

AVALIAÇÃO DA ERODIBILIDADE DE SOLOS RESIDUAIS PERTENCENTES À BACIA DO RIO UNA

Erodibility assessment for residual soils in the Una river basin

Cláudia F. Escobar de Paiva*

Íria Fernandes Vendrame**

RESUMO – O presente trabalho possui como objetivo avaliar a erodibilidade de horizontes residuais pertencentes à bacia do rio Una situada no município de Taubaté, no estado de São Paulo, Brasil. Dentre os fatores que contribuem para o surgimento e evolução dos processos erosivos ocasionados pela ação da água das chuvas, destaca-se a erodibilidade do solo que pode ser entendida como a maior ou menor facilidade com que as partículas de solo são desagregadas e posteriormente transportadas. Tal parâmetro é avaliado segundo os critérios da metodologia Miniatura Compactado Tropical (MCT) e pelo ensaio de Inderbitzen para quatro horizontes residuais coletados. Os resultados mostraram que os procedimentos aplicados e os valores encontrados para o parâmetro erodibilidade são coerentes com os valores apresentados no meio técnico para solos com características e comportamento geomecânico semelhantes às amostras ensaiadas.

SYNOPSIS – The present work aims to assess the erodibility of soils from the Una river basin, located in Taubaté town, state of São Paulo, in Brazil. Among the factors that contribute to the start and to the evolution of the erosion process due to runoff, stands out the erodibility of the soil, a factor which represents the ease with which the individual soil particles are detached and transported by water flow. The erodibility was assessed applying the MCT methodology and the Inderbitzen test to four representative soil samples of the basin. The results showed that the procedures applied and the values found for the erodibility are compatible with figures in the technical sphere for soils with similar characteristics and geomechanical behaviour of the samples tested.

PALAVRAS CHAVE – Erodibilidade, metodologia MCT e ensaio de Inderbitzen.

1 – INTRODUÇÃO

Atualmente, destaca-se como um dos mais importantes problemas ambientais a degradação do solo e conseqüentemente o assoreamento de cursos d'água e reservatórios. Segundo Guerra *et al.* (1999), a erosão acelerada pelas águas é responsável por 56% da degradação dos solos do mundo.

Já no Brasil, o problema da erosão retrata-se pelo somatório de um rápido desenvolvimento urbano e agrícola, solos frágeis, isto é, susceptíveis aos processos de erosão hídrica, e totais pluviométricos bem elevados, o que agrava ainda mais os processos de degradação do solo.

Sabe-se que o fenômeno erosivo acelerado é mais significativo nas regiões das principais bacias sedimentares do Brasil, como a Bacia Amazônica e seus arenitos terciários das formações Alter do Chão e Manaus; a Bacia do Paraná, particularmente onde ocorrem os arenitos do Grupo Bauru e arenitos das formações Botucatu e Pirambóia; e as Bacias Litorâneas, especialmente os sedimentos terciários da Formação Barreiras (ABGE, 1998).

* Professor Adjunto, CECS- Centro de Engenharia, Modelagem e Ciências Sociais Aplicadas- Engenharia Ambiental e Urbana, Universidade Federal do ABC. E-mail: claudia.paiva@ufabc.edu.br

** Professora Titular, ITA-Instituto Tecnológico de Aeronáutica, Divisão de Engenharia Civil-Departamento de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental. E-mail: iria.vendrame@gmail.com

A intensificação do uso da terra, principalmente sob o ponto de vista agrícola, em geral provoca a eliminação da cobertura vegetal natural e promove o aparecimento de processos erosivos acelerados. Pinto e Lombardo (2004) salientam que este cenário ocorre em larga escala na região sudeste do Brasil, onde a erosão hídrica, gerada pelo escoamento superficial, remove extensas camadas de solos agricultáveis.

Desta forma, pode-se dizer que uma grande parte dos municípios do Brasil apresenta problemas de degradação de solos por processos erosivos, causados principalmente pela concentração das águas de escoamento superficial e por uma intervenção antrópica indiscriminada.

Em 1997, o Departamento de Águas e Energia Elétrica em conjunto com o IPT (Instituto de Pesquisas Tecnológicas) concluíram o Diagnóstico da Erosão no Estado de São Paulo. Foram cadastradas cerca de 6700 erosões no Estado, sendo a maioria de médio a grande porte (voçorocas). Segundo Amorim (1996), no Estado de São Paulo, a perda anual devido à erosão é de aproximadamente 194 milhões de toneladas de terras férteis, dos quais 48,5 milhões de toneladas chegam aos mananciais em forma de sedimentos transportados, causando seu assoreamento.

Nota-se, portanto, que a erosão hídrica é um dos maiores problemas ambientais das cidades paulistas, as quais passaram, e ainda passam, por um processo de rápida urbanização sem planejamento e com práticas de uso e parcelamento do solo inadequadas e deficientes.

2 – OBJETIVOS

O presente trabalho visa contribuir para o conhecimento do potencial erodível dos solos pertencentes à bacia do rio Una - Taubaté, avaliando a perda laminar de solos, na referida bacia. Este objetivo fundamenta-se nas seguintes hipóteses: as perdas de solo estão entre os principais impactos ambientais da atualidade; a erodibilidade dos solos tropicais necessita ser melhor investigada e avaliada; a Bacia do rio Una está protegida ambientalmente por vários diplomas federais e finalmente, os ensaios laboratoriais propiciam uma melhor interpretação e compreensão do comportamento mecânico e hidráulico dos solos da bacia, evidenciando a importância do parâmetro erodibilidade no equacionamento dos processos erosivos.

3 – ASPECTOS GERAIS DA BACIA DO RIO UNA

A área da bacia do rio Una, é de aproximadamente 442,85 km² e está contida nas UTM's 7 430 000 m / 7 470 000 m e 420 000 m / 480 000 m, da projeção transversa de Mercator. Deste total, pode-se afirmar que aproximadamente 8% pertencem a Tremembé, 8% estão inseridos em Pindamonhangaba e os 84% restantes são território de Taubaté.

Geograficamente, a bacia do rio Una localiza-se na margem direita do rio Paraíba do Sul, possuindo terrenos que se caracterizam desde superfícies aplainadas com interflúvios sem orientação, até morros de serras restritas com topos arredondados. As vertentes apresentam perfis convexos e/ou retilíneos, com declividades variando entre 20 a 60% (IPT, 1995).

As unidades litoestratigráficas presentes, compiladas de IPT *apud* CPTI (2000), são: sedimentos aluvionares, presentes na área de várzea e no contorno das drenagens na cabeceira; o grupo Taubaté – Formações Caçapava e Tremembé, presentes na porção do curso médio da bacia; e as suítes graníticas pré-cambrianas. Seu substrato hidrogeológico é constituído por rochas cristalinas do embasamento. Nas adjacências das principais drenagens encontram-se os sedimentos recentes.

Os latossolos e argissolos vermelho-amarelos estão presentes na bacia, de acordo com dados levantados pelo Instituto Agrônomo de Campinas - IAC *apud* CPTI (2000). Aparecem também os gleissolos melânicos, sobretudo na área de várzea do rio Una com o rio Paraíba do Sul.

A bacia do rio Una encontra-se ambientalmente protegida por vários diplomas federais, que em determinada porção do território se sobrepõem. Destacando-se:

– Áreas de Preservação Ambiental – Dispõe sobre as áreas de Proteção Ambiental – APAS. Resolução Conama No. 10 (14/12/1988).

– Área de Preservação Permanente – Nascentes dos Rios. Estabelece medidas para a proteção de florestas existentes nas nascentes dos rios e fornece outras providências. Lei No. 7.754 (14/04/1989).

– Rio Paraíba do Sul – Dispõe sobre medidas de recuperação e proteção ambiental da Bacia Hidrográfica do Paraíba do Sul. Decreto No. 87.561 (13/09/1982).

4 – FATORES INTERVENIENTES NA ERODIBILIDADE

De um modo geral, as pesquisas sobre erosão do solo consideram como sendo parâmetros controladores dos processos erosivos: a erosividade da chuva, as propriedades dos solos, muitas vezes extraídas de tabelas que estipulam faixas de comportamentos pré-definidas ao material, características da cobertura vegetal e das encostas, como a declividade e o comprimento de rampa (Boardman, 1985; Guerra, 1998).

É notório que a análise de tais fatores mostra-se extremamente importante nos estudos de erosão. Porém, a identificação das características físicas peculiares ao solo em conjunto com a investigação de seu comportamento frente à ação erosiva da água, a partir de uma abordagem predominantemente experimental, podem contribuir de forma acentuada para o melhor entendimento e equacionamento dos processos erosivos.

A erodibilidade pode ser definida como a maior ou menor facilidade com que um solo sofre desagregação e posterior transporte de suas partículas constituintes. Segundo Vilar (1987), a erodibilidade está relacionada com a destacabilidade, sendo esta função das forças de atração existentes no solo, e a transportabilidade, que é função da granulometria do solo.

Nas últimas décadas a geotecnia dos solos tropicais brasileiros evoluiu significativamente, entretanto, a erodibilidade constitui uma importante propriedade mecânica destes solos, que ainda necessita de uma investigação mais criteriosa a luz de propriedades estabelecidas pela Mecânica dos Solos (Barraza Larios e Nóbrega, 2000).

Os valores da erodibilidade dos solos, obtidos por métodos indiretos (Freire e Pessoti, 1974; Bouyoucos, 1935; Bertoni e Lombardi Neto, 1990), nem sempre explicam o volume de sedimentos nas margens dos cursos d'água e os sinais de perda de material dos solos em muitos locais. Portanto, segundo Barraza Larios (2000), visando fornecer dados seguros para o planejamento do uso do solo e do controle da erosão, é necessária a determinação da erodibilidade dos solos por métodos diretos, utilizando-se equipamentos em campo e/ou laboratório.

Além dos fatores intrínsecos do solo, existem propriedades *in situ* que exercem influência na erodibilidade, destacando-se a umidade do solo e as condições de infiltração de água. De maneira geral, quanto maior for a capacidade do solo de absorver água, menor será o escoamento superficial e menor a erosão; por outro lado, quanto maior a umidade do solo, mais cedo o estado de saturação total do solo será atingido, aumentando, desta forma, o escoamento superficial (Pejon, 1992). Nogami e Villibor (1995) enfatizam que a erodibilidade é um fenômeno muito complexo, devido ao grande número de parâmetros envolvidos e a dificuldade de quantificá-los, já que via de regra os mesmos são interdependentes.

Por fim, parece ser de consenso geral no meio técnico-científico que a erodibilidade depende principalmente das seguintes características: granulometria, estrutura e macrofábrica, permeabilidade e infiltrabilidade, e coesão.

Pelo exposto, partindo-se do princípio que a erodibilidade tem um papel importante no entendimento da fenomenologia da erosão, visto que a mesma representa uma tendência natural do solo em gerar feições erosivas, procurou-se, neste trabalho, avaliar tal parâmetro através de dados levantados em campo e em ensaios laboratoriais.

5 – ESTUDOS DE CAMPO – COLETA DE AMOSTRAS

Com o intuito de verificar quais são as variáveis de maior influência na erodibilidade e quantificar tal parâmetro, amostras representativas dos solos presentes na bacia foram coletadas em diferentes pontos ao longo de áreas que apresentavam feições erosivas (Figura 1).



Fig. 1 – Feições erosivas localizadas na Fazenda Sant’Ana, bacia hidrográfica do rio Una em Taubaté-SP, Brasil.

Portanto, sendo o trabalho de caráter experimental, implicou diversas campanhas de campo visando desde a delimitação da bacia em estudo até a coleta de amostras de solo georreferenciadas. As primeiras visitas *in situ* possibilitaram o reconhecimento da bacia e a associação de um grau de erosão aos horizontes cadastrados, grau este estipulado com base em observações visuais. Basicamente buscou-se identificar os atributos do meio físico (condições naturais e/ou artificiais) responsáveis pelas feições erosivas identificadas.

Foram coletadas amostras deformadas e indeformadas representativas dos horizontes típicos da região em estudo. Quatro grupos de amostras foram selecionados, de acordo com suas características pedológicas e genéticas, com exceção dos sedimentos aluvionares. Assim, amostras representativas desses quatro grupos foram coletadas em diferentes pontos da bacia. A coleta de amostras foi orientada pelo mapa pedológico do Estado de São Paulo (Escala: 1:500 000) e trabalhos de campo prévios para identificação das principais formações pedológicas presentes na bacia.

Os locais de coleta das amostras foram escolhidos considerando-se, dentre outros fatores, a representatividade de típicos processos erosivos na região e o acesso ao local de amostragem.

A seguir (Quadro 1) estão cadastrados os principais pontos de coleta de amostras deformadas e indeformadas e sua localização na bacia do rio Una. Todas as amostras foram coletadas da camada superficial.

Quadro 1 – Pontos georreferenciados de coleta de amostras.

AMOSTRA No.	LOCALIZAÇÃO	PROFUNDIDADE	TIPO DE SOLO (Identificação Visual e Tátil)
22	Fazenda Sant'Ana	MEIA ENCOSTA (superior)	Solo residual arenoso, heterogêneo, com presença de veios de quartzo e coloração amarelada (c/ feições erosivas)
22	Fazenda Sant'Ana	MEIA ENCOSTA (inferior)	Solo residual arenoso, com presença de veios de quartzo e coloração amarelada (c/ feições erosivas)
24	Fazenda Sant'Ana	MEIA ENCOSTA (superior)	Solo residual areno-argiloso, homogêneo de coloração avermelhada (sem feições erosivas)
24	Fazenda Sant'Ana	MEIA ENCOSTA (inferior)	Solo residual areno-argiloso, homogêneo de coloração avermelhada (sem feições erosivas)
29	Sítio Pôr do Sol	SOPÉ	Solo residual argiloso, homogêneo de coloração vermelho escuro (sem feições erosivas)
31	Estrada	MEIA ENCOSTA (superior)	Solo residual de gnaiss, areno-siltoso, de coloração cinza e branca, com estruturas reliquias da rocha mãe (c/ feições erosivas)
31	Estrada	MEIA ENCOSTA (inferior)	Solo residual de gnaiss, areno-siltoso, de coloração cinza e branca, com estruturas reliquias da rocha mãe (c/ feições erosivas)

6 – OBTENÇÃO E ANÁLISE DE DADOS DE ERODIBILIDADE DOS SOLOS

Com o objetivo de trazer elementos para uma melhor e mais completa interpretação da erodibilidade dos solos estudados, foram resgatados alguns parâmetros geomecânicos de resistência à compressão simples sob condições distintas de umidade, a saber: umidade natural (w_{natural}), saturada (w_{saturado}) e seco (w_{seco}). A saturação foi obtida por capilaridade para um período de 3 horas, e para a condição w_{seco} as amostras secaram ao ar durante 24 horas. O cisalhamento dos corpos de prova foi realizado de acordo com o que preconiza a ABNT-NBR 12770 (Determinação da Resistência à Compressão não Confinada).

O Quadro 2 resume os resultados do ensaio de resistência à compressão, alguns índices físicos e expõe as classificações SUCS (Sistema Unificado de Classificação de Solos) e MCT (Miniatura Compactado Tropical).

Quadro 2 – Resumo dos resultados de classificação geotécnica, caracterização geotécnica e compressão simples.

Amostra	w	Classificações		σ_{rup} (kPa)	Argila (%)	Silte (%)	Areia (%)	w_{nat} (%)	n (%)	Sr (%)
		SUCS	MCT							
22†	w_{nat}	SM-ML	NSG'	3,81	8	10	78	10,4	45,05	34,11
	w_{seco}			2,70						
	w_{sat}			0,28						
24†	w_{nat}	CL	TG	10,76	38,5	14,4	43,6	15,8	54,34	35,85
	w_{seco}			8,90						
	w_{sat}			0,20						
29†	w_{nat}	CH	LG'	6,18	51	11	38	21,5	55,36	47,33
	w_{seco}			5,22						
	w_{sat}			0,91						
31†	w_{nat}	SM-ML	NSG'	–	2	16	80	8,3	47,08	24,90
	w_{seco}			–						
	w_{sat}			–						

Os ensaios de caracterização foram realizados segundo as normas da ABNT: Análise Granulométrica de Solos – NBR 7181/82, Massa Específica dos Grãos do Solo – NBR 6508/80, Limite de Liquidez – NBR 6459/84 e Limite de Plasticidade – NBR 7180/94.

Apresentam-se a seguir os resultados das análises para avaliação da erodibilidade das amostras coletadas.

6.1 – Metodologia MCT e a erosão

No ensaio de Absorção (Infiltrabilidade) é quantificada a velocidade de ascensão capilar pelo coeficiente de absorção (s), dado em $\text{cm}/\text{min}^{1/2}$. Tal coeficiente está relacionado à capacidade de absorção d'água dos solos e, portanto, à capacidade de desenvolvimento de escoamento superficial durante um evento pluviométrico.

Com os resultados obtidos (leituras em centímetros de água infiltrada e tempo em minutos) constrói-se o gráfico volume de água infiltrada *versus* raiz quadrada do tempo. Desta forma, o coeficiente de absorção (s) é dado pela seguinte fórmula:

$$s = \frac{(L_b - L_a) \times S_t}{10 \times (t_b - t_a) \times A_{cp}} \quad (1)$$

s – coeficiente de absorção ($\text{cm}/\text{min}^{1/2}$);

L_a, t_a – coordenadas do ponto a, da parte retilínea da curva obtida;

L_b, t_b – coordenadas do ponto b, da parte retilínea da curva obtida;

S_t – seção do tubo horizontal (cm^2).

A_{cp} – seção do corpo de prova (cm^2).

Repetindo-se as determinações para cada amostra, obteve-se um valor de s para cada condição de umidade ensaiada.

Após a realização dos ensaios de infiltrabilidade, os corpos de prova foram submetidos à perda de massa por imersão. A perda de solo por imersão (P) representa o grau de desagregação do solo sob a ação estática da água.

Segundo Nogami e Villibor (1979) uma reta com equação $P = 52s$, colocada no gráfico de Absorção (s) *versus* Perda por imersão (P), deve separar os materiais com alta erodibilidade dos de baixa erodibilidade.

Visando avaliar o papel do teor de umidade na estimativa da erodibilidade segundo o escopo da metodologia MCT, amostras indeformadas representativas dos horizontes expostos nos taludes da bacia foram também submetidas ao ensaio de infiltrabilidade e perda por imersão (P), nas condições seca ao ar e pré-umedecida, isto é, saturada por capilaridade.

Foi possível, portanto, avaliar a erodibilidade das amostras em presença da lâmina d'água sob diferentes condições de umidade.

No gráfico da Figura 2, são apresentados os resultados obtidos dos ensaios de infiltrabilidade e perda por imersão para as amostras 22, 24, 29 e 31, nas condições de umidade: natural, seca ao ar e saturada.

O critério de erodibilidade MCT aplicado aos solos estudados propiciou algumas considerações. Como resultado desta análise, a amostra 24, na condição de umidade natural, e a amostra 29, nas condições de umidade natural e saturada, apresentaram uma tendência mais estável frente à erosão, embora, independentemente da condição de umidade analisada, todas as amostras encontram-se no domínio dos materiais erodíveis (Figura 2).

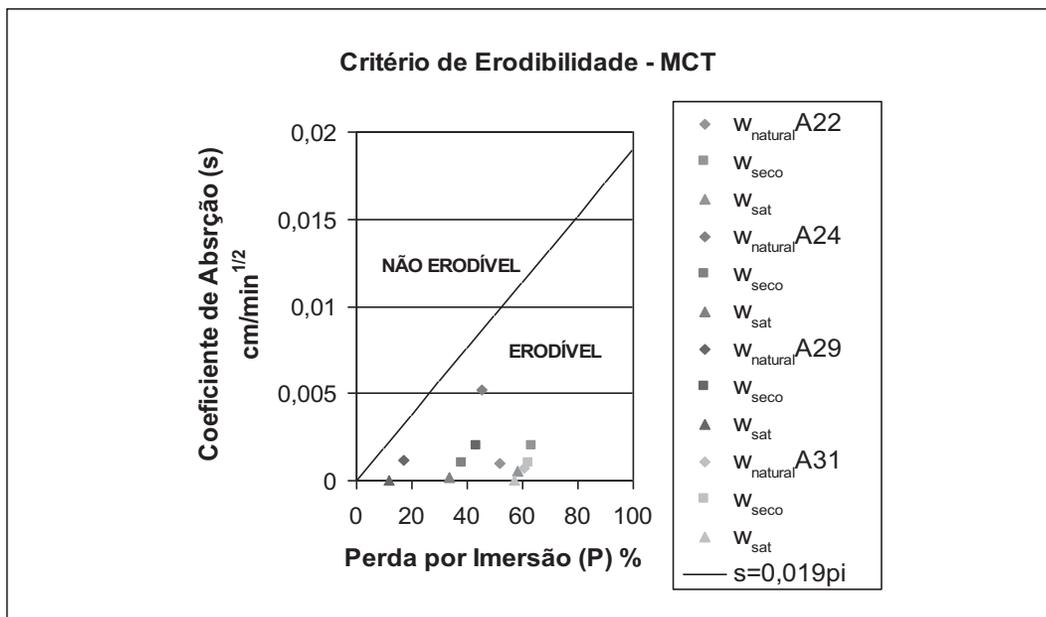


Fig. 2 – Gráfico de absorção (s) × perda por imersão (P).

Para interpretar qualitativamente a erodibilidade, o Quadro 3 sintetiza os valores para os índices de erodibilidade (E) estimados segundo a metodologia MCT.

Quadro 3 – Índices de erodibilidade estimados pela metodologia MCT.

Amostra	W_{nat}	W_{nat}	W_{seco}	W_{seco}	W_{sat}	W_{sat}	Índice de Erodibilidade		
	s ($\text{cm/min}^{1/2}$)	P (%)	s ($\text{cm/min}^{1/2}$)	P (%)	s ($\text{cm/min}^{1/2}$)	P (%)	Enat	Eseco	Esat
22†	0,001	52,03	0,002	63,26	0,00054	58,02	0,000999	0,001644	0,000484
24†	0,0052	45,27	0,001	38,36	0,00017	33,62	0,005973	0,001356	0,000263
29†	0,0012	16,98	0,002	43,45	0,00002	11,94	0,003675	0,002394	0,0000871
31†	0,0007	60,36	0,001	62,62	0,00004	56,89	0,000603	0,00083	0,0000366

Nota:

s = coeficiente de absorção ($\text{cm/min}^{1/2}$)

P = perda por imersão (%)

Enat = índice de erodibilidade para o teor de umidade natural

Eseco = índice de erodibilidade para o teor de umidade seco ao ar

Esat = índice de erodibilidade para o teor de umidade natural saturado por capilaridade

Observa-se, para todas as amostras ensaiadas, valores para o índice de erodibilidade (E) menores que 1, o que caracteriza materiais com alta erodibilidade. E ainda, perdas por imersão (P) maiores que 5% indicam solos que possuem baixa infiltrabilidade e elevada perda por imersão sob a ação estática da água (Nogami e Villibor, 1995).

6.2 – Ensaio de Inderbitzen e a erosão

Segundo Bastos *et al.* (1999) e Viana *et al.* (2002), o ensaio de Inderbitzen constitui um ensaio simples e promissor na avaliação geotécnica da erodibilidade. Dentro dos critérios para a realização deste ensaio, o Departamento Nacional de Estradas de Rodagem - DNER (1979) indica que a erodibilidade deve ser avaliada com os dados fornecidos nos primeiros 5 minutos de ensaio.

Desta forma, corpos de prova de amostras indeformadas, representativas dos horizontes expostos nos taludes da bacia, foram também submetidos ao ensaio para avaliação da erodibilidade baseado na concepção original de Inderbitzen (1961). Neste ensaio, são quantificadas as perdas de solo seco erodido com relação à área do corpo de prova e ao tempo de fluxo d'água sobre a amostra. As condições de umidade foram as mesmas utilizadas na metodologia MCT (natural, seca ao ar e pré-umedecida)

O Quadro 4 expõe os valores para as tensões cisalhantes críticas (τ_{herit}), que correspondem à mínima perda de solo e a taxa de erodibilidade (K), isto é, a perda de solo por unidade de área em função do tempo e da tensão cisalhante hidráulica aplicada, segundo as condições de declividade e vazão impostas na realização dos ensaios.

Quadro 4 – Perdas de solo (em g/cm²/min) para diferentes condições de fluxo (Q-vazão e i-inclinação de rampa) e teor de umidade das amostras; parâmetros τ_{herit} (em Pa) e K (em g/cm²/min/Pa).

VAZÃO:		Q=3 L/min		Q=7,5 L/min			
DECLIVIDADE:		i = 20g	i = 60g	i = 20g	i = 60g		
AMOSTRA	τ_h (Pa):	3,4	8,6	6,8	17,3	K (g/cm ² /min/Pa)	τ_{herit} (Pa)
*22†	w_{natural}	4,99	4,52	5,90	7,50	0,18	indet.
	w_{seco}	13,51	17,32	16,70	18,41	0,30	indet.
	w_{saturado}	8,22	13,23	11,57	13,76	0,34	indet.
24†	w_{natural}	0,05	2,77	0,42	3,83	0,28	2,67
	w_{seco}	0,08	2,40	0,40	3,25	0,23	2,46
	w_{saturado}	0,04	2,57	0,20	3,81	0,28	3,17
29†	w_{natural}	0,03	0,03	0,09	0,04	~ 0	indet.
	w_{seco}	0,98	1,59	1,57	3,17	0,16	indet.
	w_{saturado}	0,01	0,20	0,09	0,11	0,006	indet.
*31†	w_{natural}	3,82	9,49	9,34	9,60	0,31	indet.
	w_{seco}	7,11	9,75	15,12	15,09	0,45	indet.
	w_{saturado}	17,56	19,97	31,67	33,14	0,92	indet.

Nota: *Ensaio com pequeno tempo de duração.

A amostra 22 apresenta sensível variação de perdas de solo segundo as distintas condições de umidade. Comportamento oposto possui a amostra 24 onde se nota que a perda de solo não sofre alterações significativas para as diferentes condições de umidade, estando mais condicionada às variações das tensões cisalhantes aplicadas.

Confirma-se pelo ensaio de Inderbitzen o comportamento apresentado pela amostra 29 segundo a metodologia MCT que, para a condição seca ao ar, mostrou-se mais erodível, permanecendo nas demais condições (w_{natural} e w_{saturada}) com perdas de solo equivalentes.

A amostra 31 apresentou comportamento distinto para as diversas condições de umidade, possuindo as maiores perdas na condição saturada. Acredita-se que tal comportamento deve-se a influência das forças de sucção presentes em condições de umidade natural, pois, com o aumento

do teor de umidade das amostras, as forças de sucção foram reduzidas ou anuladas, facilitando muito o processo erosivo.

Por outro lado, dúvidas surgiram quanto à confiabilidade nas estimativas das tensões cisalhantes atuantes, compatível com o baixo grau de sofisticação do ensaio e pela dispersão dos resultados apresentados nos gráficos acima referidos.

De qualquer forma, vale registrar que foram estimados valores de tensões cisalhantes na ordem de grandeza de valores registrados na literatura técnica.

Constatou-se que, nos 5 minutos iniciais do ensaio, ocorreram grandes desprendimentos de partículas, particularmente para as amostras 22 e 31.

O solo da amostra 31 (solo saprolítico) confirmou em laboratório o comportamento observado *in situ*, com altos valores de K ($0,31 \text{ g/cm}^2/\text{min}/\text{Pa} \leq K \leq 0,92 \text{ g/cm}^2/\text{min}/\text{Pa}$) elevando-se para condições extremas de umidade. Bastos *et al.* (1999) encontraram valores semelhantes para K (variando de $0,28 \text{ g/cm}^2/\text{min}/\text{Pa}$ a $0,36 \text{ g/cm}^2/\text{min}/\text{Pa}$), estudando solos saprolíticos da Grande Porto Alegre. Os baixos valores estimados para a erodibilidade da amostra 29 (solo laterítico), em condições de umidade natural e saturada ($K \cong 0$), e a intensificação de sua erosão para amostras secas ao ar ($K = 0,16 \text{ g/cm}^2/\text{min}/\text{Pa}$), acordam com observações e valores ($K \cong 0,12 \text{ g/cm}^2/\text{min}/\text{Pa}$) citados por Guerra *et al.* (1999), Viana *et al.* (2002) e Bastos *et al.* (1999) para solos laterizados.

Cabe lembrar que, apesar dos resultados obtidos neste ensaio representarem de forma eficiente os efeitos erosivos do escoamento superficial, porém, não simulam o fenômeno da desagregação de partículas provocado pelo impacto da água em uma precipitação.

Confrontando os resultados obtidos pelos ensaios de Inderbitzen (valores de K) com os índices de erodibilidade estimados segundo a metodologia MCT, verifica-se que as amostras 24 e 29 apresentam uma tendência nítida, em ambas as análises, de maior resistência aos fenômenos erosivos hídricos.

Pelo Quadro 5 percebe-se a tendência mais erodível das amostras 22 e 31.

Quadro 5 – Valores de perdas de solos estimados segundo: ensaio de Inderbitzen e MCT.

Amostras	Perdas de Solo Inderbitzen (t/ha)	Perdas de Solo por Imersão MCT (%)
‡ 22	>20	52
‡ 24	< 20	45
‡ 29	<10 ^(*)	17
‡ 31	>20	60

(*) exceto para a condição w_{seco} .

Embora, tenha-se trabalhado com apenas quatro horizontes residuais, compreendendo duas argilas arenosas (Amostras 29 e 24) e duas areias siltosas (Amostras 22 e 31), todas com graus de evolução pedológica distintos, as mesmas podem ser consideradas, em certo grau, como representativas das ocorrências de solos da bacia do rio Una, uma vez que genericamente a distribuição dos solos na bacia está composta por solos dos tipos: Podzólico Vermelho Amarelo e Latossolo Vermelho Amarelo.

7 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os ensaios específicos para avaliação da erodibilidade (Inderbitzen, Infiltrabilidade e Perda por Imersão) destacaram-se como importantes ferramentas para auxiliar a compreensão do processo de erosão, observando boa correlação entre os resultados dos ensaios.

A erodibilidade dos solos depende praticamente da capacidade de desagregação e transporte de suas partículas. Dessa forma, conclui-se que, frente aos índices hídricos empregados nos ensaios realizados, os solos apresentaram-se pouco resistentes ao processo de erosão laminar.

O ensaio de Inderbitzen, apesar de não simular o fenômeno de desagregação de partículas provocado pelo impacto da água em uma precipitação, constitui um ensaio simples e promissor na avaliação geotécnica da erodibilidade. Entretanto, um monitoramento hidráulico mais apurado do ensaio pode conduzir à obtenção de valores mais acurados da tensão cisalhante hidráulica.

Nas análises realizadas, para algumas amostras, a erodibilidade se intensificou para valores extremos de umidade, isto é, condição seca e saturada. Isso sugere que a perda de coesão do solo, com a secagem ou umedecimento do mesmo, é um importante indicativo da susceptibilidade à erosão por fluxo superficial em solos residuais não saturados. Conclui-se que o teor de umidade inicial constitui um dos principais fatores na avaliação da erodibilidade de solos não saturados, principalmente daqueles fracamente estruturados e/ou com presença de argila, conforme exposto por Bastos *et al.* (1999).

O solo pertencente à amostra 29 mostrou-se menos susceptível ao processo erosivo. Este solo corresponde ao horizonte mais superficial da região (Solo Laterítico), portanto, é uma camada de proteção natural ao horizonte C (Solo Saprolítico - Amostras 22 e 31). Entretanto, foi necessário algum distúrbio nessa camada do solo para ocasionar o seu rompimento e, conseqüentemente, o surgimento de feições erosivas nas camadas subjacentes. Acredita-se que a ação antrópica traduzida pela ocupação de pequenas propriedades rurais e, por conseguinte, o manejo e uso da terra sem critérios sejam o agente deflagrador de tais eventos na bacia em estudo.

8 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABGE (1998). Associação Brasileira de Geologia de Engenharia. *Geologia de Engenharia*. Editores: Antônio Manoel dos Santos Oliveira & Sérgio Nertan Alves de Brito. 1. ed. FAPESP-CNPq, São Paulo, 587 p.
- ABNT – NBR 6459 (1984). *Limite de liquidez*. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro – RJ, 8p.
- ABNT – NBR 6508 (1980). *Massa específica dos grãos do solo*. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro – RJ, 2p.
- ABNT – NBR 7180 (1994). *Limite de plasticidade*. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro – RJ, 4p.
- ABNT – NBR 7181 (1982). *Análise granulométrica de solos*. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro – RJ, 8p.
- ABNT - NBR 12770 (1980). *Determinação da resistência à compressão não confinada*. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro – RJ, 2p.
- Amorim, D.A. (1996). *Levantamento de Áreas Degradadas por Processos Erosivos Lineares, da Bacia Hidrográfica do Ribeirão da Onça, Propostas para Recuperação, Brotas-SP*. Anais do

I Simpósio de Ciências da Engenharia Ambiental e do III Simpósio do Curso de Ciências da Engenharia Ambiental. CRHEA - Centro de Recursos Hídricos e Ecologia Aplicada. São Carlos-EESC-USP.

- Barraza Larios, M.R.; Nóbrega, L.H.P. (2000). *Caracterização Geotécnica de Solos Susceptíveis à Erosão*. Anais do XXIX Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola, Fortaleza, CE. Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola.
- Bastos, C.A.B.; Milititsky, J.; Gehling, W.Y.Y. (1999). *Emprego do Ensaio de Inderbitzen e da Metodologia MCT no Estudo da Erodibilidade de Solos Residuais da Grande Porto Alegre*. Anais do IX Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia. Porto Alegre/RS.
- Bertoni, J.; Lombardi Neto, F. (1990). *Conservação do Solo*. Ícone Editora, Barra Funda, SP, 355 p.
- Boardman, J. (1985). *Soil erosion, climatic vagary and agricultural change on the hydraulic on the South Downs around Lewes and Brighton*. Applied Geography, pp. 243-258.
- Bouyoucos, G.W. (1935). *The clay ratio as a criterion of susceptibility of soils to erosion*. J. Amer. Soc. Agron., Madison, Wisc., pp. 738-741.
- CPTI (Cooperativa de Serviços e Pesquisas Tecnológicas e Industriais) (2000). *Plano de bacias (UGRHI 01-02)*. Coordenação técnica de Antônio Melhem Saad. São Paulo, 1 (CD ROM).
- DNER (1979). *Pesquisa de Estabilidade de Taludes: Recomendação Para Proteção de Taludes Contra Erosão*. Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- Freire, O.; Pessoti, J.E.S. (1974). *Erodibilidade dos Solos do Estado de São Paulo*. Anais da E.S.A.L.Q., Vol. XXXI, pp. 333-336.
- Guerra, A.J.T.; Silva, A.S.; Botelho, R.G.M (1999). *Erosão e conservação dos solos: conceitos, temas e aplicações*. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 339 p.
- Guerra, A.J.T. (1998). *Processos Erosivos nas Encostas*. Geomorfologia: uma atualização de bases e conceitos. 3ª ed. Guerra, A. J. T. & Cunha, S. B. Bertrand Brasil, Rio de Janeiro, pp. 149-209.
- Inderbitzen, A.L. (1961). *A erosion test for soils*. Materials Research & Standards, vol.1, n.º7, pp. 553-554.
- IPT (INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS) (1995). *Mapa de Erosão do Estado de São Paulo*. São Paulo, Relatório Técnico 33.402.
- Nogami, J.S.; Villibor, D.F. (1979). *Soil Characterization of Mapping units for highway purposes in a Tropical area*. Bulletin of the International Association of Engineering Geology, 19, pp. 196-199.
- Nogami, J.S.; Villibor, D.F. (1995). *Pavimentação de Baixo Custo com Solos Lateríticos*. São Paulo.
- Pejon, O.J. (1992). *Mapeamento Geotécnico Regional da folha de Piracicaba-SP (Escala 1:100 000): Estudo de aspectos metodológicos, de caracterização e de apresentação dos atributos*. Tese de Doutorado, EESC-USP. 224 p.
- Pinto, S.A.F.; Lombardo, M.A. (2004). *O Uso de Sensoriamento Remoto e Sistema de Informações Geográficas no Mapeamento de Uso da Terra e Erosão do Solo*. Anais do XXI Congresso Brasileiro de Cartografia. São Paulo/SP.

- Viana, R.F.; Lima, D.C.; Martins, Jr., P.P.; Costa, L. M.; Marques, E.A.G. (2002). *Análises Paramétrica e Estatística de Dados Geotécnicos da Bacia das Codornas-MG*. Anais do 10º. Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia e Ambiental. Ouro Preto/MG. (CD ROM).
- Vilar, O.M. (1987). *Formulação de um modelo matemático para a erosão dos solos pela chuva*. Tese de Doutorado. EESC-USP. 196 p.