

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PELOTAS
Programa de Pós-Graduação em Manejo e Conservação do Solo e da Água



Dissertação

**Qualidade física de um Argissolo sob a influência de diferentes doses de cinza
de casca de arroz**

Ivana Kruger Tuchtenhagen

Pelotas, 2015

Ivana Kruger Tuchtenhagen

**Qualidade física de um Argissolo sob a influência de diferentes doses de cinza
de casca de arroz**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Manejo e Conservação do Solo e da Água da Universidade Federal de Pelotas, como requisito parcial à obtenção de título de Mestre em Manejo e Conservação do Solo e da Água.

Orientadora: Dr^a Cláudia Liane Rodrigues de Lima

Co-Orientador: Dr Eloy Antonio Pauletto

Pelotas, 2015

Universidade Federal de Pelotas / Sistema de Bibliotecas
Catalogação na Publicação

T887q Tuchtenhagen, Ivana Kruger

Qualidade física de um argissolo sob a influência de diferentes doses de cinza de casca de arroz / Ivana Kruger Tuchtenhagen ; Cláudia Liane Rodrigues de Lima, orientadora ; Eloy Antonio Pauletto, coorientador. — Pelotas, 2015.

122 f.

Dissertação (Mestrado) — Programa de Pós-Graduação em Manejo e Conservação do Solo e da Água, Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel, Universidade Federal de Pelotas, 2015.

1. Resíduos agrícolas. 2. Qualidade estrutural do solo. 3. Compressibilidade. 4. Resistência tênsil de agregados. I. Lima, Cláudia Liane Rodrigues de, orient. II. Pauletto, Eloy Antonio, coorient. III. Título.

CDD : 633.15

Data da defesa: 19 de fevereiro de 2015.

Banca examinadora:

Professora Dr^a Cláudia Liane Rodrigues de Lima (Presidente)
Departamento de Solos - Faculdade de Agronomia "Eliseu Maciel" - UFPel

Professor Dr Eduardo Saldanha Vogelmann
Instituto de Ciências Biológicas - Universidade Federal do Rio Grande - FURG

Professora Dr^a Maria Cândida Moitinho Nunes
Departamento de Solos - Faculdade de Agronomia "Eliseu Maciel" - UFPel

Aos meus pais, Ildomar e Isolete, aos meus irmãos Igor e Izaque, aos meus sobrinhos Samuel e Poliana e ao meu namorado, Mikael, dedico.

Agradecimentos

Fernando Pessoa afirmava que sempre é preciso saber quando uma etapa chega ao final. “Encerrando ciclos, fechando portas, terminando capítulos”. É então chegada a hora de vestir-me de nova cor, transformar novos sonhos em realidade.

Antes, porém, de trilhar novos caminhos, devo minha gratidão, pois agradecer é um gesto de reconhecimento e retribuição às graças, benefícios, dádivas, favor e gentilezas recebidas. Todos e a tudo sou grata pelo que tenho recebido em um nível maior do que meu merecimento.

Primeiramente gostaria de agradecer a Deus por ter me dado forças durante esta caminhada e permitir alcançar mais esta vitória.

Sou imensamente grata ao meu pai Ildomar Tuchtenhagen, e a minha mãe Isolete Kruger Tuchtenhagen, os quais são meus tesouros mais preciosos, pelo exemplo de vida e de conduta, pela dedicação, apoio e incentivo dados de forma incondicional ao longo da minha vida. Sem o amor e a companhia de vocês seria impossível trilhar este caminho e enfrentar todos os obstáculos que encontrei ao longo desta caminhada. Obrigada pelo voto de confiança e por sempre acreditarem na minha capacidade, eu amo vocês!

Sou grata também aos meus queridos irmãos Igor Kruger Tuchtenhagen e Izaque Kruger Tuchtenhagen pela amizade, incentivo, paciência, estímulo e por sempre acreditarem no meu potencial me dando força e não me deixando desistir.

Ao amor da minha vida, Mikael dos Santos Cardoso, pelo amor, amizade, cumplicidade, companheirismo, apoio incondicional e principalmente pela paciência, compreensão e ajuda. Agradeço-te imensamente por sempre acreditar em mim, me incentivar e me aconselhar em todas as etapas mais difíceis desta caminhada, compreendendo sempre meus momentos de ausência, medo e ansiedade.

À família Cardoso (minha segunda família) Olavo, Maria Loiva e Rayane pelo amor, dedicação e carinho que tenho recebido durante todos esses anos que convivemos juntos. Vocês são essenciais na minha vida e tenho muito orgulho de fazer parte desta família linda.

Não poderia deixar de agradecer as minhas grandes amigas Alessandra Buss Tessaro, Pamela Bilhafan Disconzi, Silvia Fonseca e Márcia Garcia, as quais foram muito especiais nesta jornada que compartilharam bons e maus momentos, que

entenderam cada ausência e também cada dia em que a única coisa que eu sabia pensar e falar era sobre o meu trabalho de mestrado.

À minha orientadora Cláudia Liane Rodrigues de Lima, pela orientação, dedicação, amizade construída, pela contribuição no meu processo de formação e construção do conhecimento, pela oportunidade de crescimento pessoal e profissional, saiba que contigo aprendi muito, e esse aprendizado com certeza me tornou uma profissional melhor. Agradeço muito por todos os ensinamentos e conhecimentos transmitidos e por ter deixado em mim o espírito da organização e da seriedade.

Quero agradecer ao professor Eloy Antonio Pauletto pela co-orientação, pelo compromisso à docência e orientação a mim prestada, pela contribuição no meu processo de formação e construção do conhecimento, pela ajuda imensurável, pela dedicação ao meu trabalho, pela amizade, carinho, enfim por tudo, o meu muito obrigado.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Manejo e Conservação do Solo e da Água, pelo conhecimento a mim passado, permitindo o enriquecimento da minha formação.

Aos responsáveis pela implementação e concessão da área experimental, para a realização deste estudo.

À Universidade Federal de Pelotas, ao Programa de Pós-Graduação em Manejo e Conservação do Solo e da Água pela oportunidade de realização do curso de mestrado e pela cedência da área experimental.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio Grande do Sul - FAPERGS - pela concessão da bolsa de estudos.

Aos colegas de pós-graduação, estagiários e funcionários do departamento de solos da UFPel pela ajuda constante e amizade construída.

Às minhas colegas e amigas: Lizete Stumpf, Letiane Penning, Thaís Antolini Vecozzi e Betania Vahl pelo companheirismo e amizade, vocês se tornaram mais que colegas, são amigas que quero ter sempre por perto e que fazem os meus dias de trabalho mais “leves e alegres”.

Agradeço, a todos que, de uma forma ou de outra, me ajudaram. A vocês o meu sincero muito obrigado.

“Só fazemos melhor aquilo que repetidamente insistimos em melhorar, a busca da excelência não deve ser um objetivo, mas sim um hábito”.

Aristóteles

Resumo

TUCHTENHAGEN, Ivana Kruger. **Qualidade física de um Argissolo sob a influência de diferentes doses de cinza de casca de arroz.** 2015. 122f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Manejo e Conservação do Solo e da Água. Universidade Federal de Pelotas, Pelotas.

A casca de arroz origina-se do processo de beneficiamento do arroz. A casca de arroz devido ao seu alto poder calorífico vem substituindo a lenha como fonte de energia nas indústrias. O subproduto gerado desta queima é denominado cinza de casca de arroz (CCA). Para a obtenção de um uso racional de CCA em solos agrícolas, este trabalho tem como hipótese que diferentes doses de CCA podem interferir na qualidade física e estrutural de solo. Tendo como objetivo de avaliar após três anos a influência da adição da cinza de casca de arroz sobre parâmetros da qualidade física e estrutural de um Argissolo Vermelho Amarelo. Foram determinados: a densidade do solo; a macroporosidade; a microporosidade; a porosidade total; a estabilidade de agregados em água; o diâmetro médio ponderado de agregados estáveis em água; o carbono orgânico total; a resistência tênsil de agregados (RT); a friabilidade (F) e a compressibilidade do solo através dos parâmetros, pressão de preconsoidação; índice de compressão e grau de compactação. O estudo foi realizado no Centro Agropecuário da Palma da Universidade Federal de Pelotas (UFPeL), em Capão do Leão (RS). O experimento foi constituído por cinco doses de CCA (0, 20, 40, 80 e 120 t ha⁻¹), em um delineamento em blocos ao acaso com quatro repetições. As amostras foram coletadas na camada de solo de 0,00-0,10 m. Foram coletadas amostras com preservada e não preservada de solo na camada de 0,00 a 0,10 m. Para avaliação da resistência tênsil, as amostras foram secas ao ar, selecionando-se 2000 agregados, os quais foram submetidos a testes de tensão indireta através de um atuador eletrônico a uma velocidade constante. A friabilidade foi calculada através do coeficiente de variação da resistência tênsil. Para quantificação dos parâmetros compressivos as amostras com estrutura preservada de solo foram saturadas com água por capilaridade e equilibradas em câmaras pressão de Richards no potencial de - 10 kPa, sendo então submetidas a ensaios de compressão uniaxial e pressões sucessivas e estáticas de 25; 50; 100; 200; 400; 800 e 1.600 kPa. Como conclusões gerais pode-se dizer que a CCA aplicada ao solo diminui a densidade e a pressão de preconsoidação, aumentando a porosidade total e a macroporosidade do solo. O tratamento sem adição de CCA (0 t ha⁻¹) apresentou o maior DMP, enquanto o tratamento com 120 t ha⁻¹ CCA proporcionou o menor DMP. De uma maneira geral, foi possível observar que à medida em que foram aumentadas as doses de CCA, diminuíram os valores de RT e aumentaram os valores de CT. Com base nos resultados obtidos e, considerando solos agrícolas, sugere-se a dose mais adequada, o intervalo compreendido entre 40 a 80 t ha⁻¹ de CCA. Os atributos físicos estudados podem ser eficientes na avaliação da qualidade estrutural dos solos com CCA. Porém, mais estudos precisam ser realizados para que valores críticos desses atributos físicos em relação ao adequado desenvolvimento de plantas possam ser definidos para diferentes tipos de solos.

Palavras-chave: resíduos agrícolas, qualidade estrutural do solo, compressibilidade, resistência tênsil de agregados.

Abstract

TUCHTENHAGEN, Ivana Kruger. **Physical quality of an Alfisol under the influence of diferente doses of rice husk ash**. 2015. 122f. Dissertation (Master) – Graduate Program in Management and Conservation of Soil and Water. Federal University of Pelotas, Pelotas.

Rice husk comes from the rice milling process. Due to its high calorific value, the rice husk is replacing wood as an energy source in the industries. The sub product generated by the burning process is called rice husk ash (RHA). To obtain a rational use of RHA in agricultural soils, this study has hypothesized that different doses of RHA can interfere with physical and structural soil quality. Thus, this study aimed to evaluate, after three years, the influence of the addition of rice husk ash on parameters of physical and structural quality of an Red Alfisol. Were determined: the soil bulk density; the macro and microporosity; total porosity; the stable water aggregates; mean weight diameter (MWD) of the aggregates; the total organic carbon (OC); aggregates tensile strength (TS); friability (F) and the soil compressibility by means of parameters such as preconsolidation pressure, compression rate and degree of compaction. The study was conducted at the Palma Agricultural Center, Federal University of Pelotas (UFPel) in Capão do Leão (RS). The experiment consisted of five doses of RHA (0, 20, 40, 80 and 120 t ha⁻¹), in a complete randomized block design with four replications. The samples were collected in the soil layer of 0.00 to 0.10 m. Preserved and not preserved samples were collected in the 0.00 to 0.10 m soil layer. For the tensile strength evaluation, the samples were air dried, 2000 aggregates selecting, which were subjected to indirectly tension tests through an electronic actuator at a constant speed. The friability was calculated using the tensile strength coefficient of variation. To quantify the compressive parameters, samples with soil preserved structure were water saturated by capillarity and balanced in Richards pressure chambers in the potential of - 10 kPa, then being subjected to uniaxial compression tests and successive and static pressures of 25; 50; 100; 200; 400; 800 and 1,600 kPa. As general conclusion it can be said that the RHA applied to the soil surface reduces the soil bulk density and the preconsolidation pressure, increasing the soil total porosity and macroporosity. The treatment without addition of RHA (0 t ha⁻¹) had the highest MWD, while treatment with 120 t ha⁻¹ showed the lowest MWD. In general, it was observed that as the RHA doses were increased, TS values decreased and OC values increased. Based on the results obtained in this study, it is possible that the range of 40 to 80 t ha⁻¹ is the most recommended for use in agriculture. The studied physical attributes can be effective in evaluating the soil structural quality with RHA. However, more studies are needed for critical values of these attributes, in relation to the proper development of plants, may be defined for different types of soils.

Keywords: agricultural waste, soil structural quality, compressibility, resistance tensile aggregates.

Lista de figuras

- Figura 1 - Diagrama de aplicação da casca de arroz (CA) e da cinza de casca de arroz (CCA) resultante do beneficiamento.20
- Figura 2 - Curva de compressão do solo (adaptada de GUPTA & ALLMARAS, 1987).28
- Figura 3 - Agregado natural (H) fixado a metades (E e F) de um recipiente por meio de “plaster of Paris” (mistura de calcário, areia e água) (G). O agregado é submetido à tração (P), sendo separado em duas partes.30
- Figura 4 - Fissura C formada entre os dois pontos de aplicação da força (P) devido ao estresse tênsil (Y) que atua no centro da amostra.31
- Figura 5 - Croqui do delineamento experimental representando a distribuição das parcelas em quatro blocos (as parcelas na cor cinza representam as doses de CCA utilizadas no presente experimento). TA= Tratamento Absoluto e AR= Adubação Recomendada.40
- Figura 6 - Curvas de compressão uniaxial normalizadas de um Argissolo Vermelho Amarelo sob diferentes doses de cinza de casca de arroz na camada de 0,00 a 0,10 m, Capão do Leão, RS.45

Lista de tabelas

- Tabela 1 - Análise descritiva da densidade do solo (D_s , $Mg\ m^{-3}$), da porosidade total (P_t , $m^3\ m^{-3}$), a macroporosidade (M_a , $m^3\ m^{-3}$) e a microporosidade (M_i , $m^3\ m^{-3}$) de um Argissolo Vermelho Amarelo sob diferentes doses de cinza de casca de arroz na camada de 0,00 a 0,10 m, Capão do Leão, RS.42
- Tabela 2 - Densidade (D_s), porosidade total (P_t), macroporosidade (M_a) e microporosidade (M_i), de um Argissolo Vermelho Amarelo sob diferentes doses de cinza de casca de arroz na camada de 0,00 a 0,10 m, Capão do Leão, RS.43
- Tabela 3 - Análise descritiva da densidade do solo (σ_p , kPa), da porosidade total ($D_{s\sigma_p}$, $Mg\ m^{-3}$), a macroporosidade (IC , $Mg\ m^{-3}$) e a microporosidade (M_i , $m^3\ m^{-3}$) de um Argissolo Vermelho Amarelo sob diferentes doses de cinza de casca de arroz na camada de 0,00 a 0,10 m, Capão do Leão, RS.46
- Tabela 4 - Pressão de preconsolidação (σ_p), densidade crítica na pressão de preconsolidação ($D_{s\sigma_p}$) e índice de compressão (IC), de um Argissolo Vermelho Amarelo sob diferentes doses de cinza de casca de arroz na camada de 0,00 a 0,10 m, Capão do Leão, RS.....47
- Tabela 5 - Análise descritiva do grau de compactação (GC , kPa) na pressão de 200 kPa, de 1.600 kPa e na pressão de preconsolidação ($GC\ \sigma_p$, Kpa) de um Argissolo Vermelho Amarelo sob diferentes doses de cinza de casca de arroz na camada de 0,00 a 0,10 m, Capão do Leão, RS.48
- Tabela 6 - Grau de compactação (GC ,) na pressão de 200 kPa, de 1.600 kPa e na pressão de preconsolidação ($GC\ \sigma_p$) de um Argissolo Vermelho Amarelo sob diferentes doses de cinza de casca de arroz na camada de 0,00 a 0,10 m, Capão do Leão, RS.49
- Tabela 7 - Agregados estáveis em água nas diferentes classes de diâmetro e diâmetro médio ponderado de agregados (DMP , mm) de um Argissolo Vermelho Amarelo sob diferentes doses de cinza de casca de arroz na camada de 0,00 a 0,10 m, Capão do Leão, RS.....66

Tabela 8 - Percentual de macroagregados e de microagregados de um Argissolo Vermelho Amarelo sob diferentes doses de cinza de casca de arroz na camada de 0,00 a 0,10 m, Capão do Leão, RS.....	69
Tabela 9 - Análise descritiva da umidade gravimétrica (Ug, %), da resistência tênsil de agregados (RT, kPa), da friabilidade (F) e do carbono orgânico total (COT, g kg ⁻¹) de um Argissolo Vermelho Amarelo sob diferentes doses de cinza de casca de arroz na camada de 0,00 a 0,10 m, Capão do Leão, RS.	70
Tabela 10 - Resistência tênsil (RT), friabilidade (F), classificação quanto à friabilidade e carbono total (CT) de um Argissolo Vermelho Amarelo sob diferentes doses de cinza de casca de arroz na camada de 0,00 a 0,10 m, Capão do Leão, RS.	72

Sumário

1 Introdução geral	15
2 Revisão de literatura	17
2.1 A cultura do arroz	17
2.2 Beneficiamento do arroz.....	18
2.3 Casca do arroz	18
2.4 Cinza de casca de arroz e as suas aplicações.....	19
2.5 Qualidade física do solo	21
2.6 Densidade, porosidade e agregação do solo	23
2.7 Compressibilidade do solo	26
2.8 Resistência tênsil de agregados e friabilidade do solo	29
3 Parâmetros compressivos de um Argissolo Vermelho Amarelo submetido a doses de cinza de casca de arroz.....	13
3.1 Resumo	13
3.2 Abstract	32
3.3 Introdução	35
3.4 Material e métodos	38
3.5 Resultados e discussão.....	42
3.6 Conclusões.....	50
3.7 Referências bibliográficas	50
4 Estabilidade de agregados, resistência tênsil e friabilidade de um Argissolo Vermelho Amarelo submetido a adição de doses de cinza de casca de arroz	55
4.1 Resumo	55
4.2 Abstract	56
4.3 Introdução	59
4.4 Material e métodos	63

4.5 Resultados e discussão.....	66
4.6 Conclusões.....	73
4.7 Referências bibliográficas	74
5 Referências bibliográficas	80
Apêndices.....	87

1 Introdução geral

O arroz (*Oryza sativa* L.) é um dos cereais mais produzidos e consumidos no mundo, caracterizando-se como principal alimento para mais da metade da população mundial. Em muitos países em desenvolvimento, o arroz é considerado um dos alimentos de maior importância, desempenhando papel estratégico em níveis econômicos e sociais. Segundo dados da Food and Agriculture Organization (FAO, 2014), o arroz é responsável por 20% da fonte energética alimentar da população mundial.

Com relação à produção mundial, o Brasil é o nono produtor, sendo o principal entre os países ocidentais e o maior da América do Sul (FAO, 2013). O Rio Grande do Sul destaca-se como o maior produtor nacional, cultivando 1.066,6 mil hectares, o que representa 44,5% da área nacional (CONAB, 2013).

O arroz passa por três setores até chegar à mesa do consumidor: produção, beneficiamento e comércio. A partir do processo de beneficiamento é gerada a casca de arroz (CA), a qual possui alto valor energético ($16,7 \text{ MJ/kg}^{-1}$) (DELLA et al., 2001). Devido ao baixo custo e ao alto poder calorífico, a CA é largamente utilizada na geração de calor e vapor, sendo as usinas de beneficiamento, as principais consumidoras deste produto, em substituição à lenha (POUEY, 2006). Todavia, o descarte da CA é considerado um problema ambiental, necessitando uma atenção especial devido à quantidade gerada e a sua difícil decomposição.

No decorrer dos tempos, a preocupação com o meio ambiente está se tornando cada vez mais relevante em diferentes campos da ciência. Os atuais processos industriais, apesar de usarem uma tecnologia mais “limpa” que as tecnologias anteriores, ainda produzem uma enorme quantidade de resíduo. A maioria das usinas de beneficiamento, entretanto não dispõe de processos adequados para o possível aproveitamento e descarte das cinzas geradas na queima da CA, denominadas cinza de casca de arroz (CCA), a qual representa em média 15% da massa da casca utilizada (GONÇALVES & BERGMANN, 2006).

Deste modo, a grande dificuldade em relação à destinação final de resíduos está na ausência de tecnologias que possibilitem o processamento, o tratamento e o reuso destes resíduos. A CCA destaca-se devido ao grande volume gerado e demorado processo de decomposição. Portanto, esse resíduo pode ser considerado como fonte de poluição e contaminação quando submetido de ações inadequadas

de gerenciamento (LORENZETT et al., 2012). Segundo Foletto et al. (2005), caso a CCA venha a ser utilizada de maneira apropriada ocorrerá o total aproveitamento da matéria prima proveniente da lavoura arrozeira.

No município de Pelotas (RS) são produzidas aproximadamente 35×10^3 t de CCA por ano (MADALUZ et al., 2008), caracterizando grande produção deste resíduo na região Sul do Estado do RS. E em muitos casos é fornecido aos produtores rurais da região, que a utilizam de forma empírica, alcançando resultados satisfatórios em seus cultivos (SANTOS, 2011). As dosagens e o tempo de reaplicação da CCA ao solo estão sendo estimados por esses agricultores mediante suas próprias observação.

Embora sejam geradas grandes quantidades de CCA, poucos trabalhos são encontrados na literatura. Nolla et al. (2010) concluíram que a CCA pode ser utilizada como corretivo da acidez. Conforme Pauletto et al. (1990), a CCA apresenta potencial de uso na correção da acidez pelo aumento do pH e como fonte de fósforo e potássio, justificando seu uso como material a ser incorporado ao solo, principalmente como substrato para a produção de mudas de hortaliças. Islabão (2013) concluiu que a CCA aumentou os teores dos cátions trocáveis básicos do solo (Ca, Mg, K e Na), o pH, a capacidade de troca catiônica efetiva assim como a disponibilidade de P e Si. Entretanto, comprovado o satisfatório potencial da CCA como fertilizante e corretivo da acidez do solo, à dose adequada para a qualidade física e estrutural do solo ainda é desconhecido.

A avaliação da qualidade do solo tem sido realizada através de diversos indicadores. O reflexo da adição de CCA em atributos do solo ainda é incipiente principalmente em relação à resistência tênsil de agregados, friabilidade e parâmetros compressivos do solo. O monitoramento da qualidade estrutural a partir desses atributos físicos do solo apresenta importância na manutenção e na avaliação da sustentabilidade dos sistemas agrícolas, propiciando racionalização do uso de matérias-primas e dos recursos naturais com redução da degradação ambiental.

A hipótese do presente trabalho fundamenta-se em que a qualidade física estrutural pode ser influenciada pela adição de diferentes doses de cinza de casca de arroz no solo. Tendo como objetivo de avaliar após três anos a influência da adição da cinza de casca de arroz sobre parâmetros da qualidade física estrutural de um Argissolo Vermelho Amarelo. Os objetivos específicos são avaliar a influência de

diferentes doses de CCA, na densidade, macroporosidade, microporosidade, porosidade total, agregação e nos parâmetros compressivos do solo além de quantificar a resistência tênsil dos agregados e a friabilidade do solo.

2 Revisão de literatura

2.1 A cultura do arroz

O arroz é uma planta da família das gramíneas (*Oryza sativa* L.), sendo originário da Índia (PEREIRA, 2002). Existem mais de 240.000 cultivares não registradas, adaptadas às condições de clima, características do solo e dos manejos tecnológicos da cultura. É tradicionalmente cultivado e consumido em todos os continentes, sendo o Brasil, o primeiro País a cultivar o cereal no continente americano. A cultura do arroz pode ser considerada extremamente versátil, pois se adapta a diferentes condições de solo e clima (AZAMBUJA et al., 2004; MAGALHÃES JÚNIOR et al., 2008).

O arroz é classificado como um dos mais importantes grãos em termos de valor econômico, sendo considerado, como um dos alimentos básicos prestigiados no cenário mundial (EMBRAPA, 2005). O seu cultivo é de grande importância, pela responsabilidade em suprir a dieta básica da população, com uma abundante contribuição de proteínas, sais minerais e calorias, além de abastecer aproximadamente 2,4 bilhões de pessoas e, conforme estimativas, até 2050, a produção deverá ser dobrada para suprir a demanda populacional (GUIMARÃES et al., 2006).

O consumo médio individual de arroz é de 60 kg/pessoa/ano, sendo que os países asiáticos são os que apresentam as médias mais elevadas, situadas entre 100 e 150 kg/pessoa/ano, enquanto que, na América Latina consomem-se em média 30 kg/pessoa/ano, destacando-se o Brasil como um grande consumidor (45 kg/pessoa/ano) (GOMES & MAGALHÃES, 2004).

O arroz é cultivado em mais de 250 milhões de pequenas propriedades, onde grande parte da população alimenta-se de arroz duas a três vezes ao dia (GOMES & MAGALHÃES, 2004). No Brasil, o arroz é a terceira cultura mais importante antecedendo a soja e o milho, com 11,3 milhões de hectares e uma média, na produtividade de 5.095 kg/ha, procedente de dois sistemas de cultivo: irrigado e de

sequeiro (CONAB, 2014). Deste modo o Brasil é considerado o maior produtor de arroz da América Latina e o nono produtor mundial (FAO, 2013).

Logo, seu cultivo está presente em todos os estados Brasileiros, sendo mais relevante no Rio Grande do Sul, onde destaca-se como o maior produtor nacional, com 8,11 milhões de toneladas, representando um incremento de 2,3% em relação à safra passada (7,93 milhões de toneladas), (CONAB, 2014).

2.2 Beneficiamento do Arroz

Após o recebimento na empresa, o arroz passa por uma etapa de limpeza, após amostragem e classificação para aferição da qualidade. O próximo passo refere-se à limpeza do produto e beneficiamento (AMATO & ELIAS, 2005). A partir do processo de beneficiamento é gerada a casca de arroz (CA), a qual destaca-se devido ao seu grande volume gerado, em termos de valores produzidos, para cada tonelada de arroz em casca, 230 kg correspondem à casca e 40 kg correspondem a cinza (DELLA, 2005).

Visando o emprego da casca de arroz, as próprias usinas de beneficiamento são as principais consumidoras deste produto, que o utilizam na geração de calor e vapor em substituição a lenha (POUEY, 2006) e, conseqüentemente, grandes volumes de cinza de casca de arroz são gerados (SANTOS, 2011).

Prudêncio Júnior et al. (2003) ressaltam por meio dessa substituição, o problema ambiental do manejo e da disposição da CA *in natura* pode ser minimizado. Porém, devido às suas características químicas e físicas, a CA não queima completamente, restando, após sua combustão, grande quantidade de material parcialmente carbonizado, denominados cinzas de cascas de arroz (CCA).

2.3 Casca do arroz

Por definição, a casca de arroz é um revestimento ou capa protetora formada durante o crescimento do grão, de baixa densidade e elevado volume. É um material fibroso, cujos maiores constituintes são celulose (50%), lignina (30%) e resíduos inorgânicos (20%). O resíduo inorgânico contém, em média, 95 a 98%, em massa, de sílica, na forma amorfa hidratada, perfazendo 13 a 29% do total da casca.

Removida durante o refino do arroz, a CA é um dos mais abundantes resíduos agroindustriais, representa 20% do total da produção de arroz, originando por ano, aproximadamente 80 milhões de toneladas desse resíduo (LORENZETT et

al., 2012). Entretanto, devido à sua lenta decomposição, permanecem pouco alterados por longos períodos de tempo, gerando danos ao ambiente. O acúmulo anual desse resíduo passa a ser um problema de descarte e de decomposição a CCA que é resultante de sua queima (ZUCCO, 2007), contribui para um dos maiores problemas da atualidade, a eliminação dos resíduos gerados pela indústria e agricultura (DELLA, 2005).

Sem um alto valor comercial em consequência de sua dureza, fibrosidade e natureza abrasiva, a CA tem sido utilizada como combustível alternativo dentro das próprias indústrias de beneficiamento do arroz, na substituição da lenha empregada devido a seu alto poder calorífico (aproximadamente 16.720 kJ/kg), como fonte alternativa de calor e vapor para os processos de secagem e parboilização nas usinas de beneficiamento do grão (DELLA et. al., 2001). Deste modo, o seu devido aproveitamento, além de agregar valor a este produto, contribui para diminuir um problema ambiental.

2.4 Cinza de casca de arroz e as suas aplicações

A CCA é um resíduo agro-industrial resultante do processo de queima da CA para a geração de energia calorífica. É um material leve, volumoso e altamente poroso (POUEY, 2006). Destaca-se devido ao grande volume gerado e pela demora de sua decomposição. Portanto, esse resíduo pode ser considerado como fonte de poluição e contaminação quando passível de ações inadequadas de gerenciamento (LORENZETT et al., 2012).

O desenvolvimento de produtos que utilizam a CCA (Figura 1) seja como componente principal ou secundário é uma alternativa para solucionar o problema da disposição das cinzas no meio ambiente, além de gerar um produto de maior valor, sem que haja a produção de um novo resíduo.

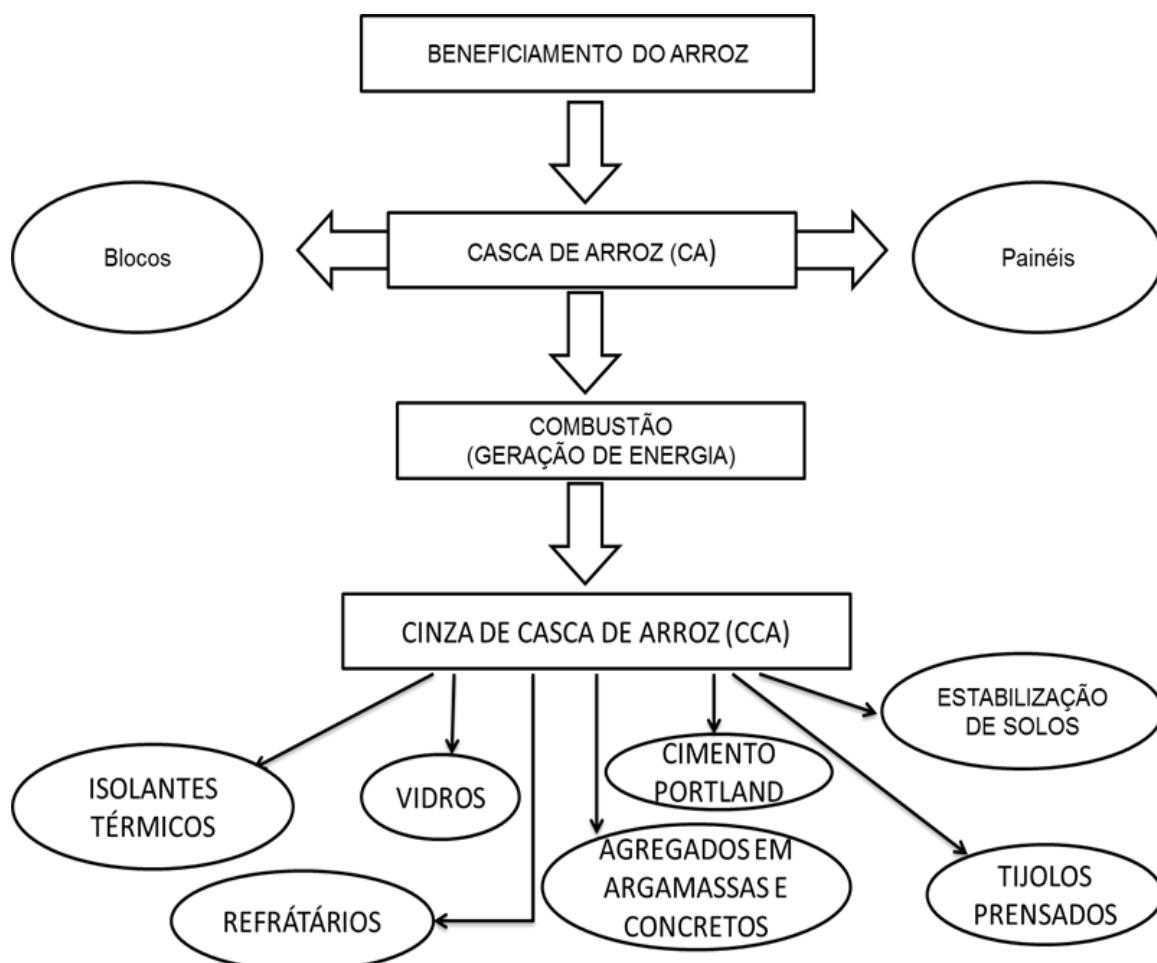


Figura 1 - Diagrama de aplicação da casca de arroz (CA) e da cinza de casca de arroz (CCA) resultante do beneficiamento.

Fonte: Della et al. (2001).

Em virtude do difícil aproveitamento da CCA, a sua possível utilização em solos agrícolas é uma alternativa. A CCA na agricultura tem sido adicionada ao solo sem acompanhamento técnico, de forma empírica, por produtores rurais que desconhecem os limites de dosagem e de frequências de aplicação deste resíduo (PAUL, 2011). O limite de dosagem depende dos efeitos da CCA sobre os atributos do solo. Weinärtner et al. (2006) relatam que são empregadas de uma a duas podendo ser utilizada até cinco toneladas de CCA por hectare dependendo do tipo de solo. Estudos realizados por Pauletto et al. (1990) verificaram que a CCA não afetou a densidade de um Argissolo Vermelho Amarelo submetido à dose máxima de 30 t ha^{-1} .

De acordo com Larbi (2010), a CCA possui alto teor de sílica amorfa porque, naturalmente, a planta de arroz absorve do solo e transporta grande quantidade do silício na forma de ácido silícico às suas superfícies. Este ácido é concentrado na

superfície da planta devido à transpiração e, subsequentemente, é polimerizado em uma membrana celulósica de sílica.

Devido ao elevado teor de sílica presente na composição química da CCA, se encontram importantes trabalhos na construção civil desenvolvidos no Brasil ((RÊGO (2004), CORDEIRO (2006), TASHIMA (2006), POUEY (2006), SANTOS (2006), TIBONE (2007), SILVA (2007) E HOPPE (2008)).

A CCA, segundo James & Rao (1986), é uma importante fonte renovável de sílica, pois contém aproximadamente 95% de sílica, com percentuais menores de álcalis e outros elementos. É possível considerar a CCA como uma alternativa de fonte de Si para as plantas, em virtude de possuir alto teor de sílica amorfa (> 92%) (FOLETTTO, 2005). Estudos realizados por Islabão (2013) e Nolla et al. (2010) relatam que a CCA atua como corretivo de acidez de solo, aumenta os teores de cátions trocáveis básicos (Ca, Mg, K e Na) bem como a disponibilidade de P e Si.

A composição da CCA possui alto teor de pozolana, que é um material silicoso ou sílico-aluminoso, que apresenta pouca ou nenhuma propriedade cimentante. Porém, na forma finamente dividida e na presença de umidade, reage quimicamente com hidróxido de cálcio a temperatura ambiente para formar compostos com propriedades cimentantes (MEHTA & MONTEIRO, 1994). Em vista disto, é possível que a CCA atue como um agente cimentante na formação de agregados.

Contudo, em se tratando de solos com CCA, há carência de estudos sobre os efeitos deste resíduo sobre a qualidade física dos solos. Deste modo uma questão que tem permanecido pendente em relação ao uso agrícola da CCA: Diferentes doses de CCA podem interferir na qualidade física e estrutural do solo?

2.5 Qualidade física do solo

Devido à importância do tema “qualidade do solo”, inúmeras tentativas para sua definição bem como sugestões de métodos e estratégias para sua caracterização estão descritas na literatura.

Sendo o solo um elemento fundamental para a preservação ambiental, começou a ser formulado no início dos anos 90, o conceito de qualidade do solo. Doran & Parkin (1994) propõem que a qualidade do solo seja “a capacidade de um dado solo em funcionar no ecossistema para sustentar a produtividade biológica, manter a qualidade ambiental, promover a saúde das plantas dos animais e dos

homens”. Esta abordagem leva em consideração não apenas o papel do solo na produção agrícola, mas também a sua participação em funções específicas no ecossistema, das quais depende a sustentabilidade em longo prazo.

Conforme Karlen (2004), a qualidade do solo é considerada como o indicador de práticas agrícolas sustentáveis, os quais são atributos que medem ou refletem o status ambiental ou a condição de sustentabilidade do ecossistema. Deste modo, o uso sustentável dos recursos naturais, tem-se constituído em tema de crescente relevância, em razão do aumento das atividades antrópicas. Em razão disso, torna-se necessário avaliar uma série de indicadores, a fim de monitorar parâmetros que indiquem a preservação, melhoria ou degradação do solo.

Os indicadores de qualidade do solo como definido por Larson & Pierce (1994), podem ser classificados como físicos, químicos e biológicos, as quais permitem o crescimento das plantas, regulam o fluxo e o armazenamento de água e ar.

Dependendo das formas de uso e manejo adotadas, os atributos físicos do solo são os que mais se alteram, (ANDRADE, 1997). Deste modo, a qualidade física tem papel determinante no crescimento e na produtividade das culturas (IMHOFF et al., 2000), pelo fato das plantas exigirem uma adequada estruturação do solo, o que permite o melhor desenvolvimento das raízes (RESENDE et al., 2002).

Diferentes atributos físicos de solos têm sido utilizados para as avaliações da qualidade estrutural como a densidade, a porosidade (LIMA et al., 2008), diâmetro médio ponderado dos agregados (CORRÊA et al., 2009), estabilidade de agregados (SALTON et al., 2008), resistência tênil de agregados, friabilidade (TORMENA et al., 2008) e compressibilidade do solo (LIMA et al., 2004).

Portanto, o monitoramento da qualidade do solo através de atributos físicos é uma ferramenta de suma importância para a manutenção e avaliação da sustentabilidade dos sistemas agrícolas (DORAN & PARKIN, 1994). Dessa forma, seu estudo torna-se necessário para fornecer informações sobre o manejo do solo e assegurar a tomada de decisões a melhor utilização desse recurso (SPOSITO & ZABEL, 2003). Entretanto, em se tratando de adição de cinza de casca de arroz, há carência de estudos sobre o seu efeito na qualidade física de solos.

2.6 Densidade, porosidade e agregação do solo

A qualidade física do solo assume importância na avaliação do grau de degradação e na identificação de adequadas práticas de uso sustentáveis. Atributos físicos como a densidade, porosidade total, macroporosidade, microporosidade e estabilidade de agregados têm sido utilizados como indicadores físicos da qualidade, por influenciar diretamente na capacidade do uso (SPERA et al., 2004; SALTON et al., 2008; CORRÊA et al., 2009).

A densidade do solo (D_s) é consequência da orientação e arranjo das partículas, assim como, da quantidade e geometria dos espaços porosos do solo. Solos com maior porosidade têm menor densidade, e dessa maneira, todos os fatores que interferem no espaço poroso irão interferir na densidade (MACHADO & FAVARETTO, 2006). A D_s é um dos indicadores da qualidade física mais utilizados na ciência do solo (CHAN, 2006). Expressa a relação entre a quantidade de massa de solo seco e o volume total do solo (volume de sólidos mais o volume do espaço poroso).

Desse modo, a D_s reflete o equilíbrio entre as fases sólida, líquida e gasosa que compõem o solo e tem, portanto, uma relação direta com a porosidade. Assim sendo, a porosidade é outro atributo físico que sofre alterações com a degradação da estrutura (ANDRADE & STONE, 2009), resultando em redução do volume de macroporos e mudanças na continuidade e distribuição de poros (DEXTER, 2004a).

Reichert et al. (2003) propuseram valores de densidade crítica ao desenvolvimento das plantas, que variam em função da classe textural: 1,30 a 1,40 Mg m^{-3} para solos argilosos, 1,40 a 1,50 Mg m^{-3} para os franco-argilosos e de 1,70 a 1,80 Mg m^{-3} para os franco-arenosos. Pauletto et al. (1990), em um Argissolo Vermelho Amarelo, verificaram que a CCA não afetou a densidade numa dose máxima de 30 t ha^{-1} .

As propriedades físicas do solo como a densidade e a porosidade são relacionadas com a modificação no volume total, estando diretamente relacionadas com a compactação. Geralmente, ocorre um aumento na resistência do solo e uma redução no volume de macroporos, com incremento da compactação, que são os primeiros a serem destruídos neste processo e os responsáveis pela infiltração de água e aeração, resultando em redução da porosidade total do solo (REICHERT et al., 2007).

Conforme Reichardt & Timm (2012), um solo bem estruturado proporciona adequada quantidade de poros, logo possui um equilíbrio com a macroporosidade, qualidade que afeta a penetração das raízes, a aeração do solo, as operações de cultivo e a infiltração de água.

A porosidade total do solo (Pt) pode ser definida como a fração volumétrica do solo, ocupada com ar e/ou água (KIEHL, 1979) e é originada pelo arranjo aleatório das partículas sólidas (KLEIN, 2012). A porosidade total é inversamente proporcional à Ds e é de grande importância para o crescimento de raízes e movimento de ar, água e solutos no solo. Sempre que o manejo tem influência sobre os valores de Ds, a relação macro/microporos é também alterada (SEQUINATTO, 2010) modificando as funções do solo em proporcionar para as culturas boa drenagem, retenção e disponibilização de água, trocas gasosas e facilidade à penetração de raízes.

Deste modo, a porosidade do solo refere-se ao volume de vazios, sendo dividida em macroporosidade e microporosidade (com poros maiores e menores de 0,05mm), respectivamente e deve estar entre 25% e 30%, e o espaço poroso controla as relações entre as fases sólida, líquida e gasosa dos solos (ANDREOLLA, 2005). Estudos realizados por Masulili et al. (2010) mostraram o efeito positivo da CCA sobre propriedades físicas do solo, onde a sua aplicação promoveu diminuição da Ds e aumento da Pt. Essa mesma tendência foi encontrada por Islabão (2013), em um Argissolo com diferentes doses de CCA.

Para estudar o armazenamento e movimentação de água, bem como a aeração, torna-se importante conhecer a distribuição dos poros. Solos com textura arenosa tem maior proporção de macroporos, sendo bem drenados, enquanto solos com textura fina tem menor capacidade de drenagem, porém a porosidade total é maior, devido a maior formação de microagregação pelas partículas de argila (KLEIN, 2005), proporcionando maior retenção de água (KIEHL, 1979). Deste modo, os microporos são importantes para a retenção e armazenamento de água pelo solo, enquanto que os macroporos promovem a infiltração e aeração do solo.

A agregação é também um dos parâmetros que pode ser utilizado para avaliar a qualidade do solo, pois a manutenção da estrutura facilitará a aeração, a infiltração de água, reduzindo a susceptibilidade à erosão (FERREIRA et al., 2010). Segundo Brady & Weill (2008), a estrutura pode ser conceituada como sendo o resultado da agregação ou arranjo espacial das frações granulométricas primárias em agrupamentos secundários, denominados de agregados.

A agregação inicia-se com a aproximação das partículas minerais através da floculação das argilas. De acordo com Imhoff et al. (2002) o aumento no teor de argila, favorece a formação de agregados mais estáveis, devido ao número de cargas elétricas entre as partículas minerais e/ou minerais e orgânicas. Entretanto, é necessário que haja a cimentação destas partículas para a formação de agregados estáveis.

A formação e estabilidade de agregados são resultantes da aproximação e cimentação das partículas do solo mediante a atuação de diversas substâncias de natureza mineral e orgânica, por meio de mecanismos físicos, químicos e biológicos (SILVA et al., 2006). Outros fatores que influenciam a formação e a estabilização dos agregados destacam-se a granulometria, teor de óxidos de ferro e alumínio e teor de matéria orgânica (MO) (FELLER et al., 1996). A MO juntamente com os minerais da fração argila, o tipo e teor de cátions presentes, atividade microbiana (TISDALL & OADES, 1979), os ciclos de umedecimento e secagem e o sistema de manejo também influenciam na agregação (LIMA et al., 2003; BASTOS et al., 2005).

O intenso revolvimento provoca quebra dos agregados, podendo diminuir sua estabilidade. O rompimento dos agregados faz com que a MO que estava em seu interior fique desprotegida, acelerando o processo de decomposição, diminuindo a resistência dos agregados. Assim a formação e estabilidade de agregados são observadas em solos com maior teor de MO, onde age como um agente cimentante, formando ligações de cátions polivalentes de seus polímeros com a superfície inorgânica (TISDALL & OADES, 1982).

A desagregação do solo produz microagregados e estes podem ser desestruturados se as partículas de argila se dispersar (TISDALL & OADES, 1982). Consequentemente, as partículas dispersas obstruem os poros, diminuindo a infiltração de água e favorecendo o escoamento superficial. Para Silva et al. (2000), quanto maior for o agregado, maiores serão o diâmetro médio ponderado (DMP) e os espaços porosos entre eles, aumentando a infiltração da água e diminuindo a erosão hídrica.

Estudos realizados por Islabão (2013), em um Argissolo mostraram um aumento da concentração de agregados estáveis em água, apresentando um efeito marcante entre as doses de 0 t ha⁻¹ e 40 t ha⁻¹ de CCA. A autora atribui este efeito principalmente às modificações químicas que a CCA ocasionou no solo, como o

aumento da concentração de cátions no complexo de troca do solo, principalmente Ca, Mg, K e Si.

2.7 Compressibilidade do solo

A compressibilidade do solo indica a resistência do solo ao decréscimo de volume quando submetido a uma dada pressão por máquinas, equipamentos e pisoteio animal (HORN & LEBERT, 1994). Segundo Alakuku et al. (2003), a avaliação da compressibilidade do solo permite um ajuste no controle das cargas e a utilização de pneu de baixa pressão de insuflagem, para que a compactação do solo seja evitada.

O termo compactação do solo refere-se ao processo de decréscimo de volume do solo não saturado quando uma determinada pressão externa é aplicada, podendo essa ser causada pelo tráfego de máquinas agrícolas ou animais, quando realizada em condições inadequadas de umidade, sendo que a condição do solo resultante do processo de compactação é conhecida como estado ou grau de compactação (HAKANSSON et al., 1990).

Richart et al. (2005) consideram a compactação como um fator limitante pela redução nos rendimentos e produtividade dos solos. Isso torna o solo mais susceptível aos agentes erosivos, com sua consequente desestruturação e perda da capacidade de absorção e infiltração da água (OLIVEIRA et al., 2004).

Debiasi (2008) cita como principais efeitos da compactação, o incremento na densidade e na resistência mecânica do solo. Consequentemente há redução da infiltração e redistribuição de água ao longo do perfil, bem como diminuição da aeração e restrição ao crescimento das raízes das plantas.

O comportamento compressivo pode ser avaliado a partir da avaliação da curva de compressão uniaxial (Figura 2) e de parâmetros mecânicos obtidos a partir desta, sendo representada graficamente pela relação entre o logaritmo da pressão aplicada e a densidade do solo ou índice de vazios (HOLTZ & KOVACS, 1981).

Como exemplos dessas propriedades, citam-se a pressão de preconsolidação (σ_p), o índice de compressão (IC) (KONDO & DIAS JÚNIOR, 1999) e o grau de compactação (GC) (CARTER, 1990).

Os métodos mais utilizados para obtenção da pressão de preconsolidação são o de Casagrande (1936) e Dias Júnior & Pierce (1995). A σ_p foi proposta por Dias Júnior (1994), Kondo & Dias Júnior (1999) e Imhoff et al. (2001) como sendo

um parâmetro, a qual tem sido amplamente aceita como indicadora da máxima pressão que um solo pode suportar a diferentes umidades, sem causar compactação adicional, uma vez que a aplicação de pressões maiores que este valor podem induzir compactação adicional. O IC também é um importante indicador, o qual representa a susceptibilidade do solo à compactação (SILVA et al., 2000), sendo determinado pela inclinação da curva de compressão virgem do solo, que representa graficamente a relação entre o logaritmo da pressão aplicada e o índice de vazios no segmento da curva reta (DIAS JUNIOR & PIERCE, 1996).

A relação entre a densidade atual e a densidade em algum estado de referência é denominada grau de compactação ou compactação relativa (HAKANSSON, 1990). O grau de compactação ou compactação relativa pode ser um parâmetro útil e de fácil medição para indicar mudanças nos parâmetros físicos como macroporosidade, condutividade hidráulica, permeabilidade ao ar e resistência à penetração do solo (CARTER, 1990). O GC define mudanças na macroporosidade, condutividade hidráulica, permeabilidade ao ar e resistência do solo à penetração (CARTER, 1990). De acordo com Klein et al. (2004) o grau de compactação, pode ser considerado um parâmetro útil para indicar a qualidade física, já que é dependente do sistema de uso adotado.

Segundo Hakansson (1990) comparações entre solos são facilitadas quando a densidade ou porosidade é relacionada à densidade ou porosidade do solo em algum estado de referência. Quanto maior a densidade inicial do solo, menor a deformação e o índice de compressão. Quando a densidade é elevada, significa que o solo já apresentou uma deformação próxima do valor máximo que pode ser alcançado. Quanto menor a densidade, maior será a deformação até alcançar a densidade máxima do solo (SUZUKI et al., 2008).

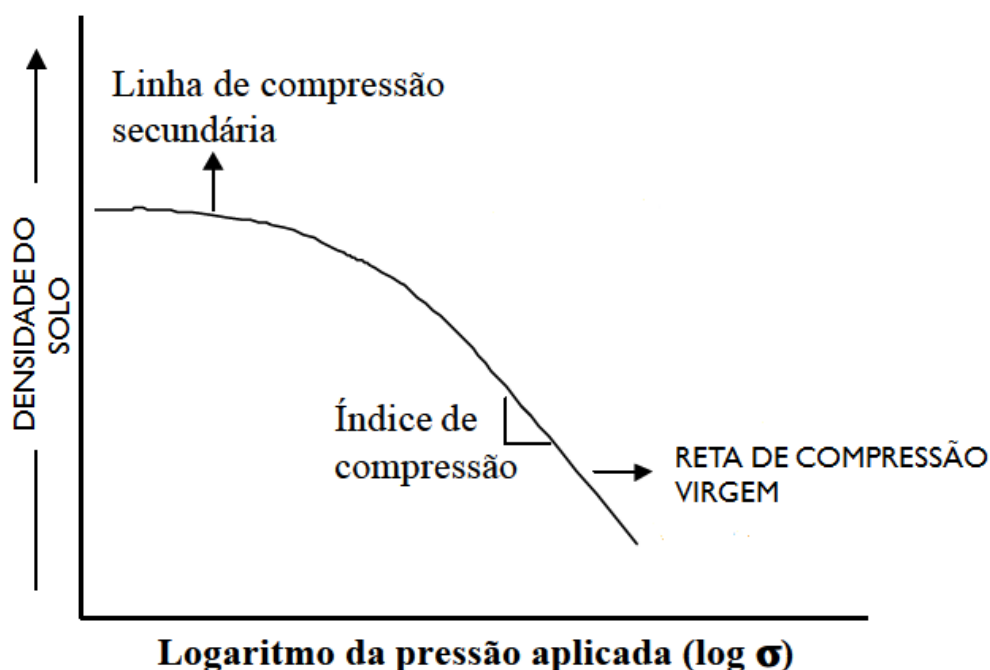


Figura 2 - Curva de compressão do solo (adaptada de GUPTA & ALLMARAS, 1987).

Dessa forma, o entendimento do comportamento compressivo utilizando as curvas de compressão uniaxial adquire uma grande relevância, visto serem elas a base, do ponto de vista físico, para a escolha do manejo mais adequado, reduzindo-se os efeitos prejudiciais oriundos do processo de compactação.

O ensaio de compressão uniaxial consiste basicamente na aplicação de sucessivas e contínuas pressões crescentes pré-estabelecidas (25, 50, 100, 200, 400, 800 e 1.600 kPa) (SILVA et al., 2007) em uma amostra de solo indeformada, permitindo obter a curva de compressão, onde tem em suas abscissas os valores das pressões aplicadas em escala logarítmica e nas ordenadas a densidade do solo em escala natural.

A curva obtida nesse tipo de ensaio é dividida em dois segmentos: um denominado curva de compressão secundária ou linha de compressão secundária, em que as deformações são elásticas (reversíveis), deste modo causando alterações pouco significativas à estrutura do solo. Pode ser utilizada, para determinar o momento adequado em que o solo deve ser mobilizado ou trafegado, sem que ocorra compactação adicional (DIAS JUNIOR & PIERCE, 1996), pois é este componente da curva de compressão que reflete a história de tensão do solo (KONDO & DIAS JUNIOR, 1999) e o outro, chamado de reta de compressão virgem, em que as deformações correspondentes são plásticas (irreversíveis) (DIAS JUNIOR

& PIERCE, 1996). A σ_p é o ponto que separa esses dois segmentos, sendo um indicativo da máxima carga à qual o solo foi submetido (VEIGA et al., 2007).

De acordo com Dias Júnior e Pierce (1996), a degradação estrutural adicional só ocorre quando as deformações ocorrem na curva de compressão virgem, onde as deformações são plásticas e não recuperáveis. Considerando essa proposição, a pressão de preconsolidação deve ser a máxima pressão aplicada ao solo para evitar compactação adicional (DIAS JUNIOR, 2000). Portanto, a pressão de preconsolidação corresponde à capacidade de suporte de carga de solos, o que torna importante o entendimento do comportamento da curva de compressão em diferentes sistemas de manejo, pois permite avaliar a susceptibilidade à deformação e, conseqüentemente, à compactação (KONDO & DIAS JUNIOR, 1999).

Uma vez que a CCA pode vir a atuar na estruturação e nos parâmetros compressivos do solo, existe pouca informação a respeito dos efeitos da CCA sobre a capacidade de suporte de carga, susceptibilidade do solo à compactação e grau de compactação.

2.8 Resistência tênsil de agregados e friabilidade do solo

A resistência tênsil de agregados (RT) é definida como o estresse ou força por unidade de área necessária para causar o fraturamento dos agregados quando submetidos à uma pressão (DEXTER & WATTS, 2000).

Li et al. (2011) definem a RT como um importante indicador de estabilidade mecânica dos agregados. Deste modo, a RT é provavelmente uma das mais úteis medidas de avaliação da condição estrutural, podendo ser determinada por um teste simples, numa ampla variação de tamanhos de agregados, consistindo num indicador muito sensível da condição estrutural (DEXTER & KROESBERGEN, 1985).

A medida da RT pode ser utilizada para avaliar os efeitos dos sistemas de manejo na estrutura, uma vez que os estresses aplicados resultam em fraturamento dos agregados nos planos de fraqueza ou nas zonas de menor resistência. A magnitude da resistência tênsil reflete a hierarquia dos agregados na estrutura, de modo que o fraturamento dos agregados maiores ocorre nos planos de fraqueza derivados das fissuras e microfissuras que formam zonas de menor resistência às tensões externas. Essa resistência é definida como o estresse, ou força por unidade

de área, requerida para que o agregado se rompa mediante a aplicação de uma tensão (DEXTER & WATTS, 2000).

A determinação da resistência tênsil de agregados pode ser feita através de testes diretos e indiretos (DEXTER & WATTS, 2000). A obtenção da RT, através de testes diretos, consiste na aplicação de duas forças de mesma direção e sentido oposto nos extremos de um agregado, o qual é separado em duas partes pela ação dessas forças (Figura 3).

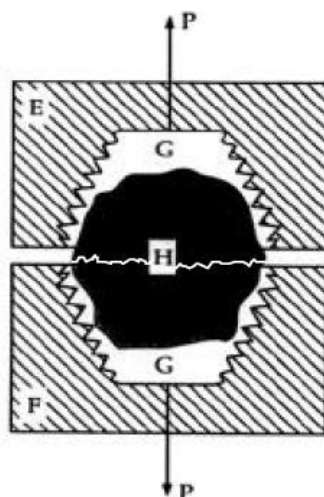


Figura 3 - Agregado natural (H) fixado a metades (E e F) de um recipiente por meio de “plaster of Paris” (mistura de calcário, areia e água) (G). O agregado é submetido à tração (P), sendo separado em duas partes.

Fonte: Dexter & Watts (2000).

Nos testes indiretos, o estresse não é aplicado diretamente sobre o agregado. Nesse caso, uma força compressiva é aplicada a uma placa metálica que transmite a força através do diâmetro polar do agregado, produzindo um aumento do estresse dentro do mesmo. O valor máximo de estresse tênsil ocorre no plano vertical através do centro da amostra, quando a força compressiva supera a resistência tênsil do agregado (força de mesma magnitude, mas em sentido oposto) forma-se uma fissura no centro do agregado, dividindo-o em unidades menores, porém, de maior resistência (Figura 4), (DEXTER & WATTS, 2000). Esses autores complementaram ainda que, a RT é, portanto, igual ao valor do estresse tênsil no momento da quebra da amostra.

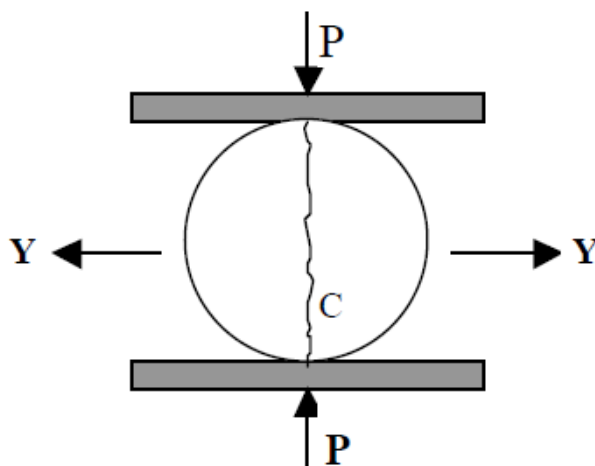


Figura 4 - Fissura C formada entre os dois pontos de aplicação da força (P) devido ao estresse tênsil (Y) que atua no centro da amostra.
Fonte: Dexter & Watts (2000).

A partir das medidas de resistência tênsil de agregados, pode-se quantificar a friabilidade (F), outro importante indicador da qualidade estrutural. A heterogeneidade da RT resultante dos planos de fraqueza ou zonas de falhas dentro dos agregados   identificada como friabilidade (DEXTER & WATTS, 2000). Este atributo   sin  nimo de qualidade física do solo (UTOMO & DEXTER, 1981) e também indicativa da condi  o estrutural (WATTS & DEXTER, 1998).

A organiza  o hierárquica da estrutura, apresentada por Dexter (1988), fornece os fundamentos do conceito da F (DEXTER & WATTS, 2000). Neste contexto,   considerada importante propriedade física dos solos agrícolas, uma vez que   desejável para o adequado estabelecimento das plantas (WATTS & DEXTER, 1998).

Maiores valores de friabilidade indicam que agregados maiores possuem RT muito menor do que agregados menores e, desse modo poderão ser quebrados mais facilmente, produzindo uma adequada distribui  o do tamanho de agregados (MACKS et al., 1996).

Para a determina  o da F três métodos são descritos: a) método do coeficiente de varia  o, em que o desvio padrão dos valores de resistência tênsil dos agregados   dividido pelo valor médio de RT; b) método que relaciona a força aplicada nos agregados com o logaritmo dos valores de RT e c) método do volume dos agregados, que relaciona o logaritmo da RT com o logaritmo do tamanho do agregado. Utomo & Dexter (1981), com base em valores de F obtidos a partir do método do volume dos agregados, propuseram um sistema de classifica  o da

friabilidade do solo. Esse método estima os valores de friabilidade como sendo a inclinação da reta que relaciona o logaritmo da resistência tênsil com o logaritmo do tamanho do agregado. Porém, quando comparado ao método do coeficiente de variação (WATTS & DEXTER, 1998), este resulta em menores valores de friabilidade. Com base nessas indicações, Imhoff et al. (2002), utilizaram o valor de F do solo multiplicado por 2, para classificar a qualidade estrutural de Latossolos.

De acordo com Utomo & Dexter (1981) e Macks et al. (1996), valores reduzidos de F indicam a tendência do solo em quebrar-se em fragmentos de tamanho aleatório (muito grandes e muito pequenos) quando submetido às atividades de preparo do solo, os quais são inadequados para a germinação e crescimento das plântulas. Valores intermediários de F indicam que agregados grandes possuem menor resistência tênsil do que agregados pequenos, podendo, serem quebrados em fragmentos pequenos mais facilmente. Valores elevados de F indicam que o solo apresenta tendência a se desagregar quando uma mínima força é aplicada, sendo, portanto, impróprios para serem utilizados em sistemas agrícolas mecanizados.

A RT é extremamente sensível à microestrutura do solo. Isto a torna um valioso parâmetro de medida em estudos do comportamento da estrutura. Maiores agregados, por exemplo, são sempre quebrados em menores agregados porque contém maior quantidade de fendas ou microrachaduras (DEXTER & WATTS, 2000). Além disso, a RT e a F são influenciados por diferentes fatores, como: conteúdo de água (WATTS et al., 1996), argila dispersa (KAY & DEXTER, 1992), concentração e composição da solução do solo (RAHIMI et al., 2000), ciclos de secagem e umedecimento (KAY & DEXTER, 1992), estabilidade dos agregados (MACKS et al., 1996), conteúdo de argila e mineralogia (IMHOFF et al., 2002) e pelo teor de MO (IMHOFF et al., 2002). De acordo com Ley et al. (1993), estes efeitos podem se refletir na qualidade estrutural para o desenvolvimento de plantas, constatados pela redução do seu estabelecimento e crescimento, em condições de elevada RT e baixa friabilidade.

No Brasil, atributos físicos e mecânicos como a RT e a F têm sido pouco estudados, principalmente em solos com adição de CCA e isto pode ser atribuído a pouca difusão e a instrumentação que facilite a determinação em um amplo número de agregados.

3 Parâmetros compressivos de um Argissolo Vermelho Amarelo submetido a doses de cinza de casca de arroz

3.1 Resumo

O processo de beneficiamento de arroz gera como resíduo grandes quantidades de casca de arroz (CA). Devido ao seu alto poder calorífico, a CA vêm substituindo a lenha empregada como fonte de energia nas indústrias de beneficiamento de arroz. O subproduto gerado desta queima constituído de cinza e cascas parcialmente carbonizada é denominado cinza de casca de arroz (CCA), a qual possivelmente pode ser utilizada na melhoria de atributos físicos, químicos e biológicos do solo. Embora, sejam produzidas altas quantidades, são encontrados poucos trabalhos utilizando a CCA no uso agrícola, principalmente nos parâmetros físicos associados à compressibilidade. Diante deste contexto, o objetivo deste trabalho foi avaliar a densidade, a porosidade e parâmetros compressivos (capacidade de suporte de carga, da suscetibilidade à compactação e grau de compactação) de um Argissolo Vermelho Amarelo submetido a cinco doses de CCA (0; 20; 40; 80 e 120 t ha⁻¹) em delineamento experimental de blocos ao acaso com quatro repetições. O estudo foi realizado no Centro Agropecuário da Palma pertencente à Universidade Federal de Pelotas (UFPeL), em Capão do Leão (RS). As amostras foram coletadas em Abril de 2013, na camada de solo de 0,00 a 0,10 m. Determinou-se a macroporosidade (MA), a microporosidade (Mi), a densidade do solo (Ds) e a porosidade total do solo (Pt). Para a avaliação dos parâmetros compressivos as amostras foram saturadas com água por capilaridades por 24 horas e posteriormente submetidas ao potencial (ψ) de - 10 kPa e ao ensaio de compressão uniaxial com pressões sucessivas e estáticas de 25, 50, 100, 200, 400, 800 e 1.600 kPa. A partir dos resultados encontrados, concluiu-se que a utilização de CCA aplicada ao solo a densidade e pressão de preconsolidação, aumentando a porosidade total e a macroporosidade do solo. O grau de compactação considerando diferentes densidades de referência, a densidade na pressão de preconsolidação e o índice de compressão são parâmetros eficientes para inferir sobre a qualidade física de solos com adição de CCA. A partir da dose de 40 para 80 t ha⁻¹ de CCA há a diminuição da Ds, um aumento da Pt e Ma e uma diminuição da Mi, diminuição do σ_p , da Ds_{op} e aumento do IC. Deste modo, é possível que este intervalo de 40 e 80 t ha⁻¹ seja o mais recomendado para a utilização em solos agrícolas. Entretanto, cabe salientar que para solos com adição de CCA é necessário ainda conhecer os valores críticos e a capacidade de uso para que este solo possa ser manejado, adequadamente.

Palavras-chave: qualidade estrutural; resíduos agrícolas; pressão de preconsolidação; grau de compactação.

Parameters of a yellow Red compressive Alfisol submitted to doses of rice hull ash

3.2 Abstract

The rice milling process generates as waste large amounts of rice husk (RH). Due to its high calorific value, the RH has replaced the used wood as an energy source in rice processing industries. The sub product generated in this burning process formed by ash and partially carbonized shells are called rice hull ash (RHA), which may possibly be used to improve soil physical, chemical and biological attributes. Although large amounts are produced, only a few studies using the RHA in agricultural use are found, especially in soil physical parameters associated with compressibility. Given this context, the aim of this study was to evaluate the soil bulk density, porosity and compressive parameters (load-bearing capacity, compaction susceptibility and compaction degree) of a Red Alfisol subjected to five doses of RHA (0, 20, 40, 80 and 120 t ha⁻¹), in a complete randomized block design with four replications. The study was conducted at the Palma Agricultural Center, Federal University of Pelotas (UFPel) in Capão do Leão (RS). The samples were collected in April 2013, in the 0.00 to 0.10 m soil layer. Soil Macroporosity (MA), microporosity (Mi), bulk density (Bd) and the total porosity (Tp) were determined. To evaluate the compressive parameters, samples were water saturated for capillaries for 24 hours and then subjected to the potential (ψ) of - 10 kPa and the uniaxial compression test with successive and static pressures of 25, 50, 100, 200, 400, 800 and 1600 kPa. From these results, it was concluded that the RHA applied to soil density and preconsolidation pressure increasing soil total porosity and macroporosity. The degree of compression considering different densities of reference, the density on the preconsolidation pressure and the compression ratio are efficient parameters to infer the soil physical quality with the RHA addition. From the RHA dose of 40 to 80 t ha⁻¹, there is a decreasing of Bd, an increase in Tp and Ma and Mi decreased, as well as occurs a decrease in σ_p , and increase in $D_{\sigma p}$ of the IC. Thus, it is possible that this interval of 40 and 80 t ha⁻¹ is the most recommended for agriculture use. However, it should be noted that for soils with RHA addition is also necessary to know the critical values and the land use capacity for an adequate management.

Keywords: structural quality; Agricultural waste; Preconsolidation pressure; Degree of compaction.

3.3 Introdução

O arroz (*Oryza sativa* L.) é originário da Índia (PEREIRA, 2002) e, mundialmente há mais de 240.000 cultivares registradas, adaptadas a condições de clima, características do solo e manejos tecnológicos. Sendo um dos cereais mais produzidos e consumidos caracteriza-se como o principal alimento para mais da metade da população mundial. Segundo dados da Food and Agriculture Organization (FAO, 2014), destaca-se como um dos alimentos com melhor balanceamento nutricional, ao fornecer 20% da energia e 15% da proteína per capita necessárias ao homem.

O Brasil é o nono produtor mundial de arroz, sendo o principal entre os países ocidentais e o maior da América do Sul. No Brasil, o arroz é a terceira cultura mais importante após a soja e o milho, com 11,3 milhões de hectares e uma média, na produtividade, de 4,7 toneladas por hectare, participando com 1,58% da produção mundial de arroz (FAO, 2013).

Cultivado há mais de um século no Rio Grande do Sul (RS), o arroz é um importante produto agrícola no Estado, sendo considerado como um dos mais relevantes para a economia, representando 44,5% da área nacional, segundo dados do acompanhamento de safra da Companhia Nacional do Abastecimento para a safra de 2013 (CONAB, 2013). No Sul do Estado concentra-se as indústrias beneficiadoras de arroz, com destaque ao município de Pelotas (IRGA, 2014).

O arroz passa por três setores até chegar à mesa do consumidor: produção, beneficiamento e comércio. Do processo de beneficiamento do arroz tem-se como resíduo a casca do arroz (CA), que devido ao seu alto valor energético (16,7 MJ/kg) (DELLA et al., 2001), vem sendo utilizada para a geração de energia. Em termos de valores produzidos, para cada tonelada de arroz em casca, 230 kg correspondem à casca e quando queimada 40 kg correspondem as cinzas (DELLA et al., 2005). De acordo com Lorenzetti et al. (2012), a CA representa o maior volume entre os subprodutos na indústria arroseira no beneficiamento, atingindo em média 20% do total da produção anual de arroz, com aproximadamente 80 milhões de toneladas, sendo um dos resíduos de maior abundância das indústrias arroseiras.

A grande dificuldade quando se fala em destinação final deste resíduo, está na ausência de novas tecnologias que possibilitem o processamento, o tratamento e o seu possível reuso. Deste modo a CCA é considerada um resíduo agroindustrial

sem destinação certa, o que ocasiona problemas ambientais como poluição de mananciais de água, do ar e do solo, (PRUDÊNCIO JÚNIOR et al., 2003). Entretanto a CCA vem sendo utilizada, de forma empírica, principalmente por agricultores familiares que tem alcançado resultados satisfatórios em seus cultivos (SANTOS, 2011).

A CCA pode vir a atuar na estruturação do solo, deste modo sendo possível que afete os parâmetros compressivos, pela formação e estabilização de agregados. Com isso, é de se esperar que diferentes doses de CCA afetem diretamente os atributos físicos do solo, principalmente os relacionados à compactação do solo. A compactação ao ser considerada como fator limitante ao rendimento das culturas nos sistemas agrícolas torna-se imprescindível o conhecimento dos efeitos deste processo para identificar as estratégias de prevenção, com a finalidade de estabelecer metodologias para a quantificação dos impactos ocasionados (GONTIJO et al., 2007).

Uma das causas preponderantes da compactação em solos agrícolas é o tráfego de máquinas, equipamentos e animais (BORTOLUZZI et al., 2008). Para Veiga et al. (2007), o tráfego excessivo é o principal responsável pela compactação ocasionada por forças mecânicas, tanto pelo número de operações como pelo simples tráfego do trator sobre o solo, quando a carga aplicada for superior à capacidade de suporte do solo. O processo de compactação pode ser atribuído tanto à diminuição do espaço poroso entre os agregados, ocorrendo um rearranjo destes na matriz do solo, como à ruptura e destruição dos agregados, havendo rearranjo e orientação das partículas, o que resulta em uma massa coesa na matriz do solo (HORN et al., 1995). Diante deste contexto, as avaliações das condições do solo são fundamentais para o planejamento das atividades agrícolas, desde a implantação até a colheita das culturas (REICHERT et al., 2007).

A avaliação dos parâmetros compressivos de um solo sob diferentes doses de CCA pode ser realizada a partir da utilização de medidas de compressão, obtidas por meio de ensaios de compressão uniaxial, como a pressão de preconsolidação (σ_p) que é um parâmetro indicativo da capacidade de suporte de carga do solo (DIAS JUNIOR & PIERCE, 1996) e o índice de compressão (IC) (CASAGRANDE, 1936; LARSON et al., 1980) que adicionalmente ao grau de compactação (GC), são parâmetros considerados indicadores da suscetibilidade do solo à compactação.

A pressão de preconsolidação representa a maior pressão a que o solo sofreu no passado (CASAGRANDE, 1936), sendo indicativo de sua história de tensão. Quando as pressões aplicadas ao solo são menores que a pressão de preconsolidação, ocorrem deformações elásticas (recuperáveis) e os parâmetros físicos sofrem alterações pouco significativas. Entretanto, se as pressões forem maiores que a capacidade de suporte de carga ocorre deformações plásticas (não recuperáveis), alterando os parâmetros físicos do solo (HOLTZ & KOVACS, 1981; LEBERT & HORN, 1991).

Deste modo, a redução do volume do solo e o aumento da densidade podem ou não causar compactação adicional. A aplicação de pressões menores do que a maior pressão à qual o solo foi submetido no passado pode ter efeitos benéficos, enquanto que, pressões maiores podem ter efeitos prejudiciais. Isso mostra a importância de se conhecer os níveis de pressão que o solo sofreu no passado e/ou a umidade do solo no momento das operações agrícolas, evitando dessa forma a compactação adicional (DIAS JUNIOR & PIERCE, 1996).

De acordo com Imhoff et al. (2004) em solos mais argilosos e mais densos, os valores de σ_p são elevados, o que pode ser atribuído à maior força de fricção e coesão entre as partículas. Da mesma forma, a menor susceptibilidade à compactação pode estar associada ao elevado estado de compactação, a qual resulta em menor deformação adicional quando altas pressões (superiores a σ_p) são aplicadas ao solo (SUZUKI et al., 2008). A σ_p diminui de acordo com o incremento do teor de água, pois o aumento da espessura do filme de água que envolve as partículas reduz a coesão e o atrito entre elas (IMHOFF et al., 2004). Por isso, a umidade do solo deve ser considerada na tomada de decisão para realizar as operações de preparo do solo, tratos culturais, colheita e transporte, tendo em vista que a aplicação de pressão ao solo por meio de operações agrícolas, quando o conteúdo de umidade for impróprio, proporcionará efeitos negativos nas propriedades físicas (KLEIN et al., 2008).

O solo apresenta uma densidade máxima, que varia com a umidade, estrutura e textura. Quando a densidade é elevada, significa que o solo já apresentou uma deformação próxima do valor máximo que pode ser alcançado. Quanto menor a densidade, maior será a deformação até alcançar a densidade máxima do solo (SUZUKI, et al., 2008).

Comparações entre solos são facilitadas quando a densidade ou porosidade é relacionada à densidade ou porosidade do solo em algum estado de referência (HAKANSSON, 1990). Silva et al. (1997) afirmam que através do grau de compactação, que é a relação entre a densidade atual e a densidade de referência ou compactação máxima (D_{sref}) pode-se acompanhar em diferentes tipos de solo o comportamento compressivo. A densidade de referência é obtida por uma pressão estática de 200 kPa (SILVA et al., 1997) em solos com estrutura não preservada. Por outro lado, Reichert et al. (2009) utilizaram como densidade de referência, aquela também obtida na pressão de 1.600 kPa no teste de compressão uniaxial, em amostras com estrutura preservada em solos subtropicais.

O alto grau de compactação significa que a porosidade e a aeração são reduzidas, aumentando a densidade e a resistência do solo à penetração, dificultando o crescimento radicular. A deformação do solo tem uma relação direta com a porosidade total, especialmente a macroporosidade, indicando que, quanto maior as deformações maiores serão as reduções de macroporosidade e porosidade total.

Diante do exposto, a avaliação da compressibilidade e dos parâmetros compressivos é de grande importância para determinar pressões máximas que o solo pode suportar e auxiliar na minimização da compactação em solos cultivados (SILVA & CABEDA, 2006).

Entretanto há carência de trabalhos a respeito dos efeitos provocados pela CCA aplicada ao solo, sobre parâmetros compressivos. No entanto, é possível que diferentes doses de cinza de casca de arroz afete a pressão de preconsolidação e o índice de compressão. Deste modo, o objetivo desse estudo foi avaliar a compressibilidade através da pressão de preconsolidação, índice de compressão e grau de compactação de um Argissolo Vermelho Amarelo, sob diferentes doses de cinza de casca de arroz.

3.4 Material e Métodos

A área de estudo está localizada, no Centro Agropecuário da Palma pertencente à Universidade Federal de Pelotas (UFPEL), no município de Capão do Leão (RS), cujas coordenadas geográficas são: E357.860 N6.480.490, UTM zona 22 datum WGS84. A área apresenta um solo classificado como Argissolo Vermelho

Amarelo (SEVERO, 1999) de textura franco arenosa. Os teores médios de argila, silte e areia do solo, sem adição de CCA (0 t ha^{-1}), são respectivamente $159,28 \text{ g kg}^{-1}$, $214,6 \text{ g kg}^{-1}$, $626,12 \text{ g kg}^{-1}$.

A CCA utilizada para este experimento é proveniente da queima da CA em leito fluidizado, utilizada no experimento foi fornecida pela Irgovel Indústria Riograndense de Óleos Vegetais. A tecnologia de leito fluidizado é capaz de produzir cinza amorfa a partir de casca de arroz com baixo teor de carbono (ANGEL et. al., 2009). As principais características químicas da CCA constam no apêndice A.

De acordo com Islabão (2013), antes de ser distribuída, a CCA foi umedecida com água residual da indústria para facilitar o seu transporte, cabe ressaltar que a densidade média da cinza úmida foi de $0,184 \text{ Kg L}^{-1}$. Para o seu manuseio e a sua distribuição uniforme sobre a parcela, utilizou-se caixa de madeira de $0,80 \text{ m} \times 0,60 \text{ m}$, perfazendo um volume de $260,1 \text{ L}$. Deste modo a caixa de madeira representava 48 Kg de CCA (20 t ha^{-1} de CCA).

A instalação do experimento ocorreu em Abril de 2010, sendo constituindo em um delineamento de blocos quatro blocos ao acaso com repetições, em parcelas de 24 m^2 ($6 \text{ m} \times 4 \text{ m}$), totalizando 1.152 m^2 . Assim sendo, a área experimental foi constituída por dez tratamentos com doses de CCA (0 ; 10 ; 20 ; 30 ; 40 ; 60 ; 80 ; 100 ; 120 e 140 t ha^{-1}) e mais dois tratamentos de referência, sendo um tratamento denominado de testemunha absoluta (TA) e outro com calagem e adubação recomendada para a cultura (AR), (ISLABÃO, 2013).

Na área experimental, foram implantadas duas culturas, aveia preta (*Avena strigosa*), em Abril de 2010 e feijão (*Fepagro Guapo Brilhante*) após a conclusão da primeira cultura. Posterior ao término de cada cultura, passou-se a roçadeira em todas as parcelas para retirar o material vegetal de cada uma. Em seguida, a área foi revegetada com pastagens nativas. A disposição dos blocos dentro da área experimental e a acomodação das parcelas dentro de cada bloco com suas referentes doses de CCA em t ha^{-1} estão apresentadas na Figura 5.

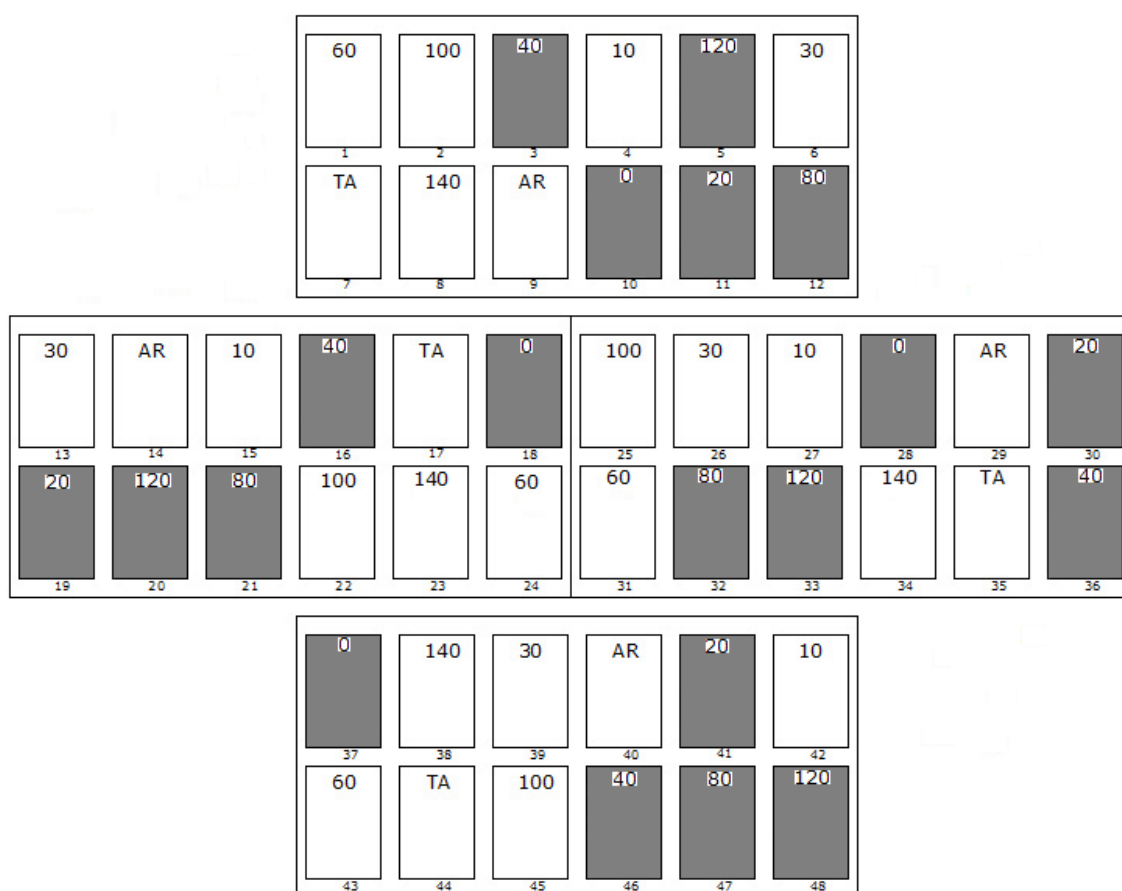


Figura 5 - Croqui do delineamento experimental representando a distribuição das parcelas em quatro blocos (as parcelas na cor cinza representam as doses de CCA utilizadas no presente experimento). TA= Tratamento Absoluto e AR= Adubação Recomendada.

Fonte: Adaptado de Islabão (2013).

A amostragem de solo para este estudo foi realizada em Abril de 2013, na camada de 0,00 a 0,10 m, sendo selecionados 5 tratamentos com as doses de CCA (0; 20; 40; 80 e 120 t ha⁻¹). Cabe salientar que, no momento da instalação do experimento, a inclusão das doses de CCA, dos fertilizantes e do calcário aplicadas ao solo, foram incorporados por meio de enxada rotativa acoplada a um micro trator do tipo “tobata”, o que impossibilitou a incorporação da CCA até 0,20 m. Desse modo, esta camada de solo e as doses de CCA mencionadas foram escolhidas em face da sua maior influência ao solo verificado por Islabão (2013).

Em cada tratamento foram coletadas aleatoriamente, amostras com estrutura preservada, com o uso de anéis volumétricos de 2,5 cm de altura e 7,0 cm de diâmetro, perfazendo um total de 60 amostras (1 camada x 5 tratamentos x 4 blocos x 3 repetições por parcela). Em laboratório as amostras foram saturadas com água por capilaridade por um período mínimo de 24 horas, pesadas e equilibradas no potencial matricial de - 6 kPa em mesa de tensão para a determinação da

macroporosidade (Ma) (EMBRAPA, 1997) e, posteriormente, ao potencial matricial: - 10 kPa, em câmaras pressão de Richards (KLUTE, 1986).

Após o equilíbrio, cada amostra foi pesada e submetida ao ensaio de compressão uniaxial em um consolidômetro automático Modelo CNTA-IHM/BR (Masquetto Automação Agrícola). Este ensaio consistiu na aplicação sucessiva e contínua de pressões crescentes e preestabelecidas de 25, 50, 100, 200, 400, 800 e 1.600 kPa, conforme Silva et al. (2007). Encerrado o ensaio, as amostras foram secas em estufa à 105°C por 24 horas, para a determinação da densidade (Ds), microporosidade (Mi) e da porosidade do solo (Pt) (EMBRAPA, 1997).

O ensaio permitiu a obtenção da curva de compressão uniaxial do solo, que relaciona o logaritmo da pressão aplicada (eixo x) versus a densidade do solo (eixo y). A σ_p foi calculada por meio da metodologia descrita por Dias Junior e Pierce (1995). Para eliminar o efeito da compactação inicial do solo, os valores utilizados para elaborar a curva de compressão foram normalizados, dividindo a densidade ao final da aplicação de cada carga (Ds) pela densidade inicial do solo (Dsi).

O índice de compressão (IC) corresponde à tangente do ângulo de inclinação da reta de compressão virgem. A normalização da densidade do solo denota o “grau de compactação” ou “compactação relativa” do solo, definida conforme as equações 1, 2 e 3.

$$GC = 100 Ds/Ds_{ref.}(Ds_{\sigma_p}) \quad (\text{Equação 1})$$

$$GC = 100 Ds/Ds_{ref.} (200 \text{ kPa}) \quad (\text{Equação 2})$$

$$GC = 100 Ds/Ds_{ref.} (1.600 \text{ kPa}) \quad (\text{Equação 3})$$

Onde:

GC= Grau de compactação (%);

Ds= Densidade atual do solo (Mg m^{-3});

Dsref. = Densidade do solo após a aplicação de 200 kPa (GC 200) (HÄKANSON, 1990) e de 1.600 kPa (GC 1.600) conforme Reichert et al. (2009).

Os resultados foram submetidos à análise de variância e, quando diferenças significativas foram observadas, as médias foram comparadas pelo teste Tukey 5% de probabilidade, com auxílio do software estatístico R (R CORE TEAM, 2014).

3.5 Resultados e Discussão

Os momentos estatísticos das variáveis Ds, Pt, Ma e Mi de um Argissolo Vermelho Amarelo sob diferentes doses de CCA na camada de 0,00 a 0,10 m estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 - Análise descritiva da densidade do solo (Ds, Mg m⁻³), da porosidade total (Pt, m³ m⁻³), a macroporosidade (Ma, m³ m⁻³) e a microporosidade (Mi, m³ m⁻³) de um Argissolo Vermelho Amarelo sob diferentes doses de cinza de casca de arroz na camada de 0,00 a 0,10 m, Capão do Leão, RS.

Tratamentos¹					
T1					
	Média	DP²	Mínimo	Máximo	CV³
Ds	1,66	0,05	1,59	1,74	3,01
Pt	0,36	0,03	0,31	0,40	8,33
Ma	86,23	3,92	80,19	92,20	4,55
Mi	13,76	3,92	7,79	19,80	28,49
T2					
	Média	DP²	Mínimo	Máximo	CV³
Ds	1,64	0,07	1,55	1,75	4,27
Pt	0,38	0,01	0,36	0,40	26,32
Ma	86,25	2,26	82,78	89,29	2,62
Mi	13,75	2,26	10,71	17,22	16,44
T3					
	Média	DP²	Mínimo	Máximo	CV³
Ds	1,57	0,10	1,39	1,70	6,37
Pt	0,38	0,02	0,35	0,41	5,26
Ma	86,76	2,25	84,01	90,66	2,59
Mi	13,23	2,25	9,33	15,98	17,00
T4					
	Média	DP²	Mínimo	Máximo	CV³
Ds	1,39	0,13	1,17	1,59	9,35
Pt	0,43	0,05	0,35	0,51	11,63
Ma	81,07	2,76	76,95	85,75	3,40
Mi	18,92	2,76	14,24	23,04	14,59
T5					
	Média	DP²	Mínimo	Máximo	CV³
Ds	1,21	0,12	1,00	1,40	9,92
Pt	0,48	0,05	0,40	0,56	10,42
Ma	77,99	6,29	67,08	86,85	8,06
Mi	23,08	5,19	15,50	32,91	22,49

¹T1= 0 t ha⁻¹, T2= 20 t ha⁻¹, T3= 40 t ha⁻¹, T4= 80 t ha⁻¹, T5= 120 t ha⁻¹.

²DP: Desvio Padrão; ³CV: Coeficiente de variação (%).

A densidade (Ds), a porosidade total (Pt), a macroporosidade (Ma) e a microporosidade (Mi) de um Argissolo Vermelho Amarelo sob diferentes doses de cinza de casca de arroz são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 - Densidade (Ds), porosidade total (Pt), macroporosidade (Ma) e microporosidade (Mi), de um Argissolo Vermelho Amarelo sob diferentes doses de cinza de casca de arroz na camada de 0,00 a 0,10 m, Capão do Leão, RS.

Tratamentos ¹	Ds	Pt	Ma	Mi
	Mg m ⁻³	----- m ³ m ⁻³ -----		
T1	1,66 a	0,36 c	0,07 b	0,28 c
T2	1,64 a	0,37 c	0,07 b	0,30 b
T3	1,58 a	0,38 c	0,08 b	0,30 b
T4	1,39 b	0,42 b	0,13 a	0,29 b
T5	1,22 c	0,48 a	0,14 a	0,34 a

Médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna, dentro de cada parâmetro avaliado, não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5%.

¹T1= 0 t ha⁻¹, T2= 20 t ha⁻¹, T3= 40 t ha⁻¹, T4= 80 t ha⁻¹, T5= 120 t ha⁻¹.

A partir da dose de 80 t ha⁻¹ (T4) de CCA ocorreu uma diminuição da Ds, aumento da Pt e Ma em relação aos tratamentos com 20 e 40 t ha⁻¹ (Tabela 2). Observa-se que os tratamentos T1, T2 e T3 não diferiram estatisticamente entre si, apresentando os maiores valores de Ds e menores valores de Pt e Ma em relação ao T4 e T5. Apesar do T5 apresentar a menor Ds e maior Pt em relação ao T4, estes não diferiram entre si em relação a Ma. No que se refere a Mi foi a dose de 120 t ha⁻¹ (T5) que proporcionou o maior incremento desta variável em relação aos demais tratamentos (Tabela 2).

Segundo Reichert et al. (2003), para solos com textura franco-arenosa (classe textural predominante neste estudo), a densidade crítica do solo situa-se entre 1,70 e 1,80 Mg m⁻³, sendo os resultados de Ds de todos os tratamentos considerados abaixo do limite crítico.

O fato de a Ds ter diminuído com o aumento das doses de CCA pode estar relacionado com a sua baixa densidade, menor que a do próprio solo, pois segundo Guerrini & Trigueiro (2004), a CCA é um material leve e de baixa densidade.

Os valores de Ds encontrados nesse trabalho corroboram àqueles encontrados por Guerrini & Trigueiro (2004), que constataram que o aumento na proporção de casca de arroz carbonizada em um substrato, proporcionou a

diminuição da Ds e por Bellé & Kämpf (1994) que ao estudarem o efeito da adição de cinza de casca de arroz na turfa, verificaram redução de forma linear na Ds. Pauletto et al. (1990) ao avaliarem o efeito de doses de cinza de casca de arroz em um Argissolo Vermelho Amarelo, verificaram que não houve diferença significativa para a densidade até a dose de 30 t ha⁻¹, apresentando apenas uma tendência de diminuição do valor à medida que aumentou a dose de CCA.

Os valores médios de Pt dos diferentes tratamentos de CCA variaram de 0,36 a 0,48 m³ m⁻³ (Tabela 2). É possível observar que até a dose de 40 t ha⁻¹ de CCA (T3) não houve diferenças estatísticas em relação ao solo que não recebeu CCA. Entretanto o T4 e T5 diferiram estatisticamente entre todos os tratamentos. Contudo, a partir da dose de 80 t ha⁻¹ o solo apresentou maior Pt em relação ao T1, T2 e T3. Este comportamento também foi observado para a Ma do solo, ou seja, a partir da dose de 80 t ha⁻¹ o solo apresentou um valor de Ma maior que 0,10 m³ m⁻³, considerado adequado para o desenvolvimento da maioria das culturas (BAVER et al. 1972; CARTER, 1988; TORMENA et al.,1998; DREWRY et al., 2008).

Em relação a Mi observa-se que o menor valor encontrado foi no T1 (0 t ha⁻¹), o qual diferiu estatisticamente dos demais. Por outro lado, a dose de 120 t ha⁻¹ também diferiu estatisticamente entre os tratamentos, porém apresentando os maiores valores de Mi (Tabela 2).

De modo geral, os resultados apresentados na Tabela 2 são semelhantes aos encontrados por Masulili et al. (2010), que encontraram efeito positivo da CCA sobre propriedades físicas, onde a sua aplicação promoveu diminuição da Ds e aumento da Pt. A mesma tendência foi apresentada por Islabão (2013) no mesmo experimento após nove meses da incorporação da CCA, evidenciando diminuição da Ds e aumento da a Pt e Ma. Klein et al. (2002) ao avaliar as alterações das propriedades físico-hídricas de substratos comerciais, misturados em diferentes proporções, observaram que a casca de arroz carbonizada pode ser utilizada para melhorar as propriedades físico-hídricas de substratos.

Com relação aos parâmetros físico-mecânicos observa-se que a curva de compressão normalizada para cada tratamento (Figura 6) indicou que o comportamento compressivo do solo foi semelhante entre os tratamentos T2 e T3 e foi semelhantes entre os tratamentos T4 e T5. O T1 foi o que apresentou a menor deformação, por conta do menor espaço poroso que apresenta. Em contrapartida, o T4 e o T5 apresentaram as maiores deformações com as cargas aplicadas,

possivelmente, devido a maior porosidade total e macroporosidade (Tabela 2). Segundo Boone & Veen (1994) durante a compactação, os poros maiores, responsáveis pela aeração, diminuem e, são substituídos por poros menores, principalmente aqueles que retêm e armazenam água. Quanto maior a deformação, maiores serão as reduções de macroporosidade e de porosidade total (SILVA et al., 2000).

Os tratamentos com menor densidade, como o T4 e T5 (Tabela 2) mostram-se mais susceptíveis à compactação, pelo maior espaço de vazios e, menor número de pontos de contato entre as partículas sólidas, resultando em menor atrito ao deslocamento e rearranjo das partículas após a compressão (SILVA et al., 2002). Guérif (1994) afirma que a deformação do solo pode ocorrer quando as partículas são capazes de se separarem e moverem em direção a outra, sendo estes movimentos limitados pela fricção e ligações entre partículas. Quanto mais denso o solo e mais arranjadas as partículas, maiores as forças de fricção, principais responsáveis pela resistência.

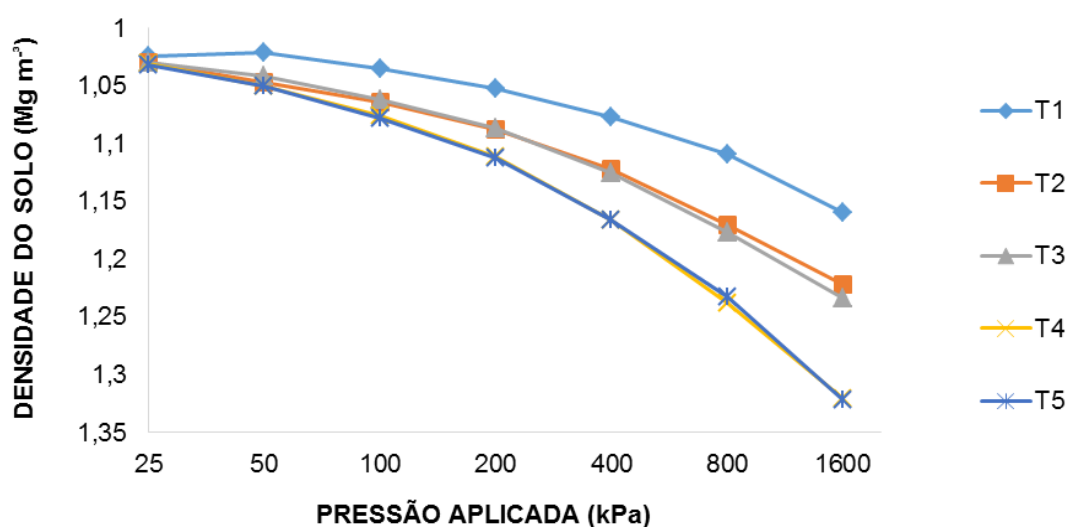


Figura 6 - Curvas de compressão uniaxial normalizadas de um Argissolo Vermelho Amarelo sob diferentes doses de cinza de casca de arroz na camada de 0,00 a 0,10 m, Capão do Leão, RS.

¹T1= 0 t ha⁻¹, T2= 20 t ha⁻¹, T3= 40 t ha⁻¹, T4= 80 t ha⁻¹, T5= 120 t ha⁻¹.

Os momentos estatísticos das variáveis σ_p , $D_{\sigma p}$ e IC de um Argissolo Vermelho Amarelo sob diferentes doses de CCA na camada de 0,00 a 0,10 m estão apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 - Análise descritiva da densidade do solo (σ_p , kPa), da porosidade total (D_{sop} , $Mg\ m^{-3}$), a macroporosidade (IC, $Mg\ m^{-3}$) e a microporosidade (M_i , $m^3\ m^{-3}$) de um Argissolo Vermelho Amarelo sob diferentes doses de cinza de casca de arroz na camada de 0,00 a 0,10 m, Capão do Leão, RS.

Tratamentos¹					
T1					
	Média	DP²	Mínimo	Máximo	CV³
σ_p	283,20	43,46	203	341	15,35
D_{sop}	1,78	1,85	0,49	1,68	103,93
IC	0,29	0,03	0,24	0,33	10,34
T2					
	Média	DP²	Mínimo	Máximo	CV³
σ_p	259,50	43,87	190	325	16,91
D_{sop}	1,70	0,08	1,56	1,81	4,71
IC	0,25	0,04	0,21	0,30	16
T3					
	Média	DP²	Mínimo	Máximo	CV³
σ_p	240,17	34,79	190	296	14,49
D_{sop}	1,68	0,10	1,50	1,81	5,95
IC	0,38	0,03	0,34	0,45	7,89
T4					
	Média	DP²	Mínimo	Máximo	CV³
σ_p	213,58	52,29	109	289	24,48
D_{sop}	1,52	0,15	1,30	1,74	9,87
IC	0,29	0,10	0,24	0,33	34,48
T5					
	Média	DP²	Mínimo	Máximo	CV³
σ_p	211,83	48,40	102	269	22,85
D_{sop}	1,33	0,12	1,13	1,55	9,02
IC	0,29	0,03	0,24	0,33	10,34

¹T1= 0 t ha⁻¹, T2= 20 t ha⁻¹, T3= 40 t ha⁻¹, T4= 80 t ha⁻¹, T5= 120 t ha⁻¹.

²DP: Desvio Padrão; ³CV: Coeficiente de variação (%).

Na Tabela 4 são apresentados os valores da pressão de preconsolidação (σ_p), densidade crítica na pressão de preconsolidação (D_{sop}) e índice de compressão (IC). Estes parâmetros apresentam importância na adequação de práticas de uso e manejo do solo e tráfego de máquinas, com vistas a minimizar o seu efeito sobre as propriedades do solo (SILVA et al., 2002).

Tabela 4 - Pressão de preconsolidação (σ_p), densidade crítica na pressão de preconsolidação ($D_{\sigma p}$) e índice de compressão (IC), de um Argissolo Vermelho Amarelo sob diferentes doses de cinza de casca de arroz na camada de 0,00 a 0,10 m, Capão do Leão, RS.

Tratamentos ¹	σ_p	$D_{\sigma p}$	IC
	kPa	Mg m ⁻³	
T1	283,20 a	1,72 a	0,29 b
T2	259,50 ab	1,70 ab	0,25 b
T3	240,17 ab	1,68 b	0,29 b
T4	213,58 c	1,52 c	0,38 a
T5	211,83 c	1,34 d	0,36 a

Médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna, dentro de cada parâmetro avaliado, não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5%.

¹T1= 0 t ha⁻¹, T2= 20 t ha⁻¹, T3= 40 t ha⁻¹, T4= 80 t ha⁻¹, T5= 120 t ha⁻¹.

Pressões exercidas sobre o solo podem ou não favorecer a compactação, dependendo da capacidade de suporte de carga, expressa pela pressão de preconsolidação, que é um indicativo do histórico de pressões exercidas sobre o solo (SUZUKI et al., 2008). Os valores médios de σ_p entre os tratamentos variaram entre 283,2 a 211,83 kPa, ou seja, à medida que houve adição de CCA, ocorreu a diminuição dos valores de σ_p (Tabela 4). Este comportamento pode estar relacionado ao incremento da Pt e Ma com a adição de CCA, principalmente da dose de 40 para 80 t ha⁻¹ (Tabela 2). De acordo com Mentges (2010) quanto mais compacto o solo, maior é a capacidade de suporte de carga. Logo, o T1 apresentou a maior σ_p , diferindo estatisticamente do T4 e T5 (Tabela 4), pois não recebeu CCA.

Horn & Fleige (2003) propuseram uma classificação para a σ_p , considerando umidade, densidade e parâmetros de resistência ao cisalhamento. Estes autores classificaram a pressão de preconsolidação em muito baixa (< 30 kPa), baixa (30-60 kPa), média (60-90 kPa), alta (90-120 kPa), muito alta (120-150 kPa) e extremamente alta (> 150 kPa). Baseado nessa classificação, a pressão de preconsolidação avaliada, é extremamente alta. Segundo Pacheco & Cantalice (2011) informam que solos com maiores valores de σ_p apresentam maior probabilidade de reduzir o crescimento das raízes.

A $D_{\sigma p}$ representa a densidade limite que o solo pode apresentar sem que haja incremento de compactação. Relacionando a D_s inicial (Tabela 2) e a $D_{\sigma p}$ (Tabela 4) observou-se que em todos os tratamentos os valores de densidade foram menores que a densidade considerada limite, não ocasionando problemas de

compactação adicional. Logo, considerando este parâmetro físico, pode-se dizer que a CCA promoveu melhorias na qualidade estrutural deste solo.

Em relação ao índice de compressão, indicativo da suscetibilidade do solo à compactação, observa-se, através da Tabela 4, que o maior IC foi apresentado pela dose de 80 t ha⁻¹, não diferindo estatisticamente da dose de 120 t ha⁻¹.

Os momentos estatísticos das variáveis Grau de compactação (GC,) na pressão de 200 kPa, de 1.600 kPa e na pressão de preconsolidação (GC σ_p) de um Argissolo Vermelho Amarelo sob diferentes doses de CCA na camada de 0,00 a 0,10 m estão apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 - Análise descritiva do grau de compactação (GC, kPa) na pressão de 200 kPa, de 1.600 kPa e na pressão de preconsolidação (GC σ_p , Kpa) de um Argissolo Vermelho Amarelo sob diferentes doses de cinza de casca de arroz na camada de 0,00 a 0,10 m, Capão do Leão, RS.

Tratamentos¹					
T1					
	Média	DP²	Mínimo	Máximo	CV³
GC 200	97,05	6,19	88,33	113,72	6,38
GC 1600	85,62	4,86	80,71	98,86	5,68
GC σ_p	96,64	5,39	89,13	103,57	5,58
T2					
	Média	DP²	Mínimo	Máximo	CV³
GC 200	90,53	85,48	96,47	4,09	94,42
GC 1600	83,31	4,19	77,11	89,12	5,03
GC σ_p	96,56	2,22	93,71	100,00	2,30
T3					
	Média	DP²	Mínimo	Máximo	CV³
GC 200	90,10	13,29	76,59	120,74	14,75
GC 1600	80,90	8,33	69,56	97,02	10,30
GC σ_p	93,82	6,29	79,89	108,67	6,70
T4					
	Média	DP²	Mínimo	Máximo	CV³
GC 200	80,35	9,24	66,85	94,97	11,50
GC 1600	72,92	8,12	63,02	87,79	11,13
GC σ_p	91,42	1,11	89,31	92,95	1,21
T5					
	Média	DP²	Mínimo	Máximo	CV³
GC 200	79,45	12,14	58,82	91,72	15,28
GC 1600	71,19	6,97	58,38	77,78	9,79
GC σ_p	90,30	3,67	81,97	95,58	4,06

¹T1= 0 t ha⁻¹, T2= 20 t ha⁻¹, T3= 40 t ha⁻¹, T4= 80 t ha⁻¹, T5= 120 t ha⁻¹.

²DP: Desvio Padrão; ³CV: Coeficiente de variação (%).

De forma geral, com relação ao grau de compactação do solo as três pressões estabelecidas (Tabela 6), praticamente tiveram o mesmo comportamento, diferindo entre si somente no tratamento T4. O grau de compactação na pressão de 200 kPa, 1.600 kPa e GC σ_p kPa, obedeceu à ordem de T1>T2>T3>T4>T5, refletindo o efeito da CCA na estrutura do solo.

Tabela 6 - Grau de compactação (GC,) na pressão de 200 kPa, de 1.600 kPa e na pressão de preconsolidação (GC σ_p) de um Argissolo Vermelho Amarelo sob diferentes doses de cinza de casca de arroz na camada de 0,00 a 0,10 m, Capão do Leão, RS.

Tratamentos ¹	GC 200 kPa	GC 1600 kPa	GC σ_p kPa
	-----%-----		
T1	97,05 a	85,62 a	96,64 a
T2	90,53 a	83,31 a	96,56 a
T3	90,01 a	80,90 a	93,82 ab
T4	80,35 b	72,92 b	91,42 b
T5	79,45 b	71,19 b	90,30 b

Médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna, dentro de cada parâmetro avaliado, não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5%.

¹T1= 0 t ha⁻¹, T2= 20 t ha⁻¹, T3= 40 t ha⁻¹, T4= 80 t ha⁻¹, T5= 120 t ha⁻¹.

Nota-se que à medida que ocorreu o aumento das doses de CCA houve uma redução do grau de compactação, ou seja, os tratamentos que apresentaram o menor grau de compactação respectivamente serão mais eficientes na recuperação do solo, e conseqüentemente mais susceptíveis a compactação.

É possível observar que os tratamentos com os maiores valores de Ds (Tabela 2) apresentaram incremento na pressão de preconsolidação (Tabela 5) e, conseqüentemente no grau de compactação (Tabela 6). Graus de compactação intermediários caracterizam-se como menos suscetíveis à compactação por serem mais resistentes às alterações na redução dos seus espaços porosos. Quando o grau de compactação é reduzido, esses solos compactam-se mais facilmente quando submetidos à pressões externas.

Hakansson (1990) e Suzuki et al. (2008) salientam que, o grau de compactação ótimo para as culturas, considerando a produtividade, encontra-se entre 77 e 88%, sendo este intervalo de forma geral, inferior ao encontrado neste estudo. Silva & Cabeda (2006) indicam que o fato de um solo com elevado grau de compactação apresentar maior resistência à compressão talvez não se apresente favorável ao desenvolvimento das plantas, pois causa o impedimento físico em sub superfície e altera a distribuição do sistema radicular além de reduzir o crescimento

aéreo das plantas (SILVA et al., 2006). Entretanto, para solos com adição de CCA é necessário ainda conhecer os valores críticos e a capacidade de uso para que este solo possa ser manejado, adequadamente.

3.6 Conclusões

A cinza de casca de arroz aplicada ao solo diminui a densidade e pressão de preconsolidação, aumentando a porosidade total e a macroporosidade do solo.

O grau de compactação considerando diferentes densidades de referência, a densidade na pressão de preconsolidação e o índice de compressão são parâmetros eficientes para inferir sobre a qualidade física de solos com adição de cinza de casca de arroz.

A partir da dose de 40 para 80 t ha⁻¹ de CCA há a diminuição da Ds, um aumento da Pt e Ma e uma diminuição da Mi, diminuição do σ_p , da D σ_p e aumento do IC. Deste modo, é possível que este intervalo de 40 e 80 t ha⁻¹ seja o mais recomendado para a utilização em solos agrícolas.

3.7 Referências Bibliográficas

BAVER, L. D.; GARDNER, W. H. & GARDNER, W. R. **Soil physics**. 4. ed. New York, John Wiley, p.498, 1972.

BELLÉ, S. & KÄMPF, A. N. Utilização de casca de arroz carbonizada como condicionador hortícola para um solo orgânico. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.29, p.1.265-1.271, 1994.

BOONE, F. R. & VEEN, B. W. Mechanisms of crop responses to soil compaction, In: SOANE, B. D.; van OUWERKWRK, C. **Soil compaction in crop production**. Amsterdam: Elsevier, p.237-264, 1994.

BORTOLUZZI, E. C.; SILVA, V. R.; PETRY, C.; CECCHETTI, D. Porosidade e retenção de água em um Argissolo sob manejos convencionais e direto submetido a compressões unidimensionais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.32, p.1447-1457, 2008.

CARTER, M. R. Temporal variability of soil macroporosity on a fine sandy loam under mouldboard ploughing and direct drilling. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.12, p.35-51, 1988.

CASAGRANDE, A. **The determination of the pre-consolidation load and its practical significance**. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOIL MECHANICS AND FOUNDATION ENGINEERING, 1936, Cambridge. Proceedings Cambridge: MA Harvard University, p.60-64, 1936.

CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento. **Central de informações agropecuárias**. 11º Levantamento de grãos da safra 2012/2013. Disponível em: http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/13_08_09_10_43_44_boletim_portugues_agosto_2013_port.pdf. Acesso em 27 de agosto de 2013.

DELLA, V. P.; KÜHN, I.; HOTZA, D. Caracterização da Cinza de Casca de Arroz para uso como Matéria Prima na Fabricação de Refratários de Sílica. **Química Nova**, v. 24, n. 6, p. 778-782, 2001.

DELLA, V. P.; KÜHN, I.; HOTZA, D. Reciclagem de Resíduos Agro-Industriais: Cinza de Casca de Arroz como Fonte Alternativa de Sílica. **Cerâmica Industrial**, v. 10, p.22-25, 2005.

DIAS JUNIOR, M. S.; PIERCE, F. J. A simple procedure for estimating preconsolidation pressure from soil compression curves. **Soil Technology**, v.8, p.139-151, 1995.

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.

DREWRY, J. J.; CAMERON, K. C. & BUCHAN, G. D. Pasture yield and soil physical property responses to soil compaction from treading and grazing - a review. **Australian Journal of Soil Research**, v.46, p.237-256, 2008.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Manual de métodos de análise de solos**, 2 ed., Rio de Janeiro: Embrapa Solos, p.212, 1997.

FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations, FAOSTAT: **Agricultural Production/strawberry**. Disponível em: <http://faostat3.fao.org/faostat-gateway/go/to/home/S>. Acesso em 04 de setembro 2013.

FAO. Food And Agriculture Organization. Statistical Databases. Disponível em: <http://www.fao.org.br>. Acesso em 30 de outubro de 2014.

GONTIJO, I.; DIAS JUNIOR, M. de S.; OLIVEIRA, M.S. de; ARAUJO JUNIOR, C.F.; PIRES, B.S. & OLIVEIRA, C.A. de. Planejamento amostral da pressão de preconsolidação de um Latossolo Vermelho distroférico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.31, p.1245-1254, 2007.

GUERRINI, I. A & TRIGUEIRO, R. M. Atributos físicos e químicos de substratos compostos por biossólidos e casca de arroz carbonizada. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.28, p.1069-1076, 2004.

GUÉRIF, J. Effects of compaction on soil strength parameters. In: SOANE, B.D.; van OUWERKERK, C. (Eds.). **Soil compaction in crop production**. Amsterdam: Elsevier, p.191-214, 1994.

HÄKANSSON, I. A method for characterizing the state of compactness of the plough layer. **Soil & Tillage Research**, v.16, p.105-120, 1990.

HOLTZ, R. D. & KOVACS, W. D. **An introduction to geotechnical engineering**. New Jersey: Prentice-Hall, p.733, 1981.

HORN, R.; DOMZAL, H. & OUWERKERK, C. van. Soil compaction processes and their effects on the structure of arable soils and the environment. **Soil & Tillage Research**, v.35, p.23-36, 1995.

HORN, R. & FLEIGE, H. A method for assessing the impact offload on mechanical stability and on physical properties of soils. **Soil & Tillage Research**, v.73, p.89-99, 2003.

IRGA – Instituto Rio Grandense do Arroz – Disponível em: <http://www.irga.rs.gov.br/index.php?action=noticia_detalhe&id=3043> Acesso em: 25 de novembro de 2014.

ISLABÃO, G. O. **Uso da cinza de casca de arroz como corretivo e condicionador do solo**. 2013. 80p. Tese (Doutorado em Agronomia) - Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Área de Concentração: Solos.

IMHOFF, S.; SILVA, A. P. da & FALLOW, D. Susceptibility to Compaction, Load Support Capacity, and Soil Compressibility of Hapludox. **Soil Science Society of America Journal**, v.68, p.17-24, 2004.

KLEIN, V. A.; CAMARA, R. K.; SIMON, M. A.; DIAS, S. T. Casca de arroz carbonizada como condicionador de substrato. In: FURLANI, A. M. C. Caracterização, manejo e qualidade de substrato para produção de plantas. **Campinas: Instituto Agrônômico**, p. 95, 2002. (Documentos IAC, n. 70).

KLEIN, V. A.; VIEIRA, M. L.; DURIGON, F. F.; MASSING, J.P.; FÁVERO, F. Porosidade de aeração de um Latossolo Vermelho e rendimento de trigo em plantio direto escarificado. **Ciência Rural**, v.38, p.365-371, 2008.

KLUTE, A. Water retention: Laboratory methods. In: KLUTE, A., ed. Methods of soil analysis: Physical and mineralogical methods. 2.ed. Madison, **American Society of Agronomy**, Part. 1. p.635-662, 1986.

KONDO, M. K. & DIAS JUNIOR, M. S. Compressibilidade de três Latossolos em função da umidade e uso. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.23, p.211-218, 1999.

LARSON, W. E.; GUPTA, S. C. Estimating critical stress in unsaturated soils from changes in pore water pressure during confined compression. **Soil Science Society of American Journal**, v.44, p.1127-1132, 1980.

LEBERT, M. & HORN, R. A method to predict the mechanical strength of agricultural soils. **Soil and Tillage Research**, v.19, p.275-286, 1991.

LORENZETT, D. B.; NEUHAUS, M.; SCHWAB, N. T. Gestão de resíduos e a indústria de beneficiamento do arroz. **Revista Gestão Industrial**, v.8, p.219-232, 2012.

MASULILI, A.; UTOMO, W. H.; MS, S. Rice Husk Biochar for Rice based cropping system in acid soil 1. The characteristics of rice husk biochar and its influence on the properties of acid sulfate soils and rice growth in west Kalimantan, Indonésia. **Journal of Agricultural Science**, p.39-47, 2010.

MENTGES, M. I. **Implicações do uso do solo nas propriedades físico-hídricas e mecânicas de um Argissolo Vermelho-Amarelo e de um Gleissolo Háptico**. Santa Maria, Universidade Federal de Santa Maria, 2010. 108p. (Dissertação de Mestrado).

PACHECO, E. P. & CANTALICE, J. R. B. Análise de trilha no estudo dos efeitos de atributos físicos e matéria orgânica sobre a compressibilidade e resistência à penetração de um Argissolo cultivado com cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.35, p.417-428, 2011.

PAULETTO, E. A.; NACHTIGALL, G. R.; GUADAGNIN, C. A. Adição de cinza de casca de arroz em dois solos do município de Pelotas, RS. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.14, p.255-258, 1990.

PEREIRA, J. A. **Cultura do Arroz no Brasil**: subsídios para a sua história. Teresina: Embrapa Meio-Norte, p.226, 2002.

PRUDÊNCIO JÚNIOR, L.R., SANTOS, S., DAFICO, D. de A. Cinza de Casca de Arroz – Utilização de Resíduos na Construção Habitacional, **Coletânea Habitar**, v.4, p.240- 261, 2003.

R CORE TEAM. R: **A language and environment for statistical computing**. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, 2014.

REICHERT, J.M.; REINERT, D.J. & BRAIDA, J.A. Qualidade dos solos e sustentabilidade de sistemas agrícolas. **Revista Ciência & Ambiente**, v.27, p.29-48, 2003.

REICHERT, J.M.; SUZUKI, L.E.A.S. & REINERT, D.J. Compactação do solo em sistemas agropecuários e florestais: identificação, efeitos, limites críticos e mitigação. In: CERETTA, C.A.; SILVA, L.S.; REICHERT, J.M. **Tópicos em Ciência do Solo**. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, p.49-134, 2007.

REICHERT, J.M.; SUZUKI, L.E.A.S.; REINERT, D.J.; HORN, R. & HAKANSSON, I. Reference bulk density and critical degree-of-compactness for no-till crop production in subtropical highly weathered soils. **Soil & Tillage Research**, v.102, p.242-254, 2009.

SANTOS, C. H. C. **Uso de cinza de casca de arroz na agricultura**. 2011. 49f. TCC (Tecnólogo em Planejamento e Gestão para o Desenvolvimento Rural) - Faculdade de Ciências Econômicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

SEVERO, C.R.S. **Caracterização dos solos do Centro Agropecuário da Palma.** Pelotas. 1999. 97p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel, Universidade Federal de Pelotas.

SILVA, A.P. da; KAY, B. D. & PERFECT, E. Management versus inherent soil properties effects on bulk density and relative compaction. **Soil & Tillage Research**, v.44, p.81-93, 1997.

SILVA, V.R.; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M. Suscetibilidade à compactação de um Latossolo Vermelho-Escuro e de um Podzólico Vermelho-Amarelo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.4, p.239-249, 2000.

SILVA, V.R.; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M. & SOARES, J.M. Fatores controladores da compressibilidade de um Argissolo Vermelho Amarelo distrófico arênico e de um Latossolo Vermelho distrófico típico. I- Estado inicial de compactação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.26, p.1-8, 2002.

SILVA, A.J.N. & CABEDA, M.S.V. Compactação e compressibilidade do solo sob sistemas de manejo e níveis de umidade. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.30, p.921-930, 2006.

SILVA, G.J.; MAIA, J.C.S. & BIANCHINI, A. Crescimento da parte aérea de plantas cultivadas em vaso, submetidas à irrigação subsuperficial e a diferentes graus de compactação de um Latossolo Vermelho-Escuro distrófico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.30, p.31-40, 2006.

SILVA, R. B.; MASQUETTO, B. J. & LANÇAS, K. P. **Desenvolvimento e automação de um consolidômetro com interface homem máquina.** In: XXXI Congresso Brasileiro de Ciência do Solo, 2007, Gramado. Conquistas e Desafios da Ciência do Solo Brasileira.

SUZUKI, L.E.A.S.; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M. & LIMA, C.L.R. Estimativa da susceptibilidade à compactação e do suporte de carga do solo com base em propriedades físicas de solos do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.32, p.963-973, 2008.

TORMENA, C.A.; ROLOFF, G.; SÁ, J.C. M Propriedades físicas do solo sob plantio direto influenciadas por calagem, preparo inicial e tráfego. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. v.22, p.301-309, 1998.

VEIGA, M.; HORN, R.; REINERT, D. J. & REICHERT, J. M. Soil compressibility and penetrability of an Oxisol from Southern Brazil, as affected by long-term tillage systems. **Soil & Tillage Research**, v.92, p.104-113, 2007.

ZUCCO, L. L.; BERALDO, A. L. Efeito da adição de cinza da casca de arroz em misturas cimento-casca de arroz. **Engenharia Agrícola**. Jaboticabal, v.28, n.2, p.217-226, 2008.

4 Estabilidade de agregados, resistência tênsil e friabilidade de um Argissolo Vermelho Amarelo submetido a adição de doses de cinza de casca de arroz

4.1 Resumo

A casca de arroz origina-se do processo de beneficiamento do arroz. Devido ao seu alto poder calorífico vem substituindo a lenha como fonte de energia nas indústrias. O subproduto gerado desta queima é denominado cinza de casca de arroz (CCA). Para a obtenção de um uso racional de CCA em solos agrícolas, este estudo teve como objetivo verificar o efeito da aplicação de doses de CCA sobre a qualidade estrutural, no que se refere aos parâmetros de estabilidade de agregados em água, diâmetro médio ponderado, resistência tênsil dos agregados e friabilidade, de um Argissolo Vermelho Amarelo. O estudo foi realizado no Centro Agropecuário da Palma da Universidade Federal de Pelotas (UFPel), em Capão do Leão (RS). O experimento foi constituído por cinco doses de CCA (0, 20, 40, 80 e 120 t ha⁻¹), em um delineamento em blocos ao acaso com quatro repetições. As amostras foram coletadas na camada de solo de 0,00-0,10 m. Para a avaliação da resistência tênsil (RT) foram utilizadas amostras com estrutura não preservada (400 agregados por tratamento), perfazendo um total de 2.000 agregados. Para a quantificação do COT foram selecionados agregados adicionais. Os resultados foram submetidos à análise de variância e ao teste de Tukey (5%). Os resultados deste estudo permitiram observar que o tratamento sem adição de CCA (0 t ha⁻¹) favoreceu a formação de agregados de maior tamanho, originando maior diâmetro médio ponderado de agregados, enquanto o tratamento com a maior concentração de CCA (120 t ha⁻¹) proporcionou a maior concentração de agregados do solo na classe de menor tamanho e menor diâmetro médio ponderado dos agregados. A partir da dose de 40 t ha⁻¹ para 80 t ha⁻¹ de CCA ocorreu uma diminuição da porcentagem de macroagregados e uma aumento da porcentagem de microagregados, mostrando que o efeito da CCA ocorre a partir de doses maiores que 40 t ha⁻¹. Nota-se que o tratamento sem adição de CCA (0 t ha⁻¹) apresentou os maiores valores de RT e o menor de CT. O valor mínimo de RT foi obtido no tratamento com 120 t ha⁻¹, apresentando o maior teor de CT. De uma maneira geral, foi possível observar que à medida em que foram aumentadas as doses de CCA, diminuíram os valores de RT e aumentaram os valores de CT. Os atributos físicos estudados podem ser eficientes na avaliação da qualidade estrutural dos solos com CCA. Porém, mais estudos precisam ser realizados para que valores críticos desses atributos físicos em relação ao adequado desenvolvimento de plantas possam ser definidos para diferentes tipos de solos. Com base nos resultados obtidos neste estudo, é possível que o intervalo de 40 e 80 t ha⁻¹ seja o mais recomendado para a utilização em solos agrícolas.

Palavras-chave: resíduos agrícolas; qualidade estrutural; agregação; carbono orgânico do solo.

Aggregates of stability, tensile strength and friability of an Alfissol submitted to addition of doses of rice hull ash

4.2 Abstract

Rice husk comes from the rice milling process. Due to its high calorific value is replacing wood as an energy source in the industries. The sub product generated by the burning process is called rice husk ash (RHA). To obtain a rational use of RHA in agricultural soils, this study aimed to verify the effect of RHA rates on the soil structural quality, with regard to the water aggregate stability, mean weight diameter, organic carbon (OC), aggregates tensile strength and friability, of a Red Alfisol. The study was conducted at the Palma Agricultural Center, Federal University of Pelotas (UFPEL) in Capão do Leão (RS). The experiment consisted of five doses of RHA (0, 20, 40, 80 and 120 t ha⁻¹), in a complete randomized block design with four replications. The samples were collected in the 0.00 to 0.10 m soil layer. For the tensile strength (TS) evaluation, samples with non-preserved structure were used (400 aggregates per treatment), making a total of 2,000 aggregates. To quantify the OC, additional aggregates were selected. The results were submitted to ANOVA and Tukey's test (5%). The results of this study allowed the observation that the treatment without RHA addition (0 t ha⁻¹) favored the formation of larger aggregates, giving greater aggregates weight diameter, while the treatment with the highest concentration of RHA (120 t ha⁻¹) gave the greatest concentration of soil aggregates in the smallest class and the smallest aggregates mean diameter. From the 40 t ha⁻¹ for 80 t ha⁻¹ RHA dose, there was a decrease in macroaggregates percentage and an increase in microaggregates percentage, showing that the RHA effect occurs from doses higher than 40 t ha⁻¹. Note that the treatment without RHA addition (0 t ha⁻¹) had the highest TS values and the lowest OC. The minimum value of TS was obtained by the treatment with 120 t ha⁻¹ having the highest OC. In general, it was observed that as the RHA doses were increased, TS values decreased and OC values increased. The studied physical attributes can be effective in evaluating the soil structural quality with RHA addition. However, more studies are needed for critical values of these attributes, in relation to the proper development of plants, may be defined for different types of soils. Based on the results obtained in this study, it is possible that the range of 40 to 80 t ha⁻¹ is the most recommended for use in agriculture.

Keywords: agricultural waste; Structural quality; aggregation; Soil organic carbon

4.3 Introdução

Atualmente o arroz (*Oryza sativa* L.) constitui uma das mais importantes culturas do mundo, sendo a fonte primária de alimento para mais da metade da população mundial. Considerando o volume mundial da produção de arroz, o Brasil apresenta posição de destaque como o nono produtor (FAO, 2013), destacando-se por ser o maior produtor deste grão fora do continente Asiático, onde 90% de toda cultura é cultivada e consumida na Ásia (MAGALHÃES JÚNIOR, 2007). O setor orizícola apresenta-se como um dos mais relevantes da economia do Rio Grande do Sul, sendo o maior produtor nacional, cultivando 1.066,6 mil hectares, representando 44,5% da área nacional, segundo os dados do acompanhamento de safra da Companhia Nacional do Abastecimento para a safra de 2013 (CONAB, 2013).

Após as primeiras operações de beneficiamento do grão, surge a CA, a qual, hoje é considerada, um coproduto do processo. Devido ao seu alto poder calorífico e o seu baixo custo, a CA é amplamente utilizada como fonte de energia, sendo que no Brasil, as próprias usinas de beneficiamento utilizam esse material substituindo a lenha pela CA na geração de calor e vapor (POUEY, 2006). A CA é um dos coprodutos mais abundantes gerados pelas indústrias arrozeiras, fibroso e de difícil degradação, permanecendo inalterado durante anos (DELLA et al., 2005).

A partir do processo de beneficiamento surge um novo resíduo, denominado cinza de casca de arroz (CCA), após a queima da CA 15% é convertida em CCA, (GONÇALVES & BERGMANN, 2006). Deste modo, a CCA é considerada um resíduo agroindustrial sem destinação certa (PRUDÊNCIO JÚNIOR et al., 2003).

As avaliações da qualidade física e estrutural dos solos em diferentes sistemas de uso e manejo geralmente são realizadas por meio de propriedades ligadas a estabilidade estrutural do solo (LIMA et al., 2008), diâmetro médio ponderado (CORRÊA et al., 2009), estabilidade de agregados (SALTON et al., 2008) e o teor de carbono orgânico (SANTOS et al., 2004).

A estabilidade de agregados estáveis em água pode ser utilizada indiretamente para avaliar a qualidade estrutural do solo (MONCADA et al., 2014), deste modo retrata a resistência que os agregados apresentam ao processo de ruptura (desagregação) em agregados menores (LIMA et al., 2003).

O estado de agregação do solo é de grande importância para as atividades agrícolas, uma vez que está relacionado com a aeração, desenvolvimento radicular,

suprimento de nutrientes, resistência mecânica do solo à penetração, retenção e armazenamento de água (KOHNEKE, 1968). Um solo apresenta estabilidade estrutural quando mantém o arranjo de sólidos e espaços vazios, mesmo expostos a diferentes forças externas. A estabilidade de agregados assume papel importante relacionado à erodibilidade dos solos agrícolas, já que a ruptura dos agregados é um dos primeiros processos relacionados com o processo erosivo.

De acordo com Tisdall & Oades (1982), a agregação do solo ocorre em duas etapas: a primeira compreende a formação do agregado e a segunda, a sua estabilização. O agregado se forma quando ocorre a aproximação das partículas de solo, principalmente através da floculação das partículas de argila, sendo esta a primeira etapa na formação de macroagregados estáveis. Cabe ressaltar que dentre os fatores que influenciam a formação e a estabilização dos agregados no solo, destacam-se: granulometria, mineralogia das argilas, conteúdo de matéria orgânica, material inorgânico não-cristalino, composição de fluidos do meio poroso, sistema radicular das plantas, presença de organismos e a profundidade do perfil do solo (KAY & ANGERS, 1999). Para Braidá (2004) e Bayer & Mielniczuk (2008) a agregação é a principal característica física influenciada pela matéria orgânica, desencadeando a alteração das demais características físicas, importantes na capacidade do solo em desempenhar adequadamente as suas funções perante a produção agrícola.

A desagregação do solo produz microagregados e estes podem ser desestruturados se as partículas de argila se dispersarem em (TISDALL & OADES, 1982). Consequentemente, as partículas dispersas obstruem os poros, diminuindo a infiltração de água no solo e favorecem o escoamento superficial.

Segundo Angulo et al. (1984), o diâmetro médio ponderado dos agregados (DMP) indica a estabilidade da estrutura frente à ação de desagregação ocasionado pela água, podendo avaliar o grau de susceptibilidade do solo à erosão hídrica, bem como a qualidade estrutural. Quanto maiores forem as proporções de agregados estáveis em água retidos nas classes de maior tamanho maior será o DMP e, consequentemente maior será o espaço poroso entre e intra agregados, o que se refletirá em maiores taxas de infiltração de água no solo diminuindo assim o escoamento superficial e consequentemente os processos erosivos. Deste modo o DMP pode ser utilizado para avaliar a estabilidade estrutural de solos sob diferentes práticas de manejo e sistemas de culturas (OBALUM & OBI, 2010).

Em adição a essas propriedades, a resistência tênsil de agregados do solo (RT) também pode ser utilizada como indicador dos efeitos do manejo na qualidade do solo. A RT é definida como o estresse ou força por unidade de área requerida para fraturar os agregados, quando submetidos a uma pressão (DEXTER & WATTS, 2000). Conforme Dexter & Kroesbergen (1985), a RT é, provavelmente, a mais útil medida de resistência individual dos agregados do solo, porque pode ser determinada por um teste simples numa ampla variação de agregados, consistindo em um indicador sensível da condição estrutural.

A magnitude da RT reflete a hierarquia dos agregados na estrutura do solo, de modo que o fraturamento dos agregados maiores ocorre nos planos de fraqueza derivados das fissuras e microfissuras que formam zonas de menor resistência. Na determinação da RT, pelo método indireto, os agregados são colocados, individualmente, em sua posição mais estável sobre uma base fixa, enquanto que, uma placa móvel desce a uma velocidade constante em direção à esta base. A força é aplicada gradativamente até causar a quebra do agregado, representada visualmente por uma fissura no centro da amostra. O valor obtido no momento da quebra do agregado será numericamente igual ao estresse tênsil no interior do agregado (DEXTER & WATTS, 2000).

Alguns autores relataram elevada variabilidade nos valores de RT dos agregados em função do formato dos agregados (IMHOFF et al., 2002; TORMENA et al., 2008). Uma forma de reduzir a variabilidade e aumentar a sensibilidade da análise de RT seria a uniformização do formato dos agregados, de modo a, apresentarem diâmetro e formato semelhantes. Estudo realizado por Imhoff et al. (2002) em Latossolos tropicais propuseram agregados com tamanho entre 19,0 - 12,5 mm, devido a estes serem mais fáceis de manusear, medir e normalmente obtidos no momento do preparo do solo.

A heterogeneidade da RT resultante dos planos de fraqueza ou zonas de falhas dentro dos agregados, tem sido identificada como friabilidade do solo (F) (DEXTER & WATTS, 2000), ou seja, a tendência de uma massa de solo se desfazer em agregados de tamanhos menores sob a aplicação de um estresse ou carga, de modo que pode ser estimada por meio do coeficiente de variação da RT (WATTS & DEXTER, 1998).

Utomo & Dexter (1981) classificaram os valores de friabilidade do solo a partir de medidas de RT obtidas através da utilização do método do volume dos

agregados. Esta classificação, quando comparada com a F estimada pelo método do coeficiente de variação (WATTS & DEXTER, 1998), resulta em menores valores de F. Com base nestas indicações, Imhoff et al. (2002) utilizaram o valor da F do solo, multiplicada por dois para classificar a qualidade estrutural de Latossolos, deste modo, definindo como: não friável ($<0,10$), ligeiramente friável ($0,10-0,20$), friável ($0,20-0,50$), muito friável ($0,50-0,80$) e mecanicamente instável ($>0,80$).

Valores elevados de friabilidade indicam que agregados maiores possuem menor resistência para serem fraturados do que agregados menores e, deste modo, poderão ser quebrados mais facilmente numa ampla distribuição de tamanhos, produzindo uma adequada distribuição do tamanho de agregados. Valores intermediários indicam que agregados maiores são sempre quebrados em tamanho menores, porque contém uma maior quantidade de fendas ou microrachaduras e menor resistência tênsil (DEXTER & WATTS, 2000). Macks et al. (1996) sugerem a F como indicadora da qualidade estrutural e física do solo, uma vez que a condição de solo friável (valores intermediários de F) é desejável para a germinação das sementes, o crescimento das plântulas e o estabelecimento das culturas.

Pesquisas têm demonstrado que a RT e F são influenciadas por diversos fatores como a umidade do solo (UTOMO & DEXTER, 1981), o conteúdo de argila dispersa, os ciclos de umedecimento e secagem, o teor de matéria orgânica do solo (DEXTER & WATTS, 2000), a mineralogia da fração argila (KEMPER et al., 1987) e os materiais cimentantes (KAY & DEXTER, 1992). A influência desses fatores sobre a RT e a F depende das condições climáticas, das práticas de manejo e de características do solo (KAY & DEXTER, 1992).

Vários trabalhos relacionaram o conteúdo de carbono (C) com a RT. Tormena et al. (2008a), observaram correlação linear significativa entre a RT e teores de C orgânico de um Latossolo de textura média. Blanco-Canqui et al. (2005), em um Argissolo, obtiveram correlação exponencial significativa entre esses parâmetros, mostrando que o aumento de C orgânico implica na redução da RT. Uma correlação significativa entre o conteúdo de C e a RT não foi verificada em trabalhos realizados por Imhoff et al. (2002), Tormena et al. (2008b), Guimarães et al. (2009), onde reportaram efeito contrário. Segundo Foletto et al. (2005), a CCA gerada na combustão apresenta uma certa quantidade de carbono. Deste modo acredita-se que este fato pode interferir nos resultados de RT e F.

Apesar da relevância do tema, há carência de informações relativas aos impactos causados pela adição de CCA aplicada ao solo. Com base no exposto, objetivou-se avaliar o efeito da aplicação de doses de CCA sobre a qualidade estrutural, no que se refere aos parâmetros de estabilidade de agregados em água, diâmetro médio ponderado, resistência tênsil dos agregados e friabilidade, de um Argissolo Vermelho Amarelo.

4.4 Material e Métodos

O experimento foi implantado no Centro Agropecuário da Palma, pertencente à Universidade Federal de Pelotas (UFPel), situada no município do Capão do Leão, RS, cujas coordenadas geográficas são: E357.860 N6.480.490, UTM zona 22 datum WGS84.

A instalação do experimento ocorreu em Abril de 2010. A área experimental possui 1.152 m², sendo constituída de quatro blocos ao acaso com quatro repetições, em parcelas de 24 m² (6m x 4m). Sendo, a área experimental é constituída por dez tratamentos com doses de CCA (0; 10; 20; 30; 40; 60; 80; 100; 120 e 140 t ha⁻¹) e mais dois tratamentos de referência, sendo um tratamento denominado de testemunha absoluta (TA) e outro tratamento testemunha com calagem e adubação recomendada para a cultura (AR), (Islabão, 2013).

A disposição das parcelas e dos blocos na área experimental está apresentada na Figura 5, (Capítulo 4). O solo da área experimental foi classificado como Argissolo Vermelho Amarelo (SEVERO, 1999), com classe textural franco-arenosa. Os teores médios de argila, silte e areia, do solo sem adição de CCA (0 t ha⁻¹) são respectivamente 159,28 g kg⁻¹, 214,6 g kg⁻¹, 626,12 g kg⁻¹.

A cinza proveniente da queima da CA, em leito fluidizado, utilizada no experimento foi fornecida pela Irgovel Indústria Riograndense de Óleos Vegetais. A tecnologia de leito fluidizado é capaz de produzir cinza amorfa a partir de casca de arroz com baixo teor de carbono (ANGEL et. al., 2009). As principais características químicas da CCA constam no apêndice A.

De acordo com Islabão (2013), antes de ser distribuída, a CCA foi umedecida com água residual da indústria para facilitar o seu transporte, cabe ressaltar que a densidade média da cinza úmida foi de 0,184 Kg L⁻¹. Para o seu manuseio e a sua

distribuição uniforme sobre a parcela, utilizou-se caixa de madeira de 0,80 m x 0,60 m, perfazendo um volume de 260,1 L. Deste modo, obteve-se que a caixa de madeira, representava 48 Kg de CCA, (20 t ha⁻¹ de CCA).

Conforme a mesma autora foram implantadas duas culturas na área experimental, aveia preta (*Avena strigosa*) e feijão (*Fepagro Guapo Brilhante*). Após o término de cada cultura, passou-se a roçadeira em todas as parcelas para retirar o material e homogeneizar a massa vegetal remanescente em cada parcela. Em seguida, a área foi revegetada com pastagens nativas.

A amostragem de solo para este estudo foi realizada em Abril de 2013, na camada de 0,00 a 0,10 m, sendo selecionados 5 tratamentos com as doses de CCA (0; 20; 40; 80 e 120 t ha⁻¹). No momento da instalação do experimento, a inclusão das doses de CCA, dos fertilizantes e do calcário aplicados ao solo foram incorporados por meio de enxada rotativa acoplado ao micro trator do tipo “tobata”, o que possibilitou a incorporação da CCA até 0,10 m, já no tratamento sem adição de CCA, passou-se apenas enxada rotativa.

As amostras com estrutura não preservada foram coletadas com auxílio de pá de corte, acondicionadas em sacos plásticos e em laboratório, destorroadas manualmente em seus pontos de fraqueza e secas ao ar, totalizando 40 amostras de solo (1 camada de solo x 5 tratamentos x 4 blocos x 2 repetições), para determinação dos agregados estáveis em água em diferentes classes de tamanho e do diâmetro médio ponderado dos agregados estáveis em água (DMP), conforme Kemper & Rosenau (1986) e Palmeira et al. (1999), utilizando o aparelho de oscilação vertical Yoder (1936). Os intervalos das classes (C) de diâmetro de agregados estáveis avaliados foram respectivamente: C1: 9,52-4,76 mm; C2: 4,76-2,00 mm; C3: 2,00-1,00 mm; C4: 1,00-0,25 mm; C5: 0,25-0,105 mm e C6: < 0,105mm.

Para quantificação da resistência tênsil (RT) foram selecionados 50 agregados de cada amostra de solo, entre 12,5-19,0 mm, perfazendo um total de 2.000 amostras (1 camada de solo x 5 tratamentos x 4 blocos x 2 repetições por parcela x 50 agregados por amostra).

No teste de tensão indireta para determinação da RT utilizou-se um atuador eletrônico linear (MA 933) a uma velocidade constante de 4 mm s⁻¹. Antes da aplicação da força, cada agregado foi mensurado quanto à massa e aferido com um paquímetro para determinação do diâmetro médio a partir de sua altura, largura e

comprimento e após os ensaios os agregados foram secos em estufa a 105°C, por 24 horas, para determinar umidade gravimétrica, conforme (Embrapa, 1997).

Para determinação da RT cada agregado foi acomodado na sua posição mais estável, considerando que os agregados não são perfeitamente esféricos, para a aplicação da carga de 20 kgf. O valor da força aplicada para a ruptura tênsil do agregado foi registrado em um sistema eletrônico de aquisição de dados.

A RT foi calculada, de acordo com Dexter & Kroesbergen, (1985), conforme a equação 4:

$$RT = 0,576 \left(\frac{P}{D^2} \right) \quad (\text{Equação 4})$$

Sendo 0,576 a constante de proporcionalidade que reflete a relação entre o estresse compressivo aplicado e o estresse tênsil gerado no interior do agregado; P é a força aplicada (N), e D é o diâmetro efetivo (mm).

O diâmetro efetivo dos agregados (D) foi calculado, segundo Watts & Dexter (1998), conforme a equação 5:

$$D = Dm \left(\frac{M}{M_0} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (\text{Equação 5})$$

Em que: Dm corresponde ao diâmetro médio do agregado (mm); M é a massa do agregado individual (g); e M_0 a massa média dos agregados na população (g).

A F foi estimada pelo método do coeficiente de variação, proposto por Watts & Dexter (1998), conforme a equação 6:

$$F = \frac{\sigma_Y}{Y} + \frac{\sigma_Y}{Y \sqrt{2n}} \quad (\text{Equação 6})$$

Em que: F é a friabilidade do solo; σ_Y é o desvio-padrão dos valores médios da resistência tênsil; Y é a média dos valores medidos de resistência tênsil em todos os agregados; e n é o número de repetições, sendo o segundo termo, o erro-padrão do coeficiente de variância.

As classes de friabilidade utilizadas neste trabalho foram tomadas com base nos valores de F (adimensional) propostos por Imhoff et al. (2002): não friável (<

0,10), ligeiramente friável (0,10 – 0,20), solo friável (0,20 – 0,50), muito friável (0,50 – 0,80) e mecanicamente instável (> 0,80).

Para quantificação do carbono orgânico foram selecionados agregados adicionais nos cinco tratamentos e em cada bloco, os quais foram moídos em gral de ágata e acondicionados em ependorf de 2 mL. O conteúdo de carbono total foi determinado por analisador elementar Perkin Elemer pelo método de combustão seca.

Os resultados foram submetidos à análise de variância e, quando diferenças significativas foram observadas, as médias foram comparadas pelo teste Tukey a 5% de probabilidade, através do Software estatístico R (R CORE TEAM, 2014).

4.5 Resultados e Discussão

A distribuição percentual dos agregados estáveis em água nas diferentes classes de diâmetro dos diferentes tratamentos estudados, com sua respectiva análise estatística, encontram-se na Tabela 7.

Tabela 7 - Agregados estáveis em água nas diferentes classes de diâmetro e diâmetro médio ponderado de agregados (DMP) de um Argissolo Vermelho Amarelo sob diferentes doses de cinza de casca de arroz na camada de 0,00 a 0,10 m, Capão do Leão, RS.

Classes de tamanho de agregados (mm)							
Tratamentos	9,52 - 4,76	4,76 - 2,00	2,00 - 1,00	1,00 - 0,25	0,25-0,105	<0,105	DMP
	(g kg ⁻¹)						mm
T1	43,58 a	17,86 b	10,08 c	14,71 c	3,66 a	10,11 c	3,94 a
T2	28,65 c	23,83 a	13,97 a	19,80 b	3,99 a	9,76 c	3,19 bc
T3	36,08 b	18,06 b	12,08 b	20,54 b	3,93 a	9,31 c	3,51 b
T4	31,49 bc	15,62 c	11,23 bc	22,73 ab	3,97 a	14,95 b	3,10 c
T5	25,62 c	14,24 c	12,47 b	24,58 a	4,11 a	19,04 a	2,66 d

Médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna, dentro de cada classe, não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5%.

¹T1= 0 t ha⁻¹, T2= 20 t ha⁻¹, T3= 40 t ha⁻¹, T4= 80 t ha⁻¹, T5= 120 t ha⁻¹.

Observa-se que houve diferença estatística entre os agregados estáveis em água nas diferentes classes e tratamentos, com exceção do diâmetro de 0,25 - 0,105 mm. A maior tendência de agregados estáveis em água encontra-se na classe de maior tamanho (9,52 - 4,76 mm), independente da dose de CCA. O tratamento sem adição de CCA apresentou a maior concentração de agregados estáveis em

água nesta classe, diferindo estatisticamente dos demais tratamentos. O tratamento com a maior concentração de CCA (T5) obteve a menor concentração de agregados estáveis em água nesta classe.

De acordo com Panachuki et al. (2006), o solo quando submetido ao revolvimento intensivo tem a sua estrutura alterada com fracionamento dos agregados em unidades menores. Nesse sentido, e levando em consideração que em todas as parcelas do experimento foi passada enxada rotativa, para a aplicação da CCA, o que fez com que ocorresse a desestruturação do solo original com destruição dos agregados, fato este que pode estar relacionado a estes resultados, demonstrando pouco tempo de atuação na melhoria da qualidade estrutural deste solo.

A CCA possui um alto teor de sílica e com alta superfície específica, o que durante a combustão, a lignina presente na CA seja removida (FERREIRA, 1999), podendo explicar a diminuição dos agregados estáveis em água como aumento das doses de CCA.

Cabe salientar que o solo da área experimental, antes da implantação das duas culturas (aveia preta e feijão) e após a colheita, é considerado como campo nativo cultivado com gramíneas, este fato pode estar relacionado à ação mais rápida na melhoria do solo sem adição de CCA em comparação aos tratamentos com CCA. De acordo com Primavesi (1982), os resíduos de gramíneas promovem a melhoria da estrutura do solo, por possuírem maior conteúdo de lignina, possibilitando aumento de ácidos carboxílicos e ácidos húmicos nos substratos.

Para Silva & Mielniczuk (1997), as gramíneas se destacam como plantas recuperadoras dos atributos físicos, pois sua alta densidade de raízes promove a aproximação das partículas do solo, bem como liberam exsudatos que estimulam a microbiota do solo, auxiliando na formação e estabilização de agregados tornando-o menos suscetível à compactação.

O fato do tratamento com a maior dose de CCA (T5) apresentar a menor concentração de agregados estáveis em água na classe de maior diâmetro (9,52 – 4,76 mm) e apresentar a maior concentração de agregados na classe de menor tamanho (<0,105 mm), pode estar relacionado ao grande volume de CCA adicionado ao solo. Cabe salientar que a CCA foi aplicada ao solo com o intuito de ser incorporada até a camada de 0,20 m. Entretanto isto não ocorreu devido possivelmente a incorporação ter sido realizada com enxada rotativa que atuou

apenas na camada de 0,00 – 0,10 m, o que gerou uma alta concentração de CCA com relação ao volume de partículas minerais do solo, dificultando a formação de agregados estáveis.

Ao analisar os tratamentos que adicionaram a CCA ao solo, percebe-se que a dose com 40 t ha⁻¹ (T3), foi a qual apresentou o melhor efeito na classe de maior tamanho 9,52 - 4,76 mm. O tratamento com 20 t ha⁻¹, foi o que apresentou a maior quantidade de agregados entre 4,76 – 2,00 mm, ou seja, são mais resistentes a ação desagregante da água. Esses resultados permitem inferir que estas doses de CCA podem ser mais eficientes na melhoria da estruturação do solo.

É possível observar que com o aumento da dose de CCA de 0 t ha⁻¹ para 120 t ha⁻¹ ocorreu um acréscimo na porcentagem de agregados na classe 1,00 – 0,25 mm. A mesma tendência foi apresentada na classe de 0,25 – 0,105 mm. Entretanto nesta classe não ocorreu diferença estatísticas entre os tratamentos, ou seja, à medida que foi adicionado CCA ao solo, os agregados nesta classe aumentaram 11,85% em relação ao solo sem adição de CCA (T1).

De acordo com estudo realizado por Grieve et al. (2005), o constante revolvimento do solo contribui para a redução da matéria orgânica, que é um dos principais agentes de formação e estabilização dos agregados. Entretanto, esses resultados diferem dos encontrados neste estudo, fato este que pode estar relacionado ao tempo de implantação do experimento, demonstrando que a CCA pode atuar imediatamente no solo, porém ao longo de três anos esse efeito pode proporcionar efeito contrário.

As informações relacionadas à distribuição dos agregados do solo podem ser sintetizadas por meio do cálculo do DMP, que permite comparar diversos sistemas de manejo quanto à organização da estrutura do solo. Assim, o DMP é um indicativo da concentração de agregados nas classes de maior tamanho. Ao ser analisado nos diferentes tratamentos foi possível observar que o tratamento sem adição de CCA apresentou o maior valor de DPM, fato este que pode estar relacionado à não adição de CCA.

Percebe-se que os tratamentos que adicionaram CCA ao solo, foi a dose de 40 t ha⁻¹ (T3) a qual apresentou o maior DMP, além de possuir a maior quantidade de agregados na classe de 9,52 – 4,76 mm. Já o tratamento com a maior concentração de CCA apresentou o menor DMP, diferindo estatisticamente dos

demais (Tabela 7), demonstrando que com o aumento das doses CCA ocorreu a diminuição do DMP.

Além disso, o fato do DMP diminuir com o aumento das doses de CCA, pode estar relacionado ao pouco tempo de ação da mesma ao solo e por apresentar alta concentração de lignina de difícil decomposição. Segundo Kiehl (1979), para ocorrer à formação de agregados no solo é imprescindível a ocorrência de duas condições: primeiramente é necessário que uma força mecânica qualquer provoque a aproximação das partículas no solo e, que posteriormente, haja um agente cimentante para concretizar essa união. A matéria orgânica, juntamente com os minerais de argila são os agentes cimentantes que mais contribuem na agregação do solo (TISDALL & OADES, 1982).

Os macroagregados são, conceitualmente, os mais afetados por mudanças nos sistemas de manejo do solo (TISDALL & OADES, 1982). Os resultados deste parâmetro, encontram-se na Tabela 8.

Tabela 8 - Percentual de macroagregados e de microagregados de um Argissolo Vermelho Amarelo sob diferentes doses de cinza de casca de arroz na camada de 0,00 a 0,10 m, Capão do Leão, RS.

Tratamentos ¹	Macroagregados	Microagregados
	-----%-----	
T1	86.76 a	13,24 c
T2	86,25 a	13,75 c
T3	86.26 a	13,74 c
T4	81.08 b	18,92 b
T5	76,92 b	23,08 a

Médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna, dentro de cada parâmetro avaliado, não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5%.

¹T1= 0 t ha⁻¹, T2= 20 t ha⁻¹, T3= 40 t ha⁻¹, T4= 80 t ha⁻¹, T5= 120 t ha⁻¹.

Observa-se que o tratamento com 0 t ha⁻¹ de CCA (T1) apresentou a tendência de maior e menor quantidade de macroagregados e microagregados, respectivamente, porém não diferindo estatisticamente dos tratamentos T2 e T3. O maior percentual de macroagregados do solo é importante na diminuição da velocidade da decomposição da matéria orgânica (MO), aumentando o tempo de permanência do material particulado como núcleo de agregação e, possibilitando a formação de microagregados enriquecidos com MO (SIX et al., 2000).

O T5 (120 t ha⁻¹) apresentou a menor quantidade de macroagregados, não diferindo estatisticamente do T4, porém, apresentou também a maior quantidade de microagregados em relação aos demais tratamentos, evidenciando a interferência da CCA na agregação do solo.

Os momentos estatísticos das variáveis Ug, RT, F e COT de um Argissolo Vermelho Amarelo sob diferentes doses de CCA na camada de 0,00 a 0,10 m estão apresentados na Tabela 9.

Tabela 9 - Análise descritiva da umidade gravimétrica (Ug, %), da resistência têsil de agregados (RT, kPa), da friabilidade (F) e do carbono orgânico total (COT, g kg⁻¹) de um Argissolo Vermelho Amarelo sob diferentes doses de cinza de casca de arroz na camada de 0,00 a 0,10 m, Capão do Leão, RS.

Tratamentos¹					
T1					
	Média	DP²	Mínimo	Máximo	CV³
Ug	1,10	0,13	0,90	1,20	11,82
RT	62,83	9,97	51,7	81,25	15,87
F	0,48	0,05	0,41	0,56	10,42
COT	1,32	0,12	1,19	1,54	9,09
T2					
	Média	DP²	Mínimo	Máximo	CV³
Ug	0,9	0,23	0,50	1,20	25,55
RT	61,31	11,58	46,07	78,54	18,89
F	0,53	0,08	0,41	0,65	15,09
COT	1,36	0,09	1,25	1,51	6,62
T3					
	Média	DP²	Mínimo	Máximo	CV³
Ug	0,80	0,17	0,60	1,10	21,25
RT	60,32	8,46	43,36	70,69	14,02
F	0,58	0,08	0,45	0,70	13,79
COT	1,43	0,20	1,22	1,82	13,99
T4					
	Média	DP²	Mínimo	Máximo	CV³
Ug	0,90	0,18	0,80	1,30	20,00
RT	59,52	9,92	44,62	77,71	16,67
F	0,54	0,06	0,46	0,65	11,11
COT	1,63	0,27	1,43	2,09	16,56
T5					
	Média	DP²	Mínimo	Máximo	CV³
Ug	1,01	0,28	0,70	1,40	27,72
RT	57,6	12,45	36,04	70,31	21,21
F	0,62	0,23	0,41	1,14	37,10
COT	1,82	0,26	1,56	2,16	14,28

¹T1= 0 t ha⁻¹, T2= 20 t ha⁻¹, T3= 40 t ha⁻¹, T4= 80 t ha⁻¹, T5= 120 t ha⁻¹.

²DP: Desvio Padrão; ³CV: Coeficiente de variação (%).

Os teores de água dos agregados, por ocasião da medida da RT, variaram de 1,1; 0,9; 0,8; 0,9 e 1,01 %, em média menor que 0,02 kg kg⁻¹ (Tabela 9), indicando que a variação da RT e a F deveu-se exclusivamente aos efeitos dos tratamentos na estrutura do solo, deste modo, favorecendo a comparação entre os diferentes tratamentos, já que a umidade do solo é um dos principais fatores que influenciam a RT (RAHIMI et al., 2000). Conforme Dexter & Watts (2000), agregados mais úmidos podem originar uma deformação plástica antes da quebra tênsil do agregado, levando à determinação incorreta da RT.

Observa-se que o coeficiente de variação (CV) da RT variou de 14,02 a 21,21%, demonstrando uma homogeneidade no formato dos agregados utilizados na determinação. Segundo Imhoff et al. (2002) a exposição do solo a sucessivos ciclos de umedecimento e secagem também pode contribuir para a variabilidade dos valores de RT e que a variação nos valores de CV podem estar relacionados à variabilidade na forma dos agregados do solo e à dificuldade em definir a posição mais estável do agregado para aplicação da carga.

O máximo valor de RT (81,25 kPa) foi obtido no T1, sem adição de CCA e o mínimo valor encontrado foi obtido no T5, o qual possui a maior concentração de CCA (120 t ha⁻¹), mostrando que o incremento das doses de cinza proporcionou a diminuição da RT. Entretanto, cabe ressaltar que, não existem na literatura valores críticos de RT. Deste modo, mais estudos precisam ser realizados, em diferentes tipos de solos para definir valores críticos de RT.

Os valores médios de resistência tênsil de agregados (RT), friabilidade (F), classificação quanto à friabilidade e Teores de Carbono orgânico total (COT, %) dos diferentes tratamentos estão apresentadas na Tabela 10.

Nota-se que à medida que ocorreu um aumento da concentração de CCA, houve uma redução da RT. Entretanto não foram verificadas diferenças estatísticas entre os tratamentos: T2, T3 e T4. Esses resultados pode ser atribuído à uma possível homogeneização dentre esses três tratamentos. Porém, os valores encontrados, em média, foram inferiores ao T1 e superiores ao T5, os maiores valores de RT entre esses três tratamentos, foram proporcionados pelo T2, relacionado a menor concentração de CCA neste tratamento.

Tabela 10 - Resistência tênsil (RT), friabilidade (F), classificação quanto à friabilidade e carbono total (CT) de um Argissolo Vermelho Amarelo sob diferentes doses de cinza de casca de arroz na camada de 0,00 a 0,10 m, Capão do Leão, RS.

Tratamentos ¹	RT (kPa)	F	Classificação quanto à friabilidade	CT
	kPa			%
T1	62,83 a	0,48 b	Friável	1,32 c
T2	61,31 ab	0,53 b	Muito friável	1,36 c
T3	60,32 ab	0,58 b	Muito friável	1,43 bc
T4	59,52 ab	0,54 ab	Muito friável	1,63 ab
T5	57,60 b	0,62 a	Muito friável	1,82 a

Médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna, dentro de cada parâmetro avaliado, não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5%.

¹T1= 0 t ha⁻¹, T2= 20 t ha⁻¹, T3= 40 t ha⁻¹, T4= 80 t ha⁻¹, T5= 120 t ha⁻¹.

O fato do T1 apresentar o maior valor de RT pode estar associado à presença de agregados mais estáveis e a não adição de CCA no solo (Tabela 10). A maior RT neste tratamento pode assegurar maior estabilidade do sistema poroso aos diferentes estresses aplicados e, indiretamente, torna-se benéfica às plantas. Entretanto, o maior valor de RT no tratamento sem adição de CCA pode estar relacionado ao pouco tempo de ação da CCA na melhoria da qualidade estrutural deste solo. Para Volk & Cogo (2008) as gramíneas se diferenciam quanto à influência de suas raízes na melhoria da estrutura do solo, devido a rusticidade e rápido desenvolvimento inicial.

O menor valor de RT foi obtido no T5, atribuído possivelmente à maior concentração de CCA e, conseqüentemente, a maior concentração de COT neste tratamento. Esses resultados demonstram que houve perda da qualidade estrutural nessa condição em relação às demais.

A F é outro indicador da qualidade estrutural e física, uma vez que, a condição de solo friável é desejável para a germinação das sementes, o crescimento das plântulas e o estabelecimento das culturas. Os cinco tratamentos apresentaram valores que oscilaram entre 0,48 e 0,62, sendo observado uma tendência no aumento dos valores de F conforme a dosagem de CCA e que, conforme a classificação proposta por Imhoff et al. (2002) quanto à friabilidade do solo, classifica-se a dose de 0 t ha⁻¹ como friável (F = 0,48), enquanto que as demais foram classificados como muito friável.

A redução da RT resultou em aumento da F, evidenciando as alterações estruturais no solo que promoveram as modificações na RT, o qual é um indicador

da qualidade estrutural do solo e que também pode ser utilizada para indicar as práticas de cultivo mais adequadas para o controle da qualidade física dos solos (TORMENA et al., 2008a). Este fato pode estar relacionado às doses de CCA, ou seja, a melhor qualidade estrutural no tratamento com 0 t ha⁻¹ se deve a não adição de CCA, sendo corroborado através da RT (Tabela 10) e também do DMP (Tabela 7).

A diminuição da RT pode ser causada pela diminuição e/ou destruição das ligações físico-químicas entre as partículas, tanto de natureza orgânica quanto inorgânica, tornando o solo mecanicamente instável, exercendo impacto negativo sobre a qualidade do solo (IMHOFF et al., 2002).

Com o aumento das doses de CCA ocorreu um acréscimo na concentração de COT. Todos os tratamentos foram superiores ao obtido para o tratamento sem adição de CCA, sendo o maior teor de COT proporcionado pelo T5, possivelmente em função da maior concentração de CCA. A diminuição dos teores de COT resultou no aumento da RT. Esses resultados corroboram com os estudos de Tormena et al. (2008a) ao observarem correlação linear negativa e significativa entre a RT e COT em Latossolo de textura média. Blanco-Canqui et al. (2005) também obtiveram correlação exponencial significativa entre esses parâmetros, mostrando que o aumento de C orgânico em um Argissolo implica redução da resistência tênsil do solo corroborado por Ferreira et al. (2011).

A RT e a F podem ser eficientes na avaliação da qualidade estrutural dos solos com CCA, porém, mais estudos precisam ser realizados, em diferentes tipos de solos e em diferentes períodos de aplicações para que sejam definidos valores críticos destes parâmetros para o desenvolvimento de plantas.

4.6 Conclusões

O tratamento sem adição de CCA (0 t ha⁻¹) favoreceu a formação de agregados de maior tamanho, originando maior diâmetro médio ponderado de agregados, enquanto o tratamento com a maior concentração de CCA (120 t ha⁻¹) proporcionou a maior concentração de agregados do solo na classe de menor tamanho e menor diâmetro médio ponderado dos agregados.

A partir da dose de 40 t ha⁻¹ para 80 t ha⁻¹ de CCA ocorreu uma diminuição da porcentagem de macroagregados e uma aumento da porcentagem de

microagregados, mostrando que o efeito da CCA ocorre a partir de doses maiores que 40 t ha⁻¹.

A resistência tênsil de agregados (RT) diminuiu proporcionalmente com a adição de CCA e aumentou com a diminuição dos teores de carbono orgânico total (COT).

A RT e a F podem ser eficientes na avaliação da qualidade estrutural dos solos com CCA, porém, mais estudos precisam ser realizados, em diferentes tipos de solos e em diferentes tempos de aplicações para que valores críticos de RT possam ser definidos.

Com base nos resultados obtidos e, considerando solos agrícolas, sugere-se a dose mais adequada, o intervalo compreendido entre 40 a 80 t ha⁻¹ de CCA.

4.7 Referências Bibliográficas

ANGEL, J. D. M; VÁSQUEZ, T. G. P; JUNKES, J. A; HOTZA, D. Caracterização de cinza obtida por combustão de casca de arroz em reator de leito fluidizado. **Química Nova**, São Paulo, v.32, p.1110-1114, 2009.

ANGULO, R.J.; ROLOFF, G. & SOUZA, M.L.P. Relações entre a erodibilidade e agregação, granulometria e características químicas de solos brasileiros. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.8, p.133-138, 1984.

BAYER, C. & MIELNICZUK, J. Dinâmica e função da matéria orgânica. In: SANTOS, G.A.; SILVA, L.S.; CANELLAS, L.P.& CAMARGO, F.A.O. (Eds.). **Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais e subtropicais**. 2ed. Porto Alegre: Metrópole, p.7-18, 2008.

BLANCO-CANQUI, H.; LAL, R.; OWENS, L.B.; POST, W.M. & IZAURRALDE, R.C. Mechanical properties and organic carbon of soil aggregates in the Northern Appalachians. **Soil Science Society of America Journal**, v.69, p.1472-1481, 2005.

BRAIDA, J.A. **Acúmulo de resíduos vegetais na superfície e de matéria orgânica no solo e suas implicações no comportamento mecânico do solo sob plantio direto**. Santa Maria, Universidade Federal de Santa Maria, 2004. 106p. (Tese de Doutorado).

CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento. **Central de informações agropecuárias**. 11º Levantamento de grãos da safra 2012/2013. Disponível em:

http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/13_08_09_10_43_44_boletim_portugues_agosto_2013_port.pdf. Acesso em 27 de agosto de 2013.

CORRÊA, J. C., BULL L, T., CRUSCIOL, C. A. C. & MORAES, M. H. Alteração de atributos físicos em latossolo com aplicação superficial de escória de aciaria, lama cal e lodos de esgoto e calcário. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.33, p.263-272, 2009.

DELLA, V.P.; KÜHN, I.; HOTZA, D. Reciclagem de Resíduos Agro-Industriais: Cinza de Casca de Arroz como Fonte Alternativa de Sílica. Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais. **Cerâmica industrial**, 2005.

DEXTER, A. R. & KROESBERGEN, B. Methodology for determination of tensile strength of soil aggregates. **Journal of Agricultural Engineering Research**, v.31, p.139-147, 1985.

DEXTER, A.R. & WATTS, C. Tensile Strenght and Friability. In: SMITH, K. & MULLINS, C. (Ed.) **Soil and environmental analysis: Physical methods**. 2. ed. New York: Marcelo Dekker, p.401–430, 2000.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Manual de métodos de análise de solos**, 2 ed., Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 212p, 1999.

FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations, FAOSTAT: **Agricultural Production/strawberry**. Disponível em: [http:// faostat3.fao.org/faostat-gateway/go/to/home/S](http://faostat3.fao.org/faostat-gateway/go/to/home/S)>. Acesso em 04 de setembro 2013.

FERREIRA, A. O.; SÁ, J. C. M.; GIAROLA, N. F. B.; HARMS, M. G.; BAVOSO, M. A.; BRIEDIS, C.; NETTO, C. Q. Variação na resistência tênsil de agregados em função do conteúdo de carbono em dois solos na região dos Campos Gerais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.35, p.437-445, 2011.

FERREIRA, Ângela A. **Concreto de alto desempenho com adição de cinza de casca de arroz: avaliação de propriedades relacionadas com a durabilidade**. 1999. 154 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

FOLETTTO, E. L.; HOFFMANN, R. S.; PORTUGAL JÚNIOR, U. L; JAHN, S. L. Aplicabilidade das cinzas da casca de arroz. **Química Nova**, v.28, p.1055-1060, 2005.

GUIMARÃES, R. M. L.; TORMENA, C. A.; ALVES, S. J.; FIDALSKI, J.; BLAINSKI, E. Tensile strength, friability and organic carbon in an Oxisol under a crop-livestock system. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v.66, p.499-505, 2009.

GONÇALVES, M. R. F.; BERGMANN, C. P. Isolantes Térmicos de Cinza de Casca de Arroz: Obtenção e Correlação de suas Propriedades com a Microestrutura. **Cerâmica Industrial**, v.11, p.38-43, 2006.

GRIEVE, I.C.; DAVIDSON, D.A. & BRUNEAU, P.M.C. Effects of liming on void space and aggregation in an upland grassland soil. **Geoderma**, v.125, p.39-48, 2005.

IMHOFF, S.; SILVA, A.P. & DEXTER, A.R. Factors contributing to the tensile strength and friability of Oxisols. **Soil Science Society of America Journal**, v.66, p.1656-1661, 2002.

ISLABÃO, G. O. **Uso da cinza de casca de arroz como corretivo e condicionador do solo**. 2013. 80p. Tese (Doutorado em Agronomia) - Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Área de Concentração: Solos.

KAY, B.D. & DEXTER, A.R. The influence of dispersive clay and wetting/drying cycles on the tensile strength of a red-brown Earth. **Australian Journal of Soil Research**, v.30, p.297-310, 1992.

KAY, B.D. & ANGERS, D.A. Soil structure. In: SUMNER, M.E., ed. **Handbook of soil science**. Washington, CRC Press, p.229-276, 1999.

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

KEMPER, W.D.; ROSENAU, R.C.; DEXTER, A.R. Cohesion development in disrupted soils as affected by clay and organic matter content and temperature. **Soil Science Society of America Journal**, v.51, p.860-867, 1987.

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

KOHNKE, H. **Soil physics**. New York, Mac Grow-Hill, p.118-142, 1968.

LIMA, C. L. R.; PAULETTO, E.A; GOMES, A. S.; SILVA, J. B. Estabilidade de agregados de um Planossolo sob diferentes sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.27, p.199-205, 2003.

LIMA, C. L. R. de, PILLON, C. N., SUZUKI, L. E. A. S. & CRUZ, L. E. C. da. Atributos físicos de um planossolo háplico sob sistemas de manejo comparados aos do campo nativo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.32, p.1849-1855, 2008.

MACKS, S. P.; MURPHY, B. W.; CRESSWELL, H. P. & KOEN, T.B. Soil friability in relation to management history and suitability for direct drilling. **Australian Journal of Soil Research**, v.34, p.343-360, 1996.

MONCADA, M. P.; GABRIELS, D.; LOBO, D; REY, J. C.; CORNELIS, W. M. Visual field assessment of soil structural quality in tropical soils. **Soil and Tillage Research**, v.139, p.8-18, 2014.

OBALUM, S.E. & OBI, M.E. Physical properties of a sandy loam Ultisol as affected by tillage-mulch management practices and cropping systems. **Soil and Tillage Research**, v.108, p.30-36, 2010.

PALMEIRA, P. R. T.; PAULETTO, E. A.; TEIXEIRA, C. F. A. & GOMES, A. da S., Pesquisa de Solos (Rio de Janeiro. RJ). **Manual de métodos de análise de solos**. 2 ed. Rio de Janeiro. 1999. 212p.

PANACHUKI, E.; SOBRINHO, T.A; VITORINO, A.C.T.; CARVALHO, D.F.; URCHEI, M.A. Parâmetros físicos do solo e erosão hídrica sob chuva simulada, em área de integração agricultura-pecuária. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. v.10, p.261-268, 2006.

POUEY, M. T. F. **Beneficiamento da cinza de casca de arroz residual com vistas à produção de cimento composto e/ou pozolânico**. Tese (Doutorado em Engenharia) Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.

PRIMAVESI, A. **O manejo ecológico do solo**. 4. ed. São Paulo: Nobel, 1982. 541 p.

PRUDÊNCIO JÚNIOR, L.R., SANTOS, S., DAFICO, D. de A. Cinza de Casca de Arroz – Utilização de Resíduos na Construção Habitacional, **Coletânea Habitaré**, v.4, p.240- 261, 2003.

R CORE TEAM. R: **A language and environment for statistical computing**. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, 2014.

RAHIMI, H.; PAZIRA, E.; TAJIK, F. Effect of soil organic matter, electrical conductivity and sodium adsorption ratio on tensile strength of aggregates. **Soil and Tillage Research**, v.54, p.145-153, 2000.

SALTON, J. C.; MIELNICZUK, J.; BAYER, C.; BOENI, M.; CONCEIÇÃO, P. C.; FABRÍCIO, A. C.; MACEDO, M. C. M. & DIRCEU, L. B. Agregação e estabilidade de agregados do solo em sistemas agropecuários em mato grosso do sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.32, p.11-21, 2008.

SANTOS, V. B. dos; CASTILHOS, D.; CASTILHOS, R. M. V.; PAULETTO, E. A.; GOMES, A. da S. & SILVA, D. G. da. Biomassa, atividade microbiana e teores de carbono e nitrogênio totais de um planossolo sob diferentes sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Agrociência**, v.10, p.333-338, 2004.

SEVERO, C.R.S. **Caracterização dos solos do Centro Agropecuário da Palma**. Pelotas. 1999. 97p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel, Universidade Federal de Pelotas.

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.20, p.113-117, 1997.

SIX, J.; ELLIOTT, E. T.; PAUSTIAN, K. Soil macroaggregate turnover and microaggregate formation: a mechanism for C sequestration under no-tillage agriculture. **Soil Biology and Biochemistry**, Amsterdam, v.32, p.2099-2103, 2000.

TISDALL, J. M.; OADES, L. M. Organic matter and water-stable aggregates in soil. **Journal of Soil Science**, v.33, p.141-163, 1982.

TORMENA, C.A.; FIDALSKI, J.; ROSSI JUNIOR, W. Resistência tênsil e friabilidade de um latossolo sob diferentes sistemas de uso. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.32, p.33-42, 2008a.

TORMENA, C.A.; ARAÚJO, M.A.; FIDALSKI, J.; IMHOFF, S.; SILVA, A.P. Quantificação da resistência tênsil e da friabilidade de um latossolo vermelho distroférico sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.32, p.943-952, 2008b.

UTOMO, W. H.; DEXTER, A. R. Soil friability. **European Journal Soil Science**, Oxford, v.32, p.203-213, 1981.

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.

YODER, R. E. A direct method of aggregate analysis of soil and a study of the physical nature of erosion losses. **Journal American Society Agronomy**, v.28, p.337-351, 1936.

WATTS, C. W. & DEXTER, A. R. Soil friability: Theory. measurement and the effects of management and organic carbon content. **European Journal of Soil Science**, v.49, p.73-84, 1998.

5 Referências bibliográficas

AMATO, G. W.; ELIAS, M. C. **Parboilização do arroz**. Porto Alegre: Editora Ricardo Lenz Ziede, 2005. 160p.

ANDRADE, A. G. **Ciclagem de nutrientes e arquitetura radicular de leguminosas arbóreas de interesse para revegetação de solos degradados e estabilização de encostas**.1997. 166 p. Tese (Doutorado em Agronomia) - Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro – RJ, 1997.

ANDRADE, R. S.; STONE, L. F. Índice S como indicador da qualidade física de solos do cerrado brasileiro. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.13, n.4, p.382-388, 2009.

ANDREOLLA, V. R. M. **Eficácia de sulcadores de uma semeadora-adubadora e suas implicações na cultura da soja e nos atributos físicos de um Latossolo sob integração Lavoura-pecuária**. Cascavel, 147 f. 2005. Dissertação de Mestrado (Mestrado em Engenharia Agrícola – Engenharia de Sistemas Agroindustriais) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná.

AJAYI, A. E.; DIAS JUNIOR, M. S.; CURI, N.; GONTIJO, I.; ARAUJO JUNIOR, C. F.; VASCONCELOS JUNIOR, A. I. Relation of strength and mineralogical attributes in Brazilian latosols. **Soil & Tillage Research**, v.102, p.14-18, 2009.

ALAKUKU, L.; WEISSKOPF, P.; CHAMEN, W. C. T. & TIJINK, F. G. J.; van der LINDEN, J. P.; PIRES, S.; SOMMER, C. & SPOOR, G. Prevention strategies for field traffic-induced subsoil compaction: A review. Part 1. Machine/soil interactions. **Soil & Tillage Research**, v.73, p.145-160, 2003.

ARAUJO JUNIOR, C. F.; DIAS JUNIOR, M. S.; GUIMARÃES, P. T. G.; PIRES, B. S. Resistência à compactação de um Latossolo cultivado com cafeeiro, sob diferentes sistemas de manejo de plantas invasoras. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.32, p.23-21, 2008.

AZAMBUJA, I. H. V. et al. Aspectos socioeconômicos da produção do arroz. In: GOMES, A. S.; MAGALHAES JUNIOR, A. M. **Arroz irrigado no sul do Brasil**, Brasília, DF. Embrapa/MAPA, p.23-44, 2004.

BASTOS, R. S.; MENDONÇA, E. S.; ALMAREZ, V. H.; CORRÊA, M. M. & COSTA, L. M. Formação e estabilização de agregados do solo influenciados por ciclos de umedecimento e secagem após adição de compostos orgânicos com diferentes

características hidromórficas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.29, p.21-31, 2005.

BERTOL, I.; ALBURQUERQUE, J. A.; LEITE, D.; AMARAL, A. J.; ZOLDAN JUNIOR, W. A. Propriedades físicas do solo sob preparo convencional e semeadura direta em rotação e sucessão de culturas, comparadas as do campo nativo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.28, p.155-163. 2004.

BRADY, N. & WEIL, R. **The Nature and Properties of Soils**. 14ed. Upper Saddle River: Prentice Hall, p. 975, 2008.

CARTER, M. R. Relative measures of soil bulk density to characterize compaction in tillage studies on fine sandy loams, **Canadian Journal of Soil Science**, v.70, p.425-433, 1990.

CASAGRANDE, A. **The determination of the pre-consolidation load and its practical significance**. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOIL MECHANICS AND FOUNDATION ENGINEERING, 1936, Cambridge. Proceedings. Cambridge: MA Harvard University, p.60-64, 1936.

CHAN, K.Y. Bulk density. In: LAL, R. (Ed.) **Encyclopedia of Soil Science**. 2 ed., New York: Taylor & Francis, p.128-130, 2006.

CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento. **Central de informações agropecuárias**. 11º Levantamento de grãos da safra 2012/2013. Disponível em: http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/13_08_09_10_43_44_boletim_portugues_agosto_2013_port.pdf. Acesso em 27 de agosto de 2013.

CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento. **Central de informações agropecuárias**. 11º Levantamento de grãos da safra 2013/2014. Disponível em: http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/14_07_09_09_36_57_10_levantamento_de_graos_julho_2014.pdf. Acesso em 31 de julho de 2014.

CORRÊA, J. C., BULL L, T., CRUSCIOL, C. A. C. & MORAES, M. H. Alteração de atributos físicos em latossolo com aplicação superficial de escória de aciaria, lama cal e lodos de esgoto e calcário. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.33, p.263-272, 2009

CORDEIRO, G. C. **Utilização de cinzas ultrafinas do bagaço de cana-de-açúcar e da casca de arroz como aditivos minerais em concreto**. 2006. 445f. Tese

(Doutorado). Coordenação dos Programas de Pós-Graduação em Engenharia-COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.

DEBIASI, H.; LEVIEN, R.; TREIN, C. R.; CONTE, O.; MAZURANA, M. Capacidade de suporte e compressibilidade de um Argissolo. Influenciadas pelo tráfego e por plantas de cobertura de inverno. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.32, p.2629-2637, 2008.

DELLA, V. P.; KÜHN, I.; HOTZA, D. Caracterização da Cinza de Casca de Arroz para uso como Matéria Prima na Fabricação de Refratários de Sílica. **Química Nova**, v.24, p.778-782, 2001.

DELLA, V. P.; KÜHN, I.; HOTZA, D. Reciclagem de Resíduos Agro-Industriais: Cinza de Casca de Arroz como Fonte Alternativa de Sílica. **Cerâmica Industrial**, v.10, p.22-25, 2005.

DEXTER, A. R. & KROESBERGEN, B. Methodology for determination of tensile strength of soil aggregates. **Journal of Agricultural Engineering Research**, London, v.31, p.139-147, 1985.

DEXTER, A. R. Soil physical quality - Part I. Theory, effects of soil texture, density, and organic matter, and effects on root growth. **Geoderma**, Amsterdam, v.120, p.201-214, 2004.

DEXTER, A. R. & WATTS, C. Tensile strength and friability. In: SMITH, K. & MULLINS, C. (ed.) **Soil and environmental analysis**: Physical methods. 2.ed. New York. Marcel Dekker, p.401-430, 2000.

DEXTER, A. R. Advances in characterization of soil structure. **Soil and Tillage Research**, v.11, p.199-238, 1988.

DIAS JUNIOR, M.S. Compactação do solo. **Tópicos em ciência do solo**, Viçosa, v.1, p.56-94, 2000.

DIAS JÚNIOR, M. S. **Compression of three soils under long-term tillage and wheel traffic**. 1994. 114 p. Thesis (Ph.D. in Crop and Soil Science) - Michigan State University, East Lansing.

DIAS JUNIOR, M. S.; PIERCE, F. J. A simple procedure for estimating preconsolidation pressure from soil compression curves. **Soil Technology**, Amsterdam, v.8, p.139-151, 1995.

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

DORAN, J. W.; PARKIN, T. B. Defining and assessing soil quality. In: DORAN, J.W. et al. (ed). **Defining Soil Quality for a Sustainable Environment**. Madison: American Society of Agronomy & Soil Science Society of America, p. 03-21, 1994.

EMBRAPA. Cultivo do arroz irrigado no Brasil. Sistemas de Produção, 3, versão eletrônica, nov./2005. Disponível em: <<http://sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br/FontesHTML/Arroz/ArrozIrrigadoBrasil/index.htm>>. Acesso em 31 de julho de 2014.

FAO – Food and Agriculture Organization of the United Nations, FAOSTAT: AgriculturalProduction/strawberry. Disponível em: [http:// faostat3.fao.org/faostat-gateway/go/to/home/S](http://faostat3.fao.org/faostat-gateway/go/to/home/S)>. Acesso em 04 de setembro 2013.

FAO. Food And Agriculture Organization. Statistical Databases. Disponível em: <http://www.fao.org.br>. Acesso em 30 de outubro de 2014.

FELLER, C.; ALBRECHT, A.; TESSIER, D. Aggregation and organic matter storage in kaolinitic and smectitic tropical soils. In: CARTER, M. R.; STEWART, B. A. (Ed.). **Structure and organic matter storage in agricultural soils**. Boca Raton: Lewis, p.309-359, 1996.

FERREIRA, R. R. M.; FILHO, J. T.; FERREIRA, V. M. Efeitos de sistemas de manejo de pastagens nas propriedades físicas do solo. **Revista Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v.31, p.913-932, 2010.

FOLETTTO, E. L.; HOFFMANN, R. S.; PORTUGAL JÚNIOR, U. L.; JAHN, S. L. Aplicabilidade das cinzas da casca de arroz. **Química Nova**, v.28, p.1055-1060, 2005.

GOMES, A. S.; MAGALHÃES JÚNIOR, A. M. Arroz Irrigado no sul do Brasil. **Embrapa Informação Tecnológica**, Brasília, p.899, 2004.

GONÇALVES, M. R. F.; BERGMANN, C. P. Isolantes Térmicos de Cinza de Casca de Arroz: Obtenção e Correlação de suas Propriedades com a Microestrutura. **Cerâmica Industrial**, v.11, p.38-43, 2006.

GUIMARÃES, C. M; SANTOS, A. B.; MAGALHÃES, A. M. J.; STONE, L. F. A cultura do arroz no Brasil. 2.ed. Aparecida de Goiânia: **EMBRAPA**, p.54, 2006.

GUPTA, S.C. & ALLMARAS, R.R. Models to assess the susceptibility of soils to excessive compaction. **Advances in Soil Science**, v.6, p.5-10, 1987

HÄKANSSON, I. A method for characterizing the state of compactness of the plough layer. **Soil and Tillage Research**, v.16, p.105-120, 1990.

HOLTZ, R. D.; KOVACS, W. D. **An introduction to geotechnical engineering**. New Jersey, Prentice-Hall, p.733, 1981.

HOPPE, A. E. **Carbonatação em concreto com cinza de casca de arroz sem moagem**. 2008. 147f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2008.

HORN, R.; LEBERT, M. Compactability and compressibility. In: SOANE, B.D.; VAN OUWERKERK, C. (Eds.). **Soil compaction in crop production**. Amsterdam: Elsevier Science, p.45-70, 1994.

IMHOFF, S.; SILVA, A. P.; DIAS JUNIOR, M. S.; TORMENA, C. A. Quantificação de pressões críticas para o crescimento das plantas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v.25, p.11-18, 2001.

IMHOFF, S.; SILVA, A.P.; TORMENA, C.A. Aplicações da curva de resistência no controle da qualidade física de um solo sob pastagem. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.35, p.1493-1500, 2000.

IMHOFF, S.; SILVA, A. P.; DEXTER, A. R. Factors contributing to the tensile strength and friability of oxisols. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.66, p.1656-1661, 2002.

ISLABÃO, Glaucia Oliveira. **Uso da cinza de casca de arroz como corretivo e condicionador do solo**. 2013. 80p. Tese (Doutorado em Agronomia) - Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Área de Concentração: Solos.

JAMES, Jose; RAO, M. Subba. Reaction Product of Lime and Silica from Rice Husk Ash. **Cement and Concrete Research**, v.16, p.67-73, 1986.

KARLEN, D. L. Soil quality as an indicator of sustainable tillage practices. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v.78, p.129-130, 2004.

KAY, B. D. & DEXTER, A. R. The influence of dispersible clay and wetting/drying cycles on the tensile strength of a Red-Brown Earth. **Australian Journal of Soil Research**, Melbourne, v.30, p.297-310, 1992.

KENNEDY, G. et al. Nutrient impact assessment of rice in major rice-consuming countries. **International Rice Commission Newsletter**, v.51, p.33-42, 2002.

KIEHL, R. José. **Manual de Edafologia**. Editora Agronômica Ceres, Ltda. São Paulo – SP, 263p, 1979.

KLEIN, V. A. & LIBARDI, P. L. Densidade e distribuição do diâmetro dos poros de um Latossolo Vermelho, sob diferentes sistemas de uso e manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.26, p.857-867, 2002.

KLEIN, V.A.; MASSING, J.P.; CÂMARA, R.K.; BIASUZ JÚNIOR, I.J. & SIMON, M.A. Densidade máxima e relativa de solos sob plantio direto. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE MANEJO E CONSERVAÇÃO DO SOLO E DA ÁGUA, 15, 2004, Santa Maria. **Anais**. Santa Maria: SBSCS, 2004. (CD-ROM).

KLEIN, V.A. Propriedades do solo e manejo da água em ambientes protegidos com cultivo de morangueiro e figueira. Passo Fundo: ed. UPF, p.61, 2005.

KLEIN, V. A. **Física do solo**. 2.ed. Passo Fundo: Ed. Universidade de Passo Fundo, 240p, 2012.

KONDO, M. K.; DIAS JÚNIOR, M. S. Compressibilidade de três Latossolos em função da umidade e uso. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.23, n.2, p.211-218, 1999.

LARSON, W. E. & PIERCE, F. J. The dynamics of soil quality as a measure of Sustainable Management. In: PANKHURST, C.; DOUBE, B.M.; GUPTA. V.V.S.R. (Ed.). *Biological Indicators of Soil Health*. Cab International. Oxon. UK, p.123, 1994.

LARBI, K. K. **Synthesis of High Purity Silicon from Rice Husks**. 2010. 116p. Thesis (Master of Applied Science) - University of Toronto, Canada.

LEY, G. J.; MULLINS, C. E. & LAL, R. Effects of soil properties on the strength of weakly structures tropical soils. **Soil and Tillage Research**, v.28, p.1-13, 1993.

LI, J. T.; ZHONG, X. L.; WANG, F. ZHAO, Q. G. Effect of poultry and livestock manure on soil physical and biological indicators in a rice-wheat rotation system. **Plant Soil Environment**, Nanjing, v.57, n.8, p.351-356. 2011.

LIMA, C. L. R.; PAULETTO, E. A.; GOMES, A. S. & SILVA, J. B. Estabilidade de agregados de um Planossolo sob diferentes sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.27, p.199-205, 2003.

LIMA, C.L.R. Compressibilidade de solos versus intensidade de tráfego em um pomar de laranja e pisoteio animal em pastagem irrigada. 2004. 70p. Tese (Doutorado em Agronomia) – Departamento de Solos e Nutrição de Plantas, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, SP.

LIMA, C. L. R.; SILVA, A. P., IMHOFF, S. & LEÃO, T. P. Compressibilidade de um solo sob sistemas de pastejo rotacionado intensivo irrigado e não irrigado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.28, p.945-951, 2004.

LIMA, C. L. R; PILLON, C. N., SUZUKI, L. E. A. S. & CRUZ, L. E. C. da. Atributos físicos de um planossolo háplico sob sistemas de manejo comparados aos do campo nativo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.32, p.1849-1855, 2008.

LORENZETT, D. B.; NEUHAUS, M.; SCHWAB, N. T. Gestão de resíduos e a indústria de beneficiamento do arroz. **Revista Gestão Industrial**, v.8, p.219-232, 2012.

MACHADO, A. de M. M.; FAVARETTO, N. Atributos físicos do solo relacionados ao manejo e conservação dos solos. In: LIMA, M. R. et al. **Diagnóstico e recomendações de manejo do solo: aspectos teóricos e metodológicos**. Curitiba: UFPR/ Setor de Ciências Agrárias, p.234-254, 2006.

MACKS, S. P.; MURPHY, B. W.; CRESSWELL, H. P. & KOEN, T. B. Soil friability in relation to management history and suitability for direct drilling. **Australian Journal of Soil Research**, Melbourne, v.34, p.343-360, 1996.

MADALUZ, L. M.; FOSTER, L.; POUEY, M. T. Cinza de casca de arroz: Atualização do estudo da disponibilidade do material na região de Pelotas. In: XVII congresso de Iniciação Científica, X Encontro de Pós - Graduação, 2008, Pelotas. **Anais do XVII**

Congresso de Iniciação Científica, X Encontro de Pós - Graduação. Pelotas: UFPel, 2008.

MAGALHÃES JÚNIOR, A. M. et. al. Biotecnologia em arroz: principais modificações genéticas. EMBRAPA Clima Temperado, Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Documentos 229: Biotecnologia em arroz: principais modificações genéticas. Pelotas, outubro, p.44, 2008.

MASULILI, A.; UTOMO, W. H.; MS, S. Rice Husk Biochar for Rice based cropping system in acid soil 1. The characteristics of rice husk biochar and its influence on the properties of acid sulfate soils and rice growth in west Kalimantan, Indonésia. **Journal of Agricultural Science**, v.2, p.39–47, 2010.

MEHTA, P. KUMAR; MONTEIRO, Paulo J. M. Concreto – Estrutura, Propriedades e Materiais. Ed. Pini. São Paulo, 1º ed. p.573, 1994.

NOLLA, A.; VOLK, L. B. S.; MUNIZ, A. S.; SILVA, T. R. B. Correção da acidez do solo em profundidade através do uso de carbonatos, silicatos e casca de arroz em lisímeros. **Revista cultivando o saber**, v.3, p.1-8, 2010.

OLIVEIRA, G.C.; DIAS JUNIOR, M. S.; CURI, N.; RESCK, D. V. S. Caracterização química e física-hídrica de um Latossolo Vermelho após 20 anos de manejo e cultivo de solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, n.28, p.335-344, 2004.

PAULETTO, E. A.; NACHTIGALL, G. R.; GUADAGNIN, C. A. Adição de cinza de casca de arroz em dois solos do município de Pelotas, RS. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.14, p 255-258, 1990.

PAUL, D. L.; ISLABÃO, G. O.; VAHL, L. C.; TIMM, L. C.; PAULETTO, E. A. Caracterização física de Argissolo com cinza de casca de arroz. In: CONGRESSO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA UFPEL. Pelotas. **Anais eletrônicos**. Pelotas: CIC, 2011. Disponível em: http://ufpel.edu.br/cic/2011/anais/pdf/CA/CA_00573.pdf. Acesso em: 9 de novembro de 2013.

PEREIRA, J. A. Cultura do Arroz no Brasil: subsídios para sua história. **Embrapa Meio-norte**, 1.ed., 2002.

POUEY, M. T. F. **Beneficiamento da cinza de casca de arroz residual com vistas à produção de cimento composto e/ou pozolânico**. Tese (Doutorando em Engenharia) Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.

PRUDÊNCIO JÚNIOR, L.R., SANTOS, S., DAFICO, D. de A. Cinza de Casca de Arroz – Utilização de Resíduos na Construção Habitacional, **Coletânea Habitaré**, v.4, p.240- 261, 2003.

R CORE TEAM. R: **A language and environment for statistical computing**. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, 2014.

RAHIMI, H.; PAZIRA, E. & TAJIK, F. Effect of soil organic matter, electrical conductivity and sodium adsorption ratio on tensile strength of aggregates. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.54, p.145-153, 2000.

RÊGO, J. H. S. **As cinzas de cascas arroz (CCAs) amorfa e cristalina como adição mineral ao cimento** – aspectos de microestrutura das pastas. 2004. 238f. Tese (Doutorado) - Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 2004.

REICHERT, J.M.; REINERT, J.M. & BRAIDA, J.A. Qualidade dos solos e sustentabilidade de sistemas agrícolas. **Ciência & Ambiente**, v.27, p.29-48, 2003.

REICHERT, J. M.; SUZUKI, L. E. A. S. & REINERT, D. J. Compactação do solo em sistemas agropecuários e florestais: Identificação, efeitos, limites críticos e mitigação. In: CERETTA, C. A.; SILVA, L. S. & REICHERT, J. M., eds. **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa, MG, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, v.5. p.49-134, 2007.

REICHARDT, K.; TIMM, L. C. **Solo, planta e atmosfera: conceitos, processos e aplicações**. 2.ed. Barueri: Manole, p.500, 2012.

RICHART, A. et al. Compactação do solo: causas e efeitos. Revisão, **Semana: Ciências Agrárias, Londrina**, v.26, p.321-344, 2005.

RESENDE, M.; CURI, N.; REZENDE, S. B. de; CORRÊA, G. F. **Pedologia: base para distinção de ambientes**. 4 ed. Viçosa, NEPUT, p.338, 2002.

SALTON, J. C.; MIELNICZUK, J.; BAYER, C.; BOENI, M.; CONCEIÇÃO, P. C.; FABRÍCIO, A. C.; MACEDO, M. C. M. & DIRCEU, L. B. Agregação e estabilidade de agregados do solo em sistemas agropecuários em mato grosso do sul. **Revista brasileira de Ciência do Solo**, v.32, p.11-21, 2008.

SANTOS, S. **Produção e avaliação do uso de pozolana com baixo teor de carbono obtida da cinza de casca de arroz residual para concreto de alto desempenho.** 2006. 150f. Tese (Doutorado) - Curso de pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006.

SANTOS, C. H. C. **Uso de cinza de casca de arroz na agricultura.** 2011. 49f. TCC (Tecnólogo em Planejamento e Gestão para o Desenvolvimento Rural) - Faculdade de Ciências Econômicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

SEQUINATTO, L. **Qualidade física do solo e rendimento de grãos num Argissolo em processo de recuperação.** Tese (Doutorado em Ciência do Solo), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 158f. 2010.

SILVA, M.L.N.; CURI, N. & BLANCANEUX, P. Sistemas de manejo e qualidade estrutural de latossolo roxo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.35 n.12, p.2485-2492, 2000.

SILVA, V. R. et al. Fatores controladores da compressibilidade de um Argissolo Vermelho amarelo distrófico arênico e de um Latossolo vermelho distrófico típico. I – Estado inicial de compactação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.26, p.1-8, 2002.

SILVA, P.R.F.; ARGENTA, G.; SANGOI, L.; STRIEDER, M.L. & SILVA, A.A. Estratégias de manejo de coberturas de solo no inverno para cultivo do milho em sucessão no sistema semeadura direta. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.36, p.1011-1020, 2006.

SILVA, I. O. **Influência da cinza de casca de arroz amorfa e cristalina e da sílica ativa na reação álcali-agregado.** 2007. 125f. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2007.

SILVA, R. B.; LANÇAS, K. P.; MASQUETTO, B. J. Consolidômetro: equipamento pneumático-eletrônico para avaliação do estado de consolidação do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v.31, p.607- 615, 2007.

SPERA, S. T.; SANTOS, H. P.; FORTANELI, R. S. & TOM, G. E. Efeito de sistemas de produção de grãos, envolvendo pastagens sob plantio direto nos atributos físicos de solo e na produtividade. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.28, p.533-542, 2004.

SPOSITO, G.; ZABEL, A. The assessment of soil quality. **Geoderma**, Amsterdam, 114:143-144, 2003.

SUZUKI, L.E.A.S.; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M. & LIMA, C.L.R. Estimativa da susceptibilidade à compactação e do suporte de carga do solo com base em propriedades físicas de solos do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.32, p.963-973, 2008.

TASHIMA, M. M. **Cinza de casca de arroz altamente reativa: método de produção, caracterização físico-química e comportamento em matrizes de cimento portland**. 2006. 81f. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2006.

TIBONE, R. **A utilização de cinza de casca de arroz de termoeletrica como componente do aglomerante de compósitos à base de cimento Portland**. 2007. 139f. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

TISDALL, J.M. & OADES, J.M. Organic matter and waterstable aggregates in soil. Europe **Journal Soil Science**. v.33, p.141-163. 1982.

TISDALL, J. M. & OADES, J. M. Stabilization of soil aggregates by the root systems of ryegrass. **Australian Journal of Soil Research**, Victoria, v.17, p.429-441, 1979.

TORMENA, C. A.; FIDALSKI, J. & ROSSI JUNIOR, W. Resistência Tênsil e Friabilidade de um Latossolo sob diferentes sistemas de uso. *Revista Brasileira de Ciências do Solo*, v.32, p.33-42, 2008.

UTOMO, W. H.; DEXTER, A. R. Soil friability. **European Journal Soil Science**, Oxford, v.32, n.1, p.203-213, 1981.

VEIGA, M.; HORN, R.; REINERT, D. J. & REICHERT, J. M. Soil compressibility and penetrability of an Oxisol from Southern Brazil, as affected by long-term tillage systems. **Soil and Tillage Research**, v.92, p.104-113, 2007.

ZUCCO, Lóris Lódir. **Estudo da viabilidade de fabricação de placas de compósitos à base de cimento e casca de arroz**. 118 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, São Paulo, 1999.

WATTS, C.W. & DEXTER, A.R. Soil friability: theory, measurement and the effects of management and organic carbon content. **European Journal of Soil Science**, Oxford, v.49, n.1, p.73-84, 1998.

WATTS, C. W.; DEXTER, A. R. & LONGSTAFF, D. J. An assessment of the vulnerability of soil structure to destabilisation during tillage. Part II. Field trials. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.37, p.175-190, 1996.

WEINÄRTNER, M. A.; ALDRIGHI, C. F. S; MEDEIROS, C. A. B. (Org.). Práticas Agroecológicas: Adubação orgânica. **Embrapa Clima Temperado**: Pelotas, RS. 1ª. Ed. 2006.

Apêndices

Apêndice A – Composição química da cinza de casca de arroz utilizada na área experimental deste estudo.

Ph	PN	Si	K	Na	Ca	Mg	Al
-- % --		----- g kg ⁻¹ -----					
8,6	0,91	410,5	11,35	6,83	6,02	4,2	0,23
C	N	P	S	Cu	Fe	Mn	Zn
----- g kg ⁻¹ -----				----- mg kg ⁻¹ -----			
72,3	0,98	2,64	3,52	7,5	480	1278	34

Apêndice B – Percentual de argila, silte e areia na camada de 0,00 a 0,10 m de um Argissolo Vermelho Amarelo sob diferentes doses de cinza de casca de arroz, na camada de 0,00 a 0,10 m, Capão do Leão, RS.

Tratamentos ¹	Argila	Silte	Areia
T1	14,39	23,41	62,20
	14,62	22,04	63,33
	14,97	22,00	63,03
	15,23	21,53	63,23
	15,05	22,32	62,63
	15,24	21,06	63,70
	18,82	19,85	61,33
	19,09	19,48	61,43
T2	13,83	24,34	61,83
	14,57	24,20	61,23
	15,09	22,21	62,70
	14,90	20,74	64,37
	12,86	20,88	66,27
	13,21	21,09	65,70
	20,03	18,91	61,07
	19,67	20,53	59,80
T3	14,64	26,22	59,13
	14,56	25,42	75,11
	15,47	22,42	66,18
	15,83	21,44	62,73
	18,71	21,75	59,53
	18,38	20,82	60,80
	19,52	19,51	60,97
	19,92	19,58	60,50
T4	13,23	25,24	61,53
	12,95	24,79	62,27
	13,14	22,46	64,40
	13,11	23,49	63,40
	17,45	23,92	58,63
	17,18	23,86	58,97
	18,03	23,4	59,57
	16,71	22,86	60,43
T5	11,91	31,25	58,83
	12,79	26,75	60,47
	14,67	22,73	62,60
	14,40	22,20	63,40
	17,15	24,82	58,03
	13,80	25,90	60,3
	16,26	20,58	63,17
	16,58	20,26	63,17

¹T1= 0 t ha⁻¹, T2= 20 t ha⁻¹, T3= 40 t ha⁻¹, T4= 80 t ha⁻¹, T5= 120 t ha⁻¹.

Apêndice C - Densidade do solo (D_s , Mg m^{-3}), macroporosidade (Ma , $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$), microporosidade (Mi , $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) e porosidade total (Pt , $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) de um Argissolo Vermelho Amarelo sob diferentes doses de cinza de casca de arroz, na camada de 0,00 a 0,10 m, Capão do Leão, RS.

Tratamentos	D_s	Ma	Mi	Pt
	Mg m^{-3}		$\text{m}^3 \text{m}^{-3}$	
T1	1,66	0,04	0,26	0,31
	1,64	0,08	0,26	0,35
	1,69	0,06	0,27	0,34
	1,68	0,13	0,27	0,40
	1,72	0,09	0,29	0,39
	1,59	0,11	0,28	0,39
	1,68	0,03	0,28	0,31
	1,69	0,05	0,27	0,33
	1,74	0,04	0,28	0,32
	1,59	0,08	0,29	0,38
	1,65	0,08	0,29	0,38
	1,65	0,07	0,30	0,38
T2	1,72	0,05	0,32	0,37
	1,56	0,10	0,28	0,38
	1,72	0,05	0,34	0,39
	1,59	0,08	0,29	0,37
	1,61	0,05	0,31	0,37
	1,56	0,09	0,28	0,38
	1,69	0,09	0,27	0,36
	1,70	0,09	0,27	0,36
	1,75	0,09	0,29	0,37
	1,60	0,06	0,31	0,37
	1,64	0,10	0,29	0,39
	1,61	0,08	0,32	0,40

¹T1= 0 t ha⁻¹, T2= 20 t ha⁻¹.

Apêndice C - Densidade do solo (D_s , $Mg\ m^{-3}$), macroporosidade (Ma , $m^3\ m^{-3}$), microporosidade (Mi , $m^3\ m^{-3}$) e porosidade total (Pt , $m^3\ m^{-3}$) de um Argissolo Vermelho Amarelo sob diferentes doses de cinza de casca de arroz na camada de 0,00 a 0,10 m, Capão do Leão, RS (Continuação).

Tratamentos	D_s	Ma	Mi	Pt
	$Mg\ m^{-3}$		$m^3\ m^{-3}$	
T3	1,58	0,09	0,31	0,40
	1,54	0,09	0,30	0,39
	1,64	0,04	0,31	0,35
	1,57	0,08	0,30	0,38
	1,71	0,06	0,32	0,38
	1,69	0,05	0,30	0,35
	1,63	0,09	0,29	0,38
	1,68	0,06	0,29	0,35
	1,39	0,10	0,31	0,41
	1,49	0,10	0,28	0,38
	1,59	0,05	0,30	0,35
	1,45	0,10	0,30	0,40
	1,28	0,18	0,31	0,49
T4	1,51	0,11	0,28	0,39
	1,43	0,11	0,30	0,41
	1,17	0,18	0,33	0,51
	1,33	0,16	0,28	0,44
	1,33	0,15	0,31	0,46
	1,21	0,15	0,30	0,46
	1,36	0,13	0,32	0,45
	1,45	0,11	0,30	0,41
	1,45	0,13	0,30	0,43
	1,58	0,10	0,27	0,36
	1,60	0,11	0,25	0,35

T3= 40 t ha⁻¹, T4= 80 t ha⁻¹.

Apêndice C - Densidade do solo (D_s , Mg m^{-3}), macroporosidade (Ma , $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$), microporosidade (Mi , $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) e porosidade total (Pt , $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) de um Argissolo Vermelho Amarelo sob diferentes doses de cinza de casca de arroz, na camada de 0,00 a 0,10 m, Capão do Leão, RS (Continuação).

Tratamentos	D_s	Ma	Mi	Pt
	Mg m^{-3}		$\text{m}^3 \text{m}^{-3}$	
T5	1,29	0,06	0,39	0,45
	1,21	0,10	0,36	0,47
	1,21	0,18	0,35	0,52
	1,27	0,15	0,31	0,45
	1,28	0,15	0,33	0,47
	1,22	0,12	0,37	0,49
	1,00	0,22	0,35	0,56
	1,08	0,21	0,32	0,52
	1,01	0,21	0,34	0,55
	1,34	0,13	0,32	0,46
	1,27	0,11	0,35	0,45
	1,41	0,08	0,33	0,40

¹T5= 120 t ha⁻¹.

Apêndice D - Valores de densidade (D_s , $Mg\ m^{-3}$) referentes à curva de compressibilidade obtidos nas pressões de 25 (D_s 25), 50 (D_s 50), 100 (D_s 100), 200 (D_s 200), 400 (D_s 400), 800 (D_s 800) e 1600 (D_s 1.600) kPa de um Argissolo Vermelho Amarelo sob diferentes doses de cinza de casca de arroz, na camada de 0,00 a 0,10 m, Capão do Leão, RS.

Tratamento ¹	Ds 25	Ds 50	Ds 100	Ds 200	Ds 400	Ds 800	Ds 1600
T1	1,02	1,03	1,04	1,04	1,04	1,07	1,12
	1,01	1,02	1,03	1,03	1,04	1,06	1,11
	1,01	1,02	1,02	1,03	1,03	1,06	1,1
	1,02	1,03	1,04	1,06	1,08	1,12	1,16
	1,02	1,03	1,05	1,08	1,12	1,16	1,22
	1,02	1,03	1,04	1,06	1,09	1,12	1,17
	1,02	1,03	1,07	1,07	1,08	1,1	1,14
	1,03	1,04	1,05	1,07	1,09	1,12	1,17
	1,01	1,02	1,03	1,05	1,07	1,11	1,16
	1,01	1,02	1,03	1,05	1,08	1,11	1,16
	1,03	1,05	1,07	1,1	1,13	1,17	1,23
	1,01	1,01	1,02	1,04	1,07	1,11	1,17
T2	1,03	1,04	1,06	1,08	1,11	1,15	1,19
	1,03	1,1	1,1	1,1	1,11	1,15	1,2
	1,03	1,04	1,06	1,08	1,11	1,15	1,2
	1,04	1,06	1,08	1,11	1,14	1,19	1,24
	1,03	1,04	1,06	1,09	1,13	1,18	1,24
	1,05	1,07	1,1	1,13	1,18	1,25	1,3
	1,02	1,03	1,05	1,07	1,1	1,13	1,18
	1,02	1,04	1,06	1,09	1,14	1,2	1,25
	1,03	1,04	1,05	1,07	1,1	1,14	1,19
	1,02	1,03	1,05	1,07	1,11	1,17	1,23
	1,03	1,04	1,05	1,08	1,12	1,17	1,23
	1,03	1,04	1,05	1,08	1,12	1,16	1,21

¹T1= 0 t ha⁻¹, T2= 20 t ha⁻¹.

Apêndice D - Valores de densidade (Ds, Mg m⁻³) referentes à curva de compressibilidade obtidos nas pressões de 25 (Ds 25), 50 (Ds 50), 100 (Ds 100), 200 (Ds 200), 400 (Ds 400), 800 (Ds 800) e 1600 (Ds 1.600) kPa de um Argissolo Vermelho Amarelo sob diferentes doses de cinza de casca de arroz, na camada de 0,00 a 0,10 m, Capão do Leão, RS (Continuação).

Tratamento ¹	Ds 25	Ds 50	Ds 100	Ds 200	Ds 400	Ds 800	Ds 1600
T3	1,03	1,04	1,06	1,09	1,13	1,18	1,24
	1,02	1,03	1,05	1,07	1,11	1,17	1,23
	1,02	1,02	1,04	1,06	1,08	1,12	1,17
	1,03	1,04	1,06	1,08	1,11	1,15	1,2
	1,02	1,03	1,05	1,07	1,1	1,15	1,2
	1,02	1,03	1,04	1,06	1,09	1,12	1,16
	1,04	1,05	1,07	1,09	1,13	1,18	1,24
	1,03	1,04	1,06	1,08	1,12	1,16	1,22
	1,03	1,05	1,07	1,1	1,14	1,2	1,26
	1,04	1,06	1,08	1,12	1,17	1,24	1,3
	1,04	1,05	1,07	1,09	1,13	1,18	1,25
	1,04	1,06	1,09	1,13	1,2	1,27	1,33
T4	1,03	1,05	1,07	1,11	1,18	1,26	1,34
	1,03	1,05	1,08	1,11	1,16	1,23	1,3
	1,05	1,07	1,1	1,13	1,18	1,24	1,31
	1,03	1,05	1,08	1,13	1,19	1,27	1,37
	1,03	1,05	1,08	1,11	1,16	1,24	1,33
	1,04	1,06	1,08	1,11	1,17	1,25	1,35
	1,03	1,04	1,07	1,12	1,19	1,28	1,38
	1,03	1,05	1,07	1,1	1,14	1,2	1,29
	1,02	1,04	1,06	1,09	1,14	1,2	1,29
	1,02	1,04	1,06	1,1	1,15	1,22	1,29
	1,03	1,05	1,08	1,11	1,17	1,23	1,3
	1,03	1,05	1,08	1,11	1,16	1,23	1,3

¹T3= 40 t ha⁻¹, T4= 80 t ha⁻¹.

Apêndice D - Valores de densidade (D_s , $Mg\ m^{-3}$) referentes à curva de compressibilidade obtidos nas pressões de 25 ($D_s\ 25$), 50 ($D_s\ 50$), 100 ($D_s\ 100$), 200 ($D_s\ 200$), 400 ($D_s\ 400$), 800 ($D_s\ 800$) e 1600 ($D_s\ 1.600$) kPa de um Argissolo Vermelho Amarelo sob diferentes doses de cinza de casca de arroz, na camada de 0,00 a 0,10 m, Capão do Leão, RS (Continuação).

Tratamento ¹	$D_s\ 25$	$D_s\ 50$	$D_s\ 100$	$D_s\ 200$	$D_s\ 400$	$D_s\ 800$	$D_s\ 1.600$
T5	1,03	1,04	1,05	1,06	1,08	1,1	1,15
	1,02	1,03	1,06	1,09	1,14	1,21	1,31
	1,04	1,06	1,09	1,14	1,21	1,28	1,37
	1,03	1,04	1,06	1,09	1,14	1,21	1,3
	1,04	1,06	1,08	1,11	1,16	1,23	1,32
	1,03	1,04	1,06	1,09	1,14	1,21	1,3
	1,03	1,06	1,1	1,15	1,22	1,29	1,39
	1,03	1,06	1,1	1,15	1,22	1,29	1,39
	1,05	1,07	1,12	1,16	1,24	1,34	1,45
	1,02	1,04	1,06	1,09	1,13	1,19	1,28
	1,02	1,04	1,07	1,1	1,15	1,21	1,3
	1,04	1,06	1,09	1,12	1,16	1,23	1,3

¹T5= 120 t ha⁻¹.

Apêndice E - Pressão de preconsolidação (σ_p , kPa), índice de compressão (IC, Mg m^{-3}), densidade na pressão de preconsolidação ($D_s \sigma_p$, Mg m^{-3}), grau de compactação a 200 (GC 200, %), 1.600 (GC 1.600, %) e na pressão de preconsolidação (GC σ_p , %) de um Argissolo Vermelho Amarelo sob diferentes doses de cinza de casca de arroz, na camada de 0,00 a 0,10 m, Capão do Leão, RS.

Tratamentos	σ_p kPa	IC Mg m^{-3}	$D_s \sigma_p$ Mg m^{-3}	GC 200	GC 1.600 %	GC σ_p
T1	305	0,28	1,65	95,37	84,18	100
	268	0,28	1,75	98,79	86,24	93,14
	203	0,24	1,66	97,13	88,02	101,80
	341	0,27	1,63	99,40	89,3	102,45
	314	0,25	1,7	93,99	83,9	101,18
	341	0,28	1,75	88,33	80,71	90,86
	267	0,3	1,68	94,35	83,5	99,40
	267	0,33	1,75	92,86	82,44	96,57
	215	0,33	1,68	113,72	98,86	103,57
	305	0,29	1,74	95,78	81,96	91,38
	299	0,3	1,84	94,25	82,83	89,13
	273	0,33	1,83	100,61	85,49	90,16
T2	301	0,29	1,73	95,55	89,12	99,42
	280	0,21	1,56	86,67	79,59	100,00
	285	0,22	1,72	93,99	88,2	100,00
	237	0,22	1,67	85,48	79,1	95,21
	190	0,29	1,69	86,10	81,31	95,27
	243	0,23	1,62	85,64	77,11	95,67
	290	0,21	1,77	93,33	88,42	94,92
	325	0,28	1,81	92,39	84,16	93,92
	300	0,3	1,81	93,58	87,06	96,69
	223	0,24	1,64	88,33	81,12	96,95
	193	0,29	1,75	96,47	84,97	93,71
	247	0,28	1,65	88,88	79,6	96,97

¹T1= 0 t ha⁻¹, T2= 20 t ha⁻¹.

Apêndice E - Pressão de preconsolidação (σ_p , kPa), índice de compressão (IC, Mg m^{-3}), densidade na pressão de preconsolidação ($D_s \sigma_p$, Mg m^{-3}), grau de compactação a 200 (GC 200, %), 1.600 (GC 1.600, %) e na pressão de preconsolidação (GC σ_p , %) de um Argissolo Vermelho Amarelo sob diferentes doses de cinza de casca de arroz, na camada de 0,00 a 0,10 m, Capão do Leão, RS (Continuação).

Tratamentos	σ_p kPa	IC Mg m^{-3}	$D_s \sigma_p$ Mg m^{-3}	GC 200	GC 1.600 %	GC σ_p
T3	223	0,32	1,69	84,49	78,22	93,49
	246	0,33	1,62	85,95	75,37	94,44
	226	0,26	1,73	90,11	80,79	94,80
	263	0,25	1,66	82,98	75	93,98
	257	0,3	1,81	86,29	82,93	93,92
	290	0,24	1,77	89,89	84,92	95,48
	191	0,28	1,5	120,74	97,02	108,67
	296	0,3	1,8	112,75	96	93,33
	258	0,3	1,74	82,73	74,73	79,89
	235	0,31	1,56	78,31	79,14	94,87
	207	0,33	1,71	90,34	77,18	92,98
	190	0,31	1,6	76,59	69,56	90,00
T4	211	0,38	1,39	72,57	65,46	91,37
	270	0,39	1,65	94,97	87,79	91,52
	225	0,34	1,59	82,08	75,13	89,31
	289	0,39	1,3	69,23	63,24	90,00
	240	0,39	1,45	75,86	67,35	91,03
	211	0,45	1,46	80	72,93	90,41
	120	0,4	1,31	66,85	63,02	92,37
	234	0,37	1,48	74,72	68	91,89
	221	0,39	1,55	78,69	70,93	92,90
	109	0,37	1,56	86,83	78,38	92,95
	226	0,38	1,72	87,78	78,22	91,86
	207	0,35	1,74	94,64	84,57	91,38

¹T3= 40 t ha⁻¹, T4= 80 t ha⁻¹.

Apêndice E - Pressão de preconsolidação (σ_p , kPa), índice de compressão (IC, Mg m^{-3}), densidade na pressão de preconsolidação ($D_s \sigma_p$, Mg m^{-3}), grau de compactação a 200 (GC 200, %), 1.600 (GC 1.600, %) e na pressão de preconsolidação (GC σ_p , %) na camada de 0,00 a 0,10 m de um Argissolo Vermelho Amarelo sob diferentes doses de cinza de casca de arroz, na camada de 0,00 a 0,10 m, Capão do Leão, RS (Continuação).

Tratamentos	σ_p kPa	IC Mg m^{-3}	$D_s \sigma_p$	GC 200	GC 1.600 %	GC σ_p
T5	213	0,23	1,4	86,58	76,33	92,14
	241	0,37	1,4	76,58	66,12	86,43
	269	0,36	1,33	73,33	67,22	90,98
	229	0,39	1,33	91,3	76,83	94,74
	255	0,39	1,41	90,14	75,74	90,78
	225	0,4	1,38	76,25	71,34	88,41
	188	0,36	1,22	58,82	71,94	81,97
	233	0,33	1,13	65,45	58,38	95,58
	213	0,37	1,13	63,29	59,17	88,50
	102	0,38	1,44	91,72	77,78	92,36
	237	0,36	1,39	91,37	76,97	91,37
	137	0,36	1,55	88,61	76,5	90,32

¹T5= 120 t ha⁻¹.

Apêndice F - Agregados estáveis em água nas diferentes classes de diâmetro (mm) e diâmetro médio ponderado de agregados estáveis (DMP, mm) de um Argissolo Vermelho Amarelo sob diferentes doses de cinza de casca de arroz, na camada de 0,00 a 0,10 m, Capão do Leão, RS.

9,72-4,76	4,76-2,00	2,00-1,00	1,00-0,25	0,25-0,105	<0,105	DMP
Tratamentos ¹						
T1						
48,22	15,39	9,24	14,70	3,18	9,27	4,2
40,37	16,17	11,47	16,59	4,09	11,31	3,72
49,63	17,49	9,12	13,65	2,62	7,49	4,36
33,65	20,36	10,59	15,60	3,32	16,49	3,36
37,65	15,56	11,15	17,76	4,28	13,62	3,5
38,88	19,99	10,76	17,22	3,45	9,70	3,73
47,36	17,73	9,02	12,35	5,63	7,92	4,21
52,87	20,22	9,30	9,83	2,74	5,05	4,66
T2						
22,35	26,93	16,17	21,21	3,42	9,92	2,89
29,31	21,11	14,82	21,11	3,02	10,63	3,17
27,66	22,49	12,76	21,23	4,88	10,97	3,07
28,66	24,07	13,61	20,66	3,80	9,21	3,2
30,38	23,52	14,09	16,85	3,92	11,24	3,29
27,68	23,75	13,01	18,35	5,88	11,34	3,1
32,23	23,14	13,95	19,64	2,74	8,30	3,42
30,94	25,63	13,34	19,38	4,27	6,44	3,4
T3						
40,95	16,93	11,29	19,15	2,29	9,39	3,79
35,82	18,28	13,27	20,18	3,78	8,67	3,51
31,80	17,91	12,48	25,27	2,99	9,56	3,23
48,37	14,39	10,35	17,55	3,25	6,09	4,21
30,47	18,83	13,98	21,21	4,02	11,49	3,17
36,62	16,46	11,04	19,89	5,91	10,07	3,47
27,79	22,10	12,75	22,10	4,18	11,08	3,07
36,81	19,59	11,47	19,00	5,05	8,10	3,59

¹T1= 0 t ha⁻¹, T2= 20 t ha⁻¹, T3= 40 t ha⁻¹.

Apêndice F - Agregados estáveis em água nas diferentes classes de diâmetro (mm) e diâmetro médio ponderado de agregados estáveis (DMP, mm) de um Argissolo Vermelho Amarelo sob diferentes doses de cinza de casca de arroz, na camada de 0,00 a 0,10 m, Capão do Leão, RS (Continuação).

9,72-4,76	4,76-2,00	2,00-1,00	1,00-0,25	0,25-0,105	<0,105	DMP
Tratamentos ¹						
T4						
29,75	16,26	11,32	23,10	3,26	16,31	3
29,14	13,78	10,39	24,51	3,21	18,97	2,87
31,04	16,70	12,30	22,45	3,86	13,64	3,12
43,86	16,40	10,35	15,15	3,93	10,31	3,94
22,63	13,57	12,08	28,67	3,80	19,24	2,45
31,28	18,08	11,88	20,32	4,55	13,88	3,16
27,08	15,93	12,14	26,26	4,63	13,96	2,83
37,15	14,26	9,41	21,37	4,56	13,26	3,42
T5						
17,69	15,57	14,17	27,56	3,85	21,16	2,19
21,90	15,14	14,19	27,51	3,69	17,57	2,47
33,63	16,26	11,91	22,70	3,52	11,99	3,28
24,19	15,81	14,54	23,67	3,43	18,36	2,64
23,61	8,67	10,05	24,75	3,53	29,39	2,3
34,10	11,60	9,38	18,41	6,57	19,94	3,1
26,24	14,92	12,91	23,57	3,39	18,97	2,73
23,64	15,95	12,58	28,46	4,91	14,45	2,61

¹T4= 80 t ha⁻¹, T5= 120 t ha⁻¹.

Apêndice G - Resistência tênsil de agregados de um Argissolo Vermelho Amarelo sem adição de cinza de casca de arroz, na camada de 0,00 a 0,10 m, Capão do Leão, RS.

Tratamento ¹					
RT (kPa)					
20,94	67,26	56,83	86,94	69,13	36,40
70,09	104,77	42,95	28,60	118,09	51,30
38,55	125,14	35,24	46,73	48,58	67,89
111,82	145,98	67,16	78,62	86,45	61,82
49,10	126,80	59,50	53,48	45,43	65,37
50,21	37,95	42,37	48,35	101,08	41,74
23,19	83,60	78,73	68,62	28,41	127,9
57,07	55,99	58,45	60,27	40,25	95,03
48,28	186,74	121,41	77,37	86,06	50,02
42,41	188,70	52,57	79,97	24,18	56,62
45,96	42,66	93,84	50,75	32,50	41,42
51,17	64,96	57,88	38,00	53,41	116,1
45,27	51,09	96,75	97,32	142,08	67,49
41,54	93,61	126,75	111,97	49,90	67,49
93,97	94,50	35,03	54,06	60,08	45,10
49,75	135,17	214,26	56,53	46,60	96,43
112,66	97,11	89,25	43,35	78,32	55,79
29,19	120,39	76,45	33,11	56,35	74,32
35,59	89,45	78,21	66,44	43,58	39,77
102,53	162,99	95,35	98,89	63,29	73,70
77,58	126,14	81,20	65,25	99,16	16,11
70,89	159,11	27,56	120,72	54,48	110,9
96,87	71,84	92,22	92,27	33,60	19,40
81,53	77,83	38,17	35,19	39,73	53,14
72,14	34,28	65,57	58,13	34,04	26,46

¹T1= 0 t ha⁻¹.

Apêndice G - Resistência tênsil de agregados de um Argissolo Vermelho Amarelo sem adição de cinza de casca de arroz, na camada de 0,00 a 0,10 m, Capão do Leão, RS (Continuação).

Tratamento ¹					
RT (kPa)					
76,42	64,12	73,13	61,54	30,80	40,21
168,17	57,23	38,98	56,13	55,59	43,45
58,32	78,59	87,45	33,83	59,63	7,78
108,91	70,08	56,19	32,56	58,03	53,60
66,13	68,72	30,43	34,89	56,41	42,87
65,94	47,80	40,63	54,55	70,87	17,49
63,79	49,47	34,02	29,43	55,33	54,10
59,34	63,28	43,72	26,47	64,66	49,02
87,84	34,22	53,28	42,93	115,28	56,36
26,18	46,05	55,70	79,15	61,89	26,26
52,13	44,05	37,80	86,23	71,06	74,86
41,12	83,81	55,15	86,23	55,43	126,76
30,66	58,25	29,15	41,40	59,11	69,07
43,70	73,62	70,39	48,89	24,37	86,96
50,94	54,29	35,69	45,77	31,95	14,35
46,11	91,06	89,24	32,05	85,25	58,25
41,27	49,82	100,15	76,94	19,13	80,90
51,63	73,17	37,77	52,04	33,62	49,71
100,46	44,32	70,13	65,92	30,53	84,68
26,75	59,02	38,14	41,18	50,83	60,57
21,71	86,08	55,24	82,94	68,71	53,13
104,61	67,73	63,60	42,94	62,87	52,55
73,09	54,10	58,92	16,03	59,24	82,38
23,11	138,82	51,39	70,12	49,93	40,84
111,04	52,15	67,47	29,50	50,29	37,59

¹T1= 0 t ha⁻¹.

Apêndice G - Resistência tênsil de agregados de um Argissolo Vermelho Amarelo sem adição de cinza de casca de arroz na camada de 0,00 a 0,10 m, Capão do Leão, RS (Continuação).

Tratamento ¹			
RT (kPa)			
60,80	47,55	63,10	58,02
56,49	39,45	52,07	55,08
38,16	53,03	45,77	54,71
47,14	106,67	61,20	49,79
45,71	39,90	5,18	39,51
53,61	42,70	41,13	46,43
40,48	41,23	140,78	34,57
40,64	74,11	62,57	109,56
56,00	27,07	46,48	78,34
38,05	47,47	36,54	131,23
50,53	71,62	25,12	140,45
45,10	34,22	43,15	54,17
38,71	47,71	76,99	32,69
50,25	56,54	77,84	41,35
51,39	40,87	52,12	42,64
22,19	89,98	77,11	99,14
39,88	130,12	42,21	55,46
31,61	60,19	68,24	51,47
30,16	17,64	139,26	56,79
65,39	85,60	52,50	79,04
48,47	55,95	42,62	79,93
50,73	59,33	43,16	68,19
58,88	38,01	71,42	98,85
87,35	28,31	75,17	127,44
58,90	43,02	67,45	64,74

¹T1= 0 t ha⁻¹.

Apêndice H - Resistência tênsil de agregados de um Argissolo Vermelho Amarelo com 20 t ha⁻¹ de cinza de casca de arroz, na camada de 0,00 a 0,10 m, Capão do Leão, RS.

Tratamento ¹					
RT (kPa)					
59,82	54,11	99,60	53,19	52,18	69,16
101,05	48,81	113,95	14,30	24,78	52,68
103,02	126,98	85,82	46,24	39,04	79,97
75,11	63,40	126,47	41,81	24,56	28,39
79,50	69,78	32,42	94,75	29,20	19,01
76,67	127,08	83,21	223,44	49,68	12,76
54,27	90,14	134,96	15,37	56,39	10,95
53,83	87,56	97,19	25,02	67,14	29,86
45,63	56,52	94,27	60,39	75,13	90,42
121,53	89,93	75,23	70,40	45,31	87,54
162,56	20,91	162,16	78,78	81,79	43,88
137,44	56,33	90,73	70,85	54,57	52,39
86,82	62,68	30,05	69,51	35,86	22,76
79,37	42,90	64,78	72,08	53,21	28,03
71,52	34,49	56,23	75,85	48,47	22,55
75,45	60,21	45,60	128,47	77,57	18,89
56,56	32,43	64,43	155,16	47,85	40,17
45,99	48,63	38,62	53,01	41,98	94,42
81,34	90,01	75,93	141,79	22,41	27,65
100,78	123,08	52,38	105,80	36,15	63,86
64,11	89,79	62,93	140,82	55,66	49,34
43,11	171,91	95,76	89,91	48,32	24,63
93,54	77,17	66,41	65,86	8,81	55,41
113,73	69,94	40,39	82,14	37,38	48,55
48,06	70,46	28,28	34,17	91,54	25,44

¹T2= 20 t ha⁻¹.

Apêndice H - Resistência tênsil de agregados de um Argissolo Vermelho Amarelo com 20 t ha⁻¹ de cinza de casca de arroz, na camada de 0,00 a 0,10 m, Capão do Leão, RS (Continuação).

Tratamento ¹				
RT (kPa)				
57,62	27,03	14,18	48,33	72,82
25,62	65,37	25,23	23,52	33,50
43,20	47,15	97,33	173,80	67,48
21,16	31,93	42,10	104,42	105,95
60,31	16,26	80,87	71,14	82,07
53,96	50,48	52,24	75,72	42,35
73,66	34,49	66,05	36,31	33,76
59,56	50,45	52,50	68,51	20,93
46,65	47,74	46,16	37,49	48,72
131,92	58,16	21,01	53,50	24,82
18,75	137,36	32,82	67,69	69,74
42,60	20,51	94,80	118,97	39,26
113,50	29,07	32,58	28,76	63,06
40,57	12,67	41,65	44,85	91,61
30,01	56,08	62,59	53,33	64,67
39,61	74,04	48,41	105,62	40,13
59,15	79,27	24,79	44,87	56,33
44,11	31,48	19,03	85,73	70,28
73,59	78,69	41,44	132,98	28,23
104,18	69,75	30,23	65,76	41,76
27,72	51,13	71,42	38,95	63,59
73,50	175,11	50,67	126,49	51,91
69,48	31,61	71,40	48,57	73,47
42,59	29,32	67,65	111,73	114,81
64,51	17,46	27,92	47,19	72,32

¹T2= 20 t ha⁻¹.

Apêndice H - Resistência tênsil de agregados de um Argissolo Vermelho Amarelo com 20 t ha⁻¹ de cinza de casca de arroz, na camada de 0,00 a 0,10 m, Capão do Leão, RS (Continuação).

Tratamento ¹				
RT (kPa)				
48,24	30,16	135,70	82,61	34,54
50,05	58,58	54,99	3,04	48,19
53,25	121,86	51,65	39,46	35,48
45,26	62,37	94,32	58,73	31,14
65,76	81,58	37,43	56,72	45,73
72,04	81,64	42,81	49,00	37,15
102,64	48,54	29,82	20,40	36,83
79,62	70,04	72,01	41,88	35,88
65,60	68,77	86,47	127,22	60,71
42,39	54,53	43,37	130,99	24,68
87,83	121,00	105,37	69,75	52,28
51,80	53,54	41,22	65,66	41,13
36,62	67,57	72,57	33,59	31,69
100,22	15,77	38,46	51,02	60,31
45,51	9,92	45,44	44,15	82,50
44,06	17,44	42,74	70,21	57,19
119,72	29,70	78,75	31,12	43,95
42,31	39,37	26,27	80,39	31,74
70,09	52,40	55,95	78,13	52,92
59,10	56,06	55,95	54,99	60,82
61,86	95,62	63,35	52,72	52,55
37,50	80,66	80,72	79,98	53,32
50,56	45,40	36,75	35,18	4,86
66,25	86,98	72,33	57,93	68,07
77,75	18,05	49,40	50,43	47,16

¹T2= 20 t ha⁻¹.

Apêndice I - Resistência tênsil de agregados de um Argissolo Vermelho Amarelo com 40 t ha⁻¹ de cinza de casca de arroz, na camada de 0,00 a 0,10 m, Capão do Leão, RS.

Tratamento ¹					
RT (kPa)					
74,47	79,20	44,11	47,14	30,00	65,74
44,54	84,41	39,04	28,44	23,40	81,87
140,57	6,03	53,26	44,23	52,33	30,42
91,49	94,92	96,94	41,39	57,44	123,55
78,42	86,48	61,84	20,15	61,76	94,61
60,20	117,62	88,53	27,81	26,12	40,59
62,29	78,13	40,52	54,94	64,50	45,46
56,65	7,58	29,61	71,22	75,33	39,92
76,48	68,20	64,68	29,31	27,63	54,62
96,38	132,32	69,57	57,30	118,64	28,33
110,53	49,05	138,28	60,59	33,22	96,01
102,92	9,56	66,69	46,69	47,49	26,35
71,93	26,12	42,80	107,19	28,32	45,25
123,53	14,72	62,87	31,65	60,86	46,35
38,42	39,31	29,35	57,75	103,26	36,95
49,97	58,49	40,95	160,72	49,81	68,24
61,65	29,20	40,48	182,57	72,75	58,87
106,47	18,37	56,29	43,07	12,98	71,24
46,52	59,14	45,79	65,18	43,44	49,97
104,17	24,17	61,73	45,35	44,48	157,66
91,76	35,62	74,90	33,99	39,18	58,30
36,17	64,78	54,95	47,89	53,72	81,92
19,94	46,68	74,27	55,03	26,18	59,02
174,99	72,59	85,26	131,82	73,46	95,75
51,12	53,90	21,39	67,01	72,20	55,39

¹T3= 40 t ha⁻¹.

Apêndice I - Resistência tênsil de agregados de um Argissolo Vermelho Amarelo com 40 t ha⁻¹ de cinza de casca de arroz, na camada de 0,00 a 0,10 m, Capão do Leão, RS (Continuação).

Tratamento ¹				
RT (kPa)				
55,10	65,59	48,76	13,88	70,02
94,97	75,31	63,15	116,67	90,79
133,86	65,75	27,06	36,36	38,95
98,88	110,33	51,64	26,70	100,20
95,13	98,58	63,71	27,80	61,85
56,66	56,94	57,97	111,51	41,83
27,83	109,75	37,54	66,19	63,36
48,00	24,20	48,64	88,42	59,20
52,14	32,16	61,75	54,88	47,41
108,87	66,63	42,50	99,17	46,48
54,06	45,34	56,14	65,99	49,51
56,22	84,07	108,78	104,11	21,82
27,52	95,63	160,40	92,97	18,40
49,21	60,59	100,58	78,05	65,06
63,87	49,28	37,80	79,34	39,47
86,52	66,42	67,83	43,22	62,38
31,64	64,82	71,24	63,00	114,19
54,62	74,42	67,16	75,42	38,57
40,05	12,85	303,02	47,13	36,40
87,38	44,40	42,80	66,27	112,79
48,84	14,98	64,52	53,63	40,18
44,41	50,91	49,78	55,61	46,08
45,06	11,74	58,49	172,27	53,53
112,00	77,25	70,12	33,85	80,63
22,83	15,06	40,74	60,08	59,44

¹T3= 40 t ha⁻¹.

Apêndice I - Resistência tênsil de agregados de um Argissolo Vermelho Amarelo com 40 t ha⁻¹ de cinza de casca de arroz, na camada de 0,00 a 0,10 m, Capão do Leão, RS (Continuação).

Tratamento ¹				
RT (kPa)				
75,57	47,12	20,16	32,95	43,80
113,59	43,52	81,37	27,86	34,89
35,90	44,55	47,02	64,86	18,47
45,47	33,22	45,38	5,99	30,27
44,26	82,98	41,43	59,92	28,83
56,18	47,25	60,64	19,94	28,61
28,79	103,31	79,39	94,06	30,98
61,56	49,77	80,97	50,88	44,96
55,21	128,17	27,63	32,53	13,97
88,08	66,57	29,37	61,46	37,23
86,86	85,14	71,54	58,03	36,27
179,16	54,71	79,93	58,84	19,04
92,76	78,48	92,72	43,81	71,93
43,55	67,02	47,55	44,16	109,27
23,32	51,25	38,24	56,74	50,02
51,36	29,14	40,12	19,01	39,49
55,18	39,16	63,53	54,50	35,43
16,53	36,91	41,34	60,00	34,51
110,27	53,21	86,72	120,92	33,10
70,89	66,06	33,68	41,76	45,86
48,15	67,38	68,09	35,55	71,65
18,57	42,01	32,07	37,14	25,99
222,66	58,34	38,13	62,92	23,02
104,45	42,81	43,63	38,67	10,74
57,34	44,50	14,14	40,55	26,49

¹T3= 40 t ha⁻¹.

Apêndice J - Resistência tênsil de agregados de um Argissolo Vermelho Amarelo com 80 t ha⁻¹ de cinza de casca de arroz, na camada de 0,00 a 0,10 m, Capão do Leão, RS.

Tratamento ¹					
RT (kPa)					
23,14	20,41	23,82	20,68	61,02	31,61
58,51	47,42	54,76	84,14	57,03	24,04
36,46	51,29	53,37	40,78	110,35	158,44
32,88	57,93	57,97	56,09	35,64	15,03
63,83	49,64	51,50	14,79	21,88	91,23
8,04	40,68	46,08	115,90	27,54	49,62
33,87	12,63	32,23	90,82	38,70	72,53
66,99	44,55	41,16	56,92	26,53	78,69
33,05	13,28	21,57	178,77	39,50	33,89
84,41	17,11	87,52	39,43	23,07	132,46
41,14	70,45	64,47	94,63	96,39	43,53
43,88	39,63	54,00	37,49	82,56	60,50
112,39	38,01	0,00	39,01	39,08	17,19
56,24	36,25	51,38	75,61	56,85	50,36
33,81	48,63	37,61	38,91	27,35	61,22
41,46	49,23	8,98	58,62	55,41	50,22
26,99	35,71	10,38	36,10	45,15	86,18
69,17	65,73	55,51	74,11	55,46	106,01
46,98	39,24	91,76	63,33	99,78	76,87
51,98	86,07	42,17	44,69	65,93	130,14
42,54	56,73	105,69	24,22	26,23	70,80
48,59	87,89	42,28	49,92	75,30	56,75
44,05	66,97	46,14	47,83	41,84	65,28
87,53	89,83	143,68	27,43	78,05	53,89
68,19	62,43	93,80	68,24	23,64	141,78

¹T4= 80 t ha⁻¹.

Apêndice J - Resistência tênsil de agregados de um Argissolo Vermelho Amarelo com 80 t ha⁻¹ de cinza de casca de arroz, na camada de 0,00 a 0,10 m, Capão do Leão, RS (Continuação).

Tratamento ¹				
RT (kPa)				
25,24	52,60	60,51	121,67	35,37
50,35	41,17	52,39	30,97	75,47
51,11	23,72	102,93	76,11	81,84
74,18	24,44	35,04	49,84	31,93
22,61	21,71	61,72	70,82	47,14
30,10	37,59	63,15	44,38	46,32
15,62	64,33	43,18	12,98	44,06
91,68	93,66	47,50	19,84	36,45
71,46	21,82	64,27	39,47	53,77
64,44	84,55	85,76	134,06	29,65
76,59	32,01	77,09	68,45	26,10
49,31	70,75	46,02	166,48	65,88
46,28	70,75	55,80	122,26	49,96
3,29	32,16	114,13	93,85	65,06
40,79	29,37	70,42	33,22	109,68
33,60	59,53	42,54	46,18	76,00
65,70	14,48	43,27	72,26	47,10
38,00	29,20	31,88	23,69	46,73
18,62	65,79	94,37	47,23	44,32
23,57	62,56	80,30	35,72	33,92
49,42	62,56	45,87	45,32	56,21
50,15	22,32	13,99	33,63	21,53
30,88	25,96	35,03	42,34	52,47
22,69	58,15	83,33	56,85	99,00
58,01	25,91	112,64	44,55	87,68

¹T4= 80 t ha⁻¹.

Apêndice J - Resistência tênsil de agregados de um Argissolo Vermelho Amarelo com 80 t ha⁻¹ de cinza de casca de arroz, na camada de 0,00 a 0,10 m, Capão do Leão, RS (Continuação).

Tratamento ¹				
RT (kPa)				
42,47	37,85	73,24	90,66	50,73
36,40	55,10	47,27	52,79	65,86
54,59	39,03	44,54	83,52	67,30
69,78	54,48	70,84	83,52	35,03
64,42	57,14	51,95	105,09	78,50
48,00	58,13	92,85	136,18	91,91
62,82	85,06	53,48	5,48	49,50
84,79	63,37	47,48	138,51	106,32
93,10	96,08	46,91	46,18	77,27
83,15	52,39	71,27	66,47	106,03
73,85	107,80	65,69	60,91	126,92
86,90	35,15	56,13	70,76	77,98
75,89	62,61	114,65	53,17	96,68
105,21	31,82	28,66	126,55	50,35
46,65	112,70	36,23	133,14	82,11
153,58	181,41	36,23	100,00	63,04
71,89	58,82	88,75	37,96	111,46
117,71	41,26	42,10	57,10	76,84
59,15	65,46	33,40	36,44	22,20
69,50	41,93	105,86	36,44	58,08
47,96	57,89	23,05	94,79	58,08
59,19	73,65	41,35	20,37	55,26
58,76	27,03	86,74	40,99	56,63
70,60	39,38	74,66	100,35	172,31
20,49	83,38	74,47	99,15	172,31

¹T4= 80 t ha⁻¹.

Apêndice K - Resistência tênsil de agregados de um Argissolo Vermelho Amarelo com 120 t ha⁻¹ de cinza de casca de arroz, na camada de 0,00 a 0,10 m, Capão do Leão, RS.

Tratamento ¹					
RT (kPa)					
53,05	75,20	88,67	35,03	50,16	72,60
58,14	39,72	79,86	54,94	24,54	27,37
100,73	139,55	75,03	65,52	53,44	22,68
68,34	52,59	135,68	52,91	87,19	93,41
53,90	34,50	132,94	151,52	109,09	55,80
107,57	32,11	27,43	226,75	67,51	132,97
65,57	65,20	61,12	45,08	28,55	45,72
68,70	79,53	77,61	73,01	37,93	26,84
26,97	68,85	45,66	61,34	39,35	47,13
32,34	42,59	69,50	46,39	58,92	79,96
63,02	24,88	95,39	70,28	49,86	27,18
57,89	35,43	27,43	35,56	26,68	107,82
134,52	36,02	27,43	52,05	36,33	34,78
70,97	62,99	63,28	72,18	68,98	48,97
32,35	48,22	34,92	46,57	72,55	82,96
22,16	103,45	19,11	35,03	162,86	48,49
35,31	91,39	51,94	39,80	158,31	30,83
45,88	53,39	122,59	87,08	90,24	76,55
145,37	51,38	73,65	12,02	142,11	22,68
71,25	56,73	96,24	33,86	22,68	46,27
36,34	53,30	166,39	41,71	43,37	136,74
23,35	65,52	47,32	108,45	77,50	22,68
56,33	83,94	96,60	61,91	34,05	27,18
25,05	51,64	41,29	70,89	43,00	58,43
54,74	115,15	55,90	122,44	124,33	78,10

¹T5= 120 t ha⁻¹.

Apêndice K - Resistência tênsil de agregados de um Argissolo Vermelho Amarelo com 120 t ha⁻¹ de cinza de casca de arroz na camada de 0,00 a 0,10 m, Capão do Leão, RS (Continuação).

Tratamento ¹				
RT (kPa)				
63,18	60,50	67,95	37,36	91,82
85,08	49,37	82,73	84,00	54,09
31,44	26,42	39,54	33,19	29,53
90,44	41,62	27,14	69,32	62,63
79,27	52,77	35,86	61,39	31,30
118,92	42,00	13,34	30,62	35,50
80,59	50,15	88,88	57,14	166,66
60,06	41,60	75,24	14,85	183,31
73,82	59,32	27,14	39,62	28,60
87,59	85,55	43,56	42,17	51,14
77,51	52,40	20,18	13,34	51,89
92,56	60,71	55,03	39,70	43,81
38,04	103,88	33,97	56,73	37,03
39,33	62,97	13,34	13,34	21,20
118,27	26,42	48,88	48,85	17,48
78,45	107,56	77,43	11,49	11,93
55,27	54,22	34,94	16,72	37,29
66,62	55,28	27,72	22,77	21,39
91,23	79,85	69,98	13,34	12,92
111,98	71,40	28,48	35,83	17,55
95,48	61,78	136,50	35,83	17,68
89,16	44,40	87,20	19,79	2,56
55,96	26,42	44,94	4,90	31,13
45,46	26,42	5,62	31,10	35,14
42,88	103,88	52,67	16,50	47,53

¹T5= 120 t ha⁻¹.

Apêndice K - Resistência tênsil de agregados de um Argissolo Vermelho Amarelo com 120 t ha⁻¹ de cinza de casca de arroz, na camada de 0,00 a 0,10 m, Capão do Leão, RS (Continuação).

Tratamento ¹				
RT (kPa)				
18,83	62,08	59,64	96,24	79,49
117,35	23,50	74,43	38,73	52,62
25,54	30,47	64,17	103,26	40,53
66,12	53,13	81,70	91,39	38,73
53,95	81,32	36,29	80,92	59,89
8,61	64,73	33,80	105,47	99,82
10,41	22,03	47,22	74,44	54,56
19,41	43,33	57,61	120,47	59,42
10,89	14,14	79,64	32,26	67,04
93,50	72,12	25,39	156,02	52,38
3,46	75,65	69,92	56,17	39,41
27,08	76,83	81,46	40,52	98,10
28,46	58,65	69,52	69,14	96,35
24,50	44,33	77,34	78,44	48,43
2,04	42,65	42,31	46,51	64,48
10,61	23,29	50,45	40,80	80,18
30,57	57,46	67,76	87,18	62,43
5,10	51,99	52,30	94,50	82,20
1,74	82,94	30,84	52,32	82,26
15,05	36,86	58,56	38,73	5,11
20,37	84,43	30,15	60,42	121,58
6,08	34,56	66,95	71,71	80,38
40,18	40,17	104,24	5,11	5,11
10,46	60,89	82,70	50,92	49,33
10,68	56,60	22,15	48,35	62,65

¹T5= 120 t ha⁻¹.

Apêndice L - Friabilidade (F) de um Argissolo Vermelho Amarelo sob diferentes doses de cinza de casca de arroz, na camada de 0,00 a 0,10 m, Capão do Leão, RS.

Tratamento ¹	F
T1	0,56
	0,51
	0,51
	0,48
	0,41
	0,46
	0,43
	0,51
T2	0,45
	0,57
	0,53
	0,65
	0,60
	0,41
	0,51
	0,50
T3	0,60
	0,60
	0,58
	0,51
	0,70
	0,65
	0,45
	0,57
T4	0,48
	0,65
	0,60
	0,54
	0,58
	0,46
	0,50
	0,52
T5	0,53
	0,64
	0,65
	0,42
	0,70
	1,14
	0,41
	0,49

¹T1= 0 t ha⁻¹, T2= 20 t ha⁻¹, T3= 40 t ha⁻¹, T4= 80 t ha⁻¹, T5= 120 t ha⁻¹.

Apêndice M - Teores de carbono orgânico total (COT, g kg⁻¹) de um Argissolo Vermelho Amarelo sob diferentes doses de cinza de casca de arroz, na camada de 0,00 a 0,10 m, Capão do Leão, RS.

COT (g kg ⁻¹)	
Tratamentos ¹	0,00 a 0,10 m
T1	1,29
	1,23
	1,29
	1,24
	1,32
	1,19
	1,54
	1,47
T2	1,30
	1,25
	1,29
	1,38
	1,35
	1,33
	1,47
	1,51
T3	1,25
	1,38
	1,3
	1,22
	1,46
	1,37
	1,63
	1,82
T4	1,48
	1,48
	1,55
	1,46
	1,52
	1,43
	2,04
	2,09
T5	2,16
	1,84
	1,61
	1,56
	2,08
	2,11
	1,62
	1,59

¹T1= 0 t ha⁻¹, T2= 20 t ha⁻¹, T3= 40 t ha⁻¹, T4= 80 t ha⁻¹, T5= 120 t ha⁻¹.