

ERODIBILIDADE OBTIDA POR MÉTODOS INDIRETOS E DIRETOS DE UMA VOÇOROCA LOCALIZADA NA REGIÃO OESTE DO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL - BRASIL

Erodibility obtained by indirect and direct methods of a gully located in the western region of the State of Rio Grande do Sul - Brazil

Rinaldo Jose Barbosa Pinheiro^a, Andrea Valli Nummer^b, Leila Posser Fernandes^c, Cezar Augusto Burkert Bastos^d

^a Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Santa Maria, Brasil.

^b Centro de Ciências Naturais e Exatas, Universidade Federal de Santa Maria, Brasil.

^c Universidade Federal de Santa Maria, Brasil.

^d Universidade de Rio Grande, Brasil.

RESUMO – O objetivo deste artigo é apresentar os resultados obtidos pela avaliação indireta e direta da erodibilidade em uma voçoroca localizada em uma área rural do município de São Francisco de Assis, região oeste do estado do Rio Grande do Sul, correlacionando-os ao comportamento destes materiais em campo. Esta avaliação foi realizada por meio de ensaios de desagregação, infiltrabilidade, perda de massa por imersão e ensaio de Inderbitzen (canal hidráulico), variando a condição de umidade inicial das amostras, em um perfil geológico-geotécnico constituído de latossolos arenosos sobre camadas de arenitos da Formação Guará. As amostras de arenito e do horizonte C, quando inundadas desagregaram completamente, o que não ocorreu com as amostras dos horizontes A e B. O horizonte A, independente da condição inicial de umidade, e o horizonte B, na condição de umidade natural, foram classificados como não erodíveis. O ensaio de desagregação foi usado de forma satisfatória na avaliação qualitativa da erodibilidade, evidenciando uma boa correlação com o comportamento das unidades estudadas em campo, sendo seus resultados compatíveis com aqueles obtidos nos ensaios de infiltrabilidade, erodibilidade específica e Inderbitzen.

ABSTRACT – The aim of this paper is to present the results of the indirect assessment of erodibility applied to a gully located in the rural area of the municipality of São Francisco de Assis, in the western side of Rio Grande do Sul, correlating them with the behavior of these materials in field. This assessment was performed by slaking test, infiltrability and modify soil-lost by immersion and Inderbitzen test (hydraulic channel), modifying the initial moisture condition of the samples in a geological and geotechnical profile formed of latosols on sandstone layers of Guará Formation. The sandstone samples and the C horizon samples, when flooded, disaggregated completely, differently from what occurred with the samples of horizons A and B. The horizon A (independently of the initial moisture content) and the horizon B (in the natural moisture condition) have been classified as non-erodible. The slaking test was employed satisfactorily in the qualitative assessment of erodibility showing a good correlation with the behavior of units studied in field, being its results consistent with those obtained from tests of infiltrability, modify soil-lost and Inderbitzen.

Palavras Chave – Erosão, ensaios, voçoroca.

Keywords – Erosion, tests, gully.

E-mails: rinaldo@ufsm.br (R. Pinheiro), a.nummer@gmail.com (A. Nummer), leilapfernandes@hotmail.com (L. Fernandes), cezARBastos@furg.br (C. Bastos)

ORCID: orcid.org/0000-0003-1444-9493, orcid.org/0000-0001-9271-442X

1 – INTRODUÇÃO

A erosão é um fenômeno geológico natural que ocorre nas camadas mais superficiais da crosta terrestre, sendo definida, por Bertoni e Lombardi Neto (2005), como um processo de desagregação e deslocamento de partículas sólidas que acontecem na superfície do solo ou nos leitos de canais, devido a diversos agentes como o impacto das gotas de chuva e do escoamento superficial e subsuperficial.

Segundo autores como Panachudi et al. (2006) e Aragão et al. (2011), a erosão hídrica é o processo de degradação que mais tem afetado a produção do solo. Este processo tem sido potencializado pela ação do homem em um curto período de tempo, devido a práticas inadequadas de manejo agrícola, resultando numa erosão acelerada. Para Camapum de Carvalho et al. (2006), o processo erosivo depende tanto de fatores externos como o potencial de erosividade da chuva e o escoamento superficial, quanto de fatores internos relacionados à desagregação e à erodibilidade do solo.

A natureza do solo/rocha determina a susceptibilidade dos terrenos à erosão e autores como Silva et al. (2009) são categóricos em afirmar que características do solo como: permeabilidade, capacidade de armazenamento de água, textura, coesão, grau e tipo de estrutura, teor de matéria orgânica e óxidos de ferro e alumínio e os tipos de argilominerais presentes afetam de maneira integrada a sua erodibilidade. Assim sendo, em conformidade com Silva et al. (2000), a erosão hídrica deve ser estudada considerando-se a erodibilidade do solo que representa o efeito integrado da infiltração de água e a resistência do solo à desagregação e ao transporte.

Ademais, de acordo com Bastos et al. (2000), a erodibilidade pode ser definida como a maior ou menor facilidade com que as partículas de solo/rocha são destacadas e transportadas pela ação de um agente erosivo. Para o autor, esta é considerada uma propriedade bastante complexa em função do grande número de fatores físicos, químicos, biológicos e mecânicos intervenientes.

Os ensaios geotécnicos são tidos como ferramentas importantes para a determinação da erodibilidade dos solos e vem sendo utilizado por alguns pesquisadores para compreender e, até mesmo, propor soluções quando do surgimento de processos erosivos. No Brasil, no entanto, a avaliação deste parâmetro envolve custos elevados e maior tempo para a sua determinação por se tratar de um país de grandes dimensões e com uma grande diversidade de solos (Denardin, 1990).

A avaliação da erodibilidade pode dar-se de forma direta ou indireta (Menezes e Pejon, 2010). Formas de avaliação direta tem sido adotada por autores como Silva et al. (2000), Cantalice et al. (2005), Nunes e Cassol (2008), Freitas et al. (2008), Oliveira et al. (2009) entre outros, valendo-se de ensaios em parcelas de solo com chuva natural ou simulada e ensaios de canais.

Muitas vezes, a determinação direta da erodibilidade torna-se inviável e, por isso, pesquisadores como Moraes et al. (2004) e Lima et al. (2007) propuseram métodos indiretos a partir de outras características dos solos de mais fácil determinação. Contudo, estas correlações podem apresentar uma dispersão muito elevada e uma validade restrita ao universo de solos para as quais foram desenvolvidas como verificaram Silva et al. (2000).

O objetivo deste artigo é apresentar os resultados obtidos pela avaliação indireta e direta da erodibilidade realizada por meio de ensaios hídricos simplificados, relacionando-se tais resultados com o comportamento verificado do solo e da rocha no campo. Para isso, foram realizados ensaios de desagregação, infiltração, perda de massa por imersão e ensaios em canal hidráulico (Inderbitzen) em amostras indeformadas de solos e rochas associados à ocorrência de uma voçoroca localizada em uma área rural do município de São Francisco de Assis, região oeste do estado do Rio Grande do Sul.

2 – DESCRIÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

Os materiais analisados provêm de uma voçoroca localizada no trecho central da rodovia RS 377, entre as cidades de Manoel Viana e São Francisco de Assis, no oeste do estado do Rio Grande

do Sul. Esta voçoroca possui 18 m de profundidade e 1000 m de comprimento (Figura 1), situando-se em uma área de relevo suavemente ondulado com declividade variando entre 2% a 15%, onde ocorrem também cerros ou morrotes e afloramentos rochosos (linhas de pedra), em que a declividade é mais acentuada. Em mapeamento geomorfológico realizado por Trentin et al. (2013) a área de estudo se encontra na província geomorfológica Depressão do Ibicuí, caracterizada pela unidade geomorfológica de patamares residuais em arenitos em padrões de forma de colinas suaves de arenito. As feições superficiais mais comuns em toda área são os areais, ravinas e voçorocas atuando sobre um substrato de rochas sedimentares de diferentes tipos, com predomínio de arenitos. Os processos erosivos estão associados aos fluxos subsuperficiais e superficiais que apresentam um forte controle estrutural de direção NW. As formas de uso e ocupação do solo são, principalmente, silvicultura e pastagens.

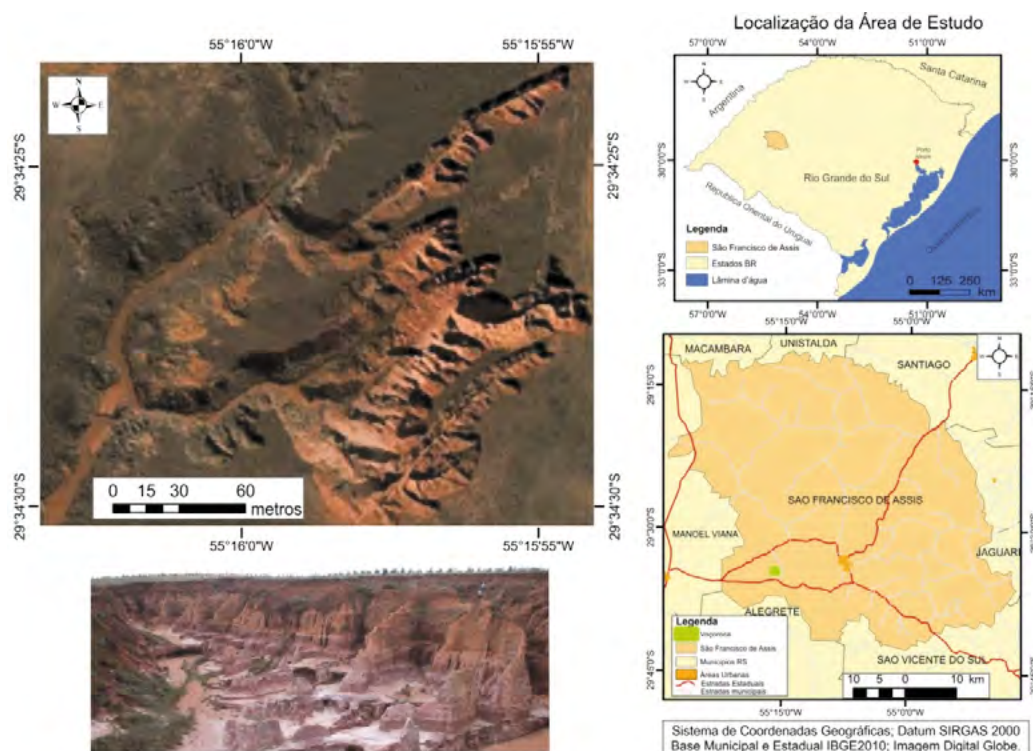


Fig. 1 – Localização do município de São Francisco de Assis-RS (A); voçoroca em imagem Google Earth ano 2004 (B) e fotografia panorâmica da voçoroca (C).

Em mapeamento geológico no interior da voçoroca, foi possível estabelecer duas unidades litológicas pertencentes à Formação Guará, denominadas de Unidade 1, na base, e Unidade 2, no topo, separadas pela diferença de coloração, estrutura, textura e comportamento distinto frente ao processo erosivo. Sobre as unidades de rocha, encontra-se de 2,5 a 3,0 m de um perfil de solo classificado como latossolo, de cor avermelhada de textura arenosa, sendo 0,20 a 0,50 m de horizonte A e, aproximadamente, 1,0 a 1,5 m de horizonte B. O perfil estratigráfico contendo estas unidades é apresentado na Figura 2 e imagens dos horizontes e camadas da voçoroca estão apresentadas na Figura 3.

A Unidade 1 mede 6,8 m de espessura aproximadamente e está dividida em oito (8) camadas distintas (1A, 1B, 1C1, 1C2, 1D, 1E, 1F1 e 1F2) que formam degraus no interior da voçoroca devido à diferença de resistência frente ao processo erosivo. Esta Unidade é composta por quartzarenitos

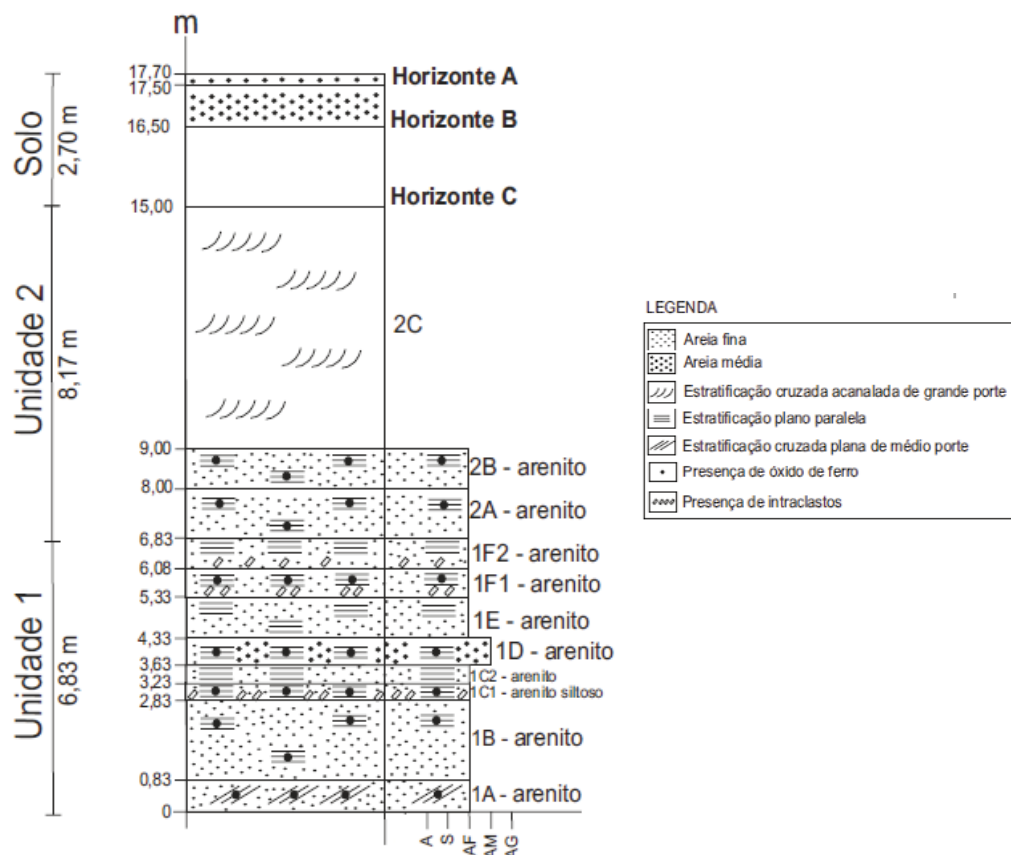


Fig. 2 – Perfil estratigráfico da área da voçoroca.

rosados de granulação fina a média com estratificações plano paralelas e minerais de óxido de ferro disseminados ou como cimento entre os grãos.

A Unidade 2, sobreposta a Unidade 1, possui aproximadamente 8 m de espessura, é composta por quartzarenitos marrom avermelhados de granulação fina, formando uma parede abrupta no topo da voçoroca. Esta unidade foi dividida em três camadas distintas denominadas de 2A, 2B e 2C. Em campo, as camadas 2A (unidade 2), 1D e 1B (unidade 1) são as mais resistentes à erosão, formando patamares no interior da voçoroca, possivelmente devido à maior quantidade de óxido de ferro como agente cimentante entre os grãos e de uma porcentagem mais elevada de silte e argila.

3 – MATERIAIS E MÉTODOS

No mapeamento geológico e geotécnico da voçoroca e áreas próximas, avaliou-se a necessidade de caracterizar em maior detalhe os horizontes superficiais onde se inicia o processo erosivo com a presença de sulcos e ravinas. Portanto, em uma das paredes da voçoroca foram retiradas amostras deformadas e indeformadas dos horizontes pedológicos (horizontes A, B e C). Identificou-se 2 unidades geológicas (quartzarenitos), sendo que a unidade 2, constituída por 3 camadas, foram realizadas as amostragens na camada 2C por ser mais espessa e menos resistente que as camadas 2B e 2A. A unidade 2, se amostrou a camada 1A por ser a base da voçoroca e ser representativo do substrato predominante na área em estudo.

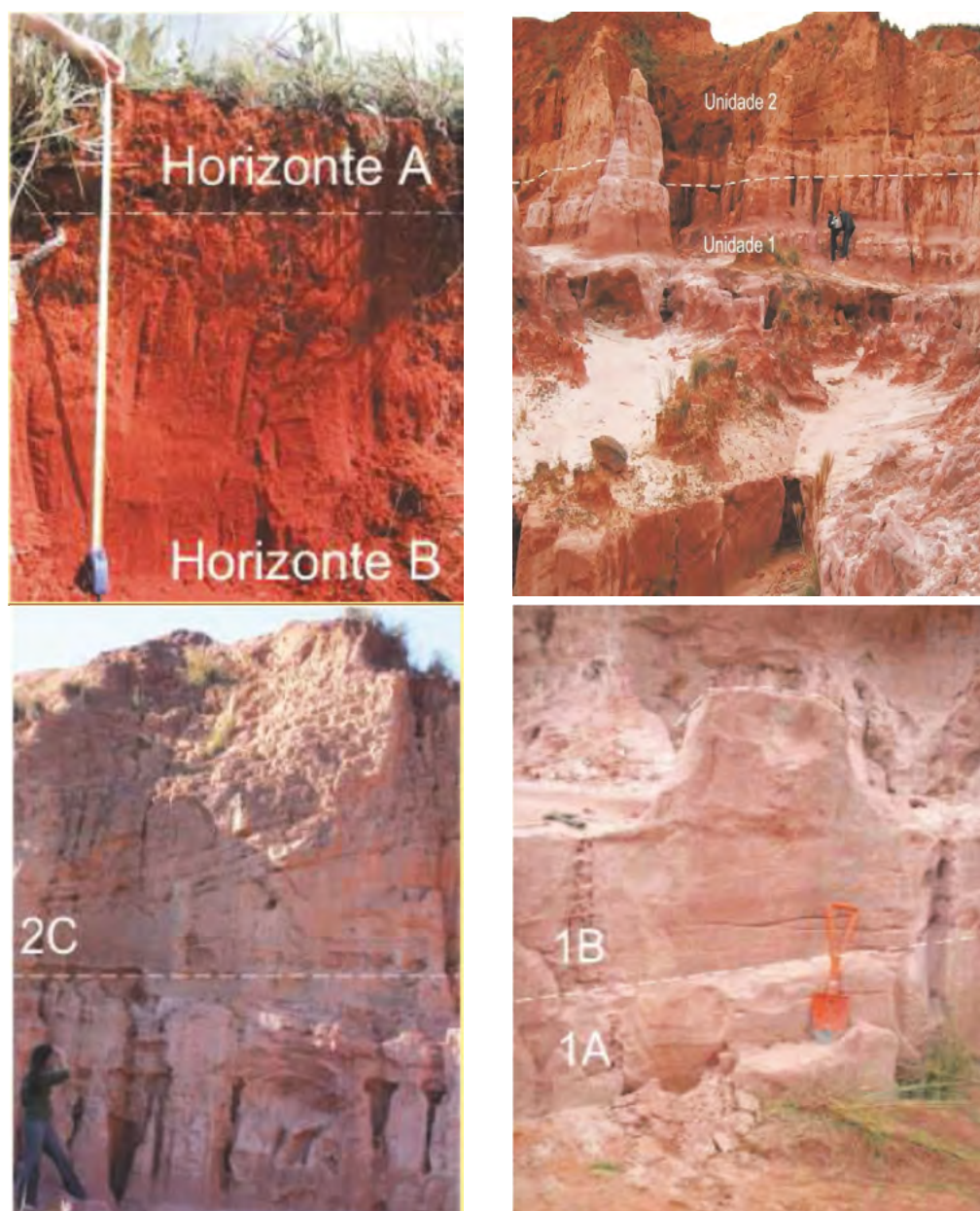


Fig. 3 – Unidades litológicas no interior da voçoroca com indicação dos locais de amostragem

3.1 – Ensaios de caracterização

Para realização dos ensaios clássicos de caracterização geotécnica: massa específica real dos grãos (norma NBR 6508 - ABNT, 1984b), análise granulométrica (norma NBR 7181 - ABNT, 1984d) e limites de Atterberg (normas NBR 6459 - ABNT, 1984a e NBR 7180 - ABNT, 1984c), foram coletadas amostras deformadas, preparadas para os ensaios de acordo com a norma NBR 6457 (ABNT, 1986). A caracterização química simplificada do solo foi realizada pela análise química da

fração terra pelo Laboratório de Solos do Centro de Ciências Rurais da UFSM. Os ensaios de caracterização foram realizados em triplicada.

3.2 – Ensaios de geomecânicos (resistência ao cisalhamento)

Vários autores em diversas áreas de conhecimento assumem que existe uma relação entre erodibilidade e a resistência ao cisalhamento avaliada através do intercepto coesivo (c) e do ângulo de atrito interno do solo (ϕ). Segundo Bastos (1999), a variação desta propriedade dos solos, sob a ação de fluxo superficial concentrado, é considerada um parâmetro fundamental no estabelecimento de uma abordagem geotécnica à erodibilidade dos solos não saturados, em regiões de clima tropical.

Ensaios de resistência ao cisalhamento foram realizados a partir de amostras indeformadas coletadas em anéis biselados quadrados ($L = 5$ cm e $h = 2$ cm) em equipamento de cisalhamento direto marca Wykeham Farrance. Os ensaios foram realizados na umidade natural das amostras e com inundação. As amostras foram ensaiadas com velocidade de cisalhamento de 0,17 mm/min, até o deslocamento máximo horizontal de 10 mm. As envoltórias de resistência foram definidas para tensões normais de 25 a 200 kPa. Os valores de tensão cisalhante de ruptura adotados referem-se a valores de pico, adotando os procedimentos preconizados pela ASTM D 3080 (2011).

3.3 – Ensaios para avaliação da erodibilidade

Com objetivo de avaliar qualitativa e quantitativamente a erodibilidade dos solos e rochas estudados, foram realizados ensaios específicos destinados a fornecer elementos empregados em critérios de análise indireta e direta de erodibilidade.

3.3.1 – Ensaio de dispersão SCS

O ensaio de dispersão SCS (ou ensaio sedimentométrico comparativo ou ainda ensaio duplo hidrométrico) tem por objetivo a avaliação da dispersibilidade de solos argilosos pela comparação entre as porcentagens (em massa) de partículas com diâmetro menor que 0,005 mm, determinadas de acordo com o ensaio de sedimentação (norma NBR 7181 - ABNT, 1984d) e de acordo com o ensaio de sedimentação realizado sem agitação mecânica e agente defloculante. O ensaio foi desenvolvido pelo SCS/USDA e normatizado pela norma NBR 13602 (ABNT, 1996). A porcentagem ou razão de dispersão (RD) é obtida pela relação entre a porcentagem (em massa) de partículas menores que 0,005 mm obtidas sem defloculante e agitação mecânica e a porcentagem (em massa) de partículas menores que 0,005 mm obtidas com defloculante e agitação mecânica. Convém destacar que a norma só considera válidos resultados obtidos para solos com teor de argila $> 12\%$ (em ensaios com defloculante).

3.3.2 – Ensaio de desagregação

O ensaio de desagregação, baseado nos estudos de Santos (1997), tem por objetivo a descrição qualitativa da desagregação de uma amostra indeformada de solo/rocha, não confinada, quando submersa em água destilada. As amostras foram coletadas em anéis biselados de PVC ($d = 10$ cm e $h = 5$ cm) e ensaiadas em três condições distintas de umidade: natural (wnat), secas ao ar por 72 horas (sa). As amostras foram extraídas do molde de amostragem e dispostas sobre uma pedra porosa, sendo submetidas a um processo de lenta submersão em água destilada (Figura 4A), segundo os seguintes estágios: (a) água na base por 30 min; (b) água a 1/3 e 2/3 da amostra por períodos de 15 min e (c) submersão total, permanecendo assim por 24 h.

O resultado do ensaio é qualitativo e em cada uma destas etapas foi registrado o comportamento da amostra com base no caráter, na intensidade e na velocidade dos processos atuantes como: umedecimento, expansão, abatimento, fraturamento, rupturas, dispersão e outros.

3.3.3 – Ensaio pelo critério de erodibilidade MCT

Nogami e Villibor (1979 e 1995) propuseram um critério de erodibilidade para solos tropicais, baseado em ensaios hídricos feitos em amostras compactadas. Este critério é fundamentado em dois parâmetros: o coeficiente de sorção (s), obtido no ensaio de infiltrabilidade, e a perda de massa por imersão modificada (π), obtida no ensaio de erodibilidade específica.

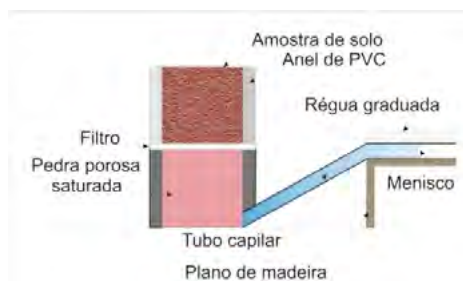
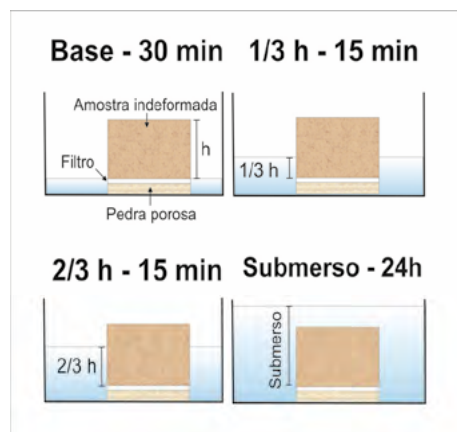
O ensaio de infiltrabilidade (Figura 4B) consiste em quantificar a velocidade de ascensão capilar em amostras indeformadas de solo/rocha coletadas em moldes biselados de PVC ($d = 5$ cm e $h = 5$ cm), ensaiadas em três condições de umidade: umidade natural (wnat), secas ao ar (sa), e pré-umedecidas (pu). O procedimento básico de ensaio consiste em dispor sobre o sistema tubo capilar – reservatório saturado –, uma amostra e, com o auxílio da régua graduada e de um cronômetro, são registradas as distâncias percorridas pelo menisco capilar no tubo em intervalos de tempo que seguem uma relação quadrática (1, 2, 4, 9, 35, 36, 49, 64 min e assim por diante), até o movimento estabilizar em uma velocidade muito lenta.

Os resultados são expressos em função da distância percorrida no tubo capilar (L em cm) e da raiz quadrada do tempo ($t^{1/2}$ em $\text{min}^{1/2}$). As curvas $L \times t^{1/2}$ definidas têm a configuração típica da Figura 8, onde se observa um nítido comportamento bilinear, com um íngreme trecho retilíneo inicial, seguido por outro de tendência quase horizontal, significando que a frente de umidade atingiu o topo da amostra. A inclinação da curva no seu trecho inicial determina o coeficiente de sorção (s em $\text{cm min}^{-1/2}$). O fluxo ascendente da água na amostra, por força das tensões capilares relacionadas à sucção do solo, determina o movimento da água ao longo do tubo capilar.

O ensaio de erodibilidade específica avalia o potencial de desagregação do solo frente à imersão em água para três condições de umidade: natural (wnat), secas ao ar (sa) e pré-umedecida (pu). As amostras são coletadas nos mesmos moldes utilizados para o ensaio de infiltrabilidade, porém, em laboratório, têm suas alturas reduzidas para 2,5 cm. Sua face interior é vedada por uma pedra porosa,

A.

B.



C.



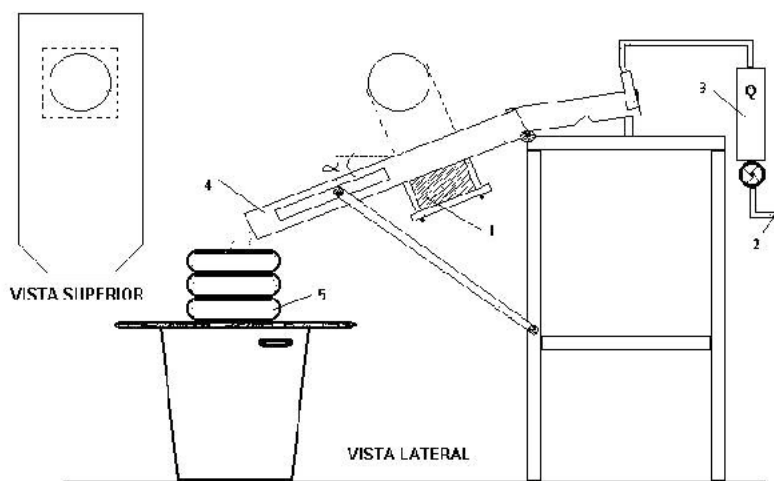
Fig. 4 – Croqui dos ensaios realizados para avaliação indireta da erodibilidade. A) ensaio de desagregação, B) ensaio de infiltrabilidade e C) ensaio de erodibilidade específica

enquanto a face exposta é mantida rente à borda do molde. O ensaio consiste em imergir as amostras em água, dispondo-as horizontalmente, permanecendo assim por 20 h e, após este tempo, recolhendo-se o material desagregado da face livre. O resultado é representado pela porcentagem de material seco desagregado em relação ao peso seco total da amostra (Figura 4C). Conforme Nogami e Villibor (1979), os solos são considerados erodíveis, quando o valor da relação da perda por imersão e da sorção (π/s) for superior a 52. Baseado em um número maior de ensaios, Pejon (1992) propôs uma modificação no limite do critério para $\pi/s = 40$.

3.3.4 – Ensaio de Inderbitzen (canal hidráulico)

Para a avaliação direta da erodibilidade foi utilizado o Ensaio de Inderbitzen que se trata de um ensaio de simples execução dentre os realizados em canais hidráulicos no meio geotécnico, apresentando resultados satisfatórios, mesmo sendo um ensaio baseado em métodos empíricos e ainda não normatizado. O equipamento consiste em uma estrutura metálica, composta de uma rampa hidráulica articulada de 25 cm de largura e 60 cm de comprimento, com inclinações variáveis de 0° a 54° , sendo suportada por uma barra metálica fixa na estrutura principal. Esta rampa é dotada de uma abertura circular central de 10 cm de diâmetro, onde é acoplado um anel contendo a amostra de solo/rocha indeformada, de tal maneira, que seu nível superior coincida com o nível da rampa, para que o escoamento laminar entre em contato com o topo da amostra. As amostras estão confinadas em anéis de PVC, biselados na parte inferior, com 10 cm de diâmetro e 5 cm de altura. Na parte superior da rampa, uma fôrma metálica está anexada ao sistema e possui a função de regularização do fluxo d'água fornecido diretamente da rede hidráulica, através da abertura de um registro (Figura 5). A vazão utilizada para o ensaio é controlada por um rotâmetro, estando este interligado a canalização. A água e o solo desagregado pelo fluxo são coletados em baldes plásticos de 60 litros e posteriormente, passados por um conjunto de peneiras de malhas 4,8, 2,0, 0,42 e 0,074 mm.

Os resultados obtidos são plotados em um gráfico que representa a relação entre a perda de solo acumulado por unidade de área da amostra (g/cm^2) e o tempo total de ensaio (minutos), como a apresentado na Figura 6A. Os dados da perda de solo em $\text{g}/\text{cm}^2/\text{min}$ de cada ensaio são plotados



1 - amostra 2 - abastecimento de água 3 - rotâmetro 4 - rampa hidráulica 5 - peneiras

Fig. 5 – Esquema do equipamento de Inderbitzen (Bastos, 1999)

junto com a tensão hidráulica atuante no ensaio, τ_h (Pa), que depende da velocidade de escoamento (v), altura da lâmina d'água (h) em função da vazão (Q) e inclinação de rampa (i).

O gráfico formado entre os dados da τ_h *versus* perda de solo ($\text{g}/\text{cm}^2/\text{min}$) resulta no ajustamento de uma reta onde foram estimados os seguintes parâmetros de erodibilidade: a taxa de erodibilidade, K ($\text{g}/\text{cm}^2/\text{min}/\text{Pa}$), representa pelo gradiente da perda de solo em relação as tensões hidráulicas aplicadas, e a tensão cisalhante hidráulica crítica, τ_h crit (Pa), representando a mínima tensão hidráulica causada pela lâmina d'água sobre o solo, que resulta na perda de solo inicial, conforme apresentado na Figura 6B. A metodologia adotada nestes ensaios foi aprimorada e desenvolvida por trabalhos anteriores de Bastos (1999), Tatto (2007), Avila (2009), Fernandes (2011), Sant'ana (2012), Basso (2013) e Fernandes (2015).

4 – RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 – Ensaios de caracterização e geomecânicos

Os resultados dos ensaios de caracterização física, química, classificação dos solos/rochas geotécnica, estimativa do coeficiente de erodibilidade pela equação universal de perda de solo e os parâmetros de resistência obtidos no ensaio de cisalhamento diretos estão apresentados no Quadro 1 (os resultados apresentados são a média de 3 determinações). Nos horizontes A, B e C do solo, a fração argila é inferior a 10%, apresentando uma diminuição deste valor com a profundidade até chegar a valores nulos na camada de base da voçoroca. Estes solos são ácidos ($\text{pH} < 5$), com CTC baixa ($1,1 \text{ Cmol}/\text{dm}^3$), textura arenosa, estrutura blocos/granular fina e permeabilidade alta. No horizonte A, ocorrem raízes finas dispersas e uma pequena porcentagem de matéria orgânica ($\text{MO} = 0,5\%$). A umidade natural destes horizontes é baixa ($w = 8\%$), apresentam-se não saturados ($S < 30\%$), com um peso específico natural entre 15 e 16 kN/m^3 . Os arenitos apresentam peso específico levemente superior e um índice de vazios mais baixo. Todos os horizontes/camadas mostraram um peso específico real dos grãos em torno de 26,5 kN/m^3 e não apresentaram plasticidade. Geotecnicamente, estes solos/rochas foram classificados com areias mal graduadas.

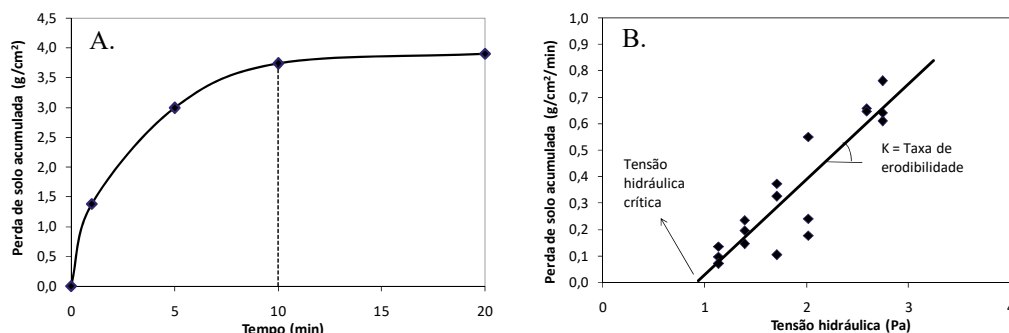


Fig. 6 – Curva típica da perda acumulada de solo por área de amostra *versus* tempo (A). Ajuste dos pontos experimentais para estimativa da taxa de erodibilidade (K) e a tensão cisalhante hidráulica crítica (τ_h crit) – (B)

No Quadro 1 estão apresentados os fatores de erodibilidade K da Equação Universal de Perda de Solo (USLE) para os horizontes/camadas estudadas, que foram estimados através da proposta de Wischmeier e Smith (1978). Sendo necessário a porcentagem de matéria orgânica, os teores de silte, areia fina e argila, a estrutura (obtida pela análise visual do perfil segundo as especificações de Lemos e Santos, 1982) e permeabilidade (obtida em ensaios *in situ* com a técnica do piezômetro para os horizontes A e B; e estimados no ensaio de infiltrabilidade para as outras camadas). A estimativa

do K_{USLE} ((t/ha)/(t.m/ha.mm/hora))) para os horizontes/camadas do perfil estudado situou-se entre 0,102 a 0,219. Valores estes inferiores a 0,30, portanto caracterizando estes materiais como de baixa a média erodibilidade (Carvalho, 1994; Cavacante e Araújo, 2005).

A avaliação da resistência ao cisalhamento dos solos/rochas estudados foi obtida em laboratório através de ensaios de cisalhamento direto convencionais, nas condições de umidades natural (c e ϕ) e inundadas (c_{pu} e ϕ_{pu}). Verifica-se que para todos os horizontes/camadas os valores de coesão são muito baixos, consistentes com a textura e estrutura observada em campo. Em geral, a inundação reduziu a tensão de cisalhamento máxima para todos os níveis de tensão aplicados nos ensaios. Nestes materiais o aumento da umidade e grau de saturação anulou o intercepto coesivo e reduziu levemente o ângulo de atrito interno. Com a saturação anula-se o efeito da sucção (parcela de

Quadro 1 – Resultados dos ensaios de caracterização, ensaios químicos, índices físicos e determinação do fator de erodibilidade (K) da equação universal de perda de solo e resistência ao cisalhamento direto.

Resultados	Horizontes de solo			Camadas de rocha	
	A	B	C	Unidade 1	Unidade 2
				2C	1A
Areia grossa (%)	1,0	2,0	2,0	0,0	1,0
Areia média (%)	49,0	50,0	72,0	56,0	39,0
Areia fina (%)	40,0	36,0	21,0	41,0	58,0
Silte (%)	2,0	6,0	1,0	1,0	2,0
Argila (%)	8,0	6,0	4,0	2,0	0,0
RD (%)	40	25	100	100	100
Pp ₂₀₀	12,6	13,7	10,2	5,8	5,3
Cu	4,5	7,1	4,8	1,4	2,2
Cc	1,2	1,6	2,1	0,9	1,4
LL e LP (%)	N.P.	N.P.	N.P.	N.P.	N.P.
% MO	0,5	0,5	0,1	0,1	0,1
CTC (Cmol/dm ³)	1,1	1,1	1,4	0,1	0,6
pH	4,5	4,6	4,8	5,3	5,0
w (%)	3,4	7,2	3,7	6,8	4,2
γ_s (kN/m ³)	26,54	26,52	26,80	26,82	26,40
γ (kN/m ³)	15,91	14,95	16,23	17,53	17,60
e	0,73	0,92	0,72	0,64	0,58
n (%)	42,0	47,3	41,6	38,8	35,9
S (%)	12,5	19,8	13,9	29,1	19,5
Class. Triangular	areia	areia	areia	areia	areia
SUCS	SM	SM	SP	SP	SP
Estrutura	bloco ou maciço				
Permeabilidade	Alta ($k = 5,6 \times 10^{-4}$ cm/s a $1,7 \times 10^{-3}$ cm/s)				
K_{USLE}	0,168	0,117	0,219	0,196	0,102
c (kPa) / ϕ (°)	3,4 / 37	1,4 / 32	4,3 / 33	0 / 38	11 / 33
c_{pu} (kPa) / ϕ_{pu} (°)	0 / 28	0 / 25	0 / 33	0 / 33	11 / 27

Obs.: RD = razão de dispersão; Cu = coeficiente de uniformidade; Cc = coeficiente de curvatura; LL = limite de liquidez; LP = limite de plasticidade; MO = matéria orgânica; CTC = capacidade de troca catiônica; w = teor de umidade; γ_s = peso específico real dos grãos; γ = peso específico natural; e = índice de vazios; n = porosidade; S = grau de saturação; SUCS = sistema unificado de classificação dos solos; SM = areia siltosa; SP = areia mal graduada; c = intercepto coesivo, ϕ = ângulo de atrito interno, c_{pu} e ϕ_{pu} = amostras pré-umedecidas.

resistência de solos não saturados) e a resistência destes solos torna-se somente devido ao atrito entre as partículas. Exceto o arenito da camada 1A, todos os horizontes/camadas a coesão se anula com a saturação.

4.2 Ensaios de dispersão e desagregação

A razão de dispersão (RD) do horizonte C e dos arenitos foi de 100% (Quadro 1). Valores que enquadram estes materiais como de média a alta e alta erodibilidade, segundo Bastos (1999). Valores de RD < 60% identificam materiais de baixa erodibilidade (horizontes A e B).

Os resultados dos ensaios de desagregação (Quadro 2) mostram que os horizontes A e B do solo, independentemente de sua condição de umidade, são mais resistentes frente à inundação, em que a estrutura, não confinada, permaneceu quase que intacta após o término do ensaio, devido à presença de grãos de tamanho silte e argila (10 a 12 %), óxidos de ferro e matéria orgânica.

Quadro 2 - Resultado dos ensaios de desagregação

Hor.	Condição Inicial	Comportamento apresentado durante o ensaio
A	Natural	Rápida ascensão capilar com quase nenhuma desagregação, nenhum inchamento, pequenos rupturas laterais. Amostra não desagrega.
B	Natural	Rápida ascensão capilar (10 min) com pouca desagregação, abatimento, nenhum inchamento, ruptura nas bordas e fissuração no topo.
	Seca ao ar	Rápida ascensão capilar (5 min), ruptura nas bordas, com muito pouca desagregação, abatimento.
C	Natural	Rápida ascensão capilar, ruptura nas bordas. Amostra desagrega completamente.
2C	Seca ao ar	Rápida ascensão capilar (5 min), com fissuração. Amostra desagrega completamente.
1A	Natural	Rápida ascensão capilar (5min) com uma alta velocidade de desagregação. Formação de trinca, ruptura nas bordas e fissuração no topo. Nenhum inchamento.
	Seca ao ar	Ascensão capilar lenta (30min) com uma alta velocidade de desagregação. Formação de trinca, rupturas nas bordas e fissuração no topo. Nenhum inchamento.

O mesmo comportamento não foi verificado para as amostras do horizonte C e das camadas 2C e 1A do arenito que apontaram um alto poder de desagregação, não resistindo à inundação completa. Constatou-se que a condição inicial de umidade das amostras não influenciou o resultado do ensaio, pois elas desagregaram completamente, sobretudo, por abatimento, resultando num material desestruturado. A Figura 7 apresenta imagens do ensaio de desagregação em amostras do horizonte B e o arenito (Tatto, 2007).

4.3 Ensaios de pelo critério de erodibilidade MCT

Para avaliação da erodibilidade pelo critério MCT foram moldados 90 corpos de prova indeformados, sendo que o Quadro 3 traz os valores obtidos para o coeficiente de sorção (s) e perda por imersão (pi) das amostras ensaiadas nas diferentes condições de umidade (média de 3 determinações para cada condição de umidade). Os valores do coeficiente de sorção para as amostras do horizonte A foram inferiores aos dos outros materiais, indicando uma menor velocidade do avanço da frente de saturação. Nas amostras do horizonte C e camadas 2C e 1A, estes valores foram

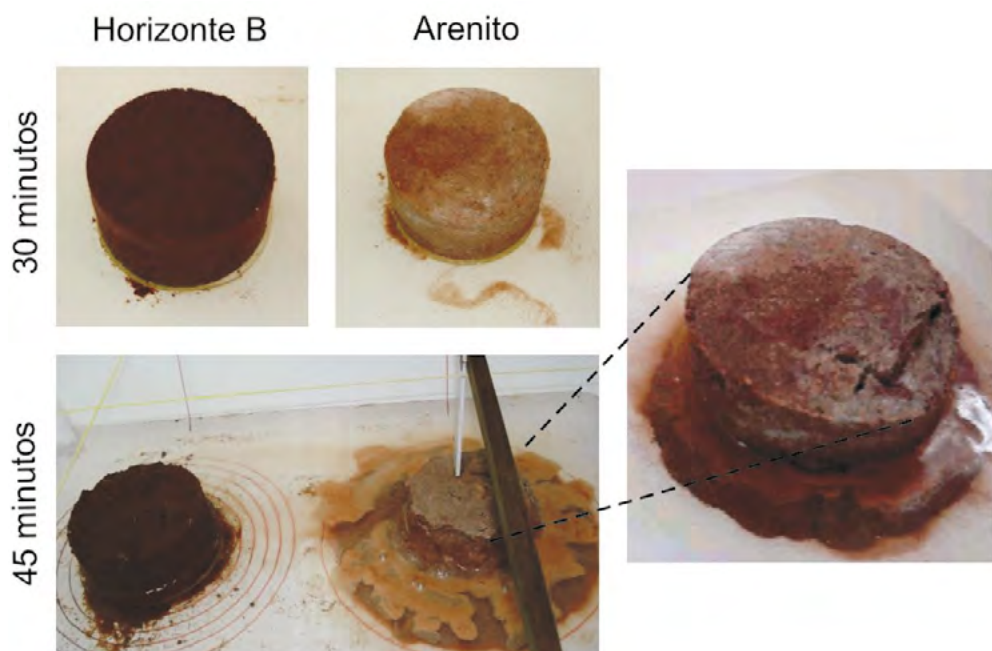


Fig. 7 – Comportamento inicial das amostras quando submetidas à inundação.

mais elevados, variando de 0,67 a 1,35 cm/min^{1/2}. A Figura 8, por sua vez, apresenta o resultado médio do horizonte A e da camada 2C, verificando a diferença de comportamento entre os materiais.

Quadro 3 – Valores do coeficiente de sorção (s) e perda por imersão (pi) para diferentes condições de umidade – critério de erodibilidade da Metodologia MCT

Horiz./ camadas	umidade natural (wnat)			seca ao ar (sa)			pré-umedecida (pu)		
	s (cm/min ^{1/2})	pi (%)	pi/s	s (cm/min ^{1/2})	pi (%)	pi/s	s (cm/min ^{1/2})	pi (%)	pi/s
A	0,367	0,21	0,69	0,499	0,33	0,73	0,054	1,33	25,7
B	0,789	22,4	29,4	0,734	37,6	58,0	0,053	57,1	1548
C	0,989	77,9	82,6	1,111	74,8	68,0	0,042	77,0	2060
2C	0,969	79,0	84,7	0,846	70,9	120,9	0,054	73,7	3013
1A	0,673	85,1	191,3	0,802	82,6	106,3	0,021	77,6	1437

Os resultados apresentados destacam a maior susceptibilidade à erosão do horizonte C e das camadas de arenito (1A e 2C) em relação aos horizontes A e B. Verifica-se uma certa tendência de aumento da velocidade de ascensão capilar (s) e da perda por imersão para as amostras secas ao ar para os solos dos horizontes A e B. Para o horizonte C e camadas de arenito não se verificou uma diferença significativa entre estes parâmetros. A perda por imersão nas amostras secas ao ar foi sempre mais elevada em relação às amostras na umidade natural e pré-umedecidas para os horizontes A e B. Nas outras camadas os valores de perda por imersão foram elevados, não apresentando esta tendência.

Nas amostras pré-umedecidas verificou-se uma tendência de diminuição na velocidade de ascensão capilar e um aumento na perda por imersão. Esta observação também foi descrita por Fernandes (2011) e Bastos (1999). Segundo Bastos (1999), a variação da razão entre as grandezas

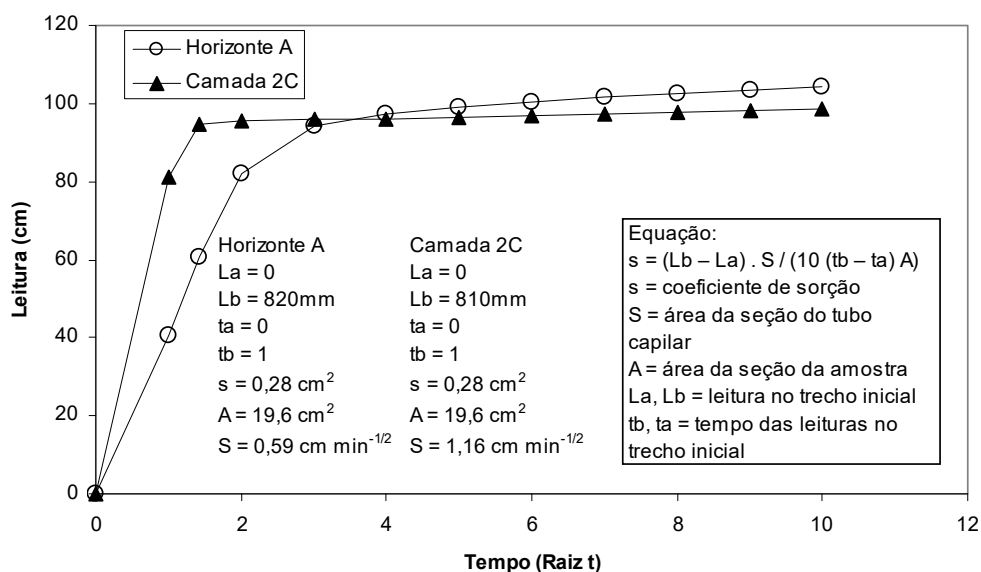


Fig. 8 – Resultado do ensaio de infiltração em amostras na umidade natural

que representam estas propriedades (π/s) é que determina qualquer mudança na avaliação de erodibilidade pelo critério proposto por Nogami e Villibor (1979).

O horizonte A para qualquer condição de umidade apresentou-se como não erodível, verificando-se que na condição pré-umedecida a erodibilidade é mais elevada que para as outras condições. Para o horizonte B, somente na umidade natural, este horizonte apresentou-se não erodível, para condição seca ao ar e pré-umedecida a relação π/s foi superior a 50, caracterizando um solo erodível (Figura 9). O horizonte C, as camadas de arenito 1A e 2C apresentaram-se erodíveis para qualquer condição de umidade. As relações π/s para condição pré-umedecidas foram extremamente elevadas. O maior destacamento que ocorre nas camadas de arenito está, provavelmente, associado ao baixo grau de cimentação entre as partículas e a perda de resistência devido à sucção.

Logo, nestes materiais, o alto potencial de desagregação mantém-se para condições de umidade semelhantes àsquelas que ocorrem na natureza quando passa a se estabelecer o fluxo de água superficial, isto é, o momento a partir do qual o solo está saturado. A redução da capacidade de infiltração do material que acontece, por exemplo, durante um evento pluviométrico pode ser associada à diminuição do coeficiente de sorção na condição pré-umedecida.

4.4 Ensaios de Inderbitzen

Os ensaios de Inderbitzen (método direto) permitiram quantificar a erodibilidade (desagregação) e também avaliar o efeito da umidade inicial as amostras à susceptibilidade à erosão hídrica por escoamento de água superficial. Os resultados dos ensaios de Inderbitzen são apresentados em termos de perda de solo (desagregação) por unidade de área (g/cm^2) pelo tempo de ensaio (min) para cada condição específica de escoamento de água e inclinação de rampa, portanto determinando-se a tensão hidráulica aplicada no ensaio (τ_h), conforme apresentado no Quadro 4. No total foram ensaiados 85 corpos de prova indeformados, com uma média de 6 corpos de prova por condição de umidade e por horizonte/camada que constituem a voçoroca. As Figuras 10 a 14, a partir dos resultados de perda de solo por unidade de área da amostra pelo tempo de ensaio plotados versus

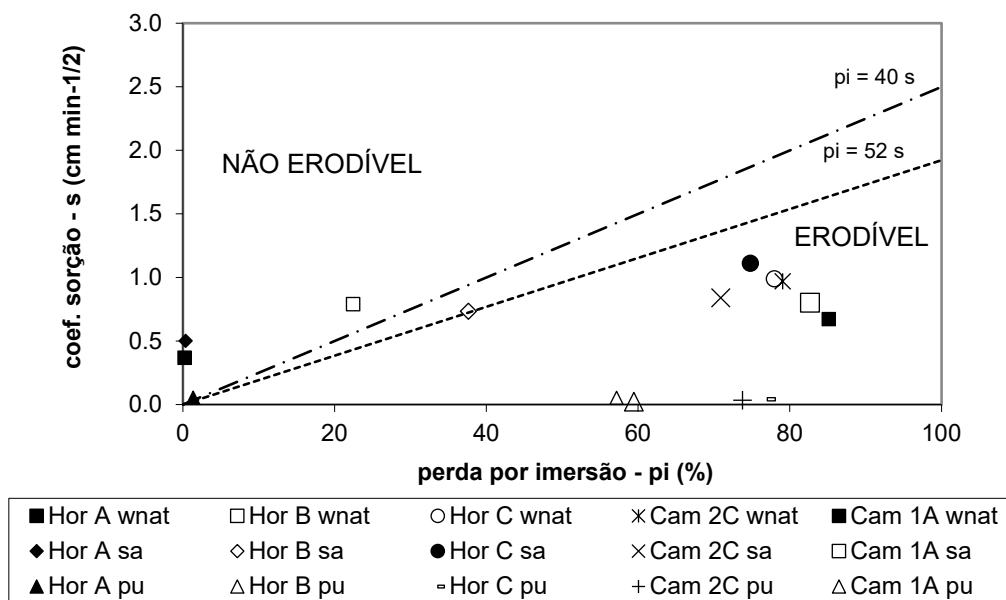


Fig. 9 – Aplicação dos critérios de erodibilidade pela Metodologia MCT

tensão hidráulica aplicada, determina-se a tensão cisalhante hidráulica crítica (τ_{herit}) e a taxa de erodibilidade (K).

Para as amostras de arenito (camadas 2C e 1A) verifica-se certa tendência de valores mais elevados de erodibilidade na condição seca ao ar. Valores bem mais elevados de erodibilidade do horizonte C e camadas de arenito foram encontradas em relação ao horizonte A. O horizonte B os valores situaram-se em um patamar intermediário.

Não foi possível determinar as tensões hidráulicas críticas para o horizonte A, mas para o horizonte B essas se situaram entre 1,0 e 1,30 Pa, valores semelhantes encontrados por Bastos (1999) para solos dos horizontes B da região metropolitana de Porto Alegre (τ_{herit} entre 1 e 1,25 Pa) e para os solos do horizonte A/B do Distrito de São Valentin em Santa Maria estudados por Fernandes (2011). Para o horizonte C e os arenitos estes valores situaram-se entre 0,5 e 1,0 Pa, portanto valores inferiores aos solos dos horizontes A e B. Bastos (1999) e Fernandes (2011) verificaram esta tendência, ou seja, os solos saprolíticos e materiais de alteração apresentam uma tensão hidráulica crítica inferior quando comparado com os horizontes pedológicos A e B. Os horizontes superficiais apresentaram valores maiores deste parâmetro indicando uma tendência de maior resistência ao início do processo erosivo por arraste das partículas do solo.

Bastos (1999) ao analisar os parâmetros físicos e geomecânicos frente à erodibilidade observada em campo e a taxa de erodibilidade medida em laboratório, através de análises estatísticas por modelos de regressão linear, conclui que na condição de umidade natural, as variáveis que se mostraram correlacionáveis com a erodibilidade (K em $10^{-2} \text{g/cm}^2/\text{min/Pa}$) medida nos ensaios de Inderbitzen foram: $P_{p,200}$ - % passante na peneira # 200; K_{USLE} - fator de erodibilidade da USLE; RD - razão de dispersão; razão π/s da metodologia MCT e Δc - variação do intercepto coesivo. Nos solos estudados em Porto Alegre e região metropolitana verificou-se uma afinidade entre o comportamento dos horizontes e camadas em campo (processos erosivos mais ou menos intensos) e os dados do parâmetro K (coeficiente de erodibilidade). Sugeriu, numa primeira aproximação, que os solos mais erodíveis apresentam valores de K na umidade natural superiores a um valor de $0,1 \text{ g/cm}^2/\text{min/Pa}$ e que os solos mais resistentes a erosão apresentem valores de K inferiores a $0,001 \text{ g/cm}^2/\text{min/Pa}$ (Bastos, 1999).

Quadro 4 – Resultados dos ensaios de Interbitzen – Perda de Solo (10^{-3} g/cm²/min), para diferentes condições de fluxo (Q = vazão e i = inclinação da rampa) e teor de umidade das amostras, e parâmetros τ_{crit} (Pa) e K (10^{-2} g/cm²/min/Pa)

Hor.	COND	Q = 3 l/min				Q = 6 l/min				τ_{herit} (Pa)	K (10 ⁻² g/cm ² / min/(Pa)
		i=10°	i=26°	i=45°	i=54°	i=10°	i=26°	i=45°	i=54°		
τ_{h} (Pa)		1,136	1,710	2,585	3,297	1,393	2,018	2,742	3,239		
A	wnat	6,4	5,5	9,8	23,4	-	14,1	18,6	20,7	indet.	0,78
	sa	8,5	7,7	9,0	-	15,8	-	28,7	37,9	indet.	1,13
	pu	5,3	5,6	-	-	21,4	33,4	37,4	33,6	indet.	1,38
B	wnat	8,3	15,2	-	-	50,9	60,8	487	416,9	1,33	24,3
	sa	16,1	138,7	140	-	73,3	-	-	406	1,02	15,5
	pu	22,8	27,1	-	-	20,6	38,3	93,3	264,2	1,29	10,3
C	wnat	97,5	373,5	-	-	235,9	856,4	761,7	-	0,79	45,8
	sa	70,9	325,0	659,0	-	197,6	240,7	610,0	-	0,92	34,6
	pu	136,1	104,2	646,7	-	146,0	177,5	641,9	-	1,08	36,3
2C	wnat	181,0	420,9	-	-	243,7	669,1	784,6	-	0,67	40,5
	sa	154,9	470,0	-	-	415,9	660,0	-	-	0,75	52,4
	pu	159,8	465,4	631,0	-	146,0	177,5	633,9	-	0,73	30,7
1A	wnat	200,3	312,5	687,4	-	198,9	701,6	859,0	-	0,76	42,3
	sa	165,4	468,5	867,8	-	299,8	694,5	846,1	-	0,68	44,5
	pu	172,1	514,2	774,3	-	-	682,8	803,7	-	0,48	37,9

O Quadro 5 resume os valores limites que foram adotados para separar as classes de erodibilidade dos solos em baixa (B); média a baixa (MB), média (M) e média a alta (MA); e alta (A).

Quadro 5 - Valores propostos por Bastos (1999) para classificar as os solos em classes de erodibilidade baixa (B), média (M) e média a alta (MA); e alta (A).

Erodibilidade	B	MB, M e MA	A
K*	< 0,1	> 0,1 e < 10	> 10
%P _{p200}	> 55	> 35 e < 55	< 35
IP (%)	>10	> 5 e < 10	< 5
K* _{USLE}	< 0,2	> 0,2	
pi/s	< 52	> 52	
Δc (%)	< 85	> 85	
RD (%)	< 60	> 60	

K = g/cm²/min/Pa

K_{USLE} = t/ha/(t.m/ha.mm/hora)

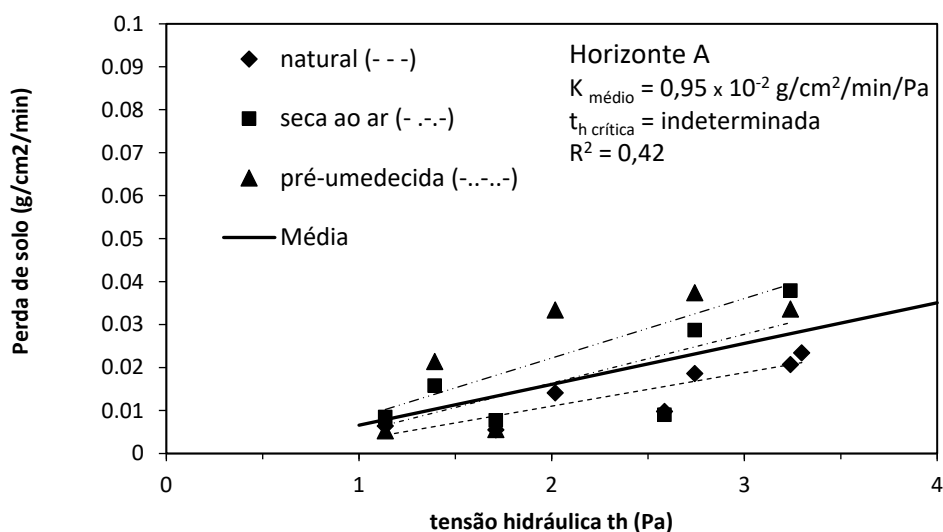


Fig. 10 – Resultados dos ensaios Inderbitzen para as amostras do horizonte A, nas condições de umidade natural, seca ao ar e pré-umedecida

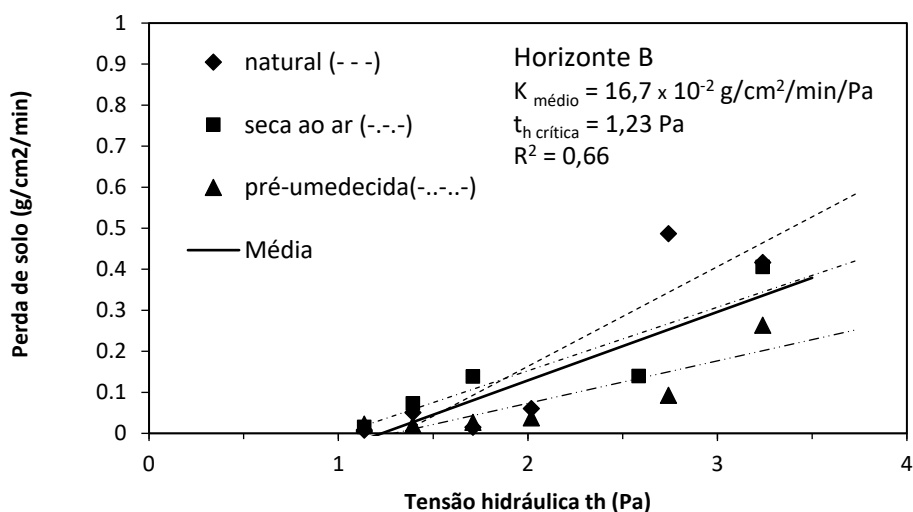


Fig. 11 – Resultados dos ensaios Inderbitzen para as amostras do horizonte B, nas condições de umidade natural, seca ao ar e pré-umedecida

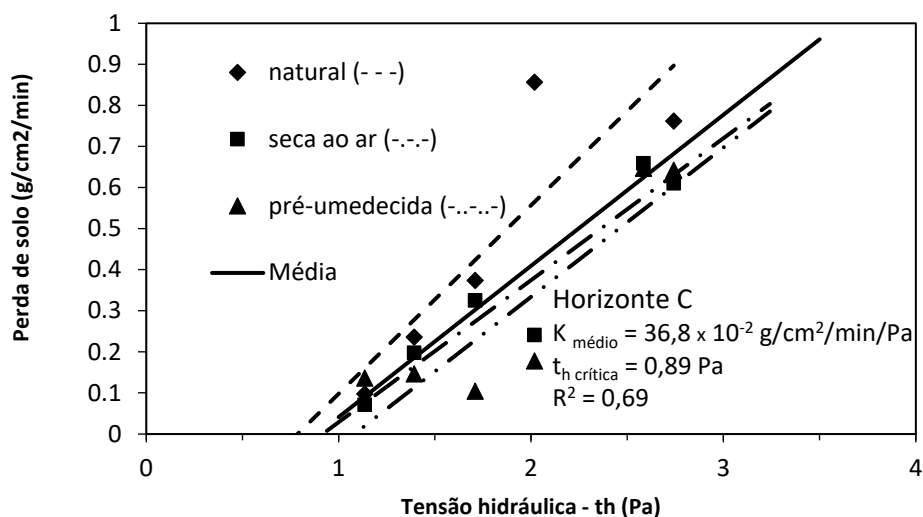


Fig. 12 – Resultados dos ensaios Inderbitzen para as amostras do horizonte C, nas condições de umidade natural, seca ao ar e pré-umedecida

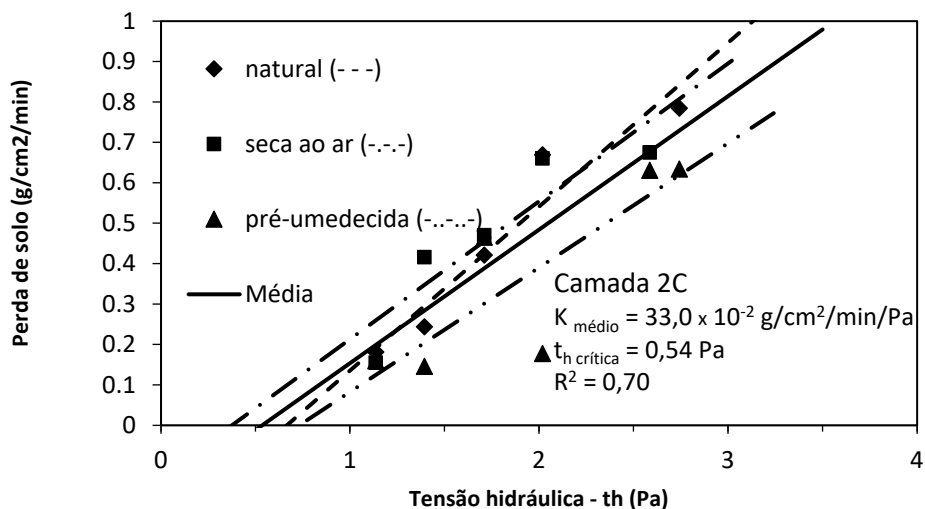


Fig. 13 – Resultados dos ensaios Inderbitzen para as amostras da camada de arenito 2C, nas condições de umidade natural, seca ao ar e pré-umedecida

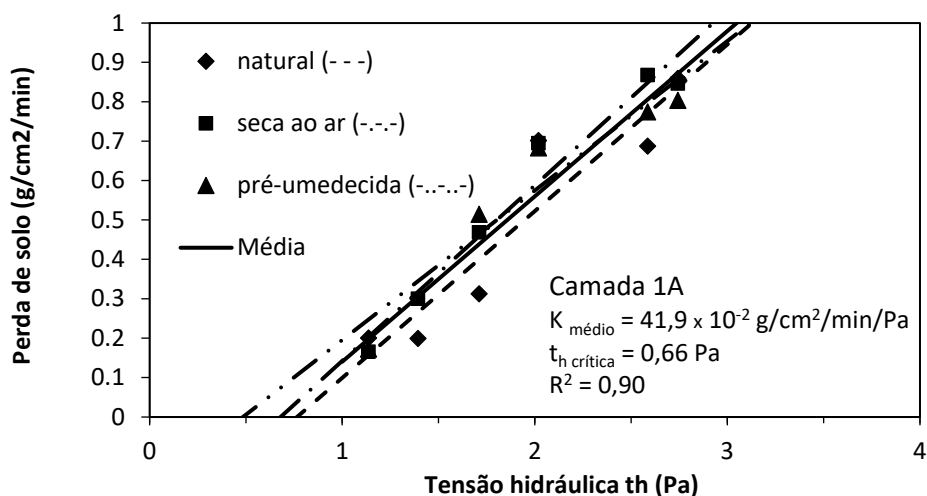


Fig. 14 – Resultados dos ensaios Inderbitzen para as amostras da camada de arenito 1A, nas condições de umidade natural, seca ao ar e pré-umedecida

O horizonte C e os arenitos das camadas 2C e 1A foram os materiais potencialmente mais erodíveis pelos dados dos ensaios de laboratório, que concordam com o comportamento verificado no campo (o processivo erosivo se tornava mais intenso quando o ravinamento chegava no horizonte C e mais intenso ainda nas camadas de arenito). Ou seja, os horizontes A e B são mais resistentes, principalmente o horizonte A, pelas inúmeras raízes que fazem com que as amostras não desagreguem quanto imersas em água e resistam mais as tensões hidráulicas. Mas, mesmo assim, devido fração fina ser pequena, pouca matéria orgânica e baixa plasticidade estes horizontes superficiais são mais erodíveis que os solos estudados por Bastos (1999) e Fernandes (2011). O Quadro 6 apresenta o resumo das análises realizadas nos horizontes/camadas do perfil da voçoroca estudada em relação aos níveis de erodibilidade propostos por Bastos (1999).

Quadro 6 - Resumo da análise da erodibilidade dos horizontes/camadas estudadas de acordo com a proposta de abordagem geotécnica de Bastos (1999): Classe 1 – Baixa; Classe 2 – Média a Baixa, Média e Média a Alta; Classe 3 – Alta.

Ident.	Parâmetros de erodibilidade						
	K	K _{USLE}	RD	%P _{p,200}	IP	pi/s	Δc
Hor. A	2	1, 2	1, 2	3	3	1, 2	3
Hor. B	3	3	1, 2	3	3	1, 2	3
Hor. C	3	1, 2	-	3	3	3	3
Cam. 2C	3	1, 2	3	3	3	3	3
Cam. 1A	3	3	3	3	3	3	1, 2

O coeficiente de erodibilidade estimado - K_{USLE}; a porcentagem passante na peneira 200, índice de plasticidade, e variação do intercepto coesivo não apresentaram uma boa relação com a erodibilidade dos solos, ou seja no perfil de São Francisco de Assis não conseguiu separar os horizontes/camadas menos erodíveis (horizontes A e B) dos mais erodíveis (horizonte C e camadas de arenito). A razão de dispersão (RD) e os critérios baseados na metodologia MCT apresentaram-se mais consistentes para estimativa da erodibilidade dos materiais estudados. O ensaio de

Inderbitzen, com a determinação do coeficiente de erodibilidade K, foi o que apresentou maior correlação com o comportamento do solo/rocha verificado no campo. Portanto, nos horizontes e camadas que os processos erosivos eram mais intensos, apresetaram maiores coeficientes de erodibilidade.

5 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os ensaios de desagregação foram utilizados de forma satisfatória na avaliação qualitativa da erodibilidade e os seus resultados destacam uma boa correlação com aqueles obtidos dos ensaios de infiltrabilidade e erodibilidade específica, bem como com o comportamento observado dos horizontes/camadas de solo e rocha no campo.

No ensaio de desagregação, a saturação das amostras anula a sucção matricial e gera poropressão positiva, que destrutura e desagrega completamente os materiais do horizonte C e camadas 2C e 1A que são mais erodíveis quando comparados aos horizontes A e B.

Nos ensaios de perda de massa por imersão (π) e infiltrabilidade, verificou-se que o horizonte A, independente da condição inicial de umidade, e o horizonte B, na condição de umidade natural, foram classificados como não erodíveis ($\pi/s < 50$).

Os resultados obtidos para relação π/s do horizonte C e camadas 2C e 1A foram elevados indicando um alto potencial erosivo. Nas amostras ensaiadas na umidade natural e secas ao ar constatou-se valores mais elevados do coeficiente de sorção (s) nos materiais que apresentaram maior perda por imersão (π).

A Metodologia MCT apresentou uma boa relação e correspondência entre os resultados dos ensaios e o comportamento dos solos/rochas observados nos locais estudados, comprovando sua aplicabilidade a estes materiais. O ensaio de Inderbitzen foi o que apresentou maior correlação com o comportamento do solo/rocha no campo. Estes ensaios apresentaram parâmetros que indicam que o horizonte C e camadas 2C e 1A são muito erodíveis ($K \text{ médio} > 33 \times 10^{-2} \text{ g/cm}^2/\text{min/Pa}$ e $\tau_{h \text{ crítica}} < 0,89 \text{ Pa}$), quando comparados com o solo superficial (horizontes A e B pedológicos). No campo observou-se a aceleração dos processos erosivos, com o aprofundamento do ravinamento com processos de solapamento, deslizamentos e piping ocorriam no horizonte C e nas camadas de arenito.

Os ensaios efetuados demonstraram que o potencial de desagregação em água está relacionado com a estrutura dos materiais frente à ação dos fluxos de água superficial e subsuperficial e dos mecanismos de hidratação e desaeração.

6 – AGRADECIMENTOS

Aos Programas de Pós-graduação em Engenharia Civil e Geografia da Universidade Federal de Santa Maria. Ao apoio logístico do Laboratório de Materiais de Construção Civil (LMCC) do Centro de Tecnologia da UFSM.

7 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aragão, R. de; Almeida, J.A.P.; Figueiredo, E.E.; Srinivasan, V.S. (2011). *Mapeamento do potencial de erosão laminar na bacia do rio Japarutuba, SE, via SIG*. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, vol.15, nº 1, pp. 731-740.
- ABNT (1984a). NBR 6459 – *Solo – Determinação do limite de liquidez – Método de ensaio*. Rio de Janeiro, 6p.
- ABNT (1984b). NBR 6508 – *Grãos de solos que passam na peneira de 4,8 mm – Determinação da massa específica*. Rio de Janeiro, 8p.

- ABNT (1984c). NBR 7180 – *Solo – Determinação do limite de Plasticidade – Método de ensaio*. Rio de Janeiro, 3p.
- ABNT (1984d). NBR 7181 – *Solo – Análise granulométrica*. Rio de Janeiro, 13p.
- ABNT (1986). NBR 6457 – *Amostras de solo - preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização*. Rio de Janeiro, 9p.
- ABNT (1996). NBR 13602 – *Solo - Avaliação da dispersibilidade de solos argilosos pelo ensaio sedimentométrico comparativo - Ensaio de dispersão SCS - Método de ensaio*. Rio de Janeiro, 1996. 5p.
- Avila, L.O. (2009). *Erosão na microbacia do Arroio Sarandi: Voçoroca do Buraco Fundo, Santa Maria, RS*. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 109p.
- ASTM D3080 (2011). *Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions*, ASTM International, West Conshohocken, PA. 9p.
- Basso, L. (2013). *Estudo da erodibilidade de solos e rochas sedimentares de uma voçoroca na cidade de São Francisco de Assis - RS*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 140p.
- Bastos, C.A.B. (1999). *Estudo Geotécnico sobre a erodibilidade de solos residuais não saturados*. Tese de Doutorado em Engenharia, UFRGS, Rio Grande do Sul, 229p.
- Bastos, C.A.B.; Milititsky, J.; Gehling, W.Y.Y. (2000). *A avaliação da erodibilidade dos solos sob o enfoque geotécnico - pesquisas e tendências*. Teoria e Prática na Engenharia Civil, Rio Grande/RS, vol. 1, pp. 17-26.
- Bertoni, J.; Lombardi Neto, F. (2005). *Conservação do Solo*. 4.ed., São Paulo: Ícone, 355p.
- Camapum de Carvalho, J.; Sales, M. M.; Souza, N. M. de; Melo, M.T.S. (2006). *Processos erosivos no Centro-oeste Brasileiro*. Finatec, Brasília, 464p.
- Cantalice, J.R.B.; Cassol, E.A.; Reichert, J.M. Borges, A.L.O. (2005). *Hidráulica do escoamento e transporte de sedimentos em sulcos em solo franco-argilo-arenoso*. Revista Brasileira de Ciência do Solo, vol.19, pp.597-607.
- Carvalho, N.O. (1994). *Hidrossedimentologia Prática – CPEM/ELETROBRÁS*.
- Cavalcante, S.P.P.; Araújo, J.C. (2005). *Avaliação espacial da perda de solo por erosão da bacia experimental de Aiuaba – Ceará através do uso de SIG*. Congresso Brasileiro de Estabilidade de Encostas, Rio de Janeiro. Anais. Rio de Janeiro: pp. 401-413.
- Denardin, J. E. (1990). *Erodibilidade do solo estimada por meio de parâmetros físicos e químicos*. Tese de Doutorado, Piracicaba: ESALQ, 113p.
- Fernandes, J. A. (2011). *Estudo da erodibilidade de solos e rochas de uma voçoroca em São Valentin, RS*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 127 p.
- Fernandes, L. P. A. (2015). *Estudo da erodibilidade de solo em uma estrada de terra do campo de instrução de Santa Maria - RS. Santa Maria*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 135p.

- Freitas, F.J.; Cantalice, J.R.B.; Bezerra, S.A; Silva, M.D.R.O.; Santos, P.M.; Correa, R.M.; Lima, P.A.; Figueira, S.B. (2008). *Erosão em entressulcos sob caatinga e culturas agrícolas*. Revista Brasileira de Ciência do Solo, vol.32, pp.1743-1751.
- Lima, J.E.F.W.; Silva, E.M. da; Eid, N.J.; Martins, E.S.; Koide, S.; Reatto, A. (2007). *Desenvolvimento e verificação de métodos indiretos para estimativa da erodibilidade dos solos da bacia experimental do alto rio Jardim – DF*. Revista Brasileira de Geomorfologia, vol.8, nº 2, pp. 23-36.
- Lemos, R.C.; Santos, R.D. (1982). *Manual de descrição e coleta de solo no campo*. 2ª. Ed. Campinas/SP.: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo/Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos, 45p.
- Menezes, M.B.M; Pejon, O.J. (2010). *Análise da influência do teor de umidade na absorção d'água e sucção dos solos em estudos de erodibilidade*. Geociências, vol.29, nº 2, pp.211-228.
- Morais, F; Bacellar, L.A.P; Sobreira, F.G. (2004). *Análise da erodibilidade de saprólitos de gnaiss*. Revista Brasileira de Ciência do Solo, vol. 28, pp. 1055-1062.
- Nogami, J.S.; Villibor, D. F. (1979). *Soil characterization of mapping units for highway purposes in a tropical area*. Bulletin of the International Association on Engineering Geology, Krefeld, nº 19, pp.196-199.
- Nogami, J.S.; Villibor, D.F. (1995). *Pavimentos de baixo custo com solos lateríticos*. Ed. Villibor, São Paulo, 213p.
- Nunes, M.C.M; Cassol, E.A. (2008). *Estimativa da erodibilidade em entressulcos de latossolos do Rio Grande do Sul*. Revista Brasileira de Ciência do Solo, vol. 32, pp. 2839-2845.
- Oliveira, J.F.; Griebeler, N.P.; Correchele, V.; Silva, V.C. (2009). *Erodibilidade e tensão crítica de cisalhamento em solos de estradas não pavimentadas*. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, vol.13 (Suplemento), pp.955-960.
- Pejon, O.J. (1992). *Mapeamento Geotécnico de Piracicaba, escala 1:100.000: Estudo de aspectos metodológicos, de caracterização e de apresentação dos atributos*. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2v. 224 p.
- Panachudi, E.; Alves Sobrinho, T.; Vitorino, A.C.T.; Carvalho, D.F. de; Urchei, M.A. (2006). *Parâmetros físicos do solo e erosão hídrica sob chuva simulada, em área de integração agricultura-pecuária*. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, vol.10, nº 2, pp. 261-268.
- Sant'ana, K.D.A. (2015). *Diagnóstico ambiental do meio físico do Campo de Instrução de Santa Maria (CISM)*. Dissertação (Mestrado em Geografia) – PPGeo, Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, 125 p.
- Santos, R.M.M. (1997). *Caracterização geotécnica e análise do processo evolutivo das erosões no município de Goiânia*. Dissertação de Mestrado em Geotecnia. Brasília: UnB, 120 p.
- Silva, M.L.N.; Curi, N.; Lima, L.M.; Ferreira, M.M. (2000). *Avaliação de métodos indiretos e determinação da erodibilidade de latossolos brasileiros*. Pesquisa Agropecuária Brasileira, vol. 35, nº 6, pp.1207-1220.
- Silva, A.M.; Silva M.L.N.; Curi N.; Avanzi, J.C.; Ferreira M.M. (2009). *Erosividade da Chuva e erodibilidade de cambissolo e latossolo na região de Lavras, sul de Minas Gerais*. Revista Brasileira de Ciência do Solo, vol. 33, pp.1811-1820.

- Tatto, J. (2007). *Análise dos Parâmetros Geológicos-Geotécnicos que Condicionam Erosão por Voçoroca no Município de São Francisco de Assis*. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria: Santa Maria, 84p.
- Trentin, R.; Robaina, L.E.S.; Scoti, A.A.V. (2013). *Mapeamento geomorfológico do município de Manoel Viana - oeste do Rio Grande do Sul - Brasil*. Geociências, vol. 32, nº 2, pp. 333-345.
- Wischmeier, W.H.; Smith, D.D. (1978). *Predicting rainfall erosion losses: A guide conservation planning*. Washington, DC, USDA, 58p. (Agriculture Handbook, 537)