

## DECLIVIDADE DOS TALUDES DE FOSSAS DE EROSÃO FORMADAS A JUSANTE DE VERTEDOUROS SALTO ESQUI: UHE LUIS CARLOS BARRETO DE CARVALHO

*João Gerdau de Borja*<sup>1\*</sup>, *Cassius Palauro*<sup>2</sup>, *Luciano Faustino da Silva*<sup>3</sup>,  
*Marcelo Giulian Marques*<sup>4</sup> & *Alba Valéria Brandão Canellas*<sup>5</sup>

**Resumo** – As barragens são obras de engenharia com a função de reter o escoamento de um curso hídrico a fim de acumular energia potencial e utilizá-la para diversos fins, como geração de energia elétrica e irrigação. Eventualmente, em época de cheia dos rios, esta energia potencial acumulada deve ser vertida com segurança. No caso de vertedouros salto esquí, presentes em diversas barragens brasileiras, a força do jato lançado gera uma fossa de erosão a jusante desta estrutura. Dependendo do progresso da fossa, a estrutura pode entrar em risco, necessitando de ações mitigadoras. Este trabalho tem como intuito subsidiar problemas correntes em fossas de erosão a jusante de vertedouros salto esquí, bem como fornecer auxílio na segurança de novos projetos, ajudando a reduzir custos. Com o monitoramento da geometria da fossa de erosão, através de levantamentos batimétricos, é possível diagnosticar a evolução dos processos erosivos em seus taludes. Para isso, foram aplicadas ferramentas utilizadas em geoprocessamento nos levantamentos batimétricos realizados a jusante da UHE LCBC – Furnas, nos anos de 1982, 1984 e 1988. Os estudos foram realizados no IPH/UFRGS, com auxílio do LAHE/Furnas.

**Palavras-Chave** – vertedouro salto esquí, fossa de erosão, ferramentas SIG.

## SLOPES OF A SCOUR HOLE GENERATED DOWNSTREAM SKI-JUMP SPILLWAYS: LUIS CARLOS BARRETO DE CARVALHO DAM

**Abstract** – Dams are engineering works with the function of retaining the flow of a water course in order to accumulate potential energy and use it for various purposes such as power generation and irrigation. Eventually, in rivers flood seasons, the accumulated potential energy must be poured safely. In the case of ski-jump spillways, present in many Brazilian dams, the power of the jet launched generates a scour hole downstream of this structure. Depending on the progress of the scour hole, the structure may enter into risk requiring mitigation actions. This work has as purpose subsidize current problems in scour holes downstream of ski-jump spillways, as well as providing assistance in the safety of new projects, helping to reduce costs. By monitoring the geometry of the scour hole through bathymetric surveys, it is possible to diagnose the evolution of the erosive processes on their slopes. For this, it was applied geoprocessing tools in the bathymetric surveys carried downstream LCBC Dam – Furnas in the years of 1982, 1984 and 1988. The studies were performed in IPH/UFRGS with the assistance of LAHE/Furnas.

**Keywords** – Ski-jump spillway, scour hole, GIS tools.

---

<sup>1</sup> IPH/UFRGS, Porto Alegre – RS, Brasil; e-mail: joao\_gerdaudeborja@hotmail.com.

\* Autor Correspondente.

<sup>2</sup> LAHE/Furnas, Rio de Janeiro – RJ, Brasil; e-mail: cassiuspalauro@gmail.com.

<sup>3</sup> IPH/UFRGS, Porto Alegre – RS, Brasil; e-mail: luciano Faustino@gmail.com.

<sup>4</sup> IPH/UFRGS, Porto Alegre – RS, Brasil; e-mail: mmarques@iph.ufrgs.br.

<sup>5</sup> LAHE/Furnas, Rio de Janeiro – RJ, Brasil; e-mail: alba.canellas@gmail.com.

## INTRODUÇÃO

As usinas hidrelétricas ocupam uma posição de destaque na composição da matriz energética brasileira, em vista do grande potencial hidroenergético dos rios do país. Na composição desse tipo de empreendimento, as barragens notabilizam-se por serem estruturas de grande porte que, devido à sua gênese e magnitude, representam obras que envolvem custos elevados e riscos significativos. Em vista disso, é importante salientar o desenvolvimento ao longo dos anos de dispositivos de segurança que viabilizam a operação segura dessas estruturas.

O vertedouro é uma estrutura de segurança existente em barragens, que tem o objetivo de permitir a passagem de cheias que ocorrem periodicamente nos rios. O vertedouro tipo salto esqui (Figura 1), caso de estudo do presente trabalho, pode ser uma alternativa muito econômica, pois a energia do jato lançado é dissipada em uma fossa de erosão, a qual é desprovida de revestimento.

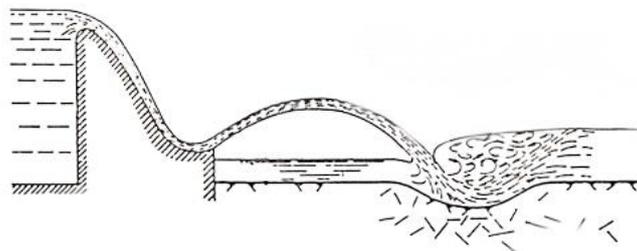


Figura 1 – Representação esquemática de um vertedouro com salto de esqui e fossa de erosão a jusante, conforme Yuditskii (1983) e Magela (1996).

O dimensionamento da geometria do vertedouro salto esqui, como o ângulo de lançamento e o raio da concha, está bem equacionado (Vischer, 1995 e Brighetti, 2004). Entretanto, cada caso deve ser analisado em função das características de onde será implantada a obra e do arranjo da mesma.

As condições topográficas devem favorecer o lançamento do jato para longe da estrutura, em virtude das correntes de retorno que podem causar erosões regressivas em direção ao pé do barramento. Além disso, a geologia presente no leito da fossa deve ter resistência significativa a fim de conter a evolução dos processos erosivos. Dependendo do progresso da fossa, a estrutura pode entrar em risco, necessitando de ações mitigadoras.

Este trabalho visa à análise das inclinações dos taludes da UHE Luis Carlos Barreto de Carvalho (UHE LCBC/Furnas) comparativamente com a bibliografia existente e, com isso, reduzir a incerteza de futuros projetos de fossas pré-escavadas. O monitoramento da geometria da fossa, como realizado, também visa auxiliar em problemas correntes, pois denuncia zonas no entorno de fossas onde a erosão está progredindo. O detalhamento realizado neste trabalho, conta com ferramentas utilizadas em geoprocessamento, ou Sistema de Informação Geográfica (SIG), as quais foram usadas em levantamentos batimétricos realizados no protótipo.

Este trabalho é um dos produtos do projeto de Pesquisa e Desenvolvimento “Análise dos Processos Físicos Envolvidos na Formação de Fossas de Erosão em Leito Coesivo a Jusante de Salto de Esqui”, firmado entre FURNAS, através do seu Laboratório de Hidráulica Experimental (LAHE/FURNAS), com o apoio da Universidade Federal do Rio Grande do Sul através do Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH/ UFRGS).

## METODOLOGIA E RESULTADOS

Este trabalho é baseado nos levantamentos batimétricos realizados a jusante do vertedouro da UHE LCBC/Furnas, localizada em Pedregulho, São Paulo (Figura 2), operada por FURNAS. Até o momento dos presentes resultados, a operação do vertedouro salto esqui tinha obtido uma vazão vertida de até 4.000m<sup>3</sup>/s com ângulo de lançamento do vertedouro de 35 graus.



Figura2 – Condições de contorno da fossa de erosão (Manso *et al.* 2007).

Através do *software* Idrisi, foram importadas as batimetrias dos anos de 1982, 1984 e 1988, obtendo-se as superfícies MDE (modelo digital de elevação). A batimetria de 1994 pode ser vista na Figura 3. Com os arquivos *raster* criados, fez-se o perfil característico da fossa de cada um dos anos em que foram realizadas as batimetrias (Figura 4).

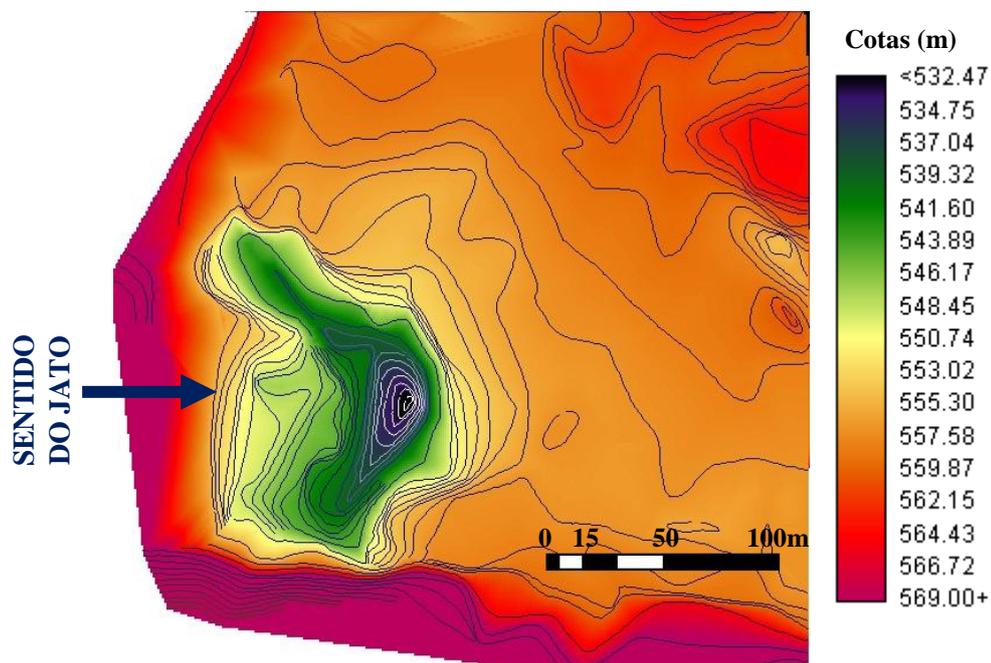


Figura 3 – Cotas interpoladas do terreno (em metros) referentes ao levantamento batimétrico realizado no ano de 1984.

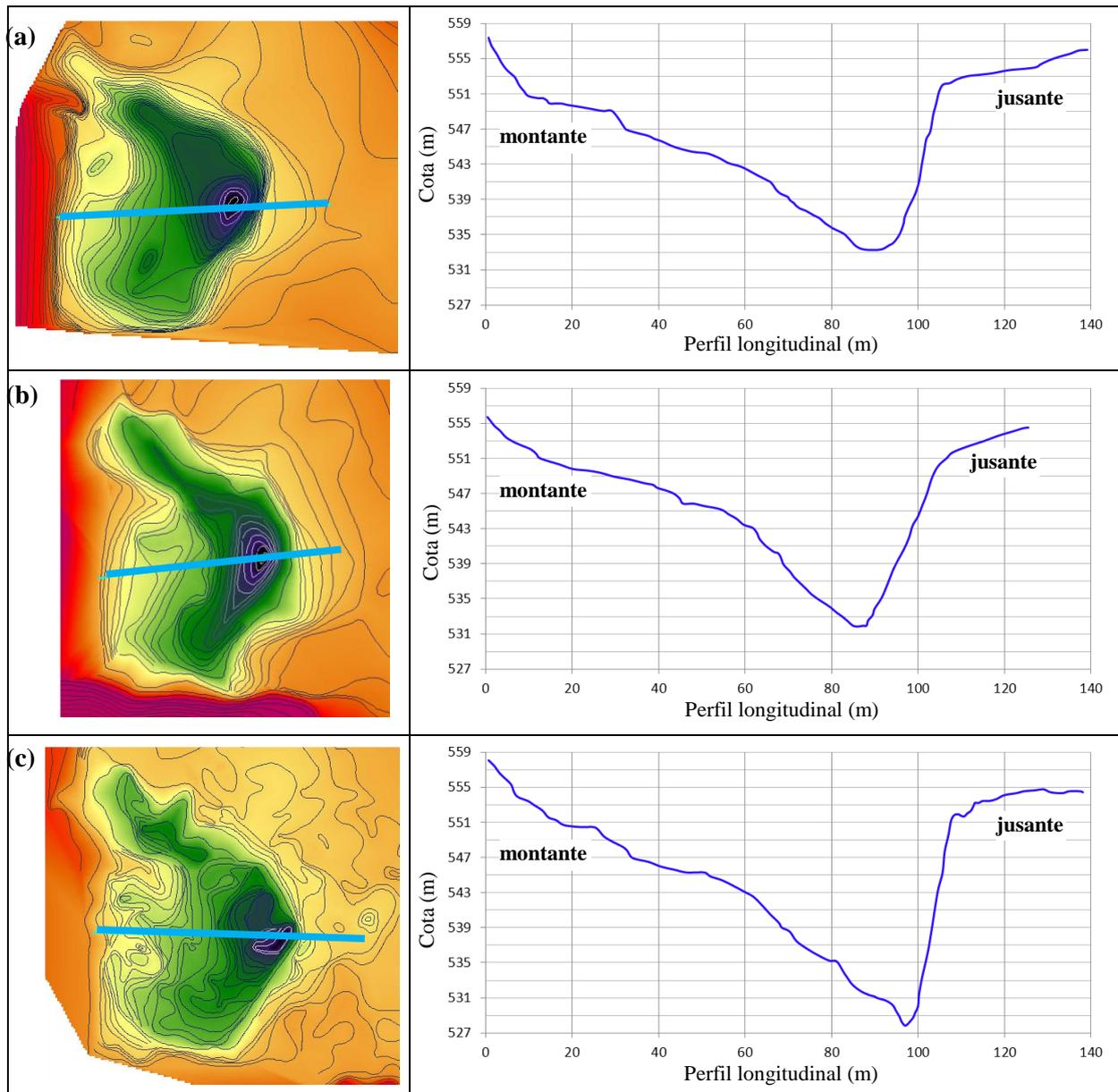


Figura 4 – perfis característicos da fossa para os anos de: (a) 1982; (b) 1984 e (c) 1988.

A fossa de erosão é delimitada pela estrutura do vertedouro a montante, e pela barra que se forma a jusante. A extensão total da fossa é definida pela área erodida em que a cota fica menor do que 555,00m, pois esta é a cota do leito do rio a jusante do barramento.

Como pode ser observado nos perfis característicos anteriores (Figura 4), a borda da fossa se estende até a cota 551,00m, isto é, a partir desta cota, se dá a abertura efetiva da fossa, sendo alterados os ângulos dos taludes efetivos de montante e de jusante em relação às inclinações da borda. Sendo assim, a superfície em planta da fossa pode ser dividida em quatro áreas, as quais podem ser vistas em seguida (Figura 5):

- a) borda de montante da fossa (551,00, < cota < 555,00m);
- b) borda de jusante da fossa (551,00, < cota < 555,00m);
- c) talude de montante da fossa (551,00, < cota < 555,00m);
- d) talude de jusante da fossa (551,00, < cota < 555,00m).

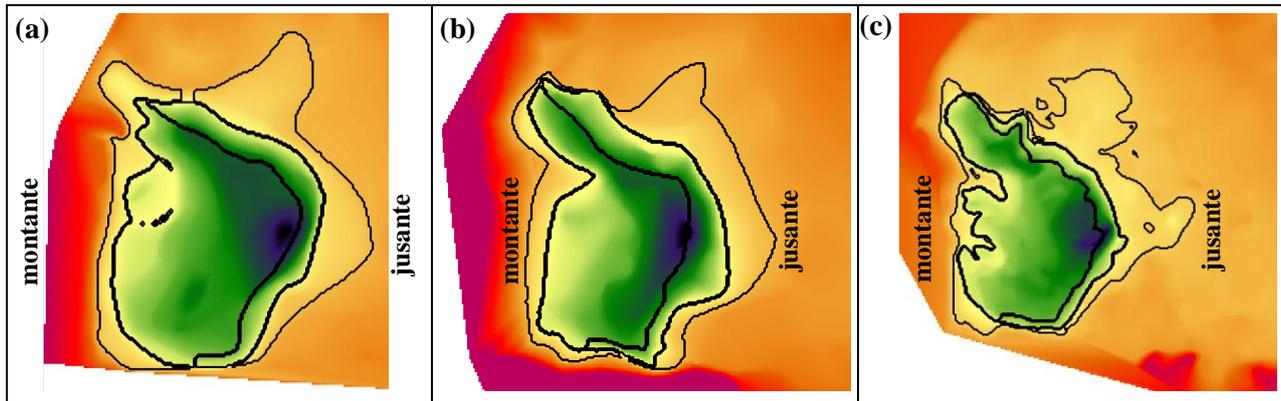


Figura 5 – Áreas das bordas e dos taludes efetivos de montante e jusante da fossa de erosão para os anos de: (a) 1982, (b) 1984 e (c) 1988.

## ANÁLISE E DISCUSSÃO

A inclinação das bordas da fossa e a inclinação efetiva dos taludes da fossa foram interpoladas através do comando *slope* do *software* Idrisi, conforme a separação de áreas fornecida anteriormente (montante e jusante). Com isso, foi possível determinar as distribuições estatísticas de inclinação dos taludes (Figura 6 e 7) para os anos de 1982, 1984 e 1988. Cada valor (*n*) da amostra é determinado pelas superfícies *raster* criadas, correspondendo a um quadrado de área 1m por 1m. A área total (em m<sup>2</sup>) da amostra é dada por *N*.

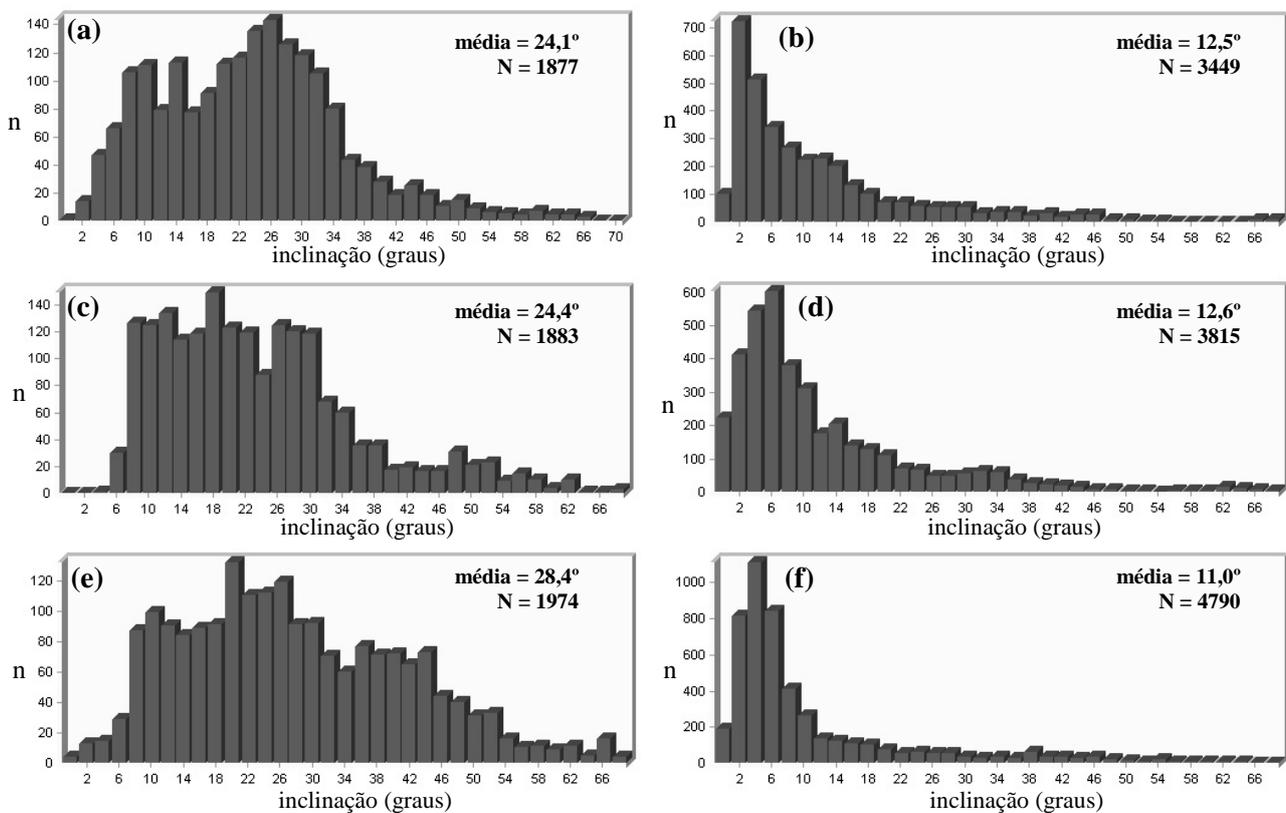


Figura 6 – Inclinação da borda da fossa (graus) nos taludes de montante e jusante: (a) M,1982; (b) J,1982; (c) M,1984; (d) J,1984; (e) M,1988; (f) J,1988.

Como é possível observar na figura anterior (Figura 6), a inclinação da borda da fossa assume uma distribuição bastante assimétrica (assimetria positiva) em sua **borda de jusante**, enquanto a **borda de montante** possui uma distribuição platicúrtica. Contudo, identificado o padrão das distribuições, o parâmetro utilizado na presente análise será apenas a média, como forma de simplificação.

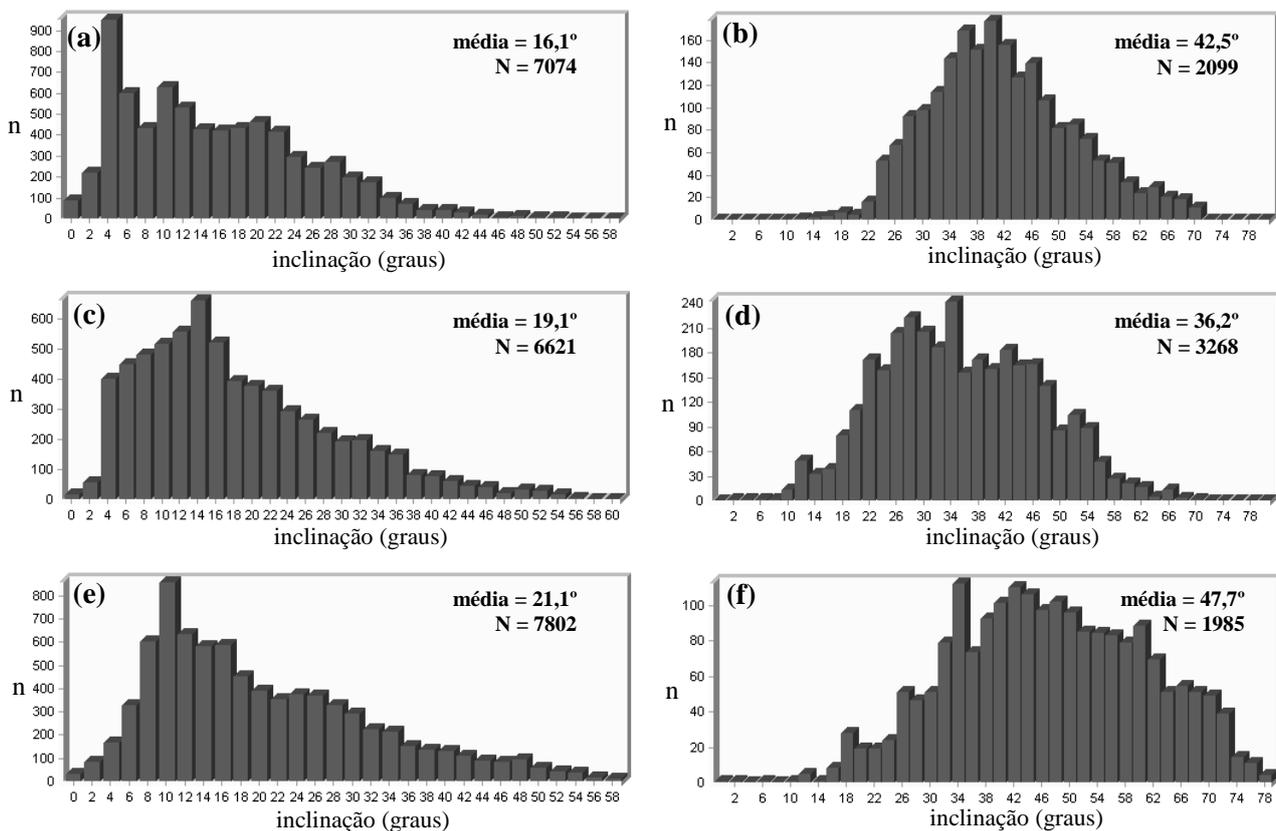


Figura 7 – Inclinação efetiva da fossa (graus) nos taludes de montante e jusante: (a) M,1982; (b) J,1982; (c) M,1984; (d) J,1984; (e) M,1988; (f) J,1988.

No caso da inclinação efetiva da fossa, como visto na Figura 7, o **talude efetivo de montante** assumiu uma distribuição parecida com a da **borda de jusante**. As distribuições também ficaram similares entre o **talude efetivo de jusante** e a **borda de montante**, porém, com significativa diferença entre os intervalos médios.

Com a diferenciação realizada entre a **borda da fossa** e os **taludes efetivos** da fossa, então, foram plotadas na Figura 8 apenas estes valores efetivos, respectivos às médias das distribuições dos taludes de montante ( $i_m$ ) e de jusante ( $i_j$ ). Desta forma, estes ângulos de inclinação foram comparados com as retas de Taraimovich (1980). A inclinação dos taludes recomendadas por este autor variam conforme o ângulo de lançamento do vertedouro salto esqui que, no caso do presente trabalho, é de 35 graus.

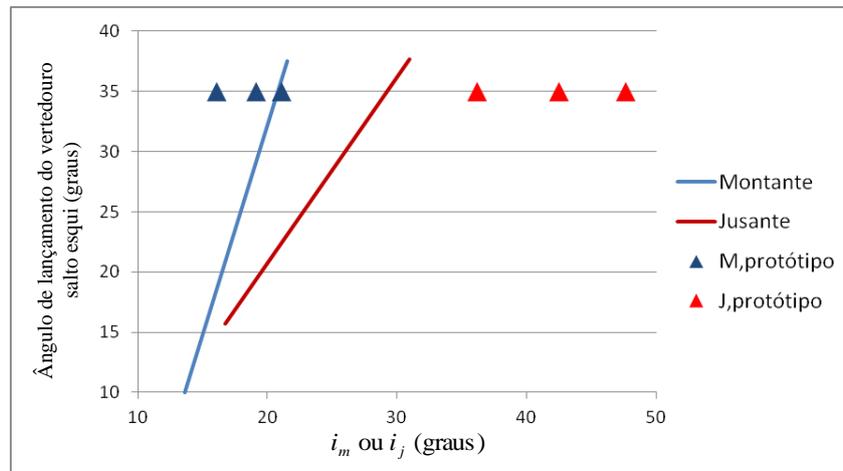


Figura 8 – Ângulos dos taludes da fossa de erosão do presente trabalho, em comparação com as retas de Taraimovich para diferentes ângulos de lançamento (adaptado de TARAIMOVICH, 1980 apud LENCASTRE, 1984)

A inclinação do **talude de montante** da UHE LCBC evoluiu entre os anos de 1982, 1984 e 1988 (16,1°; 19,1°; 21,1°), convergindo para a tendência apresentada por Taraimovich (1980) como pode ser observado na Figura 8. No caso do **talude de jusante**, as inclinações obtidas permaneceram maiores que as apresentadas por este autor. Conforme os resultados obtidos, esse talude não apresentou tendência à estabilização, já que as inclinações (42,5°; 36,2°; 47,7°) variaram bastante nos anos estudados. Esta variação, apresentada no decorrer dos anos, indica a alternância entre a instabilidade, provocada pela erosão, e aos colapsos que sucedem, tendendo à estabilidade.

Marques et al. (2013), apresentaram uma metodologia para estimar o perfil de equilíbrio de fossas de erosão. Estes autores utilizaram o método para o caso da UHE LCBC, e estimaram que a extensão dessa fossa para montante, em direção do pé do vertedouro, já se encontrava em estágio de equilíbrio no ano de 1988. Por outro lado, segundo os autores, o comprimento da fossa ainda deveria se estender para jusante.

O processo de desenvolvimento da fossa para jusante, para uma dada condição de vazão vertida, é mais lento do que para a zona de montante da fossa. Isto se deve às descargas menores, as quais moldam o **talude de montante** anteriormente à ação da macro-turbulência do fluxo no interior da fossa. Desta forma, a recirculação do fluxo continua atuando gradativamente nos processos erosivos. Isto explica a instabilidade observada, no presente trabalho, para a declividade do **talude de jusante**, a qual deve entrar em processo de estabilização à medida que o comprimento da fossa diminua seu avanço para jusante.

## CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES

Foram determinadas, através de levantamentos batimétricos e do uso de ferramentas de geoprocessamento, as inclinações dos taludes da fossa de erosão formada a jusante da UHE Luis Carlos Barreto de Carvalho. Dentre os resultados obtidos, conclui-se que houve uma alteração considerável da geometria da fossa desde o ano de 1982, até o ano de 1988. Nas análises realizadas, foi visto que o talude de montante da fossa estudada está próximo de uma situação de equilíbrio, conforme convergência dos dados com a bibliografia. Por outro lado, o talude de jusante apresentou-se instável nos anos estudados. Essa falta de tendência à estabilização, apresentada pelo talude de jusante, é explicada pela previsão de que ainda ocorra um aumento significativo da extensão da fossa nesta direção, conforme visto na bibliografia.

Para uso das presentes verificações em projetos de fossas pré-escavadas, deve-se dar ênfase em garantir um comprimento seguro da extensão da fossa e, ao mesmo tempo, assegurar a

estabilidade da profundidade de equilíbrio da mesma, isto é, segundo a potência de um jato d'água. Neste aspecto, aplicando-se inclinações menores, para uma dada profundidade visada, a maior extensão da fossa resultante irá retardar ou impedir que os processos erosivos ocorram de modo descontrolado.

Com relação a trabalhos futuros, recomendam-se estudos que minimizem o volume de pré-escavações de fossas e, ao mesmo tempo, conduzam a uma evolução segura das mesmas. Ademais, os dados e relações apresentadas aqui poderão servir para reduzir a incerteza de futuros projetos, bem como no auxílio quanto à dimensão de problemas correntes, ocasionados pela erosão no entorno de fossas localizadas jusante de vertedouros salto esquí.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem aos professores do IPH/UFRGS: Edith B. C. Schettini, Luiz A. M. Endres, em especial a Walter Collischonn, que leciona a disciplina de Geoprocessamento em Recursos Hídricos; e ao Laboratório de Hidráulica Experimental e Recursos Hídricos (LAHE/FURNAS), pelo fornecimento de material e bolsas à equipe de trabalho.

## REFERÊNCIAS

- BRIGHETTI, G. (2004). Critérios para o Dimensionamento de Extravadores com Salto de Esquí. In: *Congresso Latino americano de Hidráulica*, 21., São Pedro. Anais... IARH/AIPH.
- LENCASTRE, A. (1984). *Descarregadores de cheia com particular incidência sobre a dissipação de energia em jactos cruzados*. Dissertação apresentada para obtenção do grau de Doutor em Hidráulica Aplicada, na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 227 f., 1984.
- MAGELA, G. (1996). Erosão a jusante de vertedouros. *Revista do Comitê Brasileiro de Grandes Barragens: Erosão em bacias de lançamento – aspectos hidráulicos e geotécnicos*. São Paulo, p. 15-71.
- MANSO, P. A.; MARQUES, M.; ALMEIDA, F.; CANELLAS, A.; AND ROCHA, M. R. (2007). Rock scour downstream ski-jumps: Comparison of proto-type observations with analytical and physical-model estimates. Proc., *32nd IAHR Congress* CD-ROM, IAHR, Venice, Italy.
- MARQUES, M.; BORJA, J. G.; SILVA, L. F.; PALAURO, C.; FERREIRA, F. M.; MARZEC, E. P.; SCHWANCK, V. M.; CANELLAS, A.; ENDRES, L. (2013). Metodologia para previsão de Fossas de Erosão a Jusante de Salto de Esquí. In: *Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica*, Rio de Janeiro/RJ, ago., 2013. Anais... VII CITENEL.
- TARAIMOVICH, I. I. (1980). Calculation of local scour of rock foundations by high-velocity flows. *Hydrotechnical Construction*, Nº 8, Aug. 1980.
- VISCHER, D. L. (1995). Introduction. In: *VISCHER, D. L.; HAGER, W. H. (Ed.). Energy Dissipators*. Lisse: A. A. Balkema.. p. 1-8. Hydraulic Structures Design Manual . v. 9.
- YUDITSKII, G. A. (1983) *Acção hidrodinâmica de uma lâmina descarregadora sobre fragmentos de um leito rochoso e condições de rotura deste*. 1963. Trad. do russo J. A. Pinto de Campos. Lisboa: LNEC,. [2], 38 p.