DESENVOLVIMENTO DA RELAÇÃO ENTRE VISCOSIDADE E CONCENTRAÇÃO DE SEDIMENTOS EM ESCOAMENTOS HIPERCONCENTRADOS

Ana Luiza Schreiber Cordeiro, Júlio Cezar Tavares dos Santos, Leonardo Romero Monteiro

INTRODUÇÃO

As enxurradas são originadas por precipitações extremas e possuem menor extensão do que as inundações graduais, além de possuir alta capacidade de transporte de sedimentos. Quando as enxurradas ocorrem em espaços habitados pelo homem podem causar danos e podem ser intensificadas mediante às mudanças climáticas (da Silva Caldana, 2018). Além disso, comparando-se com as inundações graduais, as enxurradas se desenvolvem com um tempo menor de início e duração por conta da elevada velocidade do fenômeno e pela variação de vazão, o que gera um poder destrutivo superior (Oliveira, 2018).

Por meio de pesquisas, foi identificado uma escassez de estudos que abordem a temática de enxurradas para estudos experimentais físicos em laboratório. Um dos modelos físicos que se assemelha a temática de enxurradas é o "*Debris-flow flume at H.J. Andrews Experimental Florest, Oregon*" do Serviço Geológico dos Estados Unidos (USGS), que consiste em um canal de ensaio para realizar experimentos controlados de fluxo de detritos (Iverson, 1992). O trabalho da USGS tem como um dos objetivos gerais testar modelos existentes e desenvolver novos modelos para interpretar e prever o comportamento do fluído (Iverson, 1992). Outro exemplo de estudos que tem alguma semelhança com a temática de estudos experimentais físicos de enxurradas é o da Garcia (2003), sobre o volume de enxurrada e perda do solo em estradas florestais em condições de chuva natural. O experimento foi produzido em uma área de reflorestamento onde foram avaliados o volume total de água e a produção de sedimentos que provêm das estradas florestais.

De maneira concomitante, percebe-se que existem diversas pesquisas sobre enxurrada, mas, também se observa que há uma escassez dos seus estudos por modelos físicos realizados em laboratórios fechados e controlados. Desta forma, o presente trabalho tem como objetivo compreender as características hidrodinâmica das enxurradas, como, suas velocidades, energias e o transporte de sedimentos utilizando modelos reduzidos físico de baixo custo.

DESENVOLVIMENTO

Desde 2024 o Laboratório de Ciências das Águas da UDESC desenvolve um experimento de baixo custo, composto por um tanque acoplado a uma calha de 3 metros de comprimento (Soares, Monteiro, 2024). Ao longo dos anos alguns aperfeiçoamentos foram realizados no experimento como a criação de uma forma de regularização da saída do tanque por uma estrutura de impressão 3D (Silva, Monteiro, 2025). No presente trabalho, tem-se o uso de uma filmagem de 240 quadros por segundo, enquanto anteriormente utilizou-se filmagens de 60 quadros por segundo.

Para verificar a concordância entre os dados, foi compilado em planilha eletrônica os experimentos realizados por bolsistas anteriores que participaram do projeto de 2024 até o presente momento (2026). Assim, verificou-se a consistência das informações e identificou-se possíveis erros ou dados faltantes que foram recuperados. Em seguida, efetivou-se novas rodadas da experimentação, realizou-se nove novos experimentos. Para a experimentação utilizou-se configurações semelhantes às apresentadas em Soares e Monteiro (2024) e Silva e Monteiro (2025).

No primeiro dia, não foi adicionado nenhum componente à água, porém, nos demais dias foi adicionado corante azul para identificar a possibilidade de se ter uma visualização melhor caso a água

fosse tingida. Nos dois primeiros dias foi utilizada uma declividade de 10,78% e no último dia uma de 15,81%.

RESULTADOS

Para conseguir comparar os valores das velocidades que observamos foi usado a fórmula de Manning, utilizando para o coeficiente de rugosidade (n) o valor da tabela para canais artificiais de aço de Baptista (2014). A fórmula de Manning é válida para escoamentos permanentes, uniformes e turbulentos rugosos (Porto, 2006).

$$V = \frac{1}{n} R_h^{\frac{2}{3}} \sqrt{I_o}$$

onde V é a velocidade, R_h é o raio hidráulico, n é o coeficiente de rugosidade, I_o é a declividade do tanque (Tabela 1).

Também, analisou-se as medições em comparação com a Lei do Orifício, considerando o escoamento não permanente. Tomando-se a equação base da Leio do Orifício, podemos desenvolver a Equação Diferencial Ordinária como segue

$$Q = C_d\, A_o \sqrt{2gH} \quad \rightarrow \quad \frac{A_t dH}{dt} = Cd\, Ao \sqrt{2gH} \quad \rightarrow \quad \frac{A_t}{Cd\, Ao \sqrt{2g}} \frac{dH}{\sqrt{H}} = dt$$

onde Q é a vazão, C_d é o coeficiente de descarga, A_o é a área do orifício no fundo do tanque, A_t é a área do tanque, g é a aceleração da gravidade, t é o tempo e H é a altura de água dentro do tanque. Com esta equação, para o tanque que estamos trabalhando, podemos obter a relação

$$\frac{A_t}{Cd\, Ao \sqrt{2g}} \int_{H_0}^{H_f} \frac{dH}{\sqrt{H}} = \int_0^{t_f} dt \rightarrow H_f = \left(\sqrt{H_0} - t_f \frac{A_o C_d \sqrt{2g}}{2A_t} \right)^2$$

Assim, podemos obter a altura depois de determinado tempo de experimentação, e com esta altura descobrir a vazão utilizando a própria Lei do Orifício. O tempo utilizado foi o tempo da medição após a frente ter alcançado a região de medição mais o tempo que a água demora para sair da tubulação do tanque até chegar nesta região. Desta forma, modificou-se o Cd para que o somatório do erro relativo absoluto médio de todas as medições fosse o mínimo (Tabela 2).

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A fórmula de Manning é uma equação que utiliza um coeficiente empírico que não se baseia em princípios físicos, além de ser uma equação idealmente utilizada para representar escoamentos permanentes. Portanto, observando os resultados obtidos, deve-se questionar sobre a validade da equação nesta situação. Os resultados experimentais mais discrepantes e irreais apresentaram variações menores ao comparar aos valores que se obteve com esta fórmula.

Nota-se que com o uso da Lei do Orifício o erro médio reduziu de 137% quando consideramos o escoamento como permanente para 35,6%. Observa-se também que os valores encontrados são relativamente próximos entre si, pois a medição deste escoamento sempre ocorreu muito próximo entre aproximadamente 1,7 e 0,4 segundos do início da medição do escoamento. Isso mostra que valores muitos distintos das medições provavelmente são incoerentes e valores muito distantes da média de 13,2 m³/s considerando o desvio padrão de 7,8 m³/s podem ser desconsiderados, pois provavelmente ocorreu algum erro de medição.

A medição de enxurradas utilizando experimentos de baixo custo ainda apresentam muitos erros e nos próximos passos deve-se utilizar equipamentos com apoio de microcontroladores para auxiliar na medição.

Palavras-chave: Enxurrada; Escoamento.

ANEXOS

Tabela 1. *Cálculos com a Fórmula de Manning.*

		Manning Frente			Manning Estudo		
Responsável	Declividade (m/m)	Raio Hidráulico (m)	Velocidade (m/s)	Erro Relativo (%)	Raio Hidráulico (m)	Velocidade (m/s)	Erro Relativo (%)
Thallys	0,145	0,006	1,3	204%	0,011	1,9	58%
		0,005	1,1	181%	0,012	2,0	36%
		0,003	0,8	677%	0,013	2,1	133%
		0,007	1,4	320%	0,010	1,8	230%
		0,005	1,1	462%	0,022	3,0	42%
Maitê	0,054	0,005	0,6	823%	0,011	1,2	263%
		0,009	1,0	384%	0,014	1,3	212%
		0,010	1,1	262%	0,010	1,1	253%
		0,006	0,8	328%	0,016	1,5	227%
		0,007	0,9	245%	0,009	1,0	202%
		0,006	0,8	275%	0,015	1,4	87%
		0,009	1,0	202%	0,012	1,2	248%
		0,008	0,9	268%	0,011	1,2	159%
		0,006	0,8	200%	0,009	1,0	565%
		0,010	1,1	262%	0,016	1,5	186%
Júlio	0,108	0,010	1,6	155%	0,022	2,6	41%
		0,012	1,7	100%	0,023	2,6	17%
		0,010	1,5	130%	0,016	2,1	44%
		0,037	3,7	12%	0,037	3,7	3%
		0,009	1,4	144%	0,022	2,6	47%
		0,023	2,6	52%	0,016	2,1	92%
	0,158	0,011	1,6	144%	0,022	3,1	55%
		0,022	2,6	34%	0,013	2,2	91%
		0,027	2,9	17%	0,027	3,5	2%

Tabela 2. *Lei do Orifício.*

Responsável	Declividade (m/m)	Tempo de Medição (s)	Hf (m)	Vazão (m³/s)	Erro Relativo (%)
Thallys	0.145	1,47	0,015	0,0024	61%
		1,64	0,013	0,0023	62%
		1,29	0,016	0,0025	78%
		1,65	0,013	0,0023	80%
		1,32	0,016	0,0025	88%
Maitê	0.054	0,42	0,025	0,0031	64%
		0,77	0,021	0,0029	75%
		0,68	0,022	0,0029	61%
		0,71	0,022	0,0029	81%
		0,67	0,022	0,0029	38%
		0,69	0,022	0,0029	61%
		1,77	0,012	0,0022	77%
		0,83	0,020	0,0028	54%
		0,48	0,024	0,0030	71%
		0,57	0,023	0,0030	77%
Júlio	0.108	0,76	0,021	0,0029	83%
		0,70	0,022	0,0029	81%
		0,56	0,023	0,0030	68%
		0,50	0,024	0,0030	93%
		0,50	0,024	0,0030	83%
		0,45	0,024	0,0031	76%
	0.158	0,40	0,025	0,0031	86%
		0,56	0,023	0,0030	69%
		0,57	0,023	0,0030	86%

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BAPTISTA, Márcio Benedito et al. **Hidráulica aplicada**. 2. ed. Porto Alegre: ABRH, 2014.

DA SILVA CALDANA, Nathan Felipe et al. Ocorrências de alagamentos, enxurradas e inundações e a variabilidade pluviométrica na bacia hidrográfica do rio Iguaçu. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 23, 2018.

GARCIA, Alessandra Reis et al. Volume de enxurrada e perda de solo em estradas florestais em condições de chuva natural. **Revista Árvore**, v. 27, n. 4, p. 535-542, 2003.

IVERSON, Richard M. **Debris-flow flume at H.J. Andrews Experimental Forest, Oregon**. **U.S. Geological Survey**, 1992.

OLIVEIRA, Guilherme Garcia de et al. Caracterização espacial das áreas suscetíveis a inundações e enxurradas na Bacia Hidrográfica do Rio Taquari-Antas. **Geociências: São Paulo. São Paulo [recurso eletrônico]. Vol. 37, n. 4 (2018), p. 849-863.**, 2018.

PORTO, Rodrigo de Melo. **Hidráulica básica**. 4. ed. São Carlos: EESC-USP, 2006.

SILVA, Maitê Bresiani da; MONTEIRO, Leonardo Romero. **Estudo da concepção, dinâmica e modelagem de enxurradas e fluxos hiperconcentrados**. 2025. Trabalho apresentado como relatório de iniciação científica (PROBIC/UDESC).

SOARES, T. A.; MONTEIRO, L. R. MODELO EXPERIMENTAL SIMPLIFICADO PARA O ESTUDO DO COMPORTAMENTO DE ENXURRADAS. In: IV Encontro Nacional de Desastres, 2024, Curitiba/PR. IV END - Encontro Nacional de Desastres - ABRHidro, 2024