

EXPERIMENTOS PRELIMINARES SOBRE O COMPORTAMENTO DE DIFERENTES CONCRETOS À EROÇÃO POR MISTURA ÁGUA-SÓLIDO

Renan de Lima Branco^{1*} & *Gianandrea Vittorio Messa*² & *Thais Monteiro Teixeira Azevedo*³ & *José Gilberto Dalfré Filho*⁴ & *Stefano Malavasi*⁵

Resumo – O Brasil detém grande potencial hídrico e a decorrente geração energética depende de um bom desempenho das hidrelétricas, que possuem estruturas de descarga, por onde escoam a água e que, eventualmente, carregam uma grande quantidade de sólidos. Assim, uma das susceptibilidades dessas estruturas é a erosão da superfície. Os custos de reparo usualmente são altos e, até mesmo, a operação da barragem pode ser comprometida. Desta forma, é imprescindível caracterizar corretamente a composição e a resistência dos concretos a serem adotados. Este trabalho ilustra os primeiros testes com uma amostra de argamassa realizada na Unicamp. Após verificação da consistência das medidas de perda de massa, a velocidade de erosão no início do teste foi estimada. O efeito dos agregados sobre a erosão foi brevemente explorado por comparação com trabalho anterior dos autores. Os dados experimentais, consistentes em termos de repetibilidade, permitiram uma clara identificação da evolução temporal da perda de massa e a estimativa da erosão no início do teste, parâmetro chave para validar as previsões numéricas.

Palavras-Chave – Erosão; superfícies hidráulicas; experimentos.

PRELIMINARY EXPERIMENTS ON THE WATER-SOLID MIXTURE EROSION BEHAVIOR OF CONCRETE MATERIALS

Abstract – Brazil owns a great hydric potential and the hydric energy generation depends on a good performance of hydroelectric powerplants, which have discharge structures, through which water flows and eventually carries a large amount of solids. Thus, one of the susceptibilities of these structures is the erosion of the surface. The repair costs are usually expensive and even the operation of the powerplant can be compromised. It is essential to correctly characterize the composition and resistance of the concretes to be used there. This work illustrates the first tests with a mortar sample performed at Unicamp. After checking the consistency of the mass loss measures, the erosion velocity at the beginning of the test was estimated. The effect of aggregates on erosion was briefly explored by comparison with a previous work by the authors. The experimental data, consistent in terms of repeatability, allowed a clear identification of the temporal evolution of the mass loss and the erosion estimation at the beginning of the test, a key parameter to validate the numerical predictions.

Keywords – Erosion; hydraulic surfaces; experiments.

INTRODUÇÃO

O Brasil detém grande potencial hídrico e a maior parcela da matriz energética do país depende de um bom desempenho das hidrelétricas. Atualmente, apesar do investimento em novas fontes de energia, como a eólica e a solar, a hidroeletricidade é responsável por 69,8% (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2016) da energia utilizada no país.

¹ Universidade Estadual de Campinas, Cidade Universitária Zeferino Vaz, 19 35212332 Campinas (Brasil), e-mail: renanl.branco@gmail.com

² Politecnico di Milano, Piazza Leonardo da Vinci, 32 20133 Milão (Itália), e-mail: gianandrea.vittorio.messa@polimi.it

³ Universidade Estadual de Campinas, Cidade Universitária Zeferino Vaz, 19 35212332 Campinas (Brasil), e-mail: thais.m.t.azevedo@gmail.com

⁴ Universidade Estadual de Campinas, Cidade Universitária Zeferino Vaz, 19 35212332 Campinas (Brasil), e-mail: dalfre@fec.unicamp.br

⁵ Politecnico di Milano, Piazza Leonardo da Vinci, 32 20133 Milão (Itália), e-mail: stefano.malavasi@polimi.it

As usinas hidrelétricas possuem estruturas de descarga, como os vertedores e as bacias de dissipação, em concreto, por onde escoam a água e que, eventualmente, carregam uma grande quantidade de sólidos. Assim, uma das susceptibilidades dessas estruturas é a 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. Desta forma, é imprescindível caracterizar corretamente a composição e, ademais, a resistência dos concretos a serem adotados nas superfícies hidráulicas.

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 dito como a desintegração progressiva do material causada por sólidos, areia, cascalho, gelo ou detritos transportados pela água (ACI Committee 210, 1993). De acordo com Liu *et al.* (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.

Muitos métodos de ensaio foram propostos para testar a resistência à erosão do concreto. Dentre estes, o método submerso, o ASTM C1138M (2012). O aparelho especificado no método consiste num tanque cilíndrico cheio de água, no fundo do qual é colocada uma amostra de concreto. Um rotor com pás verticais mantém a mistura água-sólido em rotação por meio de um motor. A parcela sólida consiste em 70 esferas de aço de com tamanho nominal entre 12,6 e 25,3 mm, responsáveis por erodir a superfície do concreto. Na Literatura, verifica-se que diversos autores usaram métodos similares para investigar a resistência relativa de diferentes concretos sob a ação erosiva como, Dalfré Filho *et al.* (2000), Horszczaruk, (2005, 2008, 2009), Yen *et al.* (2007) Kumar e Sharma, (2014) Mohebi *et al.* (2015), entre outros.

Outros autores como Liu *et al.* (2006, 2012) e Dandapat e Deb (2016) usaram jatos de mistura água-sólido, sob o qual uma amostra de concreto está exposta, sob um ângulo de inclinação do jato. O bocal retangular conduz a água com alta velocidade, com um ângulo de inclinação especificamente definidos para reproduzir o fluxo de água sobre um vertedor. A perda de massa do concreto é devida aos esforços normais e de cisalhamento, de acordo com os autores.

Os métodos descritos acima são muito úteis para comparar diferentes concretos do ponto de vista de sua resistência à erosão, mas não permitem coletar informações sobre o comportamento de um material como parte de uma estrutura real. Isto acontece não apenas porque as amostras de concreto são muito pequenas, mas também porque as condições experimentais, destinadas a acelerar o tempo de teste, diferem das encontradas em aplicações práticas. Com base nessas considerações, os autores desta contribuição iniciaram um projeto de pesquisa conjunto que objetivou propor uma nova abordagem ao teste de erosão do concreto, com base em uma sinergia entre modelação física e numérica.

Particularmente, desenvolveu-se uma versão modificada do aparelho ASTM C1138M para aproximar o mecanismo de erosão ao real (isto é, o impacto dos sedimentos usualmente carregados, ao invés das grandes esferas de aço). É conhecido (Bitter, 1963) que a erosão depende principalmente do módulo da velocidade da partícula no impacto, $|U_p|$, seu ângulo de inclinação em relação à superfície do alvo, α , (Figura 1) e as propriedades de do material abrasivo e do material erodido. Para um material quebradiço, a erosão aumenta monotonamente com o ângulo de incidência, atingindo o valor máximo para impactos normais à superfície. O novo equipamento foi 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, as 70 esferas de aço foram substituídas por partículas de areia, correspondendo a uma fração de volume estático de 1%, e a distância do rotor do impulsor, ou seja, a sua distância da amostra de concreto, foi ajustada de modo a acelerar o processo de erosão.

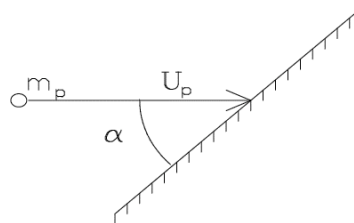


Figura 1. Esquema do impacto de uma partícula numa superfície (Malavasi *et al.*, 2013).

As simulações preliminares de fase única (Malavasi *et al.*, 2013) permitiram verificar a eficácia do novo aparelho, levando ao desenho ilustrado na Figura 2; posteriormente, foi construído um protótipo no Laboratório de Hidráulica e Mecânica dos Fluidos da Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da Unicamp. O diâmetro do tanque, T , é de 350 mm, e este valor é igual à profundidade da água acima da amostra, que está posicionada na parte inferior do tanque. A largura dos quatro anteparos laterais, igualmente espaçados, é de 35 mm ($T / 10$). O rotor possui pás inclinadas a 45° e um diâmetro igual a 175 mm ($T/2$). A aplicação de um modelo monofásico para investigar o fluxo de areia líquida em duas fases é viável apenas para valores muito baixos do número Stokes das partículas, o que nem sempre é o caso das aplicações práticas. Deste modo, desenvolveu-se uma metodologia numérica mais avançada, que envolve a utilização de um modelo Euler-Euler de duas fases e a introdução de uma função de transferência específica, ϕ , para estimar o efeito da característica dinâmica do fluido do sistema na erosão do concreto. Este método foi descrito em um artigo recentemente submetido ao *Journal of Hydrology and Hydromechanics* (Messa *et al.*, 2017), incluindo uma validação que emprega os primeiros resultados experimentais obtidos no laboratório da Unicamp.

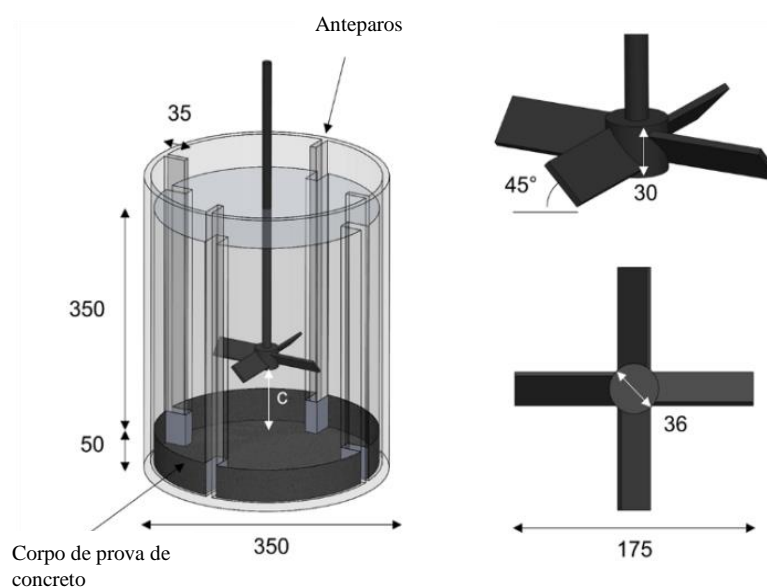


Figura 2. Detalhes do equipamento, unidades em milímetros. (Messa *et al.* 2017).

Como continuação desta pesquisa, uma nova comparação com novos dados experimentais foi planejada para melhor compreender tanto a técnica preditiva quanto o aparelho de laboratório.

Particularmente, os testes foram realizados numa amostra de argamassa, para (i) reduzir o tempo de ensaio (ii) adiar para uma fase posterior a análise da estrutura não homogênea do concreto. Depois de estender a função de transferência ϕ , definido em Messa *et al.* (2017) para coleta de previsões de erosão quantitativa em amostras de argamassa, serão realizadas experiências adicionais em concreto real, e os fatores de correção serão aplicados a ϕ de forma a ter em conta o efeito dos agregados. Finalmente, os modelos numéricos desenvolvidos serão aplicados a geometrias reais.

Um problema complexo na predição da erosão surge do efeito das mudanças de geometria causadas pela erosão na evolução do processo de desgaste. Isto é reforçado em um material não homogêneo, como o concreto, que é uma mistura de argamassa e agregados. Como resultado, a evolução da perda de massa não é linear ao longo do tempo nos experimentos, e um modelo de estado estacionário é inadequado para capturar essa tendência. No momento, as estimativas numéricas serão comparadas com a velocidade de erosão determinada experimentalmente no início do teste, quando o efeito da geometria ainda é desprezível. No futuro, serão desenvolvidos modelos numéricos para reproduzir esse efeito instável e a comparação entre argamassa e concreto permitirá estabelecer como a presença dos agregados afeta o desenvolvimento do processo de erosão.

A presente contribuição ilustra os primeiros testes com uma amostra de argamassa realizada na Unicamp. Após verificação da consistência das medidas de perda de massa, a velocidade de erosão no início do teste foi estimada partindo do princípio de que a evolução temporal da erosão segue uma lei proposta na literatura, tendo em vista a comparação futura com os resultados da simulação. Finalmente, o efeito dos agregados sobre a erosão foi brevemente explorado, por comparação, com dados anteriores, relatados em Messa *et al.* (2017).

MATERIAIS E MÉTODOS

O equipamento desenvolvido foi construído no Laboratório de Hidráulica e Mecânica dos Fluidos da Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da Unicamp, e está apresentado na foto da Figura 3.



Figura 3. Foto do equipamento construído.

Os detalhes e os parâmetros do equipamento construído são aqueles discutidos anteriormente e apresentados na Figura 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), no qual pode variar a corrente fornecida de 1,0 a 2,6 A. A rotação do rotor é expressa em termos de número de revoluções por unidade de tempo, podendo variar de 300 a 1200 rpm. A Figura 2 ainda mostra um detalhe das pás do rotor com as medidas construídas. A distância do rotor ao corpo de prova foi ajustada para 0,16 vezes o diâmetro do tanque, uma vez que este valor provou ser eficaz para atingir previsões de desgaste significativas num tempo de ensaio aceitável.

O trabalho experimental se iniciou com a separação dos materiais usados na argamassa: areia média (grãos entre 0,3 e 1,2 mm, separados por peneiramento), água, cimento CPV ARI 32. Foram também separados, limpos e untados com óleo, os moldes para confecção de corpos de prova de argamassa para testes de resistência à compressão axial e de erosão. Os moldes para compressão axial possuem dimensões ϕ 10 cm x h 20 cm e os de erosão, dimensões ϕ 30 cm x h 5 cm, seguindo o desenho do fundo do tanque. A Tabela 1 evidencia as proporções dos materiais empregados nos corpos de prova.

Tabela 1. Proporções dos materiais usados nos corpos de prova (valores em kg).

Material	Cimento CPV ARI 32	Areia Média (0,3-1,2 mm)	Água
Proporção em massa (kg)	1,72	20,16	4,54

A etapa seguinte foi a determinação da resistência à compressão axial das amostras de concreto e do módulo de elasticidade para caracterização das amostras. Os ensaios foram realizados no Laboratório de Estruturas da Unicamp, segundo a preparação sugerida na norma NBR13281/2001. Como foi empregado o concreto ARI-Alta Resistência Inicial, os ensaios à compressão axial foram realizados na máquina universal de testes aos 7 dias de idade das amostras.

Em seguida, foi dado início aos ensaios de erosão utilizando o equipamento desenvolvido. As esferas de aço foram então substituídas pelo material granular usualmente carregado pelo fluxo de água natural. A erosão será caracterizada pela perda de massa da amostra ao longo do tempo. O tempo de testes é de doze horas por amostra, sendo que a amostra é retirada e pesada a cada 2 horas. Primeiramente, a amostra de concreto é pesada usando uma balança (Toledo, modelo PRIX III Fit, faixa de 0,050-15,000 kg, precisão de 0,005 kg) e sua massa inicial é registrada (M_0). Em segundo, a amostra é posicionada na parte inferior do tanque e o espaço entre a amostra e a parede do tanque é preenchido com material selante. Na sequência, em terceiro, a água limpa é despejada no tanque até atingir o nível estático de 350 mm acima da amostra. Após, adiciona-se a parcela sólida; Areia previamente separada em peneiras, com tamanho das partículas variando entre 1,2 e 2,0 mm para produzir uma fração de volume sólido igual a 1%. A parcela sólida da mistura consiste em 950 g de partículas de areia de sílica com massa específica igual a 2650 kg/m³. Em quarto, depois de se posicionar o conjunto do motor do eixo do impulsor na altura desejada, o motor é ligado e a velocidade de rotação é ajustada. A cada 2 horas, mede-se a massa da amostra e calcula-se o decremento de massa relativa, $\Delta M/M_0$. Em seguida, repetem-se os passos dois a quatro para se evitar o acréscimo de partículas na mistura devido ao processo de erosão. Como o objetivo é comparar os resultados experimentais aos numéricos para ensaios no equipamento desenvolvido, as amostras foram propositadamente enfraquecidas para se obter os resultados num tempo de ensaio curto. Posteriormente, serão testadas amostras usuais de concreto.

RESULTADOS

Como mencionado, a caracterização mecânica da argamassa foi inicialmente calculada pela a resistência à compressão axial e, daí, derivado o seu módulo de elasticidade. A resistência à compressão apresentada pelos 12 corpos de prova submetidos a testes de compressão axial foi obtido pela média simples dos resultados individuais e é de 1,58 MPa.

O módulo de elasticidade foi então obtido com uso da Equação 1 (ABNT NBR 6118, 2003).

$$E = 5600 \times \sqrt[2]{f_{ck}} \quad (1)$$

Em que E é o módulo de elasticidade, em GPa e f_{ck} é a resistência à compressão axial. Para a resistência à compressão axial de 1,58 MPa, o módulo de elasticidade é de 7,04 GPa.

Em seguida, mediu-se a perda de massa seguindo o procedimento ilustrado na secção anterior e os resultados obtidos em duas amostras de argamassa são apresentados na Tabela 2 e apresentados graficamente na Figura 4.

Tabela 2. Perda de massa $\Delta M/M_0$ ao longo do tempo (valores em kg).

Tempo	0h	2h	4h	6h	8h	10h	12h
Corpo de Prova 1	0,000	0,093	0,250	0,344	0,393	0,454	0,529
Corpo de Prova 2	0,000	0,152	0,193	0,382	0,386	0,450	0,593
Média	0,000	0,122	0,222	0,363	0,390	0,452	0,561

Com a média dos resultados de perda de massa das amostras ao longo do tempo, pode-se traçar a tendência de erosão pela mistura água-sólido, explicitada na Figura 4 como experimental. Empregando-se a Equação 2, por meio de interpolação, pode-se encontrar os valores de $a = 10625$ h e $b = 700$, respectivamente. No gráfico ainda estão os valores para amostras de concreto de Messa *et al.* (2017), tanto os valores experimentais, quanto a interpolação pela Equação 2. É importante ressaltar que para os ensaios com concreto os intervalos de tempo de pesagem foram maiores, sendo a massa aferida a cada 6 horas até um tempo de 96 horas.

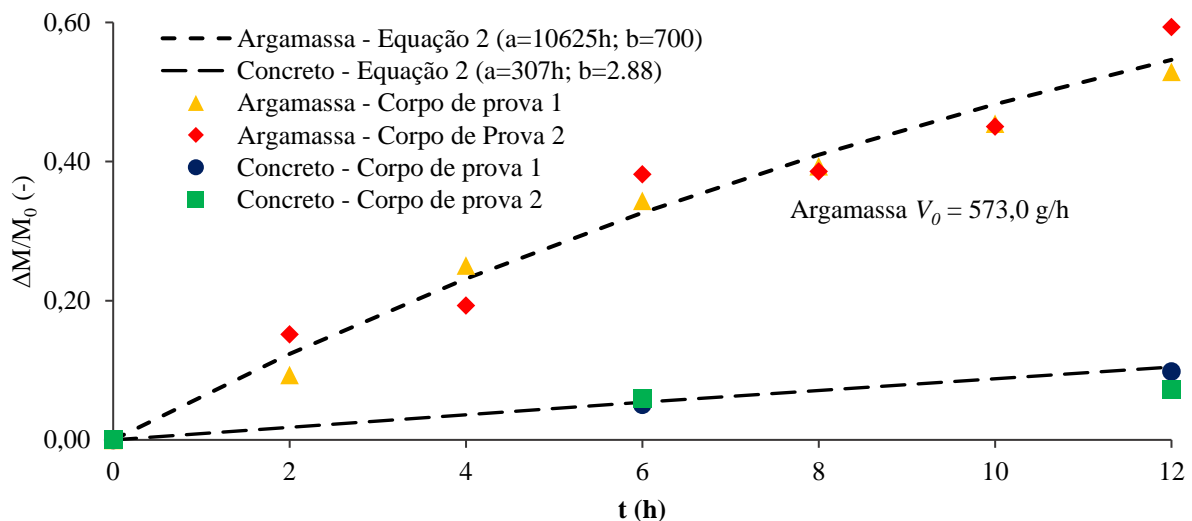


Figura 4. Variação da perda de massa de concreto ao longo do tempo durante os ensaios em laboratório.

Duas considerações podem ser feitas. Em primeiro lugar, a evolução da perda de massa da argamassa está em acordo qualitativo com os resultados de experiências anteriores em concreto utilizando diferentes aparelhos (por exemplo, Horszczaruk, 2004, 2005, 2008). Na ausência de agregados, os desvios de um comportamento linear podem ser, principalmente, consequência das mudanças de geometria auto induzidas devido à erosão. Em segundo lugar, a exigência de reprodutibilidade do experimento é amplamente satisfeita, especialmente em exposições longas à erosão.

A seguinte lei de potência tem sido usada por Horszczaruk (2005) para estimar a evolução temporal da erosão do concreto

$$\frac{\Delta M}{M_0} = 1 - \left(1 + \frac{t[h]}{a} \right)^{-b} \quad (2)$$

onde ΔM é a variação da massa no tempo de ensaio, M_0 é a massa inicial da amostra, ambas medidas em gramas; t é o tempo de teste, em horas; a [horas] e b são coeficientes, obtidos por interpolação de dados experimentais. De acordo com esta lei, a velocidade de erosão no início do teste, V [g/h] é

$$V_0 [g/h] = \left. \frac{d(\Delta M)}{dt} \right|_{t=0} = \left. \frac{d \left\{ M_0 \left[1 - \left(1 + t/a \right)^{-b} \right] \right\}}{dt} \right|_{t=0} = M_0 b \left(1 + \frac{t}{a} \right)^{-b-1} \left. \frac{1}{a} \right|_{t=0} = M_0 \frac{b}{a} \quad (3)$$

Os coeficientes $a = 10625$ h e $b = 700$ foram determinados pela interpolação com o método dos mínimos quadrados das perdas de massa correspondentes à média de ambas as séries, obtendo-se uma velocidade inicial de desgaste igual a 573 g/h. Este valor, além de outros que serão coletados no futuro para diferentes condições operacionais do aparelho, é o ponto de partida para a melhoria do método de predição da erosão numérica.

Finalmente, a curva de interpolação derivada em Messa *et al.* (2017) para um concreto com composição cimento-areia-rocha de 1-6,47-5,29 e relação água/cimento de 1,47, foi representado na Figura 4. É importante notar que para os testes de concreto os intervalos de tempo foram maiores, mas realizados sob as mesmas condições operacionais. A velocidade inicial de erosão do concreto foi de $94,3$ g/h. Isto indica que a ausência do agregado graúdo na composição das amostras reduz não só a sua resistência à compressão axial, mas também a sua resistência à erosão por impacto da mistura água-sólido. Isso foi esperado porque, como observam Dandapat e Deb (2016), os estágios iniciais de desgaste da erosão ocorrem com o enfraquecimento da interface entre as partículas de areia e a pasta de cimento, resultando na remoção da argamassa e depois na exposição dos agregados grosseiros. Como neste estudo, as amostras não apresentam agregados graúdos, o processo de erosão ocorreu mais rapidamente, em mais de cinco vezes. Este aspecto será investigado futuramente, quando serão considerados concretos com diferentes composições, especialmente, a resistência à compressão axial e o módulo de elasticidade e o agregado graúdo, uma vez que a disponibilidade geomorfológica de cada região onde as barragens são construídas, varia.

CONCLUSÃO

Tendo em vista aperfeiçoar a metodologia numérica-experimental combinada para a predição da erosão do concreto proposta em Malavasi *et al.* (2013) e Messa *et al.* (2017), foram realizados ensaios laboratoriais em amostras de argamassa. Os dados experimentais, consistentes em termos de repetibilidade, permitiram uma clara identificação da evolução temporal da perda de massa. Posteriormente, a interpolação com uma função de potência proposta na literatura (Horszczaruk, 2005) permite estimar a velocidade de erosão no início do teste, parâmetro chave para validar as previsões numéricas. Finalmente, a comparação com os dados previamente coletados sobre um concreto de baixa resistência à compressão axial permitiu preliminarmente explorar a influência dos agregados sobre a resistência à erosão.

AGRADECIMENTOS

À CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento Pessoal de Nível Superior) pelo financiamento da bolsa de mestrado na área de Recursos Hídricos, Energéticos e Ambientais da FEC – Unicamp. Bolsa nº 01-P-01879-2016.

REFERÊNCIAS

- ACI COMMITTEE 210. 210R-93: *Erosion of Concrete in Hydraulic Structures (Reapproved 2008)*. Michigan, Estados Unidos da América, 1993.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6118: *Projeto de estruturas de concreto – Procedimento*. Rio de Janeiro, 2004.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13281: *Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos — Requisitos*. Rio de Janeiro, 2005.
- ASTM C1138M-12, 2012. *Standard Test Method for Abrasion Resistance of Concrete (Underwater Method)*, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- BITTER, J.G.A. (1963). A study of erosion phenomena: Part II. *Wear* 6, pp. 169-190.
- DALFRÉ FILHO, J.G.; GENOVEZ, A.I.B.; PAULON, W.A. (2001). Desgaste nas superfícies hidráulicas e a resistência a abrasão do concreto. *Ingeniería Estructural* 8(20), pp. 18-22.
- DANDAPAT, R.; DEB, A. (2016). A probability based model for the erosive wear of concret by sediment bearing water. *Wear* 350-351, pp. 165-181.
- HORSZCZARUK, E.K., (2004). The model of abrasive wear of concrete in hydraulic structures. *Wear* 256, pp. 787-796.
- HORSZCZARUK, E.K., (2005). Abrasion resistance of high-strength concrete in hydraulic structures. *Wear*, 259, pp. 62-69.
- HORSZCZARUK, E.K., (2008). Mathematical model of abrasive wear of high performance concrete. *Wear*, 264, pp. 113-118.
- HORSZCZARUK, E.K., (2009). Hydro-abrasive erosion of high performance fiber-reinforced concrete. *Wear*, 267(1-4), pp. 110–115.
- KUMAR, R.G.B., SHARMA, U.K., (2014). Abrasion resistance of concrete containing marginal aggregates, *Construction and Building Materials*, 66, pp. 712-722.
- 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.
- LIU, Y.W, CHO, S.W., HSU, T. H., (2012). Impact abrasion of hydraulic structures concrete, *Journal of Marine Science and Technology-Japan*, 20(3), 253-258.
- MALAVASI, S.; MESSA, G.V.; 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.
- 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*.
- MOHEBI, R., BEHFARNIA, K., SHOJAEI, M., (2015). Abrasion resistance of alkali-activated slag concrete designed by Taguchi method, *Construction and Building Materials*, 98, 792-798.
- NÚCLEO DE ESTUDOS ESTRATÉGICOS DE ENERGIA/SPE/MME. *Boletim Mensal de Energia*. Junho de 2016. BRASIL.
- YEN, T.Y., HSU, T.H., LIU, Y.W., CHEN, S.H., (2007). Influence of class F fly ash on the abrasion-erosion resistance of high-strength concrete, *Constr. Build. Mater.*, 21, pp. 458-463.