

EFEITOS DA COMPACTAÇÃO SOBRE A REDUÇÃO DA ERODIBILIDADE DE UM SOLO RESIDUAL DE GNAISSE

Paulo Vinícius da Silva¹; Marcelo Heidemann²; Helena Paula Nierwinski³

Resumo – Neste trabalho discutem-se os resultados obtidos em experimentos desenvolvidos para avaliar os efeitos da desestruturação de um solo residual sobre seu potencial erosivo e a capacidade de, por meio da compactação, restituir-se a resistência à erosão. Trata-se de um solo residual saprolítico de gnaiss que ocorre no estado de Santa Catarina. Quando obras de terra expõem estes materiais à ação da água, feições erosivas severas acabam por se desenvolver. A avaliação da erodibilidade foi feita a partir da metodologia MCT que se baseia em ensaios de infiltrabilidade e de perda de massa por imersão modificado. Foram ensaiados corpos de prova indeformados e compactados sob energia normal, intermediária e modificada, e em umidade natural ou ótima, e secos após 24, 48 e 96 horas. O solo é inerentemente erosivo, mas a eliminação da macroestrutura natural torna-o ainda mais suscetível à erosão. Mesmo a compactação sob energia modificada não é capaz de reduzir a erodibilidade. A secagem reduz levemente o potencial erosivo do solo quando compactado, independentemente da energia de compactação, mas aumenta claramente o potencial erosivo do solo indeformado.

Abstract – In this work one discusses the results obtained in experiments developed to evaluate the effects of the removal of structure of a residual soil on its erodibility and the potential of restore the erosion strength by means of compaction. The soil tested is a gneiss saprolitic residual soil that occurs in the Santa Catarina state. When earthworks expose such soils, severe erosive features are developed by the action of rainfalls. The erodibility assessment was conducted using the MCT methodology, based on tests of infiltrability and modified loss of mass by immersion. Undisturbed and compacted specimens were tested in natural moisture and air dried after 24, 48 and 96 hours. Normal, intermediate, and modified energies were used in dynamic compaction. The soil is naturally erosive, but the removal of its natural macrostructure increases the erodibility. Even compaction under modified energy do not increase the erosion resistance. The drying reduces the erosive potential of the compacted soil, regardless of the compaction energy, but clearly increases the erosive potential of the undisturbed soil.

Palavras-Chave – Solos residuais; potencial erosivo; compactação; erodibilidade.

¹ Engº Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, (47) 98812-6481, paulo.ribeiro@outlook.com.br

² Engº Civil, D.Sc., Universidade Federal de Santa Catarina, marcelo.heidemann@ufsc.br

³ Engª Civil, D.Sc., Universidade Federal de Santa Catarina, helena.paula@ufsc.br

1. INTRODUÇÃO

A erosão consiste em um conjunto de processos pelos quais os materiais da crosta terrestre são removidos e transportados de um ponto a outro para aí serem depositados. Quando a erosão é causada pela água é dita erosão hídrica (Bastos, 1999). Este processo pode ser fortemente acelerado por meio da ação antrópica. Isto se dá basicamente pela mudança da topografia que promove aumento na energia e da concentração do fluxo de água, bem como pela exposição de solos a ação da água. Em áreas urbanas a erosão hídrica causa problemas à infraestrutura, como o assoreamento de corpos hídricos, reservatórios e redes de esgoto pluvial, a modificação da configuração de terrenos de taludes e consequente ruptura dos mesmos, a formação de voçorocas e a degradação dos pilares de pontes e piers (Briaud e Ho, 2010; Verstraeten e Poesen, 2000; Vilar, 1987).

Mensurar a erosão dos solos tem sido um dos principais alvos da pesquisa científica e dos programas governamentais desde o início do século XX (Garcia-Ruiz et al., 2015), e tendo em vista seus impactos ambientais, econômicos e sociais continua sendo um tema relevante. A erodibilidade do solo, conforme Wang et al. (2013), consiste na suscetibilidade do solo em ser erodido. Nogami e Villibor (1995) descrevem a erodibilidade específica como a resistência intrínseca do solo ao destacamento das partículas sob ação dinâmica do fluxo superficial e das gotas de chuva.

Dentre as propriedades do solo que impactam na erodibilidade pode-se citar a resistência ao cisalhamento, a granulometria, a permeabilidade, a mineralogia e a estrutura (Bastos, 1999; Wischmeier e Smith, 1978; Watson e Laflen, 1986, Kimiaghali et al., 2016; Duiker et al., 2001; Lal, 1990). A correlação entre a suscetibilidade à erosão e tais propriedades se mostra bem explorada quando a metodologia MCT (Nogami e Villibor, 1979) é empregada. Embora sua aplicação esteja praticamente restrita ao Brasil, diversos trabalhos têm mostrado resultados interessantes ao utilizar esta proposição, vide Bastos (1999), Higashi, (2006), Molinero Junior (2010) e Couto (2015).

O critério de erodibilidade de MCT foi desenvolvido tendo como referência o comportamento de solos tropicais saprolíticos e lateríticos. A estruturação tem forte controle sobre o comportamento geomecânico de tais materiais, inclusive sobre a erodibilidade, porque pode fornecer uma parcela adicional de resistência ao cisalhamento decorrente da coesão. Conforme Bastos (1999), a fração silte de solos saprolíticos caulíníticos-micáceos, ao contrário de siltes quartzosos de clima temperado, impõe alta erodibilidade aos solos tropicais.

A compactação também pode ter efeito sobre a erodibilidade dos solos. Segundo Silva (2009), a técnica de envelopamento diminui em torno de 70% e erosão sofrida quando comparado com o solo desprotegido. Hanson et al. (2010) mostram que a umidade de compactação no ramo seco das curvas exerce grande influência sobre a erodibilidade sendo o valor mínimo obtido em teores de umidade próximos da umidade ótima.

Na área de estudos deste trabalho solos saprolíticos de gnaiss são frequentemente escavados na regularização de terrenos ou extraídos para serem usados como material de empréstimo para aterros compactados, situação em que ficam expostos à ação de chuvas, tornando-se mais suscetíveis à erosão. Assim, este trabalho apresenta um estudo acerca dos efeitos da destruição da estrutura natural de um solo residual de gnaiss sobre seu potencial erosivo e da capacidade de, por meio da compactação, restituir-se a resistência à erosão.

2. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA ESTUDADA

O município de Joinville fica localizado na região sul do Brasil. Sua mancha urbana estende-se predominantemente sobre áreas planas, que correspondem a depósitos sedimentares recentes. A Figura 1 mostra o arcabouço geológico do município.

A ocupação urbana se dá nas áreas de planícies sedimentares, mas também sobre algumas áreas de elevação, as quais correspondem aos embasamentos metamórficos, tipicamente gnaisses e migmatitos, que se caracterizam por espessos perfis de alteração. Devido à urbanização estes terrenos são cortados e o solo extraído é usado como material de empréstimo em aterros. Assim, a associação de exposição desses solos e significativos níveis pluviométricos (>2000 mm/ano) cria um ambiente em que a erosão hídrica é potencializada.

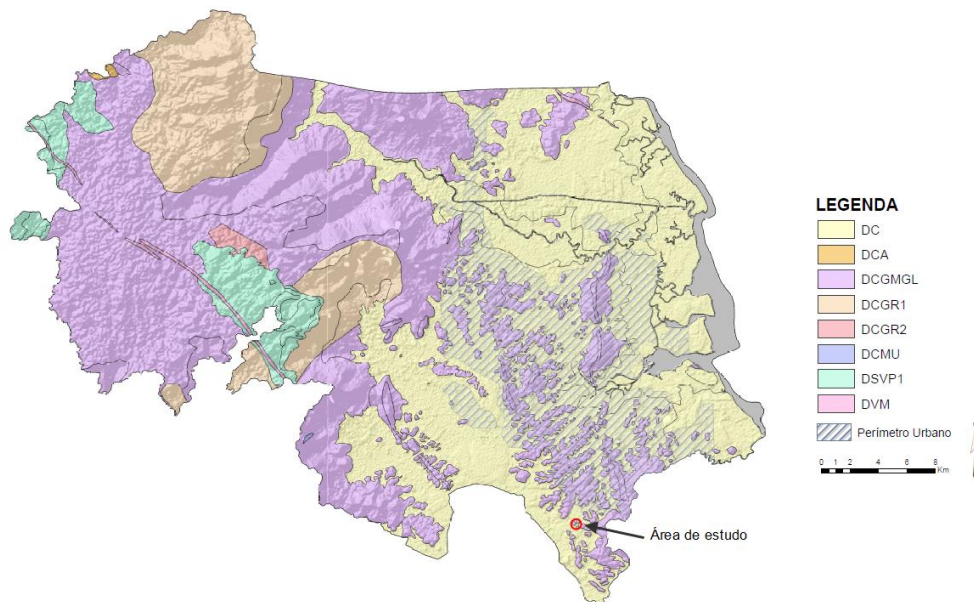


Figura 1. Arcabouço geológico do município (Geodiversidade Estadual do CPRM, datum SIRGAS 2000). DC/DCA: planícies sedimentares cenozoicas inconsolidadas; DCGMGL: migmatitos/gnaisses/granulitos; DCGR1/DCGR2: granitoides; DCMU: corpos máficos/ultramáficos; DSV1: Sequências vulcanosedimentares; DVM: Vulcanismo fissural mesozoico.

3. CAMPANHA EXPERIMENTAL

O ponto de coleta dos corpos de prova está situado nas coordenadas 715094.56 E; 7078267.86 S, a 23 m acima do nível do mar. A Figura 2 mostra a feição do terreno na área de coleta das amostras. O solo estudado foi coletado de forma indeformada e deformada conforme procedimentos recomendados na ABNT NBR 9604/2016 no horizonte saprolítico deste perfil.



Figura 2. Feições Erosivas na Área de Estudos

A caracterização física contemplou ensaios de densidade real dos grãos (ABNT NBR 6458/2017), limites de liquidez (ABNT NBR 6459/2016), limite de plasticidade (ABNT NBR

7180/2016) e granulometria (ABNT NBR 7181/2016). O agente defloculante empregado foi o hexametáfosfato de sódio. Ensaios de granulometria sem uso de defloculante também foram executados a fim de avaliar os efeitos da estruturação à textura dos materiais.

As curvas de compactação do solo estudado foram determinadas para as energias de compactação normal (600 kJ/m³), intermediária (1300 kJ/m³) e modificada (2750 kJ/m³), por meio de ensaios de compactação Proctor, conforme norma ABNT NBR 7182 (2016). Foram empregadas amostras sem reuso, secas previamente ao ar, e preparadas conforme a norma ABNT NBR 6457 (2016).

A caracterização do potencial erosivo foi feita a partir de dois ensaios: infiltrabilidade e perda de massa por imersão modificado. Estes ensaios fazem parte do conjunto de procedimentos experimentais da metodologia MCT, proposta por Nogami e Villibor (1979). Estes ensaios foram executados em corpos de prova indeformados e moldados por compactação dinâmica, tal qual no ensaio de compactação Proctor.

Os corpos de prova indeformados foram extraídos dos blocos obtidos em campo usando anéis cilíndricos de PVC com as dimensões específicas para execução dos ensaios de infiltrabilidade (50 mm de altura e 48 mm de diâmetro) e perda de massa por imersão modificado (25 mm de altura e 48 mm de diâmetro). Os corpos de prova compactados dinamicamente foram extraídos de corpos de prova do solo compactado em cilindros Proctor de 1000 cm³. A compactação foi realizada com o solo em umidade ótima de compactação para cada uma das energias utilizadas nesse trabalho. Os ensaios foram executados em corpos de prova sob umidade natural ou de moldagem e secos ao ar por períodos de 24, 48 e 96 h. Assim, ao todo foram preparados 32 corpos de prova: 16 para ensaios de infiltrabilidade e 16 para ensaios de perda de massa por imersão modificado. As condições e nomenclatura dos corpos de prova são descritas na matriz apresentada na Tabela 1.

Tabela 1. Nomenclatura dos corpos de prova ensaiados

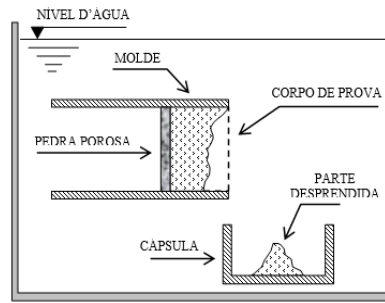
Umidade \ Condição	Indeformado	Energia Normal	Energia Intermediária	Energia Modificada
Natural/moldagem (UM)	IND-UM	EN-UM	EI-UM	EM-UM
Seco ao ar 24 h	IND-24	EN-24	EI-24	EM-24
Seco ao ar 48 h	IND-48	EN-48	EI-48	EM-48
Seco ao ar 96 h	IND-96	EN-96	EI-96	EM-96

No ensaio de infiltrabilidade mede-se a taxa de infiltração de água por capilaridade, e sua variação, ao longo do tempo. Este ensaio é executado submetendo um corpo de prova de solo à infiltração de água contida em tubo de pequeno diâmetro (5 mm de diâmetro). Mede-se então o deslocamento desse menisco (infiltração de água) ao longo do tempo e constrói-se uma curva que mostra o volume infiltrado versus a raiz do tempo. A inclinação do trecho inicial desta reta corresponde ao coeficiente de sorção (s). O equipamento utilizado é similar ao mostrado na Figura 3a.

O ensaio de perda de massa por imersão modificado baseia-se no ensaio de perda de massa por imersão proposto pela norma DNER ME 256/1994. Consiste em submeter um corpo de prova prismático, contido lateralmente por um anel polimérico e uma pedra porosa em uma de suas faces, à imersão por um período de 20h (Figura 3b). Após esse período determina-se o percentual da massa de partículas sólidas desagregada (parâmetro pi) com relação à massa inicial de partículas sólidas. A modificação do ensaio deve-se ao uso de corpos de prova que tem a face coincidente com o limite do anel de coleta (diferente do ensaio original em que parte do solo sofre parcial extrusão do interior do anel). O uso do ensaio modificado é reportado por Bastos (1999), Higashi, (2006) e Heidemann et al. (2018).



(a)



(b)

Figura 3. Ensaio de infiltração e perda de massa por imersão modificado.

O potencial erosivo é dado pela razão π_i/s . Segundo Nogami e Villibor (1979), solos que apresentam $\pi_i/s > 52$ devem ser considerados com alto potencial erosivo, enquanto Pejon (1992) propôs como limite para critério de erodibilidade $\pi_i/s > 40$.

4. RESULTADOS

A curva granulométrica do solo estudado é mostrada na Figura 4 e na Tabela 2 são apresentados os índices físicos do solo em estado natural. Trata-se de um solo predominantemente siltoso de baixa compressibilidade, sendo classificado como ML conforme o sistema USCS (ASTM D4287/2017). De acordo com Nogami e Villibor (1995), solos com tais características são inerentemente suscetíveis à erosão.

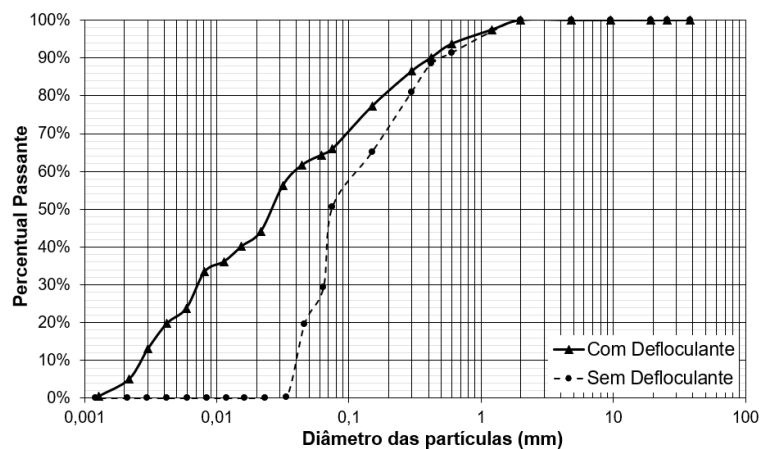


Figura 4. Curvas granulométricas com e sem defloculante

Tabela 2. Índices físicos do solo em estado natural

w_{nat} (%)	G	γ_{nat} (kN/m ³)	γ_d (kN/m ³)	Sr (%)	e	LL	IP
25,0	2,712	18,3	14,7	78,7	0,85	45,0	16,0

A diferença entre as curvas granulométricas demonstra o efeito que o uso do defloculante tem sobre as feições macroestruturais, como concreções e minerais pseudomorfos. Mostra também que *in situ* estes solos estão agrupados em partículas com dimensões de tamanho silte predominantemente. Como em campo não há a percolação de fluido que tenha efeito similar ao da solução defloculante, é discutível o estabelecimento de parâmetros de erodibilidade a partir das frações granulométricas (obtidas da forma tradicional) para solos residuais, sobretudo das partículas finas.

As curvas de compactação obtidas são mostradas na Figura 5 e os índices físicos do solo compactado na umidade ótima para as energias normal, intermediária e modificada são apresentados na Tabela 3. Comparativamente ao solo em estado natural, a compactação sob energia modificada promove um aumento do peso específico aparente seco (γ_d) da ordem de 20% e uma redução de 40% no índice de vazios. Os índices físicos da Tabela 3 foram usados como referência na preparação dos corpos de prova compactados utilizados nos ensaios de infiltabilidade e perda de massa por imersão.

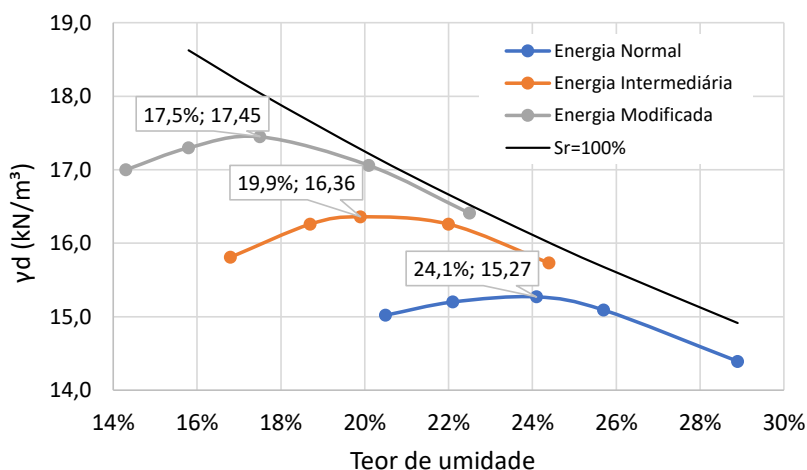


Figura 5. Curvas de compactação

Tabela 3. Índices físicos do solo compactado

Energia	Normal	Intermediária	Modificada
w_{ot} (%)	24,1	19,9	17,5
$\gamma_{d,max}$ (kN/m³)	15,27	16,36	17,45
e	0,74	0,63	0,53
S_r	86,0	88,1	90,4

Os resultados dos ensaios de infiltabilidade são apresentados na Figura 6, onde os corpos de prova encontram-se intitulados conforme descrito no Tabela 1.

Desta figura verifica-se uma tendência geral tanto do aumento na taxa de infiltração (inclinação das curvas) e quanto do volume total infiltrado na medida em que se eleva o tempo de secagem. Em campo a infiltração reduz a quantidade de água na superfície e consequentemente a intensidade do fluxo superficial, o qual é responsável por desencadear a erosão.

Em linhas gerais, nos ensaios executados o aumento da energia de compactação e uma maior umidade inicial reduzem o coeficiente de sorção, como mostra a Figura 7, que sumariza os resultados em termos de variação deste coeficiente. O aumento da energia de compactação reduz o coeficiente de sorção se considerados apenas os ensaios em corpos de prova secos por 48 e 96 h. Para o solo ensaiado sob umidade ótima o aumento da energia de compactação eleva também o coeficiente de sorção porque os corpos de prova encontram-se menos úmidos ao início do ensaio e, portanto, mais suscetíveis à infiltração de água.

Os resultados dos ensaios de perda de massa por imersão modificados são sumarizados na Figura 8. Nesta é possível verificar uma diferença clara de comportamento entre o solo indeformado e compactado. A estruturação impõe uma resistência muito maior à perda de massa, sendo que em umidade natural o solo compactado perde cerca de seis vezes mais massa que o material indeformado.

A secagem não tem efeito sobre a perda de massa do solo compactado, sendo o solo indeformado muito mais sensível. A secagem causa variação volumétrica, que no solo indeformado implica na formação de trincas e danos à estrutura do mesmo e consequente

aumento da perda de massa. No solo compactado tais feições estruturais são ausentes e, portanto, as variações volumétricas, já em geral menores por causa da compactação, não tem maiores efeitos.

Por fim, na Figura 9 são mostrados os resultados em termos do parâmetro de erodibilidade do critério MCT ($E=\pi/s$). Percebe-se que ambos os critérios de erodibilidade reportados, isto é, $E=52$ (Nogami e Villibor, 1979) e $E=40$ (Pejon, 1992), qualificam este solo como erosivo. O solo indeformado é menos erosivo que o solo compactado, como resultado principalmente da baixa perda de massa na imersão. A seta mostra o claro aumento do potencial erosivo do solo indeformado causado pela secagem.

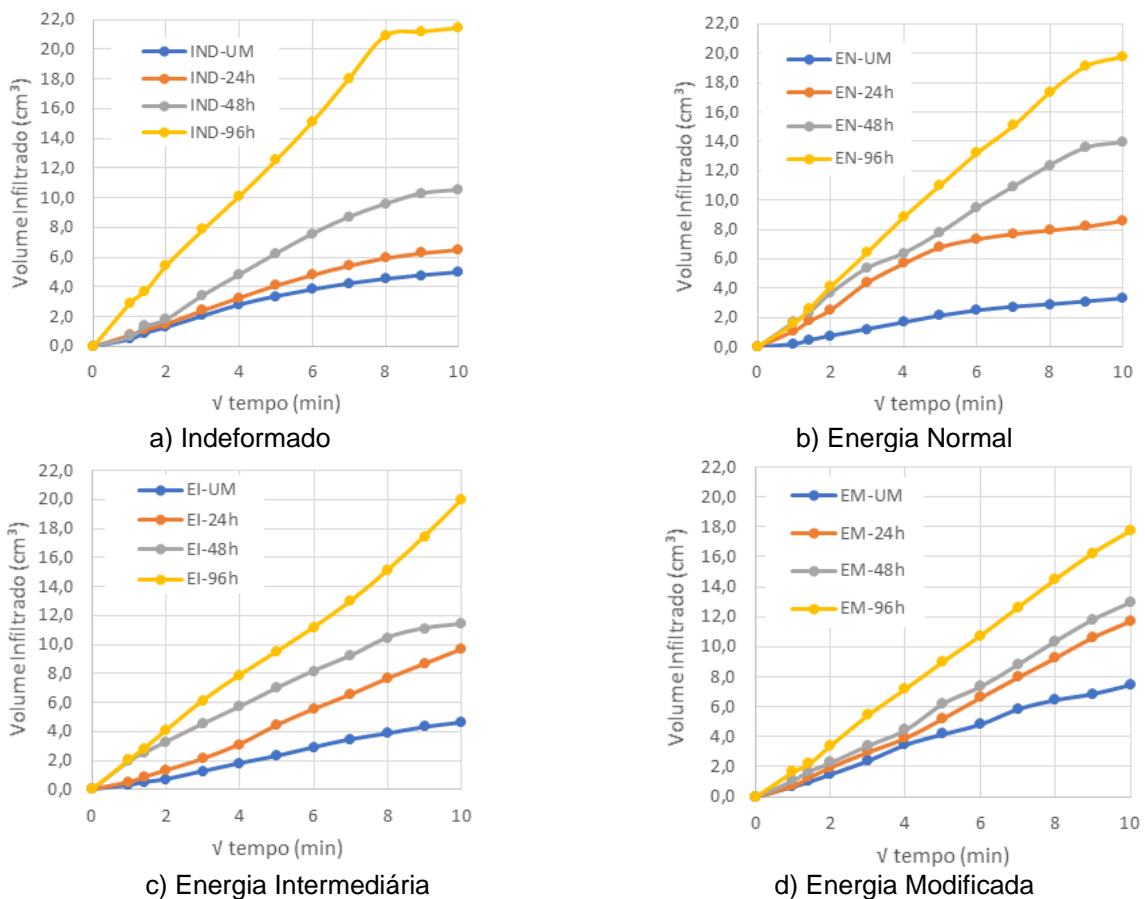


Figura 6. Resultados dos ensaios de infiltrabilidade

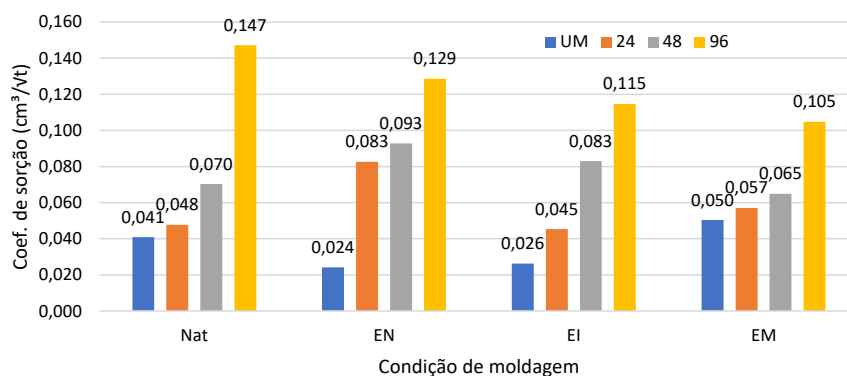


Figura 7. Coeficientes de sorção

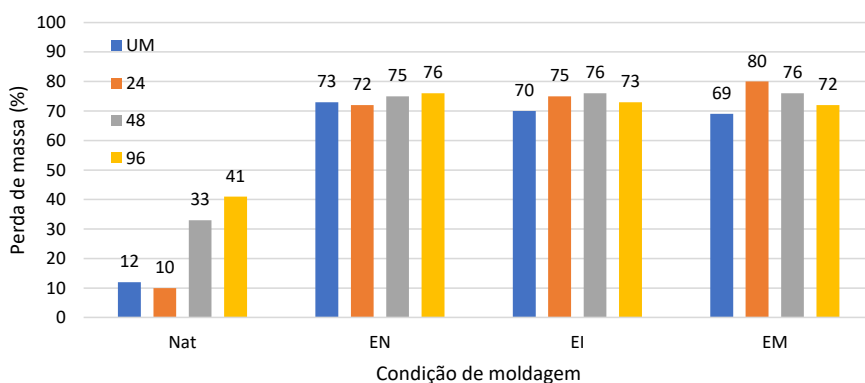


Figura 8. Resultados dos ensaios de perda de massa por imersão modificado

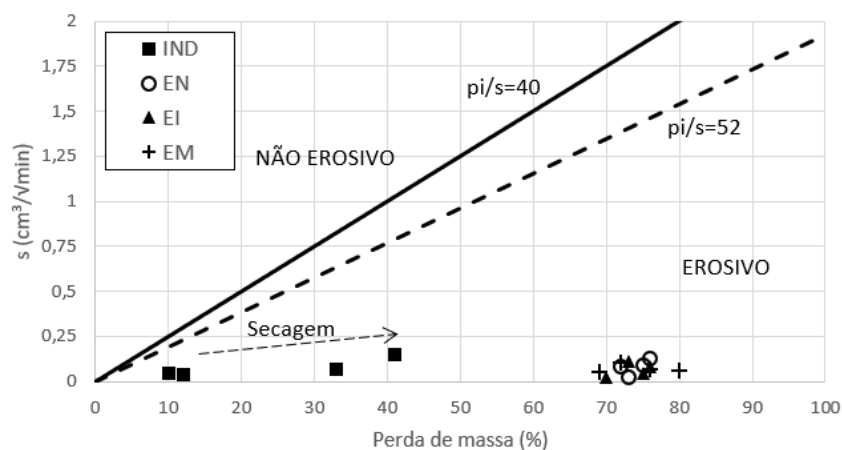


Figura 9. Potencial erosivo do solo estudado

Comparativamente, o efeito da variação da energia da compactação e da secagem prévia ao ensaio sobre o potencial erosivo do solo compactado é muito menor, visto que todos os pontos se agrupam na mesma região do gráfico. Ainda assim, no caso do solo compactado, constata-se que a secagem diminui o potencial erosivo.

5. CONCLUSÕES

O solo estudado corresponde a um silte de alta plasticidade. Ensaio de granulometria convencionais apontam para um percentual de argila inferior a 10%. Ensaio desse tipo sem uso de defloculante mostram que em estado natural as partículas de diâmetro inferior à 0,03 mm agrupam-se formando grumos maiores, de tamanho silte e areia fina. Isto demonstra que é discutível o estabelecimento de parâmetros de erodibilidade a partir das frações granulométricas (obtidas da forma tradicional) para solos residuais, sobretudo das partículas mais finas.

Os ensaios de erodibilidade mostram que a estrutura natural do solo tem expressivo impacto sobre o potencial erosivo do mesmo. O solo indeformado apresenta parâmetros de erodibilidade “E” inferiores aos medidos no solo compactado, independentemente do tempo de secagem do material. Ainda assim, mesmo em estado natural este solo é classificado como erosivo por ambos os critérios empregados (E=40 e E=52).

A secagem aumenta o potencial erosivo do solo indeformado. Apesar de promover um aumento do coeficiente de sorção (que é importante na resistência à erosão), também eleva significativamente a perda de massa.

A compactação não é capaz de impor relevante resistência à erosão, independentemente da energia utilizada. A infiltrabilidade e a perda de massa por imersão são pouco afetadas pela variação da energia de compactação. A secagem dos corpos de prova interfere mais no comportamento frente à infiltrabilidade do que a energia de compactação. Assim, é possível que algum efeito da energia da compactação sobre a erodibilidade decorra da umidade inicial do solo e densidade, que pode diminuir a velocidade com que o solo seca, e não de efeitos mecânicos ligados ao entrosamento das partículas. Por outro lado, nem a secagem, nem a energia de compactação tem efeitos significativos sobre a perda de massa por imersão.

Considerando os resultados obtidos, verifica-se que é importante que obras de terra que envolvam exposição e movimentação deste solo considerem medidas que visem proteger este material das chuvas e fluxo superficial. A adoção de energias de compactação mais elevadas como forma de reduzir o potencial erosivo não se fundamentam.

REFERÊNCIAS

- ABNT. (2016) Amostras de solo - preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. NBR 6457. Rio de Janeiro
- ABNT. (2016) Abertura de poços e trincheiras de inspeção em solo, com retirada de amostras deformadas e indeformadas: NBR 9604. Rio de Janeiro.
- ABNT. (2016) Análise granulométrica: NBR 7181. Rio de Janeiro.
- ABNT. (2016) Determinação do limite de liquidez: NBR 6459. Rio de Janeiro.
- ABNT. (2016) Determinação do limite de plasticidade: NBR 7180. Rio de Janeiro.
- ABNT. (2016) Ensaio de Compactação: NBR 7182. Rio de Janeiro.
- ABNT. (2017) Grãos de pedregulho retidos na peneira 4,8 mm – Det. massa específica, massa esp. aparente e absorção de água: NBR 6458. Rio de Janeiro.
- ASTM. (2017) Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System). D2487-17. West Conshohocken.
- Bastos, C.A.B. (1999) *“Estudo Geotécnico sobre a Erodibilidade de Solos Residuais Não Saturados”*. Tese, PPGEC/UFRGS. Porto Alegre
- Briaud, J.L., Oh, S.J. (2010) *“Bridge foundation scour”*. Geotech. Eng. J. Volume 41.
- Couto, B.O.C. (2015) *“Análise da erodibilidade em taludes com horizontes resistentes e suscetíveis aos processos erosivos”*. Dissertação, POSGEO/UFOP, Ouro Preto.
- DNER (1994) Solos compactados com equipamento miniatura - determinação da perda de massa por imersão: DNER-ME 256/94.
- Duiker, S.W., Flanagan, D.C.; Lal, R. (2001) *“Erodibility and infiltration characteristics of five major soils of southwest Spain”*. Catena, Volume 45.
- García-Ruiz, J.M. et al. (2015) *“A meta-analysis of soil erosion rates across the world”*. Geomorphology, Volume 239.
- Hanson G.J., Wahl T.L., Temple D.M. (2010) *“Erodibility characteristics of embankment materials”*, Dam Safety 2010, Seattle.
- Heidemann, M. et al. (2018) *“Efeitos da estrutura sobre o potencial erosivo de solos residuais de gnaíse do norte de Santa Catarina”*. Anais do XIX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, Salvador.
- Higashi, R.A.R. (2006) *“Metodologia de uso e ocupação dos solos de cidades costeiras brasileiras através de SIG com base no comportamento geotécnico e ambiental”*. Tese, PPGEC/UFSC: Florianópolis.

- Kimiaghalam, N., Clark, S.P., Ahmari, H. (2016) *"An experimental study on the effects of physical, mechanical and electrochemical properties of natural cohesive soils on critical shear stress and erosion rate"*. Int. J. Sediment Research. Volume 31.
- Laflen, J.M. et al. (1991) *"WEPP: Soil erodibility experiments for rangeland and cropland soils"*. J. Soil Water Cons. Volume 46, issue 1.
- Lal, R. (1990) *"Soil Erosion and Land Degradation: The Global Risks. Advances in Soil Science"* (Lal R., Stewart B.A. eds). Volume 11. Springer, New York.
- Molinero Junior, J.A. (2010) *"Estudo geotécnico dos solos de erosões resultantes de intervenções em rodovias"*. Dissertação, PPGEC/UFU. Uberlândia.
- Nogami, J.S., Villibor, D.F. (1995) *Pavimentação de baixo custo com solos lateríticos*. São Paulo, Editora Villibor.
- Nogami, J.S., Villibor, D.F. (1979) *"Soil characterization of mapping units for highway purposes in a tropical area"*. Bul. Int. Ass. Eng. Geology. Volume 19.
- 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 de Atributos"*. Tese, EESC/USP. São Carlos.
- Silva, D.J.B.V. (2009) *"Avaliação de métodos de baixo custo para proteção de taludes em estradas rurais não-pavimentadas"*. Dissertação, UNESP. Ilha Solteira.
- Verstraeten, G., Poesen, J. (2000) *"Estimating trap efficiency of small reservoirs and ponds: methods and implications for the assessment of sediment yield"*. Progress in Physical Geography. Volume 24.
- Vilar, O.M. (1987) *"Formulação de um Modelo Matemático para Erosão dos Solos pela Chuva"*. Tese, EESC/USP. São Carlos.
- Wang, B., Sheng, F., Römkens, M.J.M., Darboux, F. (2013) *"Soil erodibility for water erosion: A perspective and Chinese experiences"*. Geomorphology, Volume 187.
- Watson, D.A., Laflen, J.M. (1986) *"Soil strength, slope and rainfall intensity effects on the interrill erosion"*. Transactions of ASAE, volume 29, issue 1.
- Wischmeier, W.H., Smith, D.D (1978) *"Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning"*. U.S. Dep. Agriculture, Agricultural Handbook n. 537.