

## II-008 ANÁLISE DA ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS DEGRADADOS COM LODO DE TRATAMENTO DE ESGOTOS SANITÁRIOS ATRAVÉS DO ENSAIO DE INDERBITZEN COMBINADO

### **Herlane Costa Calheiros<sup>(1)</sup>**

Engenheira Civil pela Universidade Federal do Espírito Santo. Mestre e Doutora em Engenharia Civil (Hidráulica e Saneamento) pela Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. Docente da Universidade Federal de Itajubá - MG.

### **Bruno Ribeiro Rocha<sup>(2)</sup>**

Mestrando em Engenharia Hídrica pela Universidade Federal de Itajubá – MG.

### **Carolina Lacerda da Cruz<sup>(3)</sup>**

Mestrando em Engenharia Hídrica pela Universidade Federal de Itajubá – MG.

### **Legila Torres Albuquerque<sup>(4)</sup>**

Mestrando em Engenharia Hídrica pela Universidade Federal de Itajubá – MG.

### **Adinele Gomes Guimarães<sup>(5)</sup>**

Engenheira Civil pela Universidade Federal de Minas Gerais. Doutora em Engenharia Civil pela Universidade Federal de Viçosa. Docente da Universidade Federal de Itajubá - MG.

**Endereço<sup>(1)</sup>:** Av. BPS, 1303 – Bairro Pinheirinho - Itajubá - MG - CEP: 37500-903 - Brasil - Tel: +55 (35) 3629-1265 - e-mail: [h2c@unifei.edu.br](mailto:h2c@unifei.edu.br).

## **RESUMO**

O processo de erosão é gerado principalmente pela dissipação da energia das gotas d'água ao caírem, fragmentando os aglomerados de solo e possibilitando o carregamento dos grãos pelo escoamento superficial. Tendo em vista este problema que atinge principalmente as regiões sem cobertura vegetal do país, este estudo busca analisar a estabilização de solos degradados com lodo proveniente de estações de tratamento de esgoto sanitário. As amostras de solo foram obtidas de área degradada em Itajubá/MG e o lodo coletado na ETE da mesma cidade. O método utilizado para simulação da erosão é uma inovação, desenvolvido a partir do método Inderbitzen original e adaptado para simular simultaneamente tanto o escoamento superficial quanto o impacto das gotas de chuva. Concluiu-se que o lodo de estação de tratamento de esgoto sanitário, na proporção, compactação e inclinação estudados, não constituiu um bom material para mitigar o efeito da erosão nos solos degradados. Recomenda-se, em futuros trabalhos, a variação dos parâmetros de escoamento superficial e do impacto das gotas de chuva para verificar a alteração do efeito do lodo sobre o solo.

**PALAVRAS-CHAVE:** áreas degradadas, lodo de esgoto, erodibilidade

## **INTRODUÇÃO**

A erosão pode ser definida como a ação de retirada, dissolução e deslocamento de fragmentos do solo e das rochas por agentes erosivos, podendo eles serem naturais ou antrópicos. Entre esses agentes naturais estão a água da chuva, o vento, o gelo e ainda as raízes de plantas e animais (erosão biológica). A erosão assola as estruturas que compõem o solo, transportando material para as partes mais baixas dos relevos e, em sua maioria, resultam por alterar os corpos d'água (GUERRA et al., 2006).

A amplitude e os impactos da erosão estão relacionados com fatores condicionantes indicativos ao clima, à topografia do local, às características do solo, à cobertura vegetal e às ações antrópicas. É possível citar a declividade do terreno como exemplo desses fatores, o comprimento e a forma das encostas, a erodibilidade do solo e outras propriedades químicas e físicas do próprio, a densidade e o tipo de cobertura vegetal, bem como o volume e a frequência das chuvas e também o grau de interferência das ações humanas (GUERRA, 2006; BERTONI & LOMBARDI NETO, 1999).

Segundo Lepsch (2010), a erosão hídrica é a causa mais expressiva de erosão no Brasil. Em média, a velocidade com que as gotas da chuva atingem o solo está entre 5 e 15 km/h, enquanto o escoamento superficial não costuma ser superior a 1 km/h. Dessa maneira, é a chuva a principal fonte de desagregação do solo e da sua consequente erosão. Foi estimado que aproximadamente 1 bilhão de toneladas de material de

solo foi erodido em 2001, principalmente por meio eólico e pluvial. Ainda, segundo Demarchi e Zimback (2014), a erosão destes sedimentos reduz a fertilidade do solo e a produtividade agrícola, além de assorear rios e lagos.

De acordo com Lemos et al. (2007), existem na literatura diversos métodos para avaliar e compreender o processo de erosão, sejam eles determinísticos, probabilísticos, qualitativos ou ensaios laboratoriais. Em sua pesquisa, Araújo e Campos (2013) utilizaram três diferentes tipos de solos (denominados como solo verde, roxo e branco) para ensaios de caracterização, desagregação, penetração de cone, sucção e resistência à tração, no intuito de avaliar a susceptibilidade desses solos à erosão.

Dentre estes diversos métodos, destaca-se o estudo desenvolvido por Inderbitzen (1961), pioneiro a analisar e propor um método laboratorial para avaliação da susceptibilidade à erosão do solo. O equipamento por ele desenvolvido foi de grande relevância, pois possibilitou a análise da susceptibilidade à erosão de forma relativamente simples envolvendo escoamento de canais (BASTOS, 1999; SILVA e MELO, 2016)

Graças a sua fácil implementação, baixo custo e simplicidade, é um dos métodos com maior número de estudos realizados e com grande utilização no meio geotécnico. Com a possibilidade de variar diversos fatores envolvidos no ensaio, seja no estado de construção da amostra, seja nas configurações de vazão e inclinação da rampa, diversos pesquisadores realizaram modificações no equipamento inicialmente apresentado por Inderbitzen (BASTOS, 1999; TOMASI, 2015; SILVA e MELO, 2016).

Dentre as modificações, destacam-se os equipamentos criados por Fácio (1991) e Lemos (2002). O primeiro apresenta inclinação fixa de 10°, vazão constante de 50ml/s e tempo de ensaio recomendado de 20 minutos. Fisicamente, ele é composto por três rampas paralelas que permitem ensaios simultâneos, com largura reduzida e comprimento alongado. O encaixe das amostras possui 10 cm e é roscável. A segunda possui estrutura tubular, com apenas duas inclinações possíveis. Em vez da usual rampa, a amostra é apoiada sobre uma grelha e submetida ao chuveiramento, sendo a vazão controlado por um manômetro.

Os esgotos domésticos são compostos por águas utilizadas para fins higiênicos (banheiros, cozinhas, lavanderias e outros), consistido principalmente por resíduos humanos provenientes de redes de esgotamentos hidráulico prediais e resíduos oriundos de estabelecimentos públicos, comercial e similares. Qualitativamente, são compostos por cerca de 99,93% de água, sendo o restante representado por sólidos suspensos (MENDONÇA e MENDONÇA, 2017).

Dentre os subprodutos gerados pelo tratamento dos esgotos, destaca-se o lodo. Ele constitui a maior parcela dos rejeitos formados, e necessita de especial atenção no tratamento e disposição final (JORDÃO e PESSOA, 1995).

A fase mais onerosa do tratamento de águas residuárias é comumente o processamento e a acondicionamento final do lodo, que pode alcançar 60% do orçamento operacional para o controle da poluição das águas (WEBBER; SHAMESS, 1984).

Há muito tempo, o destino deste material vinha sendo os cursos d'água próximo às estações. No entanto, as atuais legislações restringem e proíbem esta prática. Segundo a NBR 10.004 (ABNT, 2004) e a Lei 12.305 (BRASIL, 2010) no artigo 3º, inciso XVI, estes lodos são classificados como resíduos sólidos, devem ser minimizados, reutilizados e/ou reciclados, ficando proibido seu lançamento em corpos d'água (HOPPEN et al., 2006).

Em estudo realizado por Coelho et al. (2015), foram analisadas amostras de solo arenoso e solo argiloso das redondezas da Universidade Estadual de Londrina e lodo de estação de tratamento de água. Além do solo puro, foram feitas amostras de solo argiloso com proporção de 1:1 (solo-lodo) e solo arenoso com proporção de 1:0,25 (solo-lodo). Como resultado, foi observada a possibilidade da utilização destas misturas como base para subleito de pavimentações rodoviárias, dando novas possibilidades para o lodo que antes seria descartado.

Estudos como de Sampaio et al. (2012) apontam que o uso de lodo de esgoto pode melhorar aspectos físicos do solo como porosidade e umidade. Costa; Costa; Caetano (2011) afirmam que a adição de diferentes fontes de matéria orgânica tem sido utilizada buscando melhorar a propriedade química e física dos solos degradados e a aplicação do lodo de esgoto higienizado com cal virgem tem se mostrado uma opção promissora para acelerar o crescimento e o estabelecimento de espécies que promovam a cobertura inicial do solo,

reduzindo o impacto das águas de chuva, possibilitando a restauração do equilíbrio do ecossistema. Castro; Silva; Scalize (2015) observaram que a maioria das publicações encontradas faz referência ao uso do lodo de esgoto em aplicações no solo, com a finalidade de melhorar as características físicas, químicas e biológicas, enriquecer ou recuperar os solos para a produção de vegetais, diminuir os custos de produção substituindo a adubação química, aumentar a produtividade e no desenvolvimento de metodologias laboratoriais de análises de impactos do uso do lodo de esgoto no solo. Então, o lodo de esgoto poderia ser usado para diminuir a erodibilidade de áreas degradadas? Diante desta inquietação foi realizado este estudo.

## **OBJETIVO**

Estudar o efeito do lodo produzido no tratamento de esgotos sanitários na resistência à erosão de solos de área degradada, adotando como simulador de erosão uma Rampa de Inderbitzen com produção simultânea de escoamento superficial e impacto de gotas de chuva.

## **METODOLOGIA**

O solo foi retirado de uma região de encosta exposta próxima a prefeitura da cidade com a utilização de peneira, pá e enxadas, cujas características principais, segundo Trautwein (2019), são: (a) textura: 11% de argila, 56% de silte e 33% de areia; (b) limite de liquidez: 48%; (c) limite de plasticidade: 34%; (d) compactação: teor de umidade ótimo de 20% e peso seco máximo de 15 kN/m<sup>3</sup>; (e) peso específico dos grãos: 2,6 g/cm<sup>3</sup>. O lodo proveniente de reatores UASB foi coletado em leito de secagem da Estação de Tratamento de Esgoto Sapucaí, operada pela Companhia de Saneamento de Minas Gerais.

Em semelhança ao realizado por Neves (2017), os corpos de prova foram construídos através do ensaio Proctor Normal, com energia de compactação de 5,94 kg.cm/cm<sup>3</sup>. As modificações ficam por conta da diminuição do número de golpes, para 19, e a aplicação de camada única. Ao fim da compactação, eles possuíam 10 cm de diâmetro e aproximadamente 6 cm de altura. O teor de umidade adotado foi de 20% para todos os corpos de prova, três deles compostos de solo puro e três compostos de solo com adição de lodo. Com base nos estudos de Coelho et al. (2015), foi adotada uma proporção de 1:0,125 na produção do material composto de solo-lodo. Após o preparo, as amostras foram submetidas imediatamente ao ensaio na rampa.

Tendo em vista o estudo original desenvolvido por Inderbitzen, assim como as modificações realizadas por Fácio e Lemos, este estudo desenvolveu uma nova metodologia, baseada em uma versão conjunta dos efeitos de chuvaramento e escoamento superficial. A rampa original foi desenvolvida por Neves (2017), com estrutura composta de metal e com a rampa construída em vidro com 40 mm de espessura. A rampa possui 10,5 cm de largura, 64,5cm de comprimento e orifício para amostra com 10 cm de diâmetro. A inclinação variava de 0° a 60°. A partir desta rampa, para simular o efeito da chuva, foi acrescentada uma estrutura superior de metal, contendo um reservatório e saídas individuais para a rampa e para o encanamento do chuvaramento, cada qual com seu par de registros para ativação e regulagem do fluxo. Nesta nova configuração, a inclinação da rampa é limitada entre 0° e 55°, aproximadamente.

O ensaio foi dividido em três etapas. Inicialmente, a amostra é atingida apenas pelas gotas de chuva durante 5 minutos. Ao fim desse primeiro período, é aberta a válvula que inicia o escoamento da rampa, permanecendo a ação da chuva e da rampa em conjunto por mais 10 minutos (total de 15 minutos). Após esse segundo intervalo, o registro do simulador de chuva é fechado, e o escoamento da rampa permanece por mais 3 minutos (total de 18 minutos), marcando o fim do ensaio. Todo o fluxo era coletado por recipiente posicionado ao fim da rampa.

Após o término dos ensaios, cada recipiente foi colocado em repouso em local protegido para sedimentação do solo erodido por aproximadamente 12 h. Depois, foi retirada a água até o ponto mais baixo que garantisse, com segurança, que nenhuma parcela do solo era perdida. Por fim, o restante do solo e água foi colocado em estufa para secagem total e consequente estabilização de massa. Com os dados obtidos em laboratório, foi possível proceder ao cálculo dos índices de erosão, comparando assim o desempenho de cada material.

## **RESULTADOS E DISCUSSÃO**

O teor de umidade médio do solo era de 9,84% ± 0,92% e do solo-lodo 65,57% ± 12,38%. Graças à porosidade e composição orgânica do lodo, é possível notar valor da combinação solo-lodo muito superior de umidade em comparação com o solo puro.

No preparo do material de solo-lodo, foi inicialmente escolhida uma proporção de 1:0,5 com base nos experimentos de Coelho et al. (2015). Entretanto, devido ao baixo peso específico do lodo, foi necessário reduzir a proporção para 1:0,125, uma vez que o volume da proporção inicialmente escolhida foi muito superior ao esperado.

Durante o preparo do material de solo-lodo, também foi notada uma falta de coesão do mesmo, apesar da adição estipulada de água para se atingir os 20% de teor de umidade. Com isso, foram adicionados mais 102 mL à mistura até a mesma apresentar textura e cor semelhantes ao do preparo do solo puro e capacidade de formar pequenos agregados com baixa resistência à quebra.

Após o preparo das amostras, testes na rampa, sedimentação e secagem em estufa, o material carregado pela água foi pesado e o índice de erodibilidade calculado. Os resultados revelaram que o índice de erodibilidade médio para o solo foi de  $1,26 \pm 0,41$  (variando de 1,00-1,73) e para o solo-lodo foi  $1,43 \pm 0,32$  (faixa de variação de 1,14-1,78). A partir dos resultados, é possível inferir que o lodo não afetou positivamente a resistência à erosão do solo, sendo o índice de erodibilidade aproximadamente 13% superior em solos com composição mista.

## CONCLUSÃO

Por meio deste trabalho, pode-se concluir que:

- O lodo usado nos testes teve baixa capacidade de retenção de umidade. Provavelmente, graças a alta porosidade aliado às reações exotérmicas dos micro-organismos presentes nele, a água é perdida facilmente durante o processo de manuseio, principalmente nos momentos de abertura do recipiente que o continha.
- O índice de erodibilidade do solo-lodo na proporção de 1:0,125 foi de  $1,43 \pm 0,32$ , ou seja 13% superior ao solo puro.
- O lodo de esgoto na proporção, energia de compactação e inclinação utilizados nos testes não foi capaz de mitigar os efeitos da erosão no solo degradado.

Portanto, recomenda-se que futuros trabalhos garantam a secagem do material de forma uniforme e com a mesma umidade ambiente antes da caracterização e utilização para construção dos corpos de prova. Também é recomendada a utilização de um recipiente hermeticamente selado. Por fim, este estudo recomenda que futuros trabalhos analisem diferentes proporções de solo-lodo, assim como diferentes métodos e energias de compactação e teores de umidade, em busca de um ponto ótimo que permita o uso mais eficiente do lodo no reforço de solos.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10.004 – Resíduos sólidos – classificação. Rio de Janeiro, 2004.
2. ARAUJO, R. C.; CAMPOS, T. M. P. Uso dos ensaios de penetração de cone, desagregação, sucção e resistência à tração para avaliar a erodibilidade. **Revista Luso-Brasileira de Geotecnia**, n°128, p. 67-85. jul., 2013.
3. BASTOS, C. A. B. **Estudo geotécnico sobre a erodibilidade de solos residuais não saturados**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 269p., 1999.
4. BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. Conservação do Solo. 4. ed. **Campinas: Ícone**. 355 p. 1999.
5. BRASIL. **Lei 12.305** - Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei no 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Brasília, 2010.
6. CASTRO, A. L. F. G. de; SILVA, O. R. da; SCALIZE, P. S. Cenário da disposição do lodo de esgoto: uma revisão das publicações ocorridas no Brasil de 2004 a 2014. **Multi-Science Journal**, v.1, n.2, p.66-73, 2015.
7. COELHO, R.V.; TAHIRA, F.S.; FERNANDES, F.; FONTENELE, H.B.; TEIXEIRA, R.S. Uso de lodo de estação de tratamento de água na pavimentação rodoviária. **Revista Eletrônica de Engenharia Civil**. Vol. 10, n° 2, p. 11-22, 2015.
8. COSTA, A. N. da; COSTA, A. de F. S. da; CAETANO, L. C. S. **Aspectos químicos e físicos da disposição do lodo de ETE no solo**. Vitória: INCAPER, p.32-35, 2011.

9. DEMARCHI, J. C.; ZIMBACK, C. R. L. Mapeamento, erodibilidade e tolerância de perda de solo na sub-bacia do ribeirão das perobas. **Energia na agricultura**, n. 2, vol. 29, p. 102– 114. Abr/jun 2014.
10. FÁCIO, J. **Proposição de uma metodologia de estudo da erodibilidade dos solos do Distrito Federal**. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, 122p., 1991.
11. GUERRA, A. J. T. CUNHA, S. B. Degradação Ambiental. In: GUERRA, A. J. T. CUNHA, S. B. (Org). **Geomorfologia e Meio ambiente**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2006.
12. HOPPEN, C.; PORTELLA, K. F.; JOUKOSKI, A.; TRINDADE, E. M.; ANDREÓLI, C. V. Uso de lodo de estação de tratamento de água centrifugado em matriz de concreto de cimento Portland para reduzir impacto ambiental, **Quim. Nova**, v.29, nº1, p.79-84, 2006.
13. Inderbitzen, A. L. An erosion test for soils. **Materials Research & Standards**, v. 1, n. 7, Technical Note, p. 553-554, 1961.
14. JORDÃO, E. P.; PESSOA, C. A. Tratamento de esgotos domésticos. 3 ed. Rio de Janeiro: **ABES**. 683 p. 1995.
15. LEMOS, C. F. **Avaliação da erosão superficial em áreas de cultivo com plantio direto e plantio convencional, utilizando o aparelho de Inderbitzen**. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 97p., 2002.
16. LEMOS, C. F.; SILVEIRA, C. T.; MILANI, J. R.; OKA-FIORI, C.; FIORI, A. P. Avaliação da erosão entre sulcos em solos de diferentes classes de uso na bacia do Rio da Bucha (PR), através do aparelho de Inderbitzen. **Revista eletrônica do programa de pós-graduação em Geografia – UFPR**, vol. 2, nº 2, p. 156-171, Jul./dez 2007.
17. LEPSCH, I. F. Formação e conservação dos solos. **Oficina de Textos**, 2a ed., 216p., 2010.
18. MENDONÇA, S. R.; MENDONÇA, L. C. Sistemas Sustentáveis de Esgotos. **Blucher**, 2ª ed. 364p., 2017.
19. NEVES, P. N. **Adaptação do ensaio de Inderbitzen para estudo da erodibilidade de solos modificados com fibra de cana-de-açúcar**. Dissertação (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 38p. 2017.
20. SAMPAIO, Thalita Fernanda et al. Lodo de esgoto na recuperação de áreas degradadas: efeito nas características físicas do solo. **Rev. Bras. Ciênc. Solo** [online], vol.36, n.5, p.1637-1645, 2012.
21. SILVA, A. P. N.; MELO, M. T. S. Análise do Histórico de Desenvolvimento de Modelos de Aparelho de Inderbitzen para a Confecção de Tabelas Comparativas. In: Estudos Interdisciplinares em Ciências Biológicas, Saúde, Engenharias e Gestão. **Blucher**, p. 51 – 64, 2016.
22. TOMASI, L. F. **Ensaio de Inderbitzen para avaliação da erodibilidade dos solos e rochas: aplicação nas regiões de Santa Maria, São Francisco de Assis e Porto Alegre/RS**. Dissertação (Bacharelado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria. 83p., 2015.
23. TRAUTWEIN, D. C. R. **Desenvolvimento de sistema óptico com processamento de dados para monitoramento de deformações de barragens**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Energia) – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 134p., 2019.
24. WEBBER, M. D.; SHAMESS, A. Land utilization of sewage sludge: a discussion paper. Toronto: **Expert Committee on Soil and Water Management**, 48p., 1984.