

Erodibilidade de Solos Situados nas Margens do Reservatório da UHE - Furnas

Cássia Braga Ribeiro Baleeiro
UFG, Goiânia, Brasil, cassia_baleeiro@hotmail.com

Marta Pereira Luz
Furnas, PUC Goiás, Goiânia, Brasil, martaluz@furnas.com.br

Rafael Oliveira Nascimento
UFG, Goiânia, Brasil, engrafael@live.com

Márcia Maria dos Anjos Mascarenha
UFG, Goiânia, Brasil, marciamascarenha@gmail.com

Mauricio Martines Sales
UFG, Goiânia, Brasil, salesmauricio@gmail.com

RESUMO: O Brasil é um país que apresenta sua matriz energética baseada na energia hidrelétrica, devido à grande quantidade de água doce disponível em seu território. No entanto, a construção de barragens e reservatórios de Usinas Hidrelétricas gera uma série de problemas ambientais. Dentre esses problemas, podem-se citar os processos erosivos, os quais podem provocar assoreamento dos lagos de UHE's e reduzir seu desempenho na geração de energia hidrelétrica. Nesse sentido, esse trabalho tem como objetivo a obtenção de parâmetros de erodibilidade do solo quando submetido ao escoamento superficial. Para a realização deste estudo foram coletados oito tipos de solos localizados nas margens do reservatório da usina de Furnas em Minas Gerais. Foram realizados ensaios de caracterização, solos tropicais (ensaio do azul de metileno e pastilhas) e também ensaios de Inderbitzen para a análise da erodibilidade. Verificou-se que alguns solos que apresentaram as mesmas classificações de solos lateríticos, tiveram comportamentos diferentes em relação à perda de massa. Além disso, observou-se que a composição granulométrica é um parâmetro fundamental na erodibilidade de um solo.

PALAVRAS-CHAVE: Erodibilidade, Reservatórios de UHEs, Caracterização, Solos Tropicais, Inderbitzen.

1 INTRODUÇÃO

A matriz energética do Brasil é predominantemente baseada no aproveitamento hidrelétrico em virtude de possuir aproximadamente 12% da água doce superficial do mundo e ser uma matriz renovável.

No entanto, a construção de barragens e de reservatórios cada vez maiores para abastecimento de água, transporte fluvial, produção agrícola e, principalmente para a produção de energia elétrica, acarreta em

impactos ambientais provenientes da intervenção humana em áreas inundadas para criação de Usinas Hidrelétricas (UHE's).

Dentre esses impactos ambientais, têm-se os processos erosivos decorrentes da construção e operação dos reservatórios, como a exploração inadequada da área de empréstimo, o ciclo de umedecimento e secagem dos bordos, o efeito das ondas provocadas pelo vento. Tem-se também os que neles impactam por meio de processos de assoreamento provenientes da ocupação da área lindeira, como o pisoteio de

gados, e o uso indevido das margens pela população do entorno, dentre outros.

Erosões em margens de reservatórios consistem em um problema para UHE's, visto que são responsáveis por problemas de assoreamentos, que é um dos fatores predominantes na diminuição do volume útil na geração de energia elétrica.

Segundo Jacintho *et al.* (2006), erosão é o transporte de material desagregado ou desgastado pela ação de agentes erosivos como a água, vento ou gelo. Devido a diversas variáveis que contribuem para o desprendimento e transporte do solo, a compreensão de um processo erosivo deve abordar uma série de aspectos, como: condições climáticas, geológicas, geomorfológicas, hidrológicas, hidrogeológicas, tipos de solo, proteção superficial (principalmente pela vegetação) e ação antrópica. Camapum de Carvalho *et al.* (2006) classificam as erosões em quatro grandes grupos, de acordo com os agentes erosivos: erosão hídrica, eólica, glacial e organogênica.

No Brasil, a erosão hídrica é a forma mais significativa desse fenômeno (DECHEN, 2004). Em geral, a chuva é um dos elementos

climáticos de maior importância na erosão do solo, provocando o destacamento de partículas devido à energia cinética das gotas de chuva e o carreamento de sedimentos por meio do escoamento superficial, resultando nas erosões superficiais. Vale ressaltar que a chuva provoca o umedecimento das camadas superficiais, resultando na alteração dos valores de sucção do solo, o que altera a erodibilidade do mesmo.

Dessa forma, para a elaboração de projetos de controle de erosão, é fundamental a obtenção de parâmetros de erodibilidade do solo quando submetido à ação do escoamento superficial em ambientes aquáticos diversos.

2 METODOLOGIA

Para a realização deste trabalho foram utilizados oito tipos de solos situados nas margens do reservatório da usina hidrelétrica de Furnas. Foram coletadas amostras deformadas e indeformadas de solo de acordo com os procedimentos da NBR 9604 (ABNT, 1986). Na Tabela 1 constam algumas informações geológico-geotécnica das erosões visitadas.

Tabela 1.Principais características das erosões visitadas no reservatório de Furnas em Setembro de 2015.

Erosão	Município	Coordenadas	Ocorrência	Solo	Geologia	Amostras
1	Formiga	20° 42' 30" S 45° 44' 43" W	Erosão no talude	Latossolo vermelho no topo e Cambissolo na média vertente	Formação Paraopeba	14MM15
3	Carmo do Rio Claro. Balsa de Itaci.	20° 59' 52" S 46° 01' 04" W	Erosão de margem	Latossolo Vermelho escuro	Complexo Campos Gerais 2-Arqueano (mesoarqueano)	16MM15, 17MM15 e 18MM15
4	Alfenas	21° 15' 50" S 45° 58' 17" W	Sulco e movimento de massa	Cambissolo, Neossolo litólico	Complexo Lavras-Arqueano (mesoarqueano)	21MM15 e 22MM15
8	Capitólio	20° 39' 10" S 46° 18' 22" W	Sulco a voçoroca	Latossolo, Cambissolo, Couraça Laterítica	Grupo Araxá	19MM15 e 20MM15

Para a caracterização básica do solo foram executados ensaios de análise granulométrica, limite de consistências e massa específica dos grãos. A preparação das amostras para os ensaios de compactação foi executada de

acordo com a NBR 6457 (ABNT, 1986a). O ensaio de granulometria foi realizado pelo procedimento discriminado na NBR 7181 (ABNT, 1984a). A determinação do limite de liquidez e do limite de plasticidade foi

executada de acordo com a NBR 6459 (ABNT, 1984b) e a NBR 7180 (ABNT, 1984c), respectivamente. A massa específica dos grãos foi determinada a partir dos procedimentos da NBR 6508 (ABNT, 1984d).

Além desses ensaios convencionais, foram executados ensaios específicos para a classificação dos solos tropicais: ensaios do método das pastilhas e do azul de metileno. O ensaio pelo método da pastilha foi executado de acordo com a metodologia proposta pelo DERSA (2006). O ensaio de azul de metileno foi realizado de acordo com o proposto por Fabri (1994), adotando-se as modificações propostas por Romão (1995). Os ensaios de pastilhas e azul de metileno não foram realizados para a amostra 16MM15, pois não havia material suficiente.

Os ensaios de erodibilidade foram executados por meio do aparelho de Inderbitzen produzido por Aguiar (2009) e o procedimento de ensaio adotado foi o padronizado por Almeida (2013). As condições de escoamento foram as utilizadas por Fácio (1991), ou seja, declividade da rampa de 10%, vazão de 50 ml/s

e o tempo de duração de 60 minutos. Para a realização deste ensaio foram moldados corpos-de-prova para cada um dos 08 (oito) blocos de amostras indeformadas. Os corpos-de-prova foram saturados previamente por ascensão capilar. Os amostradores em que as amostras foram moldadas apresentam forma prismática, com aproximadamente 100 mm de lado e 50 mm de altura. Estes ensaios permitem definir a perda de massa do solo quando submetido ao escoamento superficial.

3 RESULTADOS

Os resultados apresentados a seguir serão divididos em uma seção destinada à classificação dos solos e outra aos resultados de perda de massa.

3.1 Caracterização e classificação dos solos

As Figuras 1 e 2 mostram as curvas granulométricas com e sem defloculante obtidas para os oito solos analisados, respectivamente.

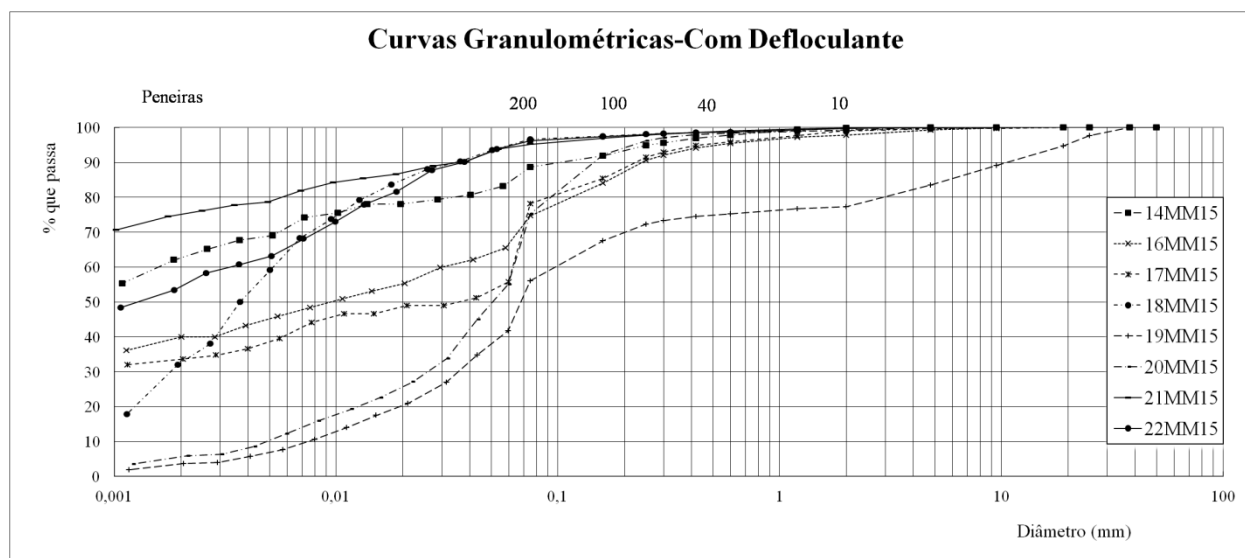


Figura 1. Curvas granulométricas com defloculante.

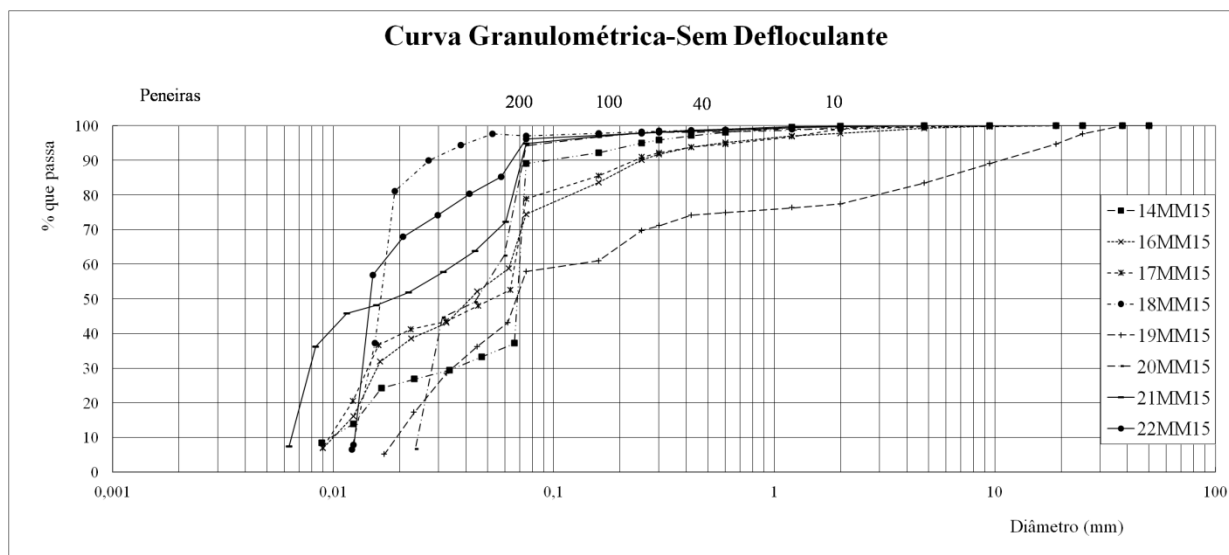


Figura 2. Curvas granulométricas sem defloculante.

A partir das Figuras 1 e 2 foi construída a Tabela 2, a seguir, que mostra a porcentagem de cada tipo de partícula (pedregulho, areia, silte e argila) presente nas amostras analisadas, para as

duas condições de ensaio: com defloculante e sem defloculante.

Tabela 2. Características granulométricas das amostras.

Amostras	Pedregulho(%)	Areia(%)	Silte(%)	Argila(%)
14MM15 (c/ defloc.)	0,08	15,7	21,58	62,64
14MM15 (s/ defloc.)	0,08	64,05	35,88	0,00
16MM15 (c/ defloc.)	2,15	31,3	26,55	39,99
16MM15 (s/ defloc.)	2,15	39,99	57,86	0,00
17MM15 (c/ defloc.)	0,77	43,42	22,27	33,53
17MM15 (s/ defloc.)	0,93	1,62	97,45	0,00
18MM15 (c/ defloc.)	0,93	4,29	62,2	32,58
18MM15 (s/ defloc.)	0,93	1,62	97,45	0,00
19MM15 (c/ defloc.)	22,63	35,32	38,52	3,53
19MM15 (s/ defloc.)	22,63	35	42,37	0,00
20MM15 (c/ defloc.)	0,62	43,8	50,07	5,51
20MM15 (s/ defloc.)	0,62	35,99	63,38	0,00
21MM15 (c/ defloc.)	0,16	5,58	19,18	75,07
21MM15 (s/ defloc.)	0,16	27,95	71,89	0,00
22MM15 (c/ defloc.)	0,26	5,08	40,38	54,27
22MM15 (s/ defloc.)	0,26	13,17	86,57	0,00

Na Tabela 3 são expostas as características físicas das amostras, sendo: w_{nat} , a umidade natural da amostra; w_L , o limite de liquidez; w_P , o limite de plasticidade, IP, o índice de

plasticidade; γ_s , o peso específico do solo; IA, o índice de atividade das argilas; e, CA, o coeficiente de agregação dos solos.

Tabela 3. Características físicas das amostras.

Amostras	w _{nat} (%)	w _L (%)	w _P (%)	IP(%)	γ _s (g/cm ³)	IA	CA
14MM15	14,03	49,4	32,5	16,9	2,70	0,27	100,00
16MM15	1,26	47,8	28,8	19,1	2,70	0,48	100,00
17MM15	1,07	44,4	28,3	16,0	2,71	0,48	100,00
18MM15	1,12	57,6	NP	NP	2,87	0,00	100,00
19MM15	0,41	36,1	NP	NP	2,79	0,00	100,00
20MM15	0,87	41,1	NP	NP	2,78	0,00	100,00
21MM15	6,32	60,2	32,4	27,8	2,71	0,37	100,00
22MM15	10,25	52,8	33,7	19,1	2,76	0,35	100,00

As classificações dos solos de acordo com a metodologia SUCS, ensaio de pastilhas e ensaio de azul de metileno podem ser vistas na tabela a seguir.

Tabela 4. Classificação dos solos.

Amostra	Classificação SUCS	Classificação Pastilhas	Pastilhas (Plasticidade)	Azul de metileno (Classificação CA)	Azul de metileno (Tipo de argilo mineral)
14MM15	ML (silte de baixa compressibilidade)	LA'-LG'	Plástico	Pouco ativo	Caulinita
16MM15	ML (silte de baixa compressibilidade)	-	-	-	-
17MM15	ML (silte de baixa compressibilidade)	LA'-LG'	Plástico	Ativo	Caulinita
18MM15	MH (silte de alta compressibilidade)	LA'-LG'	Plástico	Ativo	Caulinita
19MM15	ML (silte de baixa compressibilidade)	NA	Não Plástico	Muito ativo	Caulinita
20MM15	ML (silte de baixa compressibilidade)	LA-LA'	Não Plástico	Muito ativo	Caulinita
21MM15	MH (silte de alta compressibilidade)	LG'	Plástico	Pouco ativo	Caulinita
22MM15	MH (silte de alta compressibilidade)	LG'	Plástico	Pouco ativo	Caulinita

3.2 Ensaios de Inderbitzen

Para os oito solos analisados, obtiveram-se os seguintes gráficos de massa erodida em função do tempo. A Figura 3 mostra a massa erodida em porcentagem ao longo do tempo para as oito

amostras analisadas, já a Figura 4 mostra a porcentagem de massa erodida para sete amostras, já que a perda de massa da amostra 16MM15 destoou muito das outras:

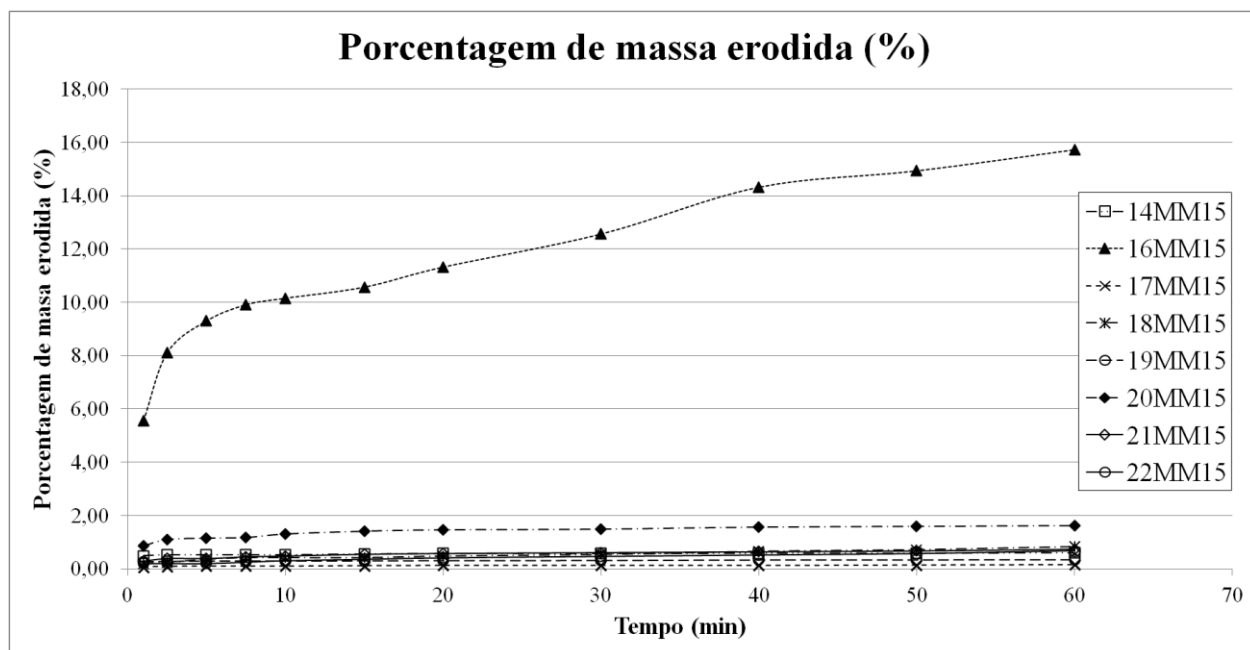


Figura 3. Porcentagem de massa erodida acumulada para as oito amostras.

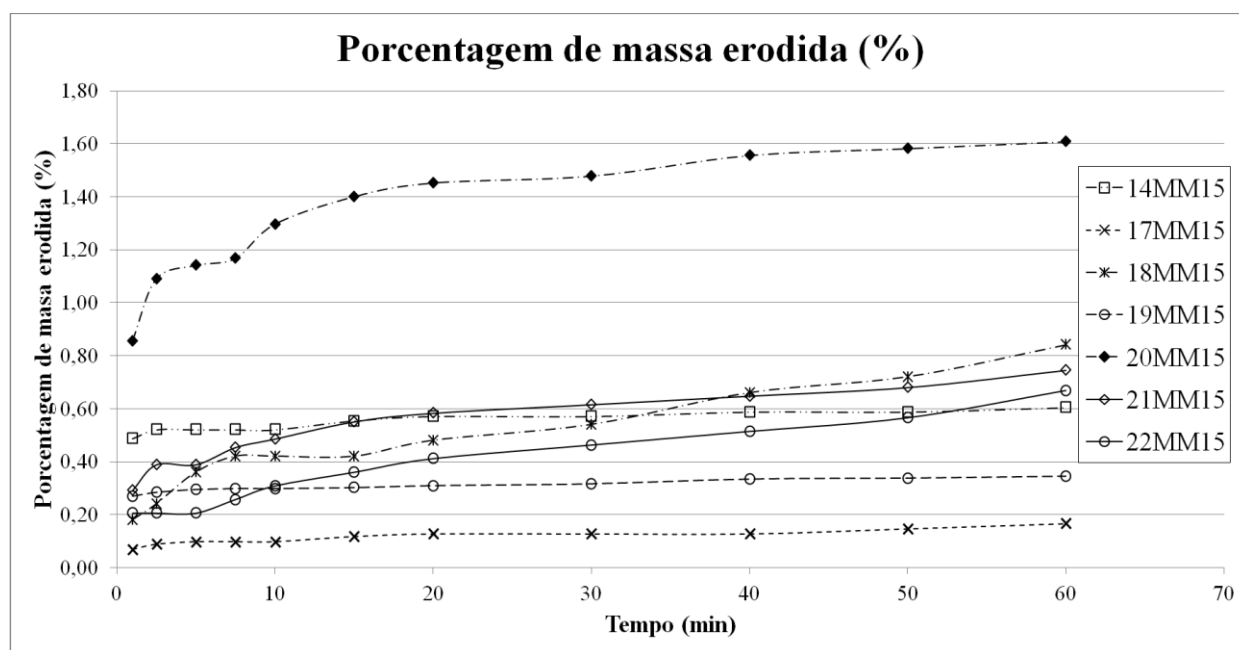


Figura 4. Massa erodida acumulada para as amostras, exceto a 16MM15.

4 DISCUSSÃO

Analisando os gráficos de perda de massa, foi possível observar que as amostras 16MM15, 17MM15, 18MM15, 19MM15, 20MM15, 21MM15 e 22MM15 não apresentaram estabilização dessa perda até o fim do ensaio. Recomenda-se executar ensaios com diversos tempos de escoamento para verificar a influência dessa variável.

Em geral, apenas a amostra 16MM15 teve uma porcentagem de perda de massa destoante (15,73%), sendo que todas as outras amostras apresentaram porcentagens inferiores a 2%. Esses valores estão na ordem de grandeza dos resultados obtidos por Medeiros (2014), Almeida *et al* (2015) e Silva *et al* (2015). Vale ressaltar que nos dois últimos trabalhos, os valores da perda de massa aumentaram consideravelmente quando os ensaios foram

executados em amostras não saturadas devido ao efeito da sucção.

A alta porcentagem de perda de massa da amostra 16MM15 não era esperada, uma vez que a mesma apresentou uma grande quantidade de argila (39,99%) em sua composição. No entanto, seus valores de índices de plasticidade (19,1) e de atividade (0,48) pode indicar a presença de argilos minerais mais ativos, o que pode ser confirmado apenas com a execução de ensaios DRX. Não foi possível a realização dos ensaios para solos tropicais, mas futuramente novos estudos irão investigar esse fato.

Por outro lado, a amostra 17MM15, com característica similar à amostra 16MM15, foi a amostra que menos perdeu massa ao longo do tempo (0,17%). Recomenda-se a execução de análises químicas e ensaios de DRX para compreender a diferença de comportamento mecânico.

As amostras 14MM15, 19MM15, 21MM15 e 22MM15 tiveram uma porcentagem de perda de massa menor que 0,75%. Isso pode ser explicado pelo fato de a primeira e os dois últimos apresentarem grande porcentagem de argila em sua composição granulométrica e serem classificados como solo laterítico. No caso da amostra 19MM15, a perda de massa se justifica por ele ser um solo bastante pedregulhoso e a vazão de 50 ml/s pode não ter sido suficiente para o carreamento do solo.

A amostra 18MM15 apresentou uma porcentagem de perda de massa de 0,84% pois, apesar de ter muita argila em sua composição granulométrica e ser classificada como laterítica, apresentou também muito silte, sendo classificada como um solo não plástico.

Por fim, a amostra 20MM15, também laterítica, apresentou uma porcentagem de perda de massa de 1,2%, pois apresenta altos teores de areia (43,8%) e silte (50,07%) e baixo teor de argila (5,51%). Além disso, é um solo não plástico.

5 CONCLUSÃO

A realização do trabalho permitiu verificar que apesar de alguns solos apresentarem as mesmas classificações de solos lateríticos, apresentam características diferentes em relação à

erodibilidade superficial. Ou seja, apesar de as classificações de solos lateríticos serem importantes na identificação do comportamento dos solos, sua composição granulométrica, plasticidade e índice de atividade exercem um papel fundamental na análise do seu comportamento.

As condições do ensaio também influenciam na perda de massa dos solos ao longo do tempo. Portanto, sugere-se que outros ensaios sejam feitos futuramente, variando as condições de saturação dos solos, a inclinação da rampa, a vazão de água e o tempo de escoamento no ensaio de Inderbitzen.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Furnas e à ANEEL pelo apoio a esta pesquisa por meio do P&D *Monitoramento e Estudo de Técnicas Alternativas na Estabilização de Processos Erosivos em Reservatórios de UHEs*.

REFERÊNCIAS

- ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas (1986a). *NBR 9604: Abertura de poço e trincheira de inspeção em solo, com retirada de amostra deformada e indeformada*. Rio de Janeiro, 9 p.
- ABNT: __ (1986b). *NBR 6457: Amostras de solo - Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização* Rio de Janeiro, 9 p.
- ABNT: __ (1984a). *NBR 7181: Solo - Análise Granulométrica*. Rio de Janeiro, 170 p.
- ABNT: __ (1984b). *NBR 6459: Solo - Determinação do limite de liquidez*. Rio de Janeiro, 6 p.
- ABNT: __ (1984c). *NBR 7180: Solo-Determinação do limite de plasticidade*. Rio de Janeiro, 3p.
- ABNT: __ (1984d). *NBR 6508 - Grãos de Solos que Passam na Peneira de 4,8mm - Determinação da massa específica*. Rio de Janeiro, 8 p.
- Aguiar, de V. G. *Bacia hidrográfica do córrego granada - Aparecida de Goiânia - GO: os processos erosivos e a dinâmica espacial urbana*. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-graduação em Geotecnia, Estrutura e Construção Civil, Escola de Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Goiás, Goiânia, , 97 p.
- Almeida, J. G. R (2014). *Erodibilidade de solos tropicais não saturados nos municípios de Senador Canedo e Bonfinópolis - GO..* Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-graduação em Geotecnia, Estrutura e Construção Civil, Escola de Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Goiás,

- Goiânia, , 127 p.
- Almeida, J.G,R ; Romão, P.A ; Mascarenha, M. M. A. ; Sales, M. M. (2015). Erodibilidade de solos tropicais não saturados nos municípios de Senador Canedo e Bonfinópolis – GO. *Geociências* (São Paulo. Online), v. 34, p. 441-451, 2015.
- Camapum de Carvalho, J.; Sales, M. M.; Mortari, D.; Fázio, J. A.; Motta, N. O.; Francisco, R. A (2006). *Processos erosivos*. In: Camapum de Carvalho, J.; Sales, M. M.; Souza, N. M.; Melo, M. T. S. (Org.). *Processos erosivos no centro-oeste brasileiro*. 1ª ed. Brasília: FINATEC, v 1, 93-147p.
- Dechen, S. C. F. et al. (2004). Manejo de solos tropicais no Brasil. *Reunião Brasileira de Manejo e Conservação do Solo e da Água: manejo integrado a ciência do solo na produção de alimentos*, 15. Santa Maria - RS. UFSM, p.1-25.
- DERSA Desenvolvimento Rodoviário S/A (2006). *Diretrizes para Identificação Expedita do Solo Laterítico – Método da pastilha. Método de ensaio*.
- Fabbri, G.T.P(1994). *Caracterização da fração fina de solos tropicais através da adsorção de azul de metileno*. Tese de Doutorado, EESC, USP.
- Fázio, J. A (1992). *Proposição de uma metodologia de estudo da erodibilidade dos solos do Distrito Federal*. Brasília, Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-graduação em Geotecnia, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental da Universidade de Brasília, 122p.
- Jacinto, E. C; Camapum de Carvalho, J; Cardoso, F. B. F; Santos, R. M. M; Guimarães, R. C; Lima, M. C. G (2006). *Solos tropicais e o processo erosivo*. In: Camapum de Carvalho, J.; Sales, M. M.; Souza, N. M.; Melo, M. T. S. (Org.). *Processos erosivos no centro-oeste brasileiro*. 1ª ed. Brasília: FINATEC, v 1, 93-147p.
- Medeiros, G. F (2014). *Susceptibilidade à erosão na alta bacia do Ribeirão Barreiro – Alexânia-GO*. Publicação D0091G14. 172 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia.
- Romão, P.de A (1995). *Mapeamento geotécnico da região de águas claras (DF): Utilização de recursos de geoprocessamento e de novos métodos de ensaio para caracterização de solos tropicais*. Dissertação (Mestrado). Departamento de Engenharia Civil, UnB, Brasília.
- Silva, M.R.; Mascarenha, M.M.A.; Jesus, A.S. (2015) Erodibilidade de solos tropicais não saturados em Silvânia-GO. In: *VII Congresso Brasileiro de Geossintéticos e VIII Congresso Brasileiro de Geotecnia Ambiental*, 2015, Brasília-DF. **Anais...** p. 230-237.