

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL**  
**FACULDADE DE AGRONOMIA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DO SOLO**

**EROSÃO EM ENTRESSULCOS E QUALIDADE FÍSICA DE SOLOS  
CONSTRUÍDOS APÓS MINERAÇÃO DE CARVÃO**

**ÂNDREA MACHADO PEREIRA FRANCO**

**(Tese de Doutorado)**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
FACULDADE DE AGRONOMIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DO SOLO**

**EROSÃO EM ENTRESSULCOS E QUALIDADE FÍSICA DE SOLOS  
CONSTRUÍDOS APÓS MINERAÇÃO DE CARVÃO**

**ÂNDREA MACHADO PEREIRA FRANCO**  
Engenheira Agrícola (UFPel)  
Mestre em Ciências – Solos (UFPel)

**Tese apresentada como um dos  
requisitos à obtenção do grau de  
Doutor em Ciência do Solo**

**Porto Alegre, RS, Brasil**

**Julho, 2010.**



## DEDICO

À memória de meu Pai querido, Enio Roci Fernandes Franco que sempre me apoiou nos meus estudos e ensinou a enfrentar as dificuldades;

À minha querida Mãe, Marlene Machado Pereira pelo carinho, amizade, incentivo e apoio em todos os momentos;

Ao meu companheiro Ricardo Victoria Silva pelo carinho, amizade, companheirismo, dedicação e principalmente compreensão em todos os momentos;

Aos meus familiares pelo apoio em todos os momentos, principalmente nos momentos que não pude estar presente cuidando do meu Pai;

Às amigas Liliani Goulart e Daniela Ceolin pela sincera amizade, apoio e por compreenderem minha ausência em muitos momentos.

*“Sem sonhos, as perdas se tornam insuportáveis,  
as pedras do caminho se tornam montanhas,  
os fracassos se transformam em golpes fatais.  
Mas, se você tiver grandes sonhos...  
seus erros produzirão crescimento,  
seus desafios produzirão oportunidades,  
seus medos produzirão coragem.”*

*(Buda)*

## **AGRADECIMENTOS**

À Deus, por ter me proporcionado o dom do estudo e força para a finalização deste trabalho;

Ao Professor Elemar Antonino Cassol pela orientação, apoio, oportunidade, amizade e companheirismo na realização deste trabalho;

Aos professores do Departamento de Solos pelo ensinamento, amizade e companheirismo, em especial ao professor Alberto Vasconcellos Inda Junior pela amizade, incentivo e colaboração nos trabalhos realizados e na banca de qualificação;

Ao Departamento de Solos pela utilização dos laboratórios;

Ao Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH) da UFRGS e ao Departamento de Solos da Faculdade de Agronomia da UFPEL pela utilização do laboratório de Física do Solo;

À CAPES e ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo (PPGCS) pela concessão da bolsa de estudo, ao Departamento de Solos da UFPEL pelo apoio logístico nas coletas de solo e à CRM pela disposição das áreas de coletas;

Aos Professores Eloy Antonio Pauletto do Departamento de Solos da UFPEL e Gustavo Henrique Merten do Instituto de Pesquisas Hidráulicas da UFRGS pelo apoio, amizade, participação e colaboração na banca de Qualificação;

Aos Funcionários Jorge Luiz Ramos dos Santos, José Ferreira da Silva Márcio, Luiz Antonio e Adão pela amizade e grande apoio para a realização deste trabalho;

Ao Funcionário Jader do PPGCS pelo profissionalismo, amizade e apoio em vários momentos;

Aos Bolsistas de Iniciação Científica Luciana, Alexandra, Douglas, Daniel e Fernando pela amizade, companheirismo e grande apoio nas coletas e realizações das chuvas simuladas;

Aos colegas do PPGCS pela amizade e companheirismo, em especial aos colegas Fabiola Lopes, Jeane Portela, André Júlio Amaral, Luis de França e Denice Almeida pela grande amizade, companheirismo e apoio nos momentos difíceis e na realização deste trabalho.

# EROSÃO EM ENTRESSULCOS E QUALIDADE FÍSICA DE SOLOS CONSTRUÍDOS APÓS MINERAÇÃO DE CARVÃO <sup>(1)</sup>

Autor: Ândrea Machado Pereira Franco  
Orientador: Prof. Elemer Antonino Cassol

## RESUMO

A lavra do carvão aliado a recomposição topográfica do terreno causam alterações na estrutura dos solos construídos, afetando a qualidade física e tornando os solos mais suscetíveis aos processos de erosão hídrica. O efeito e a magnitude desses processos são dependentes do tipo de solo. Neste contexto, este trabalho teve os seguintes objetivos: a) avaliar as características hidráulicas do escoamento, quantificar as taxas de desagregação ( $D_i$ ) e determinar a erodibilidade do solo em entressulcos ( $K_i$ ) sob chuva simulada em laboratório para solos construídos há 12 anos e há 5 anos (SC 12 e SC 5) da área de mineração de carvão de Candiota-RS e comparar com o solo original da área de mineração; b) identificar os limites críticos de densidade do solo ( $D_s$ ) em que a resistência mecânica à penetração ( $R_p$ ), a porosidade de aeração (PA) e a água disponível são limitantes para o desenvolvimento das plantas através da metodologia do Intervalo Hídrico Ótimo (IHO). A determinação do fator  $K_i$  e das variáveis hidráulicas do escoamento foram realizadas em laboratório em parcelas experimentais de 0,59 m x 0,59 m, 09 m m<sup>-1</sup> de declividade sob chuva simulada de intensidade de 85 mm h<sup>-1</sup>, aplicada durante 90 minutos. O fator  $K_i$  também foi estimado utilizando modelos analíticos de determinação indireta. O IHO foi determinado pela obtenção da resistência à penetração, umidade volumétrica e densidade do solo em amostras com estrutura preservada. Os resultados mostraram que o SC 12 apresentou melhores condições estruturais em relação ao SC 5 devido ao tempo de construção. Os solos construídos são constituídos de maciços de fragmentos de blocos compactados chamados de agregados não edáficos ou agregados não pedogênicos, os quais são mais resistentes que os agregados de origem pedogenética. Nos solos construídos, os valores de  $D_i$  e  $K_i$  determinados em laboratório foram significativamente menores que no solo original devido à formação e composição dos agregados não pedogênicos desses solos. Dos modelos de determinação indireta testados, o modelo que melhor estimou o  $K_i$  para o solo original e SC 12 foi o que utiliza o teor de argila e de óxido de ferro; O modelo que melhor estimou o valor de  $K_i$  para o SC 5 foi o que utiliza o diâmetro médio ponderado em água ( $DMP_A$ ),  $\Delta pH$  e o parâmetro de Wischmeier (M). O SC 12 foi o que apresentou maior IHO, mesmo apresentando  $D_s$  maior que a densidade crítica, concordando com a melhor estrutura do solo e também menores valores de  $D_i$  e fator  $K_i$ . A qualidade física do solo avaliada pela erodibilidade em entressulcos ( $K_i$ ) e pelo IHO deve ser comparada somente entre solos de mesma natureza.

<sup>(1)</sup> Tese de Doutorado em Ciência do Solo. Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo. Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre (95 p.) Julho de 2010.

## INTERRILL EROSION AND PHYSICAL QUALITY OF CONSTRUCTED SOILS AFTER COAL MINING <sup>(1)</sup>

Author: Ândrea Machado Pereira Franco  
Adviser: Prof. Elemar Antonino Cassol

### ABSTRACT

The extraction of the coal and the landscape resetting causes alterations in the structure of constructed soils, affecting the physical quality and becoming them more susceptible to the water erosion processes. The effect and the magnitude of these processes may be dependent on soil properties. In this context, this study had the following objectives: a) To evaluate the flow hydraulic characteristics, to determine detachment rate ( $D_i$ ) and the interrill soil erodibility factor ( $K_i$ ) under simulated rainfall at laboratory conditions for constructed soil have 12 years and have 5 years (SC 12 and SC 5) of Candiota coal mine, RS, Brazil and to compare with the original soil of the mining area; b) to identify the critical limits of bulk density, where the soil resistance to penetration ( $R_p$ ), porosity of aeration and available water are limiting for the development of the plants through the methodology of Least Limiting Water Range (LLWR). The determination of  $K_i$  factor and flow hydraulic characteristics had been done at laboratory with application of simulated rainfalls of  $85 \text{ mm h}^{-1}$  intensity during 90 minutes on bare soil at interrill unit plot of  $0.59 \times 0.59 \text{ m}$  settled on  $0.09 \text{ m m}^{-1}$  slope. The  $K_i$  factor also was determined using analytical models of indirect determination. The LLWR was determined through the soil resistance to penetration, volumetric water content and bulk density in samples with preserved structure. The results showed that the SC 12 presented better structural conditions in relation to SC 5, due to the construction time. The constructed soils are constituted of structural units, also called not edaphics aggregates or not pedogenics aggregates, which are massive and more compacted and resistant than the pedogenics aggregates. The values of  $D_i$  and  $K_i$  determined in laboratory for the constructed soils were significantly lower than at the original soil, due the formation and composition of not pedogenics units of these soils. Among the tested indirect models determination, the one that better estimate the  $K_i$  factor for the original soil and SC 12 it was that uses the clay and Fe oxides contents. The model that better estimate the factor  $K_i$  for SC 5 was the one that use the mean weight diameter (MWD),  $\Delta\text{pH}$  and the "M" Wischmeier parameter. The SC 12 presented greater LLWR, even though, presenting bulk density greater than critical bulk density. This agrees with the better soil structure and lower values of  $D_i$  and factor  $K_i$ . The use of  $K_i$  factor and LLWR to evaluate physical quality must be done only to compare soils of same nature.

---

<sup>(1)</sup> Doctorate Thesis in Soil Science. Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo. Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, RS, Brazil. (95 p.) July of 2010.

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>5</b>
<b>2.1</b>	<b>Impactos ambientais associados ao processo de lavra e a reabilitação das áreas de mineração</b>	<b>5</b>
<b>2.2</b>	<b>Estrutura dos solos naturais e dos solos construídos</b>	<b>8</b>
2.2.1	Formação e caracterização de agregados edáficos	9
2.2.2	A estrutura de solos construídos e a formação de agregados não pedogênicos	12
<b>2.3</b>	<b>Erosão hídrica do solo e escoamento em entressulcos</b>	<b>14</b>
<b>2.4</b>	<b>Erodibilidade do solo em entressulcos e a influência de alguns parâmetros do solo</b>	<b>17</b>
<b>2.5</b>	<b>Qualidade física do solo e intervalo hídrico ótimo</b>	<b>21</b>
<b>3</b>	<b>MATERIAL E MÉTODOS</b>	<b>27</b>
<b>3.1</b>	<b>Localização e caracterização da área de estudo</b>	<b>27</b>
<b>3.2</b>	<b>Coleta e preparo das amostras</b>	<b>29</b>
<b>3.3</b>	<b>Caracterização física e química do solo</b>	<b>30</b>
<b>3.4</b>	<b>Distribuição de diâmetro e estabilidade de agregados</b>	<b>33</b>
<b>3.5</b>	<b>Estudos de Erosão em Entressulcos</b>	<b>34</b>
3.5.1	Aplicação da chuva simulada em laboratório e características do simulador	35
3.5.2	Determinação das características hidráulicas do escoamento em entressulcos	36
3.5.3	Taxas de desagregação e erodibilidade do solo em entressulcos	37
3.5.4	Estimativa da erodibilidade do solo em entressulcos por métodos indiretos	38
<b>3.6</b>	<b>Intervalo Hídrico Ótimo - IHO</b>	<b>39</b>
<b>3.7</b>	<b>Análise estatística dos dados</b>	<b>41</b>
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b>	<b>43</b>
<b>4.1</b>	<b>Densidade e porosidade do solo</b>	<b>43</b>
<b>4.2</b>	<b>Diâmetro médio ponderado e índice de estabilidade dos agregados</b>	<b>45</b>
<b>4.3</b>	<b>Características hidráulicas do escoamento em entressulcos</b>	<b>49</b>
<b>4.4</b>	<b>Taxa de desagregação e erodibilidade do solo em entressulcos</b>	<b>52</b>

4.5 Erodibilidade do solo em entressulcos estimada por métodos indiretos.....	56
4.6 Intervalo hídrico ótimo do solo .....	60
4.7 Qualidade física com base na erodibilidade do solo em entressulcos e no intervalo hídrico ótimo.....	68
5 CONCLUSÕES .....	70
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	72
ANEXOS.....	83

## RELAÇÃO DE TABELAS

- Tabela 1:** Distribuição de diâmetro das partículas do solo original (SOR) e solos construídos há 12 anos (SC 12) e 5 anos (SC 5). Média entre as camadas de 0,0- 0,1 m e 0,1 – 0,2 m. Média de 12 repetições..... 31
- Tabela 2:** Características químicas dos solos para o solo original (SOR), solos construídos há 12 anos (SC 12) e 5 anos (SC 5). Média entre as camadas de 0,0- 0,1 m e 0,1 – 0,2 m. Média de 12 repetições..... 32
- Tabela 3:** Valores de densidade de partícula ( $D_p$ ), densidade do solo ( $D_s$ ), macroporosidade ( $M_p$ ), microporosidade ( $m_p$ ) e porosidade total ( $P_t$ ) para o solo original (SOR), solo construído 12 anos (SC 12) e solo construído 5 anos (SC 5). Média de 3 repetições..... 43
- Tabela 4:** Diâmetro médio ponderado dos agregados estáveis em água ( $DMP_A$ ), a seco ( $DMP_S$ ) e índice de estabilidade dos agregados (IEA) para o solos original (SOR) e construídos há 12 anos (SC 12) e 5 anos (SC 5) na camada de 0,0 a 0,2 m. Média de 3 repetições..... 46
- Tabela 5:** Características hidráulicas do escoamento em entressulcos para os solos original (SOR) e construídos há 12 anos (SC 12) e 5 anos (SC 5). Os valores observados são a média entre 75 e 90 minutos de ocorrência de chuva. Média de 4 repetições..... 49
- Tabela 6:** Taxas de desagregação ( $D_i$ ) e Fator erodibilidade do solo em entressulcos ( $K_i$ ) em condições de laboratório, sob chuva com intensidade  $85 \text{ mm h}^{-1}$  ( $I = 0,0000236 \text{ m s}^{-1}$ ) e declividade de  $0,09 \text{ m m}^{-1}$  ( $S_f = 0,4560$ ). Os valores de  $D_i$  são médias das cinco últimas observações em cada chuva. Média de 4 repetições..... 53
- Tabela 7:** Valores de erodibilidade do solo em entressulcos obtidos diretamente em laboratório e estimados por métodos indiretos para o solo original (SOR), solo construído há 12 anos (SC 12) e há 5 anos (SC 5)..... 57
- Tabela 8:** Estatística descritiva da densidade do solo ( $D_s$ ), umidade volumétrica ( $\theta_v$ ) e resistência à penetração ( $R_p$ ) para o solo original (SOR), solo construído há 12 anos (SC 12) e há 5 anos (SC 5)..... 61

<b>Tabela 9:</b> Equações de ajuste da curva de resistência mecânica do solo à penetração e da umidade volumétrica obtidas a partir das equações não lineares ajustadas para o solo original (SOR), solo construído há 12 anos (SC 12) e há 5 anos (SC 5).....	<b>62</b>
<b>Tabela 10:</b> Grau de compactação (GC) para o solo original (SOR) e para os solos construídos há 12 anos (SC 12) e 5 anos (SC 5).....	<b>68</b>

## RELAÇÃO DE FIGURAS

<b>Figura 1:</b> Vegetação da área do solo original.....	<b>28</b>
<b>Figura 2:</b> Vegetação da área de solo construído 12 anos .....	<b>28</b>
<b>Figura 3:</b> Vista da superfície do solo construído há 5 anos, com a exposição do material estéril e rejeitos de carvão.....	<b>29</b>
<b>Figura 4:</b> Parcela experimental e o sistema de umedecimento e drenagem.....	<b>34</b>
<b>Figura 5:</b> Penetrômetro eletrônico de bancada para a determinação da resistência mecânica do solo à penetração.....	<b>40</b>
<b>Figura 6:</b> Velocidade média do escoamento do para o solo original (SOR), solos construídos há 12 anos (SC 12) e 5 anos (SC 5), submetido à chuva simulada de $85 \text{ mm h}^{-1}$ durante 90 minutos em declividade de $0,09 \text{ m m}^{-1}$ . Os pontos da curva são a média de 4 repetições.....	<b>50</b>
<b>Figura 7:</b> Descarga líquida unitária média do escoamento superficial ( $q_i$ ) para o solo original (SOR), solos construído há 12 anos (SC 12) e 5 anos (SC 5), submetido à chuva simulada de $85 \text{ mm h}^{-1}$ durante 90 minutos em declividade de $0,09 \text{ m m}^{-1}$ . Os pontos da curva são a média de 4 repetições.....	<b>51</b>
<b>Figura 8:</b> Taxa de desagregação de solo em entressulcos obtida com aplicação de chuva simulada de $85 \text{ mm h}^{-1}$ durante 90 minutos sob declividade de $0,09 \text{ m m}^{-1}$ para o solo original (SOR), solos construídos há 12 anos (SC 12) e 5 anos (SC 5) da área de mineração de carvão de Candiota, RS. Os pontos da curva são média de 4 repetições.....	<b>52</b>
<b>Figura 9:</b> Solo recentemente construído com sulcos de erosão.....	<b>55</b>
<b>Figura 10:</b> Variação do conteúdo de água com a densidade do solo nos níveis críticos da capacidade de campo (CC), ponto de murcha permanente (PMP), porosidade de aeração (PA) de 10% e resistência mecânica à penetração ( $R_p$ ) de 3,5 MPa em solo original. O Intervalo Hídrico Ótimo do solo (IHO) está representado na área hachurada.....	<b>64</b>

**Figura 11:** Variação do conteúdo de água com a densidade do solo nos níveis críticos da capacidade de campo (CC), ponto de murcha permanente (PMP), porosidade de aeração (PA) de 10% e resistência mecânica à penetração (Rp) de 3,5 MPa em solo construído há 12 anos. O Intervalo Hídrico Ótimo do solo (IHO) está representado na área hachurada..... **65**

**Figura 12:** Variação do conteúdo de água com a densidade do solo nos níveis críticos da capacidade de campo (CC), ponto de murcha permanente (PMP), porosidade de aeração (PA) de 10% e resistência mecânica à penetração (Rp) de 3,5 MPa em solo construído há 5. O Intervalo Hídrico Ótimo do solo (IHO) está representado na área hachurada..... **66**

## 1 INTRODUÇÃO

O carvão é um mineral que se formou há 300 milhões de anos, durante os períodos geológicos Carbonífero e Permiano. O processo de sua formação aconteceu a partir de troncos, raízes, galhos e folhas. Todos esses fragmentos vegetais, após terem morrido, foram depositados e soterrados por sedimentos, e por meio de pressão e temperaturas extremamente elevadas foram gradativamente se transformando em minério de carvão.

O carvão mineral é um combustível fóssil natural extraído do solo por processos de mineração. É produzido e conservado pela natureza sob a forma fossilizada.

Existem ainda outras duas formas de carvão: vegetal e ativado. O carvão vegetal é uma substância obtida pela carbonização da madeira ou lenha. O carvão ativado é obtido a partir da queima controlada com baixo teor de oxigênio de certas madeiras com uma temperatura de 800 °C a 1000 °C.

O carvão mineral é uma das principais fontes de energia, superado apenas pelo petróleo. Para a obtenção do carvão mineral é necessário que se faça a extração deste minério. Esta extração pode ocorrer a céu aberto ou em minas subterrâneas.

No Brasil, as maiores reservas de carvão mineral estão concentradas nos Estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina, sendo a mina de Candiota - RS a maior do País.

Na mina de Candiota, como nas demais minas de carvão do estado do Rio Grande do Sul, o processo de lavra é realizado a céu aberto. Para tal, são utilizadas máquinas de grande porte, que realizam cortes sucessivos em sistema “vaivém” na seguinte seqüência: a) retirada do solo superficial (horizonte A) denominada de “terra vegetal” por técnicos e trabalhadores na mineração; b) retirada da argila vermelha (horizontes B e C); c) perfuração e detonação do arenito; d) descoberta do carvão através de uma máquina pesada (dragline); e)

perfuração, detonação e extração do carvão do banco superior (BS) e do banco inferior (BI), com separação do argilito intermediário; f) recomposição topográfica, constituída de cobertura, com ou sem o aproveitamento de vazios para deposição de cinzas; g) deposição da “terra vegetal” sobre a área recomposta topograficamente; h) estabelecimento de práticas agronômicas de preparo e correção do solo; i) plantio de espécies vegetais. Este processo caracteriza o processo de lavra e recomposição da área minerada e a constituição dos chamados “solos construídos”.

A extração do carvão a céu aberto causa grandes impactos ao meio ambiente. Entre os impactos está a acidificação do solo e da água pela exposição da pirita, dissulfeto de ferro ( $\text{FeS}_2$ ), que é um resíduo da mineração de carvão. Outros impactos ocorrem pela perda do habitat natural de microrganismos, pela perda total da estrutura do solo e, conseqüentemente, pela acentuada ocorrência de erosão hídrica.

Para que a extração e o aproveitamento do carvão sejam feitos com menores impactos ambientais, deve ser cumprida a legislação ambiental em vigência. Esta deve incluir estudos e elaboração de relatórios de impacto ambiental, sendo imprescindível a realização de um plano de recuperação dessas áreas de mineração.

Durante o processo de lavra ocorrem alterações relevantes na estrutura do solo, que a degradam completamente. A frequente mistura dos horizontes do solo com os rejeitos de carvão e materiais estéreis e a compactação causada pelo uso de máquinas de grande porte, que trafegam na área no momento da lavra, favorecem a degradação da estrutura do solo. Também contribuem para tal degradação o empilhamento das camadas de solo que são retiradas no momento da abertura da cava, provocando compactação desses solos.

A compactação causa o aumento da densidade do solo e conseqüentemente altera outras propriedades físicas, tais como: porosidade do solo, retenção de água, aeração e resistência do solo à penetração das raízes. Também dificulta o desenvolvimento e manutenção da cobertura vegetal.

Em função da compactação, nesses solos ocorrem condições indesejáveis de infiltração e armazenamento de água. A baixa porcentagem de cobertura vegetal favorece o aumento da taxa de escoamento superficial, facilitando a ocorrência de processos de erosão hídrica.

O controle dos processos de erosão hídrica é condição indispensável para recuperação da estrutura do solo, como também para manter o equilíbrio ecológico. Dessa forma, com o passar do tempo, o solo construído poderá retornar ao processo produtivo, com menores problemas de erosão.

A natureza dos fragmentos maciços que ocorrem nos solos construídos é bem diferenciada dos agregados do solo original. Os agregados não pedogenéticos que fazem parte da constituição dos solos construídos se caracterizam por terem estrutura maciça de origem antrópica, constituindo-se em fragmentos de blocos compactados.

Diante desses fatos, faz-se necessário a realização de estudos de erosão hídrica e a avaliação da qualidade física dos solos construídos, relacionando a estrutura do solo ao desenvolvimento de plantas.

A erosão hídrica é um dos maiores problemas ambientais que ocorrem em solos construídos. O início do processo se dá pela erosão em entressulcos causada pela energia cinética de impacto das gotas de chuva diretamente sobre as partículas de solo e pelo escoamento laminar associado. Dessa forma, ao se avaliar a suscetibilidade a erosão em solos construídos, é importante que os estudos sejam inicialmente direcionados a erosão em entressulcos. A erodibilidade do solo em entressulcos é um parâmetro que pode ser utilizado para se estabelecer comparações da suscetibilidade de diferentes solos a esse processo erosivo.

A qualidade física do solo pode ser avaliada através do intervalo hídrico ótimo (IHO). Este é um modelo que estabelece a faixa de conteúdo de água no solo em que a aeração e a resistência do solo à penetração tornam-se limitantes. Ou seja, é o intervalo em que o solo apresenta qualidade física adequada para o desenvolvimento de plantas. O IHO relaciona quatro parâmetros físicos do solo: resistência à penetração, água disponível, densidade do solo e porosidade de aeração, os quais avaliam a qualidade da estrutura do solo.

É importante que os estudos acima relatados sejam realizados em solos com diferentes idades de construção e que sejam comparados com o solo original ainda não minerado. Essas comparações são de suma importância para que se possa avaliar a evolução de solos construídos mais jovens e com maior tempo de construção com o solo original da área de mineração.

Com base no exposto, foram formuladas as seguintes hipóteses:

a - Solos construídos apresentam maior erodibilidade em entressulcos quando comparados com o solo original da área de mineração, devido a uma menor estabilidade dos agregados não pedogênicos em água, ocasionando maiores perdas de solo por erosão hídrica em entressulcos;

b – Em condições de processo semelhante de construção, solos com maior tempo de construção são menos suscetíveis a erosão em entressulcos, com menor erodibilidade em entressulcos, pois apresentam uma maior estabilidade dos agregados não pedogênicos em água, proporcionando redução das perdas de solo por erosão hídrica em entressulcos e do escoamento superficial, em relação a solos com menor tempo de construção.

c – A qualidade física dos solos construídos com o mesmo processo de construção, quantificada pelo intervalo hídrico ótimo (IHO), é menor que a do solo original, por serem solos com maior densidade e maior resistência à penetração. De forma semelhante, o tempo de construção do solo exerce efeito na melhoria da qualidade física do solo, determinada pelo IHO.

Para testar e avaliar as hipóteses, foi realizado um trabalho experimental com os seguintes objetivos:

a – Caracterizar fisicamente o solo original da área de mineração e solos construídos de diferentes idades, pelas determinações de distribuição de diâmetro das partículas primárias, estabilidade de agregados pedogênicos e não pedogênicos, densidade do solo, densidade das partículas e resistência mecânica à penetração;

b - Determinar as taxas de erosão em entressulcos com a aplicação de chuvas simuladas em laboratório, determinando a erodibilidade do solo em entressulcos em solo original da área de mineração e em solos com 5 e 12 anos de construção;

c – Avaliar as características hidráulicas do escoamento em entressulcos sob chuva simulada em laboratório com solo original da frente de mineração e em solos com diferentes tempos de construção;

d – Identificar os limites críticos de densidade do solo, na qual a resistência mecânica à penetração, a porosidade de aeração e a disponibilidade de água são limitantes para o desenvolvimento das plantas, utilizando o Intervalo Hídrico Ótimo (IHO).

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Impactos ambientais associados ao processo de lavra e a reabilitação das áreas de mineração

O processo de lavra provoca grandes degradações físicas, químicas e biológicas nos solos de áreas mineradas. Estas alterações afetam a estrutura do solo e a microbiota, com perda da vegetação. Também expõem material piritoso às condições ambientais (ar e água), oxidando e tornando-os altamente contaminantes ao solo e aos recursos hídricos da região.

As principais consequências do processo de lavra das áreas de mineração são, em termos gerais, a degradação do solo e a drenagem ácida. A degradação do solo é a perda de condições desejáveis, relacionadas ao crescimento de plantas e ao ambiente. Para isto, a recuperação dos solos é definida como o melhoramento da qualidade de um solo degradado, no sentido de adquirir novamente características próximas as originais (Reinert, 1997).

Os impactos ambientais provocados pela mineração de carvão ocorrem em dois momentos distintos. O primeiro é decorrente do rompimento das relações do ecossistema, provocado pela remoção das camadas de carvão, causando alteração dos perfis topográficos, perda da estrutura original do solo e perda da microfauna. O segundo decorre da realização das operações de preenchimento das valas abertas, trazendo como consequência alterações na topografia, aumento da densidade do solo e modificação da espessura das camadas e diminuição da proteção vegetal ao impacto das gotas da chuva (Bugin et al., 1989).

Na mina de Candiota, a recomposição topográfica do local já minerado é realizada por tratores de esteira, os quais quebram os “cones” ou pilhas de estéreis deixados pela “*walking-drag-line*” para conformação do terreno. Esses “cones” são compostos por uma mistura heterogênea de

argilitos, arenitos, folhelhos e carvão, existentes nas camadas de cobertura do perfil geológico (Pinto, 1997).

As pilhas ou cones proporcionam a compactação do solo em suas bases pela excessiva carga sobre o mesmo (Barfield et al., 1988). Para diminuir o tempo de exposição das pilhas de “terra vegetal” é ideal que se faça a recomposição das áreas mineradas simultaneamente aos processos de lavra. Ou seja, à medida que vai sendo realizada a mineração, o material extraído vai sendo utilizado para o preenchimento de cavas já abertas anteriormente. Isto evita um maior contato destes materiais com o ar e a água. Além disso, esses materiais empilhados estão sujeitos à ação das chuvas, que podem causar intensa desagregação e transporte deste material exposto, resultando em grandes perdas de solo por erosão, antes mesmo da reabilitação das áreas.

As cavas também são preenchidas com cinzas oriundas da queima do carvão, como também por materiais que constituem o lixo orgânico. Sobre esses materiais são ainda colocados uma camada superficial de solo, chamada de “terra vegetal” ou “solo orgânico”. Esta é constituída pelo horizonte A do solo, frequentemente misturado com os horizontes B e C, e subsuperficialmente, composta por estéreis de mineração. Estes são formados por uma mistura heterogênea de materiais com litologias e graus de intemperização variados, o qual pode-se conceituar um “solo construído” (Pinto, 1997).

Além da remoção e do empilhamento de grandes volumes de solo durante a mineração, vários fatores de natureza física e química do rejeito carbonífero limitam o estabelecimento vegetal, restringindo a reabilitação das áreas de mineração. Pois, estas áreas podem apresentar solos mais ácidos pela exposição e oxidação da pirita, que conseqüentemente resulta em reduções significativas da qualidade do solo (Stahl et al., 2002).

A escassez da cobertura vegetal, associada a presença de camadas impermeáveis, baixas taxas de infiltração de água e alto índice de erodibilidade, favorecem o aumento do escoamento superficial e da erosão, expondo as camadas ricas em pirita (Pinto & Kämpf, 2002).

A presença da pirita nas camadas subsuperficiais e a escassez de cobertura favorecem o contato da pirita as condições ambientais, ocorrendo sua oxidação da pirita ( $\text{FeS}_2$ ), produzindo ácido sulfúrico. Isto pode provocar o

fenômeno de drenagem ácida, que polui as águas e inibe a revegetação das áreas construídas. Os altos níveis de acidez ( $\text{pH} < 3,5$ ), causados pela oxidação da pirita, causa deficiência de nutrientes para as plantas e concentrações tóxicas de metais (Nunes, 2002). A equação geral do processo de oxidação da pirita é representada pela seguinte reação:



Outra preocupação relacionada com a pirita é quando não é realizada uma seleção prévia dos estéreis, resultando na inversão da coluna geológica. Os materiais ricos em pirita, originalmente são situados a grande profundidade e no momento da recomposição da área minerada pode vir a compor os estratos mais próximos à superfície. Estes materiais são apenas recobertos por uma fina camada de “terra vegetal” (Pinto & Kämpf, 2002). Segundo esses autores, para reverter este quadro, deve-se fazer a seleção prévia dos materiais, a correção da acidez e controle da erosão das áreas de solos construídos.

Para evitar a contaminação por pirita nas camadas mais superficiais dos solos construídos, deve-se confinar os materiais com pirita nas camadas mais profundas (Pinto & Kämpf, 2002). Este deve ser o principal enfoque no controle da contaminação dos solos e das águas nas áreas de mineração.

Após a recomposição topográfica do terreno é necessário que seja realizada uma escarificação, a fim de diminuir a compactação superficial dos solos construídos, favorecendo a inserção de plantas sobre os mesmos. Além disso, antes da inserção da vegetação, deve-se também fazer a correção dos níveis de fertilidades desses solos, o que acarretará na diminuição dos níveis de acidez e toxidez (Pinto & Kämpf, 2002). A inserção de plantas deve estar acompanhada de práticas de manejo que favoreçam o desenvolvimento e manutenção das mesmas nesses solos.

A recuperação dos impactos causados nestas áreas pode ser considerada difícil e demorada, sugerindo que haja um controle minucioso sobre os atributos do solo construído. Para isto, é necessário que seja realizado um manejo e um método de construção adequado, com uma seleção prévia e criteriosa dos materiais mais adequados para a construção, além da correta disposição destes materiais nas áreas a serem recuperadas (Pinto, 1997).

Para que a recuperação das áreas mineradas seja efetiva, é necessário que a legislação ambiental seja cumprida, na qual, deve-se recompor a paisagem o mais próximo da original. O solo construído deve retornar à capacidade produtiva e recuperar as características físicas, químicas e biológicas, ficando próximas às de um solo pré-minerado. Este deve reestabelecer o habitat dos microrganismos e recuperar a qualidade do solo, para que se obtenha o sucesso na recuperação das áreas constituídas de solo construído (Franco, 2006).

A avaliação dos distúrbios ocorridos nas áreas de mineração, que ocorrem desde a lavra do carvão até a construção do solo, é de extrema importância para que sejam estabelecidos métodos de prevenção. Medidas preventivas poderão reduzir impactos ambientais e os custos para a recuperação desses solos (Nunes, 2002).

É importante que sejam realizados estudos relacionados a avaliação da estrutura e agregação do solo, bem como de atributos que afetam a qualidade física do solo. Esses estudos podem ajudar a monitorar a evolução da recuperação de um solo degradado pela mineração, sendo que as características físicas são consideradas as mais difíceis e demoradas de serem recuperadas.

Além das avaliações físicas, é de suma importância que sejam realizados estudos no âmbito da erosão hídrica. Sua ocorrência é uma das principais conseqüências que ocorrem em solos construídos e está intimamente relacionada com os parâmetros físicos do solo.

## **2.2 Estrutura dos solos naturais e dos solos construídos**

O arranjo das partículas primárias (argila, areia e silte), que ocorre originalmente, compõe a estrutura do solo (Kemper & Chepil, 1965). Tais partículas arranjadas formam os agregados. Estes, com forma e tamanhos variáveis, constituem as unidades básicas da estrutura do solo, que são de grande importância na porosidade, aeração, crescimento das plantas, população microbiana, infiltração de água no solo e no controle dos processos erosivos (Bastos et al., 2005).

As definições acima caracterizam a formação de agregados pedogênicos. Entretanto, em solos construídos, os agregados chamados neste

trabalho de fragmentos de blocos compactados são formados a partir de interferências antrópicas, os quais também podem ser chamados de agregados não pedogênicos (Kampf et al., 1997). Com isso, faz-se necessário uma melhor explanação de como são formados e se comportam os constituintes da estrutura de solos construídos.

### **2.2.1 Formação e caracterização de agregados edáficos**

A agregação em solos naturais pode ocorrer por acreção ou por fragmentação da massa do solo. A acreção refere-se à formação de agregados pequenos, constituídos por partículas primárias do solo, que se agregam a outros pares para formar agregados maiores e, assim sucessivamente. O processo de fragmentação consiste na quebra da massa do solo por estresse mecânico, pela ação da água (Dexter, 1988), onde as partículas de solo são separadas por superfícies de fraca resistência.

O processo de acreção está relacionado ao conceito de hierarquia dos agregados. Dexter (1988) propôs uma relação direta entre os mecanismos de agregação, tamanho e hierarquia de agregados do solo. Neste caso os agregados se formariam através de uma sequência crescente de agregação (acreção), iniciando com forças microscópicas que unem as partículas de argila, silte e areia. À medida que os agregados aumentam de tamanho, forças de maior alcance predominam a estabilidade dos agregados (Azevedo & Bonumá, 2004).

Os agregados podem ser classificados em macro e micro agregados. Os agregados maiores que 250 micrômetros de diâmetro, classificados como macroagregados, são efêmeros, dependentes da ação das hifas e raízes de plantas. Já os agregados com diâmetro menor que 250 micrômetros, classificados como microagregados, possuem ligações mais fortes e duradouras (Azevedo & Bonumá, 2004).

A estrutura do solo pode ser avaliada através do grau de agregação, da estabilidade dos agregados e da distribuição do espaço poroso. Na agregação do solo o que interessa é a distribuição de diâmetro, a quantidade e a estabilidade dos agregados em água, as quais são importantes indicadores da facilidade ou dificuldade do solo de sofrer erosão hídrica e eólica (Campos et al., 1995).

Pode-se dizer que solos bem estruturados são aqueles que conseguem manter a estabilidade de seus agregados (Dexter, 1988), mesmo sob mudanças repentinas de umidade do solo e na ocorrência de chuvas intensas. Para Dexter (1975) a estabilidade dos agregados está relacionada com a capacidade do solo de resistir às forças compreensivas e desagregadoras aplicadas.

Para que os agregados se mantenham estáveis é necessário que os mesmos sejam constituídos de elementos que atuam como agentes de formação e estabilização dos mesmos, juntamente com as partículas primárias do solo.

Os elementos que colaboram para o processo de formação e estabilização dos agregados do solo são: tipo de argila, presença de sílica, compostos orgânicos, metais polivalentes, carbonato de cálcio, óxidos e hidróxidos de Fe e Al, exsudados orgânicos e substâncias orgânicas provenientes da ação dos microrganismos. O clima e raízes também são agentes de agregação importantes (Silva & Mielniczuk, 1997), podendo também incluir os ciclos de umedecimento e secagem (Bastos et al., 2005), bem como os tipos de cátions e o manejo do solo (Camargo & Alleoni, 1997). Assim, pode-se dizer que a agregação das partículas do solo envolve processos físicos, químicos, físico-químicos e biológicos.

O processo físico é caracterizado pelos agregados naturais serem formados a partir de ciclos de umedecimento e secagem. Estes promovem afastamento e aproximação das partículas, bem como a fragmentação. Na fragmentação agregados menores são formados a partir de agregados maiores (Baver et al., 1972), sendo que este processo pode ocorrer quando os agregados são submetidos a ciclos de umedecimento, conforme os estudos realizados por Oliveira (1992), como também por ação mecânica, utilizando máquinas agrícolas (Silva & Mielniczuk, 1997).

Os processos físico-químicos estão relacionados principalmente com o teor de argila e tendem a ter maior importância em solos com textura mais fina (Nunes, 2006). Os solos arenosos, segundo Brady & Weil (2002), em geral apresentam menor agregação.

O processo químico pode ocorrer através da floculação e dispersão das partículas de argila; precipitação de óxidos de ferro e de alumínio;

interação e associação entre matéria orgânica e cátions polivalentes e entre cátions e as cargas negativas da fase sólida do solo (Silva, 1993).

Dois aspectos devem ser considerados na floculação: (a) neutralização das cargas negativas (geralmente predominam no solo) por um cátion, permitindo a aproximação das partículas e a consequente floculação. Neste caso o  $H^+$  e os cátions polivalentes, como o  $Al^{+3}$ ,  $Ca^{+2}$  e  $Mg^{+2}$ , são mais efetivos; (b) em solos tropicais com predominância de óxidos de Fe e Al e de caulinita no sistema coloidal, o pH é um fator importante a ser considerado, visto que as cargas negativas e positivas são dependentes do pH (Albuquerque, 1998).

As cargas positivas se tornam maioria quando o pH do solo é ácido o suficiente para causar o acoplamento excessivo de íons H em alguns grupos funcionais de superfície (radicais OH). Portanto, a presença de cargas positivas depende do pH do solo. A presença de algumas cargas elétricas positivas é importante para promover a atração e o contato entre as partículas coloidais do solo, dificultando a dispersão (Azevedo & Bonumá, 2004). Estas cargas positivas são provenientes do intemperismo do material de origem do solo ou liberado pela decomposição de tecido vegetal.

Segundo Azevedo & Bonumá (2004) a dispersão de colóides está relacionada à interação das cargas elétricas em sua superfície em um meio polar. As cargas elétricas podem se originar da substituição isomórfica ou da dissociação de radicais nas arestas das estruturas dos minerais. Assim, a dispersão ocorre devido à combinação de pequena concentração eletrolítica e/ou valência dos contra-íons, com o domínio da energia de repulsão sobre a de atração.

O processo biológico reflete as ações dos microrganismos, das plantas e da matéria orgânica, atuando na formação dos agregados. Nos processos biológicos, dá-se ênfase a matéria orgânica do solo, pois esta tem capacidade de aderir às partículas minerais do solo, estando intimamente relacionado com a estabilidade dos agregados, formando as ligações argilo-metal-húmicas (Edwards & Bremner, 1967).

A influência da matéria orgânica na agregação do solo é um processo dinâmico. À medida que aumenta a matéria orgânica do solo, maior é

atividade microbiana, resultando numa estrutura favorável ao desenvolvimento das plantas, agregados pedogênicos mais estáveis (Campos et al., 1995).

Para Silva & Mielniczuk (1997) as plantas atuam diretamente na formação e estabilidade dos agregados, através do seu sistema radicular e, segundo Allison (1968) provocam pressão e favorecem a aproximação das partículas durante o seu crescimento. Além disso, as raízes liberam exsudados orgânicos, que são agentes efetivos na estabilização dos agregados (Oades, 1984), como também favorecem as ligações entre partículas primárias e secundárias do solo através da rede de raízes. As raízes e as plantas fornecem alimentos aos microrganismos contribuindo na produção de polissacarídeos, substâncias importantes na agregação do solo (Silva & Mielniczuk, 1997).

### **2.2.2 A estrutura de solos construídos e a formação de agregados não pedogênicos**

Os solos construídos têm sua estrutura alterada principalmente em função das atividades de lavra do carvão, como também no momento da reconstituição das áreas mineradas, acarretando a desagregação dos agregados formados pedogeneticamente.

Durante a atividade de lavra são utilizadas máquinas de grande porte que fazem a retirada de todo o solo, argilito e arenito até chegar aos bancos de carvão, numa profundidade de aproximadamente 15 m. Todo esse material retirado no momento da lavra é empilhado numa cava aberta anteriormente e misturado (Gavizzo et al., 2002). Este material sofre maior desestruturação no momento da recomposição topográfica do terreno (Schultze, 1998). Isso ocorre pelo motivo que são utilizados equipamentos de nivelamento do terreno e também de caminhões que transportam o material escavado, proporcionando a compactação do solo construído (Barfield et al., 1988; Stahl et al., 2002) e a formação de maciços com fragmentos de blocos compactados (Nunes, 2002).

Segundo D'Agostini (1992) a compactação pode influenciar sobre as características das unidades estruturais que compõem a estrutura do solo, formando agregados densos a partir da fragmentação de blocos de solos compactados, com distribuição de tamanho que também depende dos processos de fragmentação.

Os agregados não pedogênicos são formados a partir da aproximação de partículas sólidas por forças compressoras, deslocando o ar e a água existentes entre elas, ocasionando uma parcial reorientação dessas partículas (D'Agostini, 1992). Dependendo da intensidade da compressão, o sistema resulta em mais ou menos maciço, de forma a diminuir o espaço poroso, aumentar a densidade do solo, como também sofre alterações na geometria e estabelece maior superfície de contato e apoio entre as partículas de solo (Richard et al., 1999). Desta forma, a maior aproximação e orientação das partículas aumentam a intensidade de atividade superficial intra e entre agregados, para as mesmas condições de temperatura e pressão (D'Agostini, 1992).

Solos compactados, na maioria das vezes, apresentam problemas de movimento de água no solo e de desenvolvimento de plantas e raízes. A simples aproximação das partículas sólidas pode constituir um impedimento mecânico ao crescimento das raízes, mesmo as finas (D'Agostini, 1992).

Esses problemas em áreas de solos construídos dificultam a reabilitação das áreas recentemente mineradas, pois tem-se grande dificuldade em desenvolver plantas e manter o solo coberto. Isto resulta em reduções significativas da qualidade do solo e ainda expõem o solo a problemas de erosão hídrica. Isso pode ser comprovado com dados de resistência mecânica à penetração dos solos construídos quando comparado com o solo original da área de mineração.

Nunes (2002) trabalhou com solo de 1 e 5 anos de construção e solo original da camada de 0,0 a 0,2 m, e encontrou valores médios de resistência à penetração respectivamente de 5,00 MPa, 3,25 MPa e 2,37 MPa. Já Franco (2006) trabalhou com um solo recentemente construído e encontrou valor médio de resistência à penetração de 4,46 MPa na camada de 0,0 à 0,2 m. Gonçalves (2008) trabalhando na mesma área de solo construído que Franco (2006) encontrou após 3 anos valor médio de resistência mecânica à penetração de 2,89 MPa na mesma camada avaliada. Esses valores mostram que com o passar do tempo os solos construídos possuem uma evolução na estrutura do solo, diminuindo a compactação do mesmo.

Conforme Kämpf et al. (1997), os solos construídos embora sejam formados por procedimentos antropogênicos, podem adquirir uma evolução

pedogenética ao longo do tempo. Para isto, é necessário que haja um controle minucioso sobre os atributos do solo construído, que pode ser realizado através de um manejo e um método de construção adequado, com uma seleção criteriosa dos materiais mais adequados para a sua construção e correta disposição destes nas áreas a serem recuperadas (Pinto, 1997).

O adequado estabelecimento de uma cobertura vegetal poderá auxiliar na recuperação da estrutura do solo e na evolução dos agregados não pedogênicos (Kopezinski, 2000). Segundo este mesmo autor, deve-se escolher espécies que tenham capacidade para crescer rapidamente, proteger e enriquecer o solo, abrigar e alimentar a fauna, recompor a paisagem e restabelecer o regime hídrico.

As características dos materiais constituintes do solo original e o método de construção adotado refletirão sobre os atributos físicos, químicos e biológicos dos solos construídos, influenciando conseqüentemente na evolução das características dos agregados não pedogenéticos. Estes podem se transformar com o tempo e se aproximar das características de agregados edáficos, formados pedogeneticamente (Schafer et al., 1980). Isto pode ser comprovado nos trabalhos realizados por Nunes (2002) que trabalhou com solos de 5 e 15 anos de construção, Kämpf et al. (2000) que trabalhou com solos de 2, 5 e 15 anos de construção e ainda Schafer et al. (1980) que trabalhou com solos construídos de 50 anos.

### **2.3 Erosão hídrica do solo e escoamento em entressulcos**

A erosão hídrica do solo é um processo de desagregação de partículas de solo da sua massa original, transporte dessas partículas pelos agentes erosivos e eventual deposição (Ellison, 1947a, b, c, d, e). Além desses processos, a erosão hídrica envolve ainda a infiltração da água no solo, o armazenamento de parte da água precipitada e o escoamento superficial (Römken et al., 2001).

A importância desses processos e a magnitude com que ocorrem dependem de vários fatores como o clima, o relevo (declividade do terreno e comprimento do declive), o tipo de solo, o manejo de culturas e do solo, bem como das práticas conservacionistas utilizadas.

Segundo Meyer e Wischmeier (1969), a desagregação e o transporte do solo podem ser subdivididos em sub-processos, os quais podem ocorrer de forma simultânea ou não: a) desagregação do solo pelo impacto direto das gotas de chuvas; b) transporte do solo pelo efeito do salpico; c) desagregação do solo pela ação do escoamento superficial; d) transporte do solo pela ação do escoamento superficial.

O processo erosivo tem início a partir do impacto das gotas de chuva diretamente sobre a superfície do solo descoberto, ocasionando a desagregação das partículas do solo (Meyer et al., 1975), com o incremento do escoamento superficial da água sobre o solo. Essa desagregação pelo impacto da gota decorre da energia cinética das gotas de chuva, que exercem forças de pressão e cisalhamento no ponto de impacto (Cassol & Lima, 2003).

As partículas desagregadas podem causar o selamento da superfície do solo, reduzindo a taxa de infiltração da água e conseqüentemente aumentando o escoamento superficial ou enxurrada, tendo por conseqüência perdas de solo, matéria orgânica e diminuição da fertilidade do solo (Meyer et al., 1975).

O escoamento superficial da água tem seu início quando a intensidade da chuva torna-se superior a taxa de infiltração da água no solo e as necessidades de detenção e retenção superficial estejam satisfeitas. Inicialmente o escoamento ocorre na forma de fluxo laminar raso. À medida que avança no sentido do declive, tende a concentrar-se em áreas restritas da superfície, formando pequenos canais ou sulcos (Ellison, 1947a, b, c, d, e).

A erosão hídrica do solo pode ser dividida em erosão em entressulcos e em sulcos. Esta classificação é feita baseada nos estágios correspondentes à progressiva concentração de enxurrada no solo, e também está relacionada com as diferentes formas que o impacto da gota de chuva e o escoamento superficial agem na erosão em entressulcos e em sulcos. Nessa separação dos processos não existe uma limitação definida de quando termina e inicia um ou outro processo, porém estes podem ocorrer simultaneamente (Foster & Meyer, 1975; Meyer & Harmon, 1984).

Segundo Foster et al. (1985) na erosão em entressulcos a desagregação das partículas de solo ocorre pelo impacto das gotas de chuva e o transporte pelo escoamento laminar incrementado pela turbulência produzida

pelo impacto das gotas de chuva, suspendendo e mantendo suspensas as partículas de solo.

A erosão em entressulcos é essencialmente independente da erosão nos sulcos, ocorrendo em áreas relativamente curtas e geralmente orientadas segundo o microrelevo superficial (Foster, 1982). O fluxo do escoamento superficial é uniforme e ocorre na forma de fluxo laminar raso, que contribui para o fluxo concentrado nos sulcos (Nearing, 1997; Cantalice, 2001).

A resistência do solo aos processos de desagregação e transporte irá depender da resposta do impacto das gotas de chuva, do fluxo laminar, das mudanças na infiltração, rugosidade e resistência ao início do movimento e transporte das partículas (Albuquerque et al., 2002; Kuhn & Bryan, 2004; Bezzera & Cantalice, 2006).

O impacto das gotas de chuva é influenciado pela altura da lâmina do escoamento, declividade, vento, ângulo de inclinação das gotas e velocidade e temperatura do escoamento (Gerits et al., 1990). Ou seja, pelas características hidráulicas do escoamento, que representam as relações entre a superfície do solo e o escoamento superficial.

Dentre os parâmetros hidráulicos do escoamento pode-se citar a descarga unitária do escoamento superficial, descarga líquida total do escoamento por unidade de largura, a velocidade do escoamento, altura da lâmina d'água, viscosidade da água. Baseado nesses parâmetros pode-se determinar o número de Reynolds ( $R_e$ ) e o número de Froude ( $F_r$ ), os quais caracterizam o escoamento de acordo com as classificações de Guy et al. (1990) e Farenhorst & Bryan (1995).

O número de Reynolds relaciona as forças de inércia com as forças de viscosidade do escoamento, enquanto que o número de Froude relaciona as forças de inércia com as forças gravitacionais (Simons & Senturk, 1992). Na erosão em entressulcos, em que ocorre o escoamento raso, o número de Reynolds é menor que 500, o qual caracteriza o escoamento laminar. O escoamento laminar pode ser classificado em subcrítico ( $F_r < 1$ ) (Guy et al., 1990) ou laminar supercrítico ( $F_r > 1$ ) (Farenhorst & Bryan, 1995).

Conforme Guy et al. (1990), o regime de escoamento pode ser laminar e subcrítico quando  $9 < R_e < 40$  e  $F_r < 1$ , para transporte de sedimento sob chuva simulada. Já segundo Farenhorst & Bryan (1995), o regime de

escoamento é laminar supercrítico quando  $139 < Re < 399$  e  $Fr > 1$  e ainda laminar de transição quando o regime de escoamento estiver entre  $500 < Re < 760$  e  $Fr > 1$ .

#### **2.4 Erodibilidade do solo em entressulcos e a influência de alguns parâmetros do solo**

A erosão do solo pode ser estimada de forma quantitativa e qualitativa. Segundo Chaves et al. (1996) as duas formas apresentam vantagens e desvantagens. A análise qualitativa não permite a obtenção de valores numéricos, importante para a estimativa da degradação do solo e da sedimentação. Já, a análise quantitativa permite a estimativa da erosão absoluta, facilitando o planejamento conservacionista. Entretanto, modelos quantitativos exigem um maior conhecimento por parte do usuário, além de requerer mais informações do que os modelos qualitativos.

A aplicação de modelos quantitativos em processos de erosão e seu controle é atualmente uma eficiente estratégia que vem sendo utilizada no planejamento do uso, manejo e conservação do solo. Para tal, é utilizado um fator chamado de erodibilidade do solo, que representa a suscetibilidade do solo em erodir em diferentes taxas, devido às características dos parâmetros físicos, químicos e mineralógicos (Wischmeier & Mannering, 1969; Foster, 1982). Ou seja, é a recíproca de sua resistência e expressa a suscetibilidade do solo ao processo erosivo (Cassol & Lima, 2003).

O modelo mais conhecido e universalmente utilizado para estimar as perdas de solo por erosão é a USLE (*Universal Soil Loss Equation*) (Wischmeier & Smith, 1978). Nesse modelo a erodibilidade do solo é representada pelo fator “K” e envolve tanto a ação da erosão em entressulcos quanto em sulcos. A obtenção dos valores dos parâmetros da USLE necessita de vários anos de observações experimentais. Além disso, a USLE não leva em conta a forma do declive, a origem e deposição dos sedimentos, entre outros fatores.

Vários modelos de predição da erosão hídrica do solo que foram desenvolvidos recentemente baseiam-se em processos e interações de suas variáveis. Dentre esses modelos, o WEPP (*Water Erosion Prediction Project*) é um dos mais relevantes (Flanagan & Nearing, 1995). Este modelo considera a erosão em entressulcos e em sulcos separadamente. No WEPP, o fator  $K_i$

expressa a erodibilidade do solo em entressulcos e o fator  $K_r$  representa a erodibilidade do solo em sulcos. Esses fatores representam respectivamente a suscetibilidade do solo à desagregação pelo impacto das gotas de chuva e pelo escoamento superficial concentrado (Alberts et al., 1995).

O modelo WEPP considera a taxa de desagregação em entressulcos ( $D_i$ ) diretamente proporcional ao quadrado da intensidade da chuva ( $D_i \propto I^2$ ). Para que esta proporcionalidade se transforme em uma igualdade é necessária uma constante de proporcionalidade, que neste caso é representado pelo fator  $K_i$ . O fator  $K_i$  depende das características do solo e é denominado de erodibilidade do solo em entressulcos.

Conforme Flanagan & Nearing (1995), no modelo WEPP, a taxa de desagregação do solo em entressulcos em condições de solo descoberto e recém preparado, sem resíduos, coberturas ou raízes é calculada pela seguinte equação:

$$D_i = K_i I^2 S_f \quad (1)$$

onde:  $D_i$  representa a taxa de desagregação em entressulcos em  $\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ;  $K_i$  é o fator de erodibilidade em entressulcos em  $\text{kg s m}^{-4}$ ;  $I$  representa a intensidade da chuva em  $\text{m s}^{-1}$ ;  $S_f$  é o fator de ajuste para a declividade do terreno. No modelo WEPP, Liebenow et al. (1990) sugerem que o fator declividade do terreno seja ajustado pela seguinte expressão:

$$S_f = 1,05 - 0,85e^{-4\text{sen}\theta} \quad (2)$$

onde:  $\theta$  representa o ângulo do declive (graus). A expressão (2) é igual a 1,0, quando  $\theta = 45^\circ$ , ou seja, na condição de declividade padrão de  $1 \text{ m m}^{-1}$  adotada pelo modelo WEPP. Nessa condição, a equação pode ser expressa da seguinte maneira:

$$D_i = K_i I^2 \quad (3)$$

Experimentalmente, o fator de erodibilidade do solo em entressulcos,  $K_i$ , da expressão (1), é determinado pela medição das taxas de erosão em entressulcos ( $D_i$ ), sob determinada intensidade de chuva ( $I$ ), considerando-se o ajuste para uma declividade de referência ( $S_f$ ), calculada pela equação (2).

A taxa de desagregação pode ser igual à taxa de aporte de sedimento. Para isto, é necessário que se considere o efeito do escoamento superficial da água no transporte do solo desagregado. Assim, a taxa de aporte

de sedimentos das áreas em entressulcos para sulcos é modelada como sendo proporcional ao produto da intensidade da chuva e da descarga unitária do escoamento, com a constante de proporcionalidade sendo o fator erodibilidade em entressulcos (Flanagan et al., 1995).

Em solo com alta taxa de infiltração, onde o volume escoado é baixo, a taxa de aporte de sedimento pode ser menor que a taxa de desagregação. Com isso, para levar em conta o efeito do escoamento superficial no transporte de sedimentos desagregados, é necessário que seja utilizada a descarga líquida unitária do escoamento no modelo WEPP (Flanagan et al., 1995). Assim, a equação (1) passa a ter a seguinte forma:

$$D_i = K_i I q_i S_f \quad (4)$$

onde:  $D_i$  representa a taxa de desagregação em entressulcos em  $\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ;  $K_i$  é o fator de erodibilidade em entressulcos em  $\text{kg s m}^{-4}$ ;  $I$  representa a intensidade da chuva em  $\text{m s}^{-1}$ ;  $q_i$  é a taxa de excesso de chuva ou descarga líquida unitária do escoamento em  $\text{m s}^{-1}$  e  $S_f$  é o fator de declividade do terreno.

Segundo Truman & Bradford (1995) a inclusão do termo descarga líquida unitária do escoamento pode melhorar a predição da erosão em entressulcos. O produto da intensidade da chuva e da descarga líquida unitária do escoamento promove uma medida adequada das interações entre o impacto da gota de chuva e o escoamento superficial (Kinnell, 1991).

Na falta de dados locais obtidos experimentalmente, o modelo WEPP utiliza equações da rotina interna para estimar o fator de erodibilidade do solo em entressulcos ( $K_i$ ), os quais necessitam apenas dos teores de areia e argila (Flanagan & Nearing, 1995) conforme as seguintes expressões:

a) para solos que contêm 30% ou mais de areia na superfície:

$$K_{ib} = 2728000 + 19210000 AMF \quad (5)$$

onde:  $K_{ib}$  é o fator básico de erodibilidade do solo em entressulcos em  $\text{kg s m}^{-4}$ ; AMF: é a fração areia muito fina na superfície do solo em  $\text{kg kg}^{-1}$ . Se a fração AMF for maior que 0,4, deve ser considerado um valor máximo de 0,4 na equação.

b) para solos que contêm menos de 30% de areia na superfície:

$$K_{ib} = 6054000 - 5513000 \times \text{arg} \quad (6)$$

onde:  $K_{ib}$  é o fator básico de erodibilidade do solo em entressulcos em  $\text{kg s m}^{-4}$ ; arg: é a fração argila na superfície do solo em  $\text{kg kg}^{-1}$ . Se a fração argila for menor que 0,1, deve ser considerado o valor de 0,1 na equação.

Alguns atributos do solo estão fortemente relacionados com o fator erodibilidade do solo. Foster (1982) afirma que os solos diferem em relação ao fator erodibilidade do solo em entressulcos por possuírem diferentes atributos químicos, físicos e mineralógicos.

Um dos atributos que está intimamente relacionado com o fator erodibilidade do solo em entressulcos é a textura do solo. Solos mais arenosos geralmente têm maior taxa de desagregação que solos argilosos, sendo a agregação de suas partículas muito menor do que em solos mais argilosos (Meyer & Harmon, 1984). Segundo esses mesmos autores, em solos argilosos as partículas de argila agem como agente cimentante, proporcionando uma maior estabilidade dos agregados e com isso, menor erodibilidade do solo em entressulcos.

Outros atributos do solo como a matéria orgânica, o pH e o teor de cátions estão intimamente ligados a formação e estabilidade dos agregados e sua resistência. Assim, a estabilidade dos agregados em água, o grau e a forma do declive, como também a umidade do solo, afetam diretamente a suscetibilidade do solo em sofrer erosão em entressulcos (Veiga et al., 1993).

Conforme análise dos trabalhos de Nunes & Cassol (2008) que trabalharam com diferentes Latossolos do Rio Grande do Sul, Albuquerque (1998) que trabalhou com sete diferentes classes de solos e Cassol et al. (2004) que trabalhou com Argissolo Vermelho, pode-se inferir que os solos com menor valor de fator erodibilidade, foram os solos com maiores teores de argila e óxidos de ferro e alumínio e menor grau de dispersão da fração argila.

Albuquerque (1998) e Nunes & Cassol (2008) ainda propuseram modelos que determinam a erodibilidade do solo em entressulcos a partir de equações de regressão. Estes são baseados em alguns atributos físicos e químicos que afetam a erodibilidade do solo em entressulcos.

Albuquerque (1998) verificou que o parâmetro "M" (parâmetro de Wischmeier), que engloba os teores de argila, silte e areia muito fina foi o que melhor se correlacionou com a erodibilidade do solo em entressulcos. Neste

caso os teores de silte e areia muito fina aumentaram e o teor de argila diminuiu o fator erodibilidade do solo em entressulcos.

Nunes & Cassol (2008) trabalhando com Latossolos verificaram que os parâmetros que mais se correlacionaram com a erodibilidade do solo em entressulcos foram o teor de argila e o teor de ferro extraído com oxalato de amônio ácido ( $Fe_o$ ) no escuro. A variação no conteúdo de argila e de óxidos de ferro de baixa cristalinidade ( $Fe_o$ ) pode explicar até 97,4 % da variação da erodibilidade do solo em entressulcos para os Latossolos analisados.

Com base nestas constatações, pode-se afirmar que a textura é um dos principais atributos do solo que influencia diretamente na suscetibilidade do solo em sofrer erosão em entressulcos.

## **2.5 Qualidade física do solo e intervalo hídrico ótimo**

Em solos que ocorrem atividades agrícolas intensas ou outras atividades, como a mineração, pode ocorrer a degradação da estrutura do solo, o que compromete a sua qualidade física e o desenvolvimento radicular.

Em áreas de mineração de carvão a céu aberto, a degradação da estrutura do solo é intensificada pelo tráfego de máquinas, principalmente na fase de recomposição topográfica do terreno, como também na fase de reabilitação dos solos construídos. Nessas fases, o solo pode estar sem cobertura, com pouca cobertura ou até mesmo totalmente coberto.

As áreas de solo construído encontram-se, geralmente, em condições de fragilidade, favorecendo a ocorrência de compactação nesses solos. Isto acarreta o aumento da resistência à penetração das raízes e conseqüentemente prejudica o crescimento e desenvolvimento das plantas (Nunes, 2002), como também, as propriedades físico-hídricas (Klein & Camara, 2007).

A compactação excessiva dos solos construídos foi constatada por autores como Bell et al. (1994) e Andrews et al. (1998) como sendo um dos fatores mais determinantes para o crescimento das plantas nestas áreas, pois a profundidade das camadas compactadas define o limite da profundidade de enraizamento. Tal compactação resulta diretamente no aumento da densidade do solo e por conseqüência em alterações na porosidade do solo, retenção de água, aeração e resistência do solo à penetração das raízes (Letey, 1985;

Tormena et al., 1998). Também causa alterações na infiltração e redistribuição da água no solo, difusão de gases, disponibilidade de oxigênio no solo e crescimento das raízes (Hakansson & Voorhees, 1998) e no desenvolvimento da parte aérea da planta (Freddi et al., 2008). Essas alterações podem resultar no decréscimo da produção e no aumento dos processos de erosão hídrica (Soane & Ouwerkerk, 1994).

A água disponível às plantas varia com a estrutura do solo, por determinar o arranjo das partículas e por conseqüência a distribuição dos poros (Klein & Libardi, 2000). Com a compactação do solo, a quantidade de água armazenada no solo sofre alterações negativas, diminuindo a disponibilidade às plantas. A água que é disponível às plantas é conceituada como a que esta contida no solo entre a capacidade de campo e o ponto de murcha permanente (Veihmeyer & Hendrickson, 1949), sendo um dos principais fatores que afeta o crescimento e desenvolvimento das plantas (Letey, 1985).

Em solos compactados, geralmente ocorre a dificuldade de disponibilidade de água às plantas em função dos macroporos diminuírem e os microporos aumentarem, aumentando a tensão com que a água fica retida nos poros (Baumer & Bakermans, 1973). Por outro lado, quando há água disponível ao desenvolvimento das plantas, a deficiência de aeração e a resistência mecânica do solo à penetração das raízes são comumente limitantes ao crescimento e desenvolvimento das plantas (Klein & Libardi, 2000). Desta maneira, pode-se afirmar que a umidade do solo influencia diretamente na aeração e na resistência à penetração das raízes.

Segundo Baver et al. (1972) há um rápido aumento na resistência do solo à penetração com a diminuição da umidade, indicando que esta aumenta à medida que as partículas são aproximadas durante o processo de secagem do solo. Entretanto, segundo Silva et al. (2006) a densidade da camada compactada é capaz de limitar o crescimento e desenvolvimento das plantas e varia de acordo com a classe de solo, condições de umidade do solo e até mesmo com a espécie do cultivar plantado.

Contudo, o estudo, a quantificação e o monitoramento da compactação visam manter a qualidade física do solo, um bom desenvolvimento das plantas e a sustentabilidade dos sistemas agrícolas. Para

isto, têm-se utilizado vários atributos físicos entre os quais: a infiltração de água, a retenção de água, a porosidade, a densidade do solo e a resistência à penetração (Beutler et al., 2007).

Nesse sentido, pode-se conceituar a qualidade física do solo como sendo a capacidade de o solo proporcionar ao sistema radicular das plantas condições favoráveis ao seu crescimento e desenvolvimento, estando relacionada com a estrutura do solo. Esta tem sido comumente avaliada pelos indicadores da qualidade física do solo que são: a disponibilidade de água, a aeração, a temperatura, a resistência que o solo oferece à penetração das raízes e a densidade do solo (Letey, 1985; Silva et al., 1994).

As condições físicas ideais para o crescimento das plantas seria uma porosidade de aeração mínima de 10% (Grable & Siemer, 1968; Dexter, 1988), para que não restrinja o desenvolvimento radicular e não ocorra redução na difusão de gases (Taylor, 1950); a resistência mecânica à penetração do solo até 2 MPa para o crescimento das raízes e parte aérea das plantas, na qual depende do solo e da cultura a ser utilizada (Taylor et al., 1966; Tormena et al., 1998); e uma ampla disponibilidade de água no solo (Silva et al., 2009), com a capacidade de campo medida no potencial de -0,01 MPa e ponto de murcha permanente medida no potencial de -1,5 MPa (Silva et al., 1994).

Entretanto, estes limites devem ser alterados de acordo com o conhecimento dos fenômenos envolvidos e das condições experimentais locais em que são coletadas as amostras de solo (Silva et al., 2009). Existem estudos que utilizam diferentes valores limites de resistência à penetração, como Leão et al. (2004) que utilizaram os limites até 3 MPa; Klein & Camara (2007) utilizaram limites entre 2 a 3 MPa e Tormena et al. (2007) que utilizaram limite crítico de 3,5 MPa e ainda existem outros autores que utilizam valores abaixo de 1,5 MPa.

Então, para que se avalie a qualidade física do solo deve-se integrar estes diferentes atributos em um número mínimo de parâmetros. A partir dessas inferências, Letey (1985) propôs um modelo que integrasse esses atributos físicos em um só parâmetro, que foi chamado de "*Non – Limiting Water Range*" (NLWR). Este parâmetro foi conceituado como sendo a faixa de umidade não limitante ao desenvolvimento das plantas. Ou seja, a faixa de

conteúdo de água no solo em que não há restrições ao crescimento das plantas pela deficiência de oxigênio (limite superior) e pela diminuição do conteúdo de água no solo a valores próximos do ponto de murcha permanente, ou ainda quando a resistência à penetração atingir 2 MPa (limite inferior).

Mais tarde, Silva et al. (1994) aprimoraram o conceito, dizendo que o crescimento do sistema radicular varia de forma contínua com o potencial hídrico, chamando o modelo de "*Least Limiting Water Range*" (LLWR). Este foi conceituado como sendo a faixa de umidade do solo menos limitante, considerando o potencial matricial, porosidade de aeração e resistência à penetração. Para estes mesmos autores, a interação dos fatores que influenciam diretamente o crescimento de plantas em uma única variável proporcionou uma medida mais sensível as mudanças estruturais do solo que a água disponível.

Orellana et al. (1997) traduziram o conceito de Letey (1985) e chamaram o modelo de Intervalo Hídrico Ótimo (IHO) e o mesmo foi introduzido no Brasil com essa nomenclatura por Tormena et al. (1998). Este ficou sendo chamado de indicador de qualidade física do solo às plantas (Silva, et al., 2009).

Conforme Silva et al. (2009) pode-se afirmar que fora da faixa do LLWR as limitações associadas ao crescimento de plantas são mais acentuadas, enquanto que dentro do LLWR as limitações relacionadas com o crescimento de plantas são mínimas.

A partir dessas inferências pode-se conceituar o IHO como um modelo que define a amplitude do conteúdo de água em que o solo apresenta qualidade física adequada ao crescimento radicular, por não indicar limitações de água, aeração e impedimento mecânico ao crescimento radicular. Estas propriedades juntamente com a retenção de água no solo são integradas em um único parâmetro limitante ao crescimento vegetal, o IHO (Silva & Kay, 1996).

O IHO pode ser ainda conceituado como um modelo que estabelece a faixa de conteúdo de água no solo definida no limite superior pela umidade do solo na capacidade de campo, ou conteúdo de água em que a aeração do solo se torna limitante. E o limite inferior pelo conteúdo de água no ponto de murcha permanente, ou no conteúdo de água em que a resistência do solo à

penetração torna-se limitante. Ou seja, a amplitude do conteúdo de água em que o solo apresenta qualidade física adequada ao crescimento radicular (Silva & Kay, 1996; Kay et al., 1997).

O IHO também pode ser definido a partir do valor de densidade do solo ( $D_s$ ) em que o IHO é zero. Quando esse valor de  $D_s$  for atingido, é chamado de densidade crítica do solo ( $D_{s_{cr}}$ ) ao crescimento radicular, quando o solo apresenta condições limitantes, independente do conteúdo de água (Beutler et al., 2006). Valores de  $D_s > D_{s_{cr}}$ , indicam que as condições físicas do solo são restritivas ao desenvolvimento das raízes e conseqüentemente a produção de culturas.

Assim, quanto mais freqüentes forem os valores de  $D_s > D_{s_{cr}}$ , indica a redução na qualidade estrutural do solo, aumentando os riscos de a planta sofrer estresses físicos por redução de oxigenação do solo ou por elevados valores de resistência do solo à penetração. Assim, a  $D_{s_{cr}}$  é um fator limite para o controle e monitoramento da qualidade física do solo (Leão et al., 2004; Cavalieri et al., 2006).

Segundo Silva et al. (2009) há uma limitada faixa de  $D_s$  em que o IHO é máximo e numericamente igual a água disponível. Quando IHO é igual à água disponível, pode-se concluir que a tensão da água é a única propriedade física do solo que limita o crescimento das plantas. Quando ocorre o aumento do  $D_s$ , ou seja, da compactação do solo, propicia a redução da porosidade total, principalmente dos poros de maior diâmetro efetivo, os quais são responsáveis pela rápida drenagem da água e entrada do ar no solo, ocorrendo a diminuição do IHO.

Tanto o IHO quanto a  $D_{s_{cr}}$  variam com a textura do solo e com a condição estrutural do solo (Silva et al., 2004), sendo que em solos mais argilosos os valores de IHO são muito baixos ou até nulos (Topp et al., 1994). Silva et al. (2002) também estudaram três diferentes solos, na qual concluíram que a  $D_{s_{cr}}$  diminui do solo mais arenoso para o mais argiloso.

A maior parte dos estudos com o IHO no Brasil demonstra que a resistência mecânica do solo à penetração é a principal causa de redução do IHO com o aumento da  $D_s$ . Isso ocorre em função que a  $D_s$  restringe a disponibilidade de água às plantas, sendo determinante para a qualidade física do solo.

Benghough et al. (2006) estabeleceram que o IHO juntamente com as medidas temporais do teor de água do solo são as melhores estratégias para identificar os estresses físicos que as culturas são submetidas durante o seu crescimento. Assim, a redução do IHO está relacionada com maiores teores de umidade fora dos limites do IHO. Ou seja, fora do ótimo, manifestando restrições físicas ao crescimento das plantas por reduzir a aeração ou por excessiva resistência do solo à penetração. Estas estratégias foram utilizadas por Silva & Kay (1996) e por Collares et al. (2006).

Silva et al. (2009) também observaram que quanto maior for o número de dias que a umidade do solo ultrapassar ou estiver abaixo dos limites do IHO, maior é a probabilidade de que o crescimento das plantas seja controlado pela qualidade física do solo. Porém, caso se possa ampliar os limites do IHO, há uma maior probabilidade que o teor de água permaneça mais frequentemente dentro dos limites do IHO. Para que isso ocorra, é necessário que se tenha um maior controle do manejo físico do solo para melhorar as condições de Ds e umidade do solo.

Segundo Silva et al. (2009) o controle da Ds e do teor de água no solo constituem estratégias importantes para o manejo físico do solo por:

a) Reduzir a Ds que acarreta um aumento do IHO, sendo que têm-se a possibilidade de diminuir a umidade do solo sem que a resistência mecânica do solo à penetração seja limitante ao crescimento das raízes;

b) Reduzir a evaporação de água por meio de cobertura de resíduos culturais proporciona um maior tempo de permanência da água no solo e reduz a variabilidade temporal, aumentando a probabilidade das plantas permanecerem dentro dos limites dos IHO.

Várias pesquisas realizadas em diferentes solos comprovam a pertinência da aplicação do IHO na avaliação da qualidade física do solo (Tormena et al., 1998; Silva et al., 2004; Leão et al., 2004). Além de ser um indicador acessível, aplicável ao campo, permite a obtenção de valores de referência que possam ser quantificados e adotados como aceitáveis ou limitantes às plantas (Doran & Parkin, 1994). Por isso, o IHO é o indicador que melhor representa a qualidade física do solo às plantas.

### **3 MATERIAL E MÉTODOS**

#### **3.1 Localização e caracterização da área de estudo**

O estudo foi realizado na da área de mineração de carvão da Companhia Riograndense de Mineração (CRM), no município de Candiota, RS. A área está localizada na região da Campanha do estado do Rio Grande do Sul, situada a 400 km de Porto Alegre, estando próximo da fronteira do Brasil com o Uruguai. As coordenadas geográficas são 31°55' e 53° 67' respectivamente para latitude sul e para longitude oeste (Embrapa, 2008).

Conforme a classificação de Köppen, o clima da região é mesotérmico, do tipo subtropical úmido. A temperatura média anual é de 17,8 °C, a umidade relativa do ar oscila entre 75% e 85% e a precipitação pluvial média anual é de 1.350 mm, bem distribuída durante o ano, conforme dados registros da estação meteorológica de Bagé (Embrapa, 2008). O solo original da área de mineração é classificado como Argissolo Vermelho Eutrófico típico (Embrapa, 2006).

Para a realização do trabalho foram coletadas amostras de solo original da área de mineração (SOR) e de solos construídos há 5 anos (SC 5) e de 12 anos (SC 12). O solo original e os construídos possuem uma posição semelhante na paisagem e foram selecionados nas situações de maior uniformidade topográfica, ou seja, em posição de topo, para evitar solos excessivamente degradados pela erosão. O relevo característico das três áreas utilizadas para a realização deste trabalho é ondulado.

A área de solo original se caracteriza por ter sido utilizada para agricultura antes da concessão pela CRM. A vegetação predominante nas áreas de solo original é campo nativo, do tipo gramíneas e leguminosas (Figura 1). O solo original localiza-se em área com coordenadas geográficas 31° 34' 14" de latitude sul e 53° 43' 34" de longitude oeste.



**Figura 1:** Vegetação da área do solo original

Os solos com 12 e 5 anos de construção se caracterizam por apresentarem vegetação composta por gramíneas, as quais foram implantadas pela CRM logo após a construção dos mesmos.

O SC 12 anos apresenta uma vasta cobertura vegetal por gramíneas (Figura 2). A área de coleta deste solo está localizada nas coordenadas geográficas  $31^{\circ} 33' 27''$  de latitude sul e  $53^{\circ} 42' 11''$  de longitude oeste.



**Figura 2:** Vegetação da área de solo construído 12 anos

O SC 5 anos apresenta uma cobertura com bastante falhas, com frequente exposição da camada subsuperficial (Figura 3), mostrando rejeitos de

carvão logo abaixo da camada superficial do solo. A área de coleta do SC 5 anos tem coordenadas geográficas  $31^{\circ} 34' 16''$  de latitude sul e  $53^{\circ} 42' 34''$  de longitude oeste.



**Figura 3:** Vista da superfície do solo construído há 5 anos, com a exposição do material estéril e rejeitos de carvão

Em cada um dos tratamentos de campo, foram coletadas amostras de solo para: a) caracterização física e química; b) testes de laboratório sob chuva simulada para avaliação das taxas de erosão hídrica em entressulcos e determinação do fator de erodibilidade do solo em entressulcos; e c) avaliação da qualidade física do solo pelo intervalo hídrico ótimo (IHO).

A maior parte do trabalho foi desenvolvida nos laboratórios de Erosão, Física e Química do Solo do Departamento de Solos da Faculdade de Agronomia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). Algumas análises foram realizadas no laboratório de Física do Solo do Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH) da UFRGS e no laboratório de Física do Solo da Faculdade de Agronomia da Universidade Federal de Pelotas (UFPel).

### **3.2 Coleta e preparo das amostras**

Foram coletadas amostras de solo original (SOR) e solos construídos há 12 e 5 anos (SC 12 e SC 5) da área de mineração. Dependendo da finalidade da análise, foram coletadas amostras deformadas ou indeformadas, bem como, em camadas de 0,0 a 0,1 m, 0,1 a 0,2 m ou de 0,0 a 0,2 m.

Para caracterização física dos solos utilizados nos experimentos foram coletadas 7 amostras indeformadas para cada uma das camadas de 0,0 a 0,1 m e de 0,1 a 0,2 m, em três pontos eqüidistantes aproximadamente 5 m, totalizando 21 repetições por camada de cada tratamento. Essas amostras foram utilizadas para as determinações de densidade do solo, porosidade total, resistência mecânica à penetração e intervalo hídrico ótimo (IHO) do solo. As amostras indeformadas foram coletadas em cilindros de inox de 4 cm de altura e x 4,85 cm de diâmetro pelo Método do Macaco Hidráulico conforme descrito por Pedrotti et al. (2001).

Para as determinações de densidade de partículas, distribuição de diâmetro das partículas primárias, argila dispersa em água, teor de carbono orgânico, pH em água e em KCl e óxido de ferro foram coletadas amostras nas camadas de 0,0 a 0,1 m e de 0,1 a 0,2 m nos mesmos três pontos eqüidistantes de coleta das amostras indeformadas. Em laboratório as amostras foram destorroadas com auxílio de um rolo de madeira e passadas em peneira com malha de 2,0 mm para obtenção da fração de terra fina seca ao ar (TFSA), conforme Embrapa (1997).

Para a determinação da distribuição de diâmetro dos agregados, estabilidade dos agregados em água e estudos de erosão em entressulcos foram coletadas amostras na camada de 0,0 a 0,2 m. Estas amostras foram colocadas em bombonas plásticas com capacidade de 50 litros e levadas até o laboratório. As amostras para determinação da estabilidade de agregados e para os estudos de erosão em entressulcos foram passadas em peneiras de malha de 10 mm e secas ao ar.

### **3.3 Caracterização física e química do solo**

Para caracterizar física e quimicamente o solo original e os solos construídos há 12 e 5 anos foram avaliados alguns atributos físicos e químicos nas camadas de 0,0 a 0,1 m e de 0,1 a 0,2 m.

A caracterização física foi realizada através da determinação da distribuição de diâmetro das partículas primárias do solo, argila dispersa em água, densidade das partículas do solo, densidade do solo, porosidade, distribuição de diâmetro dos agregados estáveis em água e a seco e o índice de estabilidade dos agregados.

A distribuição do diâmetro das partículas do solo foi determinada pelo método da pipeta, descrito por Gee & Bauder (1986), com o uso de água e de 10 mL de dispersante de hidróxido de sódio (NaOH) 1 N e foi deixado agitando por 16 horas em um agitador do tipo vai-vém de agitação lenta.

A determinação da argila dispersa em água foi realizada através do mesmo procedimento da argila total, conforme metodologia descrita por Gee & Bauder (1986), porém sem o uso de dispersante químico.

Na Tabela 1 é apresentada a média entre as duas camadas avaliadas (0,0 a 0,1 m e de 0,1 a 0,2 m), pois não houve diferença estatística pela análise de variância entre as camadas avaliadas. Os dados médios de cada camada podem ser vistos no Anexo 1.

**Tabela 1:** Distribuição de diâmetro das partículas do solo original (SOR) e solos construídos há 12 anos (SC 12) e 5 anos (SC 5). Média entre as camadas de 0,0- 0,1 m e 0,1 – 0,2 m. Média de 12 repetições.

Solo	ADA	argila	silte	areia					
				total	AMF	AF	AM	AG	AMG
		mm							
		< 0,002	0,002 – 0,05	0,05 – 2,00	0,053- 0,105	0,105- 0,25	0,25- 0,50	0,50- 1,00	1,00- 2,00
		g kg <sup>-1</sup>							
<b>SOR</b>	116,5 b	292,3 b	269,1 a	438,7 a	36,0 a	153,6 b	141,9 a	86,9 a	20,3 b
<b>SC 12</b>	192,0 a	332,5 ab	198,9 b	468,7 a	16,3 b	204,2 a	177,2 a	49,9 b	21,1 b
<b>SC 5</b>	95,6 b	419,0 a	274,6 a	306,5 b	31,0 a	89,0 c	76,7 b	46,6 b	63,3 a

Valores seguidos da mesma letra nas colunas, não diferem significativamente entre si pelo teste de Tukey ao nível de 5% de significância. ADA: Argila dispersa em água; AMF: areia muito fina; AF: areia fina; AM: areia média; AG: areia grossa; AMG: areia muito grossa.

Com base nos teores médios de argila, silte e areia (Tabela 1) e no triângulo textural brasileiro (Santos et al., 2005), a classe textural do solo original é franco argiloso, o solo construído de 12 anos tem classe textural franco argilo arenosa e o solo construído de 5 anos argilosa.

A densidade de partículas foi determinada pelo método do picnômetro, segundo Blake & Hartge (1986) e a densidade do solo foi determinada com amostras indeformadas coletadas em cilindros de aço inox, sendo utilizado o método do anel volumétrico segundo Embrapa (1997).

A porosidade total, a micro e a macroporosidade foram determinadas através da utilização de funis de placa porosa segundo a metodologia da Embrapa (1997). Os dados médios de densidade de partículas, porosidade total, a micro e a macroporosidade de cada camada podem ser vistos no Anexo 2.

A caracterização química foi realizada através da determinação do pH em água, pH em KCl, variação de pH, teor de Fe relativo aos óxidos de ferro pedogênicos ( $Fe_d$ ), teor de Fe relativo aos óxidos de ferro de baixa cristalinidade ( $Fe_o$ ) e teor de Fe total extraído por ataque sulfúrico e carbono orgânico.

As determinações do pH em água e pH em KCl e a variação do pH foram realizadas conforme Embrapa (1997).

O ferro relativo aos óxidos de ferro pedogênicos ( $Fe_d$ ) foram extraídos conforme Mehra & Jackson (1960) e In da Junior & Kämpf (2005). O ferro relativo aos óxidos de ferro de baixa cristalinidade ( $Fe_o$ ) foram extraídos pelo método do oxalato de amônio à pH 3 no escuro (Schwertmann, 1964). O ferro total foi extraído por ataque sulfúrico segundo Embrapa (1997).

O teor de carbono orgânico (CO) foi determinado pelo método Walkley-Black, baseado na oxidação do carbono orgânico pelo dicromato de potássio, conforme descrito por Tedesco et al. (1995).

A Tabela 2 apresenta os valores de pH em água e em KCl,  $\Delta$ pH, teor de ferro relativo aos óxidos de ferro pedogênicos ( $Fe_d$ ), ferro relativo aos óxidos de ferro de baixa cristalinidade ( $Fe_o$ ), a relação  $Fe_o/Fe_d$  e os teores de carbono orgânico (CO) para o solo original da área de mineração e para os solos de 12 e 5 anos de construção. Os valores apresentados nesta tabela são médios para a camada de 0,0 a 0,2 m por não ter ocorrido diferença estatística através da análise de variância entre as camadas de 0,0 a 0,1 m e de 0,1 a 0,2 m. Os valores para cada camada analisada estão apresentados no Anexo 3.

**Tabela 2:** Características químicas dos solos para o solo original (SOR), solos construídos há 12 anos (SC 12) e 5 anos (SC 5). Média entre as camadas de 0,0- 0,1 m e 0,1 – 0,2 m. Média de 12 repetições.

Solo	pH (H <sub>2</sub> O)	pH (KCl)	$\Delta$ pH	g kg <sup>-1</sup>			
				$Fe_o$	$Fe_d$	$Fe_o/Fe_d$	CO
SOR	4,71	3,84	-0,87 a	1,01 b	27,19 b	0,04 b	14,10 a
SC 12	4,59	3,83	-0,77 a	4,25 ab	22,97 b	0,19 ab	9,49 a
SC 5	4,99	4,28	-0,72 a	8,17 a	35,64 a	0,23 a	15,80 a

Valores seguidos da mesma letra nas colunas, não diferem significativamente entre si pelo teste de Tukey ao nível de 5% de significância.  $Fe_o$ : teor de ferro relativo aos óxidos de ferro de baixa cristalinidade extraído com oxalato amônio (Schwertmann, 1964);  $Fe_d$ : teor de ferro relativo aos óxidos de ferro pedogênicos extraído com ditionito-citrato-bicarbonato (Mehra & Jackson, 1960 e In da Junior & Kämpf, 2005); CO: carbono orgânico (Tedesco et al. 1995).

### 3.4 Distribuição de diâmetro e estabilidade de agregados

Para as determinações da distribuição de agregados estáveis em água em diferentes classes de tamanho e do diâmetro médio ponderado (DMP) foram utilizadas as amostras de solo que foram passadas em peneiras de malha de 10 mm com base no peneiramento úmido, seguindo o princípio da metodologia descrita por Kemper & Rosenau (1986), que utiliza o aparelho de oscilação vertical de Yoder (1936), conforme descrito por Palmeira et al. (1999), com uma alteração no momento da separação do material inerte, conforme é descrito a seguir.

Para esta determinação foi utilizado um conjunto de peneiras com diâmetros de malha de 4,76; 2,00; 1,00; 0,50, 0,25 mm, que foram colocadas num agitador vertical semelhante ao de Yoder (1936), com 45 oscilações por minuto e agitação por um período de 10 minutos. Após, o material menor que 0,25 mm foi passado manualmente em peneiras com abertura de malha de 0,105 e 0,053 mm.

O solo retido entre as classes de 4,76 e 0,50 mm teve o material inerte e não inerte separado mecanicamente com auxílio de uma haste de borracha. Após a separação, os dois materiais (inertes e não inertes) são levados a estufa para secagem a 105 °C e depois são pesados.

A separação do material inerte das frações retidas nas peneiras menores que 0,50 mm foi realizada quimicamente, sendo colocadas em vidros, juntamente com dispersante hexametáfosfato de sódio com diluição de 10:1 e levados ao agitador de oscilação “vai-vem” por um período de 16 horas, para a separação do material inerte. Assim feito, as frações de material inerte e não inerte foram levadas em estufa a 105 °C para serem secas e posteriormente pesadas.

Para o cálculo da proporção de agregados estáveis em água foi utilizada a seguinte expressão, segundo Palmeira et al. (1999):

$$A_{gri} = \left[ \frac{Magri - mi}{\sum Magri - mi} \right] \times 100 \quad (7)$$

onde:  $Magri$  é a massa de agregados + material inerte na classe  $i$ , em g;  $mi$  é a massa de material inerte (cascalho, areia, raízes, restos de cultura, etc.) na classe  $i$ , em g.

Para o cálculo do diâmetro médio ponderado de agregados (DMP), foi utilizada a seguinte expressão, segundo Palmeira et al. (1999):

$$DMP = \left[ \frac{\sum D_{Mi} \cdot (M_{agri} - m_i)}{\sum M_{agri} - m_i} \right] \quad (8)$$

onde: DMP é o diâmetro médio ponderado de agregados, em mm;  $D_{Mi}$  é o diâmetro médio da classe  $i$ , em mm.  $M_{agri}$  é a massa de agregados + material inerte na classe  $i$  (g) e  $m_i$  é a massa da material inerte na classe  $i$ , em g.

### 3.5 Estudos de Erosão em Entressulcos

O estudo de erosão hídrica dos solos em entressulcos foi desenvolvido no laboratório de Erosão do Departamento de Solos da Agronomia da UFRGS em parcelas experimentais sob chuva simulada. As parcelas experimentais de formato quadrado têm área útil de 0,348 m<sup>2</sup>, com 0,59 m de largura, 0,59 m de comprimento e 0,10 m de profundidade, havendo uma bordadura lateral de 0,20 m de largura (Figura 4). Foram realizadas quatro repetições de chuva simulada para cada tratamento (SOR, SC 12 e SC 5).



**Figura 4:** Parcela experimental e o sistema de umedecimento e drenagem.

As parcelas experimentais são constituídas de acrílico e montadas sobre uma estrutura metálica. O volume das parcelas foi preenchido com uma camada de 2 cm de pedra britada ( $\varnothing=1,0$  cm), sobre a qual foi colocada uma

camada de 2 cm de areia ( $\varnothing=0,25$  mm) e sobre essas duas camadas foi colocada uma tela plástica de malha de 1 mm. Sobre esta tela foi colocada uma camada de 6 cm de solo seco ao ar, previamente peneirado em peneira com malha de 10 cm e com uma densidade de empacotamento ( $D_{ep}$ ) de  $1380 \text{ kg m}^{-3}$  calculada pela seguinte equação:

$$D_{ep} = \frac{M_s}{V} \quad (9)$$

onde:  $D_{ep}$  = densidade de empacotamento do solo na parcela em  $\text{kg m}^{-3}$ ;  $M_s$  = massa de solo seco ao ar colocada na parcela, em kg;  $V$  = volume da parcela ocupado pelo solo, em  $\text{m}^3$ .

O solo na parcela foi saturado com 24 horas de antecedência. Ao iniciar os testes de chuva simulada foi aplicada uma tensão de água equivalente a 5,7 centímetros de coluna de água (cca) e a parcela experimental foi ajustada para declividade de  $0,09 \text{ m m}^{-1}$ .

### **3.5.1 Aplicação da chuva simulada em laboratório e características do simulador**

As chuvas foram realizadas em laboratório utilizando um simulador de chuva construído no Departamento de Solos da Faculdade de Agronomia da UFRGS por Souza (1985), de acordo com as especificações apresentadas por Meyer & Harmon (1979), com bico aspessor Veejet 80150 (da Spraying Systems Company de Chicago, USA); diâmetro interno de 12,7 mm; altura do bico a 3,1 m da superfície do solo com uma pressão de saída de água no bico de 41 KPa, verificada com o auxílio de um manômetro, com gotas de 2,3 mm de diâmetro médio e velocidade terminal de  $8,8 \text{ m s}^{-1}$ . As chuvas foram aplicadas durante 90 minutos, com intensidade média de  $85 \text{ mm h}^{-1}$ .

Durante o tempo de ocorrência da chuva foram determinadas as taxas de escoamento pela medição do volume escoado a cada 3 minutos, coletando-se durante 1 (um) minuto em potes plásticos colocados na calha coletora na extremidade inferior da parcela experimental.

### 3.5.2 Determinação das características hidráulicas do escoamento em entressulcos

Para a caracterização hidráulica do escoamento em entressulcos, além das taxas de escoamento superficial, também foi determinada a velocidade do escoamento superficial. Com esses dados foram estimadas a velocidade média do escoamento superficial, a altura da lâmina do escoamento, o número de Reynolds, o número de Froude, o número de Reynolds da partícula e a resistência ao escoamento superficial em entressulcos.

A velocidade do escoamento superficial foi determinada em intervalos de 5 minutos com a tomada de tempo para que um corante azul de metileno percorresse a distância de 0,4 m entre dois pontos fixos na parcela, sendo expressa em  $\text{m s}^{-1}$ . Para obter a velocidade média do escoamento, os valores obtidos foram multiplicados por um fator de correção ( $\alpha = 2/3$ ) conforme Farenhorst & Bryan (1995) e Katz et al. (1995).

A altura da lâmina do escoamento (m) foi estimada pela equação derivada por Woolhiser & Liggett (1967) e Singh (1983) para fluxo sob chuva de duração finita, utilizando a seguinte equação:

$$h = \frac{q}{V} \quad (10)$$

onde:  $h$  = altura da lâmina de escoamento, em m;  $q$  = descarga líquida total por unidade de largura, em  $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$  e  $V$  = velocidade média do escoamento, em  $\text{m s}^{-1}$ . A descarga líquida foi obtida através do volume de água do escoamento coletada em potes plásticos colocados na extremidade inferior da calha coletora na unidade de tempo dividido pela largura da parcela.

O número de Reynolds ( $R_e$ ) foi estimado conforme relação apresentada por Simons & Senturk, (1992).

$$R_e = \frac{V h}{\nu} \quad (11)$$

onde:  $R_e$  = número de Reynolds, adimensional;  $V$  = velocidade média do escoamento, em  $\text{m s}^{-1}$ ;  $h$  = altura da lâmina de escoamento, em m e  $\nu$  = viscosidade cinética da água em  $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$ , que varia de acordo com a temperatura da água em  $^{\circ}\text{C}$  conforme a equação de Julien (1995):

$$\nu = [1,14 - 0,031(T - 15) + 0,00068(T - 15)^2] \times 10^{-6} \quad (12)$$

onde:  $T$  = temperatura da água em  $^{\circ}\text{C}$

O número de Froude ( $F_r$ ) foi estimado conforme descrito por Chow (1959), como também a resistência ao escoamento superficial, através do fator de perda de carga de Darcy–Weisbach ( $f$ ), conforme as seguintes equações:

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{g h}} \quad (13)$$

onde:  $F_r$  = número de Froude, adimensional;  $V$  = velocidade média do escoamento, em  $m s^{-1}$ ;  $g$  = aceleração da gravidade, em  $m s^{-2}$  e  $h$  = altura da lâmina de escoamento, em m.

$$f = \frac{8 g h S}{V^2} \quad (14)$$

onde:  $f$  = fator de perda de carga, adimensional;  $g$  = aceleração da gravidade, em  $m s^{-2}$ ;  $h$  = altura da lâmina de escoamento, em m;  $S$  = inclinação do declive, em  $m m^{-1}$  e  $V$  = velocidade média do escoamento, em  $m s^{-1}$ .

### 3.5.3 Taxas de desagregação e erodibilidade do solo em entressulcos

As taxas de desagregação do solo em entressulcos foram determinadas nas amostras do escoamento total coletado durante 1 minuto em potes plásticos com capacidade de 1 L, em intervalos de 3 min de chuva simulada. Após a coleta os potes foram pesados e adicionado 5 mL de solução de Alúmen de Potássio em concentração de  $50 g L^{-1}$ , para sedimentação das partículas. Após 24 horas, o sobrenadante foi succionado e os potes levados para secagem em estufa a  $50 ^\circ C$  até peso constante para posterior quantificação da massa de solo seco e do conteúdo de água.

Em cada ponto de amostragem, a taxa de desagregação do solo em entressulcos ( $D_i$ ) foi determinada pela expressão:

$$D_i = \frac{M_{ss}}{A D} \quad (15)$$

onde:  $M_{ss}$  é a massa do solo seco, em kg;  $A$  é a área da parcela, em  $m^2$ ;  $D$  é a duração da coleta, em s.

Conforme Flanagan & Nearing (1995), a taxa de desagregação do solo em entressulcos no modelo WEPP, em condições de solo descoberto é calculada pela equação (1). No modelo WEPP, Liebenow *et al.* (1990) sugerem que o fator declividade do solo seja ajustado pela equação (2).

Para determinação do fator de erodibilidade do solo em entressulcos ( $K_i$ ) foi utilizada a taxa média de desagregação em entressulcos obtidas nas cinco últimas medições em cada teste e a intensidade da chuva. O fator  $S_f$  foi ajustado para a declividade de  $0,09 \text{ m m}^{-1}$ . Assim, o fator de erodibilidade do solo em entressulcos ( $K_i$ ), foi obtido pela seguinte expressão:

$$K_i = \frac{D_i}{I^2 S_f} \quad (16)$$

onde:  $K_i$  é o fator de erodibilidade do solo em entressulcos, em  $\text{kg s m}^{-4}$ ;  $D_i$  representa a taxa de desagregação do solo em entressulcos, em  $\text{kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ;  $I$  representa a intensidade da chuva, em  $\text{m s}^{-1}$ ;  $S_f$  é o fator de declividade do solo.

### 3.5.4 Estimativa da erodibilidade do solo em entressulcos por métodos indiretos

O índice de erodibilidade do solo em entressulcos foi estimado conforme a equação básica proposta no modelo WEPP (Alberts et al., 1995). Para solos que contém 30 % ou mais de areia na superfície pode ser avaliada indiretamente, utilizando porcentagem de areia muito fina (AMF) de acordo com a equação (5).

A erodibilidade do solo em entressulcos também foi estimada conforme o modelo sugerido por Albuquerque (1998), que ajustou a seguinte equação:

$$K_{iA} = 7,19 \times 10^5 - (2,2 \times 10^5 \times DMPA_{kc}) - (7,2 \times 10^5 \times \Delta pH) + (148 \times M) \quad (17)$$

onde:  $K_{iA}$  é o fator de erodibilidade do solo em entressulcos (Albuquerque, 1998), em  $\text{kg s m}^{-4}$ ;  $DMPA_{kc}$  é o diâmetro médio ponderado dos agregados em água em mm;  $\Delta pH$  é a diferença entre o pH em KCl e o pH em água;  $M$  é um parâmetro textural de Wischmeier et al. (1971) que é determinado pela seguinte equação:

$$M = (Sil + AMF).(100 - Arg) \quad (18)$$

onde: Sil é o teor silte, em %; AMF é o teor de areia muito fina, em %; Arg é o teor de argila, em %, sendo todos os teores obtidos com dispersante químico NaOH 1N.

A erodibilidade do solo em entressulcos também foi estimada conforme o modelo sugerido por Nunes & Cassol (2008). O modelo obtido considera apenas o conteúdo de argila e o teor de Fe relativo aos óxidos de ferro de baixa

cristalinidade extraído com oxalato de amônio ácido ( $Fe_o$ ), e é expresso da seguinte forma:

$$K_{iN} = [1,982 - 8,886 \times 10^{-4} (Arg) - 0,228 (Fe_o)] \times 10^6 \quad (19)$$

onde:  $K_{iN}$  é a erodibilidade do solo em entressulcos, em  $kg \ s \ m^{-4}$ ; Arg é o teor de argila obtido por dispersão com NaOH 1N, em  $g \ kg^{-1}$  e  $Fe_o$  é o teor de ferro relativo aos óxidos de ferro de baixa cristalinidade extraído com oxalato de amônio (Schwertmann, 1964), em  $g \ kg^{-1}$ .

### 3.6 Intervalo Hídrico Ótimo - IHO

Para a determinação do IHO foram utilizadas as amostras com estrutura indeformada coletadas de acordo com o item 3.2 nas camadas de 0,0 a 0,1 m e de 0,1 a 0,2 m, para o solo original da área de mineração e dois solos construídos de 12 e 5 anos (SC 12 e SC 5).

As amostras foram coletadas em cilindros de aço inox de 4 cm de altura por 4,85 cm de diâmetro em três pontos equidistantes de aproximadamente 5 m. Em cada ponto de cada tratamento foram coletadas 7 repetições para cada camada, totalizando 21 amostras por camada e 42 repetições por solo. Estas foram enroladas em papel laminado e transportadas até o laboratório, onde foram saturadas e submetidas a tensões de 0,001; 0,006; 0,01; 0,033; 0,1, 0,5 e 1,5 MPa, utilizando funis de placa porosa para baixas tensões (0,001; 0,006; 0,01MPa) e câmara de Richards para as altas tensões (0,033; 0,1, 0,5 e 1,5 MPa), conforme Embrapa (1997).

Após atingir o equilíbrio foram realizadas as pesagens das amostras e as determinações de resistência mecânica do solo à penetração na Universidade Federal de Pelotas (UFPel), por meio de um penetrômetro eletrônico, modelo MA 933 fabricado pela empresa Marconi equipamentos para laboratório Ltda (Figura 5).

O equipamento foi utilizado com velocidade constante de penetração de  $10 \ mm \ min^{-1}$ , cone com diâmetro de base de 3 mm e ângulo de  $30^\circ$ . O conjunto experimental também é equipado com um atuador linear e célula de carga de 20 kg acoplada a um microcomputador para que se possa fazer a aquisição dos dados (Tormena et al., 1998).



**Figura 5:** Penetrômetro eletrônico de bancada para a determinação da resistência mecânica do solo à penetração.

A determinação da resistência mecânica à penetração foi realizada em 3 pontos no centro da amostra, a cada 0,01 cm de profundidade, totalizando 100 leituras a cada centímetro da amostra (ou 10 leituras por mm), sendo calculada pelo valor médio ao longo da profundidade da amostra, sendo descartados os valores extremos. Após a determinação da resistência mecânica à penetração ( $R_p$ ), as amostras foram colocadas em estufa a 105 °C para determinações da densidade do solo ( $D_s$ ) e da umidade volumétrica ( $\theta_v$ ) conforme Embrapa (1997).

Para a determinação do IHO, o conteúdo volumétrico de água no solo ( $\theta_v$ ) foi ajustado em função do potencial matricial ( $\psi_m$ ) expresso em módulo e a  $D_s$  segundo procedimento proposto por Silva et al. (1994). Já a curva de RP foi ajustada utilizando a equação não-linear proposta por Busscher (1990). Os dados da relação entre umidade volumétrica e o potencial mátrico, e a relação resistência a penetração e umidade volumétrica foram ajustados pelo algoritmo simplificado feito no programa Excel® (Leão & Silva, 2004), onde essas relações são expressas pelas seguintes equações:

$$\theta_v = \exp(a + bD_s) * \Psi_m^c \quad (20)$$

$$R_p = d\theta_v^e D_s^f \quad (21)$$

onde:  $\theta_v$  = Conteúdo volumétrico de água no solo, em  $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ ;  $D_s$  = Densidade do solo, em  $\text{Mg m}^{-3}$ ;  $\psi_m$  = Potencial de água no solo, em MPa;  $R_p$  = Resistência do solo à penetração, em MPa e a, b, c, d, e, f = parâmetros de ajustes dos modelos.

O conteúdo de água em que a porosidade de aeração é de 10 % foi obtido pela seguinte equação:

$$\theta_{PA} = \left( 1 - \left( \frac{D_s}{D_p} \right) \right) - 0,10 \quad (22)$$

onde:  $\theta_{PA}$  = Conteúdo volumétrico de água no solo na porosidade de aeração;  $D_s$  = Densidade do solo, em  $\text{Mg m}^{-3}$  e  $D_p$  = Densidade de partículas, em  $\text{Mg m}^{-3}$ .

A partir dos valores obtidos pelas equações 20 e 21, os dados foram plotados em função dos valores de  $D_s$  com o objetivo de determinar o IHO em cada solo avaliado. A densidade crítica do solo ( $D_{s_{cr}}$ ), que corresponde ao valor de  $D_s$  no qual o IHO é igual a zero, foi definida pela interseção das equações que determinam os limites superior e inferior do IHO.

Para a determinação do valor de resistência mecânica à penetração foram realizados vários testes com valores diferentes de  $R_p$  até que se encontrasse o IHO válido para cada tratamento. O valor de  $R_p$  que melhor representou o IHO para cada solo foi de 3,5 MPa.

O limite inferior do IHO foi considerado o conteúdo volumétrico de água no solo na resistência do solo à penetração de raízes de 3,5 MPa ( $\theta_{Rp}$ ) ou a quantidade de água no ponto de murcha permanente, considerada a umidade volumétrica do solo no potencial de -1,5 MPa ( $\theta_{1,5}$ ). O limite superior do IHO foi considerado o conteúdo volumétrico de água no solo quando a porosidade de aeração é de 10% ( $\theta_{PA}$ ) ou no conteúdo de água no solo na capacidade de campo ( $\theta_{0,01}$ ), considerada a água retida no solo no potencial de -0,01 MPa.

### 3.7 Análise estatística dos dados

A análise estatística foi realizada utilizando o programa SAEG – Sistema para análises Estatísticas, versão 9.1 (UFV, 2007).

Foram realizadas análises de variância (ANOVA) pelo teste de Tukey ao nível de 5 % de significância para os dados de caracterização física do solo e estudo de erodibilidade em entressulcos.

Para avaliação dos parâmetros do solo envolvidos na quantificação do intervalo hídrico ótimo foram realizadas análise de variância entre os dados determinados em laboratório e os estimados, utilizando o teste t ( $P < 0,05$ ). Esta análise foi realizada utilizando os pacotes estatísticos do Microsoft Office Excel versão 2007.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Densidade e porosidade do solo

Os valores de densidade do solo (Ds), densidade de partículas (Dp), macroporosidade (Mp), microporosidade (mp) e porosidade total (Pt) do solo original e dos solos construídos há 12 e 5 anos foram avaliados nas camadas de 0,0 a 0,1 m e de 0,1 a 0,2 m (Tabela 3). As repetições realizadas são apresentadas no Anexo 3.

**Tabela 3:** Valores de densidade de partícula (Dp), densidade do solo (Ds), macroporosidade (Mp), microporosidade (mp) e porosidade total (Pt) para o solo original (SOR), solo construído 12 anos (SC 12) e solo construído 5 anos (SC 5). Média de 3 repetições.

Solo	Dp Mg m <sup>-3</sup>	Ds Mg m <sup>-3</sup>	Mp -----%-----	mp	Pt
<b>camada de 0,0 - 0,1 m</b>					
SOR	2,52 Ab	1,51 Ab	6,8 Ac	25,4 Bb	32,2 Bb
SC 12	2,71 Aa	1,61 Aa	12,7 Aa	29,1 Ab	41,7 Aa
SC 5	2,59 Ab	1,51 Ab	9,8 Bb	36,8 Aa	46,5 Ba
<b>camada de 0,1 - 0,2 m</b>					
SOR	2,49 Ab	1,58 Aab	7,1 Ab	30,1 Ab	37,2 Ab
SC 12	2,71 Aa	1,64 Aa	12,1 Aab	29,8 Ab	41,9 Aab
SC 5	2,52 Ab	1,51 Ab	13,1 Aa	36,0 Aa	49,1 Aa

Valores seguidos das mesmas letras maiúsculas nas colunas, para o mesmo solo, entre as diferentes camadas, e valores seguidos da mesma letra minúsculas nas colunas, dentro de uma mesma camada, não diferem significativamente entre si pelo teste de Tukey ao nível de 5% de significância.

Os solos construídos apresentam maior porosidade total (Pt) que o solo original, em ambas as camadas analisadas (Tabela3). Na camada de 0,0 – 0,1 m não houve diferença estatística entre os solos construídos, porém ambos apresentaram porosidade total significativamente maior que a do solo original. Na camada de 0,1 – 0,2 m o SC 12 anos não diferenciou estatisticamente do solo original e do SC 5 anos, porém o SC 5 anos apresentou maior porosidade total que o solo original.

A porosidade total do solo nas camadas avaliadas mostram diferenças dos solos construídos há 12 e 5 anos para o solo original. Esta constatação não foi a mesma de Potter et al. (1988), Kampf et al. (2000) e Nunes (2002), pois estes autores encontraram valores de porosidade total maiores para o solo original.

A porosidade total dos solos construídos não sendo diferentes sugere que não houve efeito do tempo. Isto pode também ser constatado pelos resultados apresentados por Franco (2006) que trabalhando com solo recentemente construído encontrou valores de porosidade total semelhantes aos da Tabela 3 para SC 12 e SC 5 anos. Também Gonçalves (2008) obteve valores de porosidade total do solo construído há 3 anos muito próximos aos valores de porosidade total do SC 12 e SC 5 anos (Tabela 3).

Na camada superficial (Tabela 3), o SC 12 anos apresenta a maior porcentagem de macroporos que os SC 5 anos e que o solo original. Por outro lado na camada de 0,1 – 0,2 m o SC 12 anos apresentou porcentagem de macroporos que não diferenciam estatisticamente do SC 5 anos e do solo original.

O fato dos solos construídos apresentarem maior porcentagem de macroporos que o solo original se repetiu no trabalho de Nunes (2002), Franco (2006) e Gonçalves (2008) e contrasta com o que foi observado por Bussler et al. (1984) e Potter et al. (1988), os quais verificaram que o volume de macroporos é menor nos solos construídos do que no solo original.

De acordo com as constatações acima, poder-se-ia dizer que os solos construídos apresentam melhores condições para o desenvolvimento de plantas que o solo original, apesar da densa cobertura por gramíneas desenvolvida no solo original. Porém, a menor porcentagem de macroporos no solo original deve estar relacionada com atividades realizadas anteriormente à mineração, como agricultura com sistemas de cultivo convencional, e de tráfego de máquinas no momento da lavra em áreas próximas ao original (frente de mineração). Estes processos proporcionam à degradação da estrutura do solo e conseqüentemente a redução da porcentagem de macroporos.

Analisando os valores de microporosidade (Tabela 3) pode-se observar que o SC 5 anos apresentou maior porcentagem de microporos que o solo original e o SC 12 anos, sendo que estes não diferenciaram

estatisticamente. Estes comportamentos foram observados nas duas camadas avaliadas.

Entretanto, o trabalho de Nunes (2002), não confirma esta constatação. Esse autor encontrou maiores porcentagem de microporos para o solo original em ambas as camadas estudadas do que para os solos construídos. Porém, Gonçalves (2008) e Franco (2006) encontraram valores de microporosidade menores para solos construídos do que solo original somente na camada superficial. Em contrapartida estes mesmos autores obtiveram porcentagens de microporosidade maiores para os solos construídos estudados do que para o solo original na camada de 0,1 – 0,2 m, concordando com resultados obtidos neste trabalho para esta camada.

As maiores porcentagens de microporos para o solo original na camada de 0,0 - 0,1 m obtidas por Gonçalves (2008) e Franco (2006), que trabalharam com o mesmo solo original podem estar relacionadas a uma maior degradação física do solo sofrida anterior a concessão pela CRM. Este solo provavelmente deve ter sofrido degradação da estrutura quando era utilizado para agricultura, como também pelo tráfego de máquinas para minerar áreas próximas a esta.

Contudo, comparando a porcentagem de poros com a porcentagem de um solo considerado ideal por Kiehl (1979), pode-se afirmar que nenhum destes solos é 100% ideal para o desenvolvimento de plantas. Porém, os solos que mais se aproximaram das condições ideais foram os solos construídos, embora sendo solos totalmente degradados. Estes possuem maior espaço poroso e isso pode ser devido ao manejo utilizado no momento da construção do solo, que utiliza arado e/ou escarificador para reduzir a compactação dos solos recentemente construídos e aumentar o espaço poroso, para uma posterior inserção de plantas de cobertura.

#### **4.2 Diâmetro médio ponderado e índice de estabilidade dos agregados**

A Tabela 4 apresenta os dados de diâmetro médio ponderado (DMP) dos agregados estáveis em água ( $DMP_A$ ) e a seco ( $DMP_S$ ) e o índice de estabilidade dos agregados (IEA). A distribuição por classe de diâmetros dos agregados estáveis em água e a seco e as repetições de  $DMP_A$ ,  $DMP_S$  e IEA encontram-se respectivamente nos anexos 4, 5 e 6.

**Tabela 4:** Diâmetro médio ponderado dos agregados estáveis em água ( $DMP_A$ ), a seco ( $DMP_S$ ) e índice de estabilidade dos agregados (IEA) para o solos original (SOR) e construídos há 12 anos (SC 12) e 5 anos (SC 5) na camada de 0,0 a 0,2 m. Média de 3 repetições.

Solo	DMP (mm)		IEA
	Água	Seco	
SOR	2,94 b	3,18 c	0,92 a
SC 12	3,40 a	3,88 b	0,88 a
SC 5	1,67c	4,30 a	0,40 b

Valores seguidos da mesma letra nas colunas, não diferem significativamente entre si pelo teste de Tukey ao nível de 5% de significância.

O  $DMP_A$  e  $DMP_S$  diferiu para os três tratamentos estudados (Tabela 4). O solo construído há 12 anos (SC 12 anos) apresentou maior  $DMP_A$  (3,40 mm) e o solo construído há 5 anos (SC 5 anos) apresentou o menor valor de (1,67 mm).

O SC 5 anos apresentou o maior  $DMP_S$  (4,30 mm), e o solo original apresentou o menor valor (3,18 mm).

O IEA não diferiu para o solo original e o SC 12 anos (Tabela 4), sendo os valores próximos de 1 (um), valores esses maiores que o dobro de IEA obtido para o SC 5 anos. Isto indica que o solo original e o SC 12 anos apresentam agregados bastante estáveis, contrastando com o SC 5 anos, que apresentou baixa estabilidade dos agregados em água. Conforme (Silva, 1993), quanto mais próximo de “um” o valor de IEA, mais estáveis são os agregados do solo.

Com base no observado entre os solos estudados, pode-se inferir que o SC 12 anos e o solo original apresentam agregados mais resistentes e estáveis em água. Isso deve ocorrer por motivo que estes solos apresentam algumas propriedades físicas que favorecem uma melhor estrutura ao solo, como a porosidade (Tabela 3), favorecendo um melhor desenvolvimento das plantas e raízes.

Com relação aos três solos avaliados a melhor macroporosidade foi encontrada no SC 12 anos (Tabela 3). Isso deve estar relacionado ao manejo aplicado neste solo ao longo dos 12 anos após sua construção.

Outro fato que provavelmente contribuiu para uma melhor agregação e estabilidade dos agregados do SC 12 anos em relação ao SC 5 anos é o tempo de construção, que proporciona uma positiva evolução das propriedades

físicas com o passar do tempo (Tabela 3). Porém, para que isto tenha ocorrido, o solo deve ter sido adequadamente construído, com implantação de plantas de cobertura que se adaptam a solos poucos férteis e com estrutura degradada. Conforme a CRM (2009) foi realizado um acompanhamento efetivo e manutenção periódica ao longo do período de recuperação, para que esse solo desenvolvesse e mantivesse a cobertura vegetal durante todo o tempo de reabilitação desta área.

Conforme Roth et al. (1991) e Paladini & Mielniczuk (1991) em solos naturais há uma relação altamente significativa entre o conteúdo de matéria orgânica e os índices de estabilidade de agregados pedogênicos. Nos trabalhos de Franco (2006), Gonçalves (2008) e Miola (2010), que avaliaram os teores de carbono orgânico total (COT) do solo respectivamente logo após a inserção das plantas de cobertura, com 3 anos e 5 anos de construção, observou-se uma evolução nos teores de COT com o tempo para as mesmas plantas de cobertura avaliadas.

A cobertura vegetal juntamente com a ação de suas raízes proporciona uma ação efetiva sobre os agregados não pedogênicos dos solos construídos. Isto ocorre devido ao fato das moléculas orgânicas atuarem na formação e estabilização dos agregados pedogênicos e possivelmente na evolução dos agregados não pedogênicos. Também atuam como fonte de energia para os microrganismos, os quais são muito importantes na agregação do solo, justificando melhores condições estruturais para o SC 12 anos em relação ao SC 5 anos.

O solo original da área de mineração apresenta densa cobertura por gramíneas – campo nativo (Figura 1). Mesmo assim apresenta condições físicas prejudicadas (Tabela 3). Isto, provavelmente deve estar relacionado com atividades de agricultura com sistema de cultivo convencional, realizadas anteriormente à concessão pela Companhia Riograndense de Mineração (CRM). Também o tráfego de máquinas pesadas no processo de lavra do carvão em áreas de solo original próximas às áreas que estão sendo mineradas, deve ter contribuído para a degradação da estrutura do solo e conseqüentemente diminuição do diâmetro dos agregados (Tabela 4).

Os agregados do SC 5 anos (Tabela 4) são menos resistentes que os do SC 12 anos e também do solo original, quando submetidos à ação da água.

Isso deve ocorrer em função da desestruturação do solo sofrida pelos processos de lavra e recomposição do solo. Além do fato de ter sido construído há pouco tempo para que tenha refletido em agregados não pedogenéticos maiores e mais estáveis.

O SC 5 anos apresentou maior  $DMP_S$  em relação aos outros dois solos avaliados (Tabela 4). Isso provavelmente deve estar relacionado a formação das unidades estruturais densas, as quais podem ser formadas durante o preparo do solo, logo após sua construção, pela quebra de blocos de solo compactados, como também no momento do preparo das amostras em laboratório, em que os agregados não pedogênicos não são rompidos no seu plano de fraqueza, e sim em plano reto qualquer, aplicando-se, para isso, às vezes, maior tensão. Estas hipóteses são reforçadas com a afirmação de D'Agostini (1992), que trabalhou com agregados pré-formados a partir da fragmentação de blocos de solos compactados e observou que a distribuição de tamanho desses agregados depende dos processos de fragmentação utilizados.

O maior  $DMP_S$  do SC 5 anos pode também estar relacionado com a grande quantidade de fragmentos de rocha e rejeitos, que se encontram misturadas nos solos construídos no momento da recomposição topográfica do terreno das áreas mineradas conforme pode ser visualizado na Figura 3.

As plantas inseridas no SC 5 anos apresentaram grande dificuldade de se desenvolver em função da maior presença de fragmentos de rochas e rejeitos de carvão em relação aos demais (Figura 3). Com isso, a superfície do mesmo ficou exposta aos processos de erosão hídrica por longos períodos, favorecendo o desenvolvimento de sulcos de erosão. Dessa forma aflorou a camada subsuperficial expondo os rejeitos de carvão. Isto pode ter proporcionado o aumento da resistência dos agregados não pedogênicos. Isto não ocorre no solo original, pois seus agregados são formados pedogeneticamente e sem a influência do material estéril para elevar o DMP.

Com o uso de práticas de manejo adequadas ao longo do tempo, os solos construídos podem apresentar uma estrutura satisfatória para o estabelecimento de cobertura vegetal (Schafer et al., 1980). A cobertura vegetal contribui para o aumento dos teores de carbono orgânico, o qual ajuda a recuperar a estrutura do solo e proporcionar uma maior estabilidade e tamanho dos agregados do solo, fazendo com que o solo volte à atividade produtiva. O

teor de carbono orgânico não apresentou diferença estatística entre os três solos avaliados (Tabela 2), por isso não explica as diferenças observadas na agregação. Pode-se dizer que o solo construído que apresentou maior  $DMP_A$  (SC 12) não é o mesmo que apresentou maior teor de carbono orgânico (SC 5) (Tabela 2). Isso pode ter ocorrido devido ao SC 5 anos apresentar grande quantidade de rejeitos de carvão que foram encontrados nas camadas superficial e subsuperficial do solo, elevando o teor de carbono nesse solo (Figura 3). No entanto, a origem do carbono orgânico dos solos construídos pode não ser a mesma do solo original. Essa alteração pode ser devido aos processos de mineração.

Com base nos resultados, solos construídos com maior tempo de construção têm uma melhor estruturação e agregados não pedogênicos com maior DMP que solos construídos de menos idade. Isso também foi constatado por Nunes (2002) e Kämpf et al. (2000) que trabalharam com solos de diferentes idades de construção. Desta forma, solos construídos podem apresentar DMP dos agregados maior que o do solo original em função do material de construção do solo, do método de construção e manutenção destes solos, como também da atividade existente no solo original anterior aos processos de lavra.

### 4.3 Características hidráulicas do escoamento em entressulcos

Características hidráulicas do escoamento em entressulcos estão apresentadas na Tabela 5. Os valores das repetições são apresentados no Anexo 7.

**Tabela 5:** Características hidráulicas do escoamento em entressulcos para os solos original (SOR) e construídos há 12 anos (SC 12) e 5 anos (SC 5). Os valores observados são a média entre 75 e 90 minutos de ocorrência de chuva. Média de 4 repetições.

Solos	$q_i$ $m\ s^{-1}$	$q$ $m^2\ s^{-1}$	$V_s$ $m\ s^{-1}$	$V_m$ $m\ s^{-1}$	$h$ m	$T$ $^{\circ}C$	$\nu$ $m^2\ s^{-1}$	$R_e$ ----adimensional----	$F_r$	$f$
<b>SOR</b>	2,27E-05	1,35E-05	0,068	0,046	0,00031	22,8	9,43E-07	14,3	0,85	1,21
<b>SC 12</b>	2,31E-05	1,51E-05	0,090	0,060	0,00026	21,3	9,73E-07	15,5	1,22	0,56
<b>SC 5</b>	2,26E-05	1,45E-05	0,075	0,050	0,00031	24,0	9,20E-07	15,9	0,97	1,11

$q_i$ : descarga unitária do escoamento;  $q$ : descarga líquida total do escoamento por unidade de largura;  $V_s$ : velocidade superficial do escoamento;  $V_m$ : velocidade média do escoamento;  $h$ : altura de lâmina;  $T$ : temperatura;  $\nu$ : viscosidade cinemática;  $R_e$ : número de Reynolds;  $F_r$ : número de Froude; e  $f$ : coeficiente de perda de carga do escoamento.

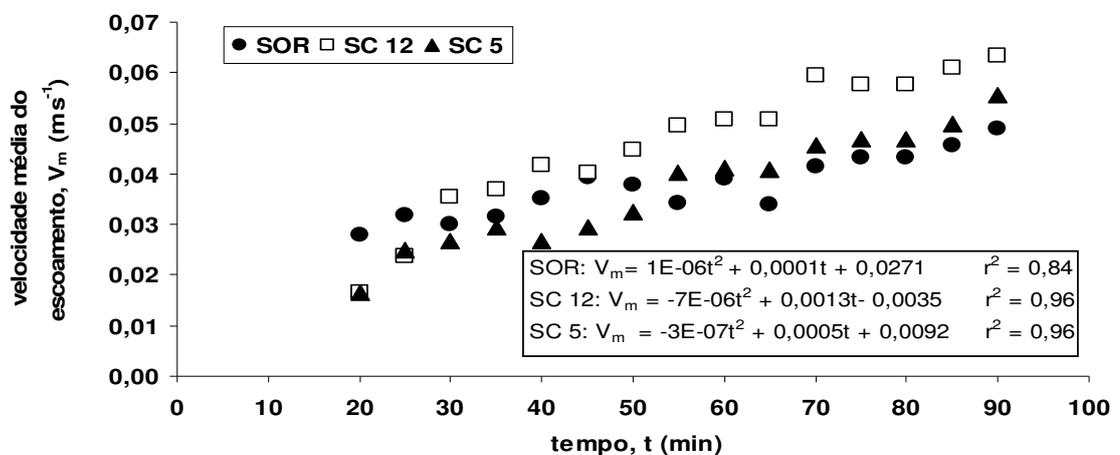
O número de Froude ( $F_r$ ) variou entre 0,85 e 1,22 (Tabela 5), caracterizando a natureza dos escoamentos como sendo do tipo subcrítico para o

solo original (SOR) e solo construído há 5 anos (SC 5). No solo construído há 12 anos (SC 12) o número de Froude foi um pouco maior que 1 ( $um$ ), caracterizando escoamento do tipo laminar supercrítico.

Os regimes de escoamentos observados no experimento em laboratórios sob chuva simulada estão dentro dos limites de classificação proposto por Guy et al. (1990) e Farenhorst & Bryan (1995). Para estes autores, o escoamento laminar característico do processo de erosão em entressulcos, pode tanto ser de natureza subcrítica ( $F_r < 1$ ) quanto supercrítica ( $F_r > 1$ ).

O número de Froude maior que um ( $Fr > 1$ ) para o SC 12 anos representa uma maior turbulência do escoamento laminar. Isso deve ter ocorrido em função da menor altura de lâmina d'água, menor rugosidade superficial ( $f$ ) e maior velocidade média do escoamento (Tabela 5) nesse solo em relação aos demais.

A velocidade do escoamento se tornou constante nos últimos 15 minutos de ocorrência da chuva (Figura 6). Nesse período a condição hidráulica do escoamento tornou-se estável.

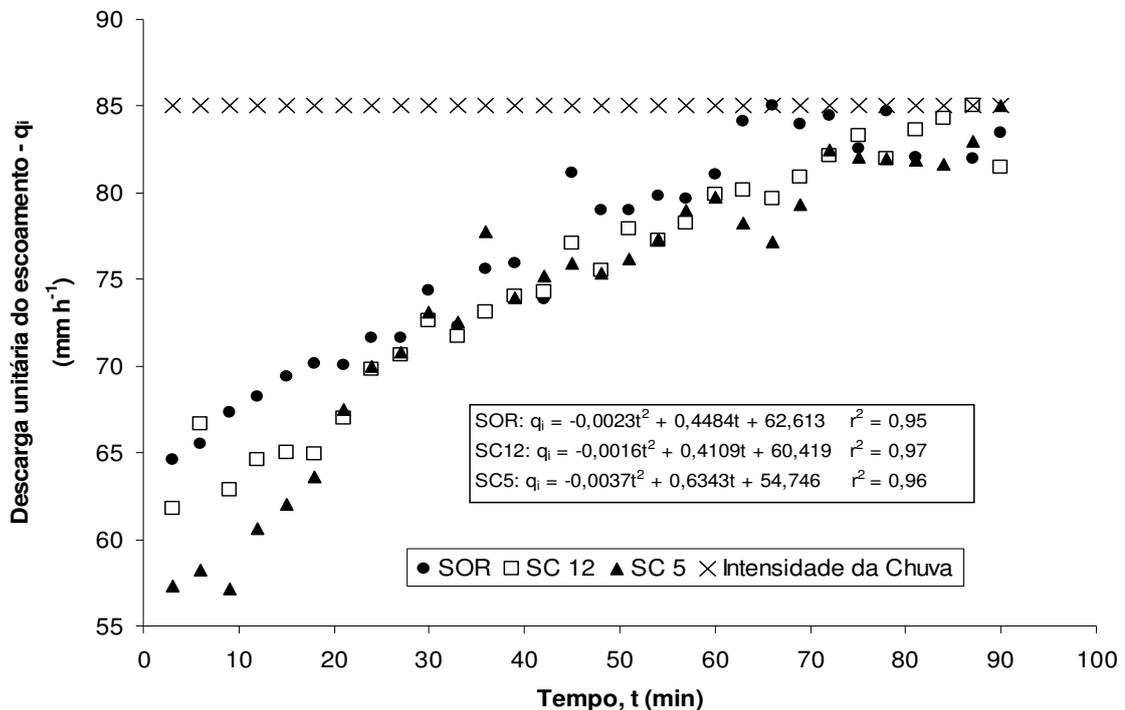


**Figura 6:** Velocidade média do escoamento do para o solo original (SOR), solos construídos há 12 anos (SC 12) e 5 anos (SC 5), submetido à chuva simulada de  $85 \text{ mm h}^{-1}$  durante 90 minutos em declividade de  $0,09 \text{ m m}^{-1}$ . Os pontos da curva são a média de 4 repetições.

Em face disso, utilizaram-se os valores da velocidade do escoamento durante o período de regime estável como base para caracterização das demais variáveis hidráulicas do escoamento.

A descarga líquida unitária média do escoamento superficial ( $q_i$ ) aumentou nos períodos iniciais da chuva, com tendência a tornar-se constante a

partir dos 75 minutos, para os três solos. No período final dos testes se aproximou da intensidade da chuva aplicada de  $85 \text{ mm h}^{-1}$  (Figura 7).



**Figura 7:** Descarga líquida unitária média do escoamento superficial ( $q_i$ ) para o solo original (SOR), solos construído há 12 anos (SC 12) e 5 anos (SC 5), submetido à chuva simulada de  $85 \text{ mm h}^{-1}$  durante 90 minutos em declividade de  $0,09 \text{ m m}^{-1}$ . Os pontos da curva são a média de 4 repetições.

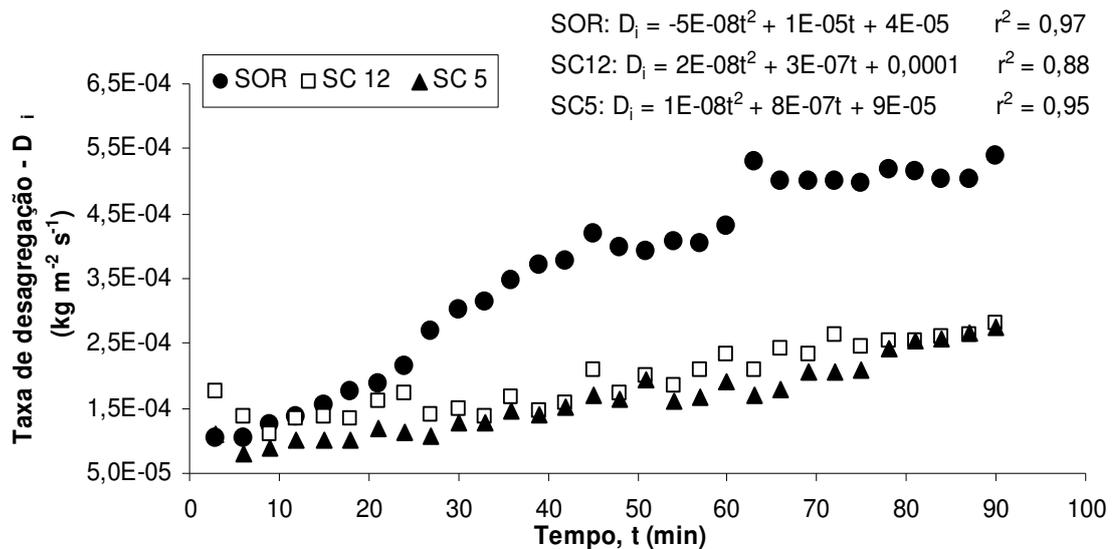
O solo original apresentou  $q_i$  mais próximo da intensidade da chuva a partir dos 45 minutos do tempo de ocorrência da chuva simulada (Figura 7). Já os solos construídos de 12 e 5 anos apresentaram  $q_i$  próximo da intensidade de chuva simulada, aproximadamente a partir dos 60 minutos de ocorrência da chuva (Figura 7).

A aproximação do  $q_i$  com a intensidade da chuva (Figura 7) demonstra que se pode usar tanto a equação (1) quanto a equação (4) para a obtenção de  $K_i$ . Quando ocorre o escoamento total da chuva precipitada utiliza-se a equação (1) com a intensidade elevada ao quadrado ( $I^2$ ). Enquanto que a equação (4) é utilizada quando ocorre alta taxa de infiltração no solo e baixo volume de água escoado e com isso utiliza-se a descarga líquida unitária para que se considere o efeito do escoamento.

#### 4.4 Taxa de desagregação e erodibilidade do solo em entressulcos

As taxas médias de desagregação em entressulcos para o solo original, solo construído há 12 anos (SC 12) e 5 anos (SC 5) ao longo de todo tempo de ocorrência da chuva podem ser observadas na Figura 8.

A partir dos 70 aos 75 minutos de ocorrência de chuva, a taxa de desagregação ( $D_i$ ) tornou-se praticamente constante no solo original e no SC 12 anos (Figura 8). No SC 5 anos as taxas de desagregação ( $D_i$ ) ainda apresentaram tendência a um leve crescimento nesse período (Figura 8). Contudo, uniformizou-se a utilização dos valores médios das taxas de desagregação das cinco últimas observações para a determinação do fator erodibilidade do solo em entressulcos ( $K_i$ ) (Tabela 6), visto que, a Figura 7 demonstra que a partir dos 70 minutos de ocorrência da chuva a descarga unitária do escoamento mostrou-se constante para todos os solos avaliados.



**Figura 8:** Taxa de desagregação de solo em entressulcos obtida com aplicação de chuva simulada de  $85\ mm\ h^{-1}$  durante 90 minutos sob declividade de  $0,09\ m\ m^{-1}$  para o solo original (SOR), solos construídos há 12 anos (SC 12) e 5 anos (SC 5) da área de mineração de carvão de Candiota, RS. Os pontos da curva são média de 4 repetições.

A Tabela 6 apresenta os valores médios de desagregação ( $D_i$ ) e do fator erodibilidade do solo em entressulcos ( $K_i$ ) para os solos avaliados em condições de laboratório, sob chuva simulada com intensidade  $85\ mm\ h^{-1}$  e declividade de  $0,09\ m\ m^{-1}$ . Os valores de  $K_i$  da Tabela 6 foram calculados conforme a equação (16) com base nos valores de  $D_i$  obtidos nos solos na

declividade e chuva aplicada. Os valores das repetições de  $D_i$ ,  $K_i$  e  $q_i$  das quatro chuvas aplicadas estão no Anexo 8.

**Tabela 6:** Taxas de desagregação ( $D_i$ ) e Fator erodibilidade do solo em entressulcos ( $K_i$ ) em condições de laboratório, sob chuva com intensidade  $85 \text{ mm h}^{-1}$  ( $I = 0,0000236 \text{ m s}^{-1}$ ) e declividade de  $0,09 \text{ m m}^{-1}$  ( $S_f = 0,4560$ ). Os valores de  $D_i$  são médias das cinco últimas observações em cada chuva. Média de 4 repetições.

Solos	$D_i$ $\text{kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$	$K_i$ $\text{kg s m}^{-4}$
	$\times 10^{-4}$	$\times 10^6$
<b>SOR</b>	4,64 a	1,82 a
<b>SC 12</b>	2,62 b	1,03 b
<b>SC 5</b>	2,59 b	1,02 b

SOR: Solo original; SC 12: solo construído há 12 anos; SC 5: Solo construído há 5 anos. Valores seguidos da mesma letra nas colunas, não diferem significativamente entre si pelo teste de Tukey ao nível de 5% de significância.

A taxa média de desagregação do solo em entressulcos ( $D_i$ ) obtida para o solo original (SOR) foi de  $4,64 \times 10^{-4} \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  (Tabela 6). Este valor para o Argissolo Vermelho estudado (solo original) foi próximo do valor encontrado por Cassol et al. (2004), que foi de  $5,35 \times 10^{-4} \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  e por Bezerra & Cantalice (2006), que foi de  $5,94 \times 10^{-4} \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  que também trabalharam com Argissolo Vermelho com teores de argila de respectivamente  $0,2065 \text{ kg kg}^{-1}$  e  $0,228 \text{ kg kg}^{-1}$ . Esses teores de argila também estão próximos ao solo original avaliado (Tabela 1).

As taxas de desagregação do solo em entressulcos ( $D_i$ ) não foram diferentes entre os solos construídos (SC 12 e SC 5), porém, ambas foram significativamente menores do que o valor de  $D_i$  para o solo original (Tabela 6). Os menores valores de  $D_i$  refletiram em menores valores de  $K_i$  para os solos construídos em relação ao solo original, pois a taxa de desagregação influencia diretamente na obtenção de  $K_i$ . Isso provavelmente deve ser em função da formação e composição dos agregados do solo, que nos solos construídos (SC 12 e SC 5) são agregados não pedogênicos, ou seja, mais resistentes ao impacto da gota de chuva, enquanto no solo original são agregados de origem pedogenética. No SC 5 anos também teve a influência de fragmentos de rocha na sua composição, que fez com que a taxa de desagregação e fator  $K_i$  para este solo fosse menor que os outros dois solos avaliados.

Os valores determinados de fator  $K_i$ , tanto para o SOR quanto para os solos construídos (Tabela 6) estão dentro da faixa dos valores determinados

para os solos que deram base ao modelo WEPP (Alberts et al., 1995), que varia de  $0,5 \times 10^6$  a  $12 \times 10^6$  kg s m<sup>-4</sup>.

O valor médio de erodibilidade do solo em entressulcos ( $K_i$ ) para o solo original foi de  $1,82 \times 10^6$  kg s m<sup>-4</sup> (Tabela 6). Este se aproximou dos valores de  $1,77 \times 10^6$  obtidos por Reichert *et al.* (2001), de  $1,87 \times 10^6$  obtido por Bezzera & Cantalice (2006) e de  $2,55 \times 10^6$  kg s m<sup>-4</sup> obtido por Cantalice (2001), que também trabalharam com Argissolos. Já Braida & Cassol (1996), em um solo com textura mais arenosa obtiveram  $K_i$  de  $5,10 \times 10^6$  kg s m<sup>-4</sup> e Rockenbach (1992) para um solo com textura franco arenosa determinou  $K_i$  de  $3,35 \times 10^6$  kg s m<sup>-4</sup>.

O SC 12 anos apresentou o maior diâmetro médio ponderado em água ( $DMP_A$ ) e uma elevada estabilidade representada pelo índice de estabilidade de agregados (IEA) (Tabela 4), refletindo em menores valores de  $D_i$  e  $K_i$  quando comparado com o solo original. Esta constatação também foi realizada por Albuquerque et al. (2000), o qual afirmou que o IEA e o fator  $K_i$  tem uma relação direta, porém negativa, ou seja, à medida que a estabilidade dos agregados aumenta (IEA), se aproximando de 1, menor é a suscetibilidade do solo em sofrer erosão em entressulcos.

O maior valor de IEA e menor valor de  $K_i$  para o SC 12 anos pode ser em função do tempo de construção, pois este obteve um maior tempo para que as condições estruturais se mostrassem melhoradas e com melhor desenvolvimento das plantas e raízes (Figura 2). Isso concorda com os resultados encontrados nos trabalhos de Schafer et al. (1980), Kämpf et al. (2000) e Nunes (2002), que trabalharam com solos construídos de diferentes idades de construção e afirmaram que solos com maior tempo de construção possuem maior evolução na estrutura e agregados não pedogênicos mais estáveis em água, refletindo em maior DMP.

O SC 5 anos, embora não tenha apresentado valores de  $K_i$  diferente do SC 12 anos, apresentou IEA muito menor que 1 (um) (Tabela 4). Isso pode ser explicado pelo motivo que o SC 5 anos apresentou agregados não pedogênicos menos estáveis em água que a seco (Tabela 4) e pouco tempo para que se observassem melhorias significativas na sua estrutura do solo.

O menor valor de  $K_i$  para o SC 5 anos, quando comparado com o SOR, deve estar relacionado com a composição do solo, pois o SC 5 anos

apresenta bastantes quantidades de rejeitos de carvão e fragmentos de rochas na sua composição. Estes materiais contribuem para a diminuição da taxa de desagregação do solo durante a aplicação das chuvas simuladas por serem materiais constituintes das camadas superficial e subsuperficial dos solos construídos, sendo visualmente o SC 5 anos apresentou a maior quantidade destes materiais (Figura 3). No entanto, estes materiais são descontados no cálculo do DMP, os quais são considerados materiais inertes do solo, resultando em baixo valor de  $DMP_A$ .

Os resultados observados poderiam levar a rejeição da hipótese de que a erodibilidade em entressulcos do solo original é menor do que dos solos construídos. Essa hipótese se apresentava consistente quando se observa grandes problemas de erosão hídrica nos solos construídos antes do estabelecimento da vegetação (Figura 9). No entanto, este comportamento que se refletiu em menores valores do fator erodibilidade em entressulcos ( $K_i$ ) provavelmente deve estar relacionado a formação e composição dos agregados não pedogenéticos de natureza antrópica nos solos construídos serem mais resistentes à energia de impacto da gota de chuva em função da natureza e formação do agregado não pedogênico, quando comparado com o solo original.



**Figura 9:** Solo recentemente construído com sulcos de erosão

Dessa forma, a hipótese seria rejeitada para a erosão em entressulcos, mas não poderia haver a mesma conclusão para a erosão em

sulcos. Isso se fundamenta nas observações visuais de ocorrência de erosão em sulcos observada a campo (Figura 9).

Os solos construídos também são poucos permeáveis (Guadagnin et al., 2007) em função da grande compactação causada nos mesmos, o que proporciona uma maior ação do escoamento superficial com a formação de caminhos preferenciais sobre o solo, acarretando o desenvolvimento de sulcos de erosão (Figura 9). Estas constatações estão intimamente relacionadas com os valores médios de resistência mecânica à penetração obtidos por Nunes (2002), Franco (2006) e Gonçalves (2008) em solos construídos para a camada de 0,0 a 0,2 m.

Para que ocorram menores problemas de erosão hídrica nos solos construídos, principalmente na fase de recente construção, seria necessária a implantação de práticas mecânicas de controle de erosão hídrica que evitem o escoamento superficial da água concentrada em sulcos. Dessa forma faz-se um seccionamento do declive, evitando que a água do escoamento adquira velocidade erosiva. Além disso, deve haver um acompanhamento efetivo para que se obtenha uma diminuição considerada da ação do escoamento superficial, pelo menos até o estabelecimento pleno da cobertura vegetal sobre os solos recentemente construídos. Vale ressaltar que este é um processo lento e custoso.

#### **4.5 Erodibilidade do solo em entressulcos estimada por métodos indiretos**

Na Tabela 7 são apresentados os valores do fator erodibilidade do solo em entressulcos ( $K_i$ ) estimado por métodos indiretos, comparando com os valores de  $K_i$  determinado em laboratório para os três tratamentos. Também nesta tabela são apresentados testes de comparações de médias entre os métodos de determinação de  $K_i$  utilizados para cada solo e comparação de médias entre os valores do fator erodibilidade do solo em entressulcos para cada solo avaliado e para cada modelo de determinação de  $K_i$ .

Entre os modelos de determinação de  $K_i$  testados, estão o modelo WEPP, modelo de Albuquerque (1998) e o modelo de Nunes & Cassol (2008), respectivamente representados pelas equações 5, 17 e 19. Cada um desses modelos utiliza parâmetros que influenciam na determinação do fator  $K_i$  para os tipos de solo que cada um dos modelos utilizou. Observando a Tabela 7, nota-se, de modo geral, que o SC 12 anos foi o que apresentou o menor valor de  $K_i$

em todos os métodos (direta e indiretamente), somente não diferenciando do SC 5 anos pelo método de determinação direta ( $K_i$ ). Isso, provavelmente deve estar relacionado com o diâmetro médio ponderado em água ( $DMP_A$ ), pois o único método de determinação indireta de  $K_i$  que depende desse parâmetro é o modelo de Albuquerque (1998) e o obtido experimentalmente em laboratório ( $K_i$ ).

**Tabela 7:** Valores de erodibilidade do solo em entressulcos obtidos diretamente em laboratório e estimados por métodos indiretos para o solo original (SOR), solo construído há 12 anos (SC 12) e há 5 anos (SC 5).

Solo	$K_i$	$K_{ib}$	$K_{iA}$	$K_{iN}$
	----- kg s m <sup>-4</sup> -----			
<b>SOR</b>	1,82 X 10 <sup>6</sup> Ab	3,41 X 10 <sup>6</sup> Aa	1,00 X 10 <sup>6</sup> ABc	1,73 X 10 <sup>6</sup> Ab
<b>SC 12</b>	1,03 X 10 <sup>6</sup> Bb	3,04 X 10 <sup>6</sup> Ba	0,70 X 10 <sup>6</sup> Bc	0,98 X 10 <sup>6</sup> Bb
<b>SC 5</b>	1,02 X 10 <sup>6</sup> Bb	3,32 X 10 <sup>6</sup> Aa	1,11 X 10 <sup>6</sup> Ab	ns

Valores seguidos das mesmas letras maiúsculas nas colunas e valores seguidos de mesmas letras minúsculas nas linhas, não diferem significativamente entre si pelo teste de Tukey ao nível de 5% de significância; ns: não satisfatório;  $K_i$ : determinado experimentalmente;  $K_{ib}$ : modelo WEPP (Alberts et al., 1995);  $K_{iA}$ : modelo sugerido por Albuquerque (1998);  $K_{iN}$ : modelo de Nunes & Cassol (2008).

O  $DMP_A$  é um fator importante na estimativa da erodibilidade do solo em entressulcos pelo modelo de Albuquerque (1998). Este parâmetro se correlaciona com praticamente todos os parâmetros do solo (Legout et al., 2005), principalmente os teores de argila e óxidos de Fe, os quais favorecem uma maior estabilidade dos agregados (Azevedo & Bonumá, 2004). Entretanto, o  $DMP_A$  é uma forma simples e prática de representar vários atributos do solo.

Geralmente, quanto maior o  $DMP_A$ , maiores os teores de argila e de óxidos de Fe no solo, o que proporciona uma maior estabilidade dos agregados em água, por conferir maior tensão e contato entre as partículas de solo (Kemper et al., 1987). Estes parâmetros também contribuem para que os agregados do solo sejam mais resistentes à energia do impacto das gotas de chuva e ao escoamento superficial, mantendo-os maiores e mais resistentes ao transporte.

O modelo de Albuquerque (1998) que utiliza o maior número de parâmetros para a determinação do fator  $K_i$ , como o  $DMP_A$ , variação de pH em KCl e em água ( $\Delta pH$ ) e o parâmetro de Wischmeier et al. (1971), subestimou os valores encontrados de  $K_i$  determinados experimentalmente e os estimados pelo modelo de Nunes & Cassol (2008) e WEPP para todos os solos avaliados, com exceção do valor de  $K_i$  para o SC 5 obtido experimentalmente, na qual não obteve diferença estatística. Isso ocorreu provavelmente em função do SC 5

anos apresentar valores de  $DMP_A$ ,  $\Delta pH$ , teor de silte e AMF dentro do intervalo de valores obtidos para os solos testados que deram origem ao modelo de Albuquerque (1998).

Já, entre os três tratamentos avaliados no modelo de Albuquerque (1998), os solos construídos diferiram entre si pelo teste de comparação de médias, mas não diferiram significativamente do valor de  $K_{iA}$  obtido para o solo original (Tabela 7). Porém, pode-se afirmar que os parâmetros que mais influenciaram na determinação do valor de  $K_{iA}$  foram o teor de areia muito fina (AMF) (Tabela 1) e o  $\Delta pH$  (Tabela 2). Alguns destes parâmetros para dois dos três solos avaliados apresentaram-se fora do intervalo de valores obtidos por Albuquerque (1998) para as diferentes classes de solos estudadas para a determinação do modelo. Albuquerque (1998), Cantalice (2001) e Nunes (2006) também constataram que o  $\Delta pH$  influencia na determinação de  $K_{iA}$ .

O parâmetro AMF (Tabela 1) pode influenciar na determinação do  $K_i$  para os modelos de Albuquerque (1998), no qual faz parte do parâmetro de Wischmeier e do modelo WEPP. Este parâmetro influencia na variação dos valores de  $K_i$ , em função que a AMF pode comportar-se como silte na erosão hídrica (Wischmeier & Mannering, 1969). Isto pode favorecer o aumento da erodibilidade dos solos em entressulcos.

A  $\Delta pH$ , assim como o pH do solo em água (Tabela 2), estão intimamente relacionados com os teores de argila dispersa em água (ADA) (Tabela 1). Quanto maior o  $\Delta pH$ , maior o afastamento do pH em relação ao ponto de carga zero (PCZ) e maior dispersão entre as partículas (Sposito, 1989). O afastamento é obtido através da diferença entre o pH medido em KCl e o pH em água destilada. A repulsão pode ocorrer tanto para valores de pH acima como abaixo do PCZ (Albuquerque, 1998). Neste trabalho, o  $\Delta pH$  (Tabela 2) para todos os solos avaliados apresentaram-se negativos, representando que as partículas desses solos possuem cargas líquidas negativas. Isto pode indicar a presença de íons de Fe e Al em abundância, sendo estes liberados durante a dissolução de minerais, os quais substituem os íons de  $H^+$  adsorvidos às partículas do solo carregadas negativamente (Quiñones, 2004). Estas cargas negativas aumentam a concentração e a atividade dos íons  $H^+$  na solução do solo juntamente com a reação de oxidação da pirita (Pinto & Kämpf, 2002).

Desta forma, o pH do solo torna-se mais baixo, ou seja, menor que 5,5, caracterizando solos ácidos. Também se pode afirmar que quanto mais próximo de zero o parâmetro  $\Delta\text{pH}$  (Tabela 2), menor o fator erodibilidade do solo em entressulcos (Albuquerque, 1998). Segundo este mesmo autor, o fator  $\Delta\text{pH}$  pode ser modificado com práticas de manejo que diminuam os problemas erosão hídrica do solo.

Observando a Tabela 7, nota-se que o modelo WEPP (Water Erosion Prediction Project), que depende somente do teor de areia muito fina (AMF) para a obtenção do fator erodibilidade ( $K_{ib}$ ), superestimou os valores de  $K_i$  obtidos experimentalmente em laboratório e os obtidos pelos modelos de Albuquerque (1998) e Nunes & Cassol (2008). Os solos construídos testados neste modelo diferiram significativamente entre si, sendo que o SC5 anos não diferiu dos valores encontrados para o SOR. Isto provavelmente ocorreu em função que os solos avaliados apresentaram teores mais elevados de AMF do que os solos americanos utilizados para a obtenção do modelo WEPP. Esta constatação concorda com as realizadas por Albuquerque (1998), Duiker et al. (2001) e Nunes & Cassol (2008).

O modelo de Nunes & Cassol (2008) foi o que melhor representou os valores estimados em laboratório para o solo original e para o SC 12 anos (Tabela 7). Este modelo é o que leva em consideração os teores de argila e de óxido de ferro relativo aos óxidos de ferro de baixa cristalinidade. Por outro lado, o modelo de Nunes & Cassol (2008) não foi satisfatório para obter o valor do fator erodibilidade em entressulcos para o SC 5 anos, conforme observado na Tabela 7. Isso, provavelmente deve ter sido em função dos altos teores de Fe relativo aos óxidos de ferro de baixa cristalinidade extraído com oxalato de amônio ( $\text{Fe}_o$ ) nesse solo (Tabela 2), não estando dentro da faixa de teores de  $\text{Fe}_o$  utilizado por Nunes & Cassol (2008) para a obtenção do modelo.

Nunes & Cassol (2008) desenvolveram esse modelo para Latossolos, porém, a utilização deste modelo no Argissolo avaliado se mostrou eficaz em função que um dos Latossolos utilizados para a obtenção deste modelo apresentou granulometria semelhante a do Argissolo utilizado neste trabalho (Tabela 1). O solo original e o SC 12 anos apresentaram teores de argila e de ferro relativo aos óxidos de Fe de baixa cristalinidade dentro da faixa de valores

dos solos utilizados por Nunes & Cassol (2008) para a obtenção da equação que constitui o modelo obtido por estes autores.

Os teores de ferro relativo aos óxidos de Fe de baixa cristalinidade ( $Fe_o$ ), mesmo em baixas concentrações (Tabela 2) têm uma ação efetiva na estabilidade dos agregados do solo. Estes óxidos apresentam elevada área superficial específica, devido ao seu pequeno tamanho e às irregularidades superficiais, constituindo-se em importantes agentes de ligação entre os constituintes do solo (Römkens et al., 1977). Isto favorece o aumento da estabilidade dos agregados (Azevedo & Bonumá, 2004) e conseqüentemente a menor erodibilidade do solo em entressulcos.

Com base na avaliação dos três modelos de determinação utilizados, pode-se afirmar que o modelo de Nunes & Cassol (2008) foi o que melhor se adaptou aos solos estudados. Esse modelo é uma ferramenta prática e precisa para se estimar a erodibilidade em entressulcos, pois necessita de poucos parâmetros que são de fácil e rápida determinação em laboratório. Porém, para se ter uma efetiva afirmação da utilização deste modelo para estes tipos de solos, seria ideal que mais solos construídos de diferentes idades fossem testados e com base nisso seria importante ampliar a base de dados desse modelo, utilizando solos com maior amplitude de variação nos teores de argila e de ferro relativo aos óxidos de ferro de baixa cristalinidade.

#### **4.6 Intervalo hídrico ótimo do solo**

A variação dos dados de densidade do solo ( $D_s$ ), umidade volumétrica ( $\theta_v$ ) e resistência mecânica à penetração ( $R_p$ ) podem ser avaliadas pelo coeficiente de variação (CV) obtido pela estatística descritiva (Tabela 8). Conforme Wilding & Drees (1983) os valores de  $D_s$  dos solos avaliados são classificados como de baixa variabilidade ( $CV < 15\%$ ), os valores de  $\theta_v$  como de moderada variabilidade ( $15\% < CV < 35\%$ ) e os valores de  $R_p$  como de alta variabilidade ( $CV > 35\%$ ).

A alta variabilidade encontrada para os dados de resistência mecânica à penetração (Tabela 8) se deve ao gradiente de  $\theta_v$  e  $D_s$  nas amostras. Esta constatação também foi observada por Silva et al. (1994), Tormena et al. (1998, 1999), Imhoff et al. (2001), Leão et al. (2004) e Tormena et al. (2007).

O maior CV para a resistência à penetração ( $R_p$ ) para os solos construídos há 12 e 5 anos (Tabela 8) deve estar relacionado com a natureza e composição destes solos, que apresentam uma estrutura degradada em função dos processos de mineração e recomposição topográfica do terreno e com diferentes materiais na sua composição, resultantes do processo de lavra do carvão.

**Tabela 8:** Estatística descritiva da densidade do solo ( $D_s$ ), umidade volumétrica ( $\theta_v$ ) e resistência à penetração ( $R_p$ ) para o solo original (SOR), solo construído há 12 anos (SC 12) e há 5 anos (SC 5).

Solos	Variáveis	Erro					Variância	Mínimo	Máximo	CV (%)
		Média	padrão	Mediana	DP					
SOR	$D_s$	1,55	0,012	1,55	0,078	0,006	1,38	1,68	5,07	
	$\theta_v$	0,26	0,009	0,25	0,058	0,003	0,17	0,41	21,88	
	$R_p$	4,90	0,317	4,48	2,052	4,211	1,25	9,32	41,90	
SC 12	$D_s$	1,63	0,016	1,62	0,101	0,010	1,41	1,80	6,22	
	$\theta_v$	0,27	0,008	0,26	0,052	0,003	0,19	0,41	19,06	
	$R_p$	5,87	0,55	4,75	3,541	12,54	0,91	13,92	60,30	
SC 5	$D_s$	1,51	0,015	1,50	0,095	0,009	1,36	1,73	6,26	
	$\theta_v$	0,34	0,008	0,34	0,054	0,003	0,25	0,46	16,13	
	$R_p$	4,35	0,409	3,37	2,647	7,009	1,07	9,07	60,82	

$D_s$ : Densidade do solo ( $Mg\ m^{-3}$ );  $\theta_v$ : Conteúdo volumétrico de água ( $m^3\ m^{-3}$ );  $R_p$ : Resistência mecânica do solo à penetração (MPa); Dp: desvio padrão; CV: Coeficiente de variação.

O aumento da resistência à penetração com o aumento da  $D_s$  (Tabela 8) pode ser devido à compactação causada nos solos avaliados. No solo original pode ter ocorrido compactação quando este era utilizado na agricultura, ou pastejo e passadas de máquinas de grande porte no momento de minerar áreas próximas. Esta hipótese está em concordância com a afirmação feita por Tormena et al. (2007), que em solos agrícolas compactados ocorre o aumento da  $D_s$  e conseqüentemente da  $R_p$ .

Nos solos construídos (SC 5 e SC 12 anos), a compactação ocorre no momento em que são formadas as pilhas de materiais retirados das cavas, as quais são posteriormente desfeitas para a conformação topográfica do terreno, concordando com as afirmações de Barfield et al. (1988). Essas pilhas são desmanchadas com passadas sucessivas de máquinas de grande porte, de modo que se faça a reconstituição topográfica da área e conseqüentemente a construção do solo.

O aumento da resistência à penetração com a diminuição do conteúdo de água ( $\theta_v$ ) (Tabela 9) pode estar associado à maior coesão entre as partículas minerais, principalmente em solos de textura argilosa, conforme afirmado por Kay & Angers (1999). Estas constatações com base na Tabela 8 podem ser confirmadas avaliando as equações apresentadas na Tabela 9.

**Tabela 9:** Equações de ajuste da curva de resistência mecânica do solo à penetração e da umidade volumétrica obtidas a partir das equações não lineares ajustadas para o solo original (SOR), solo construído há 12 anos (SC 12) e há 5 anos (SC 5).

Solos	Equações	R <sup>2</sup>	t <sub>tab.</sub>	t <sub>estat.</sub>
SOR	$\theta_v = \exp^{(-1,2395 - 0,2385 \cdot D_s)} \Psi_m^{-0,0792}$	0,72	1,683	0,037
	$RP = 0,2525 \theta_v^{-1,1620} D_s^{3,1070}$	0,53	1,683	-0,071
SC 12	$\theta_v = \exp^{(-0,8036 - 0,4270 \cdot D_s)} \Psi_m^{-0,0753}$	0,87	1,683	-3,298
	$RP = 0,0124 \theta_v^{-2,4218} D_s^{5,9242}$	0,66	1,683	0,195
SC 5	$\theta_v = \exp^{(-1,4220 + 0,0839 \cdot D_s)} \Psi_m^{-0,0607}$	0,91	1,683	0,016
	$RP = 0,1411 \theta_v^{-2,0446} D_s^{2,6911}$	0,90	1,683	-0,119

Ds: Densidade do solo (Mg m<sup>-3</sup>);  $\theta_v$ : Conteúdo volumétrico de água (m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>); RP: Resistência mecânica do solo a penetração (MPa);  $\Psi_m$ : Potencial de água no solo (MPa). Teste t a nível de 5% de significância.

Na Tabela 9, observa-se que tanto a equação proposta por Busscher (1990), empregada para ajustar a resistência à penetração, quanto a proposta por Silva et al. (1994), que ajusta a umidade volumétrica do solo, se mostram satisfatórias, visto que não apresentaram diferenças estatísticas com a aplicação do teste t para os três tratamentos. Com base nesta constatação pode-se estimar valores de  $\theta_v$  e Rp para os solos testados utilizando as equações da Tabela 9, sem que seja necessário a determinação em laboratório desses parâmetros.

As equações não lineares ajustadas para o conteúdo volumétrico de água no solo explicaram uma variabilidade entre 72, 87 e 91 % (R<sup>2</sup>), respectivamente para o SOR, SC 12 e SC 5 (Tabela 9). Porém, as equações não lineares ajustadas para a resistência à penetração explicaram de 53, 66 e 90% da variabilidade, respectivamente para SOR, SC12 e SC 5 anos.

Também é possível afirmar que a resistência à penetração (Rp) se relacionou positivamente com a densidade do solo (Ds) e negativamente com o conteúdo volumétrico de água ( $\theta_v$ ) para os três tratamentos, conforme as equações de ajuste (Tabela 9). Silva et al. (1994), Imhoff et al. (2001), Leão et

al. (2004) e Tormena et al. (1998, 1999 e 2007) também fizeram as mesmas observações.

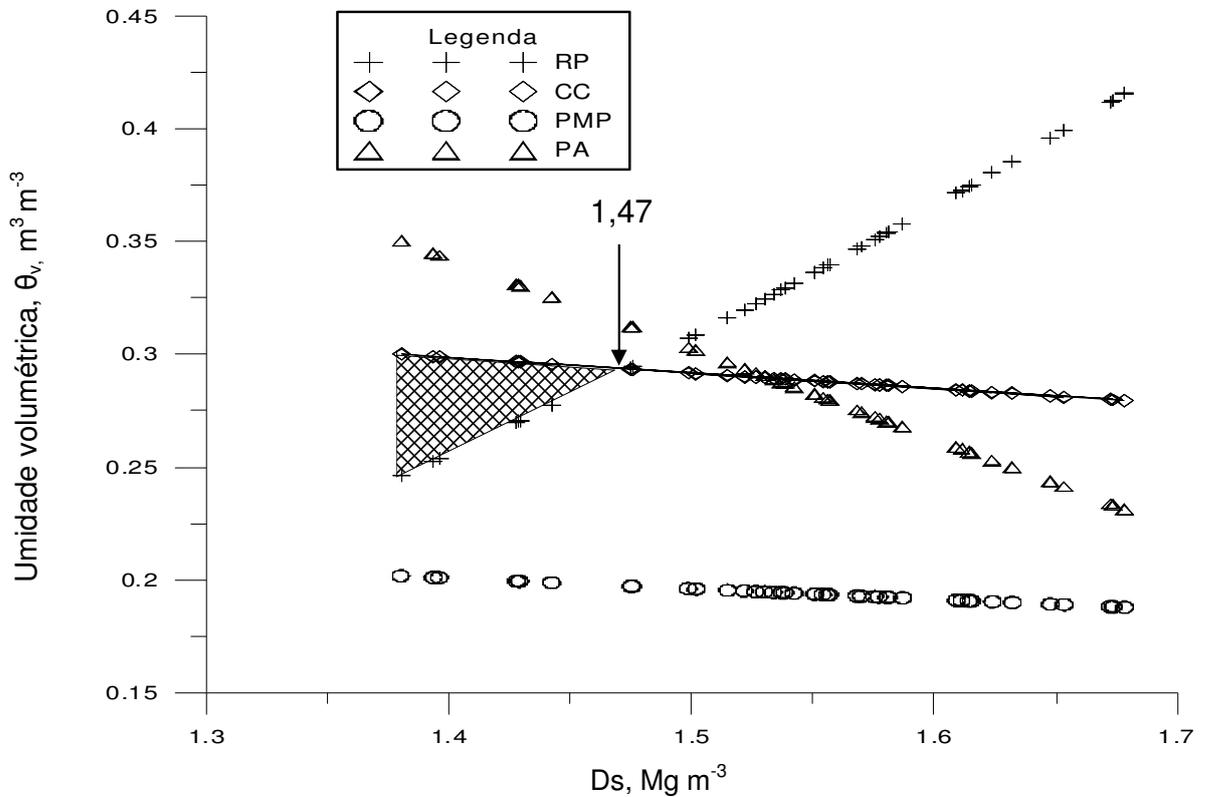
Tanto nos solos construídos quanto no solo original pode-se observar que o conteúdo volumétrico de água ( $\theta_v$ ) se relacionou negativamente com o potencial matricial de água no solo ( $\Psi_m$ ) (Tabela 9). Enquanto que, a densidade do solo se correlaciona positivamente para o SC 5 anos concordando com que foi observado por Betz et al. (1998) e Tormena et al. (1999, 2007). Já para os solos original e construído há 12 anos, o conteúdo volumétrico de água se correlacionou negativamente com a densidade do solo, mostrando que com o aumento da umidade ocorre a diminuição da densidade do solo (Tabela 9).

Para cada um dos solos avaliados foi determinado o intervalo hídrico ótimo (IHO), utilizando o conceito proposto por Silva & Kay (1996), que considera a faixa de conteúdo de água no solo definida no limite superior pela umidade do solo na capacidade de campo ( $\theta_{cc}$ ) na tensão de 0,01 MPa ou conteúdo de água em que a aeração do solo a 10% se torna limitante ( $\theta_{PA}$ ), e o limite inferior pelo conteúdo de água no ponto de murcha permanente ( $\theta_{PMP}$ ) na tensão de 1,5 MPa ou no conteúdo de água em que a resistência do solo à penetração de 3,5 MPa torna-se limitante ( $\theta_{Rp}$ ). Ou seja, a amplitude do conteúdo de água em que o solo apresenta qualidade física adequada ao crescimento radicular. Os pontos experimentais utilizados para construir os gráficos de IHO das Figuras 10, 11 e 12 estão apresentados nos Anexos 12, 13 e 14.

No solo original o limite inferior (LI) do IHO foi determinado pela  $\theta_{Rp}$  e o limite superior (LS) determinado pela  $\theta_{cc}$  (0,01 MPa), ambos em toda a extensão do IHO (Figura 10). Ou seja, da densidade mínima do solo ( $D_{s_{min}} = 1,38 \text{ Mg m}^{-3}$ ) à densidade crítica do solo ( $D_{s_{cr}} = 1,47 \text{ Mg m}^{-3}$ ), onde o IHO = 0

Também se observa que a densidade média do solo (Tabela 8) é maior que a densidade crítica do solo ( $D_s > D_{s_{cr}}$ ), podendo-se afirmar que mesmo com densidades baixas a resistência mecânica à penetração representa restrição física ao crescimento e desenvolvimento das raízes das plantas (Silva et al., 1994). Essas constatações foram observadas por Tormena et al. (1998, 1999), Beutler & Centurion (2004) e Leão et al. (2004), que trabalharam com solos tropicais. Esses trabalhos também tiveram o IHO limitado pelo conteúdo

de água na capacidade de campo ( $\theta_{0,01}$ ) no limite superior e a resistência do solo à penetração ( $\theta_{Rp}$ ) no limite inferior.

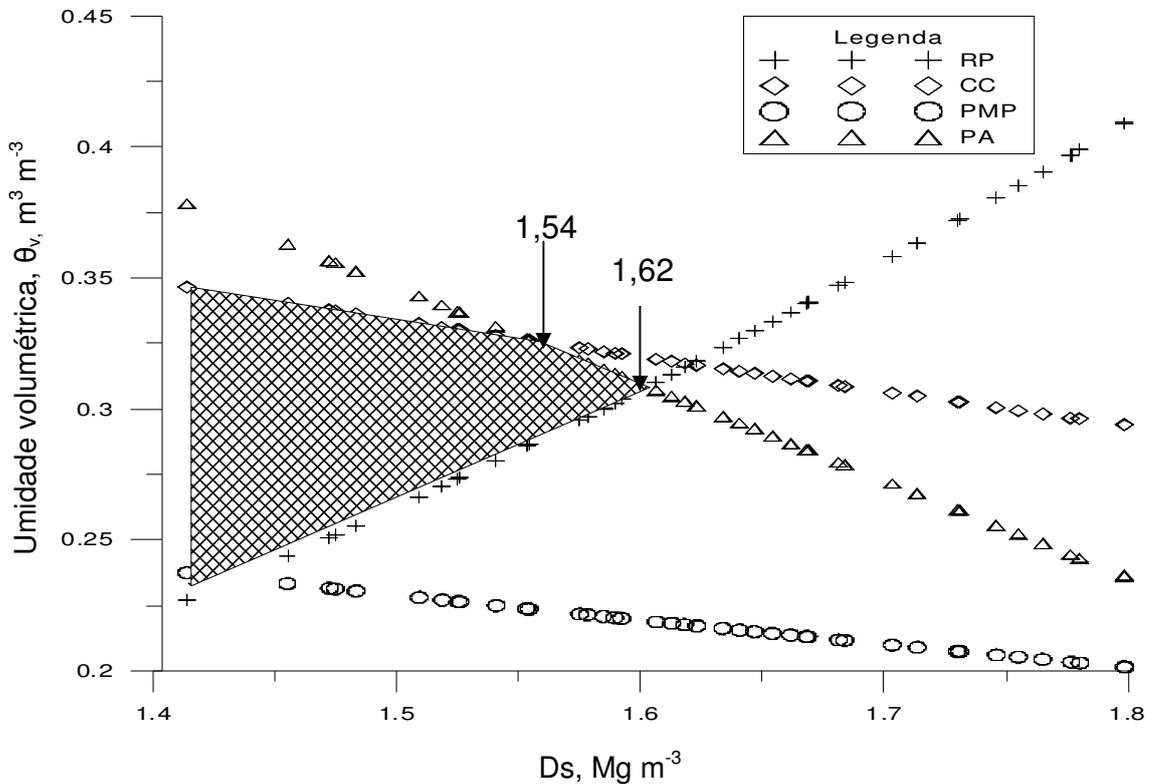


**Figura 10:** Variação do conteúdo de água com a densidade do solo nos níveis críticos da capacidade de campo (CC), ponto de murcha permanente (PMP), porosidade de aeração (PA) de 10% e resistência mecânica à penetração (Rp) de 3,5 MPa em solo original. O Intervalo Hídrico Ótimo do solo (IHO) está representado na área hachurada.

O solo construído há 12 anos (Figura 11) apresentou o limite inferior determinado pelo conteúdo de água no ponto de murcha permanente ( $\theta_{1,5}$ ) para a densidade de  $1,41 \text{ Mg m}^{-3}$ . A partir desse valor até a densidade crítica ( $Ds_{cr}$ ) de  $1,62 \text{ Mg m}^{-3}$  o limite inferior passa a ser considerado como limitante a  $\theta_{Rp}$ .

O limite superior para o SC 12 anos foi determinado pelo conteúdo de água na capacidade de campo ( $\theta_{0,01}$ ) para a Ds entre  $1,41$  à  $1,54 \text{ Mg m}^{-3}$  (Figura 11), e a partir desse ponto até a  $Ds_{cr}$  de  $1,62 \text{ Mg m}^{-3}$  o limite superior passa a ser limitado pela umidade na porosidade de aeração ( $\theta_{PA}$ ). Com base nessa análise, pode-se afirmar que o IHO está localizado entre as densidades de  $1,41$  a  $1,62 \text{ Mg m}^{-3}$ , estando a densidade do solo média de  $1,63 \text{ Mg m}^{-3}$  (Tabela 8) um pouco acima do valor de densidade crítica do solo.

Segundo Blainski et al. (2009) valores de  $D_s$  maiores que  $D_{s_{cr}}$  indicam que as condições físicas do solo são altamente restritivas ao crescimento e desenvolvimento das raízes das plantas, independentemente da umidade volumétrica de água ( $\theta_v$ ), por motivo da menor aeração ou pela maior resistência mecânica do solo à penetração, ou pela água disponível.

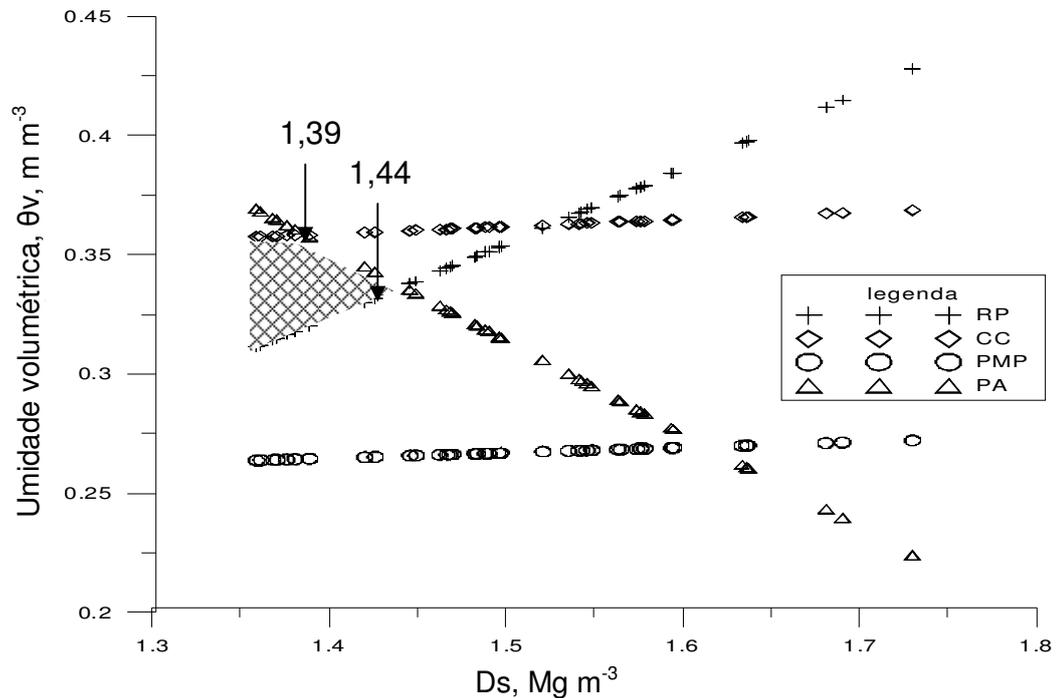


**Figura 11:** Variação do conteúdo de água com a densidade do solo nos níveis críticos da capacidade de campo (CC), ponto de murcha permanente (PMP), porosidade de aeração (PA) de 10% e resistência mecânica à penetração (Rp) de 3,5 MPa em solo construído há 12 anos. O Intervalo Hídrico Ótimo do solo (IHO) está representado na área hachurada.

O solo construído há 5 anos (Figura 12) apresentou o limite inferior determinado pela  $\theta_{Rp}$  em toda a extensão do IHO, entre a  $D_{s_{min}}$  de  $1,36 \text{ Mg m}^{-3}$  a  $1,44 \text{ Mg m}^{-3}$  ( $D_{s_{cr}}$ ). O limite superior foi determinado pelo conteúdo de água na capacidade de campo ( $\theta_{0,01}$ ) entre os valores de densidade de  $1,36$  à  $1,39 \text{ Mg m}^{-3}$ , e deste ponto até  $1,39 \text{ Mg m}^{-3}$  ( $D_{s_{cr}}$ ) o limite superior passou a ser limitado pelo  $\theta_{PA}$  (10%).

No SC 5 anos a densidade média do solo é de  $1,51 \text{ Mg m}^{-3}$  (Tabela 8), estando acima da densidade considerada crítica para este solo ( $D_s > D_{s_{cr}}$ ), o que indica que existem restrições das condições físicas para o crescimento e

desenvolvimento das raízes das plantas, conforme constado por (Silva et al., 1994).



**Figura 12:** Variação do conteúdo de água com a densidade do solo nos níveis críticos da capacidade de campo (CC), ponto de murcha permanente (PMP), porosidade de aeração (PA) de 10% e resistência mecânica à penetração (Rp) de 3,5 MPa em solo construído há 5. O Intervalo Hídrico Ótimo do solo (IHO) está representado na área hachurada.

Comportamento semelhante a este também foi observado no SC 12 anos para o limite superior de IHO (Figura 11). Entretanto, a Ds ( $1,54 \text{ Mg m}^{-3}$ ) que interseccionou a restrição de conteúdo de água no solo na capacidade de campo ( $\theta_{0,01}$ ) e conteúdo volumétrico de água na porosidade de aeração ( $\theta_{PA}$ ) nesse solo se apresentou maior que a do solo construído há 5 anos ( $1,39 \text{ Mg m}^{-3}$ ), mostrando que o SC 12 anos embora apresente densidades maiores que a do SC 5 anos, apresenta um maior IHO e menores restrições ao desenvolvimento de plantas.

Com base nas análises de cada comportamento dos tratamentos avaliados, o SC 12 anos apresentou o maior IHO, embora tenha o maior valor de Ds (Tabela 8) comparado com os outros solos.

O solo original (Figura 10) e o SC 5 anos (Figura 12) apresentaram os menores IHO, praticamente não se diferenciando. Porém, o limite crítico de Ds foi um pouco maior para o solo original, favorecendo um maior desenvolvimento de plantas no solo mesmo em densidades um pouco maiores.

Embora o SC 5 anos apresente a menor densidade média do solo ( $1,51 \text{ Mg m}^{-3}$ ) em relação aos demais tratamentos (Tabela 8), apresenta um maior coeficiente de variação (6,26 %), concordando com os altos valores de coeficiente de variação (CV) para os valores de Ds encontrados por Quiñones et al. (2008). Esses autores trabalharam com dois solos construídos de 2 e 24 anos da mina de carvão de Minas do Leão, RS, e obtiveram densidades médias de respectivamente  $2,04$  e  $1,90 \text{ Mg m}^{-3}$  e respectivos CV de 10,8 e 7,9%. Isso indica também que solos construídos com maior tempo de construção apresentam menor variabilidade da densidade do solo, concordando com os valores de CV encontrados para os dois solos construídos avaliados (Tabela 8).

Os resultados obtidos poderiam levar a rejeição da hipótese em que a qualidade física de um solo construído quantificado pelo IHO seria mais baixa que a do solo original. Essa hipótese se apresentava consistente, pois se sabe que os solos construídos têm sua estrutura degradada em função da atividade de lavra do carvão e recomposição topográfica do terreno. No entanto, essa degradação da estrutura do solo refletiu em menor IHO para o SC 5 anos. Essa diferença deve ter ocorrido em função do tempo de construção, em que solos com maior tempo de construção podem possuir uma maior evolução na estrutura do solo, concordando com a hipótese proposta neste trabalho. Também foi observado menor IHO para o solo original, em função que este solo deve ter sido submetido a atividades de agricultura, como também tráfego de máquinas e caminhões pesados os quais prejudicaram a estrutura do solo.

Dessa forma, rejeita-se a hipótese de melhor qualidade física do solo original em relação ao solo construído. Entretanto, com base no IHO pode-se afirmar que não é viável haver uma comparação entre os solos construídos e o solo original utilizando o IHO como indicador da qualidade física do solo. Porém, as comparações devem ser realizadas somente entre solos com a mesma formação estrutural, ou seja, de mesma natureza. Isso se explica pelo motivo que solos construídos têm suas unidades estruturais formadas pela ação antrópica, a partir de fragmentos de blocos compactados, enquanto que o solo original tem suas unidades estruturais formadas pedogeneticamente.

Assim, o SC 12 anos apresentou melhor qualidade física entre os solos construídos avaliados, ou seja, melhor condição para o desenvolvimento e crescimento das plantas e raízes (Figura 2), conforme pode ser comprovado

pelo grau de compactação (GC) (Tabela 10), que é a razão entre a densidade crítica ou real e a densidade de referência. Mesmo utilizando o limite crítico de resistência mecânica à penetração o valor de 3,5 MPa, conforme já utilizado por Tormena et al. (2007), leva-se a inferir que as plantas que se desenvolvem nesse solo devem ser altamente resistentes à compactação, suportar períodos de déficit hídrico e deficiência de oxigênio (Araújo et al., 2004).

**Tabela 10:** Grau de compactação (GC) para o solo original (SOR) e para os solos construídos há 12 anos (SC 12) e 5 anos (SC 5).

Solo	$D_{sc}$	$D_{ref}$	GC
	----- Mg m <sup>-3</sup> -----		----- % -----
<b>SOR</b>	1,55	1,47	105,4
<b>SC 12</b>	1,63	1,62	100,6
<b>SC 5</b>	1,51	1,44	104,9

$D_{sc}$ : densidade crítica do solo;  $D_{ref.}$  Densidade do solo em um estado de referência obtido em laboratório.

#### 4.7 Qualidade física com base na erodibilidade do solo em entressulcos e no intervalo hídrico ótimo

Com base nos resultados obtidos do fator erodibilidade do solo em entressulcos ( $K_i$ ) e intervalo hídrico ótimo (IHO), pode-se afirmar que estes dois parâmetros apresentaram concordância de resultados para o solo construído há 12 anos (SC 12). O SC 12 anos apresentou maior IHO (Figura 11) e também menor suscetibilidade em sofrer erosão em entressulcos (Tabela 6), com menor fator  $K_i$ . Essas avaliações estão de acordo com a avaliação realizada nas unidades estruturais, as quais apresentaram macroagregados estáveis em água (Tabela 4) e resistentes ao impacto da gota de chuva, propiciando uma melhor qualidade estrutural para o desenvolvimento de plantas e raízes (Figura 2), quando comparado com o solo construído há 5 anos (SC 5).

Estas constatações realizadas para o SC 12 anos estão relacionadas com a natureza e composição dos agregados não pedogenéticos, como também com o tempo de construção deste solo.

Entretanto, o SC 5 anos apresentou uma faixa pequena de (IHO) (Figura 12), representando baixa qualidade física do solo e valor do fator  $K_i$  menor que o do solo original (Tabela 6). Isso deve estar relacionado com os atributos físicos avaliados, que mostraram uma estrutura prejudicada em função das atividades de mineração, recomposição topográfica do solo e

provavelmente, falta de um acompanhamento e manejo eficaz, como também em função da natureza e composição dos agregados ou blocos não pedogenéticos, que se mostraram bastantes resistentes ao impacto da gota de chuva (Tabela 6).

Já com base no Intervalo Hídrico Ótimo (IHO) a baixa qualidade física encontrada para o solo original (Figura 10) concordou com os valores de  $K_i$  obtidos para o mesmo (Tabela 6). Isso provavelmente deve estar relacionado com a degradação ocorrida nesse solo quando era utilizado para atividades de agricultura, ou ainda pelo tráfico frequente de máquinas pesadas. No entanto, a natureza pedogenética dos agregados desse solo não possibilita uma adequada comparação com os solos construídos que apresentam agregados de natureza não pedogenética, originados da ação antrópica.

Desta forma, solos minerados que tenham sido adequadamente construídos, com a implantação de práticas de manejo adequadas e com um acompanhamento efetivo após a construção do mesmo poderão, a longo prazo, apresentar melhora significativa na estrutura dos solos, apresentando uma maior faixa de IHO e agregados não pedogênicos mais estáveis à ação da água. Isto resulta em um melhor desenvolvimento e crescimento de raízes das plantas, melhor qualidade da estrutura do solo, como também em menor suscetibilidade em sofrer erosão em entressulcos.

## 5 CONCLUSÕES

- Os solos construídos são constituídos de fragmentos de blocos compactados formados por ação antrópica, ou agregados não pedogênicos, os quais são mais densos e resistentes que os agregados de origem pedogenética que constituem as unidades estruturais do solo original;
- O solo construído há 12 anos é o que apresenta melhores condições estruturais em relação ao solo construído há 5 anos devido ao tempo de construção;
- O solo original e o solo construído há 12 anos apresentam agregados com índice de estabilidade (IEA) maior que o do solo construído há 5 anos;
- Os valores de desagregação ( $D_i$ ) e do fator de erodibilidade do solo em entressulcos ( $K_i$ ) obtidos em laboratório para os solos construídos há 12 anos e 5 anos não são diferentes entre si, mas são significativamente menores em relação aos obtidos para o solo original devido a diferente formação e composição das unidades estruturais desses solos;
- O modelo analítico de determinação indireta que melhor estima o fator de erodibilidade do solo em entressulcos ( $K_i$ ) para o solo original e o solo construído há 12 anos é o que considera o teor de argila e o de óxidos de ferro ( $Fe_o$ ). Nesses solos é o modelo que mais se aproxima aos resultados determinados em laboratórios, porém não é satisfatório para estimar o fator  $K_i$  para o solo construído há 5 anos;
- O modelo que utiliza o diâmetro médio ponderado dos agregados em água ( $DMP_A$ ), a diferença entre o pH em KCl e o pH em água ( $\Delta pH$ ) e o parâmetro textural “M” de Wischmeier, é o que melhor estima o valor do fator de erodibilidade do solo em entressulcos ( $K_i$ ) para o solo construído há 5 anos;

– O solo construído há 12 anos é o que apresenta a maior faixa de Intervalo Hídrico Ótimo (IHO), mesmo apresentando densidade média maior que a densidade crítica ( $D_s \text{ média} > D_{s_{cr}}$ ).

– A avaliação da qualidade física do solo pela utilização do fator de erodibilidade do solo em entressulcos ( $K_i$ ) e do Intervalo Hídrico Ótimo (IHO) entre solos construídos e solo original não é viável, pois apresentam naturezas diferentes em função da formação e constituição das suas unidades estruturais.

## 6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALBERTS, E. E. et al. Soil component. In: FLANAGAN, D. C.; NEARING, M. A. (Eds.). **Water erosion prediction project – WEPP**. West Lafayette: USDA, 1995. p.1- 47. (Report, 10).
- ALBUQUERQUE A. W. et al. Manejo da cobertura do solo e de práticas conservacionistas nas perdas de sob e água em Sumé, PB. **Rev. Bras. Eng. Agric. Amb.**, Campina Grande, v. 6, n. 1, p. 136-141, 2002.
- ALBUQUERQUE, J. A. **Suscetibilidade de alguns solos do Rio Grande do Sul à erosão em entressulcos**. 1998. 154 f. Tese (Doutorado) – Programa de Pós Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 1998.
- ALBUQUERQUE, J. A.; CASSOL, E. A.; REINERT, D. J. Relação entre a erodibilidade em entressulcos e estabilidade dos agregados. **Rev. Bras. Cienc. Solo**, Viçosa, v.24, p.141-151, 2000.
- ALLISON, F. E. Soil aggregation – some facts and fallacies as seen by a microbiologist. **Soil Sci.**, Baltimore, v. 106, n. 2, p. 136-143, 1968.
- ANDREWS, J. A. et al. Minesoil and site properties associated with early height growth of eastern white pine. **J. Envir. Qual.**, Madison, v. 27, p. 192-199, 1998.
- ARAÚJO, M. A.; TORMENA, C. A.; SILVA, A. P. Propriedades físicas de um Latossolo Vermelho distrófico cultivado sob mata nativa. **Rev. Bras. Cienc. Solo**, Viçosa, v. 28, p. 337-345, 2004.
- AZEVEDO, A. C.; BONUMÁ, A. S. Partículas coloidais, dispersão e agregação em Latossolos. **Cienc. Rural**, Santa Maria, v. 34, n. 2, p. 609-617, 2004.
- BARFIELD, B. J. et al. Compaction effects on erosion of mine spoil and reconstructed topsoil. **Trans. ASAE**, St. Joseph, v. 31, 447 – 452, 1988.
- BASTOS, R. S. et al. Formação e estabilização de agregados do solo influenciados por ciclos de umedecimento e secagem após adição de compostos orgânicos com diferentes características hidromórficas. **Rev. Bras. Cienc. Solo**, Viçosa, v. 29, p. 21-31, 2005.
- BAUMER, K.; BAKERMANS, W. A. P. Zerotillage. **Adv. Agronomy**, New York, v. 25, p.77-125, 1973.
- BAVER, L. D.; GARDNER, W. H.; GARDNER, W. R. **Soil physics**. New York, Joh Wiley, 1972. 498 p.

BELL, J. C.; CONNINGHAM R. L.; ANTONY, C. T. Morphological characteristics of reconstructed prime farmland soils in western Pennsylvania. **J. Envir. Qual.**, Madison, v. 23, p. 515-520, 1994.

BENGOUGH, A. G. et al. Root responses to soil physical conditions: Growth dynamics from field to cell. **J. Exper. Bot.**, Oxford, v. 57, n. 2, p. 437- 443, 2006.

BETZ, C. L. et al. Least limiting water range: traffic and long – term tillage influences in a webster soil. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, Madison, v. 62, p. 1384 – 1393, 1998.

BEUTLER, A. N.; CENTURION, J. F. Resistência à penetração em Latossolos: valor limitante à produtividade de arroz de sequeiro. **Cienc. Rural**, Santa Maria, v. 34, n. 6, p. 1793-1800, 2004.

BEUTLER, A. N. et al. Intervalo hídrico ótimo no monitoramento da compactação e da qualidade física de um Latossolo Vermelho cultivado com soja, **Rev. Bras. Cienc. Solo**, Viçosa, v. 3, p. 1223 – 1232, 2007.

BEUTLER, A. N. et al. Intervalo hídrico ótimo e produtividade de cultivares de soja. **Rev. Bras. Eng. Agric. Amb.**, Campina Grande, v. 10, n. 3, p. 639-645, 2006.

BEZERRA, S. A.; CANTALICE, J. R. B. Erosão entre sulcos em diferentes condições de cobertura do solo sob cultivo da cana-de-açúcar. **Rev. Bras. Cienc. Solo**, Viçosa, v. 30, p. 565-573, 2006.

BLAINSKI, E. et al. Intervalo hídrico ótimo num Latossolo Vermelho distroférico irrigado. **Rev. Bras. Cienc. Solo**, v. 33, p. 273-281, 2009.

BLAKE, G. R.; HARTGE, K. H. Physical and mineralogical methods. In: KLUTE, A. (Ed.). **Methods of soil analysis**. 2. ed. Madison, Wisconsin USA: Am. Soc. of Agronomy, Soil Sci. Soc. of Am., 1986. p. 363-382.

BRADY, N. C.; WEIL, R. R. **The nature and properties of soils**. 13. ed. New Jersey: Prentice Hall do Brasi, 2002. 960 p.

BRAIDA, J. A.; CASSOL, E. A. Erodibilidade em sulcos e em entressulcos de um Podzólico Vermelho-Escuro franco arenoso. **Rev. Bras. Cienc. Solo**, Campinas, v. 20, p. 127-134,1996.

BUGIN, A.; COSTA, J. F. C. L.; LAURENT, Jr. O. Controle ambiental na mineração de carvão: mina Butiá Leste. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CARVÃO, 2., 1989, Porto Alegre. **Resumos...** Porto Alegre, 1989. p. 708-726.

BUSSLER, B. H.; BYRNES, W. R.; POPE, P. E. Properties of minesoil reclaimed for forest land use. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, Madison, v. 48, p. 178-184, 1984.

BUSSCHER, W. J. Adjustment of flat-tipped penetrometer resistance data to a common water content. **Trans. ASAE**, St. Joseph, v. 33, p. 519-524, 1990.

CAMARGO, O. A.; ALLEONI, L. R. F. **Compactação do solo e o desenvolvimento das plantas**. Piracicaba: Esalq, 1997. 132 p.

CAMPOS, B. C. et al. Estabilidade estrutural de um Latossolo Vermelho-escuro distrófico após sete anos de rotação de culturas e sistemas de manejo do solo. **Rev. Bras. Cienc. Solo**, Campinas, v. 19, p. 121-126, 1995.

CANTALICE, J. R. B. **Escoamento e erosão em sulcos e em entressulcos em distintas condições de superfície do solo**. 2001. 140 f. Tese (Doutorado) – Programa de Pós Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 2001.

CASSOL, E. A.; LIMA, V. S. Erosão em entressulcos e em sulcos sob diferentes tipos de preparo do solo e manejo de resíduos culturais. **Pesqui. Agropecu. Bras.**, Brasília, v. 38, n. 1, p. 117-124, 2003.

CASSOL, E. A. et al. Escoamento superficial e desagregação do solo em entressulcos em solo franco – argilo - arenoso com resíduos vegetais. **Pesqui. Agropecu. Bras.**, Brasília, v. 39, p. 685-690, 2004.

CAVALIERI, K. M. V. et al. Efeitos de sistemas de preparo nas propriedades físicas de um Latossolo Vermelho Distrófico. **Rev. Bras. Cienc. Solo**, Viçosa, v. 30, p.137-147, 2006.

CHAVES, H. M. L.; SILVA P. A.; CARLOS, R. J. Aplicação da USLE e SGI na predição da erosão atual e potencial a nível regional. O caso do Vale do São Francisco. In: Congresso Brasileiro de Ciência do solo, 25., 1996, Viçosa, **Resumos...** Viçosa, 1996. p.1961-1963.

CHOW, V. T. **Open-channel hydraulics**. New York: McGraw-Hill, 1959. 680 p.

COLLARES, G. L. et al. Qualidade física do solo na produtividade da cultura do feijoeiro num Argissolo. **Pesqui. Agropecu. Bras.**, Brasília, v. 41, p. 1663 – 1674, 2006.

CRM - Companhia Riograndense de Mineração, Disponível em: <http://www.crm.rs.gov.br>. Acesso em: nov. 2009

D'AGOSTINI, L. R. **Variações Temporais da coesividade entre agregados de solo**. 1992. 82 f. Tese (Doutorado). Programa de Pós Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 1992.

DEXTER, A. R. Advances in characterization of soil structure. **Soil Tillage Res.**, Amsterdam, v. 11, p. 199 – 238, 1988.

DEXTER, A. R. Uniaxial compression of ideal brittle tilths. **J. Terramech**, Hannover, v. 12, p. 3-14, 1975.

DORAN, J. W.; PARKIN, R. B. **Defining soil quality**. In; DORAN, J. W.; COLEMAN, D. C.; BEZDICEK, D. F.; STEWART, B. A. (Eds.) *Defining soil quality for a sustainable environment*. Madison: ASA/CCSA/SSSA, 1994. p. 3-21. (SSSA Special, 35).

DUIKER, S. W.; FLANAGAN, D. C.; LAL, R. Erodibility and infiltration characteristics of five major soils of southwest Spain. **Catena**, Amsterdam, v. 45, p. 103-121, 2001.

- EDWARDS, A. P.; BREMER, J. M. Microagregates in soils. **J. Soil Sci.**, Malden, v. 18, p. 64-73, 1967.
- ELLISON, W. D. Soil erosion studies – part I. **Agricultural Eng.**, St. Joseph, v. 28, n. 4, p. 145-146, 1947a.
- ELLISON, W. D. Soil erosion studies – part II: soil detachment hazard by raindrop splash. **Agricultural Eng.**, St. Joseph, v. 28, n. 5, p. 197-201, 1947b.
- ELLISON, W. D. Soil erosion studies – part III: effects of soil erosion on infiltration and surface runoff. **Agricultural Eng.**, St. Joseph, v. 28, n. 6, p. 245-248, 1947c.
- ELLISON, W. D. Soil erosion studies – part IV: soil erosion, soil loss, and some effects of soil erosion. **Agricultural Eng.**, St. Joseph, v. 28, n. 7, p. 297-300, 1947d.
- ELLISON, W. D. Soil erosion studies – part V: soil transportation in splash process. **Agricultural Eng.**, St. Joseph, v. 28, n. 8, p. 349-351, 1947e.
- EMBRAPA, Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Sistemas de Produção, 3**. Bagé, RS: Embrapa Pecuária Sul, 2008. Disponível em: <http://sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br/FontesHTML/Leite/BovinoLeiteRegiaoSudoesteRioGrandeSul/aspectosecologicos.htm>. Acesso em: 09 fev. 2010.
- EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Manual de métodos de análise de solos**. 2. ed. rev. atual. Rio de Janeiro: EMBRAPA/CNPS, 1997. 212 p.
- EMBRAPA. Centro Nacional e Pesquisa em Solos. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. Brasília: Embrapa-SPI; Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2006. 306 p.
- FARENHORST, A.; BRYAN, R. B. Particle size distribution of sediment transported by shallow flow. **Catena**, Toronto, v. 25, p. 47- 62, 1995.
- FLANAGAN, D.; NEARING, M. A. United States Department of Agriculture–USDA: **Water erosion prediction project**. West Lafayette, National Soil Erosion Research Laboratory – NSERL, 1995. (Technical Documentation, 10).
- FLANAGAN, D.C. et al. Overview of the WEPP erosion prediction model. In: FLANAGAN, D. C.; NEARING, M. A. (Eds.). **Water erosion prediction project – WEPP: Technical Documentation**. West Lafayette: USDA-ARS-NSERL, 1995. (Report, 10).
- FOSTER, G. R. et al. Process of soil erosion by water. In: Follet, R. F.; Stewart, B. A. **Soil erosion and crop productivity**. Madison: ASA-CSSA-SSSA, 1985.
- FOSTER, G. R. **Modeling the erosion process**. In: HANN, C.T. (Ed.) Hydrologic modeling of small watersheds. St. Joseph: ASAE, 1982. p. 297-380. (Monograph, 5).
- FOSTER, G. R.; MEYER, L. D. Mathematical simulation of upland erosion by fundamental erosion mechanics. In: PROCEEDING SEDIMENT-YIELD WORKSHOP, 1972, Oxford. **Proceedings...** Washington: USDA, 1975. p.190-207.

FRANCO, A. M. P. **Caracterização física de um solo construído na área de mineração de carvão de Candiota – RS**. 2006. 120 f. Dissertação (Mestrado em Ciências). Programa de Pós-Graduação em Agronomia. Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, RS, 2006.

FREDDI, O. S. et al. Compactação do solo e intervalo hídrico ótimo no crescimento da parte aérea e produtividade da cultura do milho. **Irriga**, Botucatu, v. 13, n. 2, p. 272 – 287, 2008.

GAVIZZO, L. H. B. et al. Potencial poluidor de rejeitos carboníferos. II – Efeitos da recuperação com camadas de solo sobre as plantas e a poluição microbiana. **Cienc. Rural**, Santa Maria, v. 32, n. 6, p. 955-961, 2002.

GEE, G. W.; BAUDER, J. W. Particle size analysis. In: KLUTE, A. (Ed.). **Methods of Soil Analysis**. 2. ed. Madison: Am. Soc. of Agronomy, Soil Sci. Soc. of Am., 1986. p. 383-411.

GERITS, J. J. P.; LIMA, J. L. P. D.; BROEK, T. M. W. V. D. Overland flow and erosion. In: ANDERSON, M. G.; BURT, T. P. **Process studies in hillslope hydrology**. Chichester: J. Wiley; Sons, 1990. p.173-214.

GONÇALVES, F. C. **Efeito de plantas de cobertura sobre os atributos físicos de um solo construído na área de mineração de carvão de Candiota-RS após três anos**. 2008. 91 f. Dissertação (Mestrado em Ciência), Programa de Pós Graduação em Agronomia. Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas-RS, 2008. Disponível em: [http://www.ufpel.edu.br/tede/tde\\_busca/arquivo.php?codArquivo=412](http://www.ufpel.edu.br/tede/tde_busca/arquivo.php?codArquivo=412). Acesso em: 09 fev. 2010.

GRABLE, A. R.; SIEMER, E. G. Effects of bulk density, aggregate size, and soil water suction on oxygen diffusion, redox potential and elongation of corn roots. **Soil. Soc. Am. J.**, Madison, v. 32, p. 180-186, 1968.

GUADAGNIN, C. A.; PAULETTO, E. A.; PINTO, L. F. S. Taxa de infiltração estável da água ao longo de transeções em solos construídos na área de mineração de carvão de Candiota – RS. **Rev. Bras. Agrocência**, Pelotas, v. 13, n. 3, p. 337-342, 2007.

GUY, B. T. et al. Hydraulics of sediment-laden sheetflow and the influence of simulated rainfall. **Earth Surf. and Landforms**, New York, USA, v. 15, p. 101-118, 1990.

HAKANSSON, I.; VOORHEES, W. B. **Soil compaction**. In: LAL, R. et al. (Eds.) **Methods for assessment of soil degradation**. Boca Raton: CRS Press, 1998. p. 167-179.

IMHOFF, S. et al. Quantificação de pressões críticas para o crescimento das plantas. **Rev. Bras. Cienc. Solo**, Viçosa, v. 25, p. 11-18, 2001.

INDA JUNIOR, A. V.; KÄMPF, N. Variabilidade de goethita e hematita via dissolução redutiva em solos de região tropical e subtropical. **Rev. Bras. Cienc. Solo**, Viçosa, v. 29, n. 6, p. 851-866, 2005.

JULIEN, P. Y. **Erosion and sedimentation**. Melbourne: Cambridge University Press, 1995. 280 p.

KÄMPF, N.; SCHNEIDER, P.; GIASSON, E. Propriedades, pedogênese e classificação de solos construídos em áreas de mineração na bacia carbonífera do Baixo Jacuí-RS. **Rev. Bras. Cienc. Solo**, Campinas, v. 21, p. 79-88, 1997.

KÄMPF, N. et al. Solos construídos em áreas de mineração da bacia carbonífera do Baixo Jacuí. In: **Carvão e Meio Ambiente**. Centro de Ecologia da UFRGS. ed.: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre-RS, 2000, p. 596-640.

KATZ, D. M.; WATTS, F. J.; BURROUGHS, E. R. Effects of surface roughness and rainfall impact on overland flow. **J. Hidr. Am. Soc. Civil Eng.**, Reston, v. 121, p. 547- 553, 1995.

KAY, B. D.; ANGERS, D. A. Soil structure. In: SUMNER, M. E. (Ed). **Handbook of soil science**. Boca Raton: CRC Press, 1999. p. 229-276.

KAY, B. D.; SILVA A. P.; BALDOCK J. A. Sensivity of soil structure to changes in organic carbon content: predictions using pedotransfer functions. **Can. J. Soil Sci.**, Ottawa, v. 77, p. 655-667, 1997.

KEMPER, W. D.; CHEPIL, W. S. Size distribution of aggregates. In: BLACK, C. A.; EVANS, D. D.; WHITE, J. L. (Eds.). **Methods of soil analysis**. Madison: American Society of Agronomy, 1965. p. 499 - 510. (Agronomy Monogr., 9).

KEMPER, W. D.; ROSENAU, R. C. Aggregate stability and size distribution. In: KLUTE, A. (Ed.). **Methods of Soil Analysis**. 2. ed. Madison: American Society of Agronomy, Soil Science Society of America, 1986. p. 425-441.

KEMPER, W. D.; ROSENAU, R. C.; DEXTER, A. R. Cohesion development in disrupted soils as affect by clay and organic matter content and temperature. **Soil Sci. Am. J.**, Madison, v. 51, p. 860-867, 1987.

KINNELL, P. I. A. The effects of flow on sediment transport induced by raindrops impacting shallow flows. **Trans. ASAE**, St. Joseph, v. 34, p. 161-168, 1991.

KIEHL, E. J. **Manual de edafologia: relações solo-planta**. São Paulo: Ceres, 1979. 262 p.

KLEIN, V.; CAMARA, R. K. Rendimento da soja e intervalo hídrico ótimo em Latossolo Vermelho sob plantio direto escarificado. **Rev. Bras. Cienc. Solo**, Viçosa, v. 31, p. 221- 227, 2007.

KLEIN, V.; LIBARDI, P. L. Faixa de umidade menos limitante ao crescimento vegetal e sua relação com a densidade do solo ao longo do perfil de um Latossolo Roxo. **Cienc. Rural**, Santa Maria, v. 30, p. 959-961, 2000.

KOPEZINSKI, I. **Mineração e meio ambiente: considerações legais, principais impactos ambientais e seus processos modificadores**, Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2000, 103 p.

KUHN, N. J.; BRYAN, R. B. Drying, soil surface condition and interrill erosion on two Ontário soils. **Catena**, Amsterdam, v. 57, p. 113 -133, 2004.

LEÃO, T. P.; SILVA, A. P. A simplifield Excel Algorithm for estimating the least limiting water range of soil. **Sci. Agric.**, Piracicaba, v. 61, p. 649-654, 2004.

LEÃO, T. P. et al. Intervalo hídrico ótimo na avaliação de sistema de pastejo contínuo e rotacionado. **Rev. Bras. Cienc. Solo**, Viçosa, v. 28, p. 415 – 423, 2004.

LEGOUT, C.; LEGUÈDOIS, S.; LE BISSONNAIS, Y. Aggregate breakdown dynamics under rainfall compared with aggregate stability measurements. **European J. Soil Sci.**, Orléans, v. 56, p. 225-237, 2005.

LETEY, J. Relationship between soil physical properties and crop productions. **Adv. Soil. Sci.**, Georgetown, v. 1, p. 277-294, 1985.

LIEBENOW, A. M. et al. Interrill erodibility: collection and analysis of data from cropland soils. **Trans. ASAE**, St. Joseph, v. 33, p. 1882-1888, 1990.

MEHRA, O. P.; JACKSON, M. L. Iron oxide removal from soils and clays by a dithionite-citrate system buffered with sodium bicarbonate. **Clays Clay Miner.**, Ottawa, v. 7, p. 317-27, 1960.

MEYER, L. D.; FOSTER, G. R.; ROMKENS, M. J. M. Source of soil eroded by water from upland slopes. In: **Present and prospective technology for predicting sediment yields and sources**. Washington: USDA, 1975. p. 177-189.

MEYER, L. D.; HARMON, W. C. Multiple intensity rainfall simulator for erosion research on row sideslopes. **Trans. ASAE**, St. Joseph, v. 22, p. 100-103, 1979.

MEYER, L. D.; HARMON, W. C. Susceptibility of agricultural soils to interrill erosion. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, Madison, v. 48, p. 1152-1157, 1984.

MEYER, L. D.; WISCHMEIER, W. H. Mathematical simulation of the process of soil erosion by water. **Trans. ASAE**, St. Joseph, v. 12, n. 6, p. 754-758, 1969.

MIOLA, E. C. C. **Qualidade física de um solo construído e cultivado com diferentes plantas de cobertura na área de mineração de Candiota – RS**. 2010. 107 f. Dissertação (Mestrado em Ciências). Programa de Pós-Graduação em Agronomia. Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, RS, 2002.

NEARING, M. A. The mechanics of soil detachment by raindrops an runoff. **Eurasian Soil Sci.**, Amsterdam, v. 30, n. 5, p. 552-556, 1997.

NUNES, M. C. M.; CASSOL, E. A. Estimativa da erodibilidade em entressulcos de Latossolos do Rio Grande do Sul. **Rev. Bras. Cienc. Solo**, Viçosa, v. 32, p. 2839-2845, 2008.

NUNES, M. C. M. **Condições físicas de solos construídos na área de mineração de carvão de Candiota-RS**. 2002. 130 f. Dissertação (Mestrado em Ciências). Programa de Pós-Graduação em Agronomia. Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, RS, 2002.

NUNES, M. C. M. **Erosão Hídrica em Entressulcos de Latossolos do Rio Grande do Sul**, 2006. 160 f. Tese (Doutorado). Programa de Pós Graduação em Ciência do Solo. Faculdade de Agronomia - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 2006. Disponível em: <http://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/10669>. Acesso em: 10 fev. 2010.

- OADES, J. M. Soil organic matter and structural stability: mechanisms and implications for management. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 76, p. 319 – 337, 1984.
- OLIVEIRA, T. S. **Efeitos dos ciclos de umedecimento e secagem sobre propriedades físicas e químicas de quatro Latossolos brasileiros**. 1992. 102 f. Tese (Mestrado). Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 1992.
- ORELLANA, J. A.; PILATTI, M. A.; GRENÓN, D. A. Soil quality: an approach to physical state assessment. **J. Sustain. Agriculture**, New Jersey, v. 9, p.91-108, 1997.
- PALADINI, F. L. S.; MIELNICZUK, J. Distribuição de tamanho de agregados de um solo Podzólico Vermelho-escuro afetado por sistema de culturas. **Rev. Bras. Cienc. Solo**, Campinas, v. 15, p. 135-140, 1991.
- PALMEIRA, P. R. T., PAULETTO, E. A., TEIXEIRA, C. F. A., GOMES, A. da S., SILVA, J. B. Agregação de um Planossolo submetido a diferentes sistemas de cultivo. **Rev. Bras. Cienc. Solo**, Viçosa, v. 23, p. 189-195, 1999.
- PEDROTTI, A. et al. Sistemas de Cultivo de Arroz irrigado e a compactação de um Planossolo. **Pesqui. Agropecu. Bras.**, Brasília, v. 36, n. 4, p. 709-715, 2001.
- PINTO, L. F. S.; KÄMPF, N. Contaminação dos solos construídos. In: TEIXEIRA, E. C.; PIRES, M. J. R. (Coord.). **Meio ambiente e carvão**: impactos da exploração e utilização. Porto Alegre: FINEP/CAPES/PADCT/GTM/PUCRS/FEPAM, 2002. p. 69-92.
- PINTO, L. F. S. **Potencial de acidificação e de neutralização dos materiais geológicos para a composição do solo construído em área de mineração de carvão**. 1997. 186 f. Tese (Doutorado). Programa de Pós Graduação em Ciência do Solo. Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 1997.
- POTTER, K. N.; CARTER, F. S.; DOLL, E. C. Physical properties of constructed and undisturbed soils. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, Madison, v. 52, p. 1435-1438, 1988.
- QUINÕES, O. R. G. **Caracterização e Gênese de solos construídos após mineração de carvão na mina Boa Vista, Município de Minas do Leão, RS**. 2004. 107 f. Dissertação (Mestrado) Programa de Pós Graduação em Ciência do Solo. Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 2004.
- QUINÕES, O. R. G. et al. Características de solos construídos após mineração de carvão relacionadas ao processo de construção e à composição do material utilizado. **Cienc. Rural**, v. 38, n. 6, p. 1564-1571, 2008.
- REICHERT, J. M. et al. Erosão em sulcos e entressulcos em razão do formato de parcela em Argissolo Vermelho-Amarelo arênico. **Pesqui. Agropecu. Bras.**, Brasília, v. 36, n. 7, p. 965-973, 2001.
- REINERT, D. J. Recuperação de solos em sistemas agropastoris, curso sobre aspectos básicos de fertilidade e microbiologia do solo no sistema plantio direto. **Plantio Direto**, v. 4, p. 25-44, 1997.

RICHARD, G. et al. Field study of soil compaction due to traffic in Northern France: Pore space and morphological analysis of the compacted zones. **Soil & Tillage Res.**, Amsterdam, v. 51, p. 151-160, 1999.

ROCKENBACH, C. A **Erosão em entressulco sob diferentes coberturas por resíduos de trigo em um solo Podzólico Vermelho-Amarelo sob chuva simulada**. 1992. 108 f. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós Graduação em Ciência do Solo. Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 1992.

ROMKENS, M. J. M.; HELMING, K.; PRASAD, S. N. Soil erosion under different rainfall intensities, surface roughness, and soil water regimes. **Catena**, Amsterdam, v. 46, p. 103-123, 2001

RÖMKENS, M. J. M.; ROTH, C. B.; NELSON, D. W. Erodibility of select clay subsoils in relation to physical and chemical properties. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, Madison, v. 41, p. 954-960, 1977.

ROTH, C. H.; CASTRO FILHO, C.; MEDEIROS, G. B. Análise de fatores físicos e químicos relacionados com agregação de um Latossolo Roxo distrófico. **Rev. Bras. Cienc. Solo**, Campinas, v. 15, p. 241-248, 1991.

SANTOS, R. D. et al. **Manual de descrição coleta de solos no campo**. 5 ed. rev. e ampl. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo: UVF; [Rio de Janeiro]: Embrapa Solos: UFRRJ, 2005. 92 p.

SCHAFER, W. M.; NIELSEN, G. A.; NETTLETON, W. D. Minessoil genesis and morphology in a spoil chronosequence in Montana. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, Madison, v. 44, p. 802- 807, 1980.

SCHULTZE, J. P. S. **Recuperação de áreas mineradas**: estudo da mina de carvão de Candiota-RS. Seminário do Curso de Mestrado em Geologia. São Leopoldo: UNISINOS, 1998. 23 p.

SCHWERTMANN, U. **Differenzierung der eisen oxide des bodens durch extraktion unit saurer ammoniumoxalat-losung**. Z. Pflanzenernaehr: Bodenk, 1964. p.194-202.

SILVA, A. P.; IMHOFF, S.; KAY, K. Plant response to mechanical resistance and air-filled porosity of soils under conventional and no-tillage system. **Sci. Agric.**, Piracicaba, p. 451- 56, 2004.

SILVA, A. P.; KAY, B. D. The sensitivity of shoot growth of corn to the least limiting water range of soils. **Plant and Soil**, Holanda, v. 184, n. 2, p. 323-329, 1996.

SILVA, A. P.; KAY, B. D.; PERFECT, E. Characterization of the least limiting water range of soils. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, Madison, v. 58, p. 1775 – 1781, 1994.

SILVA, A. P. et al. Intervalo hídrico ótimo e sua importância para as plantas. In: **Tópicos em Ciência do Solo**, Viçosa, v. 6, p. 1-30, 2009.

SILVA, G. J.; MAIA, J. C. S.; BIANCHINI, A. Crescimento da parte aérea de plantas cultivadas em vaso, submetidas a irrigação subsuperficial e a diferentes

graus de compactação de um Latossolo Vermelho-Escuro distrófico. **Rev. Bras. Cienc. Solo**, Viçosa, v. 30, p. 31-40, 2006.

SILVA, I. F.; MIELNICZUK, J. Ação do Sistema radicular de plantas na formação e estabilização de agregados do solo. **Rev. Bras. Cienc. Solo**, Campinas, v. 21, p. 113-117, 1997.

SILVA, I. F. **Formação, estabilidade e qualidade de agregados do solo afetados pelo uso agrícola**. 1993. 126 f. Tese (Doutorado). Programa de Pós Graduação em Ciência do Solo. Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 1993.

SILVA, V. R. et al. Intervalo hídrico ótimo para três solos em sistema de plantio direto. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE MANEJO E CONSERVAÇÃO DO SOLO E DA ÁGUA, 14, 2002, Cuiabá. **Resumo...** Cuiabá: SBSCS, 2002. Disponível em: [http://w3.ufsm.br/ppgcs/congressos/XIV\\_Reuni%e3o\\_Brasileira\\_Cuiab%e1/11.pdf](http://w3.ufsm.br/ppgcs/congressos/XIV_Reuni%e3o_Brasileira_Cuiab%e1/11.pdf). Acesso em: 10 fev. 2010

SIMONS, D. B.; SENTURK, F. Sediment transport technology: water and sediment dynamics. In: **Water resources publications**. [Colorado]: [S.n.], 1992. 897 p.

SINGH, V. P. Analytical solutions of cinematic for erosion on a plane: II Rainfall of finite duration. **Adv. Water Res.**, New York, v. 6, p. 88-95, 1983.

SOANE, B. D.; OUWERKERK, C. **Soil compaction in crop production**. Amsterdam: Elsevier, 1994. 660 p.

SOUZA, M. D. **Infiltração de água em latossolo roxo distrófico submetido a diferentes manejos**. 1985. 131 f. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo. Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 1985.

SPOSITO, G. **The chemistry of soil**. New York: Oxford University Press, 1989. 277 p.

STAHL, P. D. et al. Topsoil stockpiling versus exposure to traffic: A case study on In situ Uranium wellfields. **Rest. Ecology**, Washington, v. 10, n. 1, p. 129-137, 2002.

TAYLOR, H. M.; ROBERSON, G. M.; PARKER, J. J. Soil strength-root penetration relations to coarse textured materials. **Soil Sci.**, Baltimore, v. 102, p. 18-22, 1966.

TAYLOR, S. A. Oxygen diffusion in porous media as a measure of soil aeration. **Soil Sci. Soc. Am. Proc.**, Madison, v. 14, p. 55 - 61, 1950.

TEDESCO, M. J. et al. **Análises de solo, plantas e outros materiais**. 2. ed. Porto Alegre: Departamento de Solos, Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS, 1995, 174 p. (Boletim Técnico).

TOPP, G. C. et al. Non limiting water range (NLWR): **An approach for assessing soil structure**. Ottawa: Agriculture and Agri-Food Canada, 1994. 36 p. (Technical report, 2 – Soil Quality Evaluation Program).

TORMENA, C. A. et al. Variação temporal do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Vermelho distroférico sob sistemas de plantio direto. **Rev. Bras. Cienc. Solo**, Viçosa, v. 31, p. 211- 219, 2007.

TORMENA, C. A.; SILVA, A. P.; LIBARDI, P. L. Caracterização do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo roxo sob plantio direto, **Rev. Bras. Cienc. Solo**, Viçosa, v. 22, p. 573-581, 1998.

TORMENA, C. A.; SILVA, A. P.; LIBARDI, P. L. Soil physical quality of a Brazilian Oxisol under two tillage systems using the least limiting water range approach. **Soil Tillage Res.**, Amsterdam, v. 52; p. 223-232, 1999.

TRUMAN, C. C.; BRADFORD, J. M. Laboratory determination of interrill soil erodibility. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, Madison, v. 59, p. 519-526, 1995.

UFV – Universidade Federal de Viçosa. **Sistema para análises estatísticas – SAEG**: versão 9. [Viçosa]: Fundação Arthur Bernardes, 2007.

VEIGA, M. da; CABEDA, M. S. V.; REICHERT, J. M. Erodibilidade em entressulcos de solos do Rio Grande do Sul. **Rev. Bras. Cienc. Solo**, Campinas, v. 17, n. 1, p. 289-298, 1993.

VEIHMEYER, V. J.; HENDRICKSON, A. H. Methods of measuring field capacity and wilting percentage of soils. **Soil Sci.**, Baltimore, v. 68, p. 75-94, 1949.

WILDING, L. P.; DREES, L. R. Spatial variability and pedology. In: WILDING, L. P., SMECK, N. E., HALL, G. F. (Eds.) **Pedogenesis and soil taxonomy**: 1. concepts and interactions. Amsterdam: Elsevier, 1983. p. 83-116.

WISCHMEIER, W. H.; MANNERING, J. V. Relation of soil properties to its erodibility. **Soil Sci. Soc. Am. Proceedings**, Madison, v. 33, p. 131-137, 1969.

WISCHMEIER, W. H.; SMITH, D. D. **Predicting rainfall erosion losses**: a guide to conservation planning. Washington: Department of Agriculture, 1978. (Agr. Handbook, 537)

WISCHMEIER, W. H.; JOHNSON, C. B.; CROSS, B. V. A soil erodibility nomograph for farmland and construction sites. **J. Soil Water Conserv.**, Akey, v. 26, p. 189-193, 1971.

WOOLHISER, D. A.; LIGGETT, J. A. Unsteady onedimensional flow over a plane – The rising hydrograph. **Water Res.**, New York, v. 3, p. 753-771, 1967.

YODER, R. E. A direct method of aggregate analysis of soils and a study of the physical nature of erosion losses. **J. Am. Soc. Agron.**, Madison, v. 28, p. 337-351, 1936.

## **ANEXOS**

**Anexo 1:** Argila dispersa em água (ADA) e distribuição de diâmetro das partículas primárias para o solo original (SOR), solo construído há 12 anos (SC 12) e solo construído há 5 anos (SC 5) em duas profundidades. Média de 2 repetições de laboratório.

Solo	Repetição	ADA	argila	silte	areia	AMF	AF	AM	AG	AMG
			mm							
			< 0,002	0,002 - 0,05	0,05 - 2,00	0,053 - 0,105	0,105 - 0,250	0,250 - 0,50	0,50 - 1,00	1,00 - 2,00
----- g kg <sup>-1</sup> -----										
<b>camada de 0,0 - 0,10 m</b>										
SOR	1	103,1	282,0	274,1	443,9	37,3	152,2	147,4	88,7	18,4
	2	102,0	263,9	269,0	467,2	40,1	158,3	147,4	97,9	23,4
	3	119,1	289,6	265,4	445,0	38,1	151,2	147,5	86,2	22,2
	<b>Média</b>	<b>108,0</b>	<b>278,5</b>	<b>269,5</b>	<b>452,0</b>	<b>38,5</b>	<b>153,9</b>	<b>147,4</b>	<b>90,9</b>	<b>21,3</b>
SC 12	1	181,6	343,7	181,2	475,1	14,8	212,2	185,2	42,3	20,6
	2	218,1	354,9	206,1	439,0	9,7	188,4	172,8	48,6	19,4
	3	184,3	325,1	206,8	468,2	24,4	219,8	157,6	47,8	18,6
	<b>Média</b>	<b>194,7</b>	<b>341,2</b>	<b>198,0</b>	<b>460,8</b>	<b>16,3</b>	<b>206,8</b>	<b>171,9</b>	<b>46,2</b>	<b>19,6</b>
SC 5	1	141,8	401,7	268,5	329,8	29,8	92,7	76,4	48,7	82,2
	2	116,0	415,3	259,6	325,1	36,7	107,3	90,1	41,4	49,7
	3	9,8	357,6	309,6	332,8	34,5	99,3	85,2	52,3	61,7
	<b>Média</b>	<b>89,2</b>	<b>391,5</b>	<b>279,2</b>	<b>329,3</b>	<b>33,7</b>	<b>99,8</b>	<b>83,9</b>	<b>47,4</b>	<b>64,5</b>
<b>camada de 0,10 - 0,20 m</b>										
SOR	1	114,5	296,5	267,1	436,5	31,8	155,7	140,1	89,6	19,3
	2	124,2	288,6	272,5	439,0	36,9	159,0	141,0	83,6	18,5
	3	136,4	333,0	266,7	400,4	31,6	145,4	128,0	75,3	20,0
	<b>Média</b>	<b>125,0</b>	<b>306,0</b>	<b>268,7</b>	<b>425,3</b>	<b>33,4</b>	<b>153,4</b>	<b>136,4</b>	<b>82,8</b>	<b>19,3</b>
SC 12	1	179,5	345,0	189,0	466,0	18,3	204,4	163,4	55,6	24,3
	2	210,0	333,6	202,3	464,2	8,0	171,5	205,1	56,1	23,5
	3	178,0	292,6	208,0	499,5	22,7	228,7	179,1	49,0	20,0
	<b>Média</b>	<b>189,2</b>	<b>323,7</b>	<b>199,7</b>	<b>476,6</b>	<b>16,3</b>	<b>201,5</b>	<b>182,6</b>	<b>53,6</b>	<b>22,6</b>
SC 5	1	132,4	417,9	259,5	322,6	31,2	94,7	83,8	47,9	65,0
	2	163,4	456,2	256,6	287,2	29,8	71,3	65,4	50,0	70,7
	3	9,9	465,4	293,5	241,1	23,7	68,5	59,3	39,4	50,2
	<b>Média</b>	<b>101,9</b>	<b>446,5</b>	<b>269,9</b>	<b>283,6</b>	<b>28,3</b>	<b>78,2</b>	<b>69,5</b>	<b>45,8</b>	<b>62,0</b>

Rep.: repetição de campo; AMF = areia muito fina; AF = areia fina; AM = areia média; AG = areia grossa; AMG = areia muito grossa.

**Anexo 2:** Valores de densidade de partícula (Dp), densidade do solo (Ds), macroporosidade (Mp), microporosidade (mp) e porosidade total (Pt) para o solo original (SOR), solo construído há 12 anos (SC 12) e solo construído há 5 anos (SC 5).

Solo	Rep	Dp* g cm <sup>-3</sup>	Ds** g cm <sup>-3</sup>	MP*** -----%-----	mp***	Pt***
<b>camada de 0,0 - 0,10 m</b>						
SOR	1	2,50	1,43	7,3	21,3	28,6
	2	2,55	1,58	7,6	29,4	37,0
	3	2,50	1,53	5,4	25,4	30,8
	<b>Média</b>	<b>2,52</b>	<b>1,51</b>	<b>6,8</b>	<b>25,4</b>	<b>32,2</b>
SC 12	1	2,69	1,52	14,0	27,4	41,3
	2	2,70	1,67	12,8	29,6	42,4
	3	2,73	1,63	11,2	30,3	41,5
	<b>Média</b>	<b>2,71</b>	<b>1,61</b>	<b>12,7</b>	<b>29,1</b>	<b>41,7</b>
SC 5	1	2,55	1,54	9,8	36,8	46,6
	2	2,61	1,52	10,2	35,8	46,0
	3	2,59	1,48	9,2	37,8	47,0
	<b>Média</b>	<b>2,58</b>	<b>1,51</b>	<b>9,8</b>	<b>36,8</b>	<b>46,5</b>
<b>camada de 0,10 - 0,20 m</b>						
SOR	1	2,35	1,56	7,3	31,1	38,4
	2	2,57	1,62	4,6	27,9	32,5
	3	2,56	1,55	9,5	31,2	40,7
	<b>Média</b>	<b>2,49</b>	<b>1,58</b>	<b>7,1</b>	<b>30,1</b>	<b>37,2</b>
SC 12	1	2,72	1,56	11,0	29,6	40,5
	2	2,70	1,67	14,4	30,8	45,2
	3	2,72	1,70	11,0	28,9	39,9
	<b>Média</b>	<b>2,71</b>	<b>1,64</b>	<b>12,1</b>	<b>29,8</b>	<b>41,9</b>
SC 5	1	2,59	1,56	11,2	36,5	47,7
	2	2,61	1,49	15,8	33,7	49,4
	3	2,35	1,48	12,4	37,8	50,2
	<b>Média</b>	<b>2,52</b>	<b>1,51</b>	<b>13,1</b>	<b>36,0</b>	<b>49,1</b>

Rep.: repetição de campo; \*média de 2 repetições de laboratório; \*\*média de 7 repetições de campo; \*\*\* só teve as três repetições de campo apresentada nessa tabela

**Anexo 3:** Características químicas para o solo original (SOR), solo construído há 12 anos (SC 12) e solo construído há 5 anos (SC 5) em duas profundidades. Média de duas repetições de laboratório.

Solo	Rep.	pH (H <sub>2</sub> O)	pH (KCl)	$\Delta$ pH	g Kg <sup>-1</sup>			CO
					Fe <sub>o</sub>	Fe <sub>d</sub>	Fe <sub>o</sub> /Fe <sub>d</sub>	
<b>camada de 0,0 - 0,1 m</b>								
SOR	1	4,86	3,98	-0,89	1,54	25,56	0,060	18,5
	2	4,66	3,80	-0,86	1,06	28,12	0,038	13,8
	3	4,65	3,82	-0,84	0,88	26,79	0,033	14,5
	<b>Média</b>	<b>4,72</b>	<b>3,87</b>	<b>-0,86</b>	<b>1,16</b>	<b>26,82</b>	<b>0,04</b>	<b>15,60</b>
SC 12	1	4,37	3,83	-0,54	4,32	21,70	0,199	10,1
	2	4,59	3,82	-0,78	4,40	23,97	0,183	9,0
	3	4,70	3,84	-0,87	4,32	22,01	0,196	9,8
	<b>Média</b>	<b>4,55</b>	<b>3,83</b>	<b>-0,73</b>	<b>4,35</b>	<b>22,56</b>	<b>0,19</b>	<b>9,65</b>
SC 5	1	5,92	5,14	-0,79	3,44	39,16	0,088	10,1
	2	5,50	4,86	-0,63	4,60	34,15	0,135	14,3
	3	5,84	4,84	-1,00	12,81	37,80	0,339	12,0
	<b>Média</b>	<b>5,75</b>	<b>4,95</b>	<b>-0,81</b>	<b>6,95</b>	<b>37,04</b>	<b>0,19</b>	<b>12,14</b>
<b>camada de 0,1 - 0,2 m</b>								
Original	1	4,73	3,82	-0,92	1,23	25,55	0,048	11,7
	2	4,67	3,85	-0,82	0,73	25,43	0,029	12,1
	3	4,70	3,79	-0,91	0,63	31,70	0,020	13,9
	<b>Média</b>	<b>4,70</b>	<b>3,82</b>	<b>-0,88</b>	<b>0,87</b>	<b>27,56</b>	<b>0,03</b>	<b>12,57</b>
SC 12	1	4,60	3,81	-0,79	4,63	22,61	0,205	9,9
	2	4,71	3,86	-0,85	3,54	24,30	0,146	9,9
	3	4,59	3,84	-0,75	4,26	23,21	0,183	8,2
	<b>Média</b>	<b>4,63</b>	<b>3,84</b>	<b>-0,80</b>	<b>4,14</b>	<b>23,38</b>	<b>0,18</b>	<b>9,33</b>
SC 5	1	5,26	4,47	-0,79	13,75	40,96	0,336	9,0
	2	4,23	3,62	-0,62	8,77	29,44	0,298	27,5
	3	3,20	2,76	-0,44	5,63	32,31	0,174	21,9
	<b>Média</b>	<b>4,23</b>	<b>3,62</b>	<b>-0,62</b>	<b>9,39</b>	<b>34,24</b>	<b>0,27</b>	<b>19,45</b>

Rep.: repetição de campo;  $\Delta$ pH = diferença entre pH em KCl e pH em água; Fe<sub>o</sub>: teor de ferro relativo aos óxidos de ferro de baixa cristalinidade extraído com oxalato amônio (Schwertmann, 1964); Fe<sub>d</sub>: teor de ferro relativo aos óxidos de ferro pedogênicos extraído com ditonito-citrato-bicarbonato (Mehra & Jackson, 1960 e Inda Junior & Kämpf, 2005); CO: carbono orgânico (Tedesco et al. 1995).

**Anexo 4:** Distribuição dos agregados estáveis em água em cada classe de diâmetro de tamanho da peneira, utilizando solo da camada de 0,0 a 0,2 m, conforme o princípio da metodologia descrita por Kemper & Rosenau (1986) modificado por Palmeira et al. (1999) para o solo original (SOR), solo construído há 12 anos (SC 12) e solo construído há 5 anos (SC 5).

Solo	Rep.	classes (mm)								DMP <sub>A</sub> mm
		10,0 - 4,76	4,76 - 2,00	2,00 - 1,00	1,00 - 0,5	0,50 - 0,25	0,25 - 0,105	0,105 - 0,053	<0,053	
SOR	1	26,53	16,02	15,66	14,10	12,07	1,96	8,92	4,75	2,90
	2	26,35	14,15	16,03	13,14	13,25	4,50	6,55	6,03	2,83
	3	28,09	16,73	17,76	15,45	12,71	3,62	5,65	4,55	3,08
	<b>Méd.</b>	<b>26,99</b>	<b>15,63</b>	<b>16,48</b>	<b>14,23</b>	<b>12,68</b>	<b>3,36</b>	<b>7,04</b>	<b>5,11</b>	<b>2,94</b>
SC 12	1	29,63	18,83	13,12	18,18	10,11	2,07	5,42	2,65	3,20
	2	35,24	12,38	14,06	18,27	9,22	2,57	4,08	4,17	3,41
	3	37,48	13,72	13,76	12,80	8,83	3,94	4,41	5,08	3,58
	<b>Méd.</b>	<b>34,11</b>	<b>14,98</b>	<b>13,65</b>	<b>16,42</b>	<b>9,38</b>	<b>2,86</b>	<b>4,64</b>	<b>3,97</b>	<b>3,40</b>
SC 5	1	8,27	14,50	17,61	19,50	14,42	13,24	6,38	6,07	1,60
	2	11,23	9,77	15,47	18,47	19,97	10,07	7,71	7,33	1,63
	3	11,49	13,19	16,56	18,66	18,23	9,90	6,89	5,07	1,77
	<b>Méd.</b>	<b>10,33</b>	<b>12,49</b>	<b>16,55</b>	<b>18,88</b>	<b>17,54</b>	<b>11,07</b>	<b>7,00</b>	<b>6,16</b>	<b>1,67</b>

Rep.: repetição de campo; Méd.: média das três repetições de laboratório; DMP<sub>A</sub>: diâmetro médio ponderado dos agregados estáveis em água.

**Anexo 5:** Distribuição dos agregados estáveis a seco em cada classe de diâmetro de tamanho da peneira, utilizando solo da camada de 0,0 – 0,20 m, conforme a metodologia descrita por Kemper & Rosenau (1986) modificado por Palmeira et al. (1999) para o solo original (SOR), solo construído há 12 anos (SC 12) e solo construído há 5 anos (SC 5).

Solo	Rep.	classes (mm)					DMP <sub>s</sub> mm
		10,0 - 4,76	4,76 - 2,00	2,00 - 1,00	1,00 - 0,5	< 0,50	
SOR	1	25,45	26,64	15,64	9,37	22,90	3,14
	2	24,71	25,76	18,97	10,07	20,48	3,11
	3	27,84	26,33	15,83	8,51	21,49	3,30
	<b>Méd.</b>	<b>26,00</b>	<b>26,24</b>	<b>16,82</b>	<b>9,32</b>	<b>21,62</b>	<b>3,18</b>
SC 12	1	40,94	18,74	10,67	9,03	20,62	3,93
	2	36,87	27,47	10,85	7,03	17,79	3,91
	3	37,35	21,81	12,12	7,92	20,80	3,79
	<b>Méd.</b>	<b>38,38</b>	<b>22,67</b>	<b>11,21</b>	<b>7,99</b>	<b>19,74</b>	<b>3,88</b>
SC 5	1	49,25	19,13	11,94	6,98	12,70	4,54
	2	44,17	17,63	11,47	8,96	17,77	4,14
	3	41,86	24,94	13,32	7,69	12,19	4,22
	<b>Méd.</b>	<b>45,09</b>	<b>20,57</b>	<b>12,24</b>	<b>7,87</b>	<b>14,22</b>	<b>4,30</b>

Rep.: repetição de campo; Med.: média das três repetições de laboratório; DMP<sub>s</sub>: diâmetro médio ponderado dos agregados estáveis a seco;

**Anexo 6:** Diâmetro médio ponderado a seco (DMP<sub>s</sub>) e a (úmido DPM<sub>A</sub>) e índice de estabilidade de agregados (IEA) para o solo original (SOR), solo construído há 12 anos (SC 12) e solo construído há 5 anos (SC 5). Média de 3 repetições.

Solo	Repetições	DPM <sub>A</sub> (mm)	DMP <sub>s</sub>	IEA
SOR	1	2,90	3,14	0,92
	2	2,83	3,11	
	3	3,08	3,30	
	<b>Média</b>	2,94	3,18	
SC 12	1	3,20	3,93	0,88
	2	3,41	3,91	
	3	3,58	3,79	
	<b>Média</b>	3,40	3,88	
SC 5	1	1,60	4,54	0,39
	2	1,63	4,14	
	3	1,77	4,22	
	<b>Média</b>	1,67	4,30	

**Anexo 7:** Características hidráulicas do escoamento superficial da água para o solo original (SOR), solo construído há 12 anos (SC 12) e solo construído há 5 anos (SC 5) sob declividade de  $0,09 \text{ m m}^{-1}$  e durante 90 minutos de chuva simulada.

Solo	Chuvas Rep.	$q_i$ $\text{m s}^{-1}$	$q$ $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$	$V_s$ $\text{m s}^{-1}$	$V_m$ $\text{m s}^{-1}$	$h$ $\text{m}$	$T$ $^{\circ}\text{C}$	$\nu$ $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$	$R_e$ ----adimensional----	$F_r$	$f$
		$\times 10^{-5}$	$\times 10^{-5}$			$\times 10^{-4}$		$\times 10^{-6}$			
SOR	1	2,24	1,21	0,057	0,038	3,18	24,5	0,91	13,4	0,68	1,55
	2	2,30	1,27	0,080	0,053	2,38	24,5	0,91	14,0	1,10	0,59
	3	2,27	1,51	0,056	0,037	4,06	20,0	1,00	15,1	0,59	2,06
	4	2,26	1,42	0,080	0,053	2,67	22,0	0,96	14,9	1,04	0,66
	<b>Média</b>	<b>2,27</b>	<b>1,35</b>	<b>0,068</b>	<b>0,046</b>	<b>3,07</b>	<b>22,8</b>	<b>0,95</b>	<b>14,3</b>	<b>0,85</b>	<b>1,21</b>
SC 12	1	2,35	1,49	0,070	0,047	3,19	19,0	1,03	14,5	0,83	1,03
	2	2,28	1,59	0,090	0,060	2,65	22,0	0,96	16,6	1,18	0,52
	3	2,31	1,51	0,100	0,067	2,27	22,0	0,96	15,8	1,41	0,36
	4	2,29	1,45	0,100	0,067	2,17	22,2	0,95	15,2	1,45	0,34
	<b>Média</b>	<b>2,31</b>	<b>1,51</b>	<b>0,09</b>	<b>0,06</b>	<b>2,57</b>	<b>21,3</b>	<b>0,98</b>	<b>15,5</b>	<b>1,22</b>	<b>0,56</b>
SC 5	1	2,24	1,51	0,067	0,044	3,39	25,0	0,90	16,8	0,77	1,21
	2	2,25	1,49	0,062	0,041	3,62	26,0	0,88	17,0	0,69	1,50
	3	2,32	1,49	0,062	0,041	3,62	25,0	0,90	16,6	0,69	1,50
	4	2,24	1,32	0,108	0,072	1,83	20,0	1,00	13,2	1,71	0,25
	<b>Média</b>	<b>2,26</b>	<b>1,45</b>	<b>0,075</b>	<b>0,050</b>	<b>3,12</b>	<b>24,0</b>	<b>0,92</b>	<b>15,9</b>	<b>0,97</b>	<b>1,11</b>

Rep.: repetições de laboratório;  $q_i$  = descarga unitária do escoamento superficial;  $q$  = descarga total do escoamento;  $V_s$  = velocidade do escoamento;  $V_m$  = velocidade média do escoamento ( $v^*2/3$ );  $h$  = altura da lâmina de água;  $T$  = temperatura da água;  $\nu$  = viscosidade cinemática da água;  $R_e$  = número de Reynolds;  $F_r$  = número de Froude;  $f$  = fator perda de carga.

**Anexo 8:** Taxa média e final de desagregação em entressulcos ( $D_i$ ), fator de erodibilidade do solo em entressulcos ( $K_i$ ) e descarga unitária do escoamento superficial ( $q_i$ ), sob declividade de  $0,09 \text{ m m}^{-1}$  e durante 90 minutos de chuva simulada para o solo original (SOR), solo construído há 12 anos (SC 12) e solo construído há 5 anos (SC 5).

Solo	Chuva Repetição	$D_i$ final $\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$	$K_i$ $\text{kg s m}^{-4}$	$q_i$ $\text{m s}^{-1}$
		$\times 10^{-4}$	$\times 10^6$	$\times 10^{-5}$
SOR	1	4,59	1,80	2,05
	2	3,65	1,43	2,15
	3	4,97	1,96	2,42
	4	5,34	2,10	2,35
	<b>Média</b>	<b>4,64</b>	<b>1,82</b>	<b>2,24</b>
SC 12	1	2,51	0,99	2,31
	2	2,49	0,98	2,41
	3	3,35	1,32	2,30
	4	2,12	0,83	2,28
	<b>Média</b>	<b>2,62</b>	<b>1,03</b>	<b>2,33</b>
SC 5	1	2,78	1,09	2,36
	2	2,59	1,02	2,23
	3	2,68	1,06	2,49
	4	2,30	0,91	2,33
	<b>Média</b>	<b>2,59</b>	<b>1,02</b>	<b>2,35</b>

**Anexo 9:** Densidade do solo ( $D_s$ ), Umidade gravimétrica, Conteúdo de água volumétrico ( $\theta_v$ ) e Resistência mecânica do solo à penetração ( $R_p$ ) para cada tensão aplicada no solo original.

Tensão MPa	$D_s$ $Mg\ m^{-3}$	$U_g$ $g\ g^{-1}$	$\theta$ $m^3\ m^{-3}$	$R_p$ MPa
1,5	1,48	0,156	0,231	3,13
1,5	1,52	0,111	0,169	3,90
1,5	1,43	0,155	0,222	4,60
1,5	1,59	0,132	0,209	7,30
1,5	1,61	0,127	0,205	6,95
1,5	1,50	0,169	0,253	7,57
<b>Média</b>	<b>1,52</b>	<b>0,142</b>	<b>0,215</b>	<b>5,58</b>
0,5	1,51	0,117	0,177	7,40
0,5	1,67	0,126	0,210	8,17
0,5	1,63	0,125	0,204	6,63
0,5	1,58	0,141	0,223	7,67
0,5	1,62	0,129	0,209	8,50
0,5	1,54	0,143	0,220	9,32
<b>Média</b>	<b>1,59</b>	<b>0,130</b>	<b>0,207</b>	<b>7,95</b>
0,1	1,40	0,167	0,233	4,35
0,1	1,58	0,122	0,192	5,24
0,1	1,43	0,170	0,244	3,69
0,1	1,55	0,155	0,240	5,34
0,1	1,65	0,139	0,230	6,00
0,1	1,53	0,141	0,216	6,63
<b>Média</b>	<b>1,52</b>	<b>0,149</b>	<b>0,226</b>	<b>5,21</b>
0,033	1,44	0,239	0,344	3,07
0,033	1,55	0,166	0,257	4,90
0,033	1,48	0,197	0,291	6,80
0,033	1,57	0,174	0,273	6,36
0,033	1,58	0,151	0,239	6,74
0,033	1,61	0,153	0,246	6,92
<b>Média</b>	<b>1,54</b>	<b>0,180</b>	<b>0,275</b>	<b>5,80</b>
0,01	1,38	0,199	0,274	1,60
0,01	1,53	0,164	0,250	3,79
0,01	1,61	0,175	0,281	3,41
0,01	1,55	0,200	0,311	3,60
0,01	1,56	0,200	0,311	3,46
0,01	1,58	0,154	0,243	3,50
<b>Média</b>	<b>1,54</b>	<b>0,182</b>	<b>0,278</b>	<b>3,23</b>
0,006	1,39	0,153	0,213	3,85
0,006	1,57	0,188	0,294	4,10
0,006	1,62	0,156	0,254	4,78
0,006	1,53	0,204	0,311	2,98
0,006	1,67	0,167	0,279	5,46
0,006	1,54	0,202	0,312	2,56
<b>Média</b>	<b>1,55</b>	<b>0,178</b>	<b>0,277</b>	<b>3,96</b>
0,001	1,43	0,284	0,406	1,25
0,001	1,65	0,207	0,341	4,02
0,001	1,50	0,247	0,372	2,37
0,001	1,54	0,226	0,348	2,33
0,001	1,68	0,217	0,364	3,32
0,001	1,56	0,234	0,364	2,16
<b>Média</b>	<b>1,56</b>	<b>0,236</b>	<b>0,366</b>	<b>2,58</b>

**Anexo 10:** Densidade do solo ( $D_s$ ), Umidade gravimétrica, Conteúdo de água volumétrico ( $\theta_v$ ) e Resistência mecânica do solo à penetração ( $R_p$ ) para cada tensão aplicada no solo construído há 12 anos .

Tensão MPa	$D_s$ $Mg\ m^{-3}$	$U_g$ $g\ g^{-1}$	$\theta$ $m^3\ m^{-3}$	$R_p$ MPa
1,5	1,51	0,133	0,201	4,67
1,5	1,66	0,145	0,241	12,61
1,5	1,52	0,165	0,251	6,36
1,5	1,62	0,143	0,232	7,75
1,5	1,65	0,123	0,204	10,96
1,5	1,59	0,138	0,220	8,99
<b>Média</b>	<b>1,59</b>	<b>0,141</b>	<b>0,225</b>	<b>8,56</b>
0,5	1,58	0,187	0,295	4,75
0,5	1,62	0,134	0,218	7,33
0,5	1,53	0,154	0,235	10,02
0,5	1,55	0,160	0,249	7,55
0,5	1,71	0,146	0,250	11,30
0,5	1,61	0,116	0,186	8,91
<b>Média</b>	<b>1,60</b>	<b>0,150</b>	<b>0,239</b>	<b>8,31</b>
0,1	1,54	0,137	0,211	6,02
0,1	1,58	0,147	0,233	7,41
0,1	1,67	0,140	0,234	7,96
0,1	1,47	0,167	0,246	6,42
0,1	1,67	0,169	0,282	7,56
0,1	1,78	0,141	0,251	7,56
<b>Média</b>	<b>1,62</b>	<b>0,150</b>	<b>0,243</b>	<b>7,16</b>
0,033	1,53	0,159	0,243	5,59
0,033	1,68	0,154	0,260	11,74
0,033	1,68	0,151	0,253	3,02
0,033	1,41	0,166	0,234	3,02
0,033	1,75	0,154	0,268	13,23
0,033	1,76	0,145	0,256	13,92
<b>Média</b>	<b>1,64</b>	<b>0,155</b>	<b>0,252</b>	<b>8,42</b>
0,01	1,46	0,184	0,268	1,56
0,01	1,62	0,181	0,293	2,48
0,01	1,64	0,176	0,289	4,47
0,01	1,47	0,192	0,284	1,87
0,01	1,61	0,176	0,284	4,27
0,01	1,63	0,175	0,286	4,39
<b>Média</b>	<b>1,57</b>	<b>0,181</b>	<b>0,284</b>	<b>3,17</b>
0,006	1,55	0,176	0,274	1,93
0,006	1,78	0,166	0,296	4,49
0,006	1,58	0,192	0,303	3,04
0,006	1,65	0,180	0,296	3,00
0,006	1,59	0,194	0,308	2,75
0,006	1,76	0,165	0,289	4,75
<b>Média</b>	<b>1,65</b>	<b>0,179</b>	<b>0,294</b>	<b>3,33</b>
0,001	1,48	0,252	0,375	0,91
0,001	1,73	0,205	0,356	2,37
0,001	1,80	0,214	0,386	2,77
0,001	1,70	0,240	0,409	1,40
0,001	1,73	0,213	0,369	2,74
0,001	1,80	0,202	0,363	2,79
<b>Média</b>	<b>1,71</b>	<b>0,221</b>	<b>0,376</b>	<b>2,16</b>

**Anexo 11:** Densidade do solo ( $D_s$ ), Umidade gravimétrica, Conteúdo de água volumétrico ( $\theta_v$ ) e Resistência mecânica do solo à penetração ( $R_p$ ) para cada tensão aplicada no solo construído há 5 anos.

Tensão MPa	$D_s$ $Mg\ m^{-3}$	$U_g$ $g\ g^{-1}$	$\theta$ $m^3\ m^{-3}$	$R_p$ MPa
1,5	1,55	0,202	0,313	4,2
1,5	1,69	0,190	0,284	6,44
1,5	1,59	0,160	0,254	8,67
1,5	1,68	0,183	0,308	7,45
1,5	1,42	0,194	0,276	9,07
1,5	1,48	0,203	0,301	5,83
<b>Média</b>	<b>1,57</b>	<b>0,189</b>	<b>0,289</b>	<b>6,94</b>
0,5	1,58	0,197	0,311	5,04
0,5	1,58	0,185	0,292	8,46
0,5	1,63	0,161	0,263	7,89
0,5	1,54	0,183	0,281	8,45
0,5	1,55	0,190	0,293	8,65
0,5	1,54	0,180	0,278	8,85
<b>Média</b>	<b>1,57</b>	<b>0,183</b>	<b>0,286</b>	<b>7,89</b>
0,1	1,64	0,166	0,272	3,125
0,1	1,43	0,188	0,269	3,62
0,1	1,47	0,176	0,258	2,63
0,1	1,58	0,177	0,278	4,51
0,1	1,37	0,205	0,280	2,93
0,1	1,47	0,180	0,280	3,72
<b>Média</b>	<b>1,49</b>	<b>0,182</b>	<b>0,273</b>	<b>3,42</b>
0,033	1,52	0,228	0,346	5,09
0,033	1,48	0,236	0,350	4,54
0,033	1,39	0,220	0,348	5,63
0,033	1,64	0,196	0,321	8,77
0,033	1,54	0,230	0,355	5,39
0,033	1,56	0,210	0,328	7,68
<b>Média</b>	<b>1,52</b>	<b>0,220</b>	<b>0,341</b>	<b>6,18</b>
0,01	1,36	0,274	0,373	1,86
0,01	1,50	0,263	0,393	2,48
0,01	1,38	0,279	0,385	1,07
0,01	1,50	0,258	0,386	2,4
0,01	1,45	0,251	0,363	2,57
0,01	1,36	0,299	0,407	2,89
<b>Média</b>	<b>1,42</b>	<b>0,271</b>	<b>0,384</b>	<b>2,21</b>
0,006	1,57	0,234	0,368	2,36
0,006	1,47	0,244	0,358	2,29
0,006	1,49	0,254	0,378	1,19
0,006	1,45	0,252	0,365	1,71
0,006	1,37	0,246	0,337	2,56
0,006	1,50	0,253	0,378	1,88
<b>Média</b>	<b>1,47</b>	<b>0,247</b>	<b>0,364</b>	<b>2,00</b>
0,001	1,59	0,263	0,419	2,46
0,001	1,49	0,269	0,401	1,96
0,001	1,38	0,313	0,431	2,21
0,001	1,57	0,259	0,405	1,32
0,001	1,73	0,264	0,457	1,45
0,001	1,46	0,271	0,396	1,53
<b>Média</b>	<b>1,54</b>	<b>0,273</b>	<b>0,418</b>	<b>1,82</b>

**Anexo 12:** Conteúdo de água no solo com a densidade do solo ( $D_s$ ) nos limites críticos da capacidade de campo (CC), ponto de murcha permanente (PMP), porosidade de aeração de 10% (PA) e resistência mecânica à penetração de 3,5 MPa ( $R_p$ ) para o solo original.

$\Psi$ MPa	$D_s$ $g\ cm^{-3}$	$\theta_{Rp}$	$\theta_{CC}$	$\theta_{PMP}$		$\theta_{PA}$
				$m^3\ m^{-3}$	$m^3\ m^{-3}$	
0,001	1,43	0,270	0,297	0,199		0,331
0,006	1,39	0,253	0,299	0,201		0,345
0,01	1,38	0,246	0,300	0,202		0,350
0,033	1,44	0,277	0,296	0,199		0,325
0,1	1,40	0,254	0,299	0,201		0,344
0,5	1,51	0,316	0,291	0,195		0,297
1,5	1,48	0,294	0,293	0,197		0,312
0,001	1,65	0,396	0,282	0,189		0,244
0,006	1,57	0,347	0,287	0,193		0,275
0,01	1,53	0,324	0,290	0,195		0,291
0,033	1,55	0,336	0,288	0,194		0,282
0,1	1,58	0,352	0,286	0,192		0,272
0,5	1,67	0,412	0,280	0,188		0,233
1,5	1,52	0,320	0,290	0,195		0,294
0,001	1,50	0,309	0,292	0,196		0,302
0,006	1,62	0,381	0,283	0,190		0,253
0,01	1,61	0,373	0,284	0,191		0,258
0,033	1,48	0,294	0,293	0,197		0,312
0,1	1,43	0,270	0,297	0,199		0,331
0,5	1,63	0,386	0,283	0,190		0,250
1,5	1,43	0,270	0,297	0,199		0,331
0,001	1,54	0,329	0,289	0,194		0,287
0,006	1,53	0,322	0,290	0,195		0,292
0,01	1,55	0,338	0,288	0,194		0,281
0,033	1,57	0,348	0,287	0,193		0,275
0,1	1,55	0,336	0,288	0,194		0,282
0,5	1,58	0,351	0,286	0,193		0,272
1,5	1,59	0,358	0,286	0,192		0,268
0,001	1,68	0,416	0,279	0,188		0,231
0,006	1,67	0,412	0,280	0,188		0,234
0,01	1,56	0,339	0,288	0,193		0,280
0,033	1,58	0,354	0,286	0,192		0,270
0,1	1,65	0,399	0,281	0,189		0,241
0,5	1,62	0,375	0,284	0,191		0,256
1,5	1,61	0,374	0,284	0,191		0,257
0,001	1,56	0,340	0,288	0,193		0,280
0,006	1,54	0,331	0,289	0,194		0,286
0,01	1,58	0,354	0,286	0,192		0,270
0,033	1,61	0,371	0,284	0,191		0,259
0,1	1,53	0,327	0,289	0,194		0,289
0,5	1,54	0,328	0,289	0,194		0,288
1,5	1,50	0,307	0,292	0,196		0,303

**Anexo 13:** Conteúdo de água no solo com a densidade do solo (Ds) nos limites críticos da capacidade de campo (CC), ponto de murcha permanente (PMP), porosidade de aeração de 10% (PA) e resistência mecânica à penetração de 3,5 MPa (Rp) para o solo construído há 12 anos .

$\Psi$ MPa	Ds g cm <sup>-3</sup>	$\theta_{Rp}$	$m^3 m^{-3}$		
			$\theta_{CC}$	$\theta_{PMP}$	$\theta_{PA}$
0,001	1,48	0,255	0,336	0,230	0,353
0,006	1,55	0,286	0,326	0,224	0,326
0,01	1,46	0,244	0,340	0,233	0,363
0,033	1,53	0,274	0,330	0,226	0,337
0,1	1,54	0,280	0,328	0,225	0,331
0,5	1,58	0,296	0,323	0,222	0,319
1,5	1,51	0,266	0,332	0,228	0,343
0,001	1,73	0,372	0,302	0,207	0,261
0,006	1,78	0,399	0,296	0,203	0,243
0,01	1,62	0,316	0,317	0,218	0,303
0,033	1,68	0,348	0,309	0,212	0,279
0,1	1,58	0,300	0,322	0,221	0,315
0,5	1,62	0,318	0,317	0,217	0,301
1,5	1,66	0,337	0,312	0,214	0,287
0,001	1,80	0,409	0,294	0,201	0,236
0,006	1,58	0,297	0,323	0,221	0,318
0,01	1,64	0,327	0,314	0,216	0,295
0,033	1,68	0,347	0,309	0,212	0,280
0,1	1,67	0,340	0,311	0,213	0,285
0,5	1,53	0,273	0,330	0,226	0,337
1,5	1,52	0,270	0,331	0,227	0,340
0,001	1,70	0,358	0,306	0,210	0,272
0,006	1,65	0,330	0,314	0,215	0,292
0,01	1,47	0,252	0,337	0,231	0,356
0,033	1,41	0,227	0,346	0,237	0,378
0,1	1,47	0,251	0,338	0,232	0,357
0,5	1,55	0,286	0,326	0,224	0,327
1,5	1,62	0,318	0,317	0,217	0,301
0,001	1,73	0,372	0,303	0,207	0,262
0,006	1,59	0,302	0,321	0,220	0,314
0,01	1,61	0,313	0,318	0,218	0,305
0,033	1,75	0,380	0,300	0,206	0,256
0,1	1,67	0,340	0,311	0,213	0,284
0,5	1,71	0,363	0,305	0,209	0,268
1,5	1,65	0,333	0,313	0,214	0,290
0,001	1,80	0,409	0,294	0,201	0,236
0,006	1,76	0,385	0,299	0,205	0,252
0,01	1,63	0,323	0,315	0,216	0,297
0,033	1,76	0,391	0,298	0,204	0,249
0,1	1,78	0,397	0,297	0,203	0,244
0,5	1,61	0,310	0,319	0,219	0,307
1,5	1,59	0,304	0,321	0,220	0,312

**Anexo 14:** Conteúdo de água no solo com a densidade do solo ( $D_s$ ) nos limites críticos da capacidade de campo (CC), ponto de murcha permanente (PMP), porosidade de aeração de 10% (PA) e resistência mecânica à penetração de 3,5 MPa ( $R_p$ ) para o solo construído há 5 anos .

$\Psi$ MPa	$D_s$ $g\ cm^{-3}$	$\theta_{R_p}$	$\theta_{CC}$ $m^3\ m^{-3}$		$\theta_{PMP}$	$\theta_{PA}$
0,001	2,46	0,384	0,365	0,269	0,277	
0,006	2,36	0,378	0,364	0,269	0,285	
0,01	1,86	0,311	0,358	0,264	0,369	
0,033	5,09	0,361	0,362	0,267	0,306	
0,1	3,125	0,397	0,366	0,270	0,261	
0,5	5,04	0,378	0,364	0,269	0,284	
1,5	4,2	0,370	0,363	0,268	0,295	
0,001	1,96	0,351	0,361	0,267	0,318	
0,006	2,29	0,345	0,361	0,266	0,326	
0,01	2,48	0,353	0,362	0,267	0,316	
0,033	4,54	0,349	0,361	0,267	0,321	
0,1	3,62	0,332	0,360	0,265	0,343	
0,5	8,46	0,379	0,364	0,269	0,283	
1,5	6,44	0,415	0,368	0,271	0,240	
0,001	2,21	0,316	0,358	0,264	0,363	
0,006	1,19	0,351	0,361	0,267	0,319	
0,01	1,07	0,318	0,358	0,264	0,361	
0,033	5,63	0,320	0,358	0,264	0,357	
0,1	2,63	0,344	0,361	0,266	0,327	
0,5	7,89	0,397	0,366	0,270	0,262	
1,5	8,67	0,384	0,365	0,269	0,277	
0,001	1,32	0,375	0,364	0,268	0,289	
0,006	1,71	0,339	0,360	0,266	0,334	
0,01	2,4	0,354	0,362	0,267	0,315	
0,033	8,77	0,398	0,366	0,270	0,261	
0,1	4,51	0,378	0,364	0,269	0,284	
0,5	8,45	0,366	0,363	0,268	0,300	
1,5	7,45	0,412	0,367	0,271	0,243	
0,001	1,45	0,428	0,369	0,272	0,224	
0,006	2,56	0,314	0,358	0,264	0,365	
0,01	2,57	0,338	0,360	0,266	0,335	
0,033	5,39	0,367	0,363	0,268	0,298	
0,1	2,93	0,315	0,358	0,264	0,365	
0,5	8,65	0,369	0,363	0,268	0,296	
1,5	9,07	0,330	0,359	0,265	0,345	
0,001	1,53	0,343	0,361	0,266	0,329	
0,006	1,88	0,353	0,362	0,267	0,315	
0,01	2,89	0,312	0,358	0,264	0,368	
0,033	7,68	0,374	0,364	0,268	0,289	
0,1	3,72	0,345	0,361	0,266	0,326	
0,5	8,85	0,368	0,363	0,268	0,297	
1,5	5,83	0,350	0,361	0,267	0,320	