

ERODIBILIDADE DE SOLOS TROPICAIS NÃO SATURADOS NOS MUNICÍPIOS DE SENADOR CANEDO E BONFINÓPOLIS (GO)

João Guilherme Rassi ALMEIDA¹; Patricia de Araújo ROMÃO²; Márcia Maria dos Anjos MASCARENHA³; Mauricio Martines SALES⁴

(1) Professor da Pontifícia Universidade Católica de Goiás (PUC-Goiás). CEP: 74605-010. Email: cerradojoao@yahoo.com.br.

(2) Professora do Instituto de Estudos Sócio-Ambientais. Universidade Federal de Goiás (UFG). CEP 74.001-970. Endereço eletrônico: pat_iesa@yahoo.com.br.

(3) Professora da Escola de Engenharia Civil. Universidade Federal de Goiás (UFG). CEP: 74.605-220. Endereço eletrônico: marciamascarenha@gmail.com

(4) Professor da Escola de Engenharia Civil. Universidade Federal de Goiás (UFG). CEP: 74.605-220. Endereço eletrônico: sales.mauricio@gmail.com.

Introdução
Material e métodos
Apresentação de dados
Discussão
Conclusões
Agradecimentos
Referências bibliográficas

RESUMO - Condicionantes como o clima, o relevo, o tipo e o uso e ocupação do solo pelo homem são determinantes no entendimento da suscetibilidade de um terreno à erosão. Analisando especificamente o solo, alguns estudos mostram a importância da sucção na resistência do solo aos processos erosivos. O presente estudo tem como objetivo geral a análise da influência da sucção na erodibilidade de dois solos com distintos graus de intemperismo. Foram selecionadas duas regiões próximas ao município de Goiânia, correspondentes a solos classificados como Cambissolo e Latossolo. Para analisar a erodibilidade desses materiais foram realizados ensaios de Inderbitzen e desagregação, em amostras indeformadas, em diferentes condições iniciais de saturação. Verificou-se que as amostras com menores valores de sucções iniciais apresentaram-se mais resistentes à erodibilidade superficial e à estabilidade quando inundados e que o efeito da sucção pode atuar de maneira distinta dependendo do grau de intemperismo do solo. Além disso, constatou-se que a forma na qual ocorre o umedecimento interfere na intensidade da erodibilidade. Portanto, o conceito de erodibilidade, tradicionalmente associado às propriedades físicas e mineralógicas do solo, também depende da forma e intensidade do umedecimento, que estão relacionadas ao ciclo pluviométrico da região.

Palavras-chave: Erodibilidade. Solos Tropicais Não Saturados. Ensaio de Inderbitzen. Ensaio de Desagregação. Sucção.

ABSTRACT - The climate, relief, soil type and the use and occupation of land are important to understand the susceptibility of land to erosion. Only analyzing the soil, researchs show the suction importance in the soil strenght to erodibility. In this way, the present study aims to analyze the suction effect in erodibility of two soils with distinct weathering degree. Therefore, two areas near the city of Goiânia were selected, corresponding to a Cambisol soil type and a Oxisol type. With the aim to understand the erodibility of these materials Inderbitzen tests and slanking tests were carried out in undisturbed samples, with differents initials degree of saturation. The test results show the samples with lower initial suctions were more resistance to laminar erosions and slope stability when submerged and the suction effect changes with weathering degree. However, the wetting process influenced the erosion intensity. Therefore, the soil erodibility isn't only associated to physics and mineralogy characterization, but depends of the way and the intensity.

Keywords: Erodibility. Tropical Unsaturated Soils. Inderbitzen Test. Slanking Test. Suction.

INTRODUÇÃO

Condicionantes como o clima, o relevo, o uso e ocupação e o tipo de solo são determinantes no entendimento da suscetibilidade de um terreno aos processos erosivos. Especificamente quanto ao tipo de solo, a granulometria e a permeabilidade são consideradas as características mais relevantes na erodibilidade do material. No entanto, alguns estudos mostram a importância do grau de saturação e, conseqüentemente, da sucção na resistência do solo à perda de massa devido os processos erosivos (Fácio,1991; Bastos *et al.*, 2000, 2001; Jacintho *et al.*,2006).

Em regiões de climas tropicais ocorrem constantemente solos na situação não saturada, principalmente na região denominada de zona ativa, que é um perfil de solo compreendido entre a superfície terrestre e a zona freática. No domínio da zona ativa ocorre variação constante de umidade e saturação do solo. Estudos realizados em Brasília e Goiânia mostram que as variações sazonais da umidade do solo mais expressivas foram observadas nos primeiros três metros de profundidade do perfil de solo, com perda de até 14 % durante o ano (Mascarenha, 2002 e Luz, 2012). Ou seja,

grande parte dos processos erosivos inicia-se em solos não saturados.

Em relação à influência da sucção na erodibilidade dos solos, Fácio (1991), Bastos *et al.* (2000, 2001) observaram que os solos mais erodíveis são aqueles que apresentam maior perda de coesão com o umedecimento e inundação, sendo mais vulneráveis ao destacamento de partículas por cisalhamento hidráulico.

Silva *et al.* (2009) e Aquino *et al.* (2012) analisaram a perda de massa em solos do tipo Latossolo e do tipo Cambissolo. Os primeiros autores verificaram que chuvas ocorridas logo após o período seco resultaram em maiores perdas de massa do que quando essas chuvas ocorreram após uma prévia saturação do solo. Os segundos autores observaram diferenças significativas de perda de massa dos solos estudados, dependendo da situação da chuva (avançada, intermediária e atrasada), sendo que nas chuvas avançadas foram observadas maiores perdas de massa do solo. Possivelmente, essa situação ocorreu por causa da não saturação do solo no início do pico de chuva.

Além da perda de massa de solo, que pode ocorrer no caso do escoamento superficial, um fator importante a ser observado é a possibilidade de solapamento de bases de taludes devido a sua ruptura estrutural. Segundo Jacintho *et al.* (2006), a ruptura estrutural ocorre quando a fase ar é contínua e a inundação é total, devido à geração de

poropressão positiva que pode superar a coesão do solo. Quando a fase ar é descontínua, a variação da sucção com a saturação é mínima e dessa forma não ocorre ruptura estrutural. E se a inundação é parcial, o ar é expulso do solo à medida que ocorre a ascensão capilar e, neste caso, como a coesão do solo é maior que a poropressão positiva gerada também não ocorrerá a ruptura.

De acordo com Silva *et al.* (2009), a influência da sucção na erodibilidade do solo depende do grau de intemperismo. Segundo os autores, a influência da não saturação do solo é mais acentuada no solo tipo Latossolo que no solo tipo Cambissolo.

Vale ressaltar que, em geral, os estudos que analisam a influência da sucção e do grau de intemperismo na erodibilidade do solo referem-se somente a perdas de massa, e não fazem menção à estabilidade estrutural dos solos. Além disso, o fenômeno é considerado apenas macroscopicamente

O presente artigo tem como objetivo geral a análise da influência micro e macro estrutural da sucção na perda de massa e estabilidade estrutural de dois solos lateríticos com distintos graus de intemperismo, um do tipo Cambissolo e o outro do tipo Latossolo, ambos coletados em horizontes superficiais (na profundidade média de 50 cm) de perfis localizados no município de Senador Canedo e Bonfinópolis, próximo à Goiânia, no estado de Goiás.

MATERIAL E MÉTODOS

Para este trabalho foram selecionados dois solos lateríticos com distintos níveis de intemperismo. A geologia das áreas em que foram coletadas as amostras encontram-se descritas em Campos *et al.* (2003).

A amostra relativa ao Cambissolo associa-se a um substrato em que predominam rochas xistosas da unidade geológica Grupo Araxá e foi extraída no município de Senador Canedo - Goiás, mais precisamente na margem esquerda de um afluente do córrego Dois Irmãos, com coordenadas UTM, 707 644 m E, 8 158 889 m N (Fuso 22, Datum SAD-69).

A amostra de solo do tipo Latossolo encontra-se sobre o substrato rochoso

correspondente a rochas do tipo granada gnaisse e granulitos paraderivados, do Complexo Granulítico Anápolis-Itaçu e está localizada na margem direita do córrego Bela Vista, no município de Bonfinópolis - Goiás, com coordenadas UTM, 712 304 m E, 8 165 596 m N (Fuso 22, Datum SAD-69).

A Tabela 1 apresenta as características granulométricas das amostras, na Tabela 2 constam as características físicas das amostras em estudo e na Tabela 3 constam as composições mineralógicas dos materiais obtidos por meio de análises semiquantitativas dos ensaios de identificação mineralógica por

difração de raios-X, realizados no Laboratório da Eletrobrás Furnas.

As curvas de retenção das amostras de Latossolo e Cambissolo são apresentadas na

Figura 1 e foram obtidas por meio dos ensaios com papel filtro, seguindo a metodologia de Marinho (1994) e os ajustes foram executados utilizando-se as equações de Durner (1994).

Tabela 1. Características granulométricas das amostras (modificado de ALMEIDA, 2014).

Amostra	P (%)	A (%)	S (%)	Ar (%)	IA
Cambissolo	22	40	19	19	0,63
Latossolo	1	41	14	44	0,27

P: Pedregulho; A: Areia; S: Silte; Ar: Argila; IA: Índice de Atividade dos argilosminerais;

Tabela 2. Características físicas das amostras (modificado de ALMEIDA, 2014).

Amostra	Cambissolo	Latossolo
w_{nat} (%)	11	22
w_L (%)	38	48
w_p (%)	26	36
I_p (%)	12	12
γ_s (g/cm ³)	2,8	2,88
e	0,46	1,19
e_M	0,15	0,75
e_m	0,31	0,44
Classificação SUCS	SC-SM (areia argilo-siltosa)	ML (silte de baixa compressibilidade)

w_{nat} : umidade natural; w_L : limite de liquidez; w_p : limite de plasticidade; I_p : índice de plasticidade; γ_s : massa específica dos grãos; e: índice de vazios; e_M : macroporos; e_m : microporos; SUCS: Sistema Unificado de Classificação dos Solos.

Tabela 3. Composição mineralógica das amostras (Análise semiquantitativa)

Amostra	Cambissolo	Latossolo
Quartzo	22,1	61,4
Ilita	51,7	0,0
Caulinita	17,3	19,8
Gibbsita	0,0	13,2
Goetita	0,0	0,6
Rulito	2,1	2,2
Zircão	0,0	2,8
Anortita	2,8	0,0
Biotita	3,9	0,0

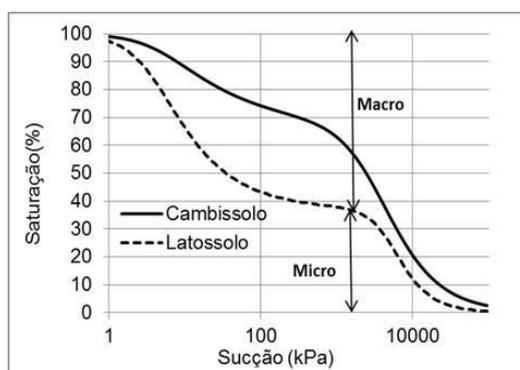


Figura 1. Curva característica solo-água (modificado de ALMEIDA, 2014).

Pode-se observar que o Latossolo possui uma curva de formato bimodal, típica de solos tropicais lateríticos, homogêneos e com alto teor de agregação da fração argilosa, apresentando dois valores de entrada de ar, um

na microestrutura (intra-agregado) e outro na macroestrutura (interagregado), conforme descritos por Camapum de Carvalho & Leroueil (2000). Segundo Romero & Vaunat (2000), os mecanismos de armazenamento de água são

distintos, caso ocorra na micro ou macroestrutura. Na primeira situação, o mecanismo dominante é a adsorção e na macroestrutura é a capilaridade.

Por outro lado, a curva referente à amostra de Cambissolo é típica de solos com várias dimensões de poros, devido à não uniformidade da curva granulométrica deste material. Neste caso o mecanismo predominante de armazenamento de água é apenas a capilaridade.

Para verificar a influência da sucção na erodibilidade dos solos, esses ensaios foram realizados em amostras com distintos teores de umidade inicial, os quais foram determinados por meio das curvas de retenção (Figura 1).

Os valores de umidade, saturação e sucção inicial nos quais foram ensaiados os corpos de prova (CP) são apresentados nas Tabelas 4 e 5.

Tabela 4. Parâmetros iniciais dos corpos de prova (CP) para os ensaios de Inderbitzen e de Desagregação - Cambissolo (modificado de ALMEIDA, 2014).

CP (Inderbitzen)	CI-1	CI-2	CI-3	CI-4	CI-5
CP (Desag.Total)	CT-1	CT-2	CT-3	CT-4	CT-5
CP (Desag.Parcial)	CG-1	CG-2	CG-3	CG-4	CG-5
w_0 (%)	4	7	10	12	16
S_0 (%)	25	43	61	74	98
ψ_0 (kPa)	8011	3416	1165	117	1,66

Condições: w_0 : umidade inicial; S_0 : saturação inicial; ψ_0 : sucção inicial.

Tabela 5. Parâmetros iniciais dos corpos de prova (CP) para os ensaios de Inderbitzen e de Desagregação - Latossolo (modificado de ALMEIDA, 2014).

CP (Inderbitzen)	LI-1	LI-2	LI-3	LI-4	LI-5
CP (Desag.Total)	LT-1	LT-2	LT-3	LT-4	LT-5
CP (Desag.Parcial)	LG-1	LG-2	LG-3	LG-4	LG-5
w_0 (%)	5	10	15	25	40
S_0 (%)	12	24	36	60	96
ψ_0 (kPa)	10035	5187	1804	14,5	1,2

Condições: w_0 : umidade inicial; S_0 : saturação inicial; ψ_0 : sucção inicial.

A escolha das umidades para a amostra de Cambissolo foi baseada na distribuição equitativa dos teores de umidade, variando desde a umidade higroscópica até a umidade de saturação. Por outro lado, as amostras do Latossolo foram estudadas nas seguintes condições: o CP-1 ($S_0=12\%$), na condição equivalente à região em que as sucções atuam nos microporos; o CP-2 ($S_0=24\%$) e o CP-3 ($S_0=36\%$), na umidade equivalente à região de transição dos valores de sucção que atuam nos micro e macroporos; e o CP-4 ($S_0 = 60\%$), na umidade equivalente à região em que a sucção atua na macroestrutura. Por fim, a condição para o CP-5 ($S_0 = 96\%$) foi equivalente àquela praticamente saturada, ou seja, referente à sucção quase nula.

Para a realização dos ensaios de Inderbitzen foram moldados 05 (cinco) corpos de prova para cada tipo de solo. Os

amostradores em que os solos foram moldados apresentam forma prismática, com aproximadamente 100 mm de lado e 50 mm de altura. Após moldados, os corpos de prova foram secos ao ar e, posteriormente, umedecidos até atingir os valores de teores de umidades mencionados nas Tabelas 4 e 5. Em seguida foram deixados em repouso em caixa térmica, encapsulados por 24 horas, a fim de se estabelecer o equilíbrio de umidade.

O aparelho de Inderbitzen utilizado nesta pesquisa foi construído por Aguiar (2009). O ensaio simula a ocorrência de escoamento superficial sobre um corpo de prova, colocado no final de uma rampa de acrílico. As perdas de massa de solo são medidas a partir do material retido em peneiras de nº 200 (abertura de 0,075 mm), colocadas abaixo da amostra. A metodologia de execução e análise dos

resultados desse ensaio foi proposta e descrita por Almeida (2014) e Almeida *et al.* (2013a).

Para este trabalho, o corpo de prova foi submetido a determinadas condições previamente escolhidas de vazão (50 ml/s), inclinação (10°) e tempo de escoamento (1 h). Nos intervalos de tempo de 1; 2,5; 5; 7,5; 10; 15, 20, 30, 40, 50 e 60 minutos foram trocadas as peneiras de mesma abertura, sem interrupção de fluxo de água. O solo erodido retido na peneira nº 200 (0,075 mm) foi coletado em cápsulas distintas em cada intervalo de tempo.

Ao término do ensaio de Inderbitzen foram realizados os cálculos para a estimativa da massa de solo perdida (M_T), equivalente à cada intervalo de tempo, por meio da comparação com a curva granulométrica, conforme a Equação 1, proposta por Almeida *et al.* (2013b).

$$M_T = \frac{100 \times M_{R200}}{100 - P_{P200}} \quad (1)$$

Onde:

M_T : massa total erodida;

M_{R200} : massa lavada retida na peneira nº 200 (0,075 mm);

P_{P200} : porcentagem passante na peneira nº 200 (0,075 mm), conforme curva granulométrica.

Os ensaios de desagregação foram realizados para prever a influência da água no solo quando submerso, verificando assim a estabilidade do corpo de prova. A metodologia utilizada foi a proposta por Santos (1997), com inundação total e parcial, em amostras indeformadas de solo, no formato de cubos com 60 mm de aresta. Para a realização deste ensaio foram moldados 05 (cinco) corpos de prova para cada amostra de solo. O processo de umedecimento foi o mesmo realizado para os ensaios de Inderbitzen.

No ensaio de desagregação submetido à imersão total, inunda-se o corpo de prova totalmente, instantaneamente, permanecendo assim por 24 horas. Para o ensaio de imersão parcial, a amostra é disposta em uma pedra porosa e a água é adicionada até à base da amostra. O corpo de prova é mantido nessa situação por 30 minutos. Em seguida, em etapas, adiciona-se água até a altura de 1/3 do corpo de prova, 2/3 e completa imersão do mesmo, aguardando 15 minutos em cada uma das etapas. Após a completa imersão, mantém-se o solo nesta condição por 24 h. A resposta do corpo de prova à imersão é observada e descrita.

APRESENTAÇÃO DE DADOS

Com a finalidade de verificar a influência da sucção na perda de massa total erodida, foi construído o gráfico de Sucção Inicial x Massa Total Erodida (Figura 2). Os valores de sucção

foram obtidos a partir das curvas de retenção apresentadas na Figura 1 e a massa total erodida, a partir do ensaio de Inderbitzen.

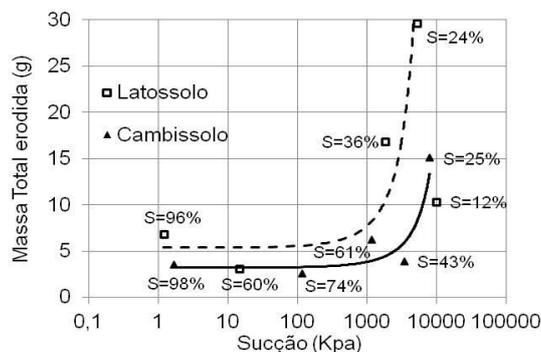


Figura 2. Sucção x massa total erodida no ensaio de Inderbitzen (modificado de ALMEIDA, 2014).

Em geral, para os dois tipos de solo, até um valor de sucção em torno de 1000 kPa esta tem pouca influência na erodibilidade do solo. A

partir deste valor, a perda de massa aumenta com o incremento da sucção inicial do solo.

Assim como no ensaio de Inderbitzen, o ensaio de desagregação foi realizado com 05 (cinco) corpos de prova de cada solo, com 05 (cinco) teores de umidade e saturação distintos, semelhantes aos teores de umidade e saturação iniciais adotados no ensaio de Inderbitzen, conforme apresentado nas Tabelas 4 e 5.

A Figura 3 apresenta os resultados do ensaio de desagregação por imersão total e parcial, nos 05 (cinco) corpos de prova referentes tanto ao Cambissolo quanto ao Latossolo, seguindo a metodologia de classificação de Holmgren & Flanagan (1977, segundo SANTOS, 1997).

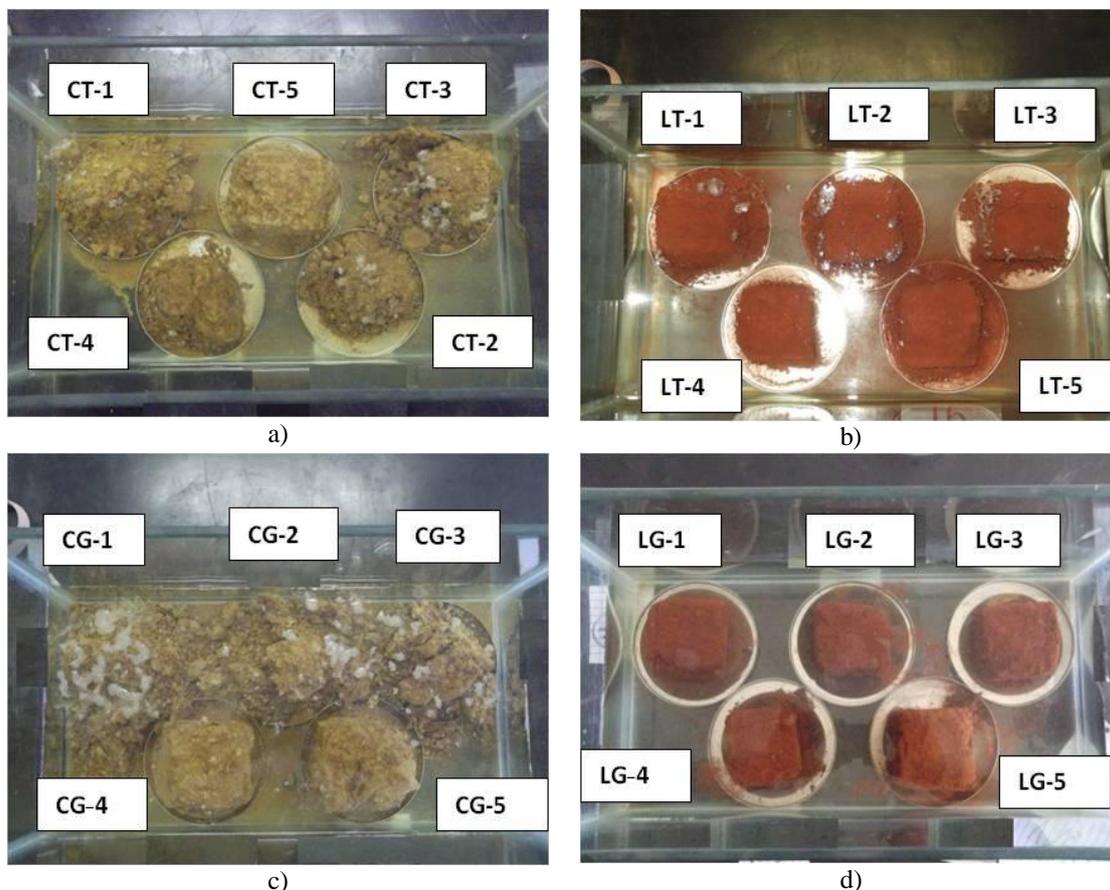


Figura 3. Ensaio de desagregação: a) Imersão total - Cambissolo; b) Imersão total - Latossolo; c) Imersão parcial - Cambissolo; d) Imersão parcial – Latossolo (modificado de ALMEIDA, 2014).

A Figura 4 apresenta a comparação entre as curvas granulométricas dos solos pesquisados e as curvas granulométricas do material retido na peneira de abertura de 0,074 mm durante a

execução dos ensaios de Inderbitzen na condição saturada e a Figura 5 apresenta imagem pós-ensaio do corpo de prova CI-1.

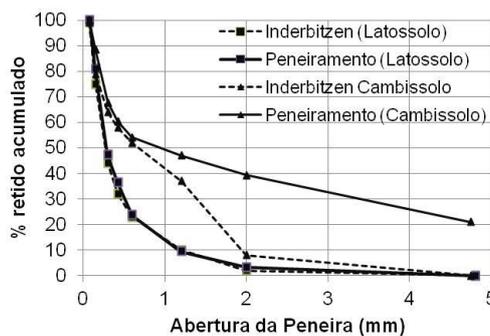


Figura 4. Porcentagem retida acumulada nas peneiras – comparação entre o ensaio de Inderbitzen e a curva granulométrica com defloculante (modificado de ALMEIDA, 2014).



Figura 5. Imagem pós-ensaio: CP CI-1(modificado de ALMEIDA, 2014).

DISCUSSÃO

Nos ensaios de Inderbitzen realizados no Cambissolo, o CI-3 ($S=61\%$) perdeu mais massa do que o CI-2 ($S=43\%$), ao contrário do esperado. Para conferir os resultados, repetiu-se o ensaio para a umidade inicial referente ao CI-2. Contudo os resultados apresentados foram semelhantes ao anterior. Para justificar o ocorrido, presume-se que o CI-3 possa ter perdido mais solo do que o esperado devido à heterogeneidade típica desse material.

Já nos ensaios de Inderbitzen realizados no Latossolo, o CP LI-1 ($S = 12\%$) apresentou perdas de massa menores que a tendência dos demais. Neste caso, existem dois pontos a serem considerados. O primeiro é a dificuldade da água de escoamento penetrar nos vazios intra-agregados (microporos), na ordem de 30 ηm , o que resultou em valores de saturação no Latossolo, ao final do ensaio, inferiores a 94%.

Outro ponto é que, neste caso, conforme comentado no item 2, a sucção ocorre devido ao fenômeno de adsorção e, portanto, não há meniscos capilares atuando nas interfaces interagregados. Dessa forma, o processo de escoamento não rompe meniscos, ou seja, não há alteração na coesão do solo, o que, conforme Bastos *et al.* (2001), é o motivo da maior perda de massa dos solos não saturados. Vale ressaltar que, em campo, e ao longo do ano, este solo sempre está com valor de saturação superior a 12%.

Embora a amostra com valor de saturação de 24% possua sucção atuando a nível microestrutural, os microporos, neste caso, possuem dimensão na ordem de 60 ηm e a sucção pode ocorrer tanto por adsorção quanto

por capilaridade. Portanto esse ponto segue a tendência geral.

Vários estudos corroboram com os resultados obtidos: há aumento da perda de massa do solo se há acréscimo no valor da sucção inicial (Bastos *et al.*, 2000, 2001; Fácio, 1991; Jacintho *et al.*, 2006; Silva *et al.*, 2009; Aquino *et al.*, 2012). Porém, não se tem conhecimento na literatura de estudos sobre a influência da sucção nos processos erosivos quando se considera sua atuação tanto na microestrutura quanto na macroestrutura do solo.

No entanto, vários modelos constitutivos para comportamento hidromecânico de solos não saturados ressaltam a importância da caracterização microestrutural em suas análises (Gens & Alonso, 1992; Alonso *et al.*, 1999, 2011, 2012). Dessa forma, a influência da sucção atuante na microestrutura na erodibilidade do solo é um tema que deve ser mais bem compreendido.

Em relação aos resultados dos ensaios de desagregação com imersão total no Cambissolo (Figura 3a), devido ao grau de saturação inferior a 61%, é possível afirmar que os corpos de prova CT-1 ($S_0=25\%$), CT-2 ($S_0=43\%$) e CT-3 ($S_0=61\%$) possuem a fase ar contínua, o que gera pressões positivas no interior das amostras, desestruturando-as. Vale ressaltar que, quanto menor o grau de saturação inicial, maior a desestruturação, pois quanto maior a quantidade de ar ocluso maior é a tendência da amostra à ruptura.

Os corpos de prova CT-4 ($S = 74\%$) e CT-5 ($S = 98\%$), devido ao reduzido valor de sucção inicial, praticamente mantiveram suas

formas e tamanhos originais, o que está de acordo com os resultados obtidos nos ensaios de Inderbitzen.

Quando imersas totalmente, as amostras referentes ao Latossolo (Figura 3b) mantiveram sua estrutura coesa, mas houve desprendimentos de solos na base dos corpos de prova. Esses desprendimentos foram maiores nos corpos de prova com maiores valores de sucção inicial, conforme também verificado no material referente ao Cambissolo.

Por outro lado, não houve desagregação nas amostras de Latossolo quando imersas em etapas (Figura 3d), independente do valor da sucção inicial. Isto ocorreu por causa da imersão gradual no ensaio, ou seja, as amostras passam por processos intermediários de saturação por capilaridade. Tal fato permite que, ao longo do ensaio ocorra um preenchimento também gradual dos vazios com água, com consequente expulsão da fase ar do solo, resultando em quase nenhuma desagregação.

No caso da imersão parcial realizada com as amostras referentes ao Cambissolo (Figura 3c), as amostras CG-1 ($S = 25\%$), CG-2 ($S = 43\%$) e CG-3 ($S = 61\%$) sofreram abatimento e as amostras CG-4 ($S = 74\%$) e CG-5 ($S = 98\%$) praticamente conservaram suas formas e tamanhos originais. Esse comportamento mostrou-se semelhante ao observado no ensaio com imersão total. Isto ocorre porque a heterogeneidade da amostra resulta em vazios não interligados, o que impossibilita a completa saturação do solo no decorrer do ensaio e consequentemente gera poropressão positiva.

Em suma, a saturação por capilaridade provoca efeitos distintos nos dois tipos de solo. Enquanto o material referente ao Cambissolo não altera o seu comportamento se saturado por capilaridade ou se inundado instantaneamente, o Latossolo praticamente não sofreu nenhuma alteração estrutural quando saturado por capilaridade, com posterior imersão parcial.

Segundo Albuquerque *et al.* (2000), Nunes & Casol (2008), Silva *et al.* (2009), Aquino *et al.* (2012) e Higashi *et al.* (2011), quanto maior o grau de intemperismo, verifica-se menor perda de massa de solo, devido à presença dos óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio, que conferem maior estabilidade aos agregados.

Neste trabalho observou-se o contrário, pois os corpos de prova do Latossolo tiveram maior perda de massa por erosão laminar do que os da amostra de Cambissolo, embora esse primeiro tivesse maior fração argilosa (43,9 %) e um expressivo teor de gibbsita (13,2%).

Esse comportamento pode ser explicado pela comparação entre as curvas granulométricas dos solos pesquisados e as curvas granulométricas do material retido na peneira de abertura de 0,074 mm durante a execução dos ensaios de Inderbitzen na condição saturada (Figura 4). Em geral, verifica-se uma similaridade entre as curvas até à dimensão dos grãos de 2mm. Ou seja, a vazão aplicada no ensaio (50 ml/s) é insuficiente para carrear grãos superiores a 2,0 mm.

Como o Latossolo não possui partículas maiores que 2,0 mm, o material erodido é completamente carregado, o que não ocorre com o Cambissolo, devido à grande quantidade de grãos superiores a 2,0 mm (22 %). Acredita-se que, com o aumento da vazão do ensaio, ocorrerá o carregamento dessas partículas e a consequente similaridade entre a curva granulométrica do material carregado no ensaio de Inderbitzen e a curva granulométrica do Cambissolo. Vale ressaltar que, ao final dos ensaios, verificou-se que as amostras de Cambissolo apresentavam partículas de diâmetros maiores que 2 mm soltas e não carregadas (Figura 5).

Em relação aos ensaios de desagregação, apresentados na Figura 3, tanto nos ensaios com imersão parcial quanto com imersão total, a instabilização é maior nas amostras equivalentes ao solo menos intemperizado, conforme esperado.

Neste caso, a coesão da argila é superior à poropressão positiva gerada pela inundação, provavelmente devido à presença de materiais cimentícios (óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio).

Estes resultados contradizem os obtidos por Camapum de Carvalho *et al.* (2006), que afirmam que quanto maior o grau de intemperismo, maior é a erodibilidade do solo. No entanto, nos solos do Distrito Federal, há predominância de ligações de pontes de argilas entre as partículas do solo, se comparadas às agregações com ligações compostas principalmente por óxidos e hidróxidos.

Segundo Cardoso (2002), as pontes de argilas são formadas por partículas com dimensões de argila e silte, constituindo o plasma e, por isso, também são denominadas por pontes de plasma e funcionam como uma cimentação muito fraca

comparada a outros solos. Os solos inseridos na região de estudo, ao contrário, tem predomínio das agregações. A Figura 6 apresenta uma fotomicrografia dessas pontes de argila de um solo em Brasília.

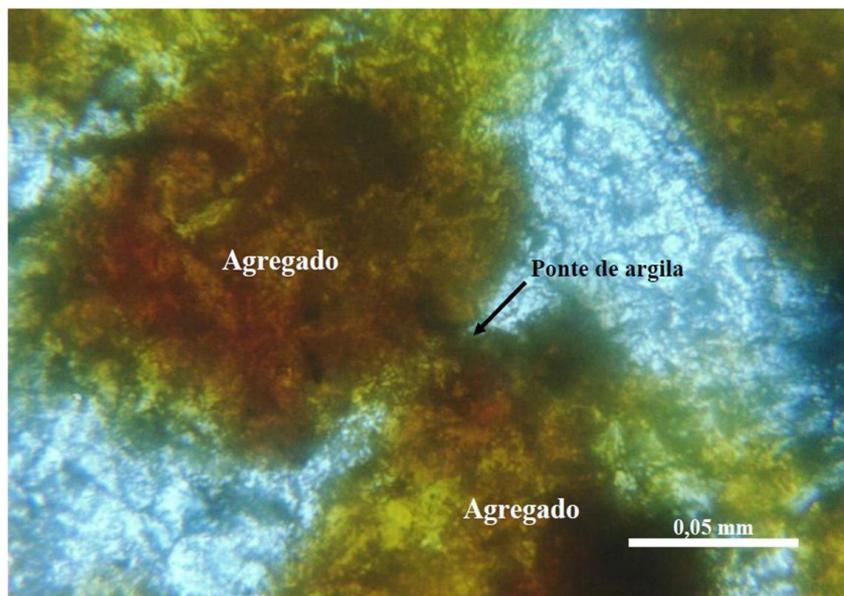


Figura 6. Ponte de argila entre dois agregados. Aumento 600x (Cardoso, 2002).

É importante ressaltar que os estudos comparativos de erodibilidade entre Cambissolo e Latossolo, aos quais foi possível

o acesso, referiram-se somente a perdas de massa, e não fizeram menção à estabilidade estrutural dos solos.

CONCLUSÃO

O material relativo ao Latossolo possui maior resistência à ruptura estrutural do que aquele relativo ao Cambissolo, conforme verificado nos ensaios de desagregação.

Em relação à erodibilidade superficial, as perdas de massa foram maiores no Latossolo do que no Cambissolo. No entanto, tal fato ocorreu devido à vazão de ensaio (50 ml/s) ser insuficiente para carrear partículas maiores que 2 mm de diâmetro, que representa 22% da massa seca de Cambissolo. Estas partículas ficaram soltas sobre os corpos de prova, conforme verificado ao final do ensaio e ao final das análises granulométricas do material retido.

A sucção influencia na erodibilidade dos solos lateríticos, e a erodibilidade aumenta com o aumento de sucção inicial do solo. No entanto, nos solos mais intemperizados, com estrutura com macro e microporos, o efeito da sucção pode atuar de maneira distinta da dos solos menos intemperizados, dependendo se a

sucção atue na micro ou na macroestrutura. Vale ressaltar que mais ensaios devem ser executados em amostras com baixos teores de saturação para validar essa teoria.

Em termos de estabilidade estrutural, se o processo de saturação é total ou parcial, a resistência do material relativo ao Cambissolo parece não alterar significativamente. Ao contrário, quando o avanço da frente de saturação ocorre de maneira parcial no Latossolo, o fenômeno de capilaridade garante maior estabilidade.

Por fim, observa-se que a maior erodibilidade do solo ocorre em amostras secas quando sofrem saturação devido ao escoamento superficial da água ou inundação abrupta. Dessa forma, fazendo um paralelo com a prática, a erodibilidade dos solos aumenta no início do período chuvoso, devido à ação das chuvas intensas e do baixo grau de saturação do solo. Portanto, o conceito de erodibilidade, tradicionalmente associado às propriedades

físicas e mineralógicas do solo, também depende da forma e intensidade do

umedecimento, que estão relacionadas ao ciclo pluviométrico da região.

AGRADECIMENTOS

Agradecimentos ao CNPq pela bolsa de pesquisa do primeiro autor, à Petrobras pelo financiamento da pesquisa e à Eletrobras Furnas pela execução dos ensaios de difração de raio-X.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. AGUIAR, de V. G. **Bacia hidrográfica do córrego granada – Aparecida de Goiânia – GO: os processos erosivos e a dinâmica espacial urbana**. Goiânia, 2009. 97 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Escola de Engenharia Civil da Universidade Federal de Goiás,
2. AQUINO, R.F.; SILVA, M.L.N; FREITAS, D.A.F; CURI, N; AVANZI, J.C. Soil losses from typic cambisols and red latosol as related to three erosive rainfall patterns. **Revista Brasileira Ciências do Solo**, v.37, p. 213-220, 2012.
3. ALBUQUERQUE, J.A.; CASSOL, E.A; REINERT, D.J. Relação entre a erodibilidade em entressulcos e estabilidade dos agregados. **Revista Brasileira Ciências do Solo**, v.24, p. 141-151, 2000.
4. ALMEIDA, J.G.R. **Erodibilidade de solos tropicais não saturados nos municípios de Senador Canedo e Bonfinópolis – GO**. Goiânia, 2014. 128p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Escola de Engenharia Civil da Universidade Federal de Goiás.
5. ALMEIDA, J.G.R; MEDEIROS, G.F, ROMÃO, P.A; MASCARENHA, M.M.A. Proposta metodológica para execução e análise dos resultados do ensaio de inderbitzen no estudo de erodibilidade laminar. In: CONGRESSO BRASILEIRO EM GEOLOGIA DE ENGENHARIA, 14 , 2013, Rio de Janeiro.**Anais ...**, Rio de Janeiro:ABGE, 2013a. v.1, p 1-8.
6. ALMEIDA, J. G. R.; ROCHA, M. F. ; GITIRANA JR., G. de F. N. A influência da sucção na erodibilidade de um solo compactado: estudo de caso em um solo erosivo do Córrego Barreiro. In: SIMPÓSIO DE PRÁTICA DE ENGENHARIA GEOTÉCNICA NA REGIÃO CENTRO-OESTE E 6º SIMPÓSIO SOBRE SOLOS TROPICAIS E PROCESSOS EROSIVOS – GEOCENTRO, 3 , 2013, Cuiabá.**Anais...** Cuiabá: ABMS, 2013b. p.63-69.
7. ALONSO, E.; VAUNAT, J.; GENS, A. Modelling the mechanical behaviour of expansiveclays. **Engineering Geology**, v.54, p. 173-183, 1999.
8. ALONSO, E.; ROMERO, E. ; HOFFMANN, C. Hydromechanical behaviour of compacted granular expansive mixtures: experimental and constitutive study. **Geotechnique**, v. 61, n.4, p. 329–344. doi:10.1680/geot.2011.61.4.329, 2011.
9. ALONSO, E. E.; PINYOL, N. M.; GENS, A. Compacted soil behaviour: initial state, structure and constitutive modelling. **Geotechnique**, p. 1–16. doi:10.1680/geot.11.P.134, 2012.
10. BASTOS, C. A. B.; MILITITSKY, J.; GEHLING, W. A avaliação da erodibilidade dos solos sob o enfoque geotécnico – pesquisas e tendências. **Teoria e prática na engenharia civil**, v. 1, p.17-25, 2000.
11. BASTOS, C. A. B.; GEHLING, W. Y. Y. & MILITITSKY, J. A relação entre a erodibilidade e propriedades geomecânicas de solos residuais não saturados. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SOLOS NÃO SATURADOS, 4, 2001, Porto Alegre. **Anais ...**,Porto Alegre: ABMS, 2001.p. 521-534.
12. CAMAPUM DE CARVALHO, J. & LEROUEIL, S. Modelo de normalização da curva característica. In: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 32 , 2000, Brasília.**Anais...**, Brasília: ABPv, 2000. p. 175-183.
13. CAMAPUM DE CARVALHO, J.; SALES, M.M.; MORTARI, D.; FÁZIO, J. A.; MOTTA, da N. O.; Francisco, R. A. Processos erosivos. In: CAMAPUM DE CARVALHO, J.; SALES, M. M.; SOUZA, N. M.; MELO, M. T. S. (Organizadores). **Processos erosivos no centro-oeste brasileiro**. 1ª ed.,Brasília: FINATEC, p. 39-88, 2006.
14. CAMPOS, J. E. G.; RODRIGUES, A. P.; ALMEIDA, L.; RESENDE, L.; MAGALHÃES, L. F.; SÁ, M. A. M. **Diagnóstico hidrogeológico da região de Goiânia**. Goiânia: Superintendência de Geologia e Mineração, 125 p, 2003.
15. CARDOSO, F. B. F. **Caracterização físico-química e estrutural de solos tropicais do Distrito Federal**, Brasília, 2002. 357 p. Tese (Doutorado em Geotecnia) - Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Brasília.
16. DURNER, W. Hydraulic conductivity estimation for soils with heterogeneous pore structure. **Water Resources Research**, v. 30, n.2, p. 211–223, 1994.
17. FÁCIO, J. A. **Proposição de uma metodologia de estudo da erodibilidade dos solos do Distrito Federal**. Brasília, 1991. 122p. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Brasília.
18. GENS, A. & ALONSO, E. A framework for the behaviour of unsaturated expansive clays. **Canadian Geotechnical Journal**, v.29, p.1013-1032, 1992.
19. HIGASHI, R.A.R; MACARRINI, M.; DAVISON DIAS, R. On the erosive potential of some weathered soils from Southern Brazil. **Soils and Rocks**, v.34, n. 3, p.219-225, 2011.
20. JACINTHO, E. C.; CAMAPUM DE CARVALHO, J.; CARDOSO, F. B. ; Santos, dos R. M. M.; Guimarães, R. C. ; Lima, M. C. G. Solos tropicais e o processo erosivo. In: Camapum de Carvalho, J.; Sales, M. M.; Souza, N. M.; Melo, M. T. S. (Organizadores). **Processos erosivos no centro-oeste brasileiro**. 1ª ed., Brasília: FINATEC, p 93-147, 2006
21. LUZ, G. C. **Influência da relação solo-atmosfera no comportamento hidromecânico de solos tropicais não saturados: estudo de caso – Município de Goiânia-GO**, Brasília, 2012. 246 p. Tese (Doutorado em Geotecnia) - Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Brasília.
22. MARINHO, F. A. M. Medição de sucção com o método do papel filtro. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA DE FUNDAÇÕES, 10, 1994,. Foz do Iguaçu. **Anais...** Foz do Iguaçu: ABMS, 1994. P.2: 515-522.
23. MASCARENHA, M. M. A. **Influência do Recarregamento e da Sucção na Capacidade de Carga de Estacas Escavadas em Solos Porosos Colapsíveis**, Brasília, 2003. 141 p. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Brasília.
24. NUNES, M.C.M. & CASOL, E.A. Estimativa da erodibilidade em entressulcos de latossolos do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira Ciências do Solo**, v.32, p.2839-2845, 2008.
25. ROMERO, E. & VAUNAT, J. (2000). Retention curves of deformable clays. In: Tarantino & Mancuso (editores.). **Experimental Evidence and Theoretical Approaches in Unsaturated Soils**, Rotterdam, p.91-106, 2006.

26. SANTOS, R. M. M. **Caracterização geotécnica e análise do processo evolutivo das erosões no Município de Goiânia**. Brasília, 1997. 138 p. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Brasília.
27. SILVA, A. M.; SILVA, M.L.N; CURI, N.; AVANZI, J.C; FERREIRA, M.M. Erosividade da chuva e erodibilidade

de cambissolo e latossolo na região de Lavras, sul de Minas Gerais. **Revista Brasileira Ciências do Solo**, v. 33, p. 1811-1820, 2009.

Manuscrito recebido em: 25 de Fevereiro de 2015
Revisado e Aceito em: 20 de Maio de 2015