

Técnicas de Recuperação de Áreas Degradadas por Processos Erosivos em Minas Gerais

Alisson Silveira Sachetti

Gerente de Engenharia, FGS Geotecnia, Porto Alegre, Brasil, alisson@fgs.eng.br

Felipe Gobbi

Diretor Técnico, FGS Geotecnia, Porto Alegre, Brasil, felipe@fgs.eng.br

Ana Paula Somenzzi

Engenheira Civil, FGS Geotecnia, Porto Alegre, Brasil, ana@fgs.eng.br

Romário Lopes

Engenheiro Civil, Juiz de Fora, Brasil, romariolopes@hotmail.com.br

Camilly Tostes

Engenheira Civil, Juiz de Fora, Brasil, camilly.tostes@hotmail.com.br

RESUMO: A partir da necessidade de recuperação de taludes acometidos por severos processos erosivos, foi elaborado estudo contemplando obras de Engenharia próximo a uma importante ferrovia junto ao município de Lagoa Dourada, Minas Gerais. A solução para o local consistiu na técnica de retaludamento e reaterro para conformação geométrica, de modo a compensar os volumes movimentados e interromper o escoamento preferencial da água. Juntamente, optou-se pela utilização de sistema de drenagem superficial, de modo a disciplinar o fluxo de água e evitar a continuidade dos processos erosivos. Além das soluções geotécnicas e hidráulicas, foi realizada a recuperação ambiental da área com técnicas de bioengenharia para facilitar e acelerar a revegetação local, bem como evitar a reincidência destes processos.

PALAVRAS-CHAVE: Processos Erosivos, Técnicas de Mitigação, Sistema de Drenagem, Bioengenharia.

ABSTRACT: Based on the need for slope rehabilitation affected by severe erosive processes, a study was developed encompassing engineering works near an important railway in the municipality of Lagoa Dourada, Minas Gerais, Brazil. The solution adopted consisted of slope regrading and backfilling to achieve geometric conformation, aiming to balance the earthwork volumes and interrupt the preferential flow of water. Additionally, a surface drainage system was implemented to regulate water flow and prevent the continuation of erosive processes. Beyond the geotechnical and hydraulic measures, environmental restoration of the area was carried out through bioengineering techniques to facilitate and accelerate local revegetation, as well as to prevent the recurrence of these processes.

KEYWORDS: Erosive Processes, Mitigation Techniques, Drainage System, Bioengineering.

1 INTRODUÇÃO

Erosões hídricas podem ter origem antrópica ou natural, estando associadas ao escoamento superficial no terreno ou interno, sendo provocadas por uma conjunção de fatores, onde os principais são a erodibilidade do solo, a geomorfologia do terreno e fatores hidrológicos da região. Esta ocorre quando as forças de desagregação dos agentes de intemperismo são superiores às forças resistentes da superfície do terreno. Portanto, uma das formas mais eficientes de controle e mitigação desses processos erosivos, quando desenvolvidos em grandes áreas, é através da intervenção no regime de escoamento superficial.

Desta maneira, este artigo trata das técnicas utilizadas para a recuperação ambiental das áreas degradadas por processos erosivos junto a um talude ao bordo de uma importante ferrovia em Minas Gerais. Pela localização e grau de erodibilidade presente, se faz necessária a intervenção com medidas de recuperação

das áreas degradadas com o intuito de evitar a geração de impacto ambiental no local e a reincidência dos processos erosivos.

A solução, de maneira geral, contempla a execução de serviços de terraplenagem (corte e aterro), sistema de drenagem superficial, além de técnicas de bioengenharia, a fim de regularizar o terreno, proporcionar condições aceitáveis de fluxo superficial e favorecer a recuperação ambiental das áreas degradadas pelas erosões.

2 ESTUDO GEOLÓGICO

O local de estudo insere-se no contexto geológico do Cinturão Mineiro (CM), faixa orogênica paleoproterozoica que circunda o limite sul do Cráton São Francisco. O CM abriga corpos intrusivos associados a zonas de cisalhamento com direção preferencial NE–SW. Na região de interesse é mapeada a Suíte Alto Maranhão, formada por tonalitos, granitos cálcio-alcálinos e quartzo-dioritos com enclaves de microdiorito melanocrático, além de diques e pegmatitos subordinados (Seixas 1988; Corrêa Neto et al. 2012; Seixas et al. 2013).

Ao longo da região, não foram encontrados afloramentos ou rocha sã que permitissem a caracterização litológica com clareza, porém o solo residual encontrado apresenta granulometria areno-argilosa, com predomínio de grãos de quartzo e teor variável de argilominerais (alteração de feldspatos e micas), com isso conclui-se que se tratam de solos de produto do intemperismo químico de granitos, em acordo com a contextualização geológica proveniente da bibliografia.

Espera-se em função das características do material, aliada a permeabilidade do solo relacionada a porosidade em virtude da fração mais grossa dos grãos e terrenos com declividade acentuada com pouca ou nenhuma cobertura vegetal estabelecida, condições que acabam por acentuar a mobilização de material, gerando sulcos concentrando os fluxos que evoluem para ravinas, aprofundando-se tanto vertical quanto lateralmente.

3 VISITA DE CAMPO

A área acometida por processos erosivos severos apresenta largura aproximada de 90m junto a porção central da erosão, estendendo-se por cerca de mais de 200m, estando esta localizada junto a um talude de corte, no bordo de uma importante ferrovia. A Figura 1 apresenta a vista geral da área.



Figura 1. Vista geral da área erodida.

Destaca-se que não foram observados indícios de instabilidade global geotécnica ao longo da área, entretanto, a região apresenta taludes de grande altura e elevada inclinação da face, esculpidos pelo fluxo desorientado d'água. Além disto, também foi observada a existência de dispositivos de drenagem superficial ao longo da lateral direita da erosão (vista frontal), junto a crista do talude de corte ferroviário.

4 DIAGNÓSTICO

O material encontrado no local corresponde a um solo residual maduro, de coloração bege, alaranjado, granulometria areno-siltosa, mas com pouca ou nenhuma preservação da textura original da rocha mãe. Identificou-se em campo a presença de quartzo e argilominerais frutos da alteração de granitoides. Este material desagrega com facilidade à pressão manual, indicando elevado potencial de erodibilidade (Figura 2), sendo este o único material identificado ao longo de todo o trecho da erosão.



Figura 2. Aspecto de amostra de solo local.

Desta forma, é possível afirmar que o principal movimento ocorrido no local é o entalhamento (Figura 3), que corresponde à erosão em sulco, originada pelo fluxo superficial desorientado. Com o decorrer deste processo, torna os taludes cada vez mais altos devido às erosões profundas, íngremes e instáveis, sendo geralmente acompanhado por escorregamentos localizados. Este processo pode avançar para a formação de grandes erosões à medida que o canal inicial é alimentado pelo escoamento, ganhando força e poder de desagregação e transporte, dando largura e profundidade ao canal.

Localmente é possível identificar ravinamento avançado originário da condução de água superficial desorientada, rupturas superficiais em taludes verticalizados, e processos erosivos severos pelas características do material presente.

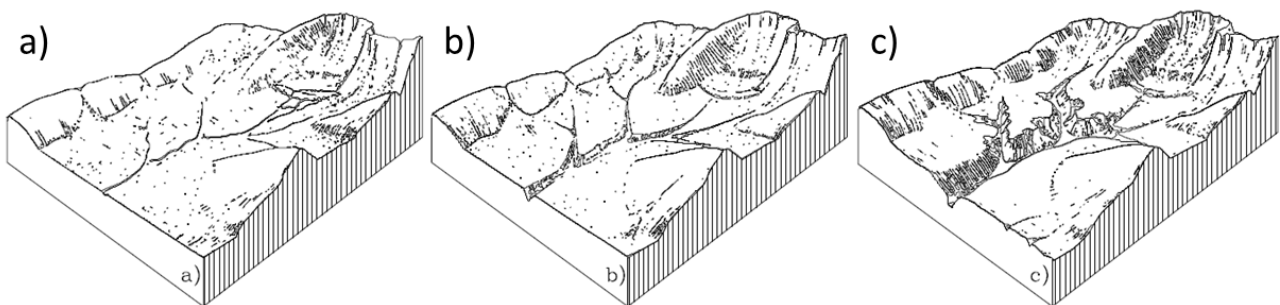


Figura 3. Processo de entalhamento (Karl e Danz, 1969), sendo a) início do processo de entalhamento, b) avanço do processo, c) configuração característica do processo de entalhe.

Conforme relatado, o gatilho que desencadeou o processo erosivo é o mau direcionamento de águas superficiais provenientes de montante e direcionadas para a face do talude, além de problemas de direcionamento de uma drenagem já existente do corte ferroviário. Para esta avaliação foi elaborado um modelo de direcionamento de fluxo superficial da região, conforme pode ser observado na Figura 4. É importante ressaltar que não foram observadas regiões com surgência d'água junto a face dos taludes acometidos pelos processos erosivos.

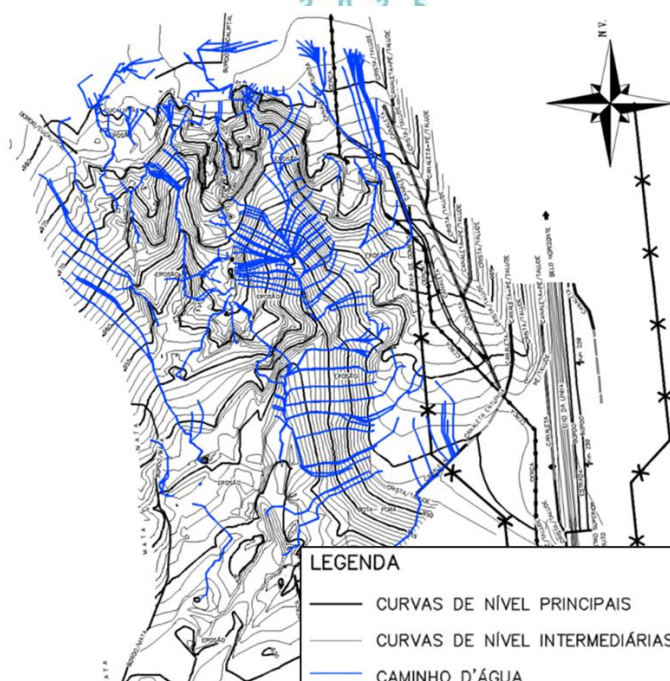


Figura 4. Modelo de direcionamento de fluxo de águas superficiais.

5 SOLUÇÃO PROPOSTA

A solução prevista associa retaludamento/reaterro do terreno com material local, juntamente com sistema de drenagem associado à técnicas de bioengenharia, como a instalação de biomanta vegetal antierosiva e revegetação ao longo da face, além de retentores de sedimentos e paliçadas de madeira na área acometida pelas erosões. A Figura 5 apresenta a planta baixa geral da solução proposta. Como se busca a recuperação da área de forma a evitar impactos ambientais no local, soluções de bioengenharia se tornam técnicas atrativas para a região.

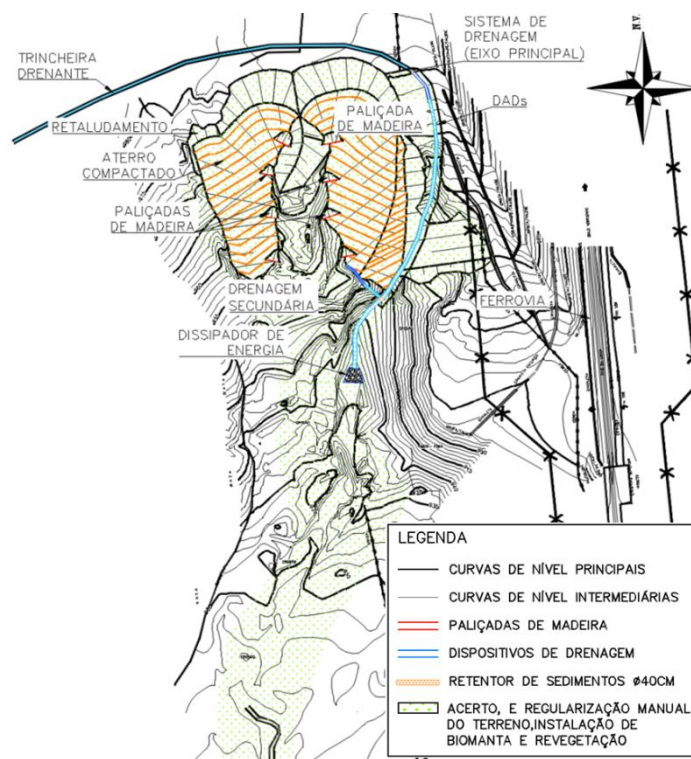


Figura 5. Planta baixa da solução de projeto.

5.1 Sistema de Drenagem Superficial

Após a elaboração do diagnóstico partiu-se para a solução de recuperação da área degradada. O primeiro ponto a ser abordado é a solução de drenagem superficial, sendo ela fundamental para o sucesso de recuperação ambiental. Para isto, buscou-se dimensionar um sistema de drenagem adaptado às condições locais do terreno acidentado pelas erosões e integrado ao meio ambiente, quando possível. O objetivo deste sistema de drenagem é captar todo o fluxo de água direcionado para o talude, conduzindo este fluxo com velocidade controlada, compatível com cada dispositivo dimensionado e com o correto descarte em região adequada, com dissipação da energia hidráulica. A Figura 6 apresenta o fluxograma de dimensionamento do sistema de drenagem de projeto, onde são indicadas as etapas do estudo hidrológico realizado.

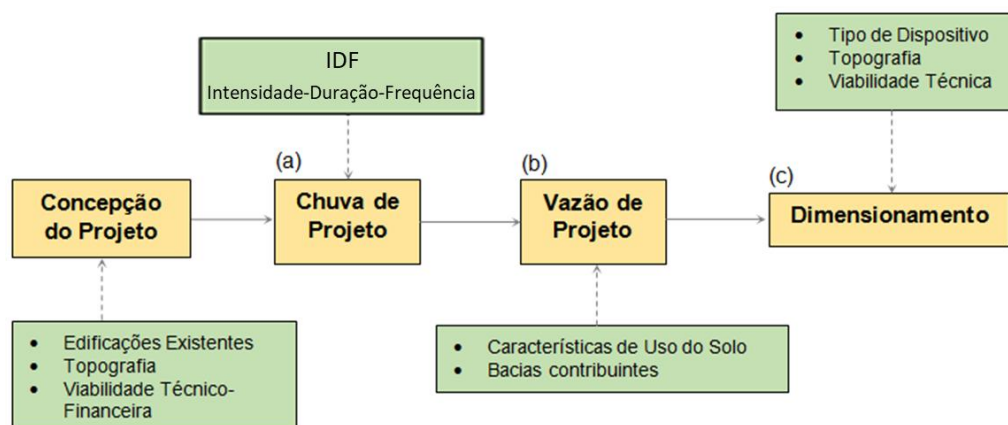


Figura 6. Fluxograma de dimensionamento do sistema de drenagem.

O dimensionamento do sistema de drenagem inicia a partir da necessidade de se conhecer a chuva de projeto, tendo em vista a correlação existente entre chuva e vazão. Esta provém do resultado de três grandezas que caracterizam as precipitações máximas (intensidade, duração e frequência), podendo ser determinada empiricamente através de observações de séries pluviográficas locais (TUCCI, 2005). Deste modo, a chuva de projeto/intensidade de precipitação considerada foi obtida através da curva IDF correspondente ao município de Lagoa Dourada (MG), sendo para isso utilizada uma ferramenta computacional que calcula os parâmetros a partir de uma base de dados e de ferramentas de interpolação entre diferentes estações pluviográficas ($k=2947,749$; $b=20,014$; $m=0,174$; $n=0,952$).

De posse desses parâmetros, foram calculadas as intensidades de chuva para períodos de retorno de 10 a 1.000 anos, conforme resultado apresentado na Tabela 1. Entretanto, de acordo com as instruções de serviços ferroviários (DNIT, 2015a), o período de retorno deve ser de 10 anos para obras de drenagem superficial, 25 a 50 anos para obras de arte correntes, e de 100 anos para obras de arte especiais. Entretanto, devido ao risco ambiental associado, optou-se pela adoção do período de retorno de 25 anos.

Tabela 1. Intensidade de chuva (mm/h) para diferentes períodos de retorno.

Duração (min)	Período de retorno (anos)							
	5	10	15	25	50	100	500	1.000
5	181,99	205,31	220,32	240,80	271,67	306,49	405,55	457,53

Já para o cálculo da vazão de projeto foi utilizado o Método Racional, indicado para bacias de até 200 ha de área de contribuição, e leva em conta que a precipitação é constante no espaço/tempo. Além disso, o balanço hídrico entre o volume escoado e o volume infiltrado é dado pelo coeficiente de escoamento (coeficiente de *Runoff*), tendo sido este avaliado de acordo com a metodologia proposta por Willians (1949, *apud* TUCCI, 2005), que considera as condições de relevo, material presente e cobertura vegetal. Além disso, a área de contribuição de projeto foi delimitada com base na declividade do local, resultando em uma área aproximada de 18.100m².

Em relação ao dimensionamento hidráulico dos dispositivos, iniciou-se pela proposição de uma trincheira drenante ao longo da crista da área, capaz de coletar água subterrânea a pequenas profundidades e ainda amortecer parte das vazões recebidas de montante. Esta foi baseada nas proposições de Schueler (1987) e Brown et al. (2009), composta por material granular drenante.

Também foram propostas sarjetas de drenagem para a coleta e condução do fluxo empregando a Equação de Manning, a qual relaciona variáveis hidráulicas conhecidas e variáveis da geometria do conduto. Para estas, de modo a integrar a solução ao local, optou-se pela utilização de sarjetas escavadas revestidas com biomanta vegetal antierosiva. Como referência, foram assumidos os valores de velocidade de fluxo estabelecidos por Fischenich (2001), que prevê velocidades aceitáveis superiores a 18 ft/s ($\approx 5,47$ m/s) para dispositivos em concreto, e de até 9,5 ft/s ($\approx 2,88$ m/s) para superfícies compostas por biomantas. Entretanto, visto que as velocidades se mostraram superiores ao estabelecido, optou-se pela execução dos dispositivos em concreto armado.

Juntamente, foram previstas descidas d'água em degraus (DADs) para a transposição de desníveis, sendo adotado o regime de quedas sucessivas (*Nappe flow*) no qual o escoamento se desenvolve em cada degrau, podendo formar ou não o ressalto hidráulico dentro do patamar do degrau. Este gera maior dissipação de energia, de forma que seja possível o controle de elevadas velocidades. Além disso, dissipadores de energia foram posicionados ao final do sistema de forma a evitar a ocorrência de erosões e danos a estruturas a jusante. Esses elementos de dissipação foram previstos com construção em enrocamento, onde a metodologia de dimensionamento foi baseada nas proposições de Fletcher e Grace (1972).

5.2 Conformação Geométrica

Visto que o objetivo do projeto é a recuperação da área degradada e que a ocorrência de processos erosivos remove parte do solo e cria caminhos preferenciais de água que favorecem a constante alimentação das erosões, foram propostos cortes e aterros com geometrias controladas, sem alterar os fatores de segurança dos taludes naturais, devolvendo a sua condição de estabilidade antes dos processos erosivos ocorridos.

Assim, as intervenções de corte e aterro buscaram melhorar as condições de estabilidade já presentes no local, executando-se cortes no terreno apenas quando era possível que sua inclinação fosse inferior à inclinação na condição natural. Já em relação à concepção dos aterros, foi previsto o preenchimento de pequenos vales e inclinações inferiores aos cortes, proporcionando redução das tensões cisalhantes sobre a massa de solo natural.

5.3 Bioengenharia para controle de erosão

Bioengenharia consiste no uso de materiais derivados de plantas, vivas ou mortas, para mitigar problemas como escorregamentos rasos e rápidos e erosões nas margens de rios, frequentemente mimetizando a natureza e utilizando o mínimo possível de equipamentos pesados (Lewis et al., 2001).

Sendo assim, ao longo da face do terreno regularizada foi previsto a instalação de biomanta vegetal antierosiva, cuja finalidade é a promoção do crescimento vegetal nos taludes e fixação das plantas. Associado à ela, retentores de sedimentos em rolos (Figura 7) foram dispostos ao longo de toda a face, visando a redução da velocidade da água escoada ao longo do talude, bem como a retenção de sedimentos para que estes não sejam direcionados em grandes quantidades para os cursos naturais de água e dispositivos de drenagem superficial.



Figura 7. Exemplo de retentores de sedimentos (adaptado de Ecology Artisans, 2017).

Além disso, em alguns talvegues formados ao longo da área onde não era possível a execução de dispositivos de drenagem, foi prevista a execução de terraceamento formado por estruturas de madeira (paliçadas – Figura 8), com o objetivo de diminuir a velocidade do fluxo d'água vindo dos talvegues através da técnica de represamento, contribuindo também para a retenção de sedimentos. A utilização destes elementos para controle de erosões se baseia na execução de pequenas barragens consecutivas ao longo de talvegues. A solução de projeto previu a cravação de elementos verticais de madeira e um elemento horizontal visando o enrijecimento da estrutura, além de reaterro compactado com material local a montante de cada paliçada.

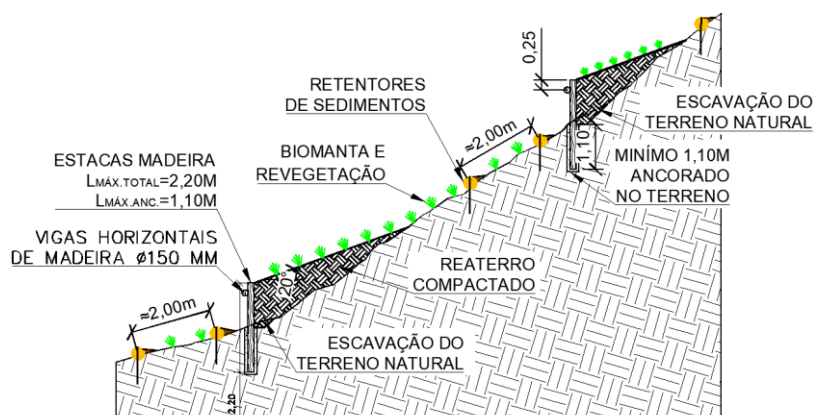


Figura 8. Ilustração de paliçadas para controle de erosões em talvegues.

5.4 Condição do Talude após a Obra

A Figura 9 abaixo apresenta a configuração final da solução de projeto logo após a implantação em campo, na qual é possível observar o início do processo de revegetação das faces dos taludes.



Figura 9. Visão geral da solução após implantação.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este artigo trata das técnicas utilizadas para a recuperação das áreas degradadas por processos erosivos junto a um talude ao bordo de uma importante ferrovia no município de Lagoa Dourada, Minas Gerais. Neste foram abordadas as condições encontradas em campo a partir de visita técnica, que subsidiaram a realização do diagnóstico do problema. De posse do diagnóstico, partiu-se para a busca de uma solução para recuperação ambiental da área, a qual evitasse ao máximo a geração de impacto ambiental no local, utilizando para isso técnicas de bioengenharia quando cabíveis.

É importante ressaltar que, como premissa, o projeto não tem a pretensão de elevar o fator de segurança global do talude, visto que o diagnóstico aponta para problemas diretamente relacionados ao fluxo de água superficial desordenado junto a face dos taludes, causando o carreamento de solo, erosão.



2 0 2 5

Sendo assim, a solução contou com a execução de cortes e aterros ao longo da região superior da área, de modo a compensar os volumes movimentados e interromper o escoamento preferencial da água. Juntamente, optou-se pela instalação de biomanta vegetal antierosiva ao longo de toda a face do terreno, bem como a instalação de retentores de sedimentos e paliçadas de madeira nas regiões de talvegue. Além disso, dispositivos de drenagem superficial consistiram em elementos fundamentais para mitigação dos processos erosivos, gerando o ordenamento e dissipação de energia adequados do fluxo d'água superficial. Também, destaca-se a necessidade e importância da realização de limpeza e manutenção neste tipo de sistema de modo a permitir o adequado funcionamento da solução implantada.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à toda equipe da FGS Geotecnia e aos demais colaboradores deste trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Brown, S. A.; Schall, J. D.; Morris, J. L.; Doherty, C. L.; Stein, S. M.; Warner, J. C. 2009. *Urban Drainage Design Manual Hydraulic Engineering Circular 22*, Third Edition. Federal Highway Administration.
- Corrêa Neto, A.V.; Modesto, A.M.; Caputo Neto, V.; Guerrero, J.C. 2012. *Alteração hidrotermal em zona de cisalhamento associada ao Lineamento Congonhas, sul do Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais*. Anuário do Instituto de Geociências 35(2), 55-64.
- Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT). *Instrução de Serviço Ferroviário ISF-208: Estudos Hidrológicos*. 2015a.
- Ecology Artisans. 2017. *Effective Erosion Control: Straw Wattle*.
- Fischenich, C. 2001. *Stability Thresholds for Stream Restoration Materials*. U.S. Army Engineer Research & Dev Center. ERDC TN-EMRRP-SR-29.
- Fletcher, B. P. Grace, J. L. 1972. *Practical Guidance for Estimating and Controlling Erosion at Culvert Outlets*. U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, Mississippi. Miscellaneous Paper H-72-5.
- Karl, J.; Danz, W. 1969. Der Einfluß des Menschen auf die Erosion im Bergland. *Schriftreihe der Bayerischen Landesstelle für Gewässerkunde*. Heft 1, München.
- Lewis, L., Salisbury, S. L., Hagen, S. 2001. *Soil Bioengineering for Upland Slope Stabilization*. Washington State Department of Transportation Technical Monitor. Olympia, WA.
- Schueler, T. R. 1987. *Controlling Urban Runoff a Practical Manual for Planning and Designing Urban BMPS*.
- Seixas, L.A.R. 1988. *Geologia e metalóctetos de ouro de uma fração do Lineamento Congonhas, Minas Gerais*. Universidade de Brasília, Dissertação de Mestrado, 119p.
- Seixas, L.A.R.; Bardintzeff, J-M.; Stevenson, R.; Bonin, B. 2013. *Petrology of the high-Mg tonalites and dioritic enclaves of the ca. 2130 Ma Alto Maranhão suite: Evidence for a major juvenile crustal addition event during the Rhyacian orogenesis, Mineiro Belt, southeast Brazil*. *Precambrian Research* 238C, 18-41.
- Tucci, C. E. M. 2005. *Hidrologia: Ciência e Aplicação*, 3ª edição. ABRH, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.