

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PELOTAS**  
**Programa de Pós-Graduação em Agronomia**  
**Área de Concentração: Solos**



**Dissertação**

**Avaliação temporal de atributos físicos de um solo  
construído em área de mineração de carvão recuperado  
com gramíneas perenes**

**Rafaela Costa de Castro**

**Pelotas, 2012**

**RAFAELA COSTA DE CASTRO**

**AVALIAÇÃO TEMPORAL DE ATRIBUTOS FÍSICOS DE UM SOLO  
CONSTRUÍDO EM ÁREA DE MINERAÇÃO DE CARVÃO  
RECUPERADO COM GRAMÍNEAS PERENES**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia da Universidade Federal de Pelotas, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Ciências (área de concentração: Solos).

**Orientador:** Professor Dr. Eloy Antonio Pauletto

**Co-orientador:** Professor Dra. Flavia Fontana Fernandes

Pelotas, 2012

**Dados de catalogação na fonte:**  
**( Marlene Cravo Castillo – CRB-10/744 )**

C355a Castro, Rafaela Costa de

Avaliação temporal de atributos físicos de um solo construído em área de mineração de carvão recuperado com gramíneas peregrinas / Rafaela Costa de Castro ; orientador Eloy Antonio Pauletto; co-orientador Flavia Fontana Fernandes. Pelotas,2012.-99f. : il..- Dissertação (Mestrado em Solos ) –Programa de Pós-Graduação em Agronomia. Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel . Universidade Federal de Pelotas. Pelotas, 2012.

1.Densidade do solo 2.Porosidade total 3.Agregação  
4.Plantas de cobertura. I.Pauletto, Eloy Antonio(orientador) II.  
Título.

CDD 631.42

**Banca examinadora:**

Prof. Dr. Eloy Antonio Pauletto (Orientador)  
Faculdade de Agronomia “Eliseu Maciel” - UFPel

Prof. Dr. Marcelo Peske Hartwig  
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Sul-Rio-Grandense.

Pesquisador Dr. Adilson Luís Bamberg  
Embrapa Clima Temperado

Prof. Dr. Luiz Fernando Spinelli Pinto  
Faculdade de Agronomia “Eliseu Maciel” – UFPel

## **AGRADECIMENTOS**

Ao Prof. Dr. Eloy Antonio Pauletto, pela sua orientação, compreensão, dedicação, empenho e acima de tudo exigência. Ressalto o agradecimento pela orientação de um profissional extremamente competente, que deixará sua sabedoria de docente como exemplo para todos os seus alunos.

À Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Flávia Fontana Fernandes pela sua co-orientação, proporcionando discussões e sugestões valiosas. Estendo o agradecimento ao aprendizado adquirido não somente com a elaboração da dissertação, mas também pelas oportunidades as quais me proporcionou e pelas lições de vida durante a minha formação como Eng<sup>a</sup>. Agrônoma.

A Doutoranda Lizete Stumpf gostaria de agradecer por tudo, mas me faltam palavras para expressar a minha gratidão. Agradeço, portanto por toda ajuda proporcionada e conhecimento compartilhado.

Em especial a estas três pessoas citadas anteriormente dedico as palavras de Charles Chaplin:

“Cada pessoa que passa em nossa vida, passa sozinha, é porque cada pessoa é única e nenhuma substitui a outra! Cada pessoa que passa em nossa vida passa sozinha e não nos deixa só porque deixa um pouco de si e leva um pouquinho de nós. Essa é a mais bela responsabilidade da vida e a prova de que as pessoas não se encontram por acaso”.

Aos professores do curso de pós-graduação em Agronomia na área de concentração em Solos, os quais colaboraram para o meu crescimento profissional.

Aos estagiários e funcionários do laboratório de física do solo pela ajuda na determinação das análises.

Aos colegas de mestrado pelo companheirismo e ajuda mútua.

A Universidade Federal de Pelotas - UFPEL e a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES pela oportunidade de crescimento profissional.

Ao CNPq – Projeto Rede Carvão – e à Companhia Riograndense de Mineração (CRM) pelo apoio financeiro e cedência da área experimental.

A todas as pessoas que direta ou indiretamente colaboraram para a elaboração desta dissertação de mestrado.

## Resumo

CASTRO, Rafaela Costa. **Avaliação temporal de atributos físicos de um solo construído em área de mineração de carvão recuperado com gramíneas perenes.** 2012. 99 p. Dissertação - Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Área de Concentração: Solos. Universidade Federal de Pelotas, Pelotas - Brasil.

A Região de Candiota concentra a maior reserva carbonífera brasileira, conhecida como a jazida Grande Candiota. Nesta localidade o carvão encontra-se próximo à superfície, sendo minerado a céu aberto. Este método de lavra envolve a retirada dos horizontes A e/ou B do solo original, seguida de remoção das rochas, com posterior reposição dos estéreis nas cavas abertas. Os estéreis são nivelados por trator de esteira e há a reposição da camada superficial do solo original, finalizando o processo de construção do solo. Este processo acarreta em uma grande compactação, gerada pelo tráfego intenso e repetido de equipamentos pesados sobre a área, podendo restringir o estabelecimento da vegetação por longos períodos. Os impactos causados pela recomposição topográfica da área refletem-se nos atributos físicos do solo construído, estando diretamente relacionados à estrutura, sendo os primeiros efeitos negativos a serem observados os valores de densidade elevados e a desproporcionalidade entre micro e macroporos. O uso de plantas que atuam como descompactadoras do solo constitui-se importante estratégia na recuperação da qualidade estrutural de solo. Tendo em vista o exposto, o objetivo geral do trabalho foi analisar o potencial de diferentes plantas de cobertura na recuperação de áreas degradadas pela mineração de carvão, através da determinação de parâmetros físicos do solo construído, ao longo do tempo. Foram analisados os tratamentos com gramíneas perenes de verão, implantadas em novembro/dezembro de 2003: T1 - Hemártria (*Hemarthria altissima*), T4 - Pensacola (*Paspalum notatum*), T5 - Grama Tifton (*Cynodon dactylon*), T7- Braquiária brizanta (*Brachiaria brizantha*). Como testemunha usou-se o solo construído sem plantas de cobertura – SCSP, no intuito de observar a ação das plantas na recuperação dos atributos do solo construído. Como conclusões gerais pode-se dizer que após seis anos de execução do experimento observa-se a recuperação inicial dos indicadores físicos do solo construído, se comprovando a eficiência das gramíneas perenes em recuperar a estrutura dos solos construídos ao longo do tempo.

Palavras-chave: densidade do solo; porosidade total; agregação; plantas de cobertura.

## Abstract

CASTRO, Rafaela Costa. **Temporal assessment of the physical properties of a constructed soil in a coal mining area restored with perennial gramineae.** 2012. 99 p. Dissertation – Graduate Program in Agronomy, Area of Concentration: Soils. Pelotas Federal University, Pelotas - Brasil.

The Candiota region has the largest coal reserve in Brazil, known as the Big Candiota deposit. In this locality the coal lies near the surface, being open-pit mining. This method of extraction involves removing the horizons A and / or B of the original soil, followed by removal of rocks with subsequent replacement of sterile armholes open. The sterile are leveled by bulldozer and is the replacement of topsoil original, finalizing the construction process from the ground. This process entails a large compression generated by intense and repeated traffic of heavy equipment over the area, restricting the establishment of vegetation for long periods. The impacts caused by the topographic reconstruction of the area are reflected in soil physical built, being directly related to the structure, being the density values and high disproportionality between micro and macropores the first negative effects to be observed. The use of plants that act as soil decompressor is an important strategy in recovering the structural quality of soil. The aim of the study was to analyze the potential of different cover crops on reclamation by coal mining, through the determination of physical parameters of soil built over time. Treatments were analyzed with perennial grasses of summer, implanted in November / December 2003: T1 - Hemártria (*Hemarthria altissima*), T4 - Pensacola (*Paspalum notatum*), T5 - Grama Tifton (*Cynodon dactylon*), T7- Braquiária brizanta (*Brachiaria brizantha*). As a control the ground built without cover crops was used – SCSP, in order to observe the action of the plants in the recovery of built soil attributes. As general conclusions, after six years of experiment, the initial recovery of physical indicators of built soil was observed, proving the efficiency of perennial grasses to rehabilitate structure of soil built along the time.

**Key words:** bulk density; total porosity; aggregation; cover crops.

## Lista de Figuras

<b>Figura 1</b> Perfil geológico na jazida de Candiota.....	<b>25</b>
<b>Figura 2</b> Processo de lavra, extração do carvão e recomposição topográfica da área minerada.....	<b>27</b>
<b>Figura 3</b> Camada subsuperficial e camada superficial formadas durante a construção do solo após a mineração de carvão.....	<b>28</b>
<b>Figura 4</b> Camadas de solo formadas durante a construção do solo após a mineração de carvão.....	<b>28</b>
<b>Figura 5</b> Imagem aérea da área experimental mantida pelo Departamento de Solos da UFPel em Candiota/RS.....	<b>29</b>
<b>Figura 6</b> Processos que envolveram a instalação do experimento.....	<b>30</b>
<b>Figura 7</b> Localização das áreas experimentais e delineamento do Experimento 1.....	<b>31</b>
<b>Figura 8</b> Experimento 1 com sistemas de manejo nas subparcelas: com ou sem roçada.....	<b>32</b>
<b>Figura 9</b> Localização das áreas experimentais e delineamento do Experimento 2.....	<b>33</b>
<b>Figura 10</b> Porcentagem de macroagregados e microagregados nos anos de 2004, 2007 e 2010, na camada de 0,00-0,10m do solo construído.....	<b>47</b>
<b>Figura 11</b> Estrutura laminar coesa gerada pelo tráfego intenso de máquinas pesadas e quebra desta massa coesa com a escarificação.....	<b>48</b>
<b>Figura 12</b> Porcentagem de macroagregados e microagregados nos anos de 2004, 2007 e 2010, na camada de 0,10-0,20m do solo construído.....	<b>51</b>
<b>Figura 13</b> Relação entre DMP e CO no ano de 2010, nas camadas de 0,00-0,10 e 0,10-0,20m do solo construído.....	<b>52</b>
<b>Figura 14</b> Diâmetro médio ponderado (DMP) nos anos de 2004, 2007 e 2010, nas camadas de 0,00-0,10m e 0,10-0,20m do solo construído.....	<b>53</b>
<b>Figura 15</b> Relação entre DMP e ADA no ano de 2004 e 2010, na camada de 0,00-0,10m do solo construído.....	<b>54</b>
<b>Figura 16</b> Carbono orgânico nos anos de 2004, 2007 e 2010, nas camadas de 0,00-0,10m e 0,10-0,20m do solo construído.....	<b>56</b>
<b>Figura 17</b> Densidade do solo construído nos anos de 2004, 2007 e 2010, nas camadas de 0,00-0,10m e 0,10-0,20m do solo construído.....	<b>70</b>
<b>Figura 18</b> Porosidade total nos anos de 2004, 2007 e 2010, nas camadas de 0,00-0,10m e 0,10-0,20m do solo construído.....	<b>72</b>
<b>Figura 19</b> Macroporosidade nos anos de 2004, 2007 e 2010, nas camadas de 0,00-0,10m e 0,10-0,20m do solo construído.....	<b>73</b>
<b>Figura 20</b> Microporosidade nos anos de 2004, 2007 e 2010, nas camadas de 0,00-0,10m e 0,10-0,20m do solo construído.....	<b>75</b>

## Lista de Tabelas

<b>Tabela 1</b> Características do solo natural e solo construído na mina de Candiota, nas camadas de 0,00-0,10m e 0,10-0,20m.....	<b>21</b>
<b>Tabela 2</b> Resultados observados em diferentes pesquisas no Experimento 1, obtidos nos anos de 2006, 2008, 2010 e 2011.....	<b>35</b>
<b>Tabela 3</b> Porcentagem de macroagregados e microagregados, diâmetro médio ponderado (DMP) de agregados estáveis em água, teor de carbono orgânico (CO) e argila dispersa em água (ADA) de um solo construído em área de mineração de carvão submetido ao cultivo de diferentes espécies vegetais nas camadas de 0,00-0,10m e 0,10-0,20m, no ano de 2010.....	<b>46</b>
<b>Tabela 4</b> Relação da microporosidade em relação à macroporosidade (Mi/Ma) de um solo construído em área de mineração de carvão submetido ao cultivo de diferentes espécies vegetais nas camadas de 0,00-0,10m e 0,10-0,20m, nos anos de 2004, 2007 e 2010.....	<b>49</b>
<b>Tabela 5</b> Valores médios de densidade do solo (Ds), porosidade total (Pt), macroporosidade (Ma), microporosidade (Mi) e capacidade de água disponível (CAD) de um solo construído em área de mineração de carvão submetido ao cultivo de diferentes espécies vegetais, no ano de 2010, nas camadas de 0,00-0,10m e 0,10-0,20m.....	<b>69</b>
<b>Tabela 6</b> Valores médios da relação de macroporosidade em relação da porosidade total (Ma/Pt) e da microporosidade em relação da porosidade total (Mi/Pt) de um solo construído em área de mineração de carvão submetido ao cultivo de diferentes espécies vegetais, no ano de 2010, nas camadas de 0,00-0,10m e 0,10-0,20m.....	<b>74</b>

## Sumário

<b>1. INTRODUÇÃO GERAL.....</b>	<b>10</b>
<b>2. REVISÃO DE LITERATURA.....</b>	<b>12</b>
2.1. Legislação ambiental brasileira relevante para a mineração de subsolo.....	12
2.2. Degradação ambiental.....	16
2.3. Solos construídos e Solos naturais.....	20
2.4. Influência das plantas de cobertura na recuperação de áreas degradadas pela mineração.....	22
2.5. Histórico da área experimental.....	25
2.5.1. Mineração de carvão e a recomposição topográfica da área.....	25
2.5.2. Caracterização da área experimental.....	29
2.5.3. Resultados obtidos no experimento 1.....	34
2.5.4. Resultados obtidos no experimento 2.....	36
<b>ARTIGO 1: EFEITO DAS GRAMÍNEAS PERENES DE VERÃO NA AGREGAÇÃO DE UM SOLO CONSTRUÍDO EM ÁREA DE MINERAÇÃO DE CARVÃO EM CANDIOTA/RS APÓS SEIS ANOS.....</b>	<b>39</b>
3.1. RESUMO.....	39
3.2. ABSTRACT.....	40
3.3. INTRODUÇÃO.....	41
3.4. MATERIAL E MÉTODOS.....	44
3.5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	45
3.6. CONCLUSÕES.....	57
3.7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	58
<b>ARTIGO 2: AVALIAÇÃO TEMPORAL DE ATRIBUTOS FÍSICOS DE UM SOLO CONSTRUÍDO CULTIVADO COM DIFERENTES GRAMÍNEAS PERENES DE VERÃO EM ÁREA DE MINERAÇÃO DE CARVÃO NO MUNICÍPIO DE CANDIOTA/RS.....</b>	<b>62</b>

<b>4.1. RESUMO.....</b>	<b>62</b>
<b>4.2. ABSTRACT.....</b>	<b>63</b>
<b>4.3. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>64</b>
<b>4.4. MATERIAL E MÉTODOS.....</b>	<b>66</b>
<b>4.5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>68</b>
<b>4.6. CONCLUSÕES.....</b>	<b>77</b>
<b>4.7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>78</b>
<b>5. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>82</b>
<b>6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>83</b>
<b>7. APÊNDICES.....</b>	<b>89</b>

## 1. INTRODUÇÃO GERAL

Na região da Campanha, onde se encontra o município de Candiota, no Rio Grande do Sul, até o período da Segunda Guerra Mundial o carvão mineral era explorado apenas de forma rudimentar, em carvoeiras, para o consumo em charqueadas da região (GUERRA & FERRARO, 2004). A primeira usina da região denominou-se Candiota I, inaugurada em 1961, sendo desativada após treze anos com a operação das duas primeiras máquinas de 63 MW da usina de Candiota II, oficialmente denominada Usina Termelétrica Presidente Médici. Em 1986 e no ano seguinte, foram instaladas mais duas unidades, correspondentes à chamada Fase B da usina, com 160 MW de potência unitária. A construção da Fase C da Usina Termelétrica Presidente Médici, deu-se no ano de 2010, e possui capacidade de 350 MW (CGTEE, 2012).

Em nível mundial, o carvão mineral foi uma das primeiras matrizes para geração de energia elétrica, porém, ao longo do tempo, este recurso perdeu espaço para o petróleo e o gás natural. Com as crises de abastecimento e o alto preço cobrado pelo petróleo, aliado aos problemas de escassez de água vivenciados nos últimos tempos para a utilização de hidrelétricas, o carvão começa a ser uma fonte bastante visada para geração de energia elétrica.

A demanda por energia no mundo até 2035 exigirá o crescimento da operação de usinas a carvão em cerca de 25%. No Brasil, o crescimento da demanda por energia nos próximos anos será inferior apenas ao da Índia, mostrando a importância de se considerar a utilização de usinas que usam o carvão como fonte energética (PIRES & HOLTZ, 2012).

Ao projetar a diversificação da matriz nacional, o Plano Decenal de Expansão de Energia Elétrica (PDEE 2006/2015) prevê a expansão da utilização do carvão, através da construção e/ou ampliação de usinas termoelétricas (ANEEL, 2008). Um exemplo desta expansão foi a ampliação da capacidade de geração de energia da Usina Termoelétrica Presidente Médici, localizada em Candiota/RS. A usina apresentava uma capacidade de geração de 126 MW na Fase A e 320 MW na Fase B com uma demanda de carvão na faixa de 1,7 milhões de toneladas por ano. No entanto, um acordo bilateral entre Brasil e China, permitiu a construção da Fase C da Usina, com uma capacidade de geração de 350MW, e que opera desde outubro de 2010. A construção da Fase C significou a intensificação da utilização do carvão

na produção de energia elétrica para atendimento do mercado brasileiro (CGTEE, 2011).

Do volume de reservas brasileiras, o Estado do Rio Grande do Sul responde por 89,25%; Santa Catarina, 10,41%; Paraná, 0,32% e São Paulo, 0,02%. Em Candiota está localizada a maior jazida carbonífera, com 38% de todo o carvão nacional (ANEEL, 2008), apresentando um potencial de extração que pode chegar a um bilhão de toneladas até a profundidade de 50 metros (CRM, 2010).

A extração do carvão na jazida de Candiota é realizada a céu aberto, com a remoção de grandes volumes de solo e de rocha, resultando em alterações paisagísticas mesmo após a recomposição topográfica da área. A recomposição da paisagem é feita através do empilhamento dos materiais das camadas retiradas para o fechamento das cavas, recobertos pelos horizontes pedogenéticos A e/ou B (terra vegetal). Após a exposição aos fatores ambientais, como ação climática, biológica e modificações físicas ocorrentes, irão se desenvolver solos cujas propriedades diferem muito daquelas do solo original.

As alterações físicas causadas nos solos construídos estão diretamente relacionadas à estrutura, logo, atributos como densidade, diâmetro médio ponderado, porosidade, resistência mecânica do solo à penetração, entre outros, indicam a degradação ocasionada nestes solos.

O uso da cobertura vegetal como medida mitigadora dos impactos ambientais é uma opção prática e econômica, embora apresente dificuldades de adaptação inerentes à composição física e química do solo degradado (D'ALTERIO & VALCARCEL, 1996). Deve-se escolher espécies que tenham capacidade para crescer rapidamente, proteger o solo, abrigar e alimentar a fauna, recompor a paisagem e restabelecer o regime hídrico (KOPEZINSKI, 2000), criando assim condições propícias para o estabelecimento de outras espécies mais exigentes.

Tendo em vista o exposto, o presente trabalho visou testar a hipótese de que a utilização de plantas de cobertura altera positivamente os atributos físicos de um solo construído ao longo dos anos, bem como as espécies estudadas apresentam distinções na recuperação dos atributos físicos do solo e na incorporação de carbono orgânico do solo construído.

## 2. REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1. Legislação ambiental brasileira relevante para a mineração de subsolo

A degradação causada pela mineração de carvão é um tema que vem sendo bastante discutido na atualidade. Historicamente, depois de explorados os recursos naturais das minas, estas eram abandonadas sem que fossem tomadas providências para reduzir riscos e impactos socioambientais. Porém, atualmente a Legislação Ambiental cobra medidas para mitigação dos impactos causados pela mineração, delegando às empresas mineradoras a responsabilidade pela reabilitação das áreas mineradas.

Na Constituição Federal de 1988 se estabeleceu em seu artigo 225, parágrafo 2º, o que segue:

Aquele que explorar recursos minerais fica obrigado a recuperar o meio ambiente degradado, de acordo com solução técnica exigida pelo órgão público competente, na forma da lei.

Ainda, a teor do disposto no Art. 20, § IX considera como bens da união os recursos minerais, inclusive os do subsolo, e que a pesquisa e lavra desses recursos só poderão ser feitas por sua autorização ou concessão (Art. 176, §1º).

É competência comum da União, dos Estados, do Distrito Federal e dos Municípios: registrar, acompanhar e fiscalizar as concessões de direitos de pesquisa e exploração de recursos minerais em seus territórios (Art. 23, § XI).

A proteção ambiental é medida de interesse coletivo, onde o direito ao meio ambiente sadio deve ser garantido para toda sociedade, prevalecendo sobre o interesse de natureza privada, por isto a obrigação do minerador em recuperar o dano causado. O Código Estadual do Meio Ambiente do Rio Grande do Sul (Lei nº 11.520, de 03 de agosto de 2000) prega em seu artigo 1º o exposto:

Todos têm direito ao meio ambiente ecologicamente equilibrado, bem de uso comum do povo e essencial à sadia qualidade de vida, impondo-se ao Estado, aos municípios, à coletividade e aos cidadãos, o dever de defendê-lo, preservá-lo e conservá-lo para as gerações presentes e futuras, garantindo-se a proteção dos ecossistemas e o uso racional dos recursos ambientais, de acordo com a presente Lei (Art. 1º, Lei Estadual 11.520/00).

Além disto, em seu artigo 3º coloca que todas as pessoas (físicas e jurídicas) devem promover e exigir medidas que garantam a qualidade do meio ambiente, assim como corrigir ou fazer corrigir, às suas expensas, os efeitos da atividade degradadora ou poluidora por elas desenvolvida.

O código estadual possui um capítulo específico de mineração (Capítulo XI) onde coloca a exigência de licenciamento ambiental da atividade, especificando inclusive que os equipamentos utilizados para extração mineral, as chamadas “dragas”, devem ser objeto específico de licenciamento. Neste momento, cabe ressaltar que a licença ambiental é ato administrativo vinculado, que produz efeitos específicos e individuais para o seu titular, sendo de caráter definitivo quanto a seus aspectos formais. Portanto, uma licença de operação de uma mina outorgada pelo órgão ambiental gera direitos e obrigações ao minerador (SOUZA, 2002).

A Política Nacional do Meio Ambiente, criada pela Lei 6.938 de 31 de agosto de 1981, tem como objetivo a preservação e recuperação da qualidade do ambiente (art. 2º), trabalhando dentro de princípios, onde se encaixa a atividade mineradora:

A Política Nacional do Meio Ambiente tem por objetivo a preservação, melhoria e recuperação da qualidade ambiental propícia à vida, visando assegurar, no País, condições ao desenvolvimento sócio-econômico, aos interesses da segurança nacional e à proteção da dignidade da vida humana, atendidos os seguintes princípios:

I - ação governamental na manutenção do equilíbrio ecológico, considerando o meio ambiente como um patrimônio público a ser necessariamente assegurado e protegido, tendo em vista o uso coletivo;

II - racionalização do uso do solo, do subsolo, da água e do ar;

...

V - controle e zoneamento das atividades potencial ou efetivamente poluidoras;

...

VIII - recuperação de áreas degradadas;

IX - proteção de áreas ameaçadas de degradação... (Art. 2º, Lei Federal 6.938/21).

O PRAD (Plano de Recuperação de Áreas Degradadas) foi instituído legalmente através do Decreto 97.632, de 10 de abril de 1989, o qual regulamenta o Art. 2º, §

VIII da Política Nacional do Meio Ambiente. O mesmo estipula que, no momento da apresentação do EIA/RIMA (Estudo de Impacto Ambiental e Relatório do Impacto Ambiental), os empreendimentos que se destinem à exploração de recursos minerais devem submeter à aprovação do órgão ambiental competente o plano de recuperação de área degradada. O decreto prevê que a recuperação deverá ter por objetivo o retorno do sítio degradado a uma forma de utilização, de acordo com um plano pré-estabelecido para o uso do solo, visando à obtenção de uma estabilidade do meio ambiente.

Este Plano de Recuperação de Áreas Degradadas quando bem elaborado e fielmente executado, vem a ser de extrema valia para o sucesso da reabilitação da área degradada. Portanto, a sua elaboração deve englobar desde o planejamento da atividade minerária até o momento do término da lavra, ou seja, o fechamento da mina. Este fechamento irá decorrer em um processo de mudança de uso da área, que deverá estar contemplado no Plano de Recuperação de Área Degradada que, se aprovado pelo órgão ambiental, fica ao encargo do minerador a obrigação de execução do plano proposto.

Referente ao término da lavra, o DNPM (Departamento Nacional da Produção Mineral) editou a Portaria nº 237 de 2001 (alterada pela Portaria nº 12 de 2002) instituindo as Normas Reguladoras de Mineração (NRMs), onde a NRM nº 20 trata da “Suspensão, Fechamento de Mina e Retomada das Operações Mineiras”.

Sobre a atividade mineradora vige o Código de Mineração (Decreto-lei nº. 227 de 28 de fevereiro de 1967), o qual em relação ao meio ambiente em seu Art. 47, dispõe que ficará obrigado o titular da concessão a responder pelos danos e prejuízos causados a terceiros, que resultarem direta ou indiretamente da lavra (§. VIII), e este deve evitar poluição do ar ou da água, que possa ser resultado dos trabalhos de mineração (§. XI)”. Ressaltasse que essas disposições já se encontravam no revogado Código de Minas de 1940.

Além do Código de Minas, a Lei nº 7.805 de 1989 (Altera o Decreto-Lei nº 227, de 28 de fevereiro de 1967, cria o regime de permissão de lavra garimpeira, extingue o regime de matrícula, e dá outras providências) responsabiliza o minerador legalmente autorizado, pela reparação dos danos causados ao meio ambiente:

O titular da autorização de pesquisa, de permissão de lavra garimpeira, de concessão de lavra, de licenciamento ou de manifesto de mina

responde pelos danos causados ao meio ambiente (Art. 19, Lei Federal 7.805/89).

Assim, segundo Souza (2003) a não recuperação do dano ambiental causado pela atividade de mineração pode acarretar sanções de natureza penal e administrativa, sem desonrar o minerador da obrigação de recuperar o meio ambiente degradado pela atividade (responsabilidade civil). Segundo o mesmo autor:

As penalidades administrativas típicas são as de cunho pecuniário (multa) ou ligadas ao regime autorizativo para o exercício de atividades (embargo, interdição ou suspensão). A responsabilidade penal é sempre de caráter subjetivo, pois pressupõe a aferição da vontade do autor para a prática do ato delituoso definido como crime, enquadrando-a nos parâmetros do dolo (consciência e vontade livre de realizar a conduta delituosa) ou da culpa (violação do dever de cuidado, atenção e diligência com que todos devem pautar-se na vida em sociedade). As penalidades criminais são aplicadas exclusivamente pelo Judiciário (SOUZA, 2003).

Referente aos danos ambientais causados pela atividade mineral, o Decreto 6.514 de 22 de julho de 2008 dispõe sobre as infrações e sanções administrativas causadas ao meio ambiente, definindo como crime ambiental o ressaltado nos artigos abaixo:

Art. 63. Executar pesquisa lavra ou extração de minerais sem a competente autorização, permissão, concessão ou licença da autoridade ambiental competente ou em desacordo com a obtida: Multa de R\$ 1.500,00 (mil e quinhentos reais) a R\$ 3.000,00 (três mil reais), por hectare ou fração.

Parágrafo único. Incorre nas mesmas multas quem deixa de recuperar a área pesquisada ou explorada, nos termos da autorização, permissão, licença, concessão ou determinação do órgão ambiental competente.

Art. 66. Construir, reformar, ampliar, instalar ou fazer funcionar estabelecimentos, atividades, obras ou serviços utilizadores de recursos ambientais, considerados efetiva ou potencialmente poluidores, sem licença ou autorização dos órgãos ambientais

competentes, em desacordo com a licença obtida ou contrariando as normas legais e regulamentos pertinentes: Multa de R\$ 500,00 (quinhentos reais) a R\$ 10.000.000,00 (dez milhões de reais).

Parágrafo único. Incorre nas mesmas multas quem:

I - constrói, reforma, amplia, instala ou faz funcionar estabelecimento, obra ou serviço sujeito a licenciamento ambiental localizado em unidade de conservação ou em sua zona de amortecimento, sem anuênciia do respectivo órgão gestor; e

II - constrói, reforma, amplia, instala ou faz funcionar estabelecimento, obra ou serviço sujeito a licenciamento ambiental localizado em unidade de conservação ou em sua zona de amortecimento, ou em áreas de proteção de mananciais legalmente estabelecidas, sem anuênciia do respectivo órgão gestor;

III - deixa de atender as condicionantes estabelecidas na licença ambiental (Decreto 6.514/08).

O disposto no Decreto de crimes ambientais deve ser observado pelas empresas mineradoras, a fim de estarem de acordo com a Legislação Ambiental. Isto é, se a empresa obtiver licença ambiental para a atividade e recuperar a área de acordo com as condicionantes e restrições impostas na mesma, estará se beneficiando do recurso natural e contribuindo para que a atividade seja econômica e ambientalmente sustentável.

## **2.2. Degradação ambiental**

A degradação ambiental tem sido associada aos efeitos negativos ou adversos que decorrem principalmente de atividades ou intervenções humanas (CAPECHE et al., 2008).

A NBR 10703 da ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas) aponta a degradação do solo como sendo a “*alteração adversa das características do solo em relação aos seus diversos usos possíveis, tanto os estabelecidos em planejamento, como os potenciais*”. O conceito contempla o entendimento do solo enquanto espaço geográfico, extrapolando o sentido de matéria ou componente predominante abiótico do ambiente. Já a NBR 13030, a qual é específica para a mineração, define áreas degradadas como “*áreas com diversos graus de alterações dos fatores bióticos e*

*abióticos, causados pelas atividades de mineração*", onde se mantém a noção de alteração.

Segundo o Manual de Recuperação de Áreas Degradadas pela Mineração (IBAMA, 1990), a definição de degradação se dá da seguinte maneira:

A degradação de uma área ocorre quando a vegetação nativa e a fauna forem destruídas, removidas ou expulsas; a camada fértil do solo for perdida, removida ou enterrada; e a qualidade e o regime de vazão do sistema hídrico forem alterados. A degradação ambiental ocorre quando há perda de adaptação às características físicas, químicas e biológicas e é inviabilizado o desenvolvimento sócio-econômico.

Um aspecto a ser destacado são os termos utilizados quando se fala em recuperação de áreas degradadas, onde podem confundir-se termos como recuperação, reabilitação e restauração. Sua diferenciação é importante, pois o emprego de determinado termo pode ter um significado diferente do imaginado.

De acordo com Capeche et al. (2008) a recuperação significa que o ambiente degradado retornará a uma forma e utilização de acordo com um plano pré-estabelecido para o uso do solo, implicando em uma condição em conformidade com os valores ambientais, estéticos e sociais da circunvizinhança. Este termo inclui o planejamento e o trabalho de engenharia e de processos hidrológicos, porém nem sempre, processos biológicos (MAJER, 1989; DIAS & GRIFFITH, 1998). Ou seja, o ambiente degradado terá condições mínimas de estabelecer um novo equilíbrio dinâmico, desenvolvendo um novo solo e uma nova paisagem.

Para Majer (1989) a reabilitação é o retorno da área degradada a um estado biológico apropriado, que pode não significar o uso produtivo da área a longo prazo, como a implantação de uma atividade que renderá lucro, ou atividades menos tangíveis em termos monetários como, por exemplo, a recreação ou a valorização estético-ecológica. A reabilitação é um termo mais amplo, referindo-se a ações que restauram a função do ecossistema sem a preocupação com a sua similaridade às condições originais, mas de modo que este novo ecossistema seja resiliente em longo prazo (ENGEL & PARROTTA, 2003).

Segundo Dias & Griffith (1998) o termo restauração refere-se à obrigatoriedade do retorno ao estado original da área, ou seja, todos os aspectos relacionados com topografia, vegetação, fauna, solo, hidrologia, devem apresentar as mesmas características anteriores à degradação. Avaliando por este ângulo, o termo

restauração seria o mais impróprio a ser utilizado, pois se trata de um objetivo praticamente inalcansável já que a restauração de um ecossistema pode ser técnica e economicamente inviável, especialmente no que tange a mineração de carvão a céu aberto.

De acordo com Engel & Parrotta (2003) o conceito de restauração ecológica tem evoluído e se diferencia do adotado por Dias & Griffith (1998), sendo este o termo mais utilizado na literatura internacional. A definição de restauração ecológica para a SER “Society for Ecological Restoration” (2004) é: “*A restauração ecológica é o processo de auxílio ao restabelecimento de um ecossistema que foi degradado, danificado ou destruído.*” Esta definição considera que restaurar um ecossistema não é copiar exatamente um modelo na natureza, mas sim recuperar a estabilidade e integridade biológica dos ecossistemas naturais. Na prática, muitas técnicas utilizadas na recuperação, reabilitação e restauração são as mesmas, diferindo entre as abordagens as metas e os objetivos, bem como a escala de tempo adotada. Logo, o trabalho de reparação ambiental que tenha como meta em longo espaço de tempo a recriação de um ecossistema auto-sustentável, estável e resiliente, regulado totalmente por processos naturais e com estrutura mais próxima possível das comunidades naturais, deve ser encarado como um trabalho de restauração ecológica (ENGEL & PARROTTA, 2003).

Para recuperar e/ou reabilitar uma área degradada é necessário conhecer os impactos causados ao ambiente pela atividade degradante. Especificamente na atividade de exploração mineral podem ocorrer impactos diretos e indiretos de diferentes naturezas sobre a área minerada e o seu entorno. Os impactos sobre o solo, a vegetação e os recursos hídricos presentes no sistema são observados na forma de alterações estéticas, físicas, químicas e biológicas, dependendo das características da geologia, vegetação, relevo e solo locais, bem como do tipo de lavra e minério a ser extraído.

No caso da mineração de carvão, especialmente a realizada a céu aberto, como ocorre no município de Candiota/RS, a disposição dos rejeitos pode vir a acidificar o aquífero freático subjacente, além de contaminar águas superficiais, a partir da reação de oxidação da pirita (ou sulfeto de ferro). Segundo Mendonça et al. (2002) a acidificação das drenagens é desencadeada pela oxidação do sulfeto de ferro ( $\text{FeS}_2$ ) presente nos rejeitos do carvão, que são expostos à ação do oxigênio e ao contato com a água.

O World Coal Institute (2005) aponta como problemas associados à mineração, além da alteração da paisagem, da erosão do solo, dos impactos na biodiversidade local e poluição hídrica, a poluição do ar (emissão de material particulado) e a poluição sonora (ruído). O mesmo instituto considera vital que as operações de reabilitação das áreas mineradas sejam procedidas logo ao término da atividade de lavra, evitando a exposição desnecessária dos rejeitos de estéreis e a formação da drenagem ácida. Um plano detalhado de reabilitação ou recuperação deve ser apresentado para cada mina, contemplando o período compreendido entre o instante inicial das operações até o término da atividade.

As áreas recuperadas podem ter diversos usos conforme objetivos e metas traçados para as áreas degradadas, levando-se em consideração o grau de impacto da atividade minerária. No caso da mina de Candiota/RS, o Plano de Controle Ambiental (o qual contempla o Plano de Recuperação das áreas e seus usos futuros) atribui que depois de recuperadas as áreas, estas serão destinadas à formação de pastagens que darão suporte às atividades ligadas à pecuária extensiva, tão logo estas apresentem condições para tal. Algumas das áreas exploradas pela CRM pertencem a terceiros e, portanto, a empresa revegeta os solos construídos com gramíneas, no intuito de devolver as áreas com condições que permitam o uso proposto.

Assim a Universidade Federal de Pelotas (UFPEL), através do Departamento de Solos da Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel, trabalha em parceria com a CRM desenvolvendo experimentos nas áreas mineradas, com o objetivo de avaliar a capacidade do solo construído em ser revegetado e encontram espécies que melhor se adaptem a ambientes de elevada degradação e que possam recuperar mais rapidamente os atributos físicos, químicos e biológicos dos solos construídos.

A escolha das espécies vegetais mais adequadas para a recuperação de áreas degradadas permite obter o sucesso na revegetação e até mesmo na estabilização dessas áreas. Nos estágios iniciais de estabelecimento da vegetação, são desejáveis espécies rústicas, que possuam algumas características como: tolerância ao estresse hídrico; boa adaptação em solos com baixa disponibilidade de nutrientes; bom nível de crescimento, propiciando rápido recobrimento da área, reduzindo o processo erosivo; e, sistema radicular capaz de explorar amplos volumes de solo sob condições adversas melhorando seus atributos físicos (GONÇALVES et al., 2003).

O sistema radicular das plantas adotadas para a recuperação de áreas degradadas deve ser apto para cumprir suas funções sob condições de baixa qualidade estrutural. Com o passar do tempo espera-se que esta vegetação contribua para a melhoria das condições físicas, químicas e biológicas do solo, tornando a camada de solo reposta mais rica em nutrientes (HARCOMBE, 1980), com mais matéria orgânica e biomassa microbiana (CROMACK, 1981) o que consequentemente tende a melhorar a estrutura do solo, tornando-o mais friável e poroso.

A ciclagem de nutrientes torna-se imprescindível, e possui uma estreita relação com o ritmo de crescimento e demanda nutricional das espécies. Quanto mais intenso é o ritmo de crescimento da espécie maior é a velocidade de ciclagem de nutrientes (GONÇALVES et. al., 2003).

A escolha inadequada das espécies pode levar a problemas futuros. Por exemplo, a utilização de espécies arbóreas poderia provocar deslizamentos em determinados casos, pois seu peso aumenta as forças atuantes.

Segundo o Relatório Técnico de Projeto “*Recuperação dos solos regenerados da área de mineração de carvão de Candiota – RS*” (2007), a escolha de espécies para a reabilitação dos solos construídos foi baseada na manutenção da vegetação compatível com a encontrada no ambiente natural da região do Bioma Pampa e na necessidade desta vegetação apresentar um alto potencial de produção de biomassa, e com isto, contribuir para a adição de carbono orgânico e nitrogênio ao solo, bem como na manutenção da cobertura do solo e contenção do processo de erosão hídrica. Escolheram-se plantas predominantemente perenes ou com alta capacidade de se perpetuarem na área por ressemeadura, adaptadas ao Bioma Pampa e ao ambiente proporcionado pelo solo construído. Procurou-se utilizar espécies herbáceas entre as forrageiras já testadas na região, pois o uso de espécies nativas, embora ambientalmente mais indicado, esbarrava na dificuldade prática de obter sementes ou mudas, além da menor velocidade de estabelecimento.

### **2.3.Solos construídos e Solos naturais**

Para haver uma melhor compreensão sobre a dificuldade de revegetação dos solos construídos apresenta-se na Tabela 1 um levantamento realizado por Nunes (2002), sobre as principais diferenças entre o solo natural (Argissolo Vermelho

Eutrófico típico) da mina de Candiota e o solo construído com um ano de idade (cobertura de terra vegetal de pequena espessura) após a mineração dessas áreas.

**Tabela 1:** Características do solo natural e solo construído na mina de Candiota, nas camadas de 0,00-0,10m e 0,10-0,20m \*.

	<b>Solo Natural</b>		<b>Solo Construído</b>
Caracterização Geral	Argissolo típico Horiz A: 0-22 cm; Horiz AB: 22-35 cm; Horiz BA: 35-45 cm; Horiz Bt: 45 – 140 cm; Horiz BC: 140-180+ cm.	Vermelho Eutrófico	Camada de terra vegetal (mistura de horizontes): em torno de 0-20 cm; Camada de material estéril (rejeito): 20+ cm.
			<b>Camada de 0,00-0,10m</b>
Areia	477,79 g.kg <sup>-1</sup>		466,10 g.kg <sup>-1</sup>
Silte	271,81 g.kg <sup>-1</sup>		311,69 g.kg <sup>-1</sup>
Argila	250,40 g.kg <sup>-1</sup>		222,21 g.kg <sup>-1</sup>
Maior concentração de agregados estáveis em água	Classe 9,52 - 4,76mm		Classe 1,00 - 0,50mm
Diâmetro médio ponderado (DMP)	3,68 mm		1,25 mm
Argila dispersa em água (ADA)	91,82 g.kg <sup>-1</sup>		51,22 g.kg <sup>-1</sup>
pH	5,42		5,00
Densidade do solo (Ds)	1,42 Mg.m <sup>-3</sup>		1,61 Mg.m <sup>-3</sup>
Porosidade total (Pt)	40,42 %		35,10 %
Macroporosidade (Ma)	1,20 %		4,38 %
Microporosidade (Mi)	39,22 %		30,72 %
Relação Mi/Ma	33:1		7:1
Carbono orgânico (CO)	23 g.kg <sup>-1</sup>		16 g.kg <sup>-1</sup>
			<b>Camada de 0,10-0,20m</b>
Areia	444,91 g.kg <sup>-1</sup>		446,69 g.kg <sup>-1</sup>
Silte	256,09 g.kg <sup>-1</sup>		324,33 g.kg <sup>-1</sup>
Argila	299,00 g.kg <sup>-1</sup>		228,98 g.kg <sup>-1</sup>
Maior concentração de agregados estáveis em água	Classe 9,52 - 4,76mm		Classe 1,00 - 0,50mm
DMP	3,20 mm		1,79 mm
Argila dispersa em água (ADA)	131,16 g.kg <sup>-1</sup>		4,71 g.kg <sup>-1</sup>
pH	5,46		3,97
Densidade do solo (Ds)	1,48 Mg.m <sup>-3</sup>		1,65 Mg.m <sup>-3</sup>
Porosidade total (Pt)	39,88 %		35,51 %
Macroporosidade (Ma)	5,46 %		2,44 %
Microporosidade (Mi)	34,42 %		33,06 %
Relação Mi/Ma	6:1		13:1
Carbono orgânico (CO)	16 g.kg <sup>-1</sup>		21 g.kg <sup>-1</sup>

\* Adaptado de Nunes (2002)

As diferenças apresentadas acima entre o solo natural e o solo construído são um reflexo da degradação ocasionada pela mineração de carvão a céu aberto. A principal alteração refere-se à degradação física, pois o perfil do solo construído é totalmente suprimido, e após o processo de construção do solo este resulta em uma condição totalmente diferenciada, na qual os materiais são desestruturados, misturados e expostos às intempéries por longos períodos de tempo. De acordo com Kämpf et al. (2000) a ausência de estrutura é uma das principais deficiências dos solos construídos jovens, implicando em suscetibilidade à erosão devido a pouca estabilidade dos materiais.

Em resumo, observa-se na Tabela 1 uma menor agregação do solo construído em relação ao solo natural, com agregados de maior tamanho na camada subsuperficial, resultantes provavelmente da ação compressiva das máquinas pesadas utilizadas na construção do solo.

Os maiores valores de densidade apresentados pelo solo construído, e consequentemente a menor porosidade total, deve-se ao tráfego de equipamentos pesados na fase de lavra e recomposição topográfica em condições inadequadas de umidade, e seleção e disposição imprópria dos materiais, incluindo mistura com materiais de estéril, que podem ter causado a acomodação das partículas do solo.

#### **2.4. Influência das plantas de cobertura na recuperação de áreas degradadas pela mineração**

Atualmente, a maioria dos trabalhos direcionados à recuperação dos solos construídos estão relacionados à reposição do solo sobre as cavas preenchidas por rejeitos, após a remodelação topográfica da área (ARRANZ-GONZÁLEZ, 2011). No entanto, o movimento repetido de equipamentos pesados durante o transporte e deposição desta camada de solo acarreta na compactação das unidades estruturais do solo construído, resultando em drenagem deficiente, baixa aeração do solo e dificuldade de desenvolvimento de raízes (SHRESTHA & LAL, 2011). Como resultado desses efeitos deletérios, a compactação do solo construído pode anular os benefícios esperados pela reposição do solo superficial, podendo restringir o estabelecimento da vegetação por longos períodos (ARRANZ-GONZÁLEZ, 2011).

A compactação causada no processo de construção dos solos minerados eleva a densidade do solo, reduzindo o número de macroporos e consequentemente,

reduzindo a taxa de infiltração da água ao longo do perfil, aumentando o risco de erosão e de déficit hídrico e nutricional nas plantas, elevando a resistência do solo ao crescimento de raízes, concentrando o seu desenvolvimento mais na superfície do solo.

Além da compactação do solo construído, fatores de natureza química também podem limitar o estabelecimento vegetal, principalmente através da acidificação das pilhas de rejeitos, devido à oxidação da pirita, que promovem a solubilização de íons em níveis tóxicos para as plantas (TAYLOR et al., 1992).

Torna-se um desafio encontrar medidas de recuperação que maximizem a viabilidade do novo ecossistema a longo prazo (SHRESTHA & LAL, 2011). No entanto, o manejo adequado do solo e de plantas de cobertura pode reduzir o tempo necessário para a recuperação de áreas degradadas. Com isso, são necessárias maiores informações sobre quais espécies vegetais são mais apropriadas para melhorar a qualidade física do solo sob determinadas condições de solo e clima (ANDRADE et al., 2009).

A calagem, a fertilização (MOREIRA, 2004) e o plantio de espécies forrageiras que possuam sistema radicular agressivo (ANDRADE et al., 2009) após a recomposição topográfica e a cobertura do rejeito carbonífero com a reposição de uma camada de solo, podem minimizar em parte os impactos causados ao ambiente pelas áreas de mineração (GAIVIZZO et al., 2002).

O uso de leguminosas herbáceas perenes como cobertura viva permanente é considerado uma prática com caráter multifuncional, associando aspectos de conservação do solo e manutenção da fertilidade como consequência da adubação verde (PERIN et al. 2002).

O material orgânico depositado continuamente serve como fonte de energia para os organismos do solo, cujos subprodutos, constituídos de moléculas orgânicas em diversas fases de decomposição, atuam como agentes de estabilização de agregados pelas ligações de polímeros orgânicos com a superfície inorgânica por meio de cátions polivalentes (CASTRO FILHO et al., 1998).

Os resíduos de leguminosas têm grande importância como fornecedores de N, podendo contribuir para a diminuição da acidez do solo e da relação C/N da matéria orgânica do solo (HARGROVE, 1986). Por outro lado, os resíduos das gramíneas promovem a melhoria do solo, por possuírem maior conteúdo de lignina, possibilitando aumento de ácidos carboxílicos e ácidos húmicos nos substratos

(PRIMAVESI, 2002), favorecendo a estruturação e a estabilidade dos agregados do solo (FASSBENDER & BORNEMISZA, 1994), tornando-o menos suscetível à compactação.

Segundo Silva e Mielniczuck (1997) as gramíneas perenes podem ser utilizadas como plantas recuperadoras da estrutura do solo em áreas degradadas, dadas as peculiaridades dos mecanismos de ação do seu sistema radicular. Os efeitos benéficos são atribuídos principalmente à alta densidade de raízes, que promove a aproximação de partículas pela constante absorção de água do perfil do solo, às periódicas renovações do sistema radicular e, à uniforme distribuição de exsudados no solo, que estimulam a atividade microbiana, cujos subprodutos atuam na formação e estabilização dos agregados.

De acordo com Haynes & Francis (1993), a ação simultânea de aproximação de partículas minerais e liberação de substâncias orgânicas no mesmo local, provavelmente, seja a ação mais importante das raízes sobre a microagregação do solo. Ao lado dessa atividade, que ocorre enquanto o sistema radicular está em crescimento, a matéria orgânica oriunda da decomposição do tecido radicular, raízes não-decompostas e micélios fúngicos também atuam na formação e estabilização, principalmente dos macroagregados.

Tisdall e Oades (1982) explicam que os agregados de diâmetro superior a 2,0 mm são mantidos juntos principalmente pela fina rede de raízes e hifas, nos casos dos solos com teores de carbono elevado, e em solos com baixo conteúdo de carbono orgânico ( $<10 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ), somente pelos agentes ligantes transitórios (polissacarídeos microbianos, associado às raízes e à biomassa microbiana da rizosfera). Segundo os autores, as raízes possuem poder de agregação estável devido a exsudações de substâncias orgânicas, ao envolvimento físico de microagregados do solo (especialmente no caso das gramíneas) e à reorientação e a aproximação de partículas e microagregados por dessecamentos localizados.

Para Vezzani et al. (2008) o desenvolvimento radicular das plantas de cobertura afeta diretamente a porosidade total do solo, pois fragmenta unidades estruturais maiores em unidades menores alterando o espaço poroso. Segundo Cardoso et al. (2003) a utilização de plantas de cobertura que produzem grande quantidade de massa seca de plantas, cobrindo o solo mais rapidamente e que possuam sistema radicular profundo e com grande volume, são capazes de promover bioporos transversais ao longo do perfil que minimizam os efeitos da

compactação do solo. Estes bioporos podem melhorar a conectividade entre as camadas superficiais e subsuperficiais, favorecendo o fluxo vertical de água e a difusão dos gases, além de servirem de caminhos para a penetração radicular de culturas subsequentes (CHIODEROLI et. al., 2012).

## 2.5. HISTÓRICO DA ÁREA EXPERIMENTAL

### 2.5.1. Mineração de carvão e a recomposição topográfica da área

A mineração de carvão na jazida de Candiota é realizada totalmente a céu aberto, pois as camadas de carvão economicamente exploráveis, estão localizadas próximas à superfície do solo. Na Figura 1 apresentam-se as litologias presentes na Jazida de Candiota, divididas em três intervalos (ADE, 1993):

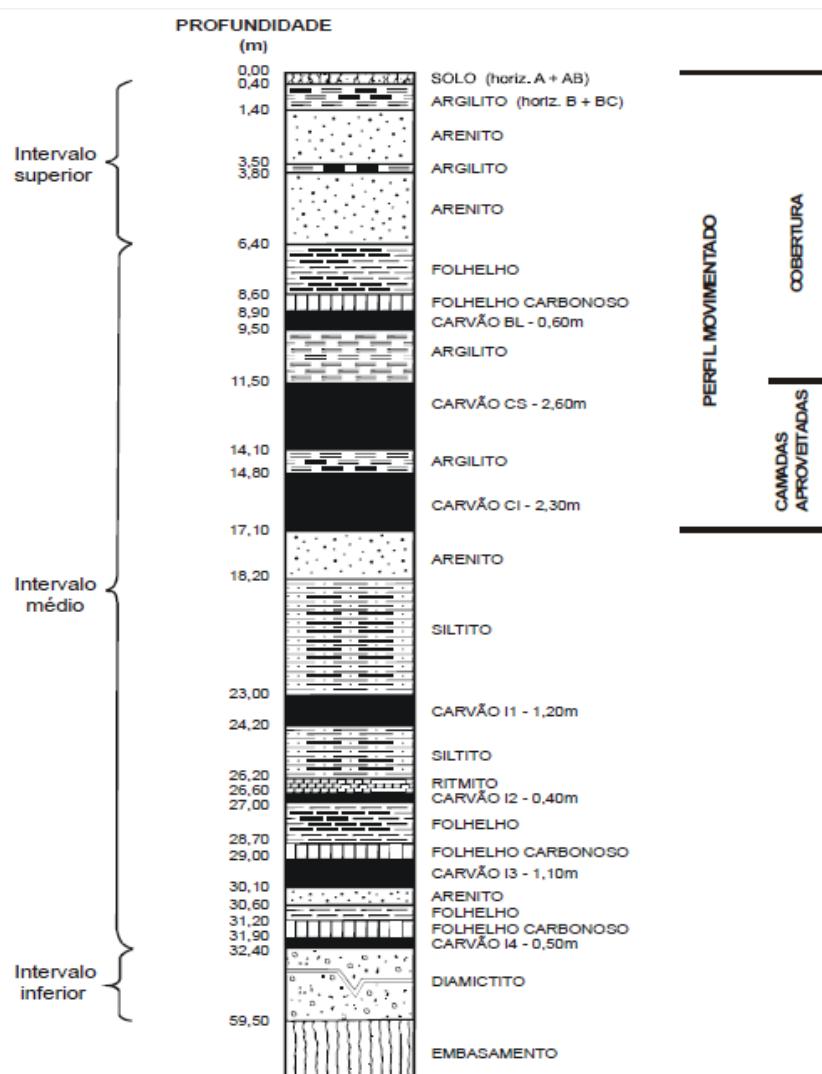


Figura 1: Perfil geológico na jazida de Candiota (adaptado de Pinto, 1999).

- a) Intervalo inferior: composto por arenitos conglomeráticos grosseiros e por conglomerados arenosos.
- b) Intervalo médio: com aproximadamente 22 m de espessura média, apresenta folhelhos e argilitos como litologias predominantes, bem como sete camadas de carvão, que se caracterizam por ser pouco espessas, inferiores a 1,50m, exceto as camadas Candiota Superior (CS) e Candiota Inferior (CI), com 2 a 3m de espessura respectivamente. Estas camadas são mineradas devido a sua espessura e qualidade e o restante, não aproveitáveis neste intervalo, é retirado junto com o material de cobertura e acabam compondo as camadas subsuperficiais dos solos construídos (estéreis).
- c) Intervalo superior: caracterizado por 5 a 10 metros de espessura de arenitos com intercalações de siltitos e argilitos.

Para a extração das camadas de carvão aproveitáveis (CS e CI), são realizados cortes sucessivos em sistema “vaivém” na seguinte seqüência:

- a) Retirada das camadas de solo (horizonte A, B e C) (Figura 2a);
- b) Perfuração e detonação do arenito;
- c) Descobertura do carvão através da “walking-drag-line” (Figura 2b);
- d) Perfuração, detonação e extração do carvão do banco superior (CS) e do banco inferior (CI), com separação do argilito intermediário (Figura 2c);
- e) Recomposição topográfica realizada por tratores de esteira, os quais quebram os cones de estéreis (Figura 2d).
- f) Reposição da camada de solo sobre a área recomposta topograficamente (Figura 2e);
- e) Revegetação da área (Figura 2f).



**Figura 2:** Processo de lavra, extração do carvão e recomposição topográfica da área minerada.

Portanto, o método de lavra e de recomposição topográfica das áreas mineradas a céu aberto origina solos antropogênicos denominados de solos construídos, geralmente adotando a seguinte formação: uma camada subsuperficial espessa composta por estéreis de mineração (Figura 3a); e uma camada superficial de solo, pouco espessa, constituída pela mistura dos horizontes A e/ou B (Figura 3b).

a)



b)



**Figura 3:** Camada subsuperficial (a) e camada superficial (b) formadas durante a construção do solo após a mineração de carvão.

Durante a recomposição topográfica das áreas mineradas há tráfego excessivo de máquinas pesadas, o que resulta na compactação das partículas desagregadas (Figura 4a). O processo de recomposição também ocasiona a mistura do solo com outros materiais geológicos, gerando uma condição muito diferenciada do solo original (Figura 4b).

a)



b)



**Figura 4:** Camadas de solo construído formadas durante o processo de construção após a mineração de carvão.

Diante disto, as propriedades físicas, químicas e biológicas dos solos construídos passam a refletir as características dos materiais constituintes do solo natural e do método de construção adotado (NUNES, 2002), com influência direta sobre a velocidade de revegetação destas áreas.

De acordo com Palmeira et al. (1999) existe uma estreita relação entre as condições físicas do solo e o desenvolvimento das plantas, pois solos desestruturados e compactados geralmente apresentam valores baixos de

porosidade, dificultando a penetração de raízes e a difusão de oxigênio. Conseqüentemente, os solos construídos apresentam elevado grau de dificuldade de revegetação.

### 2.5.2.Caracterização da área experimental

A Mina de carvão de Candiota, da Companhia Riograndense de Mineração (CRM), localiza-se no município de Candiota, a 140 km de Pelotas. A seleção da área experimental no interior da Mina (Figura 5) foi feita em conjunto com técnicos da CRM, em uma área recém construída, com as operações de preparo da área iniciadas em setembro de 2003.



**Figura 5:** Imagem aérea da área experimental mantida pelo Departamento de Solos da UFPel em Candiota/RS (Google earth).

Por ocasião da instalação dos experimentos, o solo foi escarificado com escarificador tracionado por uma patrola, atuando até a profundidade de 0,15m (Figura 6a), em virtude da necessidade de reduzir a elevada compactação de solo devida ao trânsito de máquinas pesadas (Figura 6b). Para garantir condições de fertilidade compatíveis com o desenvolvimento das plantas escolhidas, foram realizadas as seguintes correções de solo: (a) 10,4 t ha<sup>-1</sup> de calcário, incorporadas com grade de discos (Figura 6c); (b) 900 kg/ha da fórmula 5-20-20; (c) 40 kg de N por hectare na forma de sulfato de amônio, para suprir nitrogênio em cobertura.

Na área experimental de campo (Figura 6d), dois experimentos com adaptação de espécies vegetais foram colocados na mesma área de forma alternada (experimentos 1 e 2), com início em épocas diferentes.

a)



b)



c)



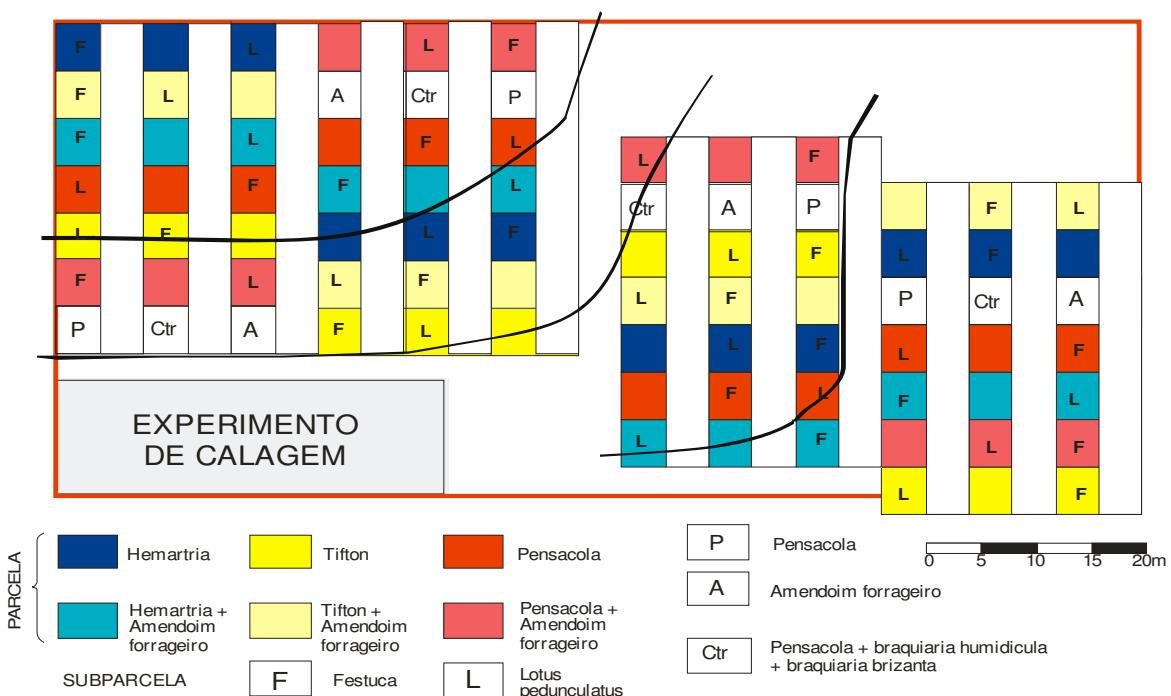
d)



**Figura 6:** Processos que envolveram a instalação do experimento: (a) solo construído escarificado; (b) rompimento da camada compactada do solo construído após escarificação; (c) correção do solo construído com calcário; (d) área experimental implantada.

O experimento 1 foi implantado entre o final de 2003 e início de 2004 (de setembro de 2003 a janeiro de 2004). Foi concebido segundo um delineamento experimental em blocos ao acaso com parcelas subdivididas e quatro repetições (quatro blocos). Os materiais de verão foram dispostos nas parcelas e as espécies de inverno nas subparcelas. Nas parcelas foram utilizadas gramíneas perenes de verão, com período estival no inverno, solteiras ou consorciadas com Amendoim Forrageiro (*Arachis pintoi*), compondo os seguintes tratamentos: T1-Hemártria (*Hemartria altissima* (Poiz.) Staff & C. E. Huhh), T2-Tifton (*Cynodon dactylon* (L.) Pers. cv. Tifton 85) + Amendoim Forrageiro (*Arachis pintoi*), T3-Hemártria (*Hemartria altissima* (Poiz.) Staff & C. E. Huhh) + Amendoim Forrageiro (*Arachis pintoi*), T4-

Pensacola (*Paspalum notatum* Flüggé Var. *sausae* Pacodi cv. Pensacola), T5-Tifton (*Cynodon dactylon* (L.) Pers. cv Tifton 85), T6-Pensacola (*Paspalum notatum* Flüggé Var. *sausae* Pacodi cv. Pensacola)+ Amendoim Forrageiro (*Arachis pintoi*), T7-Pensacola (*Paspalum notatum* Flüggé Var. *sausae* Pacodi cv. Pensacola)+ Braquiária humidícola (*Brachiaria humidicula*) + braquiária brizanta (*Brachiaria brizantha*), + Amendoim Forrageiro (*Arachis pintoi*) (Figura 7).



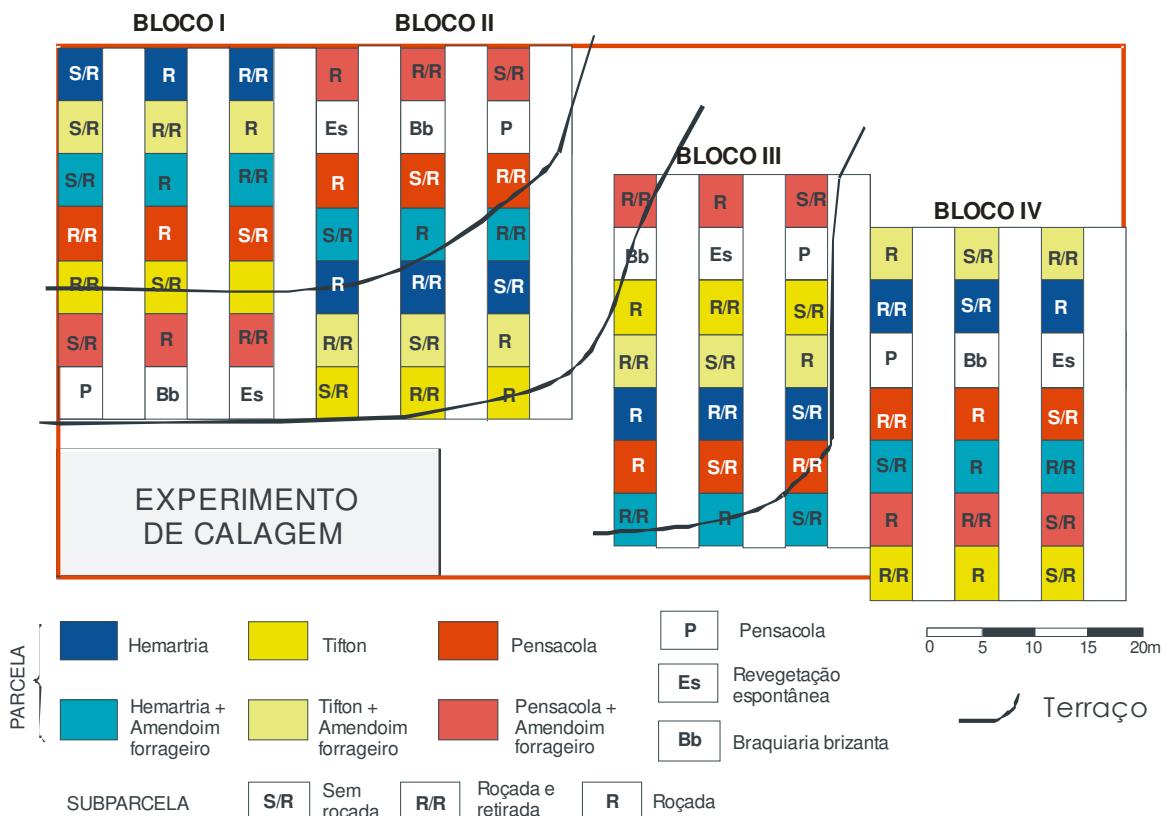
**Figura 7:** Localização das áreas experimentais e delineamento do Experimento 1

O Amendoim Forrageiro, apesar do desenvolvimento inicial, ao longo do tempo teve seu crescimento reduzido, praticamente desaparecendo por completo no terceiro ano (2006). Com isso, o experimento ficou reduzido apenas às gramíneas Hemártria (T1), Grama Tifton (T4) e Pensacola (T5), essa última apresentando um desenvolvimento muito lento até o terceiro ano. No tratamento controle com consórcio apenas se estabeleceu a Braquiária brizanta (T7).

Diante desta situação, em 2008 decidiu-se por adotar um novo sistema, introduzindo o manejo da roçada nas subparcelas (Figura 8).

A área do experimento 2, adjacente/intercalada com o experimento 1, foi alvo de várias tentativas de implantação, sempre com culturas com propagação por sementes. Em maio/2004 foram escolhidos tratamentos compostos por uma gramínea perene de inverno (*Festuca – Festuca arundinacea* (L.) cv. Tacuale) e/ou

leguminosa perene de inverno (El Rincón [faltou]), semeadas nas subparcelas, combinados com espécies perenes de verão implantadas nas parcelas por sementes no período verão 2004/5 (Capim Tanzânia – *Panicum maximum* Jacq. Cv. Tanzânia, Capim de Rhodes – *Chloris gayana* Hunth e Capim Setária – *Setaria sphacelata* (Schumach.) Stapf C. E. Huhh). Devido às estiagens no verão 2004/5 e 2005/6 as plantas não se estabeleceram.

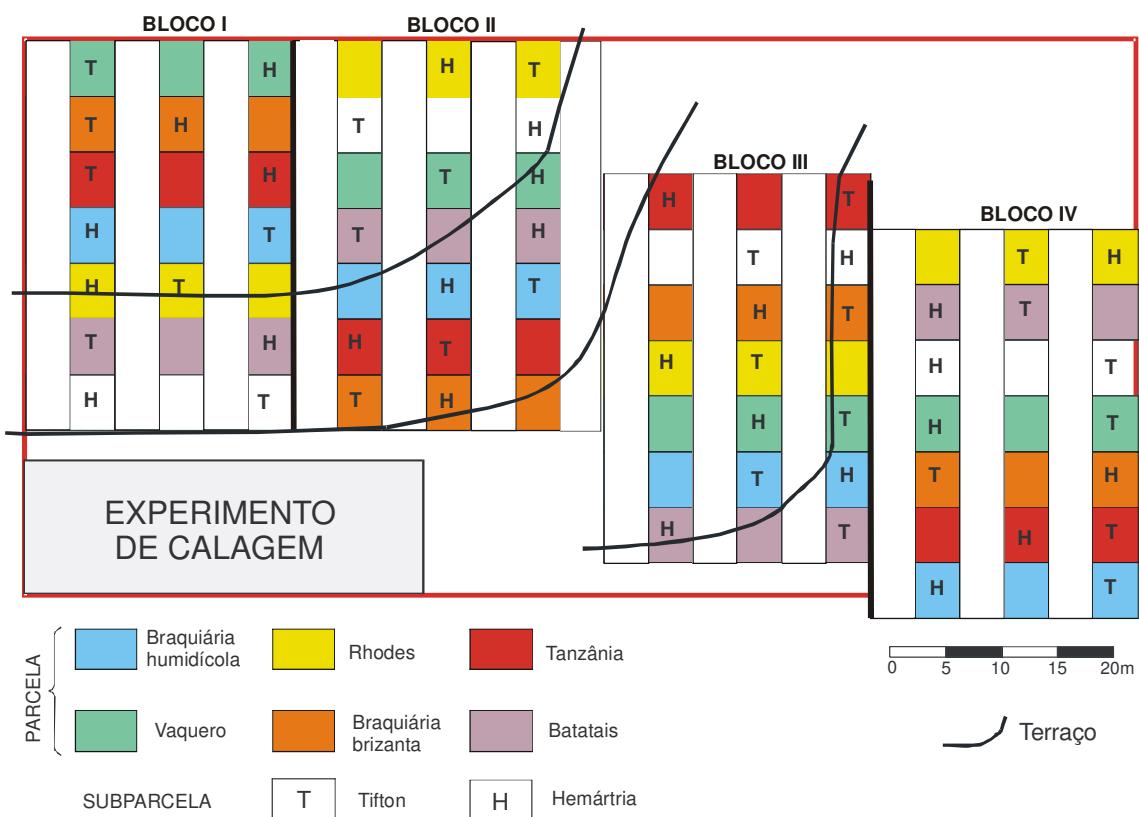


**Figura 8:** Experimento 1 com sistemas de manejo nas subparcelas: com ou sem rocada.

No inverno de 2006 iniciou-se uma nova tentativa composta por três gramíneas perenes de inverno (*Festuca* – *Festuca arundinacea* (L.) cv. Tacuahe, *Dactylis* – *Dactylis glomerata* (L.) e Capim Lanudo – *Holcus lanatus*) consorciadas ou não com uma leguminosa perene de inverno (El Rincón). Estes tratamentos foram combinados com espécies perenes de verão (*Aruana* – *Panicum maximun* Jacq. Cv. aruana, Estilozantes – *Stylosanthes capitata* Vogel cv. Campo grande e sem plantas) implantadas nas subparcelas por sementes em 03 de novembro de 2006. No inverno as culturas sofreram constantes ataques de lebres e o verão foi novamente seco, inviabilizando novamente a tentativa com introdução inicial com culturas de inverno.

No verão 2007 iniciou-se um novo experimento, dessa vez somente com culturas de verão, propagadas por sementes (Capim vaquero: *Cynodon dactylon*; Braquiaria brizanta: *Brachiaria brizantha*; Tanzânia: *Panicum maximum*; Braquiaria humidícola: *Brachiaria humidicola*; Capim de Rhodes: *Clores gayana*; Grama batatais: *Paspalum notatum Flüggé*), em consórcio nas subparcelas com Hemártria (*Hemartria altissima* (Poiz.) Staff & C. E. Huhh) e Grama Tifton (*Cynodon dactylum* (L.) Pers. cv Tifton 85), seguindo delineamento aos moldes do experimento 1 (Figura 9). A Grama Tifton e a Hermatria foram os tratamentos do experimento 1 que melhor se adaptaram ao solo construído, apresentando os melhores resultados na recuperação dos atributos físicos.

Os tratamentos com Capim de Rhodes e com Grama batatais apresentaram um desenvolvimento insatisfatório, provavelmente devido à baixa qualidade das sementes. Os tratamentos consorciados também não se estabeleceram, até o momento. Por essa razão apenas as gramíneas solteiras foram avaliadas no experimento 2.



**Figura 9:** Disposição dos tratamentos do Experimento 2 na área experimental do Departamento de Solos da UFPEL.

### **2.5.3. Resultados obtidos no experimento 1**

Analizando os dados de Franco (2006), na Tabela 2, observa-se que a maior concentração de agregados estáveis em água e os maiores valores de DMP foram observados na camada subsuperficial do solo construído, indicando, segundo a autora, que estes resultados ainda estariam relacionados ao efeito do trânsito de máquinas pesadas por ocasião da construção do solo. Pois, sabe-se que o tráfego intenso de equipamentos de grande porte para a construção do solo, em umidade inadequada, pode formar camadas mais compactadas em profundidade.

Segundo a autora, em geral a menor densidade do solo e a maior porosidade total apresentada por todos os tratamentos na camada superficial pode estar relacionada às operações realizadas por ocasião da instalação do experimento no solo construído, mediante uma escarificação para descompactar o solo e gradagem para incorporar o calcário. Ainda justifica o pouco efeito das plantas pelo pouco tempo de estabelecimento das mesmas na área (5 meses após a construção do solo).

Quando analisados os dados obtidos por Gonçalves (2008) comparando-os com os dados de Franco (2006), observa-se que houve uma desagregação na camada subsuperficial do solo construído, pois as maiores concentrações de agregados passaram da classe 4,76-2,00 para a de 1,00-0,25mm. Em relação ao diâmetro médio ponderado observa-se que houve uma redução numérica nos valores, entretanto, os maiores valores ainda continuam a ser observados na camada subsuperficial do solo construído, refletindo o efeito do trânsito de máquinas pesadas por ocasião da construção do solo em meados de 2003.

Miola (2010) realizou avaliações de parâmetros hídricos (intervalo hídrico ótimo – IHO) e compressivos (pressão de pré-consolidação – PPC) no solo construído cultivado com Hermatria, Pensacola, Tifton e Braquiaria (Tabela 2).

O IHO é um índice que está diretamente relacionado com a estrutura do solo, integrando condições do solo relacionadas ao crescimento das plantas. Isto é, é um parâmetro que descreve a amplitude hídrica do solo incorporando as limitações relacionadas com a aeração, resistência do solo à penetração e o potencial matricial do solo (MIOLA, 2010).

**Tabela 2:** Resultados observados em diferentes pesquisas no Experimento 1, obtidos nos anos de 2006, 2008, 2010 e 2011.

Atributos Físicos	Franco (2006) *	Gonçalves (2008) **	Miola (2010) ***	Leal (2011) ****
<b>Agregados estáveis em água</b>	Sem ≠ significativas entre tratamentos em ambas as camadas do solo construído. Maior [ ] na classe de 1,00-0,25 mm (32,67%), em todos os tratamentos, na camada de 0,00-0,10m. Na camada de 0,10-0,20m a maior [ ] ocorreu na classe de 4,76-2,00mm (26,68%).	Não houve ≠ significativas entre tratamentos para ambas as camadas. A maior [ ] deu-se na classe 1,00-0,25mm (valores médios de 40,13% na camada de 0,00-0,10m e 35,73% na camada de 0,10-0,20m).	-----	-----
<b>Diâmetro Médio Ponderado</b>	Os tratamentos não apresentaram ≠ significativas entre si em ambas as camadas do solo construído. Na camada de 0,00-0,10m observou-se um menor valor de DMP (1,98 mm) quando comparado com a camada de 0,10-0,20m (2,93 mm).	Não houve ≠ significativas entre tratamentos para ambas as camadas. Menores valores de DMP na camada superficial (média de 1,43mm) quando comparados com a camada subsuperficial (média de 1,76mm).	-----	-----
<b>Densidade do solo</b>	Houve ≠ significativas entre tratamentos na camada de 0,00-0,10m, destacando-se a Braquiária com menor valor ( $1,40 \text{ Mg.m}^{-3}$ ). Já na camada de 0,10-0,20m os tratamentos não apresentaram ≠ significativas entre si, com valores médios de $1,67 \text{ Mg.m}^{-3}$ .	Não houve ≠ significativas entre tratamentos para ambas as camadas. No ano de 2004 para 2007 os valores apresentaram incremento, em ambas as camadas, embora este aumento não tenha sido significativo para alguns tratamentos.	-----	-----
<b>Porosidade total</b>	Braquiária apresentou o maior valor de Pt (47,61%) na camada de 0,00-0,10m. Na camada de 0,10-0,20m não houve ≠ significativas entre tratamentos para variável Pt (valores médios de 41,41%).	Não houve ≠ significativas entre tratamentos para ambas as camadas. No ano de 2004 para 2007 os valores apresentaram incremento.	-----	-----
<b>Macroporosidade</b>	Braquiária apresentou o maior volume de Ma (16,05%) na camada de 0,00-0,10m e diferiu das demais espécies na camada de 0,010-0,020m, apresentando o maior valor (8,17%).	Não houve ≠ significativas entre tratamentos para ambas as camadas. No ano de 2004 para 2007 os valores apresentaram incremento.	-----	-----
<b>Microporosidade</b>	Não houve diferenças significativas entre tratamentos para ambas as camadas. Os valores médios de Mi na camada de 0,00-0,10m foram de 32,14% e na camada de 0,10-0,20m de 34,95%.	Não houve ≠ significativas entre tratamentos para ambas as camadas. No ano de 2004 para 2007 os valores apresentaram incremento.	-----	-----
<b>Carbono Orgânico</b>	Não houve ≠ significativas entre tratamentos para ambas as camadas. Valores médios de $5,34 \text{ g.kg}^{-1}$ na 0,00-0,10m e $5,18 \text{ g.kg}^{-1}$ na camada de 0,10-0,20m.	Não houve ≠ significativas entre tratamentos para ambas as camadas. Houve um pequeno incremento (valores médios de $7,38 \text{ g.kg}^{-1}$ na camada de 0,00-0,10m e $6,20 \text{ g.kg}^{-1}$ na camada de 0,10-0,20m).	-----	Os tratamentos elevaram os estoques de nitrogênio total, de carbono orgânico total e de carbono nas frações físicas da matéria orgânica na camada superficial do solo construído. A Hemártria e a Braquiária proporcionaram maiores aumentos de ácido humíco no solo, elevando o grau de humificação da matéria orgânica. O estoque de carbono nas frações leve livre e leve oclusa e o índice de manejo de carbono do solo construído e vegetado com Hemártria e com Braquiária Brizantha apresentaram teores de $3,09$ e $3,21 \text{ g kg}^{-1}$ respectivamente
<b>Intervalo Hídrico Ótimo</b>	-----	-----	O solo construído cultivado com Hemártria apresentou o melhor valor de IHO, pois os valores de densidade do solo critica de $1,35$ e $1,45 \text{ Mg m}^{-3}$ (valores ligados a interseção do limite superior considerando respectivamente o $\theta_{CC}$ ( $0,006 \text{ MPa}$ ) e $\theta_{CP}$ ( $0,01; 0,033 \text{ MPa}$ ) com o $\theta_{RP}$ ) são maiores que a Ds média apresentada por este tratamento ( $1,32 \text{ Mg.m}^{-3}$ ).	-----
<b>Pressão de Pré-Consolidação</b>	-----	-----	O menor valor da pressão de pré-consolidação foi apresentado pelo tratamento Hermatária (71 kPa) e os maiores valores apresentados pela Pensacola (120 kPa), Tifton (120 kPa) e Braquiária (118 kPa), indicando o melhor desempenho desta espécie vegetal na reestruturação do solo construído.	-----

\*coletas em maio de 2004; \*\* coletas em maio de 2007; \*\*\* coletas em 2010; \*\*\*\* coletas em outubro de 2009

O IHO é calculado pela diferença entre o limite superior e o inferior de umidade. O limite superior é determinado pelo menor valor do conteúdo de água comparando-se a umidade na capacidade de campo ( $\theta_{CC}$ ) com a umidade na porosidade de aeração de 10% ( $\theta_{PA}$ ), enquanto o limite inferior é o maior valor entre a umidade no ponto de murcha permanente ( $\theta_{PMP}$ ) e a umidade no valor crítico de resistência mecânica à penetração ( $\theta_{RP}$ ).

A compressibilidade do solo é definida como a resistência do solo quando submetido a uma carga externa. O entendimento do processo de compressão envolve a avaliação das curvas de compressão uniaxial. Conforme Dias Junior e Pierce (1996) a curva de compressão simula as reduções de volume do solo, representando graficamente a relação entre o logaritmo da pressão aplicada e o índice de vazios ou a densidade do solo. A pressão de preconsolidação divide essa curva em duas partes: uma região de deformações pequenas, elásticas e recuperáveis, chamada de curva de compressão secundária, e outra região, de deformações plásticas e não recuperáveis, chamada de curva de compressão virgem.

#### **2.5.4. Resultados obtidos no experimento 2**

No intuito de avaliar o efeito de diferentes gramíneas (Capim vaquero, Braquiaria brizanta, Tanzânia, Braquiaria humidicola, Hermatia e Tifton) na recuperação dos parâmetros físicos em Candiota, Stumpf (2011) coletou amostras de solo em outubro de 2009 (1 ano e 9 meses após o plantio das espécies vegetais), nas camadas de 0,00-0,05m e 0,10-0,15m e comparou seus resultados com uma testemunha (solo construído sem plantas de cobertura). Os resultados observados foram os seguintes:

a) Quando avaliado a porcentagem de macroagregados entre os tratamentos e a testemunha (solo construído sem plantas de cobertura) observou-se que todos diferiram significativamente, com destaque para a Braquiaria humidicola, Hermatia e Braquiaria brizanta que apresentaram os melhores valores (77,08%, 75,51% e 75,26% respectivamente), na camada de 0,00-0,05m. Na camada de 0,10-0,15m todos os tratamentos também diferiram significativamente da testemunha, com destaque para a Hermatia que apresentou o maior valor (85,92%).

No que diz respeito à porcentagem de microagregados, todos os tratamentos foram significativamente menores em relação à testemunha, em ambas as camadas do solo construído.

Quando avaliado o DMP, observou-se que todos os tratamentos apresentaram diferença significativa em relação a testemunha (solo construído sem plantas de cobertura), com destaque para a Braquiaria brizanta que apresentou o maior valor (2,00mm) na camada de 0,00-0,05m e a Braquiária humidicola na camada de 0,10-0,15m (2,38mm).

b) Na camada de 0,00-0,05m a maioria dos tratamentos apresentou diferenças significativas em relação à testemunha (solo construído sem plantas de cobertura) quando avaliados os valores de Ds e Pt. As Braquiarias brizanta e humidicola se destacaram das demais, pois apresentaram respectivamente o menor valor de Ds ( $1,39 \text{ Mg.m}^{-3}$ ) e o maior valor de Pt (47,41%). Na camada de 0,10-0,15m a maioria dos tratamentos também apresentou melhores resultados de Ds e Pt em relação à testemunha (solo construído sem plantas de cobertura). O capim vaquero apresentou o menor valor de Ds ( $1,56 \text{ Mg.m}^{-3}$ ) e o maior valor de Pt (43,30%).

Em relação à Ma, na camada de 0,00-0,005m o tratamento com Braquiária humidicola apresentou a única diferença significativa em relação ao solo construído sem plantas de cobertura (testemunha), mostrando um maior valor (10%). Na camada de 0,10-0,15m o tratamento com Capim vaquero foi o único a apresentar diferenças significativas em relação a testemunha, mostrando também um maior valor (8,37%).

Para a variável Mi, os tratamentos não apresentaram diferenças significativas em relação testemunha, em ambas as camadas do solo construído.

Levando em consideração os estudos já realizados até o momento na área experimental de Candiota e a relevância de se obter um melhor entendimento sobre o processo de recuperação do solo construído, este trabalho buscou responder questões relacionadas ao comportamento das diferentes gramíneas na recuperação dos atributos físicos do solo construído durante o período de seis anos de avaliação.

Logo, a dissertação foi elaborada na forma de dois artigos que serão apresentados a seguir, intitulados como:

1. Efeito de gramíneas perenes de verão na agregação de um solo construído em área de mineração de carvão em Candiota/RS após seis anos;
2. Avaliação temporal de atributos físicos de um solo construído cultivado com diferentes gramíneas perenes de verão em área de mineração de carvão no município de Candiota/RS.

## **ARTIGO 1: EFEITO DE GRAMÍNEAS PERENES DE VERÃO NA AGREGAÇÃO DE UM SOLO CONSTRUÍDO EM ÁREA DE MINERAÇÃO DE CARVÃO EM CANDIOTA/RS APÓS SEIS ANOS**

### **3.1 RESUMO**

O carvão, embora seja um componente importante da matriz energética de vários países, é criticado devido aos problemas ambientais gerados como a emissão de gases de efeito estufa na atmosfera, bem como questões relacionadas à acidificação do solo e da água devido à drenagem ácida. No entanto, para o Brasil este recurso se torna estratégico para a matriz energética do país devido à vulnerabilidade das condições hidrológicas em determinadas regiões. A maior reserva carbonífera brasileira localiza-se em Candiota/RS, onde a extração de carvão se desenvolve a céu aberto com reflexos negativos sobre a topográfica, hidrologia, solo e vegetação da área. Este trabalho objetivou avaliar a influência de diferentes gramíneas na recuperação da agregação do solo construído ao longo de seis anos. Os tratamentos avaliados foram: T1 - Hemártria (*Hemarthria altissima*), T4 - Pensacola (*Paspalum notatum*), T5 - Tifton (*Cynodon dactylon*), T7 - Braquiária (*Brachiaria brizantha*). Coletaram-se amostras deformadas em junho de 2010 nas camadas de 0,00-0,10m e 0,10-0,20m, para as determinações da porcentagem de macro e microagregados e diâmetro médio ponderado (DMP). Com o objetivo de analisar a influência das diferentes plantas de cobertura na agregação do solo construído ao longo do tempo, compararam-se os dados coletados em maio de 2004, maio de 2007 e junho de 2010 (5 meses, 3 anos e 5 meses, 6 anos e 6 meses após o estabelecimento do experimento, respectivamente). Também se compararam os resultados de cada tratamento obtido em 2010, com uma testemunha (solo construído sem plantas de cobertura). Ao longo dos seis anos conclui-se que houve ação positiva das quatro espécies de gramíneas na recuperação da agregação do solo construído, com destaque para a Braquiária e a Pensacola, principalmente na camada de 0,00 – 0,10m. Houve incremento do teor de carbono orgânico ao longo do tempo, entretanto, isto não se refletiu em aumento do DMP.

PALAVRAS-CHAVES: mineração a céu aberto; compactação; plantas de cobertura.

### 3.2. ABSTRACT

Although it is considered an important component of the energy matrix in several countries, coal is criticized on account of the environmental problems it causes, such as the emission of greenhouse gases in the atmosphere and other issues related to the acidification of soil and water because of acid drainage. In Brazil, however, this resource becomes strategic for the country's energy matrix due to the vulnerability of the hydrologic conditions in certain regions. The largest Brazilian coal reserve is located in the municipality of Candiota / RS, where coal is mined by open pit methods with negative effects on the topography, hydrology, soil and vegetation of the area. This study aimed to evaluate the influence of different grasses in the rehabilitation of a constructed soil in the course of six years. The treatments studied were: T1 – Hemarthria Grass (*Hemarthria altissima*), T4 – Pensacola Grass (*Paspalum notatum*), T5 – Tifton Grass (*Cynodon dactylon*), T7- Braquiaria Grass (*Brachiaria brizantha*). Disturbed soil samples were collected in June 2010 from the layers of 0.00-0.10 m and 0.10-0.20 m to determine the percentage of macro and micro aggregates and mean weight diameter (MWD). In order to evaluate the influence of different cover crops on the constructed soil aggregation in the course of time, it was compared the data collected in May 2004, May 2007 and June 2010 (5 months, 3 years and 5 months, 6 years and 6 months after the onset of the experiment, respectively). The results obtained from each treatment in 2010 were also compared with a control (constructed soil without cover crops). Over the six years it was concluded that there was positive action of four species of grasses in the recovery of soil aggregation built, highlighting the Brachiaria Grass and Pensacola Grass, mainly in the layer from 0.00 to 0.10 m. There was an increase of organic carbon over time, however, this increase was not reflected in the MWD.

KEYS WORDS: open pit mining; compression; cover plants.

### **3.3. INTRODUÇÃO**

O consumo de energia é um dos principais indicadores do desenvolvimento econômico e do nível de qualidade de vida de qualquer sociedade, refletindo o ritmo de atividade dos setores industrial, comercial e de serviços. Dentre as matrizes energéticas disponíveis, o carvão é a fonte mais utilizada para geração de energia elétrica no mundo, respondendo por 41% da produção total. No Brasil, o minério representa aproximadamente 1,5% da matriz da energia elétrica (ANEEL, 2008).

O carvão, embora seja um componente importante da matriz energética de vários países, principalmente no hemisfério norte, não tem uma boa reputação junto aos ambientalistas, sendo quase sempre associado com geração de energia ambientalmente incorreta (PIRES, 2008). As críticas que pesam contra a geração de energia a base de carvão é que há emissão de gases de efeito estufa na atmosfera devido a queima de combustível fóssil, contribuindo para o aquecimento global do planeta, bem como questões relacionadas à chuva ácida e a acidificação do solo e da água devido a drenagem ácida, dificultando a reabilitação das áreas mineradas.

A matriz energética brasileira é composta primordialmente de usinas hidrelétricas, que proporcionam uma fonte de energia elétrica de baixo custo devido à abundância de recursos hídricos (ANEEL, 2008). No entanto, esta dependência torna o sistema vulnerável às condições hidrológicas e há ainda fatores que geram impactos negativos na implantação de novas hidrelétricas, como a dificuldade na obtenção de licenças ambientais e o longo prazo necessário para construção.

A tendência mundial de buscar fontes diversificadas de energia deve aumentar a participação do carvão na matriz energética brasileira, sendo que a previsão da Eletrobrás é que passe dos atuais 1,5% para 5,35% até 2015 (PIRES, 2008). Para atender tal demanda, a Região da Campanha no Estado do Rio Grande do Sul, a qual engloba o município Candiota, apresenta-se como importante local para expansão, pois possui a maior reserva carbonífera brasileira, abrangendo uma área de 2.500 Km<sup>2</sup> (FRITZ, 2004), representando cerca de 38% das reservas nacionais (ANEEL, 2008).

Na mina de Candiota a extração de carvão se desenvolve a céu aberto, com a retirada dos horizontes A e/ou B do solo original, seguida de remoção das rochas (arenitos e siltitos) assentadas sobre as lentes de carvão. Em seguida, os estéreis

(rochas e camadas de carvão não aproveitadas) retornam à cava aberta, sendo depositados em forma de cones. Posteriormente, estes são nivelados por trator de esteira e há a reposição da camada superficial do solo original, retirada da frente de lavra do carvão, finalizando o processo de construção do solo.

O processo de extração de carvão a céu aberto provoca uma intensa alteração topográfica e hidrológica da área, com supressão da vegetação local, tornando o ambiente degradado. Consequentemente, os solos construídos apresentam baixo teor de matéria orgânica, baixa qualidade estrutural e redução da atividade microbiana (USSIRI et al., 2006) limitando o estabelecimento da vegetação e restringindo a restauração dos solos minerados.

Entre as alterações causadas no ambiente a compactação gerada durante a construção do solo é uma das mais expressivas, sendo responsável por mudanças significativas na estrutura do solo, com redução da porosidade total, da continuidade de poros, da distribuição do seu diâmetro e sua estabilidade (RICHARD et al. 2001; CHINN & PILLAI, 2008).

Segundo Chaves & Calegari (2001) a agregação pode ser definida como a união de partículas (argila – íon – matéria orgânica, areia e silte) em uma unidade estrutural do solo, sendo sua estabilidade caracterizada como a resistência a uma ação mecânica degradante, particularmente da água. Assim, consideram-se solos bem estruturados aqueles que conseguem manter a estabilidade de seus agregados, mesmo sob mudanças abruptas de umidade e chuvas intensas, minimizando assim processos erosivos (CAMARGO & ALLEONI, 1997).

A cobertura do solo, o aumento da atividade microbiológica e o aumento da matéria orgânica e sua menor exposição à decomposição pelos microorganismos aumentam a estabilidade estrutural, tendo relação direta com a habilidade de um solo em resistir à compactação (REINERT et.al., 2006).

O incremento da agregação é expresso pela estabilidade dos agregados, ocorrendo independente do tipo de solo (REINERT et.al., 2006). Deve-se ressaltar, no entanto, que o aumento da estabilidade não necessariamente está associado à melhoria da qualidade dos agregados, uma vez que esses podem se apresentar compactados, com predominância de microporos (CARPENEDO & MIELNICZUK, 1990).

De acordo com Wendling et al. (2012) a matéria orgânica é o principal agente de formação e estabilização dos agregados. A agregação pode ser avaliada por um

método que determine a distribuição do tamanho de agregados em água em cinco ou seis classes e por um índice de estabilidade como o diâmetro médio ponderado dos agregados, que tem estreita correlação com a perda de solo ou erosão hídrica (KEMPER & CHEPIL, 1965).

O DMP, ou a presença de agregados grandes, pode refletir a resistência do solo à erosão, pois quanto maior for o agregado, maiores serão os espaços porosos entre agregados, aumentando a infiltração de água ao longo do perfil (CASTRO FILHO et al. 1998).

Os fatores que determinam a formação da estrutura do solo são relacionados com a natureza e procedência do material de origem, com os processos físicos e bioquímicos de formação do solo, com o clima, a vegetação e os microorganismos (GUERRA, 2000). Portanto, o empilhamento das camadas litólicas, a mistura dos horizontes e a implantação da vegetação, promoverá um novo processo de pedogênese no solo construído, afetando suas características físicas, químicas e biológicas ao longo do tempo, até que este volte a cumprir uma função no ambiente. No entanto, o estabelecimento de plantas de cobertura adequadas a este ambiente pode reduzir o tempo necessário para recuperação de áreas degradadas.

A utilização de plantas de cobertura capazes de produzir grande quantidade de fitomassa, cobrindo o solo rapidamente e que possuam sistema radicular denso e profundo, pode melhorar a qualidade estrutural do solo e promover a formação de canais que melhorem o movimento da água e a difusão dos gases ao longo do perfil do solo, além de servirem de caminhos para a penetração radicular de culturas subsequentes (CARDOSO et al., 2003). Mais especificamente, as gramíneas favorecem a agregação do solo na camada superficial (ANDRADE et al., 2009), devido à rusticidade e ao rápido desenvolvimento inicial (VOLK & COGO, 2008) se destacando como plantas recuperadoras dos atributos físicos (SILVA & MIELNICZUK, 1997).

Neste contexto, o presente trabalho visou testar a hipótese de que gramíneas perenes de verão alteram positivamente a agregação do solo construído. Logo, o objetivo do trabalho visa analisar a influência de quatro espécies de gramíneas na recuperação da agregação de um solo construído, ao longo do tempo, em uma área de mineração de carvão em Candiota – RS.

### 3.4. MATERIAL E MÉTODOS

A área de estudo se localiza na mina de extração de carvão no município de Candiota/RS, pertencente à Companhia Riograndense de Mineração (CRM), situada nas coordenadas geográficas 31°33'55"S e 53°43'30"W. O município está situado a 400 km da cidade de Porto Alegre e 140 km de Pelotas. De acordo com a classificação de Wilhelm Köppen, o clima da região é do tipo Cfa, ou seja, subtropical úmido.

O solo construído da área experimental caracteriza-se pela mistura de horizontes, sendo predominante o horizonte B de um Argissolo Vermelho Eutrófico típico (EMBRAPA, 2006). A granulometria do solo construído na camada de 0,00-0,20m apresenta 326,8 g.kg<sup>-1</sup> de areia, 207,4 g.kg<sup>-1</sup> de silte e 465,4 g.kg<sup>-1</sup> de argila (FRANCO, 2006), definindo sua textura como argilosa.

O solo foi construído no início de 2003 e o experimento instalado em novembro/dezembro de 2003, em delineamento de blocos ao acaso com parcelas de 20m<sup>2</sup> (5m x 4m), com quatro repetições. Os tratamentos avaliados foram: T1 - Hemártria (*Hemarthria altíssima*), T4 - Pensacola (*Paspalum notatum*), T5 - Grama Tifton (*Cynodon dactylon*), T7- Braquiária brizanta (*Brachiaria brizantha*).

Coletaram-se amostras deformadas em junho de 2010 (8 repetições por tratamento) nas camadas de 0,00-0,10m e 0,10-0,20m. Para as determinações da distribuição de agregados estáveis em água em diferentes classes de tamanho e do diâmetro médio ponderado (DMP) foram utilizadas amostras secas ao ar, passadas na peneira de malha de 9,52 mm, com base no peneiramento úmido, seguindo o princípio do método descrito por Kemper & Rosenau (1986) e adaptado por Palmeira et al. (1999), que utiliza o aparelho de oscilação vertical de Yoder (1936). Os intervalos das classes foram: C1: 9,52-4,76mm; C2: 4,76-2,00mm; C3: 2,00-1,00mm; C4: 1,0-0,25mm; C5: 0,25-0,105mm e C6: < 0,105mm. Os agregados foram separados em macroagregados (maiores que 0,25mm) e microagregados (menores que 0,25mm), de acordo com Tisdall & Oades (1982).

A argila dispersa em água foi determinada seguindo o método da pipeta, descrito por Gee & Bauder (1986), onde o correspondente a 10 g de solo seco foram colocadas em um vidro de 1000 mL, correspondente a um vidro de café solúvel. Adicionou-se 250 mL de água destilada, o qual foi submetido à agitação lenta, por

16 horas em um agitador do tipo vai-vém. Após foram realizados os demais procedimentos de análise.

Para a determinação do carbono orgânico utilizou-se o método Walkley-Black, em amostras deformadas, passadas em peneira de 2mm, com três repetições, segundo Tedesco et al. (1995).

Com a finalidade de avaliar a influência das diferentes plantas de cobertura na agregação do solo construído ao longo do tempo, compararam-se os dados coletados em maio de 2004 (FRANCO, 2006), maio de 2007 (GONÇALVES, 2008) e junho de 2010 (5 meses, 3 anos e 5 meses, 6 anos e 6 meses após o estabelecimento do experimento, respectivamente). Também se compararam os resultados de cada tratamento obtido em 2010, com uma testemunha (solo construído sem plantas de cobertura – SCSP) localizada ao lado da área experimental, caracterizada por não possuir plantas de cobertura em sua superfície.

Os dados obtidos em 2010 foram submetidos ao teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro, e para avaliar a influência das diferentes plantas de cobertura ao longo do tempo foram utilizados os dados obtidos por Franco (2006) e Gonçalves (2008) cujas coletas de solo foram realizadas 5 meses (2004) e 41 meses (2007), respectivamente, após a instalação do experimento. A comparação de médias entre os anos foi realizada através da análise de medidas repetidas (*proc.mixed*) mediante o uso do Software SAS.

Para as comparações feitas entre a testemunha (solo construído sem plantas de cobertura) e cada tratamento foi utilizado o teste t, por se tratarem de amostras independentes.

### **3.5. RESULTADOS E DISCUSSÃO**

Na Tabela 3 apresentam-se os valores de macro e microagregados, diâmetro médio ponderado (DMP) de agregados estáveis em água, carbono orgânico (CO) e argila dispersa em água (ADA), obtidos no solo construído cultivado com diferentes gramíneas perenes de verão, referente à coleta realizada em 2010.

Ao comparar os tratamentos entre si observa-se que não houve diferenças significativas para as porcentagens de macroagregados e microagregados, em ambas as camadas do solo construído, no ano de 2010.

No entanto, quando os tratamentos foram comparados com a testemunha (solo construído sem plantas de cobertura) observam-se diferenças significativas

tanto na camada de 0,00-0,10m como na camada de 0,10-0,20m (Tabela 3). Isto é, todos os tratamentos apresentaram maiores valores de macroagregados e menores valores de microagregados em relação à testemunha (SCSP).

**Tabela 3:** Porcentagem de macroagregados e microagregados, diâmetro médio ponderado (DMP) de agregados estáveis em água, teor de carbono orgânico (CO) e argila dispersa em água (ADA) de um solo construído em área de mineração de carvão submetido ao cultivo de diferentes espécies vegetais nas camadas de 0,00-0,10m a 0,10-0,20m, no ano de 2010.

Tratamentos	Macroagregados ----- ----- (%) -----	Microagregados ----- -----	DMP (mm)	CO ----- ----- (g.kg <sup>-1</sup> ) -----	ADA ----- ----- - -----
<b>0,00-0,10m</b>					
Hermatria	82,21 a*	17,79 a*	2,08 a*	8,50 b*	326,90 a*
Pensacola	82,90 a*	17,10 a*	2,34 a*	7,56 b*	332,20 a*
Tifton	78,85 a*	21,15 a*	1,90 a*	7,78 b*	247,00 b*
Braquiária	80,65 a*	19,35 a*	2,20 a*	10,02 a*	215,40 b*
<b>SCSP</b>	<b>69,04</b>	<b>30,96</b>	<b>1,66</b>	<b>2,94</b>	<b>94,20</b>
<b>0,10-0,20m</b>					
Hermatria	86,25 a*	13,75 a*	2,13 a	5,64 a*	70,90 a
Pensacola	87,94 a*	12,06 a*	2,77 a	5,77 a*	17,60 ab*
Tifton	87,09 a*	12,91 a*	2,31 a	6,79 a*	11,80 b*
Braquiária	88,79 a*	11,21 a*	2,52 a	7,35 a*	15,20 ab*
<b>SCSP</b>	<b>77,89</b>	<b>22,11</b>	<b>2,47</b>	<b>2,05</b>	<b>96,30</b>

Letras minúsculas iguais na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade; SCSP: solo construído sem plantas de cobertura; \* = indica diferença significativa entre cada tratamento e a testemunha (SCSP), pelo teste t ( $p < 0,05$ ).

A maior porcentagem de macroagregados em relação à testemunha se justifica pela ação positiva das plantas de cobertura através da maior cobertura vegetal sobre a superfície do solo construído da área experimental, minimizando a desagregação das partículas pela ação da chuva, bem como a possível ação mecânica e biológica das raízes na formação de novos agregados e na manutenção daqueles formados por compressão durante a construção do solo.

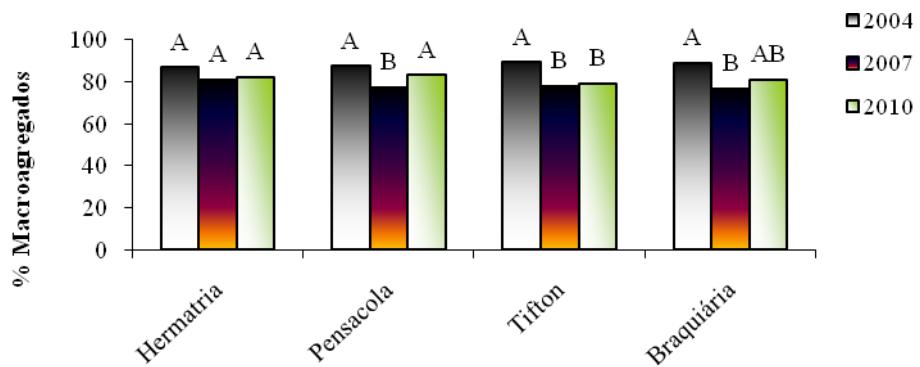
Com relação aos microagregados, o fato da testemunha apresentar os maiores valores está relacionado à própria falta de cobertura vegetal, proporcionando menor agregação além de deixar o solo mais suscetível à ação de intempéries climáticas (Tabela 3). De acordo com Campos et al. (1999), solos com uma boa cobertura diminuem a ação direta das gotas de chuva, favorecendo o

desenvolvimento do sistema radicular e contribuindo para a criação de um ambiente mais favorável à agregação.

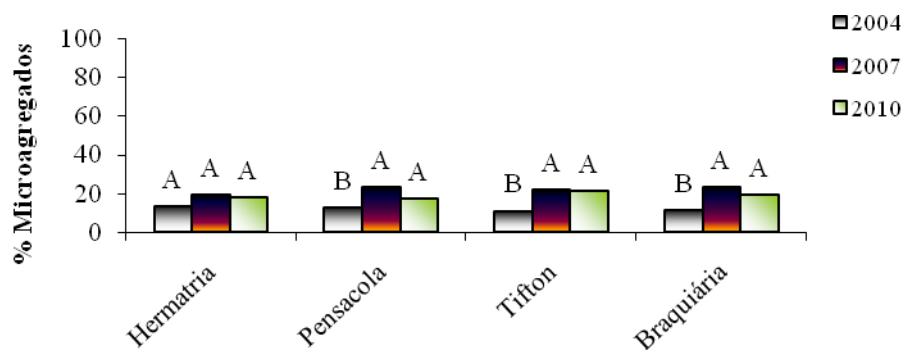
Ao se analisar os valores referentes à agregação, nas diferentes camadas do solo construído, observa-se uma menor porcentagem de macroagregados na camada de 0,00-0,10m em relação à camada de 0,10-0,20m para todos os tratamentos (Tabela 3). Possivelmente este resultado seja um reflexo da escarificação realizada durante a implantação do experimento, somado à ação desagregadora da chuva sobre a massa coesa escarificada até o estabelecimento completo das plantas de cobertura, bem como dos tratos culturais (capinas) realizados no intuito de controlar plantas invasoras nas parcelas experimentais. Todos os eventos citados anteriormente foram mais intensos na camada superficial (0,00-0,10m) do solo construído.

Ao analisar o efeito do tempo para a porcentagem de macroagregados e microagregados, verifica-se que este foi significativo somente na camada de 0,00-0,10m para os tratamentos Pensacola e Braquiária (Figura 10a, b).

a)

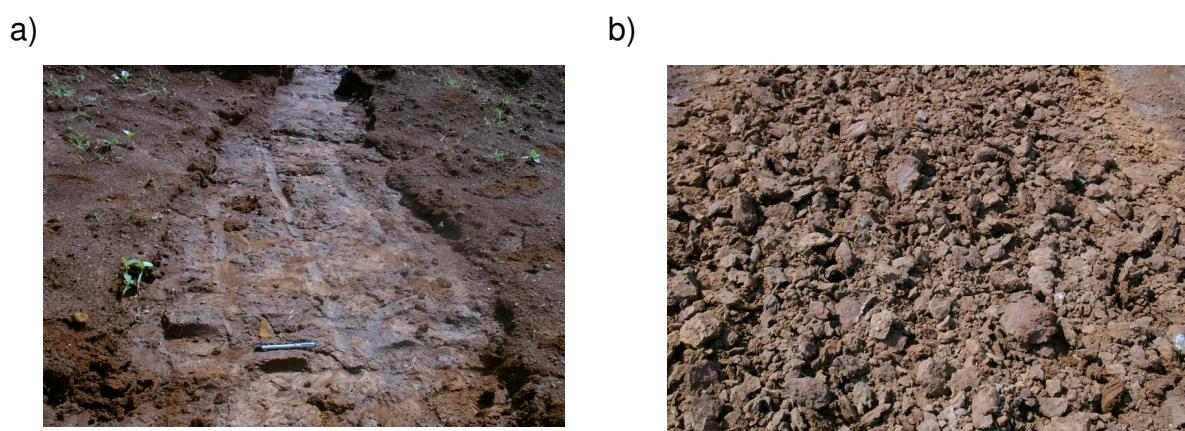


b)



**Figura 10:** Porcentagem de macroagregados (a) e microagregados (b) nos anos de 2004, 2007 e 2010, na camada de 0,00-0,10m do solo construído.

O valor elevado na porcentagem de macroagregados apresentado por todos os tratamentos em 2004, na camada de 0,00-0,10m (Figura 10a), possivelmente não seja devido à ação biológica das plantas de cobertura, mas proporcionado pelo rompimento da camada compactada através da escarificação, realizada 5 meses antes da coleta dos dados. Vale lembrar, que a camada de terra vegetal depositada sobre o estéril é predominantemente formada por horizonte B do solo original. Este por sua vez, naturalmente possui teor de argila mais elevado que os outros horizontes, e os agregados do solo tendem a formar blocos. Logo, durante a construção do solo houve a compressão dessas partículas e/ou blocos, acarretando em uma estrutura laminar coesa, gerada pelo tráfego intenso de máquinas pesadas (Figura 11a). Visualmente observou-se a quebra desta massa coesa com a escarificação, ocasionando agregados de grande diâmetro, mas possivelmente com estrutura interna alterada (Figura 11b).



**Figura 11:** Estrutura laminar coesa gerada pelo tráfego intenso de máquinas pesadas (a) e quebra desta massa coesa com a escarificação (b).

De acordo com Carpenedo & Mielniczuk (1990) o aumento da estabilidade não necessariamente está associado à melhoria da qualidade dos agregados, uma vez que esses podem se apresentar compactados, com predominância de microporos. No solo construído estudado a alta predominância de microporos em relação aos macroporos é observada em ambas as camadas, principalmente na camada subsuperficial (0,10-0,20m) onde a relação era em média de 5,59 : 1; 5,03 : 1 e 4,17 : 1, em 2004, 2007 e 2010, respectivamente. Já na camada superficial do solo construído a relação Mi/Ma era em média de 2,55 : 1; 3,33 : 1, 3 : 1, em 2004, 2007 e 2010, respectivamente (Tabela 4).

**Tabela 4:** Relação da microporosidade em relação à macroporosidade (Mi/Ma) de um solo construído em área de mineração de carvão submetido ao cultivo de diferentes espécies vegetais nas camadas de 0,00-0,10m a 0,10-0,20m, nos anos de 2004, 2007 e 2010.

<b>Tratamentos</b>	----- Camada 0,00-0,10m -----			----- Camada 0,10-0,20m -----		
	<b>2004</b>	<b>2007</b>	<b>2010</b>	<b>2004</b>	<b>2007</b>	<b>2010</b>
Hermatria	2,87	3,35	2,99	5,32	5,21	4,31
Pensacola	2,89	2,96	3,29	6,80	4,42	4,22
Tifton	2,46	3,62	3,01	5,95	6,14	4,83
Braquiária	1,97	3,41	2,80	4,29	4,36	3,31
<b>Media</b>	<b>2,55</b>	<b>3,33</b>	<b>3,00</b>	<b>5,59</b>	<b>5,03</b>	<b>4,17</b>

A diminuição na porcentagem de macroagregados observada na camada de 0,00-0,10m para a maioria dos tratamentos de 2004 para 2007 (Figura 10a) pode ser devido à atuação do sistema radicular das diferentes espécies na quebra dos agregados formados por compressão. De acordo com Vezzani et al. (2008) o crescimento das raízes das plantas é um dos fatores que fragmentam unidades estruturais maiores em unidades menores formando o espaço poroso do solo. Camargo & Alleoni (1997) já mencionavam que as plantas ditas descompactadoras apresentam potencial de rompimento de camadas de impedimento mecânico e que a pressão exercida pelo crescimento radicular pode levar à quebra dos agregados (TISDALL & OADES 1982) quando a raiz consegue exercer pressão suficiente para dilatar o poro cujo diâmetro é menor que o seu (CAMARGO & ALLEONI 1997). O efeito químico será discutido adiante junto ao DMP.

O incremento na porcentagem de macroagregados observados de 2007 para 2010 na camada de 0,00-0,10m, com diferenças significativas para os tratamentos Braquiária e Pensacola, pode ser um indicador da atuação mais efetiva do sistema radicular das plantas de cobertura na reagregação do solo construído após o

rompimento das camadas compactadas somado à atividade biológica de organismos do solo (Figura 10a). As raízes das gramíneas criam uma rede que favorece a estabilidade dos agregados (SILVA et al. 2006), consequentemente há a diminuição da densidade do solo devido à criação de bioporos que favorecem a entrada de ar e a drenagem da água (VASCONCELOS et al. 2010), proporcionando condições adequadas para o desenvolvimento subsequente de espécies vegetais mais exigentes (CAPECHE et al. 2008).

As Braquiárias são gramíneas muito utilizadas como cobertura vegetal e em função disto são normalmente manejadas visando à conservação do solo manutenção e aumento da matéria orgânica, melhorando as propriedades físicas e químicas do solo (CECONI et. al. 2006). A Pensacola possui desenvolvimento um pouco lento, mas aos poucos vai cobrindo a superfície do solo através do crescimento de seus curtos rizomas (PEREIRA 2008), auxiliando, desta forma, na reestruturação do solo.

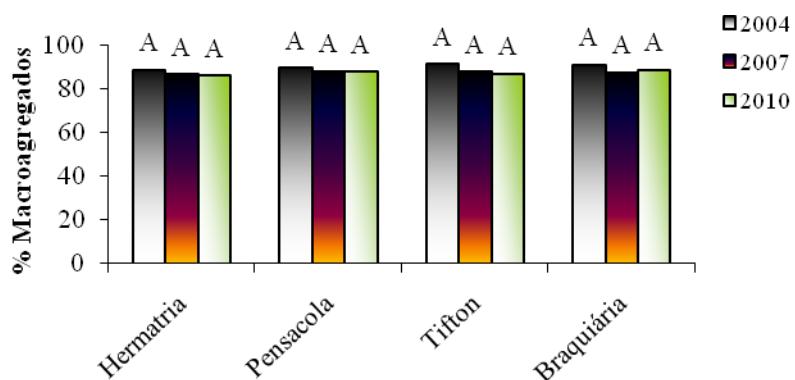
Apesar das outras espécies vegetais ainda não apresentarem valores que indiquem incremento na porcentagem de macroagregados, espera-se que ao longo dos anos estas possam ser mais eficazes na formação de agregados por ação biológica de seu sistema radicular principalmente na camada superficial do solo construído (0,00-0,10m). Segundo Perin et al. (2002) há evidências de que as raízes aceleram a agregação, tanto pela liberação de exsudados orgânicos como pela compressão das partículas e remoção de água durante seu avanço através do espaço poroso do solo. Em solos agrícolas, em que se adota o uso de plantas de cobertura para a melhoria dos atributos do solo, observam-se aumentos da adição de carbono e da densidade radicular no decorrer dos anos, promovendo ganhos crescentes na proporção de macroagregados do solo (VEZZANI & MIELNICZUK 2011).

Ao se observar o efeito do tempo para a porcentagem de microagregados verifica-se que este foi significativo somente na camada de 0,00-0,10m (Figura 10b). O incremento observado ao longo do tempo pode ser reflexo da quebra mecânica dos agregados formados por compressão durante a escarificação do solo construído, somado à ação química da calgem bem como à ação das intempéries climáticas e do sistema radicular das plantas de cobertura, através do incremento de carbono orgânico e da liberação de exudatos nesta camada.

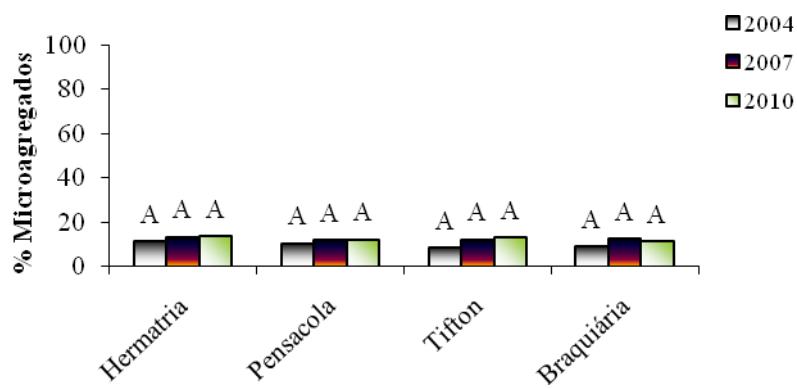
De acordo com Tisdall & Oades (1982) o sistema radicular e as hifas de fungos podem atuar como núcleos de formação de microagregados e por serem ligantes temporários, ao se decompor formam fragmentos recobertos por mucilagens dando origem a novos agregados.

Na camada subsuperficial do solo construído (0,10-0,20m) ainda não se observa a ação positiva das plantas de cobertura na agregação do solo, pois ao longo dos anos os tratamentos não apresentaram diferenças significativas, tanto na porcentagem de macroagregados como de microagregados (Figura 12a,b). Possivelmente, o pouco desenvolvimento radicular se deve ao fato dessa camada apresentar densidade do solo acima do limite crítico para solos com textura argilosa conforme sugerido por Reichert et al. (2003). Isto é, todos os tratamentos apresentam densidade superior a  $1,40 \text{ Mg.m}^{-3}$ , consequentemente também apresentam valores de porosidade total inferior ao considerado ideal por Kiehl (1979), ou seja, menores que 50%, além de apresentar a proporção de micro:macroporos maior que 2:1 (Tabela 3). Estas características físicas implicam em menor aeração e infiltração de água nesta camada, condições estas que não permitem o adequado desenvolvimento radicular das plantas de cobertura.

a)



b)

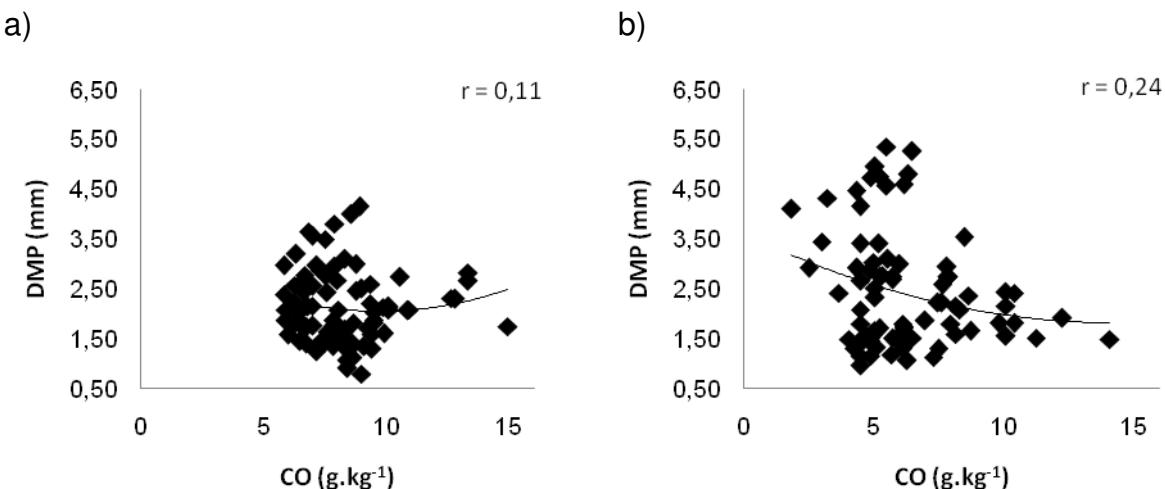


**Figura 12:** Porcentagem de macroagregados (a) e microagregados (b) nos anos de 2004, 2007 e 2010 na camada de 0,10-0,20m do solo construído.

Da mesma forma que para as porcentagens de macro e microagregados, os tratamentos não apresentaram diferenças significativas entre si para a variável DMP em ambas as camadas, no ano de 2010 (Tabela 3). No entanto, quando se compara o DMP de cada tratamento com a testemunha (solo construído sem plantas de cobertura) observa-se que somente na camada de 0,00-0,10m houve diferenças significativas, ou seja, todos os tratamentos apresentaram maiores valores de DMP (Tabela 3).

A não diferenciação dos valores de DMP dos tratamentos em relação ao tratamento testemunha (SCSP) na camada de 0,10-0,20m deve-se possivelmente à maior compactação subsuperficial do solo construído, tanto da área experimental quanto da área adjacente considerada como testemunha, de modo que as raízes não foram capazes de acessar e romper satisfatoriamente tal camada.

A maioria dos autores relata que o incremento de carbono orgânico no solo influencia no aumento do DMP. Entretanto, no solo construído em questão, observa-se que apesar do tratamento com Braquiária ter apresentado o maior teor de carbono orgânico na camada de 0,00-0,10m, isto não se refletiu em maior DMP (Tabela 3). Este comportamento denota que atualmente a agregação do solo construído ainda pode apresentar reflexos do histórico do tráfego de máquinas durante a recomposição topográfica da área minerada. Isto se deduz quando são correlacionados os valores de DMP e CO em ambas as camadas do solo construído, pois estes apresentaram um baixo valor de  $r$  (Figura 13 a,b).

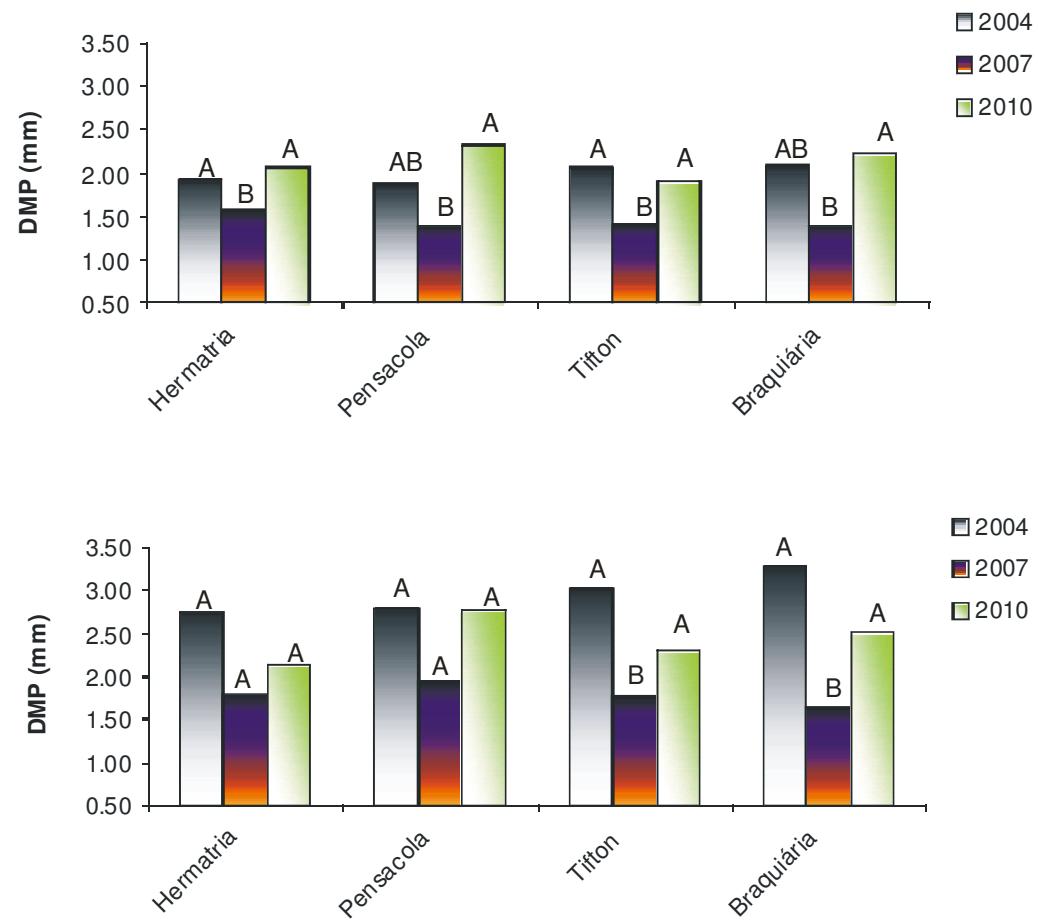


**Figura 13:** Relação entre DMP e CO no ano de 2010, nas camadas de 0,00-0,10m (a) e 0,10-0,20m (b) do solo construído.

Ao se observar o efeito do tempo para a variável DMP verifica-se que os tratamentos diminuíram seus valores de 2004 para 2007 e aumentaram posteriormente, em ambas as camadas, exceto os tratamentos com Hermatária e Pensacola na camada de 0,10-0,20m (Figuras 14a,b).

O maior valor inicial de DMP em 2004 deve-se provavelmente à compressão do solo construído, como já mencionado anteriormente. De acordo com Conte et al. (2011) solos compactados podem apresentar elevada estabilidade de agregados em água e conseqüentemente maiores valores de DMP, porém as relações na distribuição entre microporos, macroporos e a porosidade total podem encontrar-se alteradas. Esta alteração é observada em ambas as camadas do solo construído (Tabela 4). Carpenedo & Mielniczuk (1990) também verificaram que uma área sob plantio direto apresentou um aumento do DMP dos agregados estáveis em água na camada de 0,00-0,10m, porém a avaliação da estrutura interna dos agregados mostrou que estes foram formados por forças de compressão e não por ação biológica das raízes e microrganismos.

a)

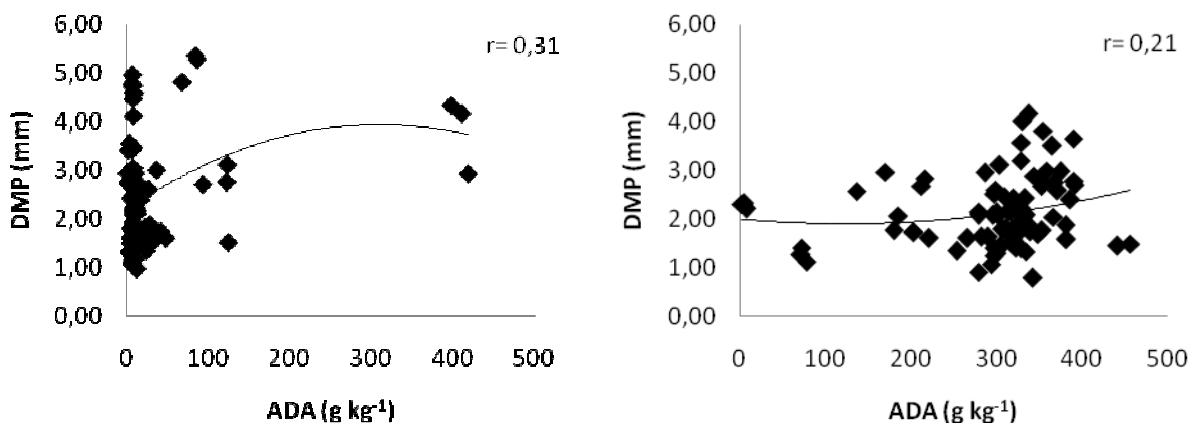


**Figura 14:** Diâmetro médio ponderado (DMP) nos anos de 2004, 2007 e 2010 nas camadas de 0,00-0,10m (a) e 0,10-0,20m (b) do solo construído.

A diminuição dos valores de DMP de 2004 para 2007, principalmente na camada de 0,00-0,10m, também pode ser atribuída ao efeito químico do calcário aplicado na área experimental. Este possível efeito é indicado pelos valores de argila dispersa em água na Tabela 3, fenômeno relacionado a solos de carga variável, bem como pela correlação entre DMP e ADA nos anos de 2004 e 2010 (Figura 15a,b).

a)

b)



**Figura 15:** Relação entre DMP e ADA no ano de 2004 (a) e 2010 (b), na camada de 0,00-0,10m do solo construído.

Ressalta-se a importância de se mostrar a correlação entre os valores de DMP e ADA para o ano de 2007. No entanto não foi realizada a determinação deste atributo nesse ano. O processo de dispersão dos agregados por ação química, ligada ao aumento de pH acima de 7,0 em função da calagem restrita a essa camada (Apêndice 10), pode ter provocado a diminuição da agregação de 2004 para 2007 (Figura 10a) e o menor DMP na camada de 0,00-0,10m (Figura 14a) em relação a camada de 0,10-0,20m.

Segundo Prado (2003) é comum encontrar problemas de super-calagem em algumas áreas em cultivo convencional, onde a incorporação do calcário é feita de forma inadequada com uso indiscriminado de grades leves fazendo com que a camada superficial de 0,00-0,10m receba o dobro do calcário recomendado. Este excesso pode levar a diversos problemas de natureza química como a alteração nas propriedades eletroquímicas do solo e a dispersão da argila, com a consequente obstrução dos poros. Na área de estudo a incorporação superficial foi devida ao alto grau de compactação da camada de 0,10-0,20m, não atingida por ocasião da escarificação.

Por outro lado, Albuquerque et al. (2003) observaram, em Latossolo Bruno que a calagem não interferiu no diâmetro médio dos agregados, provavelmente em razão do efeito benéfico da matéria orgânica sobre os atributos físico-mecânicos do solo.

O maior teor de argila dispersa em água apresentado em todos os tratamentos quando comparado com a testemunha na camada de 0,00-0,10m, deve-se provavelmente à calagem realizada durante a instalação do experimento (Tabela

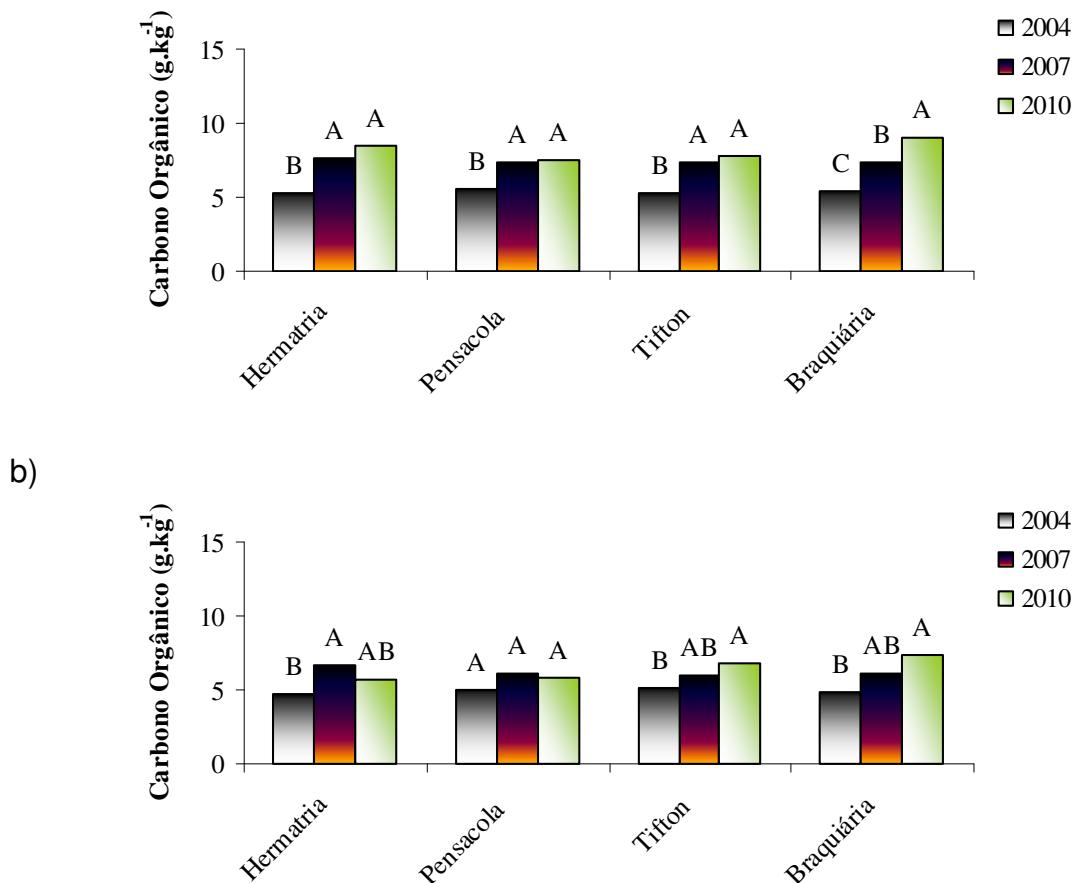
3). Reporta-se a esta alternativa, pois o solo construído da área experimental está revegetado há 6 anos, o que tenderia a reduzir o efeito desagregador da chuva em comparação ao solo construído sem plantas de cobertura. De acordo com Cogo et al. (2003) a cobertura do solo, proporcionada pelos resíduos culturais deixados na superfície, tem ação direta e efetiva na redução da erosão hídrica, em virtude da dissipação de energia cinética das gotas da chuva, a qual diminui a desagregação das partículas de solo e o selamento superficial e aumenta a taxa de infiltração de água.

Na camada de 0,10-0,20m os valores de argila dispersa em água foram menores dos apresentados na camada de 0,00-0,10m, possivelmente pela ausência do efeito químico da calagem, ou seja, o calcário não atingiu a camada subsuperficial do solo construído. Observa-se ainda na Tabela 3 que no tratamento testemunha (SCSP), tanto na camada de 0,00-0,10m como na camada de 0,10-0,20m os valores de ADA são semelhantes, evidenciando ainda mais o efeito da calagem na dispersão da argila na camada superficial da área experimental.

Embora se observe efeito do tempo para o teor de carbono orgânico com incremento dos valores de 2004 para 2010, principalmente na camada de 0,00-0,10m (Figura 16 a,b) verifica-se que essa variável não apresentou correlação positiva com os valores de DMP (Figura 13a).

Espera-se, contudo, que no decorrer dos anos o contínuo aporte de matéria orgânica, tanto da parte área como da parte subterrânea, atue de forma mais eficaz na formação de novos agregados, auxiliando na recuperação das condições edáficas do solo construído. Segundo Vezzani & Mielniczuk (2011) a adoção de práticas conservacionistas baseadas no mínimo revolvimento do solo, no correto manejo de resíduos e na inclusão de gramíneas perenes na rotação de culturas, pode recuperar a qualidade estrutural do solo, devido à permanência intacta dos restos de raízes das culturas, à ação da meso e macro fauna na fragmentação desses resíduos, influenciando diretamente na aeração e na movimentação descendente da água e na manutenção da arquitetura de poros (CASTRO FILHO et al. 1998).

a)



**Figura 16:** Carbono orgânico nos anos de 2004, 2007 e 2010 nas camadas de 0,00-0,10m (a) e 0,10-0,20m (b) do solo construído.

Marcolan & Anghinoni (2006) observaram em um Argissolo Vermelho distrófico típico sob sistema plantio direto, a necessidade de haver um período mínimo de quatro anos após o revolvimento, para o retorno dos atributos físicos do solo à condição original uma vez que eles não se diferenciaram daqueles encontrados no sistema plantio direto, com 8 e 12 anos.

No solo construído, entretanto, observa-se que após 6 anos de condução do experimento pode ser evidenciado a ação positiva das plantas de cobertura sobre a agregação, principalmente na camada de 0,00-0,10m, pois todos os tratamentos se destacaram quando comparados com a testemunha (solo construído sem plantas de cobertura).

Vale ressaltar que no caso dos solos construídos em área de mineração de carvão, a recuperação é muito mais lenta do que em áreas agrícolas, pois a mineração promove a destruição total do perfil do solo, que levou milhares de anos para ser formada, diferente do solo agrícola que tem em geral 0,20m de solo desestruturado, se adotado o manejo convencional.

### **3.6. CONCLUSÕES**

1. Após seis anos de condução experimental usando diferentes plantas de cobertura como recuperadoras da agregação de solos construídos em Candiota-RS, ocorreu ação positiva das quatro espécies de gramíneas perenes de verão.
2. Entre as plantas de cobertura utilizadas, a Braquiária e a Pensacola foram as que mais se destacam ao longo do tempo na formação de macroagregados, principalmente na camada de 0,00 – 0,10m.
3. Os teores de carbono orgânico foram incrementados ao longo do tempo, entretanto, isto não se refletiu em aumento do diâmetro médio ponderado de agregados (DMP).
4. Os resultados deste estudo mostram que a recuperação dos atributos físicos do solo em áreas impactadas pela mineração do carvão a céu aberto ocorre de forma lenta, principalmente na camada subsuperficial do solo, que apresenta maior compactação.

### 3.7. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Albuquerque, J.A.; Bayer, C.; Ernani, P.R.; Mafra, A.L.; Fontana, E.C. Aplicação de calcário e fósforo e estabilidade da estrutura de um solo ácido. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.27, n°5, p. 799-806. 2003.
- ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica (Brasil). **Atlas de energia elétrica do Brasil**. 3° Ed. 2008. 236p.
- ANDRADE, R.S.; STONE, L.F.; SILVEIRA, P.M. Culturas de cobertura e qualidade física de um Latossolo em plantio direto. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.13, n.4, p.411-418. 2009.
- CAMARGO, O.A. & ALLEONI, L.R.F. **Compactação do solo e o desenvolvimento de plantas**. Piracicaba: Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz. 1997.
- CAMPOS, B.C.; REINERT, D.J.; NICOLODI, R. & CASSOL, L.C. Dinâmica da agregação induzida pelo uso de plantas de inverno para cobertura do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.23, p.383-391. 1999.
- CAPECHE, C.L.; MACEDO, J.R. & MELO, A.S. **Estratégias de recuperação de áreas degradadas**. Disponível em [www.cnps.embrapa.br](http://www.cnps.embrapa.br). Acesso em 12 fevereiro de 2012.
- CARDOSO, E.G.; ZOTARELLI, L.; PICCININ, J. & TORRES, J. **Distribuição do sistema radicular da cultura da soja em função do manejo do solo**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO 29. 2003. Anais... Ribeirão Preto: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo 2003. 1 CD-ROM.
- CARPENEDO, V. & MIELNICZUCK, J. Estado de agregação e qualidade de agregados de Latossolos Roxos submetidos a diferentes sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.14, n.1, p.99-105. 1990.
- CASTRO FILHO, C.; MUZILLI, O. & PODANOSCHI, A.L. Estabilidade dos agregados e sua relação com o teor de carbono orgânico em um Latossolo Roxo distrófico em função de sistemas de plantio rotações de culturas e métodos de preparo das amostras. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.22, p.527-538. 1998.
- CECONI, D.E; POLETTO, I.; BRUN, E.J. & LOVATO, T. Crescimento de mudas de açoita-cavalo (*Luehea divaricata* Mart.) sob influência da adubação fosfatada. **Cerne**, v.12, n. 3, p. 292-299. 2006.

- CHAVES, J.C.D. & CALEGARI, A. Adubação verde e rotação de culturas. **Informe Agropecuário**, v.22, p.53-60. 2001.
- CHINN, C. & PILLAI, U.P.P. Self-repair of compacted Vertisols from Central Queensland. **Geoderma**, v.144, p.491-504. 2008.
- CONTE, O.; WESP, C.L.; ANGHINONI, I.; CARVALHO, P.C.F.; LEVIEN, R. & NABINGER, C. Densidade agregação e frações de carbono de um Argissolo sob pastagem natural submetida a níveis de ofertas de forragem por longo tempo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, p. 579-587. 2011.
- COGO, N.P.; LEVIEN, R. & SCHWARZR, A. Perdas de solo e água por erosão hídrica influenciadas por métodos de preparo classes de declive e níveis de fertilidade do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.27, p.743-753. 2003.
- EMBRAPA - Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 2ed. 2006. 306p.
- FRANCO, A.M.P. **Caracterização física de um solo construído na área de mineração de carvão de Candiota-RS**. Pelotas-RS 2006. 124f. Dissertação (Mestrado em Solos). Programa de Pós-Graduação em Agronomia. Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel - Universidade Federal de Pelotas 2006.
- FRITZ, K.B.B. Impactos Sócio-econômicos do uso do carvão mineral na região de Candiota/RS. In: **Estudos Ambientais em Candiota – Carvão e seus impactos**. Cadernos de Planejamento e Gestão Ambiental nº 4. Fundação Estadual de Proteção Ambiental Henrique Luiz Roessler. Porto Alegre/RS. 2004. p. 31-50.
- 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**. Pelotas-RS 2008. 92f. Dissertação (Mestrado em Solos). Programa de Pós-Graduação em Agronomia. Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel - Universidade Federal de Pelotas. 2008.
- GUERRA, H.O.C. **Física do solo**. Centro de Ciências e Tecnologia – CCT UFPb 2000. 173p.
- KEMPER, W.D. & ROSENAU, R.C. Aggregate stability and size distribution. In: KLUTE, A. (ed.). **Methods of Soil Analysis** 2.ed. Madison Wisconsin USA: American Society of Agronomy Soil Science Society of America 1986. p.425-441.
- KEMPER, W.D. & CHEPIL, W.S. Size distribution of aggregates. In: BLACK C.A. (ed.). **Methods of soil analysis**. Part 1. Physical and mineralogical properties

- including statistics of measurements and sampling. Madison American Society of Agronomy 1965. p.499- 510.
- KIEHL, E. J. **Manual de Edafologia**. São Paulo-SP ed. Agronômica Ceres Ltda 1979. 262p.
- MARCOLAN, A.L & ANGHINONI, I. Atributos físicos de um Argissolo e rendimento de culturas de acordo com o revolvimento do solo em plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.23, p.163-170. 2006.
- PALMEIRA, P.R.T.; PAULETTO, E.A.; TEIXEIRA, C.F.A.; GOMES, A.S. & SILVA, J.B. Agregação de um Planossolo submetido a diferentes sistemas de cultivo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.23, p. 189-195. 1999.
- PEREIRA, A.R. **Como selecionar plantas para áreas degradadas e controle de erosão**. 2. ed. 2008. 239 p.
- PERIN, A.; GUERRA, J.G.M.; TEIXEIRA, M.G.; PEREIRA, M.G. & FONTANA, A. Efeito da cobertura viva com leguminosas herbáceas perenes na agregação de um Argissolo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 26, n 3, p. 713-720. 2002.
- PIRES, F.L. **Avaliação econômica de termelétricas a carvão – Uma alternativa para diversificação da Matriz Energética Brasileira**. 2008. Disponível em <[www.tchehoje.com.br](http://www.tchehoje.com.br)>. Acesso em 01 de maio de 2012.
- PRADO, R.M. A Calagem e as propriedades físicas de solos tropicais: Revisão de Literatura. **Revista Biociências**, v.9, n 3. 2003.
- REICHERT, J.M.; REINERT, J.D. & BRAIDA, J.A. Qualidade dos solos e sustentabilidade dos sistemas agrícolas. **Ciência & Ambiente**, v.27, p. 29-48. 2003.
- REINERT, D.J.; REICHERT, J.M.; VEIGA, M. & SUZUKI, L.E.A.S. **Qualidade física dos solos**. In: Reunião Brasileira de Manejo e Conservação do Solo e da Água. 2006. Anais... SBCS 2006. CD-ROM.
- RICHARD, G.; COUSIN, I.; SILLON, J.F.; BRUAND, A. & GUÉRIF, J. Effect of compaction on the porosity of a silty loam: Influence on unsaturated hydraulic properties. **European Journal Soil Science**, v.52, p.49-58. 2001.
- SILVA, A.J.N.; CABEDA, M.S.V. & CARVALHO, F.G. Matéria orgânica e propriedades físicas de um Argissolo Amarelo Coeso sob sistemas de manejo com cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 10, p.579-585. 2006.

- SILVA, I.F. & MIELNICZUK, J. Ação do sistema radicular de plantas na formação e estabilização de agregados do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.21, p.113-117. 1997.
- TEDESCO, M.J.; GIANELLO, G. & BISSANI, C.A. **Análises de solo plantas e outros materiais**. 2 ed. rev. e ampliada. Porto Alegre-RS: Departamento de Solos Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS 1995 174p.
- TISDALL, J.M. & OADES, J.M. Organic matter and water-stable aggregates in soils. **European Journal of Soil Science**, v. 33, p. 141-163. 1982.
- USSIRI, D.A.; LAL, R. & JACINTHE, P.A. Soil properties and carbon sequestration of afforested pastures in reclaimed minesoils of Ohio. **Soil Science Society of America Journal**, v 70, p.1797-1806. 2006.
- VASCONCELOS, R.F.B.; CANTALICE, J.R.B.; OLIVEIRA, V.S.; COSTA, Y.D.J. & CAVALCANTE, D.M. Estabilidade de agregados de um Latossolo amarelo distrocoeso de tabuleiro costeiro sob diferentes aportes de resíduos orgânicos da cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.34, p.309-316. 2010.
- VEZZANI, F.M; CONCEIÇÃO, P.C; MELLO, N.A. & DIECKOW, J. Matéria orgânica e qualidade do solo. In: SANTOS, G.A; SILVA, L.S; CANELLAS, L.P; CAMARGO, F.A. **Fundamentos da Matéria Orgânica do Solo – Ecossistemas Tropicais e Subtropicais**. Porto Alegre-RS 2008. p.483-493.
- VEZZANI, F.M. & MIELNICZUK, J. Agregação e estoque de carbono em Argissolo submetido a diferentes práticas de manejo agrícola. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.35, p.213-223. 2011.
- VOLK, L.B.S & COGO, N.P.R. Inter-relação biomassa vegetal subterrânea-estabilidade de agregados-erosão hídrica em solo submetido a diferentes formas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, p.1713-1722. 2008.
- WENDLING, B.; FREITAS, I.C.V; OLIVEIRA, R.C; BABATA, M.M & BORGES, E.N. Densidade agregação e porosidade do solo em áreas de Conversão do cerrado em floresta de pinus pastagem e Plantio direto. **Bioscience Journal**, v. 28, p. 256-265. 2012.
- YODER, R.E. A direct method of aggregate analysis of soils and a study of the physical nature of erosion losses. **Journal of American Society Agronomy**, v.28, p.337-351. 1936.

## **ARTIGO 2: AVALIAÇÃO TEMPORAL DE ATRIBUTOS FÍSICOS DE UM SOLO CONSTRUÍDO CULTIVADO COM DIFERENTES GRAMÍNEAS PERENES DE VERÃO EM ÁREA DE MINERAÇÃO DE CARVÃO NO MUNICÍPIO DE CANDIOTA/RS**

### **4.1. RESUMO**

Apesar do carvão ser um recurso energético estratégico na geração de energia do país, é inegável os problemas gerados pela sua extração. A mineração a céu aberto provoca uma intensa alteração topográfica e hidrológica da área com supressão da vegetação local, tornando o ambiente degradado. Um dos principais problemas apresentados pelos solos construídos se refere à acidificação e desestruturação física do solo, o que dificulta o restabelecimento das espécies vegetais na área. A tendência é que estes solos apresentem uma maior densidade e uma desproporcionalidade entre macro e microporos quando comparados ao solo não minerado. Este trabalho objetivou avaliar a influência de diferentes gramíneas na recuperação dos atributos físicos do solo construído, ao longo de seis anos. Os tratamentos avaliados foram: T1 - Hemártria (*Hemarthria altissima*), T4 - Pensacola (*Paspalum notatum*), T5 - Tifton (*Cynodon dactylon*), T7- Braquiária (*Brachiaria brizantha*). Coletaram-se amostras preservadas no ano de 2010, nas camadas de 0,00-0,10m e 0,10-0,20m, para determinações da densidade do solo (Ds), a porosidade total (Pt), a macroporosidade (Ma), a microporosidade (Mi) e a capacidade de água disponível (CAD). Com o objetivo de analisar a influência das diferentes plantas de cobertura na recuperação dos atributos físicos do solo construído, ao longo do tempo, compararam-se os dados coletados em maio de 2004, maio de 2007 e junho de 2010 (5 meses, 3 anos e 5 meses, 6 anos e 6 meses após o estabelecimento do experimento, respectivamente). Também se compararam os resultados de cada tratamento, obtido em 2010, com uma testemunha (solo construído sem plantas de cobertura). Os resultados avaliados permitiram concluir que após seis anos de condução experimento as gramíneas passaram a atuar de forma mais eficiente na recuperação dos atributos físicos do solo construído, principalmente na camada de 0,00-0,10m, com destaque para a Braquiaria.

PALAVRAS-CHAVES: desestruturação; plantas de cobertura; recuperação.

#### 4.2. ABSTRACT

Even though coal is a strategic energy resource for power generation in the country, the problems caused by its extraction are undeniable. The open-pit mining method produces intense topographic and hydrological changes in the area, leading to the suppression of local vegetation and making the environment degraded. One of the main problems presented by constructed soils is acidification and physical disruption, which hinders the restoration of plant species in the area. The trend is that these soils have a higher density and a disparity between macro and microporosity when compared to non-mined lands. This study aimed to evaluate the influence of different grasses in the recovery of the physical properties of a constructed soil in the course of six years. The treatments studied were: T1 – Hermatia Grass (*Hemarthria altissima*), T4 – Pensacola Grass (*Paspalum notatum*), T5 - Tifton Grass (*Cynodon dactylon*), T7-Brachiaria Grass (*Brachiaria brizantha*). Preserved samples were collected in 2010 at depths of 0.00-0.10 m and 0.10-0.20 m for determination of bulk density (BD), total porosity (Tp), macroporosity (Ma), microporosity (Mi), and available water capacity (AWC). In order to evaluate the influence of different cover crops on the constructed soil physical attributes in the course of time, it was compared the data collected in May 2004, May 2007 and June 2010 (5 months, 3 years and 5 months, 6 years and 6 months after the onset of the experiment, respectively). The results obtained from each treatment in 2010 were also compared with a control (constructed soil without cover crops). Based on the evaluated results, it was possible to conclude that after six years of experiment grasses started to act more efficiently in the recovery of the constructed soil physical properties, mainly in the layer 0.00-0.10 m and especially under Brachiaria Grass.

KEYS WORDS: disruption; cover crops; recovery.

#### **4.3. INTRODUÇÃO**

O carvão é combustível fóssil com a maior disponibilidade mundial, com reservas que totalizam 847,5 bilhões de toneladas, quantidade suficiente para atender a produção atual por 130 anos. As reservas brasileiras descobertas até o momento ocupam o décimo lugar no ranking mundial, totalizando 7 bilhões de toneladas, ou seja, correspondem a menos de 1% das reservas totais (ANEEL 2008). De acordo com Pires (2008) a tendência mundial de crescimento da demanda de energia deve aumentar a participação do carvão na matriz energética brasileira, sendo que a previsão da Eletrobrás é que passe dos atuais 1,5% para 5,35% até 2015.

O Rio Grande do Sul possui as maiores reservas de carvão do país (cerca de 88%). Na Região de Candiota (a qual engloba os municípios de Aceguá, Bagé, Candiota, Herval, Hulha Negra, Pedras Altas e Pinheiro Machado) encontra-se a maior reserva carbonífera brasileira, conhecida como a jazida Grande Candiota (FRITZ, 2004). Esta reserva abrange uma área aproximada de 2.500 Km<sup>2</sup> com 38% das reservas brasileiras (ANEEL 2008).

Nesta localidade o carvão encontra-se próximo à superfície, entre 10 e 25m de profundidade, podendo ser minerado a céu aberto. Este método de lavra emprega a “dragline”, máquina de grande porte para remoção das camadas adjacentes do carvão, ocasionando modificações na topografia vegetação e no regime hidrológico da área.

O processo da extração do carvão envolve a retirada dos horizontes A e/ou B do solo original, seguida de remoção das rochas (arenitos e siltitos). Em seguida, os estéreis (rochas e camadas de carvão não aproveitadas) retornam à cava aberta, onde são depositados em forma de cones. Posteriormente, esses são nivelados com tratores de esteira e há a reposição da camada superficial do solo original, retirada anteriormente à lavra do carvão, finalizando o processo de construção do solo.

Durante o processo de construção de solo ocorre tráfego intenso de equipamentos pesados sobre a área, acarretando na compactação da camada de solo reposta sobre os estéreis. De acordo como Arranz-Gonzalez (2011), a compactação do solo construído pode anular os benefícios esperados pela reposição do solo superficial, podendo restringir o estabelecimento da vegetação por longos períodos.

Os impactos causados pela recomposição topográfica da área sem controle do tráfego de máquinas e com umidade inadequada, refletem-se nos atributos físicos químicos e biológicos do solo construído, como drenagem deficiente, baixa aeração do solo e dificuldade de desenvolvimento de raízes (SHRESTHA & LAL 2011).

Os primeiros efeitos negativos sobre os atributos físicos do solo construído a serem observados são os valores de densidade elevados e a desproporcionalidade entre micro e macroporos (NUNES, 2002; FRANCO, 2006; GONÇALVES, 2008). Isto é um reflexo do próprio processo de construção do solo, devido à mistura de horizontes (geralmente horizontes subsuperficiais são usados como camada de reposição) e o uso de máquinas de grande porte na recomposição da área.

O valor da Ds reflete características do sistema poroso do solo, e como as raízes das plantas se desenvolvem nos poros, admite-se que qualquer alteração significativa nesse sistema pode resultar em interferência no desenvolvimento radicular, bem como na disponibilidade de água para as plantas (SANTOS et al. 2009).

De acordo com Sequinatto (2010) sempre que o manejo do solo tem influência sobre os valores de densidade, a relação micro/macroporos é também alterada. Para Klein & Libardi (2002) os macroporos são os poros com diâmetro maior que 0,05mm (que perdem a água em tensões menores que 6 kPa), e os microporos, aqueles com diâmetro menores que 0,05mm (que são esvaziados a tensões entre 6 e 1500 kPa).

O conhecimento da densidade do solo e da relação micro/macroporos nessas áreas torna-se de grande valia para se indicar a tendência deste solo em suportar o crescimento de vegetação e sua suscetibilidade a processos erosivos.

Para Magalhães et al. (2009) ao ocorrer o rompimento de camadas de solos compactados é de se esperar um elevado gasto de energia metabólica através do transporte de fotossintetizados da parte aérea para as raízes, o que leva à queda de produção, entretanto, geralmente a maioria das culturas não apresenta a capacidade de romper as camadas muito compactadas. Diante disso, a planta faz uso do mecanismo de defesa através da expansão de raízes laterais com diâmetros adequados para passar pelos poros menores formados pelo processo compressivo do solo (CAMARGO & ALLEONI, 1997). Entretanto, as raízes laterais também podem apresentar dificuldade em romper as camadas compactadas. Logo, se o obstáculo é imposto a ambas, a planta passa a emitir pêlos radiculares.

Neste contexto, o presente trabalho testou a hipótese de que gramíneas perenes de verão alteram positivamente os atributos físicos do solo construído. Logo, o objetivo do trabalho visa analisar a influência de 4 espécies de gramíneas na densidade, porosidade e capacidade de água disponível de um solo construído ao longo do tempo, em área de mineração de carvão em Candiota/RS.

#### **5.4. MATERIAL E MÉTODOS**

A área de estudo se localiza na mina de extração de carvão no município de Candiota/RS, pertencente à Companhia Riograndense de Mineração (CRM), nas coordenadas geográficas 31°33'55"S e 53°43'30"W. O município está situado a 400 km da cidade de Porto Alegre e 140 km de Pelotas.

De acordo com a classificação de Wilhelm Köppen o clima da região é subtropical úmido. O solo construído da área experimental caracteriza-se pela mistura de horizontes, sendo predominante o horizonte B de um Argissolo Vermelho Eutrófico típico (EMBRAPA 2006). A granulometria do solo construído na camada de 0,00-0,20m é  $326,8 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$  de areia,  $207,4 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$  de silte e  $465,4 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$  de argila (FRANCO 2006) definindo sua textura como argilosa.

O solo foi construído no início de 2003 e o experimento instalado em novembro/dezembro de 2003, em delineamento de blocos ao acaso com parcelas de  $20\text{m}^2$  ( $5\text{m} \times 4\text{m}$ ), com quatro repetições. Os tratamentos avaliados foram: T1 - Hemártria (*Hemarthria altissima*), T4 - Pensacola (*Paspalum notatum*), T5 - Grama Tifton (*Cynodon dactylon*), T7- Braquiária brizanta (*Brachiaria brizantha*).

Coletaram-se amostras preservadas em junho de 2010, nas camadas de 0,00-0,10m e 0,10-0,20m (16 repetições por tratamento) com o uso de anéis volumétricos de 4,8 cm de diâmetro e 3 cm de altura. Para a determinação da densidade do solo (Ds) foi utilizado o método do anel volumétrico e para a determinação da porosidade total (Pt), macroporosidade (Ma) e microporosidade (Mi) o método da mesa de tensão, conforme Embrapa (1997).

Para a determinação das curvas de retenção de água no solo foram utilizadas as câmaras de pressão de Richards (KLUTE, 1986) para as tensões de 10, 33, 102 e 1530 kPa e a mesa de tensão para as tensões de 1kPa e 6 kPa.

Os dados da relação umidade volumétrica e potencial mátrico foram ajustados pelo programa computacional Soil Water Retention Curve – SWRC de Dourado Neto et al. (2000), que utiliza o modelo de van Genuchten (1980), cuja a equação é:

$$\theta = \theta_r + \left[ \frac{(\theta_s - \theta_r)}{1 + (\alpha h)^n} \right]^m \quad (1)$$

Onde:

$\theta_s$  = umidade volumétrica do solo saturado ( $\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ );

$\theta_r$  = umidade volumétrica residual ( $\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ );

$h$  = módulo do potencial mátrico em cm de coluna de água;

$\alpha, n, m$  = parâmetros empíricos referentes às características do solo.

Os parâmetros foram ajustados partindo-se de valores iniciais de 0,015, 2,0 e 0,50 para  $\alpha, n, m$  respectivamente, e calculados considerando sua independência (Van Genuchten & Nielsen, 1985). Após este procedimento, foram montadas as curvas de retenção através da utilização do programa Excel, a fim de visualizar o comportamento de cada uma.

A água disponível (AD) foi considerada como sendo a água armazenada no solo entre as tensões de 10 kPa e 1530 kPa, tensões essas usadas para representar respectivamente a capacidade de campo e o ponto de murcha permanente, após o ajuste das curvas ao modelo de van Genuchten (1980). Para o cálculo da capacidade de água disponível (CAD) foi utilizado a seguinte expressão:

$$\text{CAD} = (\theta_{\text{CC}} - \theta_{\text{PMP}})$$

Onde:

CAD = capacidade de água disponível (mm);

$\theta_{\text{CC}}$  = valor de umidade na capacidade de campo ( $\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ );

$\theta_{\text{PMP}}$  = valor de umidade no Ponto de Murcha Permanente ( $\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ).

Para a determinação do carbono orgânico utilizou-se o método Walkley-Black, em amostras de solo com estrutura deformada, passadas em peneira de 2mm, com três repetições, segundo Tedesco et al. (1995).

Com o objetivo de avaliar a influência das diferentes plantas de cobertura na recuperação dos atributos físicos do solo construído ao longo do tempo, compararam-se os dados coletados em maio de 2004 (FRANCO, 2006), maio de 2007 (GONÇALVES, 2008) e junho de 2010 (5 meses, 3 anos e 5 meses, 6 anos e 6 meses após o estabelecimento do experimento, respectivamente). Também se compararam os resultados de cada tratamento obtido em 2010, com uma testemunha (solo construído sem plantas de cobertura – SCSP) localizada ao lado

da área experimental, caracterizada por não possuir cobertura vegetal em sua superfície.

Os dados obtidos em 2010 foram submetidos ao teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro, e para avaliar a influência das diferentes plantas de cobertura ao longo do tempo foram utilizados os dados obtidos por Franco (2006) e Gonçalves (2008) cujas coletas de solo foram realizadas 5 meses (2004) e 41 meses (2007), respectivamente, após a instalação do experimento. A comparação de médias foi realizada através da análise de medidas repetidas (*proc.mixed*) mediante o uso do Software SAS.

Para as comparações feitas entre a testemunha (solo construído sem plantas de cobertura) e cada tratamento foi utilizado o teste t, por se tratarem de amostras independentes.

#### **4.5. RESULTADOS E DISCUSSÃO**

Na Tabela 5 são apresentados os valores de densidade do solo (Ds), porosidade total (Pt), macroporosidade (Ma), microporosidade (Mi) e capacidade de água disponível (CAD) observados nas camadas de 0,0 – 0,10m e 0,10 – 0,20m de um solo construído cultivado com 4 espécies distintas de gramíneas perenes de verão.

Ao se comparar os tratamentos entre si observa-se diferenças estatísticas em ambas as camadas (Tabela 5). A Braquiária se destacou na camada de 0,00-0,10m, diferindo da Pensacola por apresentar o menor valor de Ds ( $1,37 \text{ Mg.m}^{-3}$ ), bem como diferiu da Pensacola e do Tifton na camada de 0,10-0,20m, apresentando também o menor valor de Ds ( $1,51 \text{ Mg.m}^{-3}$ ).

Para solos agrícolas existem indicações de limites críticos de densidade do solo ao crescimento radicular, porém esses são variáveis para diferentes tipos de solos e plantas. Segundo Reichert et al. (2003) para solos com textura argilosa, a densidade crítica situa-se entre  $1,30$  e  $1,40 \text{ Mg.m}^{-3}$ . Logo, observa-se que todos os tratamentos apresentam Ds superior àquela considerada crítica ao desenvolvimento de raízes, exceto o tratamento com Braquiária na camada de 0,00-0,10m que apresenta densidade abaixo de  $1,40 \text{ Mg.m}^{-3}$  (Tabela 5).

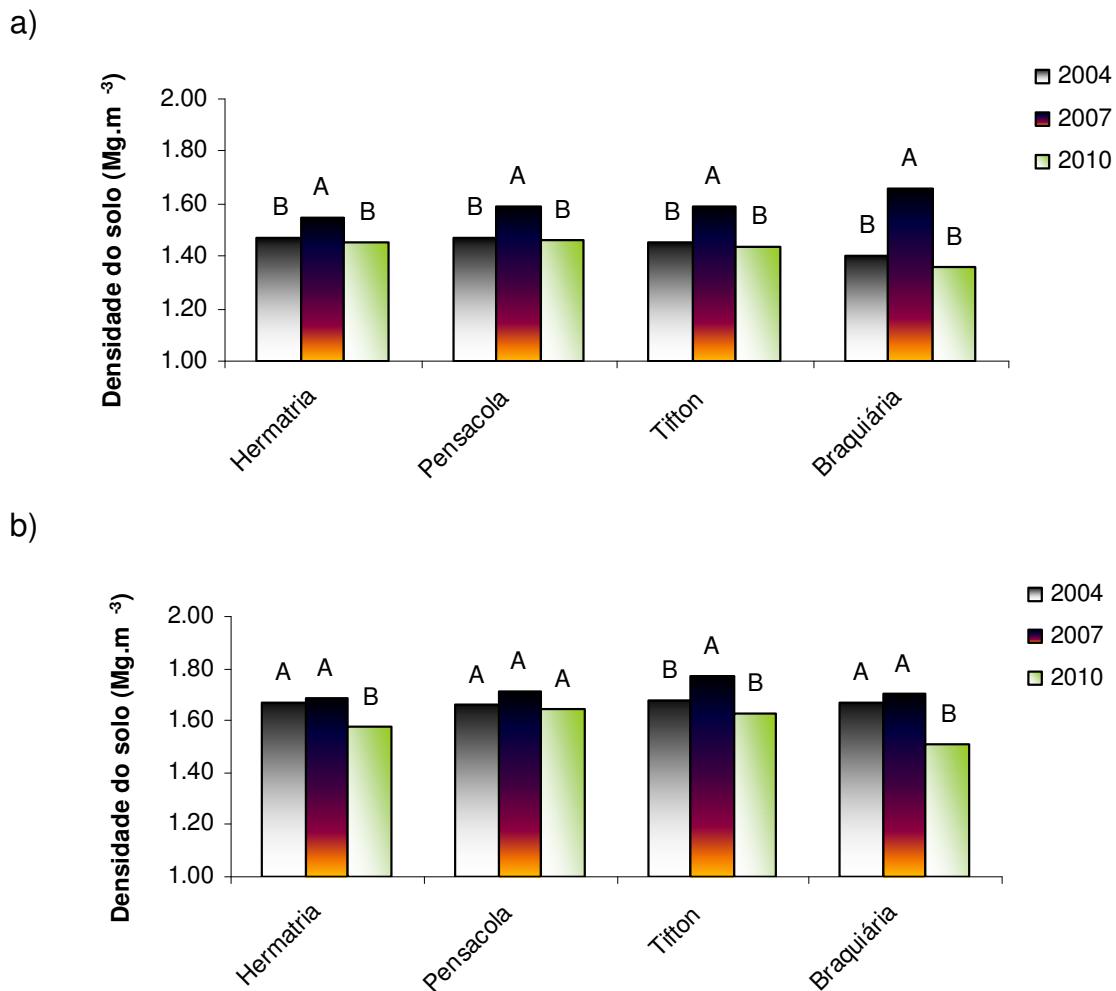
**Tabela 5:** Valores médios de densidade do solo (Ds), porosidade total (Pt), macroporosidade (Ma), microporosidade (Mi) e capacidade de água disponível (CAD) de um solo construído em área de mineração de carvão, submetido ao cultivo de diferentes espécies vegetais, no ano de 2010, nas camadas de 0,00-0,10m a 0,10-0,20m.

Tratamentos	Ds (Mg.m <sup>-3</sup> )	Pt	Ma (%)	Mi	CAD (cm <sup>3</sup> .cm <sup>-3</sup> )
<b>0,00-0,10m</b>					
Hermatria	1,45 ab	52,32 a*	13,11 a	39,21 a	0,12 a
Pensacola	1,46 a	50,84 a	11,84 a	38,99 a	0,10 a
Tifton	1,44 ab	51,29 a	12,77 a	38,52 a	0,11 a
Braquiária	1,37 b*	51,98 a*	13,67 a	38,31 a	0,12 a
<b>SCSP</b>	<b>1,48</b>	<b>48,15</b>	<b>11,15</b>	<b>37,00</b>	<b>0,13</b>
<b>0,10-0,20m</b>					
Hermatria	1,59 ab	45,21 a	8,50 a	36,71 a	0,06 a
Pensacola	1,65 a	47,37 a	9,07 a	38,30 a	0,05 a
Tifton	1,64 a	46,49 a	7,97 a	38,52 a	0,05 a
Braquiária	1,55 b*	48,22 a	11,20 a	37,02 a	0,05 a
<b>SCSP</b>	<b>1,61</b>	<b>46,46</b>	<b>9,22</b>	<b>37,24</b>	<b>0,07</b>

Letras minúsculas iguais na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade; SCSP: solo construído sem plantas de cobertura; \* = indica diferença significativa entre cada tratamento e a testemunha (SCSP) pelo teste t ( $p < 0,05$ ).

A eficiência da Braquiária, tanto na camada superficial como na subsuperficial, se confirma quando se comparam os tratamentos com o solo construído sem plantas de cobertura (SCSP), já que é o único tratamento que difere estatisticamente da testemunha (Tabela 5). A não diferenciação dos demais tratamentos em relação à testemunha pode ser reflexo do intenso tráfego ao qual foi submetida à área antes da implantação do experimento, somado a maior dificuldade de desenvolvimento radicular das outras gramíneas.

Ao se observar o efeito do tempo para a densidade do solo verifica-se que a maioria dos tratamentos apresentou diferenças significativas entre os anos, principalmente na camada de 0,00-0,10m (Figura 17a, b). Na camada de 0,00-0,10m observa-se um menor valor de densidade em 2004 em relação aos valores apresentados em 2007 (Figura 17a). Isto pode ser reflexo da escarificação realizada no momento da instalação do experimento, já que a coleta foi realizada cinco meses após a construção do solo. De acordo com Vieira & Klein (2007) o escarificador inicialmente promove a mobilização do solo com o aumento da porosidade total, no entanto com o passar do tempo ocorre novamente adensamento natural devido à ausência de revolvimento.



**Figura 17:** Densidade do solo construído nos anos de 2004, 2007 e 2010 nas camadas de 0,00-0,10m (a) e 0,10-0,20m (b) do solo construído.

Após 2007 observa-se uma diminuição na densidade do solo em todos os tratamentos (Figura 17a). Acredita-se que este já seja um efeito do sistema radicular das plantas de cobertura estudadas. Em solos agrícolas sob plantio direto a diminuição da densidade do solo com o tempo de adoção do sistema já é conhecida (VIEIRA & KLEIN, 2007; ASSIS & LANÇAS, 2004) devido ao desenvolvimento de galerias no solo a partir da morte do sistema radicular das culturas antecessoras (HICKMANN et al., 2012), que contribuem para o aumento da infiltração de água e difusão de gases, melhorando a qualidade física do solo para as culturas subsequentes (FOLONI et al., 2006).

Na camada de 0,10-0,20m a maioria dos tratamentos apresentou uma densidade mais elevada nos anos de 2004 e 2007 em relação ao ano de 2010 (Figura 17b). O maior valor de Ds pode ser reflexo da não mobilização total desta

camada durante a escarificação do solo, somado ao efeito cumulativo do tráfego de máquinas durante a recomposição topográfica da área minerada.

A diminuição da densidade do solo de 2007 para 2010, exceto no tratamento com Pensacola, pode ser resultado da atuação do sistema radicular das plantas de cobertura estudadas (Figura 17b). Para Silva & Mielniczuk (1997) as gramíneas podem ser usadas como plantas recuperadoras da estrutura do solo por apresentarem maior densidade de raízes e melhor distribuição do sistema radicular no solo.

A densidade do solo no tratamento com Pensacola não diferenciou ao longo dos anos (Figura 17b) devido, possivelmente, ao fato desta planta de cobertura apresentar um desenvolvimento naturalmente mais lento no início de sua formação (PEREIRA, 2008) bem como paralisar seu crescimento e reduzir sua produção de matéria seca no período de inverno (PAIM & RIBOLDI, 1995). Logo, somado a esses fatores, possivelmente o sistema radicular da Pensacola apresentou maior dificuldade em romper as camadas mais compactadas na subsuperfície do solo construído (Tabela 5).

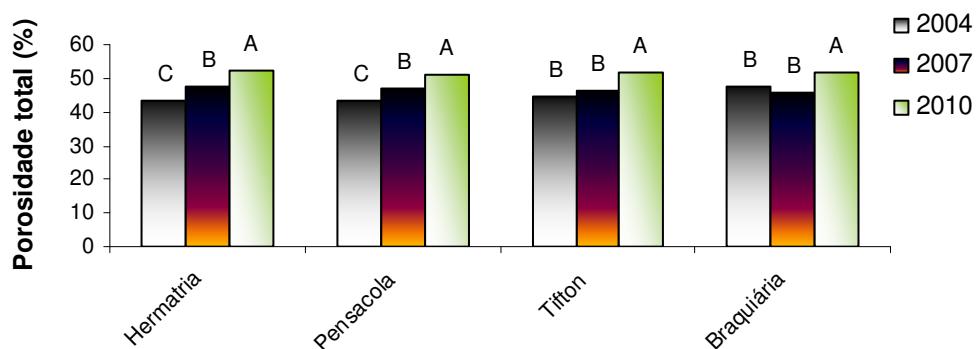
Na tabela 5 pode-se observar que os tratamentos não diferiram estatisticamente entre si quanto à porosidade total, à macroporosidade e à microporosidade em 2010, em ambas as camadas do solo construído.

Apesar do tratamento com Braquiária ter-se diferenciado estatisticamente da Pensacola na camada de 0,00-0,10m e da Pensacola e Tifton na camada de 0,10-0,20m quanto a Ds, isto não se refletiu em diferenças na porosidade total, na macroporosidade e na microporosidade (Tabela 5). Este comportamento diferencia-se do observado em solos agrícolas pois esses geralmente apresentam maior porosidade total e macroporosidade do solo quando possuem menores valores de densidade do solo. Isto ocorre porque a densidade é um atributo que reflete o arranjo das partículas no solo, que por sua vez, define as características do sistema poroso (FERREIRA, 2010).

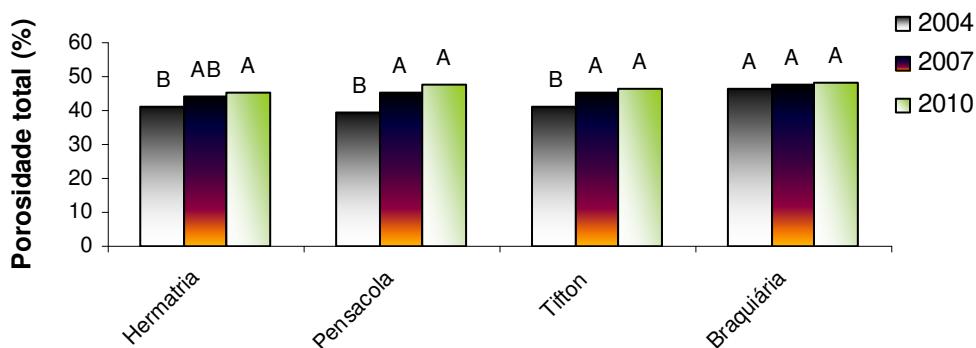
No entanto, a eficiência da Braquiária e da Hermatria pode ser evidenciada quando se compara a porosidade total de cada tratamento com a testemunha (solo construído sem plantas de cobertura), principalmente na camada de 0,00-0,10m. Na camada de 0,10-0,20m, entretanto, não houve diferenças significativas entre tratamentos e a testemunha (Tabela 5).

Ao se observar o efeito ao longo do tempo para a porosidade total verifica-se que a maioria dos tratamentos apresentou diferenças significativas entre os anos, principalmente na camada de 0,00-0,10m (Figura 18a, b). Na camada mais superficial do solo construído observa-se que todos os tratamentos aumentaram seus valores significativamente de 2004 para 2010 (Figura 18a). Na camada subsuperficial a maioria dos tratamentos também apresentou aumento significativo da porosidade total ao longo do tempo (18b).

a)



b)



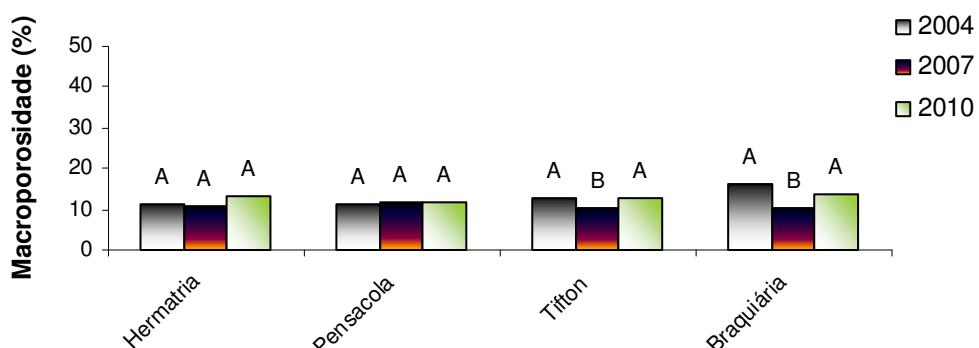
**Figura 18:** Porosidade total nos anos de 2004, 2007 e 2010 nas camadas de 0,00-0,10m (a) e 0,10-0,20m (b) do solo construído.

Segundo Kiehl (1979) a porosidade total do solo considerada ideal para o crescimento de plantas deve ser ao redor de 50%, com um terço dela constituído de macroporos e dois terços de microporos. Em relação a essa referência, pode-se observar que na camada de 0,00-0,10m os tratamentos apresentaram valores médios de 44,90% em 2004 e elevaram-se para 51,68% em 2010 (18a). Isso mostra o quanto as plantas de cobertura podem contribuir para a melhoria da estrutura do solo e apresentar um desenvolvimento mais sustentável. Na camada de 0,10-0,20m

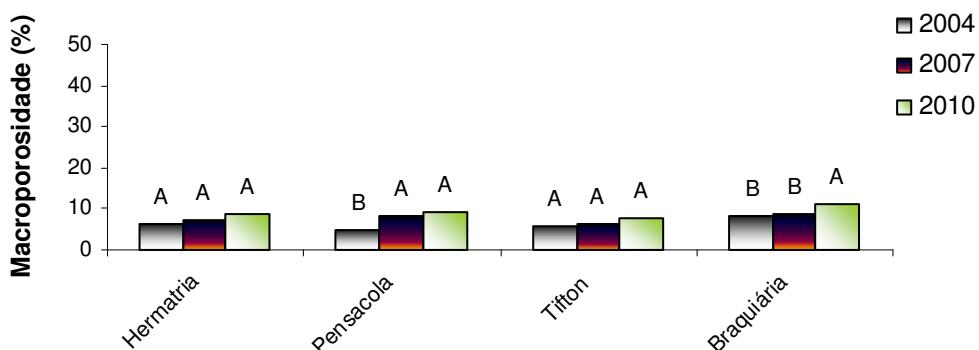
os tratamentos apresentaram valores médios de 42,04% em 2004 para 46,82% em 2010 (Figura 18b), ou seja, nesta camada os valores de porosidade total ainda apresentam-se abaixo do ideal.

Como mencionado anteriormente, para as variáveis macroporosidade e microporosidade os tratamentos não apresentaram diferenças entre si e nem em relação à testemunha (SCSP), em ambas as camadas do solo construído (Tabela 5). No entanto, ao se observar o efeito do tempo para a macroporosidade verifica-se que apenas dois tratamentos apresentaram diferenças significativas entre os anos, tanto na camada de 0,00-0,10m como na camada de 0,10-0,20m (Figura 19a,b).

a)



b)



**Figura 19:** Macroporosidade nos anos de 2004, 2007 e 2010 nas camadas de 0,00-0,10m (a) e 0,10-0,20m (b) do solo construído.

Na camada de 0,00-0,10m observa-se que os tratamentos Tifton e Braquiária apresentaram redução dos valores de Ma de 2004 para 2007, mas posterior incremento de 2007 para 2010. Ambos os tratamentos aumentaram seus valores médios de 10,22% em 2007 para 13,22% em 2010 (Figura 19a). Na camada de 0,10-0,20m, observa-se que os tratamentos Pensacola e Braquiária também

aumentaram seus valores médios de 6,61% em 2004 para 10,13% em 2010 (Figura 19b).

Seguindo o critério de proporcionalidade de macroporos/microporos em relação à porosidade total (espaço poroso deve ser ocupado por 33% de macroporos e 67% de microporos), sugerido por Khiel (1979), pode-se observar que em 2010 todos os tratamentos ainda apresentam proporções inadequadas ao desenvolvimento radicular, em ambas as camadas do solo construído.

Observa-se na Tabela 6 que os tratamentos apresentaram em média 24,85% e 19,58% do espaço poroso total ocupado por macroporos nas camadas de 0,00-0,10m e de 0,10-0,20m, respectivamente.

**Tabela 6:** Valores médios da relação de macroporosidade em relação da porosidade total, (Ma/Pt) e da microporosidade em relação da porosidade total (Mi/Pt) de um solo construído em área de mineração de carvão, submetido ao cultivo de diferentes espécies vegetais, no ano de 2010, nas camadas de 0,00-0,10m a 0,10-0,20m.

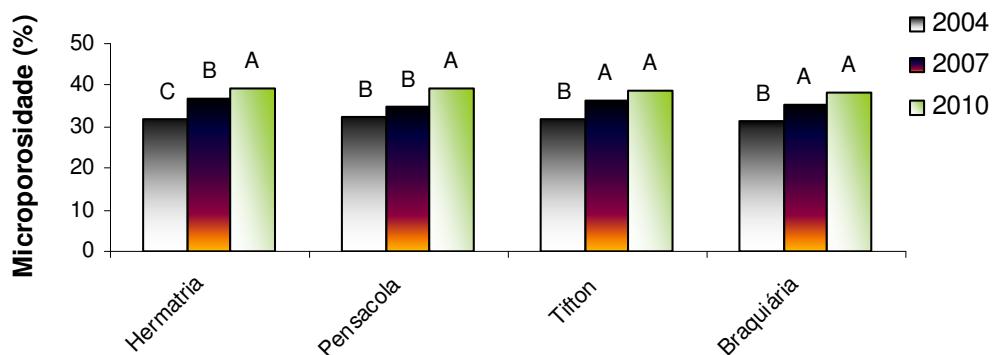
<b>Tratamentos</b>	<b>Ma/Pt</b>	<b>Mi/Pt</b>	<b>Ma/Pt</b>	<b>Mi/Pt</b>
			(%)	
	<b>0,00-0,10m</b>		<b>0,10-0,20m</b>	
Hermatria	25,06	74,94	18,82	81,20
Pensacola	23,29	76,71	19,15	80,83
Tifton	24,76	74,62	17,14	82,88
Braquiária	26,30	73,72	23,21	76,77
<b>Media</b>	<b>24,85</b>	<b>75,00</b>	<b>19,58</b>	<b>80,42</b>

A relação ideal de 33% de macroporos em relação à porosidade total indica boa relação entre capacidade de aeração e retenção de água no solo (GENRO et al., 2009). De acordo com Neto et al. (2008) solos com baixos valores de macroporos apresentam sérias restrições ao crescimento vegetal, às trocas gasosas e à infiltração de água, intensificando o escoamento superficial das precipitações e consequentemente, os riscos de erosão hídrica.

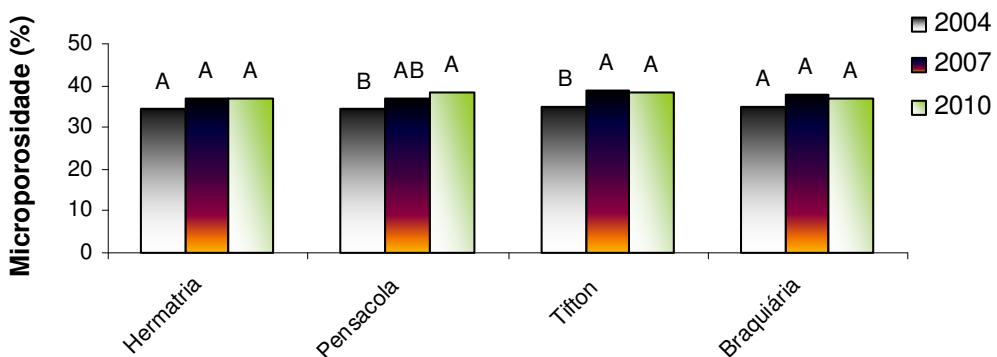
Apesar de 33% ser a faixa ideal de macroporos no solo em relação à porosidade total, alguns autores como Tormena et al. (1998) e Girardelo et al. (2011) consideram o valor do volume total de macroporos de 10% como restritivo ao desenvolvimento radicular em solos agrícolas sob plantio direto. Ao se considerar este valor, verifica-se que todos os tratamentos em 2010, ultrapassam esse limite na camada de 0,00-0,10m. Na camada de 0,10-0,20m somente o tratamento com Braquiaria apresentou macroporosidade superior a 10% (Tabela 5).

Ao se analisar o efeito do tempo para a microporosidade verifica-se que todos os tratamentos diferiram significativamente de 2004 para 2010, aumentando seus valores médios de 31,86% em 2004 para 38,75% em 2010 na camada de 0,00-0,10m (Figura 20a). Na camada de 0,10-0,20m observa-se que somente os tratamentos Pensacola e Tifton apresentaram valores de microporosidade que diferiram significativamente ao longo do tempo. Isto é, em 2004 os referidos tratamentos aumentaram seus valores médios de 34,67% para 38,41% em 2010 (Figura 20b).

a)



b)



**Figura 20:** Microporosidade nos anos de 2004, 2007 e 2010 nas camadas de 0,00-0,10m (a) e 0,10-0,20m (b) do solo construído.

Seguindo o critério de proporcionalidade de microporos em relação à porosidade total, sugerido por Khiel (1979), verifica-se que em 2010 todos os tratamentos apresentaram microporosidade acima dos 67%. Observa-se na Tabela 6 que os tratamentos apresentaram em média 75% e 80,42% do espaço poroso total ocupado por microporos, nas camadas de 0,00-0,10m e de 0,10-0,20m, respectivamente.

Apesar de inadequada a proporção entre macroporos/microporos, observa-se que entre os tratamentos, a Braquiária apresenta a melhor relação Ma/Pt e Mi/Pt, em ambas as camadas do solo construído, indicando maior efeito na recuperação da estrutura e distribuição de poros dos solos construídos que as demais plantas até o presente momento.

Na Tabela 5 também se observa que os tratamentos não apresentaram diferenças significativas entre si e nem em relação à testemunha (SCSP) para a capacidade de água disponível, em 2010. Este pode ser um reflexo da não diferenciação da microporosidade em ambas as camadas do solo construído. O conteúdo de água disponível reflete as alterações na estrutura do solo em virtude das alterações do espaço poroso (TORMENA et al., 1998) principalmente com aumento da microporosidade, que está relacionada à armazenagem de um volume de água relativamente alto, retido à baixa energia e disponível às plantas por um período de tempo relativamente longo após uma chuva (BERTOL et al., 1998).

Diante dos resultados apresentados ao longo dos 6 anos de condução do experimento, denota-se o quanto complexo é a recuperação dos atributos físicos de um solo construído após a mineração de carvão. As características físicas dos solos construídos dependem da variabilidade herdada dos diferentes processos construtivos, determinando a espessura e o grau de compactação das camadas (KÄMPF et al., 1997). Portanto a recuperação passa pela mitigação dos problemas químicos e físico-hídricos que resultam da construção dos solos após a mineração de carvão (CAMPOS et al., 2010).

Finalmente, torna-se necessário adotar medidas de recuperação que promovam a viabilidade do novo ecossistema a longo prazo (SHRESTHA & LAL, 2011), ou seja, o solo construído deve retornar a ser um meio para o crescimento de plantas, um regulador do fluxo de água, um reciclador de materiais e um habitat para organismos. Para isto, o conhecimento e o uso de plantas de cobertura com maior adaptabilidade às condições edáfico-climáticas locais e que gerem um maior aporte de biomassa aérea e subterrânea, torna-se fundamental na aceleração do processo de recuperação de áreas com elevado grau de degradação, caso das áreas mineradas.

#### **4.6. CONCLUSÕES**

1. Após seis anos de condução experimento as gramíneas passam a atuar de forma mais eficiente na recuperação dos atributos físicos do solo construído com destaque para a Braquiária, cujo tratamento apresentou menor densidade do solo e melhor relação entre macro e microporosidade com a porosidade total, principalmente na camada de 0,00-0,10m.
2. A capacidade de água disponível não foi afetada pela ação das diferentes gramíneas.
3. Após seis anos de condução do experimento, pôde ser observado que atributos hídricos como a capacidade de água disponível possivelmente necessitam de maior tempo de atividade das plantas de cobertura para que resultados positivos possam se tornar mais evidentes.

#### **4.7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS:**

- ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica (Brasil). **Atlas de energia elétrica do Brasil.** 3.ed. 2008. 236p.
- ASSIS, R.L. & LANÇAS, K.P. Efeito do tempo de adoção do sistema plantio direto na densidade do solo máxima e umidade ótima de compactação de um Nitossolo Vermelho distroférrico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.28, p.337-345. 2004.
- ARRANZ-GONZÁLEZ, J. C. Suelos mineros asociados a la minería de carbón a cielo abierto en España: una revisión. **Boletín Geológico y Minero**, v.122, n.2, p.171-186. 2011.
- BERTOL, I.; GOMES, K.E.; DENARDIN, R.B.N.; MACHADO, L.A.Z. & MARASCHIN, G.E. Propriedades físicas do solo relacionadas a diferentes níveis de oferta de forragem numa pastagem natural. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.33, p. 779-786. 1998.
- CAMARGO, O.A. & ALLEONI, L.R.F. **Compactação do solo e o desenvolvimento de plantas.** Piracicaba: Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz. 1997.
- CAMPOS, M.L.; ALMEIDA, J.A.; SILVEIRA, C.B.; GATIBONI, L.C.; ALBUQUERQUE, J.A.; MAFRA, A.L; FILHO, O.K. & SANTOS, J.C.P. Impactos no solo provocados pela mineração e depósito de rejeitos de carvão mineral. **Revista de Ciências Agroveterinárias**, v.9, n2, p. 198-205. 2010.
- DOURADO NETO, D.; NIELSEN, D.R.; HOPMANS, J.W.; REICHARDT, K. & BACCHI, O.O.S. Software to model soil water retention curves (SWRC, version 2.0). **Scientia Agrícola**, v. 57, n 1, p. 191-192, 2000.
- EMBRAPA - Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Manual de Métodos de Análise de Solo.** Rio de Janeiro: EMBRAPA CNPS 1997. 80p.
- EMBRAPA - Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos.** 2ed. 2006. 306p.
- FERREIRA, M. M. Caracterização Física do Solo. In: van LIER Q. J. **Física do Solo.** Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. 2010. p.2-27.
- FOLONI, J.S.S.; LIMA, S.L. & BÜL, L.T. Crescimento aéreo e radicular da soja e de plantas de cobertura em camadas compactadas de solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.30, p.49-57. 2006.

- FRANCO, A.M.P. **Caracterização física de um solo construído na área de mineração de carvão de Candiota- RS.** Pelotas-RS 2006. 124f. Dissertação (Mestrado em Solos). Programa de Pós-Graduação em Agronomia. Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel - Universidade Federal de Pelotas 2006.
- FRITZ, K.B.B. Impactos Sócio-econômicos do uso do carvão mineral na região de Candiota-RS. In: **Estudos Ambientais em Candiota – Carvão e seus impactos.** Cadernos de Planejamento e Gestão Ambiental nº 4. Fundação Estadual de Proteção Ambiental Henrique Luiz Roessler. Porto Alegre – RS. 2004. p. 31-50.
- GENRO JUNIOR, S.A.; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M. & ALBUQUERQUE, J.A. Atributos físicos de um Latossolo Vermelho e produtividade de culturas cultivadas em sucessão e rotação. **Ciência Rural**, v.39, p.65-73. 2009.
- GIRARDELO, V.C.; AMADO, T.J.C.; NICOLOSO, R.S.; HÖRBE, T.A.N.; FERREIRA, A.O.; TABALDI, F.M. & LANZANOVA, M.E. Alterações nos atributos físicos de um Latossolo Vermelho sob plantio direto induzidas por diferentes tipos de escarificadores e o rendimento da soja. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.35, p.2115-2126. 2011.
- 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.** Pelotas-RS 2008. 92f. Dissertação (Mestrado em Solos). Programa de Pós-Graduação em Agronomia. Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel - Universidade Federal de Pelotas 2008.
- HAMZA, M. A. & ANDERSON, W. K. Soil compaction in cropping systems: a review of the nature causes and possible solutions. **Soil and Tillage Research**, v.82, n2, p.121-145. 2005.
- HICKMANN, C.; COSTA, L.M.; SCHAEFER, C.E.G.R.; FERNANDES, R.B.A. & ANDRADE, C.L.T. Atributos físico-hídricos e carbono orgânico de um Argissolo após 23 anos de diferentes manejos. **Revista Caatinga**, v.25, n1, p.128-136. 2012.
- JIMENEZ, R.L.; GONÇALVES, W.G.; ARAÚJO FILHO, J.V.; ASSIS, R.L.; PIRES, F.R. & SILVA, G.P. Crescimento de plantas de cobertura sob diferentes níveis de compactação em um Latossolo Vermelho. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.12, n2, p.116–121. 2008.
- KÄMPF, N. Propriedades pedogênese e classificação de solos construídos em áreas de mineração na Bacia Carbonífera do Baixo Jacuí. **Revista Brasileira Ciência do Solo**, v. 21, p.165-178. 1997.

- KIEHL E. J. **Manual de Edafologia**. São Paulo-SP ed. Agronômica Ceres Ltda, 1979. 262p.
- KLUTE, A. (ed.). **Methods of Soil Analysis** 2.ed. Madison Wisconsin USA: American Society of Agronomy Soil Science Society of America 1986. p.425-441.
- KLEIN, V.A. & LIBARDI, P.L. Condutividade hidráulica de um Latossolo Roxo não saturado sob diferentes sistemas de uso e manejo. **Ciência Rural**, v.32, n6, p.945-953. 2002.
- MAGALHÃES, E.N.; OLIVEIRA, G.C.; SEVERIANO, E.C.; COSTA, K.A.P. & CASTRO, M.B. Recuperação estrutural e produção de capim-tifton 85 em um Argissolo vermelho-amarelo compactado. **Ciência Animal Brasileira**, v.10, n1, p. 68-76. 2009.
- NETO, A.L.; ALBUQUERQUE, J.A.; ALMEIDA, J.A.; MAFRA, A.L.; MEDEIROS, J.C. & ALBERTON, A. Atributos físicos do solo em área de mineração de carvão influenciados pela correção da acidez, adubação orgânica e revegetação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.32, n4. 2008.
- NUNES, M.C.D. **Condições físicas de solos construídos na área de mineração de carvão de Candiota-RS**. Pelotas-RS 2002. 130f. Dissertação (Mestrado em Solos). Programa de Pós-Graduação em Agronomia. Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel - Universidade Federal de Pelotas 2002.
- PAIM, N.R. & RIBOLDI, J. Renovação de área de pastagem de trevo-branco associado com gramíneas. **Revista Brasileira de Agrociência**, v.1, n3, p.189-194. 1995.
- PEREIRA, A.R. **Como selecionar plantas para áreas degradadas e controle de erosão**. 2. ed. Belo Horizonte: Ed. FAPI 2008. 239 p.
- PIRES, A & HOLTZ, A. *Setor elétrico ante a demanda crescente*. Disponível em: <https://conteudoclippingmp.planejamento.gov.br>. Acesso em: 12/03/2012.
- REICHERT, J.M.; REINERT, J.D.; BRAIDA, J.A. Qualidade dos solos e sustentabilidade dos sistemas agrícolas. **Ciência & Ambiente**, v.27, p.29-48. 2003.
- SANTOS, L.N.S.; PASSOS, R.R.; CARDOSO, L.C.M.; SANTOS, L.; GARCIA, G.O. & CECÍLIO, R.A. Avaliação de atributos físicos de um Latossolo sob diferentes coberturas vegetais em Alegre (ES). **Engenharia Ambiental**, v.6, n2, p.140-149. 2009.

- SEQUINATTO, L. **Qualidade física do solo e rendimento de grãos num Argissolo em processo de recuperação.** 2010. 158f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo)-Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- SEVERIANO, E.C.; OLIVEIRA, G.C.; JÚNIOR, M.S.; COSTA, K.A.P.; CASTRO, M.B. & MAGALHÃES, E.N. Potencial de descompactação de um Argissolo promovido pelo capim-tifon 85. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.14, p.39-45. 2010.
- SHRESTHA, R.K. & LAL, R. Changes in physical and chemical properties of soil after surface mining and reclamation. **Geoderma**, v.161, p. 168-176. 2011.
- SILVA, I.F. & MIELNICZUK, J. Ação do sistema radicular de plantas na formação e estabilização de agregados do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.21, p.113-117. 1997.
- TEDESCO, M.J.; GIANELLO, C & BISSANI, C.A. **Análises de solos plantas e outros materiais.** Porto Alegre: UFRGS 1995 174 p.
- TORMENA, C.A.; SILVA, A.P. & LIBARDI, P.D. Caracterização do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Roxo sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.22, p.573-581.1998.
- Van GENUCHTEN, M.T.H. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society of America Journal**. n44, p.892-898. 1980.
- Van GENUCHTEN M.T.H. & NIELSEN, D.R. On describing and predicting the hidraulic properties of unsaturated soils. **Annales Geophysical** 3 (5): 615:628. 1985.
- VIEIRA, M.L.; KLEIN, V.A. Propriedades físico-hídricas de um Latossolo Vermelho submetido a diferentes sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, v.31, p.1271-1280. 2007.

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Após seis anos de execução do experimento é possível observar a recuperação inicial dos indicadores físicos do solo construído. Esta demora demonstra o grau de degradação no sistema solo ocasionada pela mineração do carvão e a dificuldade de se recuperar estas áreas. Contudo as pesquisas desenvolvidas até o presente momento comprovam a eficiência das gramíneas perenes em recuperar a estrutura dos solos construídos ao longo do tempo.

Ressalta-se a importância de mais estudos relacionados aos indicadores microbiológicos e biológicos, como a distribuição do sistema radicular das plantas em profundidade, para melhor compreensão dos efeitos das plantas de cobertura utilizadas na recuperação do solo construído.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ADE, M. V. B. **Caracterização dos sistemas deposicionais e das camadas de carvão no pacote sedimentar da Malha IV, Jazida de Candiota (RS).** Porto Alegre-RS, 1993. 121f. Dissertação (Mestrado). Instituto de Geociências - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 1993.
- ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica (Brasil). **Atlas de energia elétrica do Brasil.** 3 ed. 2008. 236p.
- ANDRADE, R.S.; STONE, L.F. & SILVEIRA, P.M. Culturas de cobertura e qualidade física de um Latossolo em plantio direto. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.13, n4, p.411–418. 2009.
- ARRANZ-GONZÁLEZ, J.C. Suelos mineros asociados a la minería de carbón a cielo abierto en España: una revisión. **Boletín Geológico y Minero**, v.122, n2, p.171-186. 2011.
- BRASIL. Constituição da república federativa do Brasil de 1988. Diário Oficial da República Federativa do Brasil. Brasília 1988.
- BRASIL. Decreto n.º 6.514. Diário Oficial da República Federativa do Brasil. Brasília 2008.
- BRASIL. Decreto 97.632 de 10 de abril de 1989. Diário Oficial da República Federativa do Brasil. Brasília 1989.
- BRASIL. Decreto- lei nº. 227 de 28 de fevereiro de 1967. Diário Oficial da República Federativa do Brasil. Brasília 1967.
- BRASIL. Lei nº 6.938 de 31 de agosto de 1981. Institui a Política Nacional do Meio Ambiente. Diário Oficial da República Federativa do Brasil. Brasília 1981.
- BRASIL. Lei nº 7.805 de 1989. Diário Oficial da República Federativa do Brasil. Brasília 1989.
- CAPECHE, C.L.; MACEDO, J.R. & MELO, A.S. **Estratégias de recuperação de áreas degradadas.** Disponível em [www.cnps.embrapa.br](http://www.cnps.embrapa.br). Acesso em 12 fevereiro de 2012.
- CARDOSO, E.G.; ZOTARELLI, L.; PICCININ, J. & TORRES, J. **Distribuição do sistema radicular da cultura da soja em função do manejo do solo.** In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO 29. 2003. Anais... Ribeirão Preto: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo 2003. 1 CD-ROM.
- CASTRO FILHO, C.; MUZILLI, O. & PODANOSCHI, A.L. Estabilidade dos agregados e sua relação com o teor de carbono orgânico em um Latossolo Roxo

distrófico em função de sistemas de plantio rotações de culturas e métodos de preparo das amostras. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.22, p.527-538. 1998.

CHIODEROLI, C.A.; MELLO, L.M.M; GRIGOLLI, P.J.; FURLANI, C.E.A; SILVA, J.O.R & CESARIN, A.L. Atributos físicos do solo e produtividade de soja em sistema de consórcio milho e braquiária. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola Ambiental**, v.16, n1, p.37-43. 2012.

CGTEE – Companhia de Geração Térmica de Energia Elétrica. Disponível em: <http://www.eletrobras.gov.br>. Acesso em: 15/07/2012.

CRM – **Companhia Riograndense de Mineração**. Disponível em: <http://www.crm.rs.gov.br>. Acesso em 10 de novembro 2011.

CROMACH, Jr.K. Below-ground processes in forest succession. In: WEST D. C.; SHUGART H. H.; BOTKIN D. B. (Ed.) **Forest sucession – concepts and application**. 1981. 361-373p.

D'ALTERIO, C.F.V. & VALCARCEL, R. **Medidas Fisico-Biológicas de Recuperação de áreas Degradadas: “Avaliação das Modificações Edáficas e Fitossociológicas”**. VI Jornada de Iniciação Científica. Resumos... UFRRJ. 137p. p.52. 1996.

DIAS, L.E. & GRIFFITH, J.J. Conceituação e caracterização de áreas degradadas. In: **Recuperação de Áreas Degradadas**. Editora Folha de Viçosa Ltda. Viçosa – MG. 1998. p.1-7.

DIAS JUNIOR, M.S. & PIERCE, F.J. O processo de compactação do solo e sua modelagem. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.20, p.175-182. 1996.

DNPM. Portaria nº 237 de 18 de outubro de 2001. Institui as Normas Reguladoras de Mineração (NRMs). 2001.

ENGEL, V.L. & PARROTTA, J.A. Definindo a restauração ecológica: Tendências e perspectivas mundiais. In: **Restauração ecológica de ecossistemas naturais. Fundação de Estudos e Pesquisas Agrícolas e Florestais – FEPAF**. Botucatu – SP. 2003. p. 1-26.

FASSBENDER, H.W. & BORNEMISZA, E. **Química de suelos: Com énfasis en suelos de América Latina**. 2.ed. San José: IICA 1994. 420p.

FRANCO, A.M.P. **Caracterização física de um solo construído na área de mineração de carvão de Candiota- RS**. Pelotas-RS 2006. 124f. Dissertação

- (Mestrado em Solos). Programa de Pós-Graduação em Agronomia. Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel - Universidade Federal de Pelotas 2006.
- GAIVIZZO, L.H.B; VIDOR, C.; TEDESCO, M.J. & BISSANI, C.A. Potencial poluidor de rejeitos carboníferos. Efeitos da recuperação com camadas de solo sobre as plantas e a população microbiana. **Ciência Rural**, v.32, n6, p.955-961. 2002.
- 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.** Pelotas-RS 2008. 92f. Dissertação (Mestrado em Solos). Programa de Pós-Graduação em Agronomia. Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel - Universidade Federal de Pelotas 2008.
- GONÇALVES, J.L.M.; NOGUEIRA JUNIOR, L.R & DUCATTI, F. Recuperação de solos degradados. In: **Restauração ecológica de ecossistemas naturais.** Fundação de Estudos e Pesquisas Agrícolas e Florestais – FEPAF. Botucatu – SP. 2003. p. 111-163.
- GUERRA, T & FERRARO, L.W. Caracterização Geral da Região de Candiota. In: **Estudos Ambientais em Candiota – Carvão e seus impactos.** Cadernos de Planejamento e Gestão Ambiental nº 4. Fundação Estadual de Proteção Ambiental Henrique Luiz Roessler. Porto Alegre – RS. 2004. p. 17-33.
- GUERRA, A.J.T. Início do processo erosivo. In: GUERRA A.J.T.; SILVA A.S.S; BOTELHO R.G.M. **Erosão e Conservação dos Solos: Conceitos Temas e Aplicações.** Ed. Bertrand Brasil 1999. p.17-55.
- HARCOMBE, P.A. Soil nutrient loss as a facto in early tropical secondary succession. **Biotropica**, v.12, p.8-14. 1980.
- HARGROVE, W.L. Winter legumes as a nitrogen source for no-till grain sorghum. **Agronomy Journal**, v.78, n1, p.70-74. 1986.
- HAYNES, R.J. & BEARE, M.H. Influence of six crop species on aggregate stability and labile organic matter fractions. **Soil Biology & Biochemistry**, v.29, n11, p.1647-1653. 1997.
- IBAMA. **Manual de recuperação de áreas degradadas pela mineração.** Brasília IBAMA 96p. 1990.
- INDORANTE, S.J.; JANSEN, I.J. & BOAST, C.W. Surface mining and reclamation initial changes in soil character. **Journal of Soil and Water Conservation**, p.347-350.1981.

- KÄMPF,N.; SCHNEIDER, P. & BOHNEN, H. Solos construídos em áreas de mineração da bacia carbonífera do Baixo Jacuí. In: **Carvão e Meio Ambiente**. Centro de Ecologia da UFRGS. Ed. UFGRS. 2000 p.596-640.
- KIEHL, E. J. **Manual de Edafologia**. São Paulo-SP ed. Agronômica Ceres Ltda, 1979. 262p.
- KOPEZINSKI, I. **Mineração e Meio Ambiente: Considerações Legais principais impactos ambientais e seus processos modificadores**. Porto Alegre-RS Universidade Federal do Rio Grande do Sul 2000 103p.
- LEAL, O.A. **Qualidade física de um solo construído e cultivado com diferentes plantas de cobertura na área de mineração de Candiota – RS**. Pelotas-RS 2010. 107f. Dissertação (Mestrado em Solos). Programa de Pós-Graduação em Agronomia - Universidade Federal de Pelotas. 2010.
- MAJER, J.D. Fauna studies and land reclamation technology: a review of the history and need for such studies. In: **Animals in primary succession: the role of fauna in reclaimed lands**. p.3-33. Cambridge University Press. 1989.
- MENDONÇA, R. M.G. et al. **Uso do solo argiloso compactado para minimização da drenagem ácida em rejeitos da mineração de carvão na região sul do Estado de Santa Catarina**. CETEM/MCT. Rio de Janeiro set. 2002. [Contribuição Técnica elaborada para II Congresso Brasileiro de Mina a Céu Aberto e II Congresso Brasileiro de Mina Subterrânea Belo Horizonte IBRAM]. Disponível em [www.cetem.gov.br/publicacao](http://www.cetem.gov.br/publicacao) .Acesso em 18 de abril de 2008.
- MIOLA, E.C.C. **Qualidade física de um solo construído e cultivado com diferentes plantas de cobertura na área de mineração de Candiota – RS**. Pelotas-RS. 2010. 107f. Dissertação (Mestrado em Solos). Programa de Pós-Graduação em Agronomia - Universidade Federal de Pelotas. 2010.
- MOREIRA, P.R. **Manejo do solo e recomposição da vegetação com vistas a recuperação de áreas degradadas pela extração de bauxita em Poços de Caldas - MG**. Universidade Estadual Paulista Julio de Mesquita Filho 2004. 139p. (Tese de Doutorado).
- NUNES, M.C.D. **Condições físicas de solos construídos na área de mineração de carvão de Candiota-RS**. Pelotas-RS 2002. 130f. Dissertação (Mestrado em Solos). Programa de Pós-Graduação em Agronomia. Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel - Universidade Federal de Pelotas 2002.

- PALMEIRA, P.R.T.; PAULETTO, E.A.; TEIXEIRA, C.F.A.; GOMES, A.S. & SILVA, J.B. Agregação de um Planossolo submetido a diferentes sistemas de cultivo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.23, p.189-195. 1999.
- PERIN, A.; GUERRA, J.G.M.; TEIXEIRA, M.G.; PEREIRA, M.G. & FONTANA, A. Efeito da cobertura viva com leguminosas herbáceas perenes na agregação de um Argissolo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v26, p.713-720. 2002.
- PINTO, L.F.S. **Potencial de acidificação e de neutralização do carvão cinzas e materiais geológicos da área de mineração de Candiota-RS**. Relatório da FAPERGS UFPel Pelotas-RS 1999. 31p.
- PIRES, A & HOLTZ, A. Setor elétrico ante a demanda crescente. Disponível em: <https://conteudoclippingmp.planejamento.gov.br> . Acesso em: 12/03/2012.
- PRIMAVESI, A. **Manejo ecológico do solo: a agricultura em regiões tropicais**. São Paulo: Nobel 2002. 549p.
- PAULETTO, E.A.; PINTO, L.F.S.; FERNANDES, F.F. & CASTILHOS, D.D. **Relatório Técnico de Projeto “Recuperação dos solos regenerados da área de mineração de carvão de Candiota – RS”** (2007).
- RIO GRANDE DO SUL. Lei nº 11.520 de 03 de agosto de 2000. Institui o Código Estadual do Meio Ambiente do Rio Grande do Sul. Porto Alegre 2000.
- SILVA, I.F. & MIELNICZUK, J. Ação do sistema radicular de plantas na formação e estabilização de agregados do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.21, p.113-117. 1997.
- SHRESTHA, R. K. & LAL, R. Changes in physical and chemical properties of soil after surface mining and reclamation. **Geoderma**, v.161, p.168-176. 2011.
- SOUZA, M.G. **Fechamento de Mina: aspectos legais**. Disponível em: <http://www.geologo.com.br> .Acessado em 12/03/2012.
- STUMPF, L. **Atributos físicos e mecânicos de um solo construído em área de mineração de carvão em Candiota-RS cultivado com diferentes espécies vegetais**. Pelotas-RS 2011. 124f. Dissertação (Mestrado em Solos). Programa de Pós-Graduação em Agronomia. Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel - Universidade Federal de Pelotas 2011.
- TAYLOR, R.W.; IBEABUCHI, I.O. & SISTANI, K.R. Accumulation of some metals by legumes and their extractability from acid mine spoils. **Journal of Environmental Quality Madison**, v.21, n.2, p.176-180. 1992.

- TISDALL, J.M. & OADES, J.M. Organic matter and water-stable aggregates in soils. **European Journal of Soil Science**, v. 33, p. 141-163. 1982.
- VEZZANI, F.M; CONCEIÇÃO, P.C; MELLO, N.A. & DIECKOW, J. Matéria orgânica e qualidade do solo. In: SANTOS, G.A; SILVA, L.S; CANELLAS, L.P; CAMARGO, F.A. **Fundamentos da Matéria Orgânica do Solo – Ecossistemas Tropicais e Subtropicais**. Porto Alegre-RS 2008. p.483-493.
- WORLD COAL INSTITUTE. The Coal Resource: a Comprehensive Overview of Coal. 2005. Disponível em <http://www.worldcoal.org> . Acesso em 19 de fevereiro de 2012.

# APÊNDICES

**Apêndice 1** - Médias finais da distribuição dos agregados estáveis em água nas diferentes classes de tamanho diâmetro médio ponderado (DMP) e carbono orgânico (CO) para os 5 tratamentos dos blocos I II III e IV, na camada de 0,00-0,10m, no ano de 2010.

Tratamento	BLOCO I						DMP mm	CO g/kg <sup>-1</sup>	Macroag. ----- % -----	Microag. ----- % -----
	9,72-4,76	4,76-2,00	2,00-1,00	1,00-0,25	0,25-0,105	<0,105				
Hermatria	12,75	17,94	19,48	22,95	4,92	21,95	1,97	8,50	73,13	26,87
Pensacola	6,82	19,74	22,45	29,45	5,68	15,86	1,69	6,70	78,46	21,54
Tifton	14,20	19,28	19,44	27,98	4,83	14,27	2,15	7,90	80,90	19,10
Braquiária	14,09	24,05	20,67	21,72	7,98	11,49	2,28	11,60	80,54	19,46
Solo construído	2,11	6,77	11,82	42,97	8,44	27,89	0,86	2,80	63,67	36,33
BLOCO II										
Hermatria	18,45	20,30	23,47	25,52	3,63	8,64	2,52	7,50	87,74	12,26
Pensacola	26,70	21,65	19,28	21,91	2,94	7,53	3,07	6,80	89,54	10,46
Tifton	18,04	18,35	18,86	27,21	4,25	13,29	2,37	7,10	82,46	17,54
Braquiária	25,61	24,54	18,99	20,16	2,72	7,98	3,08	7,10	89,30	10,70
Solo construído	35,80	25,06	8,39	11,15	2,24	17,37	3,61	1,20	80,39	19,61
BLOCO III										
Hermatria	14,57	14,09	15,90	36,24	5,53	15,04	1,90	8,70	79,43	20,57
Pensacola	9,36	14,51	18,76	36,29	6,53	14,54	1,68	8,60	78,94	21,06
Tifton	6,33	13,37	16,21	36,55	10,34	17,20	1,40	8,00	72,46	27,54
Braquiária	20,34	17,29	15,52	27,81	5,32	13,72	2,46	13,90	80,96	19,04
Solo construído	36,51	10,23	15,48	37,57	9,02	24,23	1,09	4,20	66,75	33,25
BLOCO IV										
Hermatria	12,52	15,46	18,98	34,80	4,89	13,36	1,93	9,20	81,75	18,25
Pensacola	27,85	15,73	14,45	26,30	4,03	11,63	2,91	8,10	84,34	15,66
Tifton	8,65	14,92	21,80	34,11	6,62	13,90	1,68	8,10	79,48	20,52
Braquiária	2,36	9,83	16,45	43,29	7,23	20,84	1,04	8,20	71,93	28,07
Solo construído	13,27	12,98	16,13	27,60	9,80	31,16	1,10	3,70	69,97	40,96

**Apêndice 2 - Médias finais da distribuição dos agregados estáveis em água nas diferentes classes de tamanho diâmetro médio ponderado (DMP) e carbono orgânico (CO) para os 5 tratamentos dos blocos I II III e IV, na camada de 0,10-0,20m, no ano de 2010.**

Tratamento	BLOCO I						DMP mm	CO g/kg <sup>-1</sup>	Macroag. ----- % -----	Microag. ----- % -----
	9,72-4,76	4,76-2,00	2,00-1,00	1,00-0,25	0,25-0,105	<0,105				
Hermafória	10,34	17,39	20,59	31,48	5,17	15,02	1,85	4,60	79,80	20,20
Pensacola	15,04	25,74	20,67	28,26	4,24	6,04	2,44	6,30	89,72	10,28
Tifton	20,74	27,55	22,24	20,04	3,13	6,30	2,88	7,50	89,69	10,31
Braquiária	4,43	17,35	31,79	28,13	6,11	12,21	1,57	8,50	81,69	18,31
Solo construído	4,75	11,89	20,40	36,90	4,97	21,09	1,29	3,10	73,94	26,06
BLOCO II										
Hermafória	26,18	24,75	22,32	18,46	1,81	6,47	3,33	4,50	91,72	8,28
Pensacola	56,56	21,22	11,69	7,39	0,77	2,37	4,40	5,10	96,86	3,14
Tifton	22,83	22,91	21,98	22,20	1,84	8,24	2,88	5,80	89,92	10,08
Braquiária	43,96	31,15	12,12	8,36	1,20	3,20	4,43	4,50	95,60	4,40
Solo construído	1,38	8,18	18,35	42,08	6,40	23,61	0,94	0,70	69,98	30,02
BLOCO III										
Hermafória	7,92	17,21	25,39	35,80	4,49	9,20	1,76	6,00	86,32	13,68
Pensacola	4,17	11,39	22,80	41,91	5,89	13,84	1,30	6,30	80,27	20,26
Tifton	4,35	16,57	25,50	34,27	4,06	15,26	1,48	5,00	80,69	19,31
Braquiária	5,29	17,72	25,31	38,88	5,47	7,33	1,61	6,20	87,19	12,81
Solo construído	36,29	16,73	14,10	11,41	4,79	16,68	3,45	2,40	78,53	21,47
BLOCO IV										
Hermafória	6,40	16,11	26,88	37,72	4,12	8,77	1,65	7,40	87,11	12,89
Pensacola	27,53	24,35	15,04	22,75	3,10	7,23	3,16	5,40	90,72	9,28
Tifton	12,01	19,49	24,98	30,74	2,93	9,85	2,09	8,80	87,22	12,78
Braquiária	11,57	28,44	25,51	26,05	2,92	5,51	2,34	10,20	91,57	8,43
Solo construído	44,71	24,31	8,94	11,16	2,03	8,85	4,22	2,00	89,12	10,88

**Apêndice 3** - Médias Finais da densidade do solo (Ds), porosidade total (Pt), macroporosidade (Ma) e microporosidade (Mi) para os 5 tratamentos dos blocos I II III IV, na camada de 0,00-0,10m, no ano de 210.

Tratamento	BLOCO I				BLOCO II			
	Ds Mg.m <sup>-3</sup>	Pt ----- (%) -----	Ma	Mi	Ds Mg.m <sup>-3</sup>	Pt ----- (%) -----	Ma	Mi
Hermatria	1,37	59,97	18,60	41,37	1,39	50,53	14,17	36,36
Pensacola	1,43	54,25	14,76	39,48	1,51	47,71	13,20	34,51
Tifton	1,39	56,34	14,51	41,83	1,43	47,60	9,25	38,35
Braquiária	1,40	51,31	12,17	39,15	1,32	55,73	21,91	33,82
Solo construído	1,55	47,60	12,17	35,42	1,43	46,92	7,26	39,66
BLOCO III				BLOCO IV				
Hermatria	1,51	49,12	10,32	38,80	1,52	49,67	9,38	40,30
Pensacola	1,45	51,39	10,37	41,02	1,47	49,99	9,02	40,96
Tifton	1,46	51,13	14,19	36,94	1,48	50,08	13,13	36,95
Braquiária	1,30	53,10	12,23	40,87	1,44	47,76	8,37	39,39
Solo construído	1,46	49,24	9,55	39,69	1,50	48,83	15,60	33,23

**Apêndice 4** - Médias Finais da densidade do solo (Ds), porosidade total (Pt), macroporosidade (Ma) e microporosidade (Mi) para os 5 tratamentos dos blocos I II III IV, na camada de 0,10-0,20m, no ano de 210.

Tratamento	BLOCO I				BLOCO II			
	Ds Mg.m <sup>-3</sup>	Pt ----- (%) -----	Ma	Mi	Ds Mg.m <sup>-3</sup>	Pt ----- (%) -----	Ma	Mi
Hermatria	1,56	45,13	7,42	37,71	1,46	46,44	12,33	34,11
Pensacola	1,56	50,70	10,31	40,39	1,70	43,44	9,15	34,29
Tifton	1,65	53,40	9,87	43,53	1,67	41,75	6,62	35,13
Braquiária	1,58	50,10	10,15	39,95	1,71	40,00	7,38	32,62
Solo construído	1,69	42,64	6,01	36,63	1,58	47,09	9,77	37,32
BLOCO III				BLOCO IV				
Hermatria	1,67	43,47	6,19	37,28	1,67	45,79	8,05	37,74
Pensacola	1,66	46,76	6,37	40,39	1,66	48,59	10,45	38,14
Tifton	1,60	45,54	7,49	38,05	1,63	45,26	7,91	37,35
Braquiária	1,37	52,46	12,98	39,48	1,53	50,30	14,27	36,02
Solo construído	1,54	50,02	12,91	37,11	1,63	46,10	8,19	37,91

**Apêndice 5** - Dados da curva de retenção de água considerando como limite superior a água retida à tensão de 10 kPa e parâmetros de ajuste para o modelo de Van Genuchten (1980) no bloco I nas camadas de 0,00-0,10m e 0,10-0,20m, no ano de 2010.

**Apêndice 6** - Dados da curva de retenção de água considerando como limite superior a água retida à tensão de 10 kPa e parâmetros de ajuste para o modelo de Van Genutchen (1980) no bloco II nas camadas de 0,00-0,10m e 0,10-0,20m, no ano de 2010.

BLOCO II														
		Tensões							$\alpha$	m	n	$\theta_r$	$\theta_s$	A.D
Tratamentos		0	10	60	102	340	1020	15300	(l/m)			(cm³/cm³)	(cm³/cm³)	
camada de 0,00 - 0,10 m														
<b>Hermatria</b>	$\theta_{obs.}$	0,505	0,468	0,364	0,348	0,304	0,268	0,238						
	$\theta_{calc.}$	0,505	0,465	0,375	0,347	0,298	0,272	0,246	0,0454	0,4737	1,13	0,238	0,505	
<b>Pensacola</b>	$\theta_{obs.}$	0,477	0,418	0,345	0,330	0,301	0,266	0,251						
	$\theta_{calc.}$	0,477	0,416	0,350	0,330	0,293	0,272	0,254	0,018	1,142	0,673	0,251	0,477	
<b>Tifton</b>	$\theta_{obs.}$	0,476	0,454	0,383	0,365	0,319	0,269	0,240						
	$\theta_{calc.}$	0,476	0,448	0,391	0,366	0,310	0,273	0,243	0,006	1,163	0,785	0,240	0,476	
<b>Braquiária</b>	$\theta_{obs.}$	0,557	0,483	0,338	0,313	0,278	0,235	0,209						
	$\theta_{calc.}$	0,557	0,483	0,342	0,312	0,266	0,242	0,218	0,115	0,293	1,678	0,209	0,557	
<b>Solo Const.</b>	$\theta_{obs.}$	0,469	0,425	0,397	0,377	0,291	0,222	0,182						
	$\theta_{calc.}$	0,469	0,445	0,395	0,369	0,294	0,229	0,183	0,001	3,764	0,711	0,182	0,469	
camada de 0,10 - 0,20 m														
<b>Hermatria</b>	$\theta_{obs.}$	0,464	0,426	0,341	0,335	0,319	0,277	0,252						
	$\theta_{calc.}$	0,460	0,439	0,348	0,331	0,302	0,284	0,263	0,1320	0,0396	9,3110	0,250	0,460	
<b>Pensacola</b>	$\theta_{obs.}$	0,434	0,387	0,343	0,335	0,324	0,316	0,300						
	$\theta_{calc.}$	0,430	0,390	0,344	0,336	0,322	0,315	0,305	0,2569	0,0906	4,3458	0,300	0,430	
<b>Tifton</b>	$\theta_{obs.}$	0,417	0,378	0,351	0,339	0,327	0,315	0,303						
	$\theta_{calc.}$	0,420	0,379	0,351	0,343	0,325	0,313	0,301	0,0016	2,7868	0,4397	0,300	0,420	
<b>Braquiária</b>	$\theta_{obs.}$	0,396	0,361	0,323	0,312	0,305	0,294	0,291						
	$\theta_{calc.}$	0,400	0,360	0,320	0,311	0,298	0,293	0,290	0,0302	1,3637	0,7780	0,290	0,400	
<b>Solo Const.</b>	$\theta_{obs.}$	0,471	0,389	0,373	0,341	0,319	0,296	0,263						
	$\theta_{calc.}$	0,471	0,397	0,358	0,346	0,318	0,297	0,270	0,0003	3,6043	0,3501	0,264	0,471	

**Apêndice 7** - Dados da curva de retenção de água considerando como limite superior a água retida à tensão de 10 kPa e parâmetros de ajuste para o modelo de Van Genutchen (1980) no bloco III nas camadas de 0,00-0,10m e 0,10-0,20m, no ano de 2010.

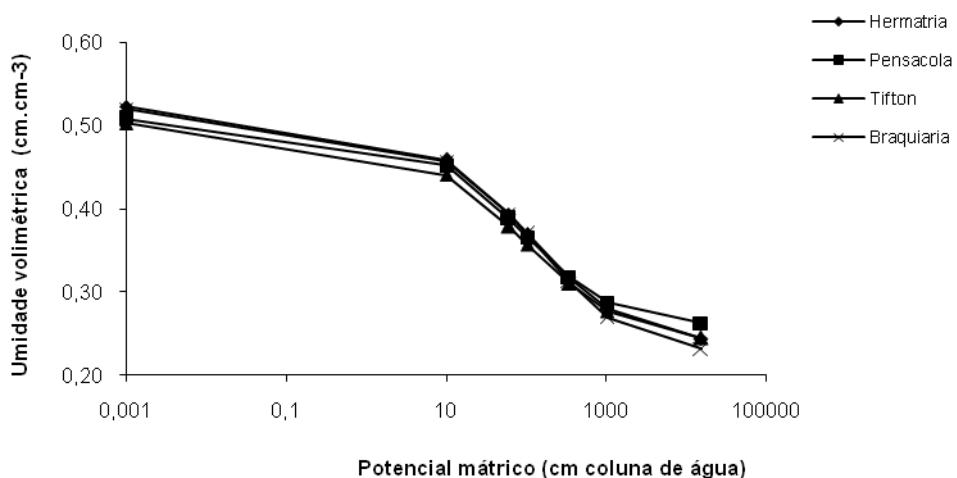
BLOCO III														
Tratamentos		Tensões							$\alpha$	$m$	$n$	$\theta_r$	$\theta_s$	A.D
		0	10	60	102	340	1020	15300	(l/m)				(cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup> )	(cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup> )
camada de 0,00 - 0,10 m														
<b>Hermatria</b>	$\theta_{obs.}$	0,491	0,452	0,388	0,371	0,325	0,295	0,275						
	$\theta_{calc.}$	0,491	0,450	0,391	0,369	0,323	0,296	0,277	0,0056	1,5978	0,6848	0,275	0,491	0,093
<b>Pensacola</b>	$\theta_{obs.}$	0,514	0,487	0,410	0,372	0,333	0,290	0,268						
	$\theta_{calc.}$	0,510	0,490	0,408	0,376	0,321	0,295	0,274	0,027	0,524	1,297	0,270	0,510	0,102
<b>Tifton</b>	$\theta_{obs.}$	0,511	0,465	0,369	0,347	0,320	0,277	0,249						
	$\theta_{calc.}$	0,510	0,469	0,375	0,350	0,308	0,285	0,260	0,074	0,342	1,362	0,250	0,510	0,090
<b>Braquiária</b>	$\theta_{obs.}$	0,531	0,460	0,409	0,374	0,314	0,267	0,223						
	$\theta_{calc.}$	0,530	0,463	0,397	0,372	0,312	0,265	0,222	0,0002	5,079	0,485	0,220	0,530	0,150
<b>Solo Const.</b>	$\theta_{obs.}$	0,492	0,451	0,397	0,358	0,314	0,262	0,219						
	$\theta_{calc.}$	0,492	0,451	0,393	0,370	0,311	0,264	0,222	0,001	2,464	0,594	0,219	0,492	0,148
camada de 0,10 - 0,20 m														
<b>Hermatria</b>	$\theta_{obs.}$	0,435	0,407	0,373	0,358	0,340	0,321	0,300						
	$\theta_{calc.}$	0,430	0,408	0,373	0,361	0,336	0,320	0,304	0,0192	0,7688	0,7834	0,300	0,430	0,0565
<b>Pensacola</b>	$\theta_{obs.}$	0,468	0,439	0,404	0,382	0,364	0,342	0,326						
	$\theta_{calc.}$	0,470	0,440	0,398	0,384	0,356	0,342	0,331	0,0107	1,3224	0,7167	0,330	0,470	0,0526
<b>Tifton</b>	$\theta_{obs.}$	0,455	0,416	0,380	0,371	0,336	0,316	0,288						
	$\theta_{calc.}$	0,460	0,419	0,383	0,371	0,341	0,319	0,293	0,0008	2,7582	0,4664	0,290	0,460	0,0774
<b>Braquiária</b>	$\theta_{obs.}$	0,525	0,490	0,395	0,372	0,321	0,268	0,242						
	$\theta_{calc.}$	0,520	0,486	0,399	0,367	0,309	0,277	0,247	0,0268	0,5826	1,0460	0,240	0,520	0,1203
<b>Solo Const.</b>	$\theta_{obs.}$	0,500	0,387	0,371	0,349	0,324	0,303	0,266						
	$\theta_{calc.}$							0,0000	6,2981	0,2654	0,266	0,500		

**Apêndice 8** - Dados da curva de retenção de água considerando como limite superior a água retida à tensão de 10 kPa e parâmetros de ajuste para o modelo de Van Genutchen (1980) no bloco IV nas camadas de 0,00-0,10m e 0,10-0,20m, no ano de 2010.

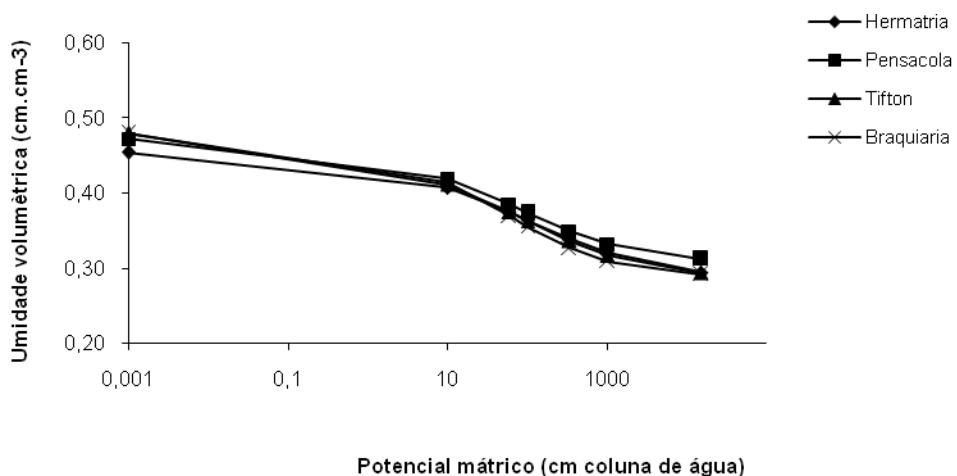
BLOCO IV														
		Tensões							$\alpha$	m	n	$\theta_r$	$\theta_s$	A.D
Tratamentos		0	10	60	102	340	1020	15300	(l/m)			(cm³/cm³)	(cm³/cm³)	
camada de 0,00 - 0,10 m														
<b>Hermatria</b>	$\theta_{obs.}$	0,497	0,435	0,403	0,365	0,324	0,288	0,234						
	$\theta_{calc.}$	0,497	0,439	0,387	0,367	0,321	0,283	0,239	0,0004	3,3111	0,4622	0,234	0,497	
<b>Pensacola</b>	$\theta_{obs.}$	0,500	0,448	0,410	0,386	0,341	0,306	0,262						
	$\theta_{calc.}$	0,500	0,452	0,406	0,388	0,343	0,306	0,263	0,0001	5,528	0,461	0,260	0,500	
<b>Tifton</b>	$\theta_{obs.}$	0,501	0,417	0,369	0,349	0,311	0,270	0,228						
	$\theta_{calc.}$	0,501	0,424	0,370	0,351	0,309	0,276	0,236	0,0003	3,669	0,403	0,230	0,501	
<b>Braquiária</b>	$\theta_{obs.}$	0,478	0,436	0,394	0,375	0,312	0,275	0,212						
	$\theta_{calc.}$	0,480	0,443	0,393	0,372	0,316	0,267	0,214	0,001	2,964	0,562	0,210	0,480	
<b>Solo Const.</b>	$\theta_{obs.}$	0,488	0,392	0,332	0,311	0,290	0,262	0,222						
	$\theta_{calc.}$	0,488	0,388	0,334	0,318	0,283	0,259	0,229	0,003	2,174	0,394	0,222	0,488	
camada de 0,10 - 0,20 m														
<b>Hermatria</b>	$\theta_{obs.}$	0,458	0,392	0,377	0,365	0,351	0,334	0,309						
	$\theta_{calc.}$	0,460	0,391	0,365	0,357	0,341	0,329	0,314	0,0001	4,9574	0,2923	0,310	0,460	
<b>Pensacola</b>	$\theta_{obs.}$	0,487	0,401	0,380	0,370	0,353	0,326	0,296						
	$\theta_{calc.}$	0,487	0,396	0,365	0,356	0,337	0,323	0,304	0,0001	4,9625	0,2819	0,300	0,487	
<b>Tifton</b>	$\theta_{obs.}$	0,432	0,368	0,357	0,345	0,329	0,303	0,274						
	$\theta_{calc.}$	0,433	0,370	0,342	0,333	0,314	0,298	0,276	0,0001	4,3650	0,3094	0,270	0,433	
<b>Braquiária</b>	$\theta_{obs.}$	0,503	0,380	0,360	0,346	0,332	0,315	0,289						
	$\theta_{calc.}$	0,500	0,387	0,352	0,344	0,330	0,320	0,305	2,2029	0,1027	2,4481	0,290	0,500	
<b>Solo Const.</b>	$\theta_{obs.}$	0,461	0,403	0,379	0,363	0,344	0,320	0,295						
	$\theta_{calc.}$	0,461	0,397	0,363	0,353	0,330	0,314	0,297	0,0001	5,8164	0,3521	0,295	0,461	

**Apêndice 9 – Curvas de retenção de água nas camadas de 0,00-0,10m (a) e 0,10-0,20m (b) no solo construído no ano de 2010.**

a)



b)



**Apêndice 10** – Valores médios de pH e capacidade de troca de cátions de um solo construído da área de mineração de carvão de Candiota-RS, cultivado com diferentes espécies vegetais, nas camadas de 0,00-0,05m, 0,05-0,10m e 0,10-0,15m (coleta de solo realizada em 2009).

Tratamento	pH água	CTC efetiva cmolc kg <sup>-1</sup>
0,00-0,05m		
Hermafroita	7,06	12,55
Pensacola	6,72	11,92
Tifton	7,03	12,15
Braquiária	6,05	10,26
0,05-0,10m		
Hermafroita	6,34	10,86
Pensacola	5,97	10,45
Tifton	6,53	10,92
Braquiária	5,73	9,92
0,10-0,15m		
Hermafroita	4,93	9,04
Pensacola	4,90	9,51
Tifton	5,00	8,87
Braquiária	4,60	10,09