

EROSÃO FLUVIAL EM LEITOS ROCHOSOS: ANTIGOS CONCEITOS SOB NOVAS PERSPECTIVAS

LIMA, A.G.^{1,2}

¹ Universidade Estadual do Centro-Oeste, UNICENTRO, Guarapuava, PR

² Universidade Federal de Santa Catarina, UFSC, Florianópolis, SC
aglima@cfh.ufsc.br

RESUMO

Os processos fluviais sobre leitos rochosos têm recebido recentemente maior atenção da geomorfologia. A importância desses processos para o desenvolvimento de modelos de evolução da paisagem tem promovido avanços teóricos e metodológicos, bem como o resgate de antigas noções e conceitos e sua incorporação dentro de novas perspectivas. O presente artigo procura salientar alguns aspectos desse novo quadro de relações, mediante uma breve análise de dois avanços relativamente recentes e considerados críticos para a compreensão da incisão fluvial em leitos rochosos. Um deles se refere à erosão por abrasão e o outro à erosão por arranque. Conclui-se que por meio de experimentos, observações de campo e integração de conceitos em modelos matemáticos, tem-se avançado no entendimento dos mecanismos de erosão fluvial em leitos rochosos. Antigos conceitos de base qualitativa agora estão sendo validados quantitativamente. Sobretudo no tocante à abrasão fluvial os modelos têm alcançado bons resultados ao considerarem o efeito duplo dos sedimentos em trânsito nos canais (fornecimento de ferramentas para incisão e proteção do leito pelo recobrimento). Quanto ao processo de erosão por arranque, os estudos têm avançado, revelando diversos aspectos novos que precisam ser mais bem compreendidos para que os modelos possam incorporá-los de modo mais consistente. Nesse sentido, o trânsito de sedimentos e a resistência litológica em função dos fraturamentos são itens importantes e que indicam novas possibilidades para os estudos sobre leitos rochosos.

Palavras-chave: Erosão fluvial; Leitos rochosos; Modelos matemáticos.

INTRODUÇÃO

A despeito da sua ampla ocorrência, os rios de leito rochoso sempre receberam pouca atenção das pesquisas geomorfológicas. Anteriormente à década de 1990 haviam referências esparsas na literatura referindo-se a aspectos particulares e espetaculares desses rios, sobretudo cachoeiras.

O trabalho de Howard & Kirby (1983) deu base para uma nova e mais integrada abordagem dos processos geomorfológicos operantes nos rios de leito rochoso e que veio a se firmar a partir da década de 1990. A experimentação desenvolvida por esses pesquisadores em uma área de *badlands* permitiu relacionar o comportamento geomorfológico dos canais de leito rochoso com a tensão de cisalhamento (*shear stress*) ou com a potência do escoamento (*stream power*). A natureza dessa pesquisa levava a considerar a evolução das redes de canais e conseqüentemente do relevo das bacias fluviais. A mudança de escala, de experimental para bacia, consolidou-se desde então (e.g. HOWARD et al., 1994; SNYDER et al., 2000; WHIPPLE & TUCKER, 2002; FINLAYSON & MONTGOMERY, 2003; TOMKIN et al., 2003).

À medida que as pesquisas avançavam e os modelos mostravam suas deficiências, tornava-se evidente a necessidade de um movimento de retorno, sobretudo aos fundamentos dos processos fluviais em leitos rochosos em escala experimental e de campo. A questão fundamental era decifrar o mecanismo processual que leva um rio a aprofundar seu leito no substrato rochoso. Para tanto, resgatam-se antigas noções e conceitos, submetendo-os a novas avaliações experimentais e de campo.

Considerando esse movimento de retorno, o presente artigo procura focalizar dois avanços considerados críticos para a compreensão do mecanismo de incisão fluvial em leito rochoso, obtidos nos últimos dez anos. Um deles se refere à erosão por abrasão e o outro à erosão por arranque. São descritos brevemente os resultados fundamentais de três trabalhos e analisados alguns desdobramentos que indicam o caminho de futuros avanços.

FLUXO DE SEDIMENTOS E ABRASÃO

A importância do fluxo de sedimentos para erosão dos leitos fluviais foi primeiramente considerada por Gilbert (1877; conforme SKLAR & DIETRICH, 1998, p.248). Deve-se a ele a noção de que o suprimento de sedimentos a um canal age de dois modos opostos: 1) fornecendo ferramentas (clastos) que promovem a abrasão do leito e 2) limitando a abrasão na medida em que recobre o leito, isolando-o do impacto dos clastos em trânsito.

Sklar & Dietrich (2001; 2004) revisitaram essa clássica noção, mediante experimentos em laboratório com 22 litologias diferentes e a consequente formulação de um modelo que procura englobar essa dualidade do fluxo de sedimentos na erosão fluvial.

O modelo é expresso da seguinte forma:

$$E = k_1 \frac{q_s}{(\tau^*/\tau_c^* - 1)^{1/2}} - k_2 \frac{q_s^2}{D_s^{3/2} (\tau^*/\tau_c^* - 1)^2}$$

(1)

onde E é a taxa de erosão do leito rochoso, q_s é o suprimento de sedimento por unidade de largura, τ^* é a tensão de cisalhamento não-dimensional, τ_c^* é a tensão de cisalhamento crítica não-dimensional, D_s é o diâmetro do grão; $k_1 = 0.08YR_b g/k_v \sigma_t$ e $k_2 = 0.014Y(R_b g)^{0.5}/(\tau_c^*)^{1.5} k_v \sigma_t^2 \rho_s$, onde Y é o módulo de elasticidade de Young, R_b é a densidade não-dimensional, g é a aceleração da gravidade, k_v é o coeficiente de resistência da rocha, σ_t é a resistência à tração da rocha, ρ_s é a densidade do sedimento; k_1 e k_2

representam, respectivamente, o efeito abrasivo das partículas sedimentares e o efeito de cobertura pelos sedimentos, que tende a proteger o leito da ação abrasiva.

Em relação aos experimentos (SKLAR & DIETRICH, 2001), uma importante constatação foi que a distribuição granulométrica dos sedimentos supridos a um canal é um importante controle sobre as taxas de erosão. A eficiência erosiva aumenta para os sedimentos que são transportados em contato com o leito (no caso dos experimentos esse transporte seria por saltação). O declive mínimo necessário para ocorrer incisão erosiva é dado pela tensão de cisalhamento crítica para a granulometria mais grossa. Outro progresso importante foi o estabelecimento quantitativo entre taxas de erosão e resistência das rochas.

Quanto ao modelo desenvolvido (SKLAR & DIETRICH, 2004), ele prediz uma dependência não linear entre taxa de abrasão e suprimento de sedimento e capacidade de transporte. Taxas máximas de abrasão ocorrem quando as taxas de suprimento são moderadas, aumentando o número de impactos sem produzir uma cobertura do leito. Ocorrem também em níveis intermediários de excesso de tensão de cisalhamento, caracterizando um ótimo na movimentação da carga do leito sem, contudo, colocá-la em suspensão.

EROSÃO POR ARRANQUE

Embora a abrasão seja um processo onipresente em todos os rios de leito rochoso, a erosão por arranque (*plucking*) pode ser significativa em determinadas condições ambientais. Esse tipo de erosão ocorre pela força hidráulica do fluxo, deslocando blocos de rocha do leito, previamente delimitados por fraturas. Cabe observar que o termo aqui traduzido por *arranque* é tratado na língua inglesa como *plucking* e como *quarring*. O primeiro termo parece ser mais adequado, uma vez que o segundo é de uso consagrado na descrição de arranque pela ação de geleiras (e.g HALLET, 1996). Em relação ao uso do termo *fratura* é importante notar que, no contexto da erosão por arranque, apesar de mais comumente ele se referir a descontinuidades planas geradas nas rochas por esforços tectônicos ou por arrefecimento do magma, elas incluem planos de acamamento, foliação e fraturas produzidas pelo impacto de clastos transportados por saltação.

Hancock et al. (1998) desenvolveram dois modelos físicos simplificados para estimar a capacidade de erosão por arranque. O primeiro modelo considera o soergimento de bloco por efeito hidráulico, tendo-se apenas a superfície superior exposta ao fluxo:

$$v_t \approx \left[\frac{2gz}{\rho_w} (\rho_r - \rho_w) \right]^{1/2}$$

(2)

A velocidade limiar do fluxo (v_t) determina a diferença de pressão exercida sobre o bloco, ou seja, a diferença entre a força de soerguimento e a força normal ao leito. Na equação (2) g é a gravidade, z é a espessura do bloco, ρ_w e ρ_r são, respectivamente, a densidade da água e da rocha.

O segundo modelo considera o deslocamento de um bloco com a face frontal livre, situação encontrada nas rupturas de declive:

$$HS_e \approx \frac{z\mu_s}{\rho_w} (\rho_r - \rho_w)$$

(3)

onde, H é a profundidade do fluxo, S_e é o gradiente de energia, que para efeitos práticos pode ser substituído pelo gradiente do canal e μ_s é o coeficiente de atrito estático, que depende da relação entre a força de cisalhamento crítica (F_S) e a força normal ao leito (F_N), ou seja, $F_S = \mu_s F_N$. O modelo fornece a espessura máxima de bloco (z) passível de ser removida do leito sob determinadas condições de fluxo (HS_e).

Por meio desses modelos os autores chegaram a duas conclusões principais. A primeira, é que a capacidade de um rio para erodir seu leito por meio de arranque aumenta com o quadrado da velocidade do fluxo. A segunda conclusão é que o espaçamento de fraturas estabelece uma velocidade limiar, abaixo da qual a erosão por arranque não acontece. Em outras palavras, quanto maior é o espaçamento das fraturas maior deverá ser a velocidade do fluxo para promover o arranque. De modo mais específico, conforme atestam Whipple et al. (2000), a escala submétrica de espaçamento entre fraturas seria propiciadora de erosão por arranque.

ANÁLISE DOS AVANÇOS

A partir dos trabalhos destacados, percebe-se que o conhecimento sobre a incisão em leitos rochosos melhorou pela quantificação e modelagem dos processos. Com isso, alguns conceitos pré-existentes foram validados, como os de Gilbert (1877). Outro conceito fortalecido foi o da relação entre a incisão fluvial e a resistência litológica. Embora reconhecida desde há muito (e.g. HACK, 1973), como um fator fundamental nas respostas geomorfológicas, a quantificação da resistência litológica na análise dos

processos fluviais somente foi incorporada com o aprofundamento das pesquisas em leitos rochosos (e.g. WOHL, 1993). Nos trabalhos de Sklar & Dietrich (2001, 2004), a resistência litológica é incorporada à modelagem dos processos e permitiu resultados mais consistentes. Como parte dessa consistência está a constatação de que a taxa de erosão das rochas por abrasão relaciona-se inversamente com o quadrado da resistência à tração.

Sobre a relação entre incisão fluvial e resistência litológica, à luz dos resultados dos trabalhos de Hancock et al. (1998) e Sklar & Dietrich (2001, 2004) há desdobramentos importantes que estão sendo analisados na tese de doutorado do autor do presente artigo.

Os modelos de Hancock et al. (1998) para a erosão por arranque são simplificados. Não foram considerados os efeitos das orientações e mergulhos diferenciais de fraturas (MILLER, 1991), nem os efeitos de projeção dos blocos (COLEMAN et al., 2003). Além disso, tais modelos não consideram o efeito dos sedimentos em trânsito. Embora não tenha entrado na estrutura dos modelos a participação dos sedimentos foi discutida pelos referidos autores. Alguns pontos dessa discussão são indicativos importantes, até então não avaliados, para os próximos passos em direção a um entendimento mais completo do mecanismo de erosão por arranque.

Conforme Hancock et al. (1998) observaram, uma importante ação dos sedimentos seria o alargamento das fraturas pelo que chamaram de *hydraulic wedging*. O conceito é trabalhado novamente pelos mesmos autores em Whipple et al. (2000), onde aparece a expressão *hydraulic clast wedging*. Atentando para o fato de que a descrição do processo, bem como o uso dessa expressão para denominá-lo, é relativamente recente, propomos aqui a sua tradução para o português como *cunha clasto-hidráulica*. Esse processo consiste no trapeamento de clastos, como areias, seixos e calhaus, nas fraturas do leito, provavelmente por efeito de pequenos e temporários alargamentos dessas fraturas, produzidos por variações da pressão hidráulica no fluxo turbulento. Ao serem aprisionados, os clastos impedem que as fraturas voltem à sua largura original. O alargamento progressivo favoreceria o processo de arranque. O processo de cunha clasto-hidráulica precisa de mais evidências de campo e, sobretudo, o efeito de alargamento por flutuações da pressão do fluxo fluvial mereceria uma modelagem.

Outro aspecto discutido no contexto da erosão por arranque evidencia a estreita relação desse processo com o duplo efeito do trânsito de sedimentos, tal como a situação modelada por Sklar & Dietrich (2001, 2004). A proteção do leito, no caso, seria contra a ação da força hidráulica sobre as fraturas e contra o impacto dos sedimentos transportados em saltação. Os impactos poderiam fraturar a superfície do leito. Muitas dúvidas

permanecem quanto à eficiência dos impactos para geração de fraturas que suportem, posteriormente, um processo de erosão por arranque. Impactos certamente fragmentam as rochas do leito e facilitam a remoção de pequenos pedaços e lascas, mas isso seria mais apropriadamente chamado de macro-abrasão (WHIPPLE, 2004). O uso do modelo de Sklar & Dietrich (2004) pode, de certa forma, ser aplicado ao caso de erosão por arranque, mas haveria uma limitação a situações nas quais a litologia fosse muito frágil ou intensamente fraturada. Tais limitações foram discutidas por Whipple et al. (2000) a propósito das considerações iniciais de Sklar & Dietrich (1998).

Muito ainda precisa ser feito para o entendimento completo do mecanismo de erosão por arranque. Observações detalhadas de campo em condições variadas de litologia e fraturamento certamente contribuirão para responder alguns questionamentos fundamentais. Por exemplo: Considerando litologias distintas, porém com o mesmo grau de fraturamento, as respectivas taxas de erosão por arranque seriam iguais ou diferentes? Se forem diferentes, quais fatores podem ser responsáveis? Qual o papel desempenhado pelas características granulométricas dos sedimentos em trânsito nos canais?

Naturalmente, os resultados das observações devem ser incorporados em modelos que permitam o entendimento das relações de modo mais produtivo, ou seja, no auxílio do gerenciamento ambiental dos sistemas fluviais em leitos rochosos e mistos e ainda na melhoria dos modelos de incisão existentes.

CONCLUSÕES

Por meio de experimentos, observações de campo e integração de conceitos em modelos matemáticos, tem-se avançado no entendimento dos mecanismos de erosão fluvial em leitos rochosos. Antigos conceitos de base qualitativa agora estão sendo validados quantitativamente. Sobretudo no tocante à abrasão fluvial por saltação os modelos têm alcançado bons resultados. Quanto ao processo de erosão por arranque, os estudos têm avançado revelando diversos aspectos novos que precisam ser mais bem compreendidos para que os modelos possam incorporá-los de modo mais consistente. Nesse sentido, o trânsito de sedimentos e a resistência litológica em função dos fraturamentos são itens importantes e que indicam novas possibilidades para os estudos sobre leitos rochosos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

COLEMAN, S.; MELVILLE, B.W. & GORE, L. Fluvial entrainment of protruding fractured rock. *J. Hydraulic Engineering*, v. 129, n. 11, p. 872-884, 2003.

- FINLAYSON, D.P.; MONTGOMERY, D.R. Modeling large-scale fluvial erosion in geographic information systems. *Geomorphology*, v.53, n.12, p.147-164, 2003.
- HACK, J.T. Stream profile analysis and stream gradient index. *J. Res. US Geol. Survey*, v.1 n.4, p.421-429, 1973.
- HALLET, B. Glacial quarrying: a simple theoretical model. *Annals of Glaciology*, v.22, p.1-8, 1996.
- HANCOCK, G. S.; ANDERSON, R. S. & WHIPPLE, K. X. Beyond power: bedrock river incision process and form. In: TINKLER, K. & WOHL, E. E. (eds.). *Rivers over rock: fluvial processes in bedrock channels*: Washington: American Geophysical Union: Washington, DC, 1998, p. 35-60. (Geophysical monograph 107)
- HOWARD, A.D.; DIETRICH, W.E. & SEIDL, M.A. Modeling fluvial erosion on regional to continental scales. *J. Geophysical Research*, v. 99 (B7), p. 13971-13986, 1994.
- HOWARD, A.D. & KERBY, G. Channel changes in badlands. *Geol. Soc. Am. Bull.* v.94, n.6, p.739-752, 1983.
- MILLER, J. The influence of bedrock geology on knickpoint development and channel bed degradation along downcutting streams in South-central Indiana. *Journal of Geology*, v. 99, p.591-605, 1991.
- SKLAR, L. & DIETRICH, W.E. River longitudinal profiles and bedrock incision models: stream power and the influence of sediment supply. In: TINKLER, K.J. & WOHL, E.E. *Rivers over rock: fluvial processes in bedrock channels*. American Geophysical Union: Washington, DC, 1998, p.237-260. (Geophysical monograph, 107)
- SKLAR, L.S. & DIETRICH, W.E. Sediment and rock strength controls on river incision into bedrock. *Geology*, v.29, n.12, p.1087-1090, 2001.
- SKLAR, L.S. & DIETRICH, W.E. A mechanistic model for river incision into bedrock by saltating bed load. *Water Resources Research*, v.40, n.6, W06301, doi: 10.1029/2003WR002496, 2004.
- SNYDER, N.P.; WHIPPLE, K.X.; TUCKER, G.E.; MERRITTS, D.J. Landscape response to tectonic forcing: digital elevation model analysis of stream profiles in the Mendocino triple junction region, northern California. *Geol. Soc. Am. Bulletin*, v.112, n.1250-1263, 2000.
- TOMKIN, J.H.; BRANDON, M.T.; PAZZAGLIA, F.J.; BARBOUR, J.R.; WILLET, S.D. Quantitative testing of bedrock incision models for the Clearwater River, NW Washington State. *J. Geophysical Research*, v.108, n.B6, p.2308, doi: 10.1029/2001JB000862, 2003
- WHIPPLE, K.X. Bedrock rivers and the geomorphology of active orogens. *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.*, v.32, p. 151-185, 2004.
- WHIPPLE, K.X.; HANCOCK, G.S.; ANDERSON, R.S. River incision into bedrock: mechanics and relative efficacy of plucking, abrasion, and cavitation. *Geol. Soc. Am. Bull.*, v.112, n.3, p. 490-503, 2000.
- WHIPPLE, K.X. TUCKER, G.E. Implications of sediment flux dependent river incision models for landscape evolution. *J. Geophysical Research*, v.107, n.B2, doi: 10.1029/2000JB000044, 2002.
- WOHL, E.E. Bedrock channel incision along Picaninny creek, Australia. *Journal of Geology*, v.101, p-749-761, 1993.