

## DESENVOLVIMENTO DE UMA DESCIDA DE ÁGUA MODULAR POR MEIO DE MODELO FÍSICO REDUZIDO

*DEVELOPMENT OF A MODULAR STEPPED CHUTE THROUGH REDUCED PHYSICAL  
MODEL*

**Felipe Angelo Neves CAMPERA, Jorge Luis Zegarra TARQUI, Aloysio Portugal Maia  
SALIBA, Juni CORDEIRO**

Universidade Federal de Minas Gerais. Avenida Antônio Carlos, 6627, Belo Horizonte (MG). E-mails:  
felipecamperra@hotmail.com; jlztarqui@yahoo.com.br; asaliba@ehr.ufmg.br; juni.scordeiro@gmail.com

Introdução  
Referencial teórico  
Descidas em degraus  
Bacias de dissipação  
Sistema (Modulação da Descida e Bacia de Dissipação)  
Materiais e métodos  
Instrumentação de medição  
Resultados e discussão  
Análise dimensional do módulo em estudo  
Coleta dos dados no Modelo Físico Reduzido  
Análise dos resíduos  
Considerações finais  
Referências

**RESUMO** - Estruturas hidráulicas de dissipação de energia em degraus são há muito utilizadas em obras de diferentes portes como infraestrutura urbana, drenagem rodoviária e vertedouros de usinas. Na mineração, pilhas de estéril – estruturas de disposição de materiais sem valor econômico, extraídos para liberação do minério das cavas – são aterros formados pelo método ascendente, com bancos a cada dez metros de desnível, podendo atingir, somados, até 300 m de empilhamento. As descidas de água são construídas em taludes (1V:2H) padronizados pelo projeto geométrico geotécnico, seguidos de patamares horizontais (bermas) de três a oito metros de comprimento. Há várias soluções de projeto para essas estruturas de drenagem como seção retangular revestida em concreto armado, lisas ou em degraus, geocélula preenchida em concreto em seção trapezoidal, lisas e gabiões. Propõe-se neste estudo o desenvolvimento de um equacionamento que permita, empregando um modelo físico reduzido na escala 1:10, direcionar os critérios de projeto dessas estruturas de drenagem superficial aplicadas à geometria pré-fixada. Os resultados obtidos permitiram constatar que a partir de uma formulação adequada é possível tratar o sistema formado pela descida e bacia de dissipação, otimizando-se a fase de projeto, diminuindo-se os riscos associados à erosão e criando-se balizas para economicidade de execução.

**Palavras-chave:** Drenagem superficial em pilhas de estéril. Descida de água modular. Descida em degraus. Drenagem superficial para mineração.

**ABSTRACT** - Stepped chutes have long been used in works of different sizes of urban infrastructure, road drainage, spillways, and mine drainage. Mine waste dumps are structures for the disposal of materials with no economic value, extracted to release ore exploration. These deposits are formed by the ascending method, with banks at every ten meters of unevenness, which can reach, in total, up to 300 m of stacking. Their drainage systems use stepped chutes built on slopes defined by geotechnical design (usually 1V: 2H), followed by horizontal levels (berms) from three to eight meters in length. There are several design solutions for these drainage structures: reinforced concrete, smooth or stepped rectangular section chutes; concrete filled geocell, smooth trapezoidal section chutes; gabion, smooth or stepped, rectangular or trapezoidal chutes; etc. This study proposes an equation to design criteria surface drainage structures applied to mine waste dumps geometry. The results indicated that it is possible to treat the hole system as if formed by a single stepped chute and stilling basin system, optimizing design effort, reducing associated risks with erosion, and creating beacons for economic execution.

**Keywords:** Surface drainage in waste dumps. Modular stepped chute. Stepped Chute. Surface drainage for mining.

### INTRODUÇÃO

A drenagem superficial de qualquer obra de disposição de material por empilhamento é extremamente importante para a segurança estrutural do projeto. Nesse contexto, pilhas de estéril são estruturas de disposição de materiais, sem valor econômico, extraídos para liberação do minério das cavas. São aterros construídos pelo método ascendente, com bancos a cada 10 metros de desnível que podem atingir 300 metros de

altura máxima total (United States Bureau of Reclamation - USBR, 1987).

As descidas de água são construídas nos taludes (1V:2H), uma vez que nas bermas, a cada 10 metros, ocorre um trecho plano com comprimento entre 3 e 8 metros. Diversas soluções executivas podem ser adotadas, tais como seção retangular revestida em concreto armado, lisas ou em degraus, geocélula preenchida

em concreto com seção trapezoidal, em geral lisas, gabiões, dentre outras (Osmar, 2016).

Uma questão fundamental é a dissipação de energia nas bermas. A completa perda de energia do escoamento levaria a uma profundidade muito subcrítica, fato que seria antieconômico tendo em vista que haverá um novo trecho de aceleração em sequência, ou seja, no próximo talude.

Diversas estruturas de dissipação ao final de descidas, lisas ou em degraus, foram pesquisadas e desenvolvidas ao longo dos anos, sendo dimensionadas pelo número de Froude final da descida de água. Entretanto, esse processo individualiza a solução em casos de novas quedas. Com relação aos custos, bacias de dissipação são caras e de difícil execução no

campo, principalmente no ambiente de mineração, como pilhas de estéril (Valero et al., 2018).

A figura 1 ilustra o problema sequencial das quedas. A proposta experimental da pesquisa é desenvolver um módulo, representado por uma descida em degraus aliada a uma bacia de dissipação. Dessa forma, é possível reduzir os custos da estrutura nas bermas pela diminuição da profundidade mais próxima da crítica possível. Além disso, pode-se reduzir a verificação global de todo empilhamento, que geraria uma estrutura final muito cara devido aos elevados números de Froude finais, garantindo-se, também, uma situação mais favorável à segurança, relacionadas, por exemplo, ao controle de erosão.

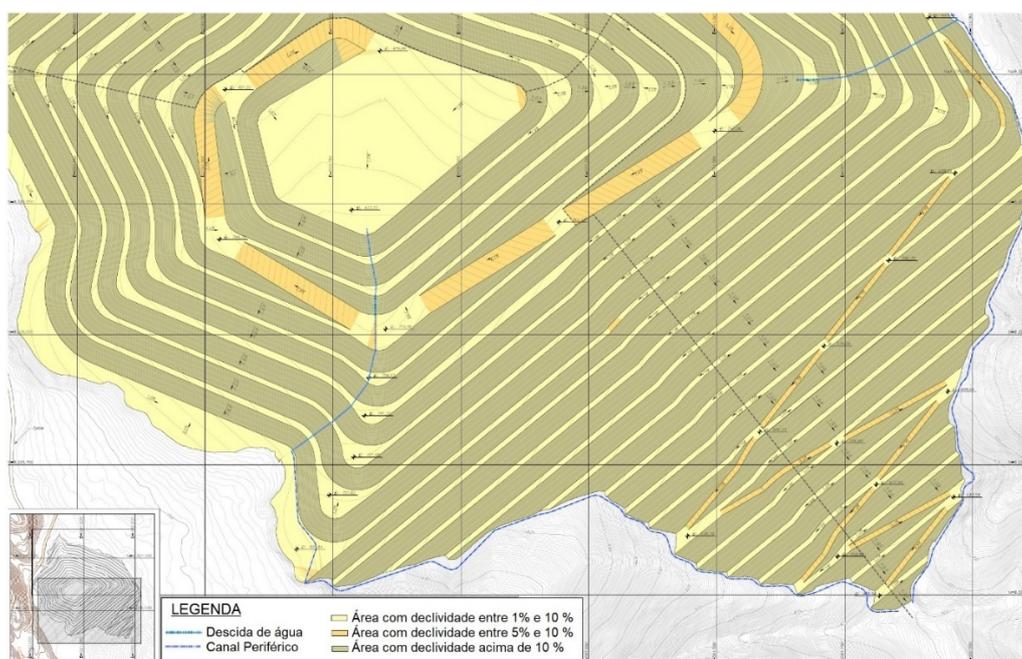


Figura 1 - Pilha de disposição de Estéril, Jacaré, Carajás, Vale. Fonte: Carvalho (2019).

## REFERENCIAL TEÓRICO

Nos três subitens seguintes é desenvolvido um breve panorama das pesquisas anteriores que fomentam a investigação do módulo proposto por este trabalho. De forma geral, trata-se do primeiro subitem sobre descidas em degraus isoladamente, seguido pelo subitem a respeito de bacias de dissipação, também isoladamente, e, por fim, do sistema modular combinado investigado por Altalib et al. (2019).

### Descidas em degraus

As descidas hidráulicas em degraus têm sido pesquisadas extensamente ao longo dos anos, principalmente com desenvolvimento de materiais tecnológicos para suas execuções. A principal diferença para os vertedouros em degraus, utilizados em obras de grande porte, é o perfil

balístico de aproximação na entrada. Muitas vezes do tipo Creager, esse dispositivo aproxima o jato de água da sua conformação natural na estrutura pronta, evitando o aparecimento do fenômeno da cavitação em alta escala na região (Dai Prá et al., 2016).

Dessa forma, as descidas em degraus não contam com um perfil na entrada, correspondendo a obras de pequeno e médio portes. Esse tipo de drenagem superficial pode ser executada em infraestrutura rodoviária, urbana e empilhamentos como no ambiente de mineração. A figura 2 apresenta dois modelos dessas estruturas em suas aplicações distintas, dependendo do porte da obra.

Segundo Chanson (2002) e Dai Prá et al. (2016) e diversas outras pesquisas anteriores sobre o tema,



**Figura 2** - Estruturas em degraus, pequeno e grande porte. (a) Descida em drenagem rodoviária, (b) Vertedouro em degraus na barragem Rio da Dona, Santo Antônio de Jesus/BA. Fonte: Conterato (2014).

os regimes de escoamento em degraus podem ser subdivididos em três conjuntos. De acordo com sentido de aumento da vazão na estrutura, pode-se constatar o regime *nappe flow*, transição ou *skimming flow*. Para critérios de dimensionamento de projeto, o último regime, com maior vazão atribuída na faixa de vazões, é utilizado para o cálculo.

Chanson (2015) discute a existência de outras três zonas no perfil de linha de água desenvolvido na descida em degraus. A primeira sem aeração, a segunda com escoamento aerado parcialmente e condição gradualmente variada e, por fim, a terceira com aeração total e escoamento uniforme com profundidade constante. Para isso é necessário o comprimento suficiente da estrutura para formação de cada uma delas.

Portanto, por se tratar de um escoamento complexo, devido ao fenômeno da aeração, o fluxo em descidas em degraus necessitou de bastante experimentação e ajustes matemáticos, buscando altas correlações nas formulações propostas por diversos autores constantes da literatura sobre o tema, com a finalidade de criar-se critérios de projeto para essas estruturas hidráulicas aplicadas à drenagem superficial. Dessa forma, como trabalho experimental, propõe-se investigar novas configurações de bacia de dissipação combinadas a uma descida em degraus padronizada pelo projeto geométrico de pilhas de estéril no ambiente de mineração.

### Bacias de dissipação

Segundo Wiest et al. (2020), a estrutura de dissipação a jusante de descidas ou vertedouros lisos ou escalonados (degraus) possui alto valor econômico. Contudo, garante maior segurança global ao projeto a fim de se evitar erosões de pé e controle da velocidade de queda para o próximo

desnível em sequência, quando houver. Diversos órgãos de pesquisa estabeleceram configurações típicas dessas bacias de dissipação para condições de entrada do fluxo bem pré-estabelecido.

A tabela 1 exhibe, de forma sucinta, as principais configurações típicas de bacias de dissipação desenvolvidas por laboratórios de pesquisas hidráulicas em todo o mundo.

### Sistema (Modulação da Descida e Bacia de Dissipação)

Como trabalho explicativo e motivador deste estudo foi escolhida uma pesquisa experimental com paramentos em degraus de diferentes inclinações, alturas e números, no sistema, e bacia de dissipação por ressalto hidráulico. O estudo foi desenvolvido no laboratório hidráulico de barragens e pesquisas de engenharia hidráulica da Universidade de Mossul. O número de degraus variou de 9, 12 e 15, relações de inclinação ( $h/l$ ) de  $1/2$ ,  $1/3$  e  $1/4$  e alturas totais dos paramentos de 36, 45 e 54 centímetros (Altalib et al., 2019).

O trabalho de Altalib et al. (2019) foi desenvolvido em um canal com vazão constante de  $55,85 \text{ L} \cdot \text{s}^{-1}$ . A figura 3 exhibe a configuração típica do sistema e as principais variáveis envolvidas no tratamento da análise dimensional.

A partir da identificação das variáveis geométricas, cinemáticas e dinâmicas envolvidas no problema, como requisito à aplicação do teorema de Buckingham, a fim de se encontrar igualdade dimensional de massa, comprimento e tempo foi possível aos autores encontrarem a dependência demonstrada na Equação 1.

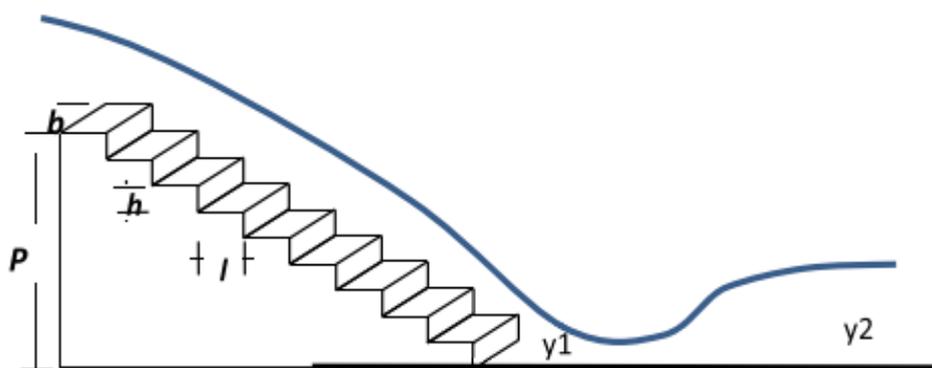
$$\Delta E = f(P, l, h, n, b, V_1, V_2, g, y_1, y_2, L^*, \mu, \rho, \gamma_c) \quad (1)$$

Na qual:  $n$  = número de degraus,  $L^*$  = comprimento do ressalto (m),  $\mu$  = viscosidade dinâmica ( $\text{kg} \cdot (\text{s} \cdot \text{m})^{-1}$ ),  $\rho$  = densidade ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ),

**Tabela 1** - Principais bacias de dissipação parametrizadas por órgãos de pesquisa. Fonte: Chanson (2015).

Instituição de Pesquisa	Bacias de Dissipação	Recomendações
Departamento de Recuperação dos Estados Unidos (USBR)	Tipo I	$1,7 < Fr < 2,5$ Sem presença de blocos, raramente recomendada devido às questões de segurança.
Departamento de Recuperação dos Estados Unidos (USBR)	Tipo II	$Fr_1 > 4,5$ $V_1 > 18 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ Barragens com altura expressiva, canais e vertedouros largos.
Departamento de Recuperação dos Estados Unidos (USBR)	Tipo III	$Fr_1 > 4,5$ $V_1 < 18,3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ $q < 18,6 \text{ m}^3 \cdot (\text{m} \cdot \text{s})^{-1}$
Departamento de Recuperação dos Estados Unidos (USBR)	Tipo IV	$2,5 < Fr < 4,5$ Ressaltos hidráulicos oscilantes e obras de médio porte.
Laboratório (SAF) Saint Anthony Falls. Universidade de Minnesota.	SAF	$1,7 < Fr < 2,5$ Jusante de pequenas estruturas hidráulicas como bueiros, tubulações e descidas ou vertedouros.
Departamento de Obras Públicas (PWB) & Estação Experimental (WES) - EUA	PWB (Public Works Department) WES (Waterways Experiment Station)	Jusante de tubos circulares com diâmetro: $450\text{mm} \leq \phi \leq 1850\text{mm}$ Estruturas de queda menor que $3 \phi$ e velocidades menores que $V < 2\sqrt{g\phi} = 6,264\phi^{0,5}$
Administração Federal de Rodovias (FHWA) – EUA	FHWA	Jusante de bueiros e canais. Recomendadas três partes com diferentes inclinações e cotas em cada uma delas.
Instituto Hidráulico de Leningrad (VNIIG)	Gunko	Bacias de dissipação compactas com bloco contínuo, dimensionado pelo Froude, e quedas menores que 40 metros. Além de $q < 80 \text{ m}^3 \cdot (\text{m} \cdot \text{s})^{-1}$
	Lyapin	Bacias de dissipação compactas com linha de blocos, dimensionada por função auxiliar, e quedas menores que 20 metros. Além de $q < 80 \text{ m}^3 \cdot (\text{m} \cdot \text{s})^{-1}$
	Kumin	Bacias de dissipação compactas com presença de alta aeração. Adequada para quedas menores que 30 metros. Além de $q < 100 \text{ m}^3 \cdot (\text{m} \cdot \text{s})^{-1}$

Legenda:  $Fr$  é o número de Froude do escoamento (adimensional),  $V$  é a velocidade na entrada da bacia de dissipação ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ),  $q$  é a vazão específica por metro ( $\text{m}^3 \cdot (\text{m} \cdot \text{s})^{-1}$ ),  $\phi$  é o diâmetro da tubulação (mm) e  $g$  é aceleração da gravidade ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ ).



**Figura 3** - Esquema de variáveis da descida em degraus e ressalto hidráulico no sistema. Fonte: Altalib et al. (2019).

Legenda:  $P$  é altura total da descida em degraus (m),  $b$  é a largura da descida (m),  $h$  e  $l$  são os espelhos e patamares dos degraus (m), respectivamente e  $y$  é a profundidade do escoamento a montante e jusante do ressalto hidráulico, respectivamente, indicadas pelo índice 1 e 2.

$V_1$  e  $V_2$  = velocidades de entrada e saída, respectivamente, do ressalto na bacia de dissipação ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ),  $y_c$  = profundidade crítica do escoamento (m) e  $\Delta E$  = variação de energia de montante menos a residual de pé (m).

A aplicação do teorema de Buckingham é finalizada com as relações adimensionais entre as variáveis elencadas. Dessa forma, a escolha apropriada das três grandezas representativas pode ser infeliz. É necessário um trabalho de tentativas

até a relação final, após igualdade dos  $\pi$  gerados. Assim, Altalib et al. (2019), através do teorema, obtiveram a Equação 2.

$$\Delta E = y_1 \varphi \left( \frac{y_1}{y_2}, \frac{P}{y_c}, \frac{L}{b}, \frac{h}{l}, n, Fr_1, Fr_2, Re \right) \quad (2)$$

Na qual:  $Fr_1$  e  $Fr_2$  correspondem aos números de Froude na entrada e saída do ressalto (adimensionais) e  $Re$  representa o número de Reynolds (adimensional).

Para todas as configurações geométricas narradas e com os dados experimentais encontrados, Altalib et al. (2019) executaram uma regressão múltipla. O número de Reynolds tem parcela de expoente praticamente desprezível, confirmando a característica do escoamento em canal aberto. A equação 3 demonstra o excelente ajuste encontrado por esses autores, com coeficiente de correlação próximo de 1 ( $R^2 = 0,998$ ).

$$\frac{\Delta E}{y_1} = \left( \frac{y_1}{y_2} \right)^{-0,488} \left( \frac{P}{y_c} \right)^{0,242} \left( \frac{L^*}{b} \right)^{0,39} \left( \frac{h}{l} \right)^{0,562} n^{-2,24} Fr_1^{2,87} Fr_2^{-2,46} \quad (3)$$

## MATERIAIS E MÉTODOS

O modelo físico reduzido de uma descida em degraus foi construído no Centro de Pesquisas Hidráulicas e Recursos Hídricos (CPH) da Universidade Federal de Minas Gerais. Trata-se de uma estrutura adaptável às faixas de inclinação e geometrias dos degraus para diferentes cenários.

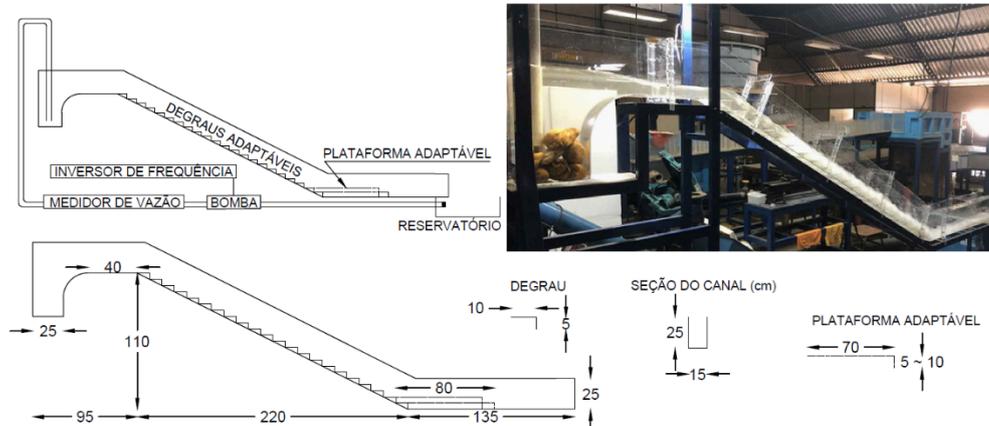
Para efeito de transposição das escalas, o modelo é adaptável para representar perfeitamente a configuração de talude e berma de um empilhamento de estéril na escala 1:10. Ou seja, no protótipo dez metros verticais e oito metros máximos da plataforma horizontal, respectivamente. Salienta-se que a escala de 1:10 atende aos critérios recomendados por Chanson (2002) que,

Dentre os diversos resultados encontrados, como uma das conclusões do trabalho, Altalib et al. (2019) encontraram a maior taxa dissipação de energia associada a menor quantidade de degraus na menor altura de queda ( $P = 36$  cm). Ou seja, na relação de carga altimétrica e macro rugosidade (degraus) a carga proporcionada pelo desnível geométrico vence. O melhor modelo, considerando-se os custos de obra, foi o modelo com menor altura total e maior inclinação, também, com maior número de degraus. Assim o comprimento do ressalto fica reduzido, diminuindo-se a estrutura de bacia de dissipação.

Altalib et al. (2019) avaliaram apenas a dissipação de energia em um sistema genérico ( $\Delta E$ ), mas não propuseram modulação para critérios de projeto padronizado. Dessa forma, o caso da drenagem superficial das pilhas de estéril foi modulado neste estudo.

para evitar distorção dos resultados por efeitos de escala, propõe limite até 1:10 para escoamentos em degraus.

O modelo físico foi confeccionado em acrílico, correspondendo a uma estrutura adaptável às faixas de inclinação e geometrias dos degraus para 1V:2H, 1V:1H e 1V:0,75H. Uma vez que o projeto padrão de uma pilha de estéril é de 1V:2H, trabalhou-se com tal declividade. A figura 4 demonstra a configuração do arranjo experimental. O tamanho do reservatório foi capaz de manter a água de recirculação por bombeamento em temperatura constante da ordem de 20 °C. Em todos os experimentos, a escala adotada foi 1:10.



**Figura 4** - Montagem experimental, esquema e dimensões em centímetros do modelo físico reduzido.

A rugosidade tratada na escala de 1:10 correspondeu a um coeficiente de rugosidade de Manning equivalente ao valor para concreto liso (0,013). Como critério conservador, a favor da

maior velocidade terminal, não foi estabelecida mudança de rugosidade do modelo. De forma geral, conforme tabela 2, ensaiou-se sete vazões como valores representativos do regime *Skimming*

*Flow*, Transição e *Napped Flow*. A faixa de vazões representativas do dimensionamento hidráulico das estruturas encontra-se no regime *Skimming flow*, iniciando-se com  $5,2 \text{ L} \cdot \text{s}^{-1}$ . Portanto, foram

adotados os dados das vazões de 5,2, 6, 7 e  $8 \text{ L} \cdot \text{s}^{-1}$ , como valores representativos para a regressão múltipla realizada no *software* R controlada pelo Excel.

**Tabela 2** - Resumo dos ensaios realizados para o Módulo

Cenários	Vazões Testadas ( $\text{L} \cdot \text{s}^{-1}$ )	Número de Ensaios - Saída	Número de Ensaios por Vazão - Saída	Número de Ensaios - Entrada	Número de Ensaios por Vazão - Entrada	Total de Ensaios
Descida em Degraus	2; 3; 4; 5,2; 6; 7; 8	189	27	63	9	252
Módulo (sistema)	5,2; 6; 7; 8	36	9	-	-	36

### Instrumentação de medição

A principal técnica utilizada para medição de velocidade e nível d'água no modelo físico reduzido foram baseadas em filmagens com alta frequência de quadros com tratamento pelo *software* Kinovea.

Além disso, o controle de vazão por medição eletromagnética e profundidade por meio de ponta

linimétrica, também foram utilizados nos ensaios físicos. A definição do correto valor de cada vazão operada foi realizada através de um medidor eletromagnético da marca *Endress-Hauser* modelo Promag (Figura 5). Assim, variando-se a frequência no inversor foi possível atender às faixas de vazões descritas na tabela 2.



**Figura 5** - Medidor de vazão da marca *Endress-Hauser* modelo Promag.

Para mensuração das grandezas descritas, utilizou-se a análise por filmagem com alta frequência de quadros, 240 quadros por segundo, uma vez que a velocidade do escoamento é alta na saída, cerca de  $2,00 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ .

A prática conta com lançamento de um flutuador em contraste de cores com a vizinhança para acompanhamento por vídeo.

Dessa forma, a partir de um referenciamento com eixos cartesianos (x, y) e definição de uma escala prévia para cada ensaio, realizou-se a aferição de distância, velocidade e posição ao longo do escoamento para as regiões de interesse.

O tratamento das filmagens foi realizado pelo

*software* Kinovea que permite exportar os dados no formato de planilha (\*.xls).

Para exemplificar o processo descrito, a figura 6 apresenta as etapas descritas para extração dos resultados no perfil de entrada do modelo físico reduzido. Uma vez que o objetivo deste trabalho consiste na mensuração de profundidades e velocidades na bacia de dissipação do modelo físico reduzido, trabalhou-se com gradeamento na resolução mínima de 1,25 centímetros nesta região. A figura 7 apresenta a rotina de extração dos dados, exemplificada pela situação da vazão de  $6,0 \text{ L} \cdot \text{s}^{-1}$ , altura ( $\Delta z$ ) = 3cm e posição do paramento em  $L=37,5\text{cm}$ .

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

### Análise dimensional do módulo em estudo

A partir do trabalho de Altalib et al. (2019), realizou-se a análise dimensional do sistema de

interesse, abarcando a descida em degraus e bacia de dissipação, ou seja, para um módulo destinado ao projeto padrão de uma pilha de estéril.

Dessa forma, com as mensurações experimentais, foi possível realizar os tratamentos estatísticos adequados para análise e sua

regressão múltipla, a fim de encontrar-se a formulação matemática de auxílio ao projeto de drenagem de um empilhamento de estéril.

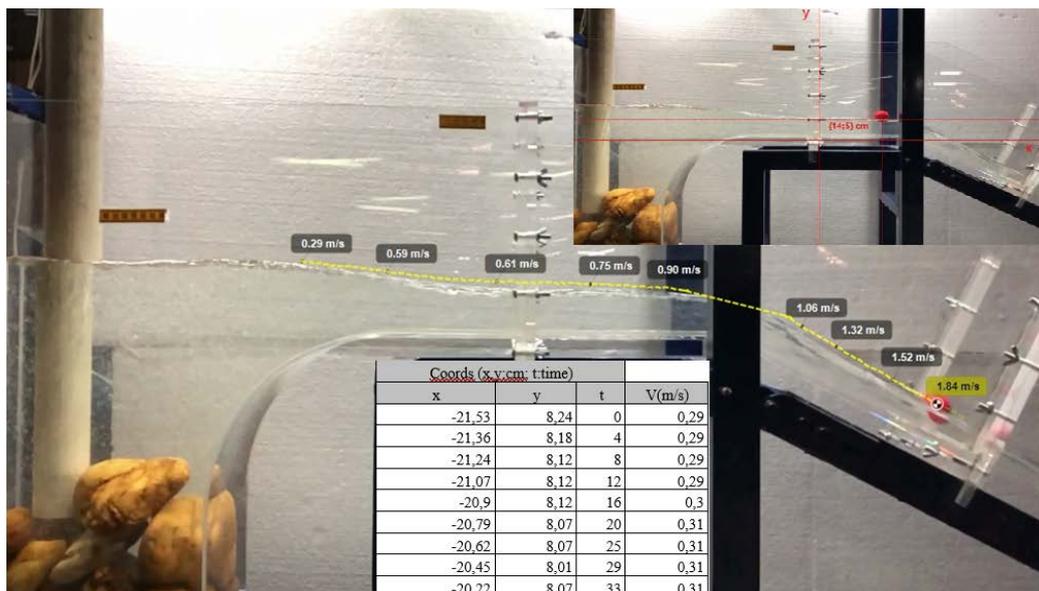


Figura 6 - Definição de um sistema cartesiano, acompanhamento do flutuador e extração dos resultados pelo Kinovea.

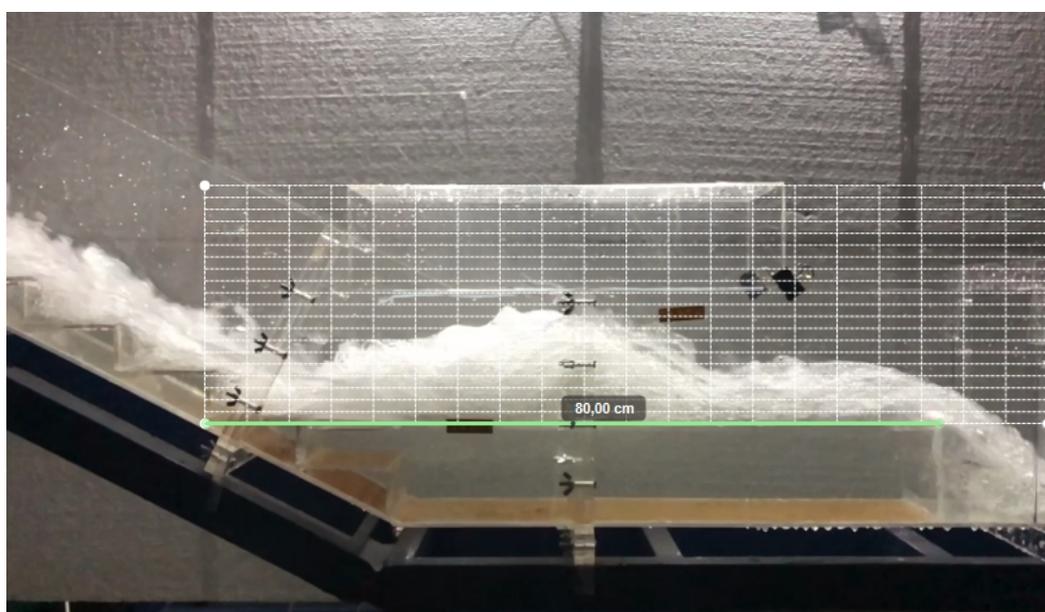


Figura 7 - Formação de um pseudo-ressalto para  $\Delta z = 3$  cm,  $L = 37,5$  cm e  $Q = 6,0$  L . s<sup>-1</sup>.

A aplicação do Teorema de Buckingham exige a identificação das variáveis de interesse, conforme figura 8 e equação 4. Salienta-se que a escolha da profundidade do escoamento ( $y_2$ ), como variável dependente, determina a dimensão de escavação máxima nas bermas das pilhas de estéril, critério ligado à economia do projeto.

$$y_2 = \text{função}(y_h, q, y_1, y_3, \Delta z, L, \mu, \rho, g) \quad (4)$$

Na qual:  $y_h$  é a profundidade de entrada no módulo (m),  $q$  é a vazão específica ( $\text{m}^3 \cdot (\text{m} \cdot \text{s})^{-1}$ ),  $y_1$  e  $y_2$  são as profundidades conjugadas do ressalto,  $y_3$  é a profundidade de

saída do sistema,  $\Delta z$  é altura da soleira (m),  $\mu$  é a viscosidade dinâmica da água ( $\text{kg} \cdot (\text{m} \cdot \text{s})^{-1}$ ),  $\rho$  é densidade da água ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ),  $g$  é a aceleração da gravidade ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ ) e  $L$  a posição de  $\Delta z$  (m).

Com a resolução do sistema para cada  $\pi$  adimensional, fixando variáveis representantes das grandezas fundamentais geométricas, cinemáticas e dinâmicas, chegou-se à expressão final da equação 5 por meio de manipulações matemáticas.

$$\frac{y_2}{y_h} = \text{função} \left( Fr_1, Fr_3, \frac{\Delta z}{y_h}, \frac{L}{y_h}, Fr_{y_h} \right) \quad (5)$$

Portanto, através de regressão múltipla pretende-se chegar aos coeficientes na forma da equação 3, que avaliou apenas a dissipação de energia no sistema e não as condições de entrada e saída que são um dos objetivos deste trabalho. Os critérios estatísticos elucidados por Naghettini et

al. (2017) foram abordados para a eliminação ou escolha de variáveis, as quais correspondem ao teste do F total da distribuição de *Snedecor*, teste do F parcial, análise dos resíduos quanto à normalidade (teste de *Shapiro-Wilk*), independência e homogeneidade das variâncias (homocedasticidade).

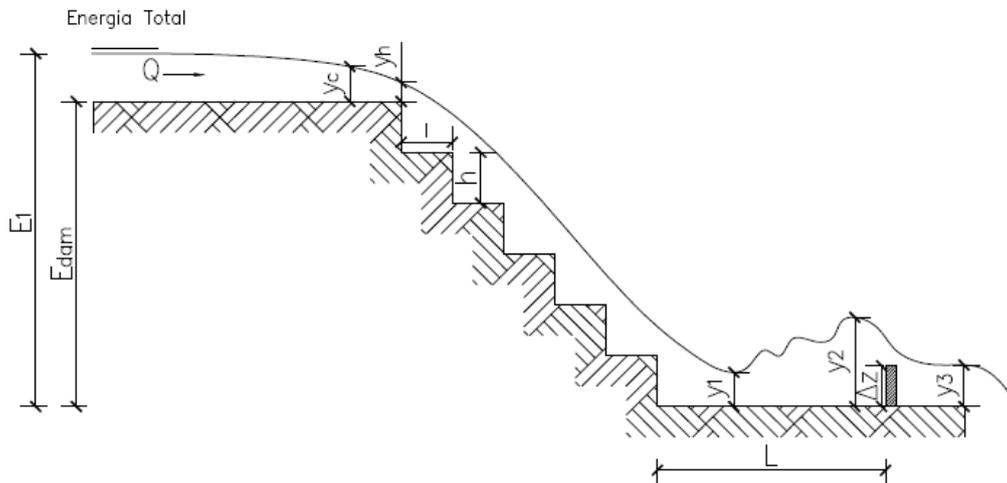


Figura 8 - Variáveis da análise dimensional proposta.

### Coleta dos dados no Modelo Físico Reduzido

Sem a montagem de blocos na bacia de dissipação, apenas para verificação dos possíveis números de Froude finais, os valores das velocidades terminais para a descida de água em degraus foram mensurados considerando as sete vazões representadas na tabela 2. Destaca-se que foi utilizada a mediana experimental de 27 medições para cada uma das vazões.

Assim, a figura 9 apresenta a distribuição dessas medições. Ressalta-se que os valores encontrados servem de referência para vazões acima de  $5,2 \text{ L} \cdot \text{s}^{-1}$ , representante do grupo de regime *skimming flow* (referente ao dimensionamento hidráulico da bacia de dissipação).

Para contextualizar os resultados encontrados das velocidades medianas experimentais, procurou-se representá-las junto aos dados experimentais de Chanson (2015). O fator de resistência de *Darcy-Weisbach* ( $f$ ) para a estrutura em degraus foi determinado como 0,17 pela mesma metodologia de cálculo do algoritmo do programa SisCCOH, desenvolvido pelo Departamento de Engenharia Hidráulica e Recursos Hídricos da Universidade Federal de Minas Gerais. Essa metodologia segue as formulações de Ohtsu et al. (2004). Portanto, assim como indicado na figura 10, nota-se que os valores experimentais obtidos nessa pesquisa podem ser considerados aceitáveis quando comparados àqueles disponíveis na literatura.

### Velocidades Terminais Experimentais - Descida em Degraus

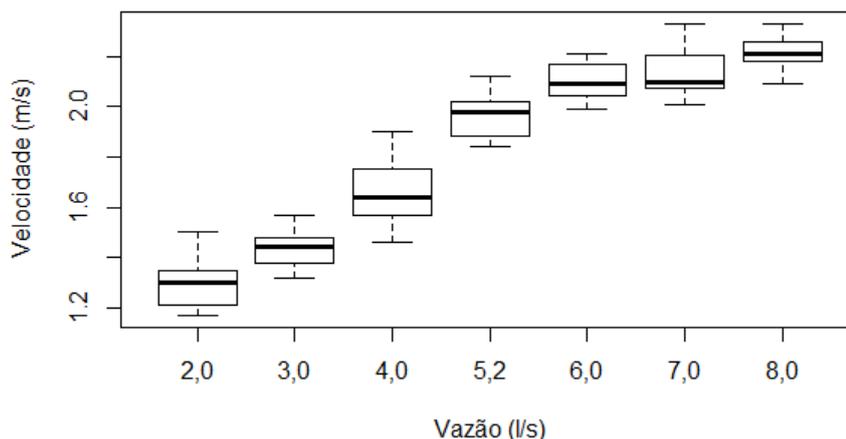


Figura 9 - Distribuição das velocidades terminais experimentais por vazão.

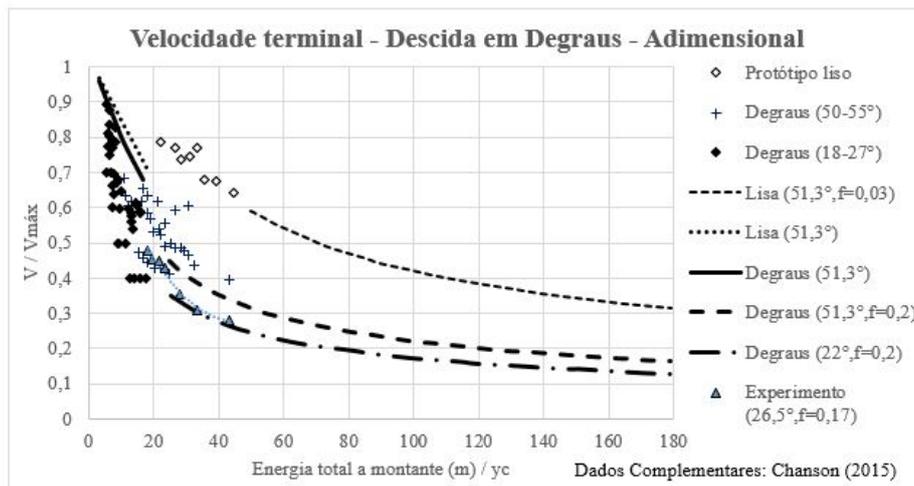


Figura 10 - Curvas adimensionais para velocidade terminal - Experimento e literatura.

Em relação à montagem da bacia de dissipação para estudo do módulo padronizado para projeto, os resultados preliminares demonstraram a existência do fenômeno do *Weir Flow*, uma condição subcrítica abaixo da relação de  $\Delta z$  crítico descrita por Hager (1992) e demonstrada por Conterato (2014).

Como as equações da hidráulica clássica restringem-se aos fluxos não altamente aerados, determinou-se a faixa de trabalho na bacia. Assim, pelas equações limitantes do fenômeno, uma vez que as flutuações de pressão podem levar ao desgaste do concreto, trabalhou-se com soleiras de 2, 3 e 4 centímetros de altura para

posições de 25, 35 e 50 centímetros na berma em escala (1:10).

Dessa forma, o domínio de ensaios foi restrito às condições preconizadas pela literatura. Assim, as alturas dos blocos e distâncias na berma foram determinadas pelos critérios de Hager (1992), demonstrados por Conterato (2014). Com efeito apenas ilustrativo do fenômeno do *Weir Flow*, a figura 11 apresenta a situação indesejável para altura de  $\Delta z = 7,5$  centímetros, acima da faixa de trabalho do estudo. Esse fenômeno foi evitado, procurando-se situações próximas de um pseudoressalto hidráulico, como foi apresentado na figura 7.



Figura 11 - Fenômeno do *Weir Flow*,  $\Delta z = 7,5$  cm,  $L=50,0$  cm e  $Q=8,0 L \cdot s^{-1}$ .

### Regressão múltipla e proposição de equação para o módulo

Visando-se a adequação dos dados medidos no modelo físico reduzido a partir do resultado da análise dimensional realizada neste trabalho, com final na equação 5, foi realizada a mesma

adaptação como da equação 3 do trabalho de Altalib et al. (2019).

Trabalhou-se com os *softwares* Excel e R para melhor controle dos resultados. A regressão linear múltipla, iniciou-se pela linearização por logaritmos neperianos na forma da equação 6

com resultados na tabela 3.

$$\ln \frac{y_2}{y_h} = \text{interseção} x \left( \ln Fr_1^{a1} \ln Fr_3^{a2} \ln \left( \frac{\Delta z}{y_h} \right)^{a3} \ln \left( \frac{L}{y_h} \right)^{a4} \ln Fr_{y_h}^{a5} \right) \quad (6)$$

Para conferência dos resultados do ajuste, o trabalho de Naghettini et al. (2017) foi utilizado como balizador das decisões seguintes. De acordo com os autores, o teste da significância da Equação de Regressão Linear Múltipla deve ser verificado “globalmente” pelo “teste do F total”.

O valor gerado foi de 10,91, sendo  $F(0,05;5;30) = 2,53$ , ou seja, ao nível de significância de 5% com 5 variáveis independentes e 30 graus de liberdade, a distribuição F de *Snedecor* retorna o valor de 2,53.

Como o valor de 10,91 é maior que 2,53, rejeita-se a hipótese nula (a relação entre as variáveis não é linear), portanto, existe regressão.

Para conferência individual da participação de cada variável isoladamente, conforme indicado por Naghettini et al. (2017), o “teste do F parcial” mostrou que  $\frac{L}{y_h}$  e  $Fr_{y_h}$  tem participação

preponderante no valor de  $y_2/y_h$ . Dessa forma, com nível de significância de 5% (0,05) é possível verificar que o valor-p é superior em todos os casos, menos para a4 e a5, assim, aceita-se a hipótese nula nesses casos (a variável isolada não melhora significativamente o modelo).

Esse teste não é determinístico como “teste do F total”, que traduziu a existência da regressão. Assim, o resultado é aceitável, principalmente devido à discussão dos resíduos pelo subitem seguinte.

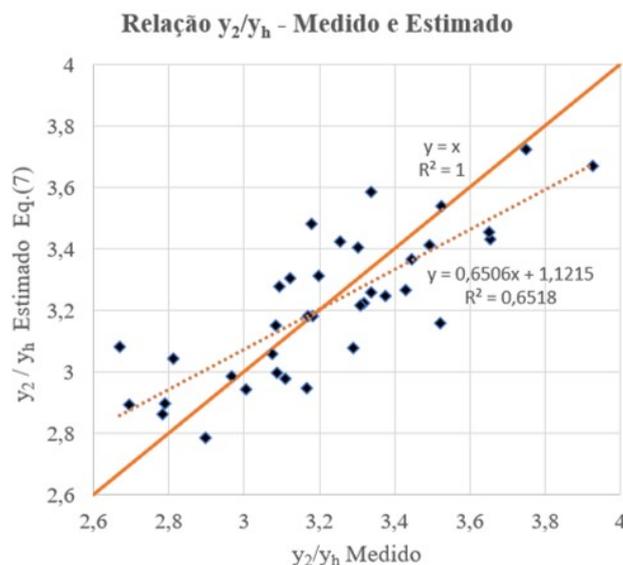
Por fim, a equação 7 conclui o ajuste alcançado a partir da mensuração das variáveis de interesse nos cenários de vazões, posições e alturas dos blocos descritos neste trabalho.

$$\frac{y_2}{y_h} = 0,3556 \left( Fr_1^{0,228} Fr_3^{-0,080} \frac{\Delta z}{y_h}^{-0,05} \frac{L}{y_h}^{-0,220} Fr_{y_h}^{4,766} \right) \quad (7)$$

A figura 12 exibe a configuração das medidas experimentais e estimadas pela Equação 7, para a qual obteve-se coeficiente de correlação,  $R^2$ , correspondendo a 0,65.

**Tabela 3** - Resumo da estatística de regressão ( $y_2/y_H$ ) – Gerado no programa R

	Estimado	Erro	Padrão	Valor t Pr(> t )
<b>Interseção</b>	-1,0034	0,42339	-2,442	0,02071 *
<b>a1</b>	0,22818	0,16625	1,373	0,18007
<b>a2</b>	-0,08071	0,20869	-0,387	0,70168
<b>a3</b>	-0,04984	0,04495	-1,109	0,2763
<b>a4</b>	-0,22079	0,06287	-3,512	0,00143 **
<b>a5</b>	4,76696	0,73695	6,469	$3,79 \times 10^{-7}$ ***
<b>Significância: 0 "****" 0,001"***" 0,01 "****" 0,05 " " 0,1 " " 1</b>				
<b>Erro residual padrão 0,05885 em 30 graus de liberdade</b>				
<b>R quadrado múltiplo: 0,6453, R quadrado ajustado 0,5861</b>				
<b>Estatística-F: 10,91 em 5 e 30 GL, p-valor <math>4,764 \times 10^{-6}</math></b>				



**Figura 12** - Relação entre Medido e Estimado ( $y_2/y_h$ ).

### Análise dos resíduos

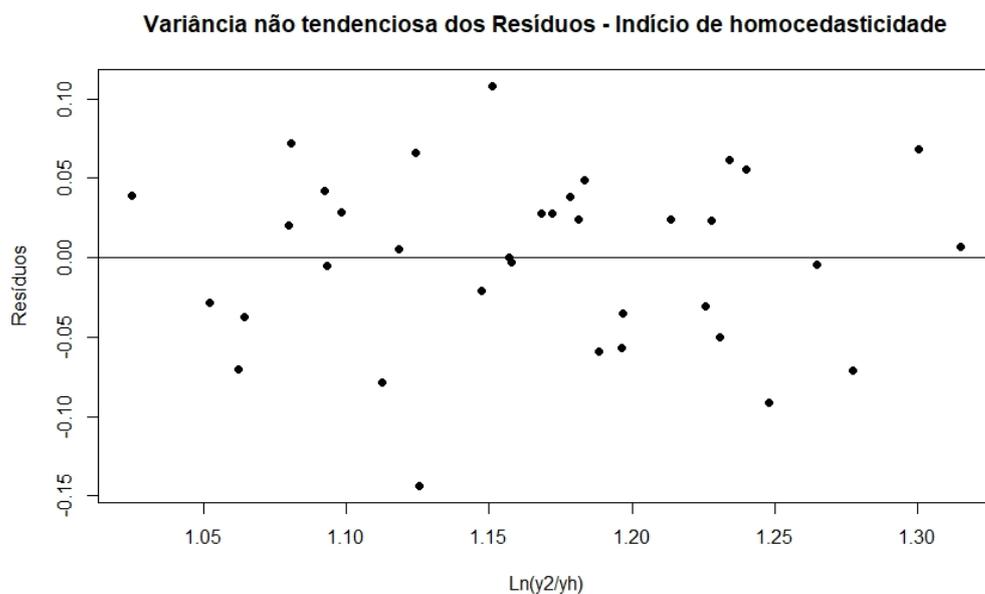
A partir das discussões de Naghettini et al. (2017) sobre os enquadramentos corretos dos resíduos da regressão linear múltipla, traçou-se os caminhos da análise deste subitem. Os autores narram a necessidade de três condições fundamentais aos resíduos: normalidade, independência e homogeneidade das variâncias.

A condição de independência foi garantida pela forma de extração dos resultados em cada ensaio isolado por 36 vezes, como narra Naghettini et al. (2017), conforme foram executadas três posições do paramento (L), para três alturas diferentes ( $\Delta z$ ) e 4 vazões de dimensionamento do regime *skimming flow*, em dias alternados, totalizando os 36 ensaios referidos.

Para verificação da normalidade dos resíduos,

executou-se o teste de *Shapiro-Wilk* no programa R. A estatística de teste foi de  $W=0,95954$  e valor- $p=0,2081$ . Como o nível de significância adotado foi de 5% (0,05), menor que o valor- $p$  gerado, a hipótese nula não é rejeitada, ou seja, condição suficiente que sustenta a afirmação de que os resíduos têm distribuição normal.

Por fim, para garantir a homogeneidade das variâncias (homocedasticidade), tentou-se encontrar alguma tendência no gráfico recomendado por Naghettini et al. (2017). Por isso, conforme constatou-se que os pontos estão aleatoriamente distribuídos em torno do zero, sem nenhum comportamento ou tendência, há indícios de que a variância dos resíduos é homocedástica (Figura 13). Ressalta-se que a presença de "funil" seria um indicativo da presença de heterocedasticidade.



**Figura 13** - Variância dos resíduos  $\ln(y_2/y_h)$ .

### CONSIDERAÇÕES FINAIS

Para o experimento desenvolvido, aplicado à modulação para drenagem superficial de uma pilha de estéril constituída de uma descida de água em degraus e bacia de dissipação, os dados experimentais foram extraídos por meio de um modelo físico reduzido na escala 1:10.

A faixa de trabalho foi determinada, inicialmente, pela constatação do fenômeno de escoamento tipo *Weir Flow*. Nesse sentido, o domínio das alturas das soleiras foi reduzido para 4, 3 e 2 centímetros, considerando, principalmente, a eficiência de dissipação de energia da descida em degraus frente à energia disponível a montante. As posições analisadas do bloco (L) na bacia dissipação foram de 25, 37,5 e 50

centímetros, a fim de evitar-se o salto do escoamento na próxima descida em sequência para uma pilha de estéril.

As vazões testadas foram representantes do dimensionamento hidráulico de descidas de água em degraus, ou seja, regime *skimming flow*, com valores de 5,2, 6, 7 e 8  $L \cdot s^{-1}$ .

Os resultados demonstraram uma padronização do comportamento pela Equação 7, referente à regressão múltipla. Os valores para relação de  $\frac{y_3}{y_H}$  – entrada e saída do sistema – flutuaram próximo à unidade, ou seja, para faixa de vazões ensaiada do regime *skimming flow* e geometrias adotadas, o sistema funcionará

sempre próximo da condição hidráulica de entrada e saída iguais.

Dessa forma, controlando as condições de velocidade e profundidade em apenas uma queda sequencial, evita-se processos erosivos demasiados e desgaste da estrutura, além de atender os critérios de economicidade pela menor escavação nas bermas (conferida pelo adimensional  $\frac{y_2}{y_h}$ ). Do ponto de vista do rigor estatístico,

os resíduos da regressão tiveram distribuição normal, independência e homogeneidade das variâncias. Porém, apesar da distribuição F de *Snedecor*, pelo teste do F total, indicar a existência de regressão, a participação isolada de cada variável não foi atendida para todas aquelas elencadas na análise dimensional. Assim, investigações com geometrias e vazões diferentes poderão ser testadas.

## REFERÊNCIAS

- ALTALIB, A.N.; MOHAMMED, A.Y.; HAYAWI, H.A. Hydraulic jump and energy dissipation downstream stepped weir. **Flow Measurement and Instrumentation**, v. 69, n. July, p. 1–7, 2019.
- CARVALHO, A.D. **Pilha de Disposição de Estéril, Jacaré, Carajás, VALE**. Disp. em: <<http://acdesenhos.com.br/projetos/>>. Acessado em: 15dez2019.
- CHANSON, H. **Energy dissipation in hydraulic structures**. 1. ed. Boca Raton, FL United States: CRC Press, 2015.
- CHANSON, H. **The hydraulics of stepped chutes and spillways**. 1. ed. Lisse, The Netherlands: Balkema, 2002.
- CONTERATO, E. **Determinação de Critérios de Dimensionamento de Soleira Terminal em Bacia de Dissipação a Jusante de Vertedouro em Degraus**. Porto Alegre, 2014. 156 p. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- DAI PRÁ, M.; PRIEBE, P.S.; SANAGIOTTO, D. G.; MARQUES, M.G. Dissipação de energia do escoamento deslizante sobre turbilhões em vertedouros em degraus de declividade 1V:1H. **Ingeniería del agua**, v. 20, n. 1, p. 1, 2016.
- HAGER, W.H. **Energy dissipators and hydraulic jump**. 1. ed. Zurich, Switzerland: Springer-Science+Business Media, B.V., 1992.
- NAGHETTINI, M.; PINTO, E.J.A.; COSTA, V.; FERNANDES, W.; SILVA, A.T. **Fundamentals of statistical hydrology**. 1. ed. Switzerland: Springer, 2017.
- OHTSU, I.; YASUDA, Y.; TAKAHASHI, M. Flow characteristics of skimming flows in stepped channels. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 130, n. 9, p. 860–869, 2004.
- OSMAR, F.M. **Análise de esforços sobre vertedouros em degraus de declividade 1V:0,75H**. Porto Alegre. 2016. 84 p.. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- USBR. UNITED STATES DEPARTMENT OF THE INTERIOR BUREAU OF RECLAMATION. **Design of Small Dams**. 3. ed. Washington: Water Resources Technical Publication, 1987.
- VALERO, D.; BUNG, D. B.; CROOKSTON, B. M. Energy dissipation of a Type III basin under design and adverse conditions for stepped and smooth spillways. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 144, n. 7, 2018.
- WIEST, R.A.; STEINKE, J.R.; TEIXEIRA, E.D.; PRÁ, M.D.; SALIBA, A.P.M.; MARQUES, M.G. Start position of a sloping hydraulic jump. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 25, n. 19, p. 1–9, 2020.

*Submetido em 14 de outubro de 2020  
Aceito para publicação em 15 de setembro de 2021*