

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
FACULDADE DE AGRONOMIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM FITOTECNIA

PROPOSTA DE CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DE SUBSTRATOS ATRAVÉS DA
CENTRIFUGAÇÃO E A INFLUÊNCIA DA PREPARAÇÃO INICIAL DAS
AMOSTRAS

Eduarda Demari Avrella
Engenheira Florestal/UDESC
Mestre em Fitotecnia/UFRGS

Tese apresentada como um dos requisitos à obtenção do Grau de Doutor em Fitotecnia
Área de concentração: Sistemas de produção vegetal

Porto Alegre (RS), Brasil
Janeiro de 2020

CIP - Catalogação na Publicação

Avrella, Eduarda Demari
Proposta de caracterização física de substratos
através da centrifugação e a influência da preparação
inicial das amostras / Eduarda Demari Avrella. --
2020.
125 f.
Orientador: Claudimar Sidnei Fior.

Tese (Doutorado) -- Universidade Federal do Rio
Grande do Sul, Faculdade de Agronomia, Programa de
Pós-Graduação em Fitotecnia, Porto Alegre, BR-RS,
2020.

1. Sistemas de produção vegetal. 2. Produção de
mudas. 3. Substrato para plantas. 4. Análise de
substratos. 5. Caracterização física de substratos. I.
Fior, Claudimar Sidnei, orient. II. Título.

EDUARDA DEMARI AVRELLA
Engenheira Florestal - UDESC
Mestre em Fitotecnia - UFRGS

TESE

Submetida como parte dos requisitos
para obtenção do Grau de

DOCTORA EM FITOTECNIA

Programa de Pós-Graduação em Fitotecnia
Faculdade de Agronomia
Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Porto Alegre (RS), Brasil

Aprovado em: 30.01.2020
Pela Banca Examinadora

Homologado em: 18.02.2020
Por

CLAUDIMAR SIDNEI FIOR
Orientador - PPG Fitotecnia
UFRGS

CHRISTIAN BREDEMEIER
Coordenador do Programa de
Pós-Graduação em Fitotecnia

PAULO VITOR DUTRA DE SOUZA
PPG Fitotecnia/UFRGS

ATELENE NORMANN KÄMPF
Faculdade de Agronomia/UFRGS

THAIS QUEIROZ ZORZETO CESAR
FEAGRI/UNICAMP

CARLOS ALBERTO BISSANI
Diretor da Faculdade de
Agronomia

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Nei e Rosane, e ao meu irmão, João Paulo, por serem os meus maiores incentivadores e por acreditarem no meu potencial. Vocês sempre foram a base de tudo e os meus exemplos a serem seguidos. Agradeço pela educação, amor, carinho, apoio, paciência, força e inspiração. Vocês são os responsáveis por eu ter chegado até aqui. Sem vocês nada disso seria possível.

Ao meu companheiro, Giordano Bruno Fornari, o meu agradecimento mais especial. Pelo incentivo constante à minha realização profissional e por entender a minha ausência em muitos momentos. Você acompanhou minha formação acadêmica desde o início da graduação, sempre esteve presente me ajudando e incentivando a dar o meu melhor. Que esses 15 anos de união sejam apenas o início de um caminho regado de muita felicidade, companheirismo, saúde e amor. Desejo que a vida seja cada vez mais generosa conosco e que me permita desfrutar da tua amizade, companhia, amor e carinho até o final de nossas vidas.

Ao professor Claudimar Sidnei Fior, pela amizade, orientação, dedicação, ensinamentos e incentivo. Por me permitir compartilhar do seu conhecimento e por não medir esforços para ajudar todos que batem na sua porta. Agradeço por ter estado presente nos momentos de conquistas e de derrotas durante meu mestrado e doutorado, e, principalmente, por ter depositado em mim sua confiança e acreditar no meu trabalho. Você, com certeza, é um exemplo de profissional e pessoa a ser seguido. Meus mais sinceros agradecimentos.

À professora Atelene Normann Kämpf, pela atenção e apoio concedido, e por estar sempre disponível para ajudar.

À professora Lilia Beatriz Vence, a quem devo muito pela elaboração desta tese. Sou grata pela atenção, ajuda, ensinamentos e por ter me recebido tão bem em seu laboratório.

A todo o pessoal da “Flori”, Aquélis Armiliato Emer, Bibiana Antonello Marodin, Monique Caumo, Kássia Cauana Trapp, Marília Tedesco, Mara Cintía Winhelmann, Luciano da Silva Alves, Juliana Hörlle, Larissa Campos de Sá, Gian Carlos Gonçalves, Bruna Pletsch e professora Marília Lazarotto. E, em especial, à minha irmã de coração, Luciana Pinto Paim, por ser minha parceira de pesquisa e por estar ao meu lado em todas as “loucuras” desse doutorado. Vocês são a minha segunda família e foram fundamentais

nessa caminhada. Tive muita sorte por cruzarem meu caminho e por me acompanharem em todos os momentos felizes e tristes da pós-graduação. Serei eternamente grata pela amizade de todos.

À Renata Diane Menegatti, pelas trocas de ideias, incentivo, apoio e por ser meu ombro amigo sempre que precisei.

À Universidade Federal do Rio Grande do Sul e à Faculdade de Agronomia pelas oportunidades.

Ao Laboratório de Substratos da Faculdade de Agronomia da UFRGS pela disponibilidade de realização de muitos estudos, e ao Idenir José de Conto que fez tanto por mim e pelas minhas análises.

Ao Departamento de Plantas de Lavoura da UFRGS. Em especial à professora Carla Andrea Delatorre e à toda equipe do Laboratório de Biotecnologia por disponibilizarem a centrífuga para realização das análises, sem a qual não seria possível a concretização deste trabalho.

A todos os professores e funcionários do PPG Fitotecnia e do Departamento de Horticultura e Silvicultura, e a CAPES e CNPq pelo apoio financeiro.

E a todos que, de uma forma ou outra, contribuíram para a realização desse trabalho.

O meu mais sincero muito obrigada!

PROPOSTA DE CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DE SUBSTRATOS ATRAVÉS DA CENTRIFUGAÇÃO E A INFLUÊNCIA DA PREPARAÇÃO INICIAL DAS AMOSTRAS¹

Autor: Eduarda Demari Avrella

Orientador: Prof. Claudimar Sidnei Fior

RESUMO

A caracterização das propriedades dos substratos dá suporte para a escolha correta dos componentes e direciona decisões de práticas de manejo no cultivo em recipientes. Há vários sistemas de análise empregados, porém, os procedimentos rotineiros para a determinação da curva de retenção de água são morosos e imprecisos, levando, em média, quinze dias para a obtenção de um laudo. Aliado a esta limitação, o preparo inicial das amostras e a forma como elas são acondicionadas antes e durante as análises também carece de padronização. Portanto, objetivou-se propor um método para a caracterização física de substratos que seja reprodutível, menos moroso e de fácil execução, além de mostrar a influência da manipulação dos materiais quanto à umidade inicial, compactação e tamanho amostral no preparo inicial das amostras. Utilizaram-se turfa de *Sphagnum*, pó-de-coco, casca de arroz carbonizada, vermiculita expandida e argila expandida como substratos. A capacidade de retenção de água foi obtida nas tensões 0, 10, 50 e 100 hPa, a partir do método que utiliza funis de Büchner, do método baseado na norma europeia (CEN-EN13041) e pelo método aqui proposto como alternativo, que consiste na centrifugação de amostras. Na centrifugação as tensões foram simuladas aliando-se a velocidade angular, a altura da amostra e o raio medido do ponto mais externo da amostra ao ponto central da centrífuga. Aplicaram-se três rotações (230; 520 e 730 rpm), correspondentes às tensões 10; 50 e 100 hPa, testando-se, para cada tensão, tempos de centrifugação. Após, procedeu-se a comparação do conteúdo hídrico volumétrico entre os métodos. Quanto ao preparo inicial das amostras, os estudos consistiram em ensaios com densidades de empacotamento (solto, intermediário e compactado), tamanhos de amostra (cilindros de 53,16 e 381,05 cm³) e determinação da densidade dos materiais na “umidade atual” e, após, padronização dessa umidade em centrifugação a uma velocidade angular equivalente a uma tensão de 50 hPa, durante 60 minutos. Os resultados mostraram que há correlação positiva ($p < 0,001$) entre a centrifugação e os métodos considerados como padrão, sendo que os tempos de centrifugação necessários para estabilização da umidade variam conforme o material analisado e a tensão aplicada. Contudo, reduziu-se pela metade o tempo necessário para obtenção de um laudo. Além disso, a centrifugação em velocidade angular correspondente a 50 hPa mostrou-se viável para padronização da umidade inicial das amostras. Ainda, a compactação e o tamanho das amostras alteraram os valores de porosidade total, espaço de aeração e disponibilidade e capacidade de retenção de água dos componentes analisados. A centrifugação das amostras mostra-se como um método promissor, pois além de garantir que a força de tensão realmente atue sobre toda a amostra na determinação da curva de retenção de água de substratos, ainda reduz o tempo de análise, otimizando os recursos nos procedimentos rotineiros em laboratório.

¹Tese de Doutorado em Fitotecnia, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brasil. (125f.) Janeiro, 2020.

PROPOSAL FOR THE PHYSICAL CHARACTERIZATION OF SUBSTRATES THROUGH CENTRIFUGATION AND THE INFLUENCE OF INITIAL OF PREPARATION SAMPLES²

Author: Eduarda Demari Avrella

Adviser: Claudimar Sidnei Fior

ABSTRACT

The characterization of substrate properties supports the correct choice of components and directs management decisions in container cultivation. There are several systems of analysis, however, the routine procedures for determining the water retention curve are time consuming and inaccurate, taking an average of fifteen days to obtain a report. Allied to this limitation, the initial preparation of samples and the way they are packaged before and during analysis also needs standardization. Therefore, this study aimed to propose a method for physical characterization of substrates that can be reproducible, less time-consuming and easy to perform, as well as showing the influence of material handling on initial humidity, compaction and sample size in initial sample preparation. *Sphagnum* peat, coconut powder, carbonized rice husk, expanded vermiculite and expanded clay were used as substrates. Water retention capacity was obtained at tensions 0, 10, 50 and 100 hPa, from the method that uses Büchner funnels, the method based on the European standard (CEN-EN13041) and by the method proposed here as an alternative, which consists in centrifuging samples. In centrifugation, the tensions were simulated by combining the angular velocity, the sample height and the radius measured from the outermost point of the sample to the central point of the centrifuge. Three rotations were applied (230; 520 and 730 rpm) corresponding to the tensions 10; 50 and 100 hPa, testing for each tension the centrifugation times. Afterwards, the volumetric water content was compared between the methods. Regarding the initial preparation of the samples, the studies consisted of tests with packing densities (loose, intermediate and compressed), sample size (53.16 and 381.05 cm³ cylinders) and determination of density of the materials at “current humidity” and after standardization of this humidity in centrifugation at an angular velocity equivalent to a tension of 50 hPa for 60 minutes. Results showed a positive correlation ($p < 0.001$) between centrifugation and standard methods, considering that the centrifugation times required for moisture stabilization vary according to the material analyzed and the applied tension. However, the time required to obtain a report was halved. Besides that, centrifugation at an angular velocity of 50 hPa was feasible for standardization of the initial moisture of the samples. Also, the compaction and the sample size changed the values of the total porosity, air space, availability and water retention capacity of the analyzed components. The sample centrifugation shows itself as a promising method, as well as ensuring that the tensile force actually acts on the entire sample in determining the substrate water retention curve, still reduces analysis time, optimizing resources for routine laboratory procedures.

²Doctoral Thesis in Plant Science, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brasil. (125p.) January, 2020.

SUMÁRIO

	Página
1 INTRODUÇÃO	1
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1 Substrato para plantas	4
2.2 Preparação de amostras para caracterização física de substratos.....	5
2.3 Métodos de análise mais usados para caracterização física de substratos	10
3 MATERIAL E MÉTODOS	14
3.1 Métodos de análise.....	23
3.1.1 Método baseado na norma CEN-EN13041	24
3.1.2 Método dos funis de Büchner.....	27
3.1.3 Método alternativo: centrifugação de amostras.....	31
3.1.3.1 Estudo do tempo de centrifugação	35
3.1.3.2 Determinação dos parâmetros da caracterização física dos substratos.....	36
3.1.4 Comparação entre métodos de análise.....	36
3.2 Efeito da preparação inicial das amostras	37
3.2.1 Padronização da umidade inicial das amostras segundo o método da centrifugação	37
3.2.2 Efeito da compactação na caracterização física de substratos.....	38
3.2.3 Efeito do tamanho da amostra na caracterização física de substratos	40
3.3 Análise estatística dos dados.....	41
3.3.1 Estudo de reprodutibilidade.....	42
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	43
4.1 Métodos de análise.....	43
4.1.1 Método baseado na norma CEN-EN13041	43
4.1.2 Método dos funis de Büchner.....	45

	Página
4.1.3 Método alternativo: centrifugação das amostras	47
4.1.3.1 Estudo do tempo de centrifugação	47
4.1.3.2 Determinação dos parâmetros da caracterização física dos substratos	56
4.1.4 Comparação entre métodos de análise.....	58
4.2 Efeito da preparação inicial das amostras	75
4.2.1 Padronização da umidade inicial das amostras segundo o método da centrifugação	75
4.2.2 Efeito da compactação na caracterização física de substratos.....	78
4.2.3 Efeito do tamanho da amostra na caracterização física dos substratos ..	88
5 CONCLUSÕES	91
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	92
7 REFERÊNCIAS.....	95
8 APÊNDICE.....	104

RELAÇÃO DE TABELAS

Página

1.	Densidade de empacotamento dos substratos argila expandida, turfa de <i>Sphagnum</i> , casca de arroz carbonizada e da mistura entre esses dois últimos componentes em proporções volumétricas de 1:1.....	39
2.	Características físicas dos materiais turfa de <i>Sphagnum</i> (TS), pó-de-coco (PC), casca de arroz carbonizada (CAC), vermiculita expandida (VE) e argila expandida (AE) determinados pelo método baseado na norma CEN-EN13041.....	45
3.	Características físicas dos materiais turfa de <i>Sphagnum</i> (TS), pó-de-coco (PC), casca de arroz carbonizada (CAC), vermiculita expandida (VE) e argila expandida (AE) determinados pelo método dos funis de Büchner.....	47
4.	Regressões lineares e coeficiente de determinação (R^2) calculados para um intervalo de três tempos de centrifugação, utilizados para determinar o tempo necessário para extrair toda água disponível a uma determinada tensão para os materiais turfa de <i>Sphagnum</i> , pó-de-coco e casca de arroz carbonizada.....	53
5.	Regressões lineares e coeficiente de determinação (R^2) calculados para um intervalo de três tempos de centrifugação, utilizados para determinar o tempo necessário para extrair toda água disponível a uma determinada tensão para os materiais vermiculita expandida e argila expandida.....	54
6.	Variabilidade dos resultados de conteúdo hídrico volumétrico demonstrado pelo coeficiente de variação (CV). Erro máximo (ϵ max) calculado para distintas probabilidades ($p < 0,05$ e $p < 0,01$), e número de repetições necessárias (η) calculadas para erros (ϵ) máximos de 10 e 5%, obtidos em centrífuga com velocidade angular equivalente às tensões de 10, 50 e 100 hPa, para os materiais turfa de <i>Sphagnum</i> , pó-de-coco, casca de arroz carbonizada, vermiculita expandida e argila expandida.....	56
7.	Características físicas dos materiais turfa de <i>Sphagnum</i> (TS), pó-de-coco (PC), casca de arroz carbonizada (CAC), vermiculita expandida (VE) e argila expandida (AE) determinados pelo método da centrifugação das amostras.....	58

8. Variabilidade dos resultados de conteúdo hídrico volumétrico demonstrado pelo coeficiente de variação (CV) dos materiais turfa de *Sphagnum*, pó-de-coco, casca de arroz carbonizada, vermiculita expandida e argila expandida, obtidos a partir de três métodos de análise (centrifugação, CEN-EN13041 e funil de Büchner) em tensões de 10, 50 e 100 hPa..... 69
9. Capacidade de retenção de água a 10 hPa, porosidade total e espaço de aeração dos materiais turfa de *Sphagnum* (TS), pó-de-coco (PC), casca de arroz carbonizada (CAC), vermiculita expandida (VE) e argila expandida (AE) em função do método de análise utilizado..... 70
10. Água disponível, água facilmente disponível, água tamponante e água remanescente dos materiais turfa de *Sphagnum* (TS), pó-de-coco (PC), casca de arroz carbonizada (CAC), vermiculita expandida (VE) e argila expandida (AE) em função do método de análise utilizado..... 72
11. Percentual de umidade “atual” (umidade próxima a 50%, segundo Fermino, 2003) e padronizada após centrifugação a uma velocidade angular equivalente a 50 hPa durante 60 minutos, para os materiais turfa de *Sphagnum*, pó-de-coco, casca de arroz carbonizada e vermiculita expandida..... 75
12. Análise de variância das propriedades físicas dos substratos argila expandida (AE), turfa de *Sphagnum* (TS), casca de arroz carbonizada (CAC) e da mistura entre esses dois últimos componentes em proporções volumétricas de 1:1, em função da densidade de empacotamento..... 79
13. Densidade seca e compressibilidade dos substratos argila expandida, turfa de *Sphagnum* (TS), casca de arroz carbonizada (CAC) e da mistura entre esses dois últimos componentes em proporções volumétricas de 1:1, em função da densidade de empacotamento..... 79
14. Porosidade total, espaço de aeração e razão de vazios dos substratos argila expandida, turfa de *Sphagnum* (TS), casca de arroz carbonizada (CAC) e da mistura entre esses dois últimos componentes em proporções volumétricas de 1:1, em função da densidade de empacotamento, e a porcentagem de redução nos valores desses parâmetros em relação à compactação das amostras solta e compactada..... 81
15. Impedância mecânica (kPa) em turfa de *Sphagnum* em função de densidades de empacotamento, para leituras realizadas a 5 e 10 cm de profundidade em tubetes de 55 cm³, antes e após o período de permanência em casa de vegetação (125 dias)..... 86
16. Porosidade total e espaço de aeração dos substratos turfa de *Sphagnum* (TS), pó-de-coco (PC), casca de arroz carbonizada (CAC) e vermiculita expandida (VE) em função de tamanhos de amostra utilizadas para a análise..... 88

17. Água disponível, água facilmente disponível, água tamponante e água remanescente dos substratos turfa de *Sphagnum* (TS), pó-de-coco (PC), casca de arroz carbonizada (CAC) e vermiculita expandida (VE) em função de tamanhos de amostra utilizadas para a análise..... 89

RELAÇÃO DE FIGURAS

	Página
1. Mesa de tensão de vidro com kitassato acoplado ao equipamento.....	11
2. Funis de Büchner com coluna de água acoplada ao equipamento.....	12
3. Turfa de <i>Sphagnum</i> utilizada nos experimentos.....	15
4. Análise granulométrica do material turfa de <i>Sphagnum</i> utilizado nos experimentos.....	16
5. Pó-de-coco utilizado nos experimentos.....	17
6. Análise granulométrica do material pó-de-coco utilizado nos experimentos..	17
7. Casca de arroz carbonizada utilizada nos experimentos.....	18
8. Análise granulométrica do material casca de arroz carbonizada utilizado nos experimentos.....	19
9. Vermiculita expandida utilizada nos experimentos.....	20
10. Análise granulométrica do material vermiculita expandida utilizado nos experimentos.....	20
11. Argila expandida utilizada nos experimentos.....	21
12. Análise granulométrica do material argila expandida utilizado nos experimentos.....	22
13. Equipamentos do tipo leito de areia, em que os três da estante superior são utilizados para tensionar até 100 hPa, e o da estante inferior para tensionar em 50 hPa para padronização da umidade inicial das amostras.....	24
14. Amostras dos materiais colocados em cilindros com capacidade de 2 L (A) e mantidos em água durante 24 horas (B).....	25
15. Conjunto de dois cilindros sobrepostos de 5 cm de altura e 10 cm de diâmetro (A-B) preenchidos com os materiais após padronização da umidade inicial das amostras (C) e mantidos em água durante 24 horas (D)..	25
16. Conjunto de dois cilindros sobrepostos mantidos em leito de areia (A), separação do cilindro superior (B) e pesagem do cilindro inferior (C).....	26

	Página
17. Cilindro de aço inoxidável com capacidade de 381,05 cm ³ (A), preenchido com substrato (B) e mantido com água até 2/3 de sua altura (C).....	29
18. Fluxograma dos procedimentos realizados para obtenção do conteúdo de água contido nas amostras após tensionamento em 0, 10, 50 e 100 hPa pelo método dos funis de Büchner.....	30
19. Centrífuga Eppendorf (modelo 5804R).....	31
20. Cilindro com placa de vidro sinterizada e reservatório coletor para água drenada (A) e estrutura de plástico rígido que serve como suporte para os cilindros (B) acoplado em rotor de placas da centrífuga Eppendorf (modelo 5804R) (C).....	32
21. Representação esquemática de uma amostra em centrífuga.....	34
22. Preenchimento dos cilindros de vidro com capacidade de 60,96 cm ³ , contendo um reservatório coletor de água em sua base (A), cilindros mantidos em água (B) e suporte para o conjunto de cilindros (C), o qual foi acoplado em rotor de placas da centrífuga Eppendorf (modelo 5804R).....	35
23. Curva de retenção de água dos materiais turfa de <i>Sphagnum</i> (TS), pó-de-coco (PC), casca de arroz carbonizada (CAC), vermiculita expandida (VE) e argila expandida (AE) determinada pelo método baseado na norma CEN-EN13041.....	44
24. Curva de retenção de água dos materiais turfa de <i>Sphagnum</i> (TS), pó-de-coco (PC), casca de arroz carbonizada (CAC), vermiculita expandida (VE) e argila expandida (AE) determinada pelo método dos funis de Büchner.....	46
25. Conteúdo hídrico volumétrico (cm ³ cm ⁻³) retido em amostras após tempos de centrifugação para velocidades angulares equivalentes a 10, 50 e 100 hPa. A = turfa de <i>Sphagnum</i> ; B = pó-de-coco; C = casca de arroz carbonizada. *** = p<0,001.....	48
26. Conteúdo hídrico volumétrico (cm ³ cm ⁻³) retido em amostras após tempos de centrifugação para velocidades angulares equivalentes a 10, 50 e 100 hPa. A = vermiculita expandida; B = argila expandida. *** = p<0,001.....	49
27. Estabilização da umidade em função do tempo de centrifugação para extração da água disponível em velocidades angulares equivalentes a 10, 50 e 100 hPa, medido a partir do conteúdo hídrico volumétrico, após os 30 primeiros minutos de centrifugação. A = turfa de <i>Sphagnum</i> ; B = pó-de-coco; C = casca de arroz carbonizada.....	50

28.	Estabilização da umidade em função do tempo de centrifugação para extração da água disponível em velocidades angulares equivalentes a 10, 50 e 100 hPa, medido a partir do conteúdo hídrico volumétrico, após os 30 primeiros minutos de centrifugação. A = vermiculita expandida; B = argila expandida.....	51
29.	Curva de retenção de água dos materiais turfa de <i>Sphagnum</i> (TS), pó-de-coco (PC), casca de arroz carbonizada (CAC), vermiculita expandida (VE) e argila expandida (AE) determinada pelo método da centrifugação das amostras.....	57
30.	Curva de retenção de água dos materiais turfa de <i>Sphagnum</i> (A), pó-de-coco (B) e casca de arroz carbonizada (C) determinada pelos métodos de análise CEN-EN13041, funis de Büchner e centrifugação das amostras.....	60
31.	Curva de retenção de água dos materiais vermiculita expandida (A) e argila expandida (B) determinada pelos métodos de análise CEN-EN13041, funis de Büchner e centrifugação das amostras.....	61
32.	Correlação do conteúdo hídrico volumétrico ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$) do material turfa de <i>Sphagnum</i> , em função dos métodos de análise para caracterização física de substratos nas tensões de 10, 50 e 100 hPa. *** = $p < 0,001$	64
33.	Correlação do conteúdo hídrico volumétrico ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$) do material pó-de-coco, em função dos métodos de análise para caracterização física de substratos nas tensões de 10, 50 e 100 hPa. *** = $p < 0,001$	65
34.	Correlação do conteúdo hídrico volumétrico ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$) do material casca de arroz carbonizada, em função dos métodos de análise para caracterização física de substratos nas tensões de 10, 50 e 100 hPa. *** = $p < 0,001$	66
35.	Correlação do conteúdo hídrico volumétrico ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$) do material vermiculita expandida, em função dos métodos de análise para caracterização física de substratos nas tensões de 10, 50 e 100 hPa. *** = $p < 0,001$	67
36.	Correlação do conteúdo hídrico volumétrico ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$) do material argila expandida, em função dos métodos de análise para caracterização física de substratos nas tensões de 10, 50 e 100 hPa. * = $p < 0,05$; ns = não significativo.....	68
37.	Densidade úmida (kg m^{-3}) dos materiais turfa de <i>Sphagnum</i> (A), pó-de-coco (B), casca de arroz carbonizada (C) e vermiculita expandida (D), determinada com os materiais na umidade “atual” (umidade próxima a 50%, segundo Fermino, 2003) e após padronização desta umidade em centrifugação a uma velocidade angular equivalente a 50 hPa durante 60 minutos.....	76

38.	Água disponível (A), água facilmente disponível (B), água tamponante (C) e água remanescente (D) dos materiais argila expandida (AE), turfa de <i>Sphagnum</i> (TS), casca de arroz carbonizada (CAC) e da mistura entre esses dois últimos componentes em proporções volumétricas de 1:1, em função da densidade de empacotamento. *Médias seguidas pela mesma letra para cada substrato não diferem estatisticamente pelo teste DMS (diferença mínima significativa) de Fisher ao nível de 5% de probabilidade de erro.....	82
39.	Curva de retenção de água dos materiais argila expandida (A) e turfa de <i>Sphagnum</i> (B), em função da densidade de empacotamento.....	83
40.	Curva de retenção de água do material casca de arroz carbonizada (A) e da mistura deste com turfa de <i>Sphagnum</i> em proporções volumétricas de 1:1 (B), em função da densidade de empacotamento.....	84

APÊNDICE

1.	Cilindro com placa de vidro sinterizada e reservatório coletor para água drenada (A) e estrutura de plástico rígido que serve como suporte para os cilindros (B) acoplado em rotor de placas da centrífuga Eppendorf (modelo 5804R) (C).....	105
2.	Suporte para proveta com argola fixada a 10 cm de altura.....	105
3.	Representação esquemática de uma amostra em centrífuga.....	106

1 INTRODUÇÃO

O atual desenvolvimento do cultivo de plantas em ambiente protegido e em recipientes tem aumentado a demanda por tecnologias que proporcionem modernização das técnicas de produção e preparo das mudas, visando a padronização e qualidade do produto final. Segundo Cruz *et al.* (2016) há carência de estudos sobre protocolos que proporcionem aumento na escala de produção, aliado à obtenção de mudas de qualidade, quer sejam com fins comerciais ou conservacionistas, buscando assegurar o sucesso das ações de produção, revegetação, resgate de germoplasma e/ou estabelecimento de cultivos. Diante disso, avanços tecnológicos na escolha dos insumos e no manejo durante o cultivo são fundamentais para manter condições favoráveis para o crescimento e desenvolvimento das plantas, dentre os quais alguns são baseados nas propriedades dos substratos.

Substrato para plantas é todo material poroso, usado puro ou em mistura, que, colocado em um recipiente, proporciona ancoragem e suficientes níveis de água e oxigênio para um ótimo desenvolvimento das plantas (Vence, 2008). Assim, como a principal limitação na produção de plantas em recipientes é a restrição de espaço imposta pelo próprio recipiente para o desenvolvimento das raízes (Kämpf, 2005; Vence, 2012), é de fundamental importância a utilização de componentes com características físicas, químicas e biológicas adequadas, constituindo-se, portanto, em um dos fatores mais importantes e complexos do cultivo em recipientes.

Devido ao substrato ser um insumo que atrai grande interesse de pesquisadores no mundo, há décadas desenvolvem-se pesquisas de novos materiais paralelamente ao estudo de métodos de análises (Fermino, 2003). Muitas pesquisas trazem informações sobre determinação das características físicas (Verdonck *et al.*, 1978; Fonteno *et al.*, 1981; Bunt, 1983; Gabriëls & Verdonck, 1991; Martinez-Farré, 1992; Wallach *et al.*, 1992; Bohne & Günther, 1997; Kreij *et al.*, 2001; Fermino, 2003; Wever & van Winkel, 2004; Caron *et al.*,

2005; Fermino & Kämpf, 2005; Spier, 2008; Diaz, 2010; Vence, 2012; Zorzeto *et al.*, 2014). Associado a isso, percebem-se vários sistemas de análise empregados, porém, em geral, não existe um consenso no que se refere a um método mais adequado a ser utilizado. Ainda, as frequentes variações nos resultados obtidos de um mesmo método provocam divergência entre laudos.

A análise de substratos é uma ferramenta indispensável na determinação das características físicas dos materiais. A partir dela, é possível estabelecer a padronização dos insumos e, principalmente, possibilitar que consumidores de substratos decidam de forma consciente por sua aquisição e uso, que as indústrias possam melhorar a qualidade dos produtos, e que o poder público, por sua vez, possa fiscalizar a veracidade das informações contidas nas embalagens (Zorzeto *et al.*, 2014).

Uma ferramenta que traz importantes informações sobre determinado material a ser utilizado como substrato é a chamada Curva de Retenção de Água, a qual é uma variável que expressa as características físicas que possibilitam determinar a quantidade de água contida em um meio de cultivo em determinada tensão aplicada, sendo composta, portanto, pela porosidade total, espaço com ar, espaço com água, bem como a forma como essa água está disponível para as plantas. Contudo, os procedimentos rotineiros para a quantificação destas características são morosos e imprecisos, levando, em média, quinze dias para a obtenção de um laudo, o que desagrada as indústrias e os consumidores. Aliado a esta limitação, o preparo inicial das amostras dos componentes do substrato a serem analisados também pode influenciar nos resultados.

A relação ar-água em substratos é influenciada pela umidade inicial das amostras, pelo aumento da quantidade de sólidos por unidade de volume (compactação) e também pelo tamanho amostral durante as análises (Fonteno, 1993; Kämpf *et al.*, 1999a, b; Kämpf, 2000; Gruszynski, 2002; Fermino, 2003; Fernandes & Corá, 2004; Fermino & Kämpf, 2005; Fermino & Kämpf, 2006; Fermino & Kämpf, 2012; Vence, 2012). Diante disso, torna-se imprescindível a padronização no preparo inicial das amostras antes destas serem submetidas às análises, o que direciona para a obtenção de laudos com resultados confiáveis e reproduzíveis.

Com base neste contexto, construiu-se a hipótese de que é possível analisar o conteúdo hídrico de substratos, bem como a curva de retenção de água, de forma mais precisa e menos morosa, simulando as tensões que determinam a extração de água das

amostras em um sistema de centrifugação, através de um equipamento com controle de variáveis ambientais, substituindo a mesa de tensão e os funis de Büchner.

Portanto, com este estudo busca-se propor um método para a caracterização física de substratos que seja reprodutível, de fácil execução e que possibilite a determinação da curva de retenção de água em menor tempo, de forma a contribuir para a melhoria dos procedimentos rotineiros de análise em laboratório, bem como a redução do tempo para obtenção dos laudos. Além disso, objetivou-se, também, mostrar a influência da manipulação dos materiais quando a umidade inicial, compactação e tamanho amostral no preparo inicial destas amostras, nos resultados da caracterização física de substratos.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Substrato para plantas

O substrato é definido como todo material poroso, usado puro ou em mistura, que, colocado em um recipiente, proporciona ancoragem e suficientes níveis de água e oxigênio para um ótimo desenvolvimento das plantas (Vence, 2008). Portanto, são formados a partir do manuseio de distintos materiais ou formulações destes, com base em determinados objetivos.

Devido à restrição do espaço imposta pelo recipiente, a condição para o desenvolvimento de plantas é diferente daquelas a campo (Miner, 1994). Deste modo, o substrato deve apresentar maior economia hídrica, espaço de aeração e permeabilidade em comparação ao solo *in situ*. Além disso, dentre os requisitos, um substrato deve apresentar retenção de água, elevada porcentagem de porosidade e espaço de aeração, alta estabilidade de estrutura, com fibras resistentes à decomposição, ausência de patógenos e propágulos de plantas indesejadas, pH adequado, além de disponibilidade de aquisição e transporte (Kämpf, 2005).

A produção de plantas em recipientes surgiu a partir de dois avanços importantes: maior controle e uso racional de nutrientes nas adubações, e pela maior facilidade no controle de disseminação de microrganismos patogênicos (Raviv & Lieth, 2008). No Brasil, a utilização de substratos no meio de cultivo foi introduzida pelos produtores de plantas ornamentais, e com o passar do tempo outras áreas foram absorvendo a tecnologia, como a olericultura, a fruticultura, a silvicultura e, mais recentemente, o setor de plantas de lavoura, na produção de mudas “pré-brotadas” de cana-de-açúcar.

Muitos são os materiais utilizados como componentes de substratos, como por exemplo a vermiculita, a casca de pinus, o composto orgânico, a turfa, a fibra de coco, a casca de arroz carbonizada, a perlita e o vermicomposto (Verdonck *et al.*, 1978; Bilderback & Fonteno, 1993; Orozco *et al.*, 1995; Kämpf, 2005; Picken & Reinikainen, 2009; Amha

et al., 2010; Gomes & Paiva, 2013). Além disso, pesquisas têm sido desenvolvidas com objetivo de aprofundar conhecimentos sobre alternativas viáveis para produção de substratos, considerando, principalmente, rejeitos de diferentes atividades/culturas, bem como a relação custo/benefício e a sustentabilidade dos sistemas (Kratz *et al.*, 2013; Klein, 2015; Kratz *et al.*, 2015; Stuepp *et al.*, 2017; Almeida *et al.*, 2018; Berilli *et al.*, 2018; Monteiro *et al.*, 2019; Oconor *et al.*, 2019). Diante disso, é natural que, devido a essas diversas fontes e composições, os substratos sejam constituídos de ampla diversidade de materiais.

As características dos substratos influenciam diretamente no ciclo, na qualidade e nos custos de produção. Por isso, durante a sua escolha, deve-se levar em consideração a espécie a ser cultivada, a fase de cultivo e, especialmente, o sistema de produção adotado (Fermino & Mieth, 2018).

Neste contexto, nem sempre um único material atenderá todas as características desejáveis para o ótimo desenvolvimento das plantas. Por consequência, a maioria dos substratos são formados pela mistura de dois ou mais materiais em proporções variadas para atingir propriedades físicas, químicas e biológicas desejáveis. A elaboração de uma mistura se baseia, portanto, no uso de diversos componentes, os quais são classificados conforme suas funções, e recebem denominações específicas. Por exemplo: os componentes básicos são utilizados em maior proporção e têm por função fornecer estrutura ao substrato; os condicionadores são utilizados para melhorar características físicas, como por exemplo, reduzir a densidade, aumentar a porosidade total e melhorar a retenção de água e/ou drenagem; e por último, os aditivos são utilizados para controlar ou melhorar as características químicas e/ou biológicas (Kämpf, 2005; Schafer *et al.*, 2015). Estes componentes são medidos em unidades de volume, isto devido à ampla faixa de densidade apresentada pelos materiais (Valenzuela, 2009; Vence *et al.*, 2010).

2.2 Preparação de amostras para caracterização física de substratos

Os parâmetros da caracterização física de substratos (porosidade total, espaço de aeração, disponibilidade e capacidade de retenção de água) relacionados com o conteúdo hídrico volumétrico correspondentes a todas as tensões aplicadas (0 a 100 hPa) são afetados por distintos fatores, como os dispositivos de tensão, o ponto de referência a partir

do qual é considerada a tensão aplicada, a umidade inicial das amostras, o efeito da saturação e compactação dos materiais, e também o tamanho amostral (Vence, 2012).

O teor de umidade inicial do substrato apresenta influência na acomodação das partículas e, conseqüentemente, no volume final de substrato (Fermino, 2003; Vence, 2012). Em decorrência disso, todos os parâmetros que são expressos em unidades de volume são afetados pela umidade inicial das amostras. Além disso, o efeito da umidade também pode influenciar a expansão ou compressão durante a manipulação, principalmente para materiais orgânicos (Vence, 2012).

Em estudo buscando caracterizar fisicamente substratos comerciais, Vence *et al.* (2010) verificaram que as diferenças obtidas entre os métodos utilizados se devem ao tratamento inicial que as amostras receberam, ou seja, à umidade inicial das amostras. Contudo, em outro estudo verificou-se ainda que os procedimentos sobre a amostra inicial não afetam a todos os materiais da mesma maneira, pois estes são dependentes do tipo e tamanho dos poros e do tamanho e compressão das partículas (Vence *et al.*, 2012).

Neste sentido, é sabido que a umidade inicial das amostras apresenta influência sobre vários parâmetros resultantes das análises de caracterização física de substratos, como a densidade seca, modificando a quantidade de sólidos por amostra (Fermino & Kämpf, 2005), a porosidade total (Fonteno, 1993), a capacidade de retenção de água (Liz *et al.*, 2008), a distribuição do tamanho dos poros (Gruszynski, 2002), a acomodação das partículas (Fermino, 2003), a impedância mecânica (Kämpf *et al.*, 1999a, b) e o volume do substrato dentro do recipiente (Fermino, 2003).

Para a determinação das propriedades físicas de substratos, a Federação dos Institutos para Pesquisa e Análises Agrícolas da Alemanha (VDLUFA) recomendava que as amostras sejam preparadas com 50% ($0,50 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$) de umidade, conforme Hofmann (1970). Nesse sentido, Fermino (2003) considera que uma amostra de material orgânico está com umidade próximo a 50% quando, ao ser comprimida entre os dedos, a amostra mantém-se visualmente aglutinada, sem deformar, nem liberar água. No entanto, esse método é completamente subjetivo, o que resulta em variações na umidade entre amostras, pois a prática é dependente de cada operador (Spier, 2008).

Já o Comitê Europeu de Normatização (CEN), recomenda que, inicialmente, as amostras devem ser saturadas em água e submetidas a uma tensão de 50 cm de coluna d'água (50 hPa) em leito de areia a fim de equilibrar a umidade inicial (CEN, 1999b).

Sendo assim, a umidade da amostra será igual ao conteúdo de água remanescente após tensionamento em 50 hPa.

Pela legislação brasileira, as amostras devem ser submetidas à determinação da densidade e da capacidade de retenção de água a 10 hPa, na “Umidade Atual” (Brasil, 2007), ou seja, com o conteúdo hídrico que as amostras são recebidas pelos laboratórios, o que, naturalmente, é muito variável.

É importante salientar que a determinação da densidade de um substrato deve ser realizada de forma rigorosa e com o máximo de repetibilidade, pois, além de sua identificação como um parâmetro físico importante, ela também serve como base para definir a quantidade de material a ser usado na determinação da curva de retenção de água. Portanto, caso não seja realizada de forma correta, resultará em multiplicação de erros nos parâmetros sucessivos. Assim, considerando a importância que a determinação adequada da densidade úmida do substrato apresenta, torna-se necessário padronizar os procedimentos para sua mensuração.

Outro fator que apresenta influência sobre os parâmetros físicos obtidos nas análises é a compactação da amostra dentro do recipiente porta-amostra. Em alguns métodos de análise o material é compactado de forma natural pela ação da água durante a saturação (De Boodt *et al.*, 1974; Valenzuela, 2009), o que certamente influencia nas determinações posteriores, uma vez que provoca alteração na distribuição e proporção de macro e microporos.

A relação entre a massa e o volume de uma amostra de substrato observada em determinado recipiente, em dado momento, é definida como densidade de empacotamento (Burés *et al.*, 1995), e ocorre o aumento no conteúdo de sólidos por unidade de volume à medida que aumenta seus valores. Em consequência, importantes propriedades físicas são modificadas (Spier, 2008). Segundo Schafer (2004), os principais reflexos da acomodação e/ou agregação das partículas dos substratos são o aumento da água tamponante e água remanescente, e diminuição da água facilmente disponível. Ou seja, a diminuição de macroporos pela compactação provoca o aumento da umidade, pois conseqüentemente haverá maior proporção de microporos, que são os principais responsáveis pelo armazenamento de água (Schneider, 2000). Da mesma forma, durante o preenchimento dos recipientes para os cultivos, os cuidados para evitar a compactação devem ser tomados, pois, ela pode interferir de forma significativa no crescimento das mudas. Além da menor

difusão de oxigênio às raízes, do aumento da umidade e da ação de hormônios como o etileno, a compactação do substrato no recipiente eleva a resistência à penetração das raízes, provocando a chamada impedância mecânica, a qual afeta diretamente as raízes, ocasionando modificações morfológicas indesejáveis ao seu desempenho, o que terá como consequência menor superfície radicular para a absorção de nutrientes e água (Schneider, 2000).

As raízes que crescem em substratos com maior resistência mecânica são mais curtas, mais grossas e com formas mais irregulares, quando comparadas a raízes que se desenvolvem sob condições de menor resistência (Fermino & Kämpf, 2006).

De acordo com Kämpf *et al.* (1999b) a pressão de penetração correlaciona-se com a compactação do substrato, apresentando interação entre o grau de compactação e o nível de umidade do substrato. Assim, conhecer o comportamento de cada material em relação à impedância mecânica imposta favorece a avaliação da qualidade física de materiais, além de ser uma ferramenta adicional para análise do comportamento de substratos nas condições de cultivo, como entender sintomas relacionados ao sistema radicular de culturas mais sensíveis e/ou no desenvolvimento das mudas (Fermino, 2003).

Em estudo com produção de mudas de gipsófila (*Gypsophila paniculata* cv. Bristol Fairy) verificou-se que a densidade do substrato pode ter afetado o crescimento das raízes destas plantas (Bosa *et al.*, 2003). Este efeito pode ser potencializado pelo tipo de irrigação, da umidade e da pressão exercida pelo próprio peso das partículas que caem umas sobre as outras durante o preenchimento dos recipientes (Kämpf *et al.*, 1999b).

Além do efeito da umidade inicial e da compactação das amostras, outro fator que influencia nos métodos de análise é o volume e a geometria dos recipientes utilizados como porta-amostras (Vence, 2012).

O processo de produção de mudas atualmente faz uso de técnicas que utilizam diferentes tamanhos e tipos de recipientes. O volume limitado e a condição confinada do material fazem com que as propriedades físicas do substrato variem conforme o tipo e as dimensões do recipiente no qual se encontra, ou seja, sua forma, o material do que é feito, a capacidade (volume interno) e, principalmente, sua altura.

Os valores das propriedades físicas dos substratos, como por exemplo a densidade, a capacidade de retenção de água, o espaço de aeração e a porosidade total, podem sofrer modificações durante o período de cultivo. Os valores destas propriedades de um mesmo

material podem variar conforme a altura da coluna de água no substrato, limitada pela altura do recipiente, a qual sofre influência direta do potencial gravitacional da água em cada ponto do recipiente. Em recipientes com poucos centímetros de altura, como por exemplo em bandejas alveoladas, ou multicelulares, o potencial da água torna-se mais reduzido, resultando em menos drenagem do que em tubetes de 10 a 15 cm, os quais, por sua vez, terão menor drenagem, relativamente a vasos de 15 a 20 cm de altura, e assim consecutivamente.

Com base nisto, durante as análises para caracterização física de substratos pode haver variações nos resultados em função do tamanho da amostra a ser considerada. Em estudo buscando avaliar o efeito da altura dos anéis volumétricos (cilindros metálicos utilizados como porta-amostras durante análise física de substratos) na determinação da relação ar-água de substratos, verificou-se a importância de se definir estas dimensões durante a caracterização da curva de retenção de água (Fernandes & Corá, 2002).

Muitas pesquisas indicam a utilização de anéis volumétricos de distintos tamanhos para a análise de substratos (De Boodt *et al.*, 1974; Puustjärvi, 1974; Goh & Mass, 1980; Bragg & Chambers, 1988). Verdonck & Gabriëls (1988) recomendam a utilização de recipientes com o maior tamanho possível e propõem o uso de cilindros sobrepostos de 100 mm de diâmetro e 50 mm de altura para as análises de rotina. A legislação brasileira determina a utilização de cilindros volumétricos de 100 ± 5 mm de diâmetro interno e 50 ± 1 mm de altura (Brasil, 2007).

Puchalski & Kämpf (2000), estudando o efeito da altura do recipiente sobre a produção de mudas de *Hibiscus rosa-sinensis* Linn. em plugs determinaram porosidade total, espaço de aeração, água facilmente disponível e água tamponante com cilindros de 3 cm de altura, diferentemente da altura dos recipientes utilizados durante o cultivo, os quais variavam de 5 a 14 cm. Os autores consideram que o espaço de aeração determinado em laboratório com uso de cilindros de 3 cm de altura tenha sido subestimado em relação à real condição nos recipientes testados (com maior altura) e, conseqüentemente, a água disponível superestimada.

Estudos com desenvolvimento de mudas mostram a influência da altura dos recipientes no crescimento de plantas de *Cryptomeria japonica* D. Don (Santos *et al.*, 2000), *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden (Gomes *et al.*, 2003), *Rhapis excelsa* (Thunberg) Henry ex. Rehder (Luz *et al.*, 2006), *Peltophorum dubium* (Spreng.) Taub.

(Brachtvogel & Malavasi, 2010) e *Cabralea canjerana* (Vell.) Mart. (Gasparin *et al.*, 2014), onde recipientes com altura superior proporcionam baixa capacidade de retenção de água dos substratos.

2.3 Métodos de análise mais usados para caracterização física de substratos

Muitas pesquisas trazem informações sobre métodos para determinação das características de substratos (Verdonck *et al.*, 1978; Fonteno *et al.*, 1981; Bunt, 1983; Gabriëls & Verdonck, 1991; Martinez-Farré, 1992; Wallach *et al.*, 1992; Bohne & Günther, 1997; Kreij *et al.*, 2001; Fermino, 2003; Wever & van Winkel, 2004; Caron *et al.*, 2005; Fermino & Kämpf, 2005; Spier, 2008; Diaz, 2010; Vence, 2012; Zorzeto *et al.*, 2014). No entanto, mesmo após anos de pesquisa, não existe um consenso no que se refere à metodologia empregada para determinação das propriedades físicas de substratos para plantas. Esse é um ponto frágil dos estudos científicos que envolvem a produção, o consumo e a normatização desse insumo, pois a definição do material a ser utilizado de forma correta como substrato para plantas passa, inevitavelmente, pela análise correta em laboratório.

No Brasil, a legislação para padronização e comercialização de substratos para plantas teve como primeiro marco legal a Instrução Normativa (IN) nº 14, de 15 de dezembro de 2004. Esta IN visava estabelecer definições, normas de garantias e tolerâncias e padronização quanto à embalagem e rotulagem, além da obrigatoriedade de registro junto ao Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. A partir desta IN passou a ser obrigatória a apresentação no rótulo ou embalagem dos materiais os valores de condutividade elétrica (CE) (mS cm^{-1}), potencial hidrogeniônico (pH) em água, umidade máxima em percentual (massa/massa), densidade em base seca (kg m^{-3}) e capacidade de retenção de água (CRA) em percentual (massa/massa) (Brasil, 2004).

De forma complementar, foi determinado pela IN nº 17, de 21 de maio de 2007, os métodos analíticos oficiais para substratos para plantas e condicionadores de solos, os quais padronizam as metodologias para determinação de cada parâmetro obrigatório, conforme a IN nº14 de 2004, especificando equipamentos, materiais, procedimentos e unidades de medida (Brasil, 2007). E, recentemente, a partir da IN nº 05 de 14 de março de 2016, foram realizadas alterações na legislação quanto à tolerância máxima e mínima para cada parâmetro obrigatório na caracterização dos substratos (Brasil, 2016).

Segundo alguns autores podem ser utilizados vários métodos para a determinação da relação ar-água em substratos, nos quais os procedimentos buscam simular as condições de cultivo e, assim, inferir sobre o comportamento destes materiais quando submetidos ao cultivo com plantas (Fermino & Kämpf, 2005; Valenzuela, 2009; Vence *et al.*, 2010; Vence, 2012). Pelas normativas brasileiras, a determinação do conteúdo hídrico volumétrico é realizada a partir do método da mesa de tensão, segundo os princípios de De Boodt & Verdonck (1972). Geralmente a mesa, de tampa quadrada, é construída com uma superfície de vidro que possui no centro um orifício que é interligado, a partir de uma mangueira flexível e transparente, a um kitassato ou uma coluna de vidro (Figura 1). A tensão é produzida por um sistema de vasos comunicantes de acordo com a altura da saída de água no kitassato ou na coluna (Fermino & Mieth, 2018), e a camada de material poroso pode ser composto por papel mata borrão, de maneira que a capilaridade desse material sustente uma coluna de água de altura variável, exercendo tensão no substrato em análise.



FIGURA 1. Mesa de tensão de vidro com kitassato acoplado ao equipamento.

O método dos funis de tensão (funis de Büchner) foi adaptado com base na metodologia padrão vigente na legislação atual brasileira - IN n°17 de 2007 (Brasil, 2007). Neste caso, a tensão também é produzida a partir de um sistema de vasos comunicantes, fazendo-se uso de funis de vidro (23 cm de diâmetro) com placa porosa (Figura 2).



FIGURA 2. Funis de Büchner com coluna de água acoplada ao equipamento.

Mesmo que a IN 17 (Brasil, 2007) faça exigências somente para obtenção da disponibilidade de água em 10 cm de coluna de água (10 hPa), tanto o método da mesa de tensão como o dos funis de Büchner possibilitam a obtenção da curva de retenção de água em tensões que variam de 0 a 100 hPa. Contudo, a maior deficiência do método da mesa de tensão é o limite da tensão aplicada capaz de sustentar a coluna de água sem a entrada de ar

em tensões superiores a 50 hPa, onde, geralmente, ocorre o rompimento da coluna de água, sendo essa uma das principais limitações que este método impõe.

Internacionalmente, as normas impostas pelo Comitê Europeu de Normatização (CEN) trazem informações sobre os métodos para preparação das amostras para análises físicas e químicas, determinação do conteúdo de matéria seca, umidade e densidade (CEN, 1999a), volume de ar e água, valor de contração, porosidade total e densidade em base seca (CEN, 1999b), utilizando-se como dispositivos de tensão os leitos de areia. Segundo Vence (2012) é um método com ampla difusão internacional e faz uso de equipamento que pode ser facilmente utilizado por qualquer laboratório.

Estes três métodos descritos apresentam limitações quanto ao tempo necessário para obtenção de um laudo, levando, em média, 15 dias para a determinação da curva completa de retenção de água (0 a 100 hPa). Além disso, dentre os problemas destes métodos está também a variação da temperatura e umidade do ar junto às amostras, associado ao longo período de análise, o que pode trazer resultados equivocados devido à não contabilização da água perdida pela evaporação no ambiente. Ainda, de acordo com Diaz (2010), devido a desuniformidade de poros e o grande volume de macroporos presente na maioria dos materiais utilizados como substratos, pode ocorrer a descontinuidade do filme de água que envolve as partículas, fazendo com que a tensão exercida no ponto de sua aplicação não se distribua de maneira uniforme por toda a amostra, o que gera resultados imprecisos.

Diante disso, há necessidade de estudos visando a otimização ou a substituição dos métodos de análise atuais, os quais não atendem às necessidades, seja devido à morosidade, seja pela falta de confiabilidade já demonstrada pela inconsistência e pela falta de repetibilidade dos resultados, mesmo em análises de mesmo material no mesmo laboratório. Com esse propósito, trabalhou-se na elaboração de um método confiável, com maior controle das variáveis envolvidas, e que pudesse resultar em redução do tempo necessário para a obtenção de um laudo de análise física de substratos.

3 MATERIAL E MÉTODOS

Os trabalhos foram realizados nas dependências do Laboratório de Substratos e casa de vegetação do Departamento de Horticultura e Silvicultura, e do Laboratório de Biotecnologia do Departamento de Plantas de Lavoura, da Faculdade de Agronomia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), em Porto Alegre, Rio Grande do Sul (RS), Brasil. Além disso, estudos também foram realizados no Laboratório de Substratos da *Cátedra de Jardinería* da Faculdade de Agronomia da Universidad de Buenos Aires (FAUBA), Buenos Aires, Argentina.

Nos experimentos testaram-se turfa de *Sphagnum*, pó-de-coco, casca de arroz carbonizada, vermiculita expandida e argila expandida como substratos. Estes, foram escolhidos por serem de origens distintas (orgânicos e minerais), e por apresentarem heterogeneidade nas suas composições, com distintas formas e tamanhos de partículas, o que, conseqüentemente, gera produtos com diferentes características físicas. Além disso, são materiais amplamente utilizados como substratos para produção de mudas em diversos sistemas de cultivo, de fácil aquisição no mercado e disponíveis durante o ano todo.

Estes materiais foram submetidos à caracterização das propriedades granulométricas, químicas e físicas. A distribuição proporcional do tamanho das partículas foi determinada utilizando-se amostras de 100 g de material seco ao ar durante 24 horas, onde as amostras passaram por um sistema de peneiras (malhas de 3,35; 2,00; 1,40; 0,50 e 0,106 mm) sob agitação manual durante dois minutos. As frações retidas em cada peneira foram pesadas e calculadas as porcentagens sobre a massa total das amostras.

Para as análises químicas foram consideradas as avaliações de condutividade elétrica (CE) e potencial hidrogeniônico (pH), em uma dissolução substrato:água de 1:5 (v/v), conforme IN nº 17, de 21 de maio de 2007 (Brasil, 2007). Para o atributo físico relativo à densidade, avaliaram-se a densidade em base úmida (DU) e densidade em base seca (DS), a partir do método da auto-compactação (Hoffmann, 1970). As determinações

de porosidade total (PT), espaço de aeração (EA), capacidade de retenção de água a 10 hPa (CRA), água disponível (AD), água facilmente disponível (AFD), água tamponante (AT) e água remanescente (AR) foram obtidas nas tensões 0, 10, 50 e 100 hPa, a partir dos métodos descritos no item 3.1.

A turfa de *Sphagnum* (Figura 3) utilizada nos estudos do presente trabalho foi obtida comercialmente (TN Top - Agrinobre). É um material originário do Canadá, o qual, inicialmente, passou por um processo de descompactação e após foi adicionado um agente umectante diluído na água. Em sua composição são acrescentados fertilizante NPK e micronutrientes. Apresentou valor de pH de 4,17 e condutividade elétrica de $0,04 \text{ mS cm}^{-1}$, e densidade úmida e seca de $228,99$ e $96,58 \text{ kg m}^{-3}$, respectivamente, sendo, portanto, considerado um material leve.



FIGURA 3. Turfa de *Sphagnum* utilizada nos experimentos.

A distribuição do tamanho das partículas da turfa de *Sphagnum* mostrou baixa predominância percentual de partículas com tamanho maior que 3,35 mm e de maior predominância percentual de partículas entre 0,50 e 1,40 mm, com ausência de partículas menores de 0,106 mm (Figura 4).

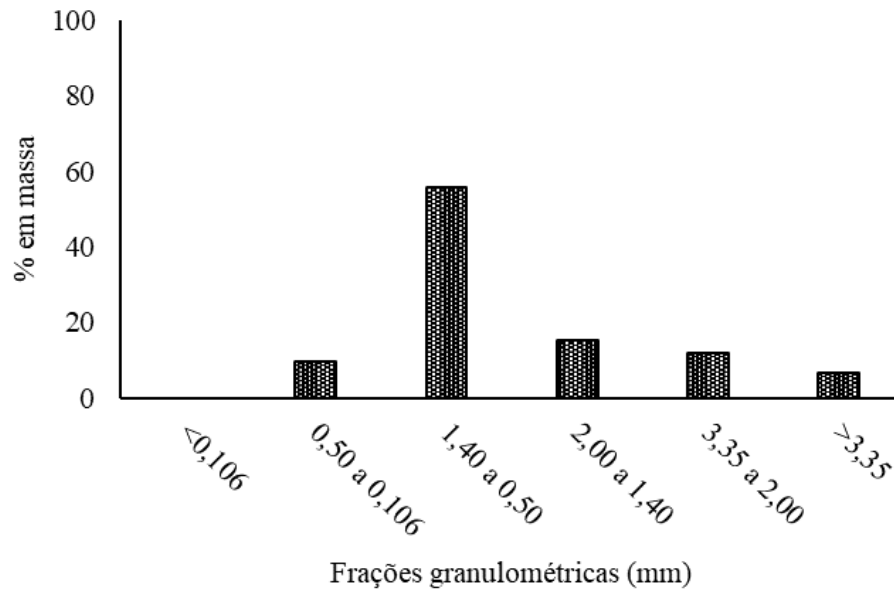


FIGURA 4. Análise granulométrica do material turfa de *Sphagnum* utilizado nos experimentos.

O pó-de-coco (Figura 5), também obtido comercialmente (Golden Mix tipo PM[®] - AMAFIBRA), é formulado por fibras do mesocarpo de cascas de coco trituradas (*Cocos nucifera* L.). Segundo informações do fabricante é um substrato com características de leveza, elevada porosidade, capacidade de retenção de água e estabilidade física, o que proporciona condições ideais para o enraizamento e o crescimento de plantas e mudas em geral. De acordo com a análise química, o valor de pH foi de 5,05 e a condutividade elétrica de 0,76 mS cm⁻¹, devido à adição de fertilizante ao produto comercial. As densidades úmida e seca são baixas (265,82 e 87,66 kg m⁻³, respectivamente), e há predominância percentual de partículas com tamanho entre 0,50 e 1,40 mm, com baixa porcentagem de partículas com tamanho inferior a este e acima de 2,0 mm (Figura 6).



FIGURA 5. Pó-de-coco utilizado nos experimentos.

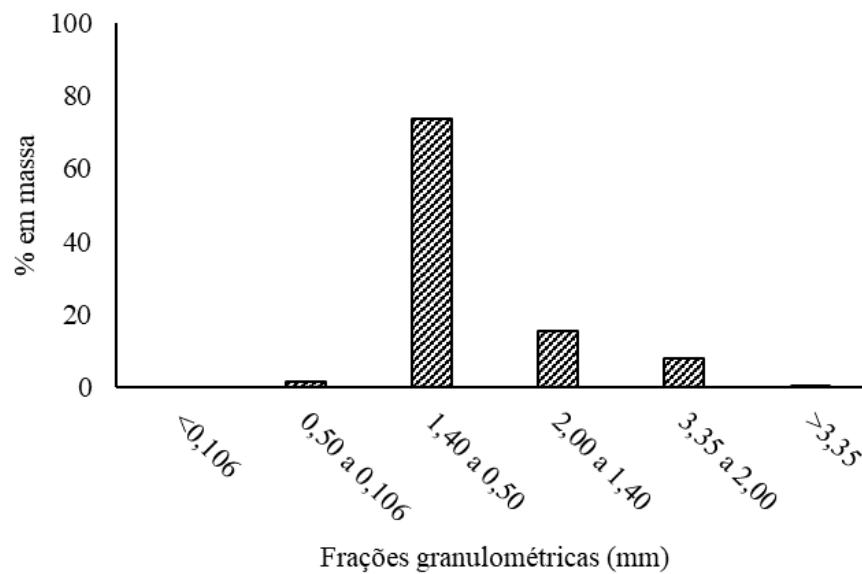


FIGURA 6. Análise granulométrica do material pó-de-coco utilizado nos experimentos.

A casca de arroz é proveniente de uma indústria localizada no município de Butiá, RS, e passou pelo processo de carbonização na Estação Experimental Agrônômica da

UFRGS, em Eldorado do Sul, RS, conforme procedimento descrito por Kämpf (2005) (Figura 7). Com base na análise para caracterização química, este material apresentou valor de pH de 6,64 e condutividade elétrica de $0,67 \text{ mS cm}^{-1}$. A densidade úmida apresentou valor de $293,44 \text{ kg m}^{-3}$ e a densidade seca de $145,06 \text{ kg m}^{-3}$.



FIGURA 7. Casca de arroz carbonizada utilizada nos experimentos.

A distribuição do tamanho de partículas da casca de arroz carbonizada evidenciou predominância de partículas de tamanho médio (entre 0,50 a 3,35 mm) (Figura 8), resultando em alta porcentagem de macroporos, garantindo alto espaço de aeração e baixa retenção de água pela falta de partículas de tamanho inferior a 0,50 mm (Zorzeto *et al.*, 2014).

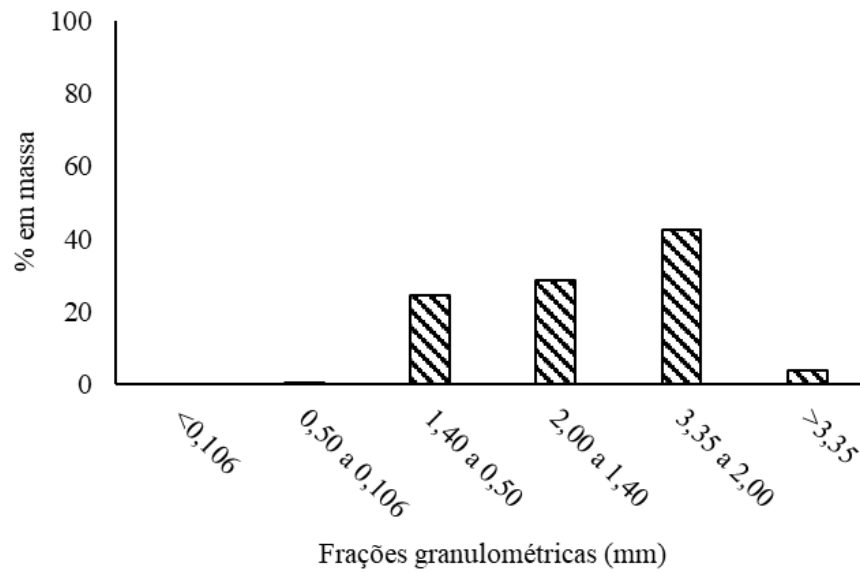


FIGURA 8. Análise granulométrica do material casca de arroz carbonizada utilizado nos experimentos.

A vermiculita expandida (Figura 9), obtida comercialmente pela empresa Carolina Soil[®], apresentou pH de 8,65, condutividade elétrica de 0,02 mS cm⁻¹, densidade úmida de 344,91 kg m⁻³ e densidade seca de 117,19 kg m⁻³. A distribuição do tamanho das partículas apresentou-se mais uniforme entre as frações granulométrica de 3,35 a 0,50 mm, com porcentagens quase nulas nas frações de maior e menor tamanho testadas (>3,35 e <0,106 mm, respectivamente) (Figura 10).



FIGURA 9. Vermiculita expandida utilizada nos experimentos.

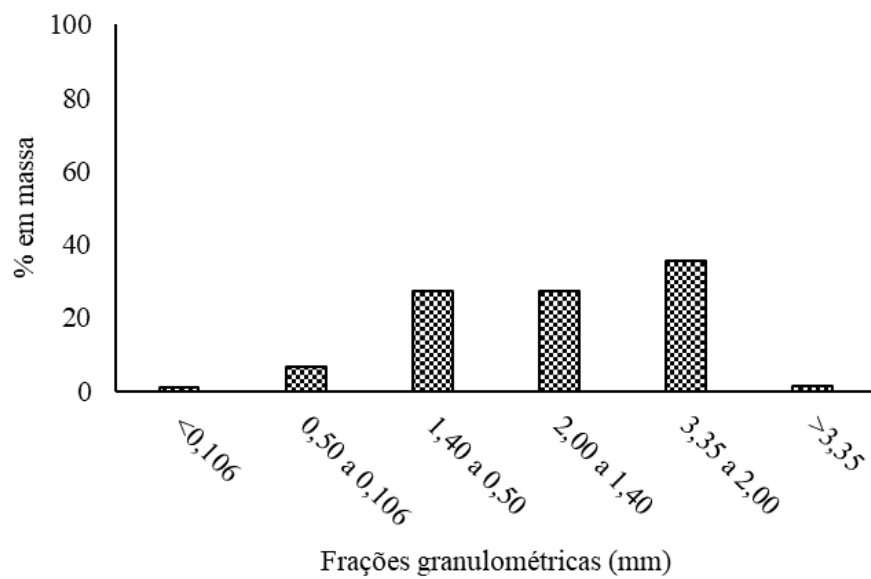


FIGURA 10. Análise granulométrica do material vermiculita expandida utilizado nos experimentos.

A argila expandida (CINEXPAN) (Figura 11) usada é um agregado leve de argila expansiva com granulometria em torno de 5 mm, conhecida internacionalmente como LECA (Light Expanded Clay Aggregates). São grãos inteiros ou partidos, constituídos de uma superfície microporosa rígida e de alta resistência, com o interior formado por uma massa cerâmica porosa. O processo é realizado em forno rotativo de alta tecnologia, que dá o formato arredondado dos grãos, a uma temperatura de 1.200 °C. É um produto natural, incombustível, não inflamável e não se degrada com o tempo (informações do fabricante), apresentando partículas inteiras e/ou partidas. Os resultados da caracterização química da argila expandida mostraram valor de condutividade elétrica de 0,03 mS cm⁻¹ e pH de 6,67. Em relação aos atributos de densidade, verificaram-se valores altos, com média de 775,14 e 696,12 kg m⁻³, para densidade úmida e seca, respectivamente. A distribuição do tamanho de partículas mostrou predominância percentual de partículas com tamanho acima de 2,00 mm (Figura 12), o que proporciona ao material elevada quantidade de macroporos que são responsáveis por elevada drenagem.



FIGURA 11. Argila expandida utilizada nos experimentos.

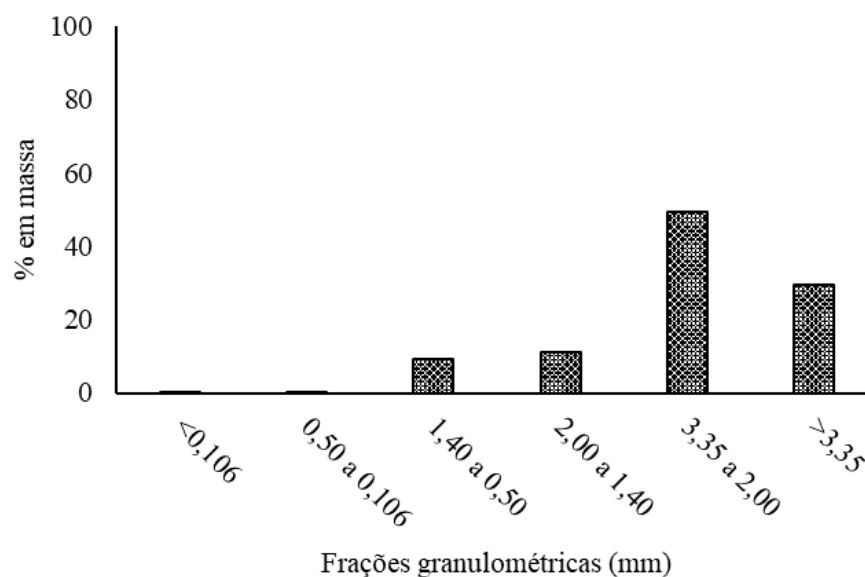


FIGURA 12. Análise granulométrica do material argila expandida utilizado nos experimentos.

Os materiais utilizados no presente estudo como substratos são, portanto, distintos quanto ao tamanho das suas partículas. O arranjo e as formas de organização destas partículas definem o tipo e tamanho dos poros, ou seja, a interação entre as partículas (sólidos) e os poros, caracterizam o meio poroso em questão.

Segundo classificação de Zorzeto *et al.* (2014), para a distribuição granulométrica das partículas, frações muito grandes são aquelas acima de 3,35 mm; grandes as entre 3,35 e 2,00 mm; intermediárias entre 2,00 e 0,50 mm; finas entre 0,50 e 0,10 mm; e muito finas as menores do que 0,10 mm. Neste caso, quando há predominância de frações intermediárias e finas, as formulações apresentam alta porosidade e maior presença de microporos, os quais são responsáveis pela retenção de água. No entanto, quando há superioridade de frações de partículas muito grandes, grandes e intermediárias, tem-se elevada aeração para o sistema radicular, porém podendo ocorrer prejuízos à retenção de água, devido à baixa proporção de microporos (Zorzeto *et al.*, 2014).

Em relação aos valores de densidade obtidos para todos os materiais utilizados nesse estudo, houve variação de 228,99 a 775,14 kg m⁻³ para a densidade úmida e de 87,66 a 696,12 kg m⁻³ para a densidade seca. Na literatura há variações entre dados de distintos materiais (Sahin *et al.*, 2002; Schmitz *et al.*, 2002; Saidelles *et al.*, 2009; Kratz *et al.*, 2015; Mota *et al.*, 2018; Oconor *et al.*, 2019), mostrando que há uma ampla diversidade de componentes e formulações. No entanto, as determinações de densidade podem ser

influenciadas pela umidade inicial das amostras (Vence, 2012) e pelo método utilizado (Verdonck *et al.*, 1978; Fermino, 2003; Fonteno & Harden, 2003).

Quanto aos atributos químicos, os valores de condutividade elétrica fornecem uma estimativa do conteúdo de sais solúveis do meio, em função de que íons dissolvidos na água conduzem corrente elétrica na proporção direta de sua concentração (Fermino, 2014). Desta maneira, os valores abaixo da faixa considerada adequada para o desenvolvimento da maioria dos cultivos (0,36 a 0,65 mS cm⁻¹) por Cavins *et al.* (2000), obtidos para os componentes turfa de *Sphagnum*, vermiculita e argila expandida, são importantes por permitirem o ajuste da fertilização do substrato, adequando formulações segundo a necessidade de cada cultura.

É importante utilizar substratos com valores de pH dentro das faixas recomendadas (5,0 a 5,8 para formulações com predominância de matéria orgânica, ou 6,0 a 6,5 para solo mineral), pois isso influencia na disponibilidade de nutrientes, apresentando efeito direto sobre os processos fisiológicos das plantas. Neste caso, há diversas formas de alterar o pH dos substratos, como a alcalinidade da água de irrigação e/ou a adubação empregada, mistura de componentes originalmente ácidos ou alcalinos às formulações, aplicação de acidificantes, entre outros (Fochesato *et al.*, 2008; Schafer *et al.*, 2015; Ceccagno *et al.*, 2019).

3.1 Métodos de análise

Como metodologias padrão para determinação de características físicas dos substratos utilizaram-se o **método descrito pelo Comitê Europeu de Normatização** (CEN), baseado na norma EN13041 (CEN, 1999b), e o método que faz uso de **funis de Büchner**, segundo os princípios de De Boodt & Verdonck (1972).

O método descrito pelo Comitê Europeu de Normatização (CEN-EN13041) foi utilizado por apresentar ampla difusão internacional, e assim como os funis de Büchner, por fazer uso de equipamentos que permitem sua utilização por qualquer laboratório do país.

A metodologia que faz uso de funis de Büchner foi escolhida por ser o método utilizado pelo Laboratório de Substratos da Faculdade de Agronomia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Segundo Schafer *et al.* (2015) este laboratório é pioneiro no Brasil em realizações de análises físicas e químicas de diversos materiais oriundos de

setores de pesquisa ou de produção. Este método foi adaptado com base na metodologia padrão vigente na legislação atual brasileira - IN nº17 de 2007 (Brasil, 2007).

Além destes, utilizou-se um método, aqui apresentado como alternativo, para determinar o conteúdo hídrico volumétrico de substratos a partir da **centrifugação de amostras**. Esta hipótese foi baseada em estudos já realizados com solos, onde as tensões são simuladas aliando-se a velocidade angular, a altura da amostra e o raio medido do ponto mais externo da amostra ao ponto central da centrífuga. Buscou-se com isso, além de melhorar o controle de variáveis ambientais que influenciam nos resultados obtidos na caracterização física de substratos, reduzir o tempo necessário para obtenção do laudo.

3.1.1 Método baseado na norma CEN-EN13041

Foram utilizados leitos de areia (Figura 13) construídos pelo Laboratório de Substratos da FAUBA, com dimensões de aproximadamente 50 cm x 35 cm x 30 cm.



FIGURA 13. Equipamentos do tipo leito de areia, em que os três da estante superior são utilizados para tensionar até 100 hPa, e o da estante inferior para tensionar em 50 hPa para padronização da umidade inicial das amostras.

Inicialmente, as amostras foram colocadas em cilindros com capacidade de 2 L (11 cm de altura) vedados na parte basal com tecido de nylon (tecido tipo voal) (Figura 14A), e

mantidos com água até 1 cm a menos que a sua borda superior durante 24 horas (Figura 14B). Após esse período, foram colocados para tensionar em leito de areia a 50 hPa até o equilíbrio da umidade, a fim de padronizar a umidade inicial das amostras. Com esses materiais, preencheram-se conjuntos de dois cilindros sobrepostos de 5 cm de altura e 10 cm de diâmetro (Figura 15A-C), os quais permaneceram novamente em água durante 24 horas (Figura 15D), e logo submetidos a tensão de 10 hPa.



FIGURA 14. Amostras dos materiais colocados em cilindros com capacidade de 2 L (A) e mantidos em água durante 24 horas (B).



FIGURA 15. Conjunto de dois cilindros sobrepostos de 5 cm de altura e 10 cm de diâmetro (A-B) preenchidos com os materiais após padronização da umidade inicial das amostras (C) e mantidos em água durante 24 horas (D).

Quando alcançado o equilíbrio (quando cessou a drenagem de água na coluna do aparelho) na tensão 10 hPa (Figura 16A), retiraram-se os cilindros do leito de areia, eliminando-se o cilindro superior (Figura 16B), e determinando-se a massa somente do cilindro inferior (volume do cilindro de 388 cm³) (Figura 16C), obtendo assim a massa dos materiais após tensionamento a 10 hPa. Em seguida os cilindros retornaram ao leito de areia onde foram submetidos à tensão de 50 hPa, permanecendo nesta condição por período necessário para alcançar o equilíbrio. Posteriormente, pesaram-se novamente os cilindros. Este mesmo procedimento foi realizado com os cilindros nas tensões ajustadas para 80 e 100 hPa, e logo em seguida as amostras foram colocadas em estufa a 105±3 °C, onde permaneceram até massa constante.



FIGURA 16. Conjunto de dois cilindros sobrepostos mantidos em leito de areia (A), separação do cilindro superior (B) e pesagem do cilindro inferior (C).

As análises foram realizadas em quatro repetições por material, e com base nestes valores foram obtidos os conteúdos hídricos volumétricos nas tensões de 10, 50 e 100 hPa. A partir disto, também foi realizada a determinação da densidade seca, capacidade de retenção de água, porosidade total, espaço de aeração, água disponível, água facilmente

disponível, água tamponante e água remanescente, com base nas equações 1, 2, 3, 5, 6, 7, 8 e 9, respectivamente.

$$\text{Equação 1: DS (kg m}^{-3}\text{)} = \frac{\text{massa seca (g)}}{\text{volume de substrato (cm}^3\text{)}} \times 1000$$

$$\text{Equação 2: CRA (cm}^3 \text{ cm}^{-3}\text{)} = \frac{\text{volume de água retido na tensão 10 hPa (cm}^3\text{)}}{\text{volume de substrato (cm}^3\text{)}}$$

$$\text{Equação 3: PT (cm}^3 \text{ cm}^{-3}\text{)} = 1 - \frac{\text{densidade seca (kg m}^{-3}\text{)}}{\text{densidade de partícula (kg m}^{-3}\text{)}}$$

Onde a densidade de partícula (DP) foi determinada com base no conteúdo de matéria orgânica (MO) e de cinzas (CZ) dos materiais, a partir da equação 4:

$$\text{DP (kg m}^{-3}\text{)} = \frac{1}{\frac{\text{MO}}{100 \times 1.550 \text{ kg m}^{-3}} + \frac{\text{CZ}}{100 \times 2.650 \text{ kg m}^{-3}}}, \text{ em que } 1.550 \text{ kg m}^{-3} \text{ é considerada uma média da}$$

densidade de partícula dos materiais orgânicos e 2.650 kg m^{-3} para materiais inorgânicos.

$$\text{Equação 5: EA (cm}^3 \text{ cm}^{-3}\text{)} = \text{PT} - \text{CRA}$$

$$\text{Equação 6: AD (cm}^3 \text{ cm}^{-3}\text{)} = \text{AFD} + \text{AT}$$

$$\text{Equação 7: AFD (cm}^3 \text{ cm}^{-3}\text{)} = \text{CRA} - \text{conteúdo hídrico volumétrico a 50 hPa}$$

$$\text{Equação 8: AT (cm}^3 \text{ cm}^{-3}\text{)} = \text{conteúdo hídrico volumétrico a 50 hPa} - \text{AR}$$

$$\text{Equação 9: AR (cm}^3 \text{ cm}^{-3}\text{)} = \text{conteúdo hídrico volumétrico a 100 hPa}$$

3.1.2 Método dos funis de Büchner

Neste estudo foram utilizados funis de vidro (23 cm de diâmetro) com placa porosa, onde a tensão era produzida por um sistema de vasos comunicantes de acordo com a altura

do ponto de drenagem de uma coluna de água, em relação ao ponto central da amostra (Figura 2).

Nesse método, as amostras foram analisadas em cilindros metálicos com volume de 381,05 cm³ (anéis de aço inoxidável com 1,50 mm de espessura, 5,0 cm de altura e 9,85 cm de diâmetro interno) (Figura 17A). Para isso, inicialmente, procedeu-se a vedação do fundo dos cilindros com tecido tipo voal, sendo preso por um atilho de borracha (Figura 17A). Após, os cilindros foram preenchidos com os diferentes materiais (Figura 17B), sendo que a quantidade foi calculada a partir da densidade úmida dos mesmos, ou seja, a quantidade de material utilizado para o preenchimento dos cilindros em cada amostra foi definida pela massa de cada material que, de acordo com a sua densidade, seria necessário para o preenchimento total do respectivo cilindro, de acordo com a equação 10.

$$\text{Equação 10: Massa de substrato (g)} = \frac{\text{volume do cilindro (mL)} \times \text{densidade úmida (g L}^{-1}\text{)}}{1000}$$

A determinação das densidades úmida e seca foi realizada pelo método da auto-compactação (Hoffmann, 1970), o qual consiste em preencher uma proveta plástica e graduada de 500 mL, até a marca de 300 mL, com as amostras na umidade atual. Em seguida, esta proveta foi deixada cair na posição vertical, sob a ação do seu próprio peso de uma altura de dez centímetros por dez vezes consecutivas. Após, com o auxílio de uma espátula nivelou-se a superfície levemente, e leu-se o volume obtido (em mL). Posteriormente, pesou-se o material úmido (g) e levou-se à estufa para secagem a 65±5 °C até peso constante, obtendo-se, assim, os valores de densidade úmida (DU) e densidade seca (DS) aplicando-se as equações 11 e 12, respectivamente.

$$\text{Equação 11: DU (kg m}^{-3}\text{)} = \frac{\text{massa úmida (g)}}{\text{volume (mL)}} \times 1000$$

$$\text{Equação 12: DS (kg m}^{-3}\text{)} = \frac{\text{densidade úmida (kg m}^{-3}\text{)} \times (100 - \text{umidade (\%)})}{100}$$

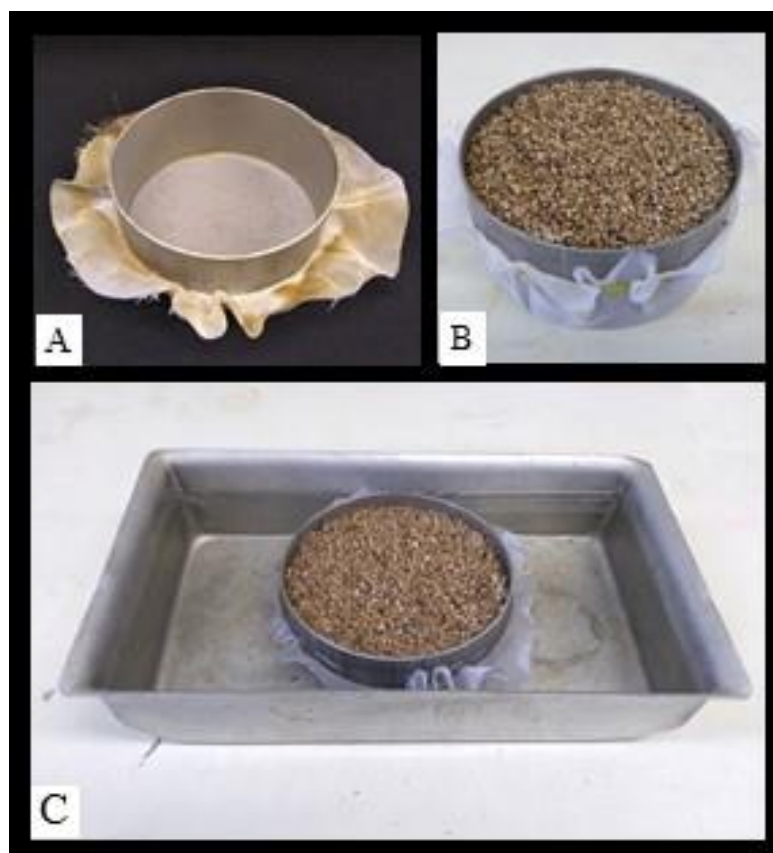


FIGURA 17. Cilindro de aço inoxidável com capacidade de 381,05 cm³ (A), preenchido com substrato (B) e mantido com água até 2/3 de sua altura (C).

Prosseguiu-se, então, com a colocação dos cilindros com água até 2/3 de sua altura por 24 horas (Figura 17C). Transcorrido este período, os procedimentos subsequentes para obtenção do volume de água contido nas amostras correspondentes aos pontos 0, 10, 50 e 100 hPa de tensão, seguem a descrição do fluxograma apresentado na Figura 18.

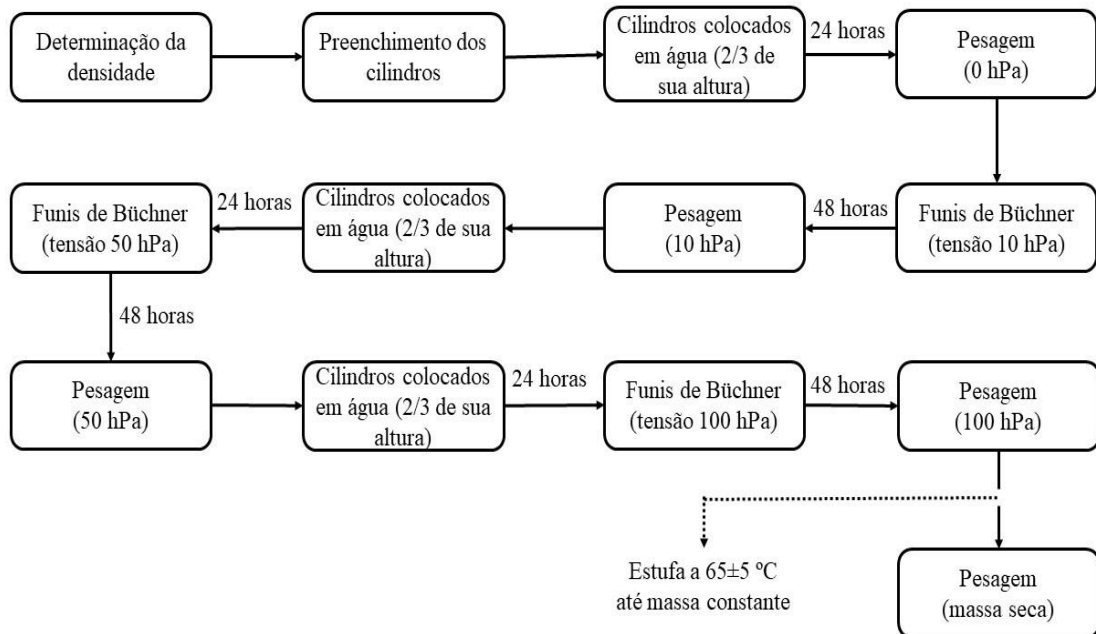


FIGURA 18. Fluxograma dos procedimentos realizados para obtenção do conteúdo de água contido nas amostras após tensionamento em 0, 10, 50 e 100 hPa pelo método dos funis de Büchner.

As análises foram realizadas em quatro repetições por material, e com base nisso, foram obtidos os valores de conteúdo hídrico volumétrico nas tensões de 0, 10, 50 e 100 hPa. A partir destes valores, também foi realizada a determinação da capacidade de retenção de água a 10 hPa, porosidade total, espaço de aeração, água disponível, água facilmente disponível, água tamponante e água remanescente, de acordo com as equações 13, 14, 15, 16, 17, 18 e 19, respectivamente.

$$\text{Equação 13: CRA (cm}^3 \text{ cm}^{-3}\text{)} = \frac{\text{volume de água retido na tensão 10 hPa (cm}^3\text{)}}{\text{volume do cilindro (cm}^3\text{)}}$$

$$\text{Equação 14: PT (cm}^3 \text{ cm}^{-3}\text{)} = \frac{\text{volume de água retido na tensão 0 hPa (cm}^3\text{)}}{\text{volume do cilindro (cm}^3\text{)}}$$

$$\text{Equação 15: EA (cm}^3 \text{ cm}^{-3}\text{)} = \frac{\text{volume de água retido em 0 hPa (cm}^3\text{)} - \text{volume de água retido em 10 hPa (cm}^3\text{)}}{\text{volume do cilindro (cm}^3\text{)}}$$

$$\text{Equação 16: AD (cm}^3 \text{ cm}^{-3}\text{)} = \frac{\text{volume de água retido em 10 hPa (cm}^3\text{)} - \text{volume de água retido em 100 hPa (cm}^3\text{)}}{\text{volume do cilindro (cm}^3\text{)}}$$

$$\text{Equação 17: AFD (cm}^3 \text{ cm}^{-3}) = \frac{\text{volume de água retido em 10 hPa (cm}^3) - \text{volume de água retido em 50 hPa (cm}^3)}{\text{volume do cilindro (cm}^3)}$$

$$\text{Equação 18: AT (cm}^3 \text{ cm}^{-3}) = \frac{\text{volume de água retido em 50 hPa (cm}^3) - \text{volume de água retido em 100 hPa (cm}^3)}{\text{volume do cilindro (cm}^3)}$$

$$\text{Equação 19: AR (cm}^3 \text{ cm}^{-3}) = \frac{\text{volume de água retido em 100 hPa (cm}^3)}{\text{volume do cilindro (cm}^3)}$$

3.1.3 Método alternativo: centrifugação de amostras

O estudo foi conduzido onde os materiais foram submetidos à determinação do conteúdo hídrico volumétrico nas tensões de 0, 10, 50 e 100 hPa, a partir do método que consiste na centrifugação de amostras. Para tanto, utilizou-se a centrífuga Eppendorf modelo 5804R (Figura 19), com comprimento da amostra de substrato de 4,5 cm e raio medido do ponto mais externo da amostra até o do ponto central da centrífuga de 9 cm.



FIGURA 19. Centrífuga Eppendorf (modelo 5804R).

Esta técnica consistiu em preparar as amostras colocando-as em cilindros que contém na parte superior uma tampa e em sua base uma placa de vidro sinterizado (porosidade P3 - 16 a 40 Micra) (permitindo a livre drenagem de água, mas retendo as partículas das amostras). Envolvendo a base desse cilindro foi acoplado um coletor de

vidro para a água drenada (Figura 20A). Os cilindros com os coletores foram acoplados a uma estrutura de plástico rígido (Figura 20B) no interior da centrífuga, o qual manteve as amostras na posição vertical quando a centrífuga não está em funcionamento (Figura 20C), sendo elevada gradualmente, de acordo com a velocidade de rotação assim que é acionada, de forma a fazer com que a tensão na amostra, provocada pela força centrífuga, seja sempre na direção do fundo do cilindro.

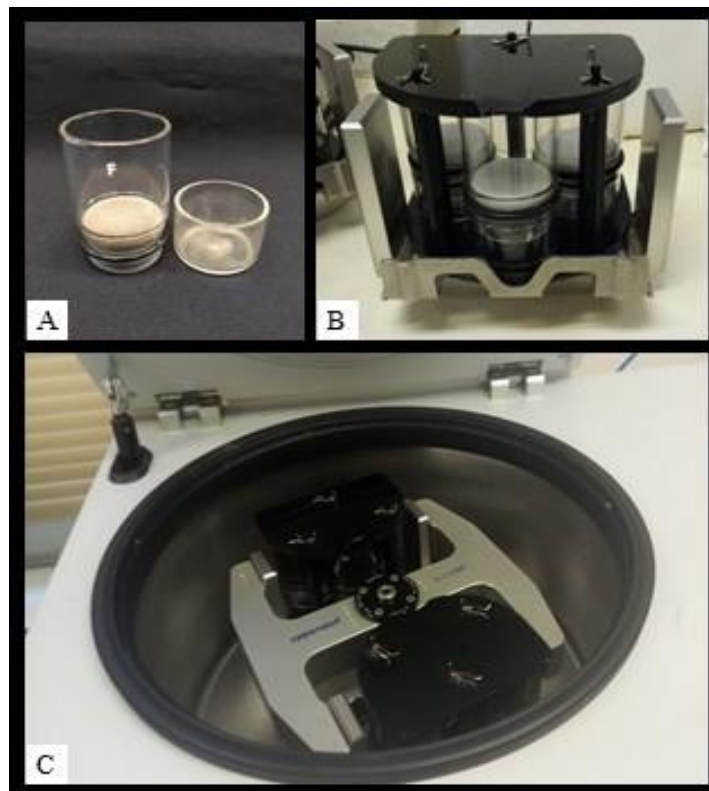


FIGURA 20. Cilindro com placa de vidro sinterizada e reservatório coletor para água drenada (A) e estrutura de plástico rígido que serve como suporte para os cilindros (B) acoplado em rotor de placas da centrífuga Eppendorf (modelo 5804R) (C).

Para a definição do número de rotações por minuto (rpm), realizou-se o cálculo da velocidade angular, em rpm, para cada potencial (10; 50 e 100 hPa), com base em equações descritas por Freitas Júnior & Silva (1984) e Silva & Azevedo (2001). A relação entre este potencial, a velocidade angular estabelecida e o raio da centrífuga são definidos por:

$$\text{Equação 20: } dh_r = \omega^2 g^{-1} r dr$$

Onde: dh_r = diferencial de tensão da água na amostra na superfície em r (cm de H_2O);
 ω = velocidade angular ($rad\ s^{-1}$);
 g = aceleração da gravidade ($981\ cm\ s^{-2}$);
 r = distância do eixo da centrífuga até uma dada seção transversal da amostra (cm);
 dr = diferencial de r , ou seja, distância do eixo da centrífuga à superfície em r (cm).

Integrando-se a equação 20 no intervalo (r , r_e) obtém-se que:

$$\text{Equação 21: } h_r = \frac{1}{2} \omega^2 g^{-1} (r_e^2 - r^2)$$

Onde: h_r = tensão de água na amostra (cm de H_2O);
 r_e = distância do eixo da centrífuga à superfície em r_e (cm).

A equação 21 é a função que descreve a distribuição do potencial ao longo de r . Entretanto, busca-se determinar o valor médio da tensão (\bar{h}) estabelecida na amostra, no intervalo de r_i a r_e , o que é definido por:

$$\text{Equação 22: } \bar{h}(r_i, r_e) = \frac{\int_{r_i}^{r_e} h_r dr}{\int_{r_i}^{r_e} dr}$$

Aplicando-se a equação 21 na equação 22, integrando e substituindo ($r_e - r_i$) por L , obtém-se:

$$\text{Equação 23: } \bar{h}(r_i, r_e) = \frac{1}{6} \omega^2 g^{-1} L (3r_e - L)$$

Considerando-se a tensão média (\bar{h}), expressa em kPa, e a velocidade angular (ω), em rpm, a equação 23 pode ser reduzida a:

Equação 24: $\omega = K \sqrt{\bar{h}}$

Onde: ω = velocidade angular em rpm;

\bar{h} = tensão em kPa;

$K = x$, em unidades convenientemente transformadas de modo que o valor da rotação resulte em rpm para uma tensão dada em hPa. Essa constante pode ser calculada pela seguinte equação:

$$\text{Equação 25: } K = \frac{60}{2\pi} \sqrt{\frac{6 \times 981 \times 10,1957}{L(3 Re - L)}}$$

Onde: L = comprimento da amostra de substrato (cm) e Re = raio medido do ponto mais externo da amostra até o do ponto central da centrífuga (cm), conforme demonstrado na Figura 21.

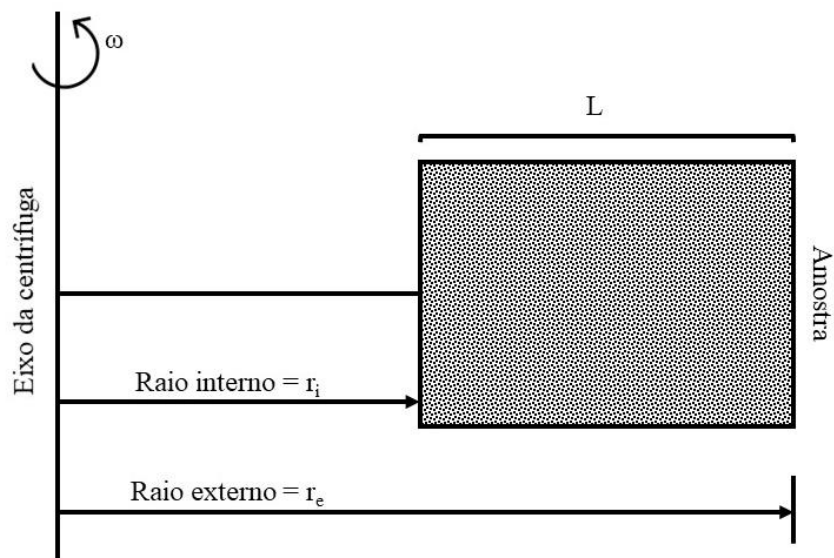


FIGURA 21. Representação esquemática de uma amostra em centrífuga.

Com base nestas equações, chegaram-se aos seguintes números de rotações por minuto: 230, 520 e 730 rpm, os quais correspondem às tensões de 10, 50 e 100 hPa, respectivamente.

3.1.3.1 Estudo do tempo de centrifugação

Para cada rotação e para cada formulação de substrato, a fim de determinar o tempo necessário de centrifugação para obtenção do equilíbrio de umidade das amostras, testaram-se os tempos de centrifugação de 0; 15; 30; 60; 120; 180; 240; 300; 360; 420; 480 e 540 min.

Em cada teste, utilizou-se um conjunto de cilindros composto por seis subunidades, as quais apresentavam individualmente $60,96 \text{ cm}^3$ (Figura 22A), totalizando um volume de amostra de $365,76 \text{ cm}^3$. A quantidade de material por cilindro foi calculada a partir da densidade úmida dos mesmos, a qual foi obtida pelo método da auto-compactação (Hoffmann, 1970). Após preenchidos com os materiais, os cilindros foram deixados durante 24 horas com água até $2/3$ de sua altura (Figura 22B), e após transcorrido este período, foram retirados da água, obtendo-se, imediatamente, o peso correspondente a 0 hPa, e logo colocados no suporte de estrutura de plástico rígido (Figura 22C) que vai acoplado ao rotor de placas da centrífuga.



FIGURA 22. Preenchimento dos cilindros de vidro com capacidade de $60,96 \text{ cm}^3$, contendo um reservatório coletor de água em sua base (A), cilindros mantidos em água (B) e suporte para o conjunto de cilindros (C), o qual foi acoplado em rotor de placas da centrífuga Eppendorf (modelo 5804R).

Após o período em água, os cilindros foram submetidos aos diferentes tempos de centrifugação, determinando-se, por meio de pesagem, o conteúdo de água presente na amostra após cada tempo testado. Após o equilíbrio, quando a redução da massa de água entre as últimas três pesagens foi inferior a 1% do volume acumulado da água extraída, as amostras foram levadas à estufa a $65 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$ até massa constante, a fim de estabelecer o

conteúdo de água que permaneceu no substrato após a centrifugação em cada tensão aplicada.

Os tratamentos foram dispostos em delineamento inteiramente casualizado, testando-se 12 tempos de centrifugação (0; 15; 30; 60; 120; 180; 240; 300; 360; 420; 480 e 540 min) para cinco materiais utilizados como substratos (turfa de *Sphagnum*, pó-de-coco, casca de arroz carbonizada, vermiculita expandida e argila expandida), sendo todas as análises realizadas em quadruplicatas.

3.1.3.2 Determinação dos parâmetros da caracterização física dos substratos

Após determinados os tempos necessários para a extração de toda água disponível a uma determinada tensão, conforme estudo descrito no item 3.1.3.1, determinou-se o conteúdo hídrico volumétrico nas tensões de 0, 10, 50 e 100 hPa para todos os materiais utilizados como substratos. A partir disso, foram determinados os parâmetros de capacidade de retenção de água a 10 cm de coluna de água, porosidade total, espaço de aeração, água disponível, água facilmente disponível, água tamponante e água remanescente de acordo com as equações 13, 14, 15, 16, 17, 18 e 19, respectivamente.

3.1.4 Comparação entre métodos de análise

Os dados do conteúdo hídrico volumétrico nas tensões de 0, 10, 50 e 100 hPa e os valores dos parâmetros que compõem a curva de retenção de água de substratos obtidos no método da centrifugação para os materiais turfa de *Sphagnum*, pó-de-coco, casca de arroz carbonizada, vermiculita e argila expandida, foram comparados com os resultados obtidos com os funis de Büchner, segundo os princípios de De Boodt & Verdonck (1972), e com o método descrito pelo Comitê Europeu de Normatização (CEN), baseado na norma EN13041.

Realizou-se também a comparação do tempo necessário para obtenção de um laudo de caracterização física de substratos a partir dos dois métodos considerados padrão (método europeu e funis de Büchner) com o método alternativo baseado na centrifugação de amostras.

Os estudos foram realizados em três experimentos, onde cada um correspondeu a um método de análise (CEN-EN13041, funis de Büchner e centrifugação), e cinco materiais utilizados como substratos (turfa de *Sphagnum*, pó-de-coco, casca de arroz

carbonizada, vermiculita expandida e argila expandida), sendo todas as análises realizadas em quadruplicatas.

3.2 Efeito da preparação inicial das amostras

3.2.1 Padronização da umidade inicial das amostras segundo o método da centrifugação

Neste estudo foram utilizados como substratos os materiais turfa de *Sphagnum*, pó-de-coco, casca de arroz carbonizada e vermiculita expandida, os quais foram submetidos à determinação das densidades úmida e seca, a partir do método da auto-compactação (Hoffmann, 1970). Estas determinações foram realizadas com amostras na “umidade atual” e com a umidade padronizada após centrifugação (centrífuga Eppendorf - modelo 5804R, Figura 9) em velocidade proporcional a uma tensão de 50 hPa (50 cm de coluna de água), conforme detalhado no item 3.1.3.

A “umidade atual” das amostras foi uniformizada segundo Fermino (2003), considerando-se uma umidade próxima a 50% ($0,50 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$), sendo este nível alcançado quando, ao ser comprimido contra a palma da mão, o material úmido, sem desprender água entre os dedos, formava um torrão coeso. Após este procedimento, as amostras foram levadas à estufa a $65 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$ até massa constante para determinação da umidade.

Na padronização da umidade das amostras, subamostras foram colocadas em cilindros com volume individual de $60,96 \text{ cm}^3$ (Figura 22A), sendo que cada repetição foi composta por um conjunto de seis cilindros, totalizando um volume de amostra de $365,76 \text{ cm}^3$. Após o preenchimento, de acordo com a quantidade de material calculada a partir da densidade úmida dos mesmos, os cilindros foram deixados em água durante 24 horas com água até $2/3$ de sua altura (Figura 22B), e após transcorrido este período, foram retirados da água, obtendo-se, imediatamente, o peso correspondente a 0 hPa. Em seguida, foram submetidos à centrifugação durante 60 minutos em 520 rotações por minuto. Posteriormente ao tempo de centrifugação, as subamostras foram pesadas e levadas à estufa a $65 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$ até massa constante para determinação da umidade padronizada.

Após conhecido o volume de água remanescente na subamostra submetida à centrifugação, realizou-se a uniformização da amostra total, levando-se em consideração esse percentual de umidade, para então proceder com a determinação da densidade dos

materiais. Assim, a umidade padronizada foi correspondente à umidade que permaneceu no substrato após centrifugação com força equivalente a uma tensão de 50 hPa, durante 60 minutos.

A determinação das densidades foi realizada pelo método da auto-compactação (Hoffmann, 1970), utilizando-se uma proveta plástica e graduada de 500 mL, sendo preenchida com material até 300 mL. Em seguida, esta proveta foi deixada cair na posição vertical, sob a ação do seu próprio peso de uma altura de dez centímetros por dez vezes consecutivas. Após, com o auxílio de uma espátula nivelou-se a superfície levemente, e leu-se o volume obtido (em mL). Posteriormente, pesou-se o material úmido (g) e levou-se à estufa para secagem a 65 ± 5 °C até peso constante. Desta maneira, os valores de densidade úmida (DU), umidade (U) e densidade seca (DS) foram obtidos aplicando-se as equações 26, 27 e 28, respectivamente.

$$\text{Equação 26: } DU \text{ (kg m}^{-3}\text{)} = \frac{\text{massa úmida (g)}}{\text{volume (mL)}} \times 1000$$

$$\text{Equação 27: } U \text{ (\%)} = \frac{\text{massa úmida (g)} - \text{massa seca (g)}}{\text{massa úmida (g)}} \times 100$$

$$\text{Equação 28: } DS \text{ (kg m}^{-3}\text{)} = \frac{\text{densidade úmida (kg m}^{-3}\text{)} \times (100 - \text{umidade (\%)})}{100}$$

Os tratamentos foram dispostos em delineamento inteiramente casualizado, com dois tratamentos (umidade atual e umidade padronizada), sendo estes testados para quatro materiais (turfa de *Sphagnum*, pó-de-coco, casca de arroz carbonizada e vermiculita expandida), e todas as análises realizadas em quintuplicatas.

3.2.2 Efeito da compactação na caracterização física de substratos

A fim de verificar o efeito da compactação das amostras durante os procedimentos de análise, procedeu-se com estudo em que os tratamentos consistiram em diferentes níveis de densidade de empacotamento dos componentes argila expandida, turfa de *Sphagnum*, casca de arroz carbonizada e da mistura entre esses dois últimos em iguais proporções volumétricas. Estes foram submetidos aos níveis de compactação (densidade de

empacotamento) solto (sem compactação), intermediário (moderadamente compactado) e compactado. A densidade solta foi obtida a partir do livre preenchimento do recipiente, sem pressão sobre o material e sem impacto do recipiente. O nível compactado foi obtido definindo-se a maior quantidade de substrato possível por recipiente, mediante compactação com pressão manual. Uma vez definidos os dois extremos (solto e compactado), foi estabelecido o nível intermediário, conforme Tabela 1, para cada material.

TABELA 1. Densidade de empacotamento dos substratos argila expandida, turfa de *Sphagnum*, casca de arroz carbonizada e da mistura entre esses dois últimos componentes em proporções volumétricas de 1:1.

Tratamentos	Densidade de empacotamento (kg m ⁻³)			
	Argila expandida	Turfa de <i>Sphagnum</i>	Casca de arroz carbonizada	TS + CAC (1:1, v/v)
Solto	718,9	190,9	163,8	167,1
Intermediário	777,3	330,9	328,1	330,2
Compactado	835,9	467,3	492,5	493,3

TS + CAC = turfa de *Sphagnum* + casca de arroz carbonizada.

Os materiais foram submetidos às tensões de 0, 10, 50 e 100 hPa, utilizando-se funis de tensão (funis de Büchner), conforme os princípios de De Boodt & Verdonck (1972), fazendo-se uso de cilindros volumétricos (anéis metálicos de 3,0 cm de altura e 4,8 cm de diâmetro interno) preenchidos com a quantidade de substrato correspondente a cada tratamento (Tabela 1). Determinou-se, assim, o conteúdo hídrico volumétrico nas tensões 0, 10, 50 e 100 hPa, e com base nisto, as propriedades: porosidade total, espaço de aeração, água disponível, água facilmente disponível, água tamponante, água remanescente e razão de vazios.

Paralelamente, para a turfa de *Sphagnum*, também foram realizadas análises de impedância mecânica, por ser uma ferramenta adicional de análise do comportamento de substratos, contribuindo para explicar possíveis problemas que a compactação possa provocar. Para isso, utilizaram-se tubetes cilíndricos, de polietileno com seis estrias internas salientes, com capacidade de 55 cm³, os quais foram mantidos sem plantas em casa de vegetação durante 125 dias. Os tubetes permaneceram em sistema de irrigação do tipo microaspersão com lâmina de água de 12 mm dia⁻¹, distribuída em quatro ciclos diários, durante o período de novembro de 2016 a março de 2017, com temperatura e umidade relativa médias de 27,70 °C e 76,68%, respectivamente.

Estes tubetes, preenchidos com a quantidade de substrato (turfa de *Sphagnum*) referente a cada densidade de empacotamento (Tabela 1), foram submetidos a avaliações mensais da compactação dentro dos recipientes. Para tanto, utilizaram-se quatro tubetes por tratamento em cada avaliação. A impedância mecânica foi medida com micropenetrômetro Chatillon, Greensboro, NC/USA, sendo as leituras realizadas a 5 e 10 cm de profundidade, em uma única perfuração central por tubete (altura do tubete = 12 cm). A sonda de 6,5 mm de diâmetro, apresentava ápice cônico com semi-ângulo de 30 °C. De acordo com Kämpf *et al.* (1999a), a equação $Q = F / A$ descreve a pressão (Q) necessária para introduzir verticalmente uma sonda metálica na amostra, em que F é a força requerida para penetrar a sonda e A, a área do ápice da sonda. O valor F é fornecido pelo equipamento como Pico C (Compressão), e representa o valor máximo entre 600 leituras individuais realizadas pelo instrumento em 120 milissegundos.

Os tratamentos foram dispostos em delineamento experimental inteiramente casualizado, com três níveis de densidade de empacotamento (solto, intermediário e compactado) para quatro composições de substrato (argila expandida, turfa de *Sphagnum*, casca de arroz carbonizada e a mistura entre esses dois últimos componentes em proporções volumétricas de 1:1), sendo as análises em laboratório realizadas em quintuplicatas, e as da casa de vegetação, em quadruplicatas.

3.2.3 Efeito do tamanho da amostra na caracterização física de substratos

Com o intuito de verificar variações em resultados de análise em função do tamanho da amostra, o qual foi referido pelo volume amostral, foram utilizados cilindros com volumes de 53,16 e 381,05 cm³. Estes foram preenchidos com os materiais turfa de *Sphagnum*, pó-de-coco, casca de arroz carbonizada e vermiculita expandida, os quais foram submetidos à caracterização das propriedades físicas nas tensões de 0, 10, 50 e 100 hPa, utilizando-se funis de tensão (funis de Büchner), conforme os princípios de De Boodt & Verdonck (1972). Os cilindros de 53,16 cm³ apresentavam dimensões de 3,0 cm de altura e 4,8 cm de diâmetro interno, enquanto os cilindros de 381,05 cm³, dimensões de 5,0 cm de altura e 9,85 cm de diâmetro interno.

Os cilindros foram preenchidos com os materiais de acordo com a sua densidade úmida, a partir do método da auto-compactação (Hoffmann, 1970), determinadas com os materiais na umidade atual uniformizada segundo Fermino (2003). Prosseguiu-se, então,

com a colocação dos cilindros com água até 2/3 de sua altura por 24 horas, e após seguiram-se os procedimentos descritos no item 3.1.2.

Os tratamentos foram dispostos em delineamento experimental inteiramente casualizado, com dois tamanhos de amostra (53,16 e 381,05 cm³), sendo testados para quatro materiais utilizados como substratos (turfa de *Sphagnum*, pó-de-coco, casca de arroz carbonizada e vermiculita expandida), e as análises em laboratório realizadas em quintuplicatas.

3.3 Análise estatística dos dados

Para os estudos referentes ao tempo de centrifugação (item 3.1.3.1), comparação entre os métodos de análise (item 3.1.4) e para verificar o efeito da compactação nos resultados de características físicas dos substratos (item 3.2.2), inicialmente, os dados foram submetidos aos testes de Kolmogorov-Smirnov e Bartlett para verificação da normalidade e homogeneidade de variâncias, respectivamente. Após atendidos esses pressupostos foram submetidos à análise de variância (ANOVA) ao nível de 5% de probabilidade de erro. Contudo, quando as variáveis não atenderam a estes pressupostos, procedeu-se a análise não paramétrica pelo teste de Kruskal-Wallis.

Na sequência, após verificada a significância da análise de variância, para o estudo do tempo de centrifugação os dados foram submetidos à análise de regressão exponencial e regressão linear. Enquanto para o estudo da comparação entre os métodos e compactação dos materiais, as médias foram comparadas pelo teste DMS (diferença mínima significativa) de Fisher. Além disso, para o estudo sobre a comparação entre os métodos de análise realizou-se, também, a análise de Correlação de Pearson.

Para os experimentos sobre a padronização da umidade inicial (item 3.2.1) e sobre o tamanho da amostra (item 3.2.3), os dados foram submetidos ao teste t de Student, e quando estes apresentaram-se como não pareados, a análise foi realizada a partir do teste de Mann-Whitney.

Para todas as análises realizadas, utilizaram-se os *software* Costat 6.4 e SigmaPlot 11.0.

3.3.1 Estudo de reprodutibilidade

Com qualquer metodologia seguida, os resultados devem apresentar variabilidades aceitáveis que sejam repetidas no tempo e por distintos laboratórios. O estudo de reprodutibilidade tem por finalidade estimar a adequação do método buscando confiabilidade, e, portanto, validade dos resultados obtidos (Vence, 2012).

Segundo procedimentos de Steel & Torrie (1988) determina-se o número necessário de observações para dados contínuos, para que se possa razoavelmente confiar que o intervalo de confiança para um erro escolhido não será maior que um valor determinado. Com base nisso, a partir dos resultados obtidos no estudo do tempo de centrifugação e para a comparação entre os métodos de análise, calculou-se o desvio padrão (S), coeficiente de variação (CV), número de repetições (η) necessárias para alcançar um nível de confiança de 95%, e o erro máximo (ε) cometido para o nível de 95 e 99% de confiança realizando-se quatro repetições, de acordo com as equações que seguem:

$$\text{Equação 29: } S = \sqrt{\frac{\sum(x_i - \bar{x})^2}{n-1}}$$

$$\text{Equação 30: } CV (\%) = \frac{S}{\bar{x}} \times 100$$

$$\text{Equação 31: } \eta \geq \left(\frac{S \times t_{(p\%, n-1)}}{\varepsilon} \right)^2$$

$$\text{Equação 32: } \varepsilon = \frac{S \times t_{(p\%, n-1)}}{\sqrt{\eta}}$$

Onde: x_i = valor obtido para cada repetição;

\bar{x} = valor médio;

$t_{(p\%, n-1)}$ = valor de t de Student, que depende do nível de confiança p (%) e dos graus de liberdade (n-1);

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Métodos de análise

4.1.1 Método baseado na norma CEN-EN13041

Os resultados referentes à curva de retenção de água, também conhecida como conteúdo hídrico volumétrico, obtidos a partir do método baseado na normatização europeia, demonstraram que a casca de arroz carbonizada foi o material que apresentou os menores valores médios quando submetida a tensões que variam de 10 a 100 hPa, com ponto de inflexão entre 10 e 50 hPa. Ou seja, ponto no qual há uma mudança mais expressiva na direção da curva. Comportamento semelhante foi observado para o pó-de-coco e para a turfa de *Sphagnum*, porém com valores bastante superiores aos verificados para casca de arroz carbonizada. Entretanto, para vermiculita expandida, houve pouca variação em função da tensão aplicada no momento da análise, indicando que toda a água disponível foi extraída da amostra já em 10 hPa (Figura 23).

Para argila expandida não houve variação da curva de retenção de água com o aumento da tensão (Figura 23), indicando a ineficiência do método para extração de água deste tipo de material. Este resultado, muito provavelmente, é consequência do fato de a argila expandida possuir um potencial matricial no interior das partículas inferior ao potencial criado a partir da tensão aplicada no sistema, ou seja, a água que está retida nos poros internos das partículas de argila expandida está em uma tensão maior que 100 hPa. Além disso, devido às características do material, é possível que ocorra descontinuidade de capilares entre as partículas e a superfície onde a tensão está sendo aplicada, o que impede a retirada de água em tensões de até 100 hPa.

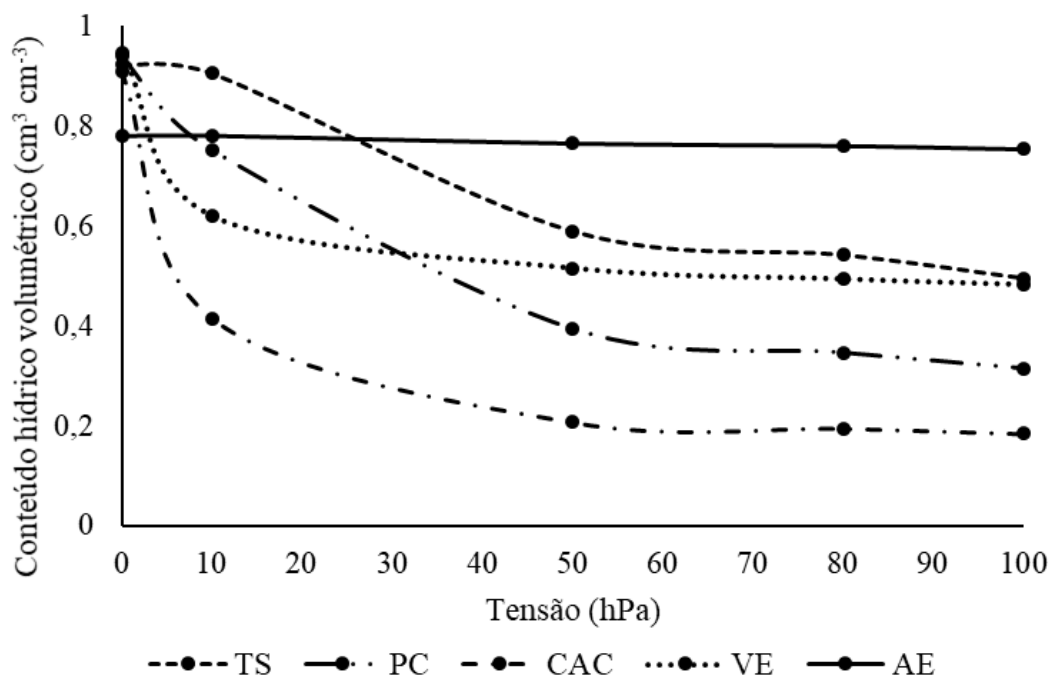


FIGURA 23. Curva de retenção de água dos materiais turfa de *Sphagnum* (TS), pó-de-coco (PC), casca de arroz carbonizada (CAC), vermiculita expandida (VE) e argila expandida (AE) determinada pelo método baseado na norma CEN-EN13041.

Os resultados dos parâmetros de caracterização física dos materiais demonstraram variação para a densidade seca de 94,27 a 716,49 kg m⁻³, sendo que a menor densidade foi observada no pó-de-coco e a maior na argila expandida (Tabela 2).

A capacidade de retenção de água, obtida a 10 cm de coluna de água, mostrou-se elevada na turfa (0,90 cm³ cm⁻³) e com valores baixos na casca de arroz carbonizada (0,42 cm³ cm⁻³). O pó-de-coco, a vermiculita e a argila expandida apresentaram valores de 0,75; 0,62 e 0,78 cm³ cm⁻³, respectivamente (Tabela 2).

Os valores de porosidade total variaram de 0,90 a 0,95 cm³ cm⁻³ para os materiais turfa de *Sphagnum*, pó-de-coco, casca de arroz carbonizada e vermiculita, enquanto para argila expandida a média foi de 0,78 cm³ cm⁻³ (Tabela 2). Quanto ao espaço de aeração, para turfa de *Sphagnum*, o valor médio foi menor quando comparado ao pó-de-coco, casca de arroz carbonizada e vermiculita expandida (Tabela 2). Isto se deve, principalmente, à elevada capacidade de retenção de água a 10 hPa deste material, já que a fórmula para o cálculo deste parâmetro se baseia na diferença entre a porosidade total e a capacidade de retenção de água. Isso explica também os valores nulos para a argila expandida, pois esta apresentou valor de CRA igual ao total de poros.

TABELA 2. Características físicas dos materiais turfa de *Sphagnum* (TS), pó-de-coco (PC), casca de arroz carbonizada (CAC), vermiculita expandida (VE) e argila expandida (AE) determinados pelo método baseado na norma CEN-EN13041.

Propriedades físicas	Materiais				
	TS	PC	CAC	VE	AE
DS (kg m ⁻³)	119,97	94,27	165,40	139,37	716,49
CRA (cm ³ cm ⁻³)	0,91	0,75	0,41	0,62	0,78
PT (cm ³ cm ⁻³)	0,93	0,94	0,90	0,95	0,78
EA (cm ³ cm ⁻³)	0,02	0,19	0,49	0,33	0,00
AD (cm ³ cm ⁻³)	0,41	0,44	0,23	0,14	0,03
AFD (cm ³ cm ⁻³)	0,32	0,36	0,21	0,11	0,02
AT (cm ³ cm ⁻³)	0,09	0,08	0,02	0,03	0,01
AR (cm ³ cm ⁻³)	0,50	0,31	0,18	0,48	0,75

DS = densidade seca; CRA = capacidade de retenção de água a 10 hPa; PT = porosidade total; EA = espaço de aeração; AD = água disponível; AFD = água facilmente disponível; AT = água tamponante; AR = água remanescente.

Em relação às características de disponibilidade de água, os materiais turfa de *Sphagnum* e pó-de-coco foram os que apresentaram os valores médios mais altos (0,41 e 0,44 cm³ cm⁻³, respectivamente), seguido de casca de arroz carbonizada (0,23 cm³ cm⁻³), vermiculita expandida (0,14 cm³ cm⁻³) e argila expandida (0,03 cm³ cm⁻³). Em contrapartida, para a água remanescente, a argila expandida foi a que apresentou o valor médio mais alto (0,75 cm³ cm⁻³) em comparação aos outros materiais, os quais demonstraram variações entre 0,18 a 0,50 cm³ cm⁻³, sendo que o menor valor foi obtido para a casca de arroz carbonizada (Tabela 2).

4.1.2 Método dos funis de Büchner

Os valores de densidade úmida e seca, obtidos a partir do método da auto-compactação, e que neste caso servem como base para o cálculo da quantidade de material a ser utilizado para a análise nos funis de Büchner, apresentaram os menores valores para turfa de *Sphagnum*, pó-de-coco, casca de arroz carbonizada e vermiculita, e os maiores valores para o material argila expandida (Tabela 3). Com isso, verifica-se que somente a argila expandida pode ser considerada como de alta densidade, segundo classificação proposta por Gonçalves & Poggiani (1996).

A partir dos resultados obtidos na determinação da relação ar-água pelo método que utiliza funis de Büchner, foi possível observar um comportamento semelhante ao obtido no

método CEN-EN13041 para a curva de retenção de água dos materiais turfa de *Sphagnum*, pó-de-coco, casca de arroz carbonizada e vermiculita expandida. Verificando-se, portanto, menor capacidade de retenção de água para a casca de arroz carbonizada e equilíbrio do conteúdo de água na vermiculita expandida. Além disso, para argila expandida também foi observada dificuldade de extração de água a partir da tensão de 10 hPa (Figura 24).

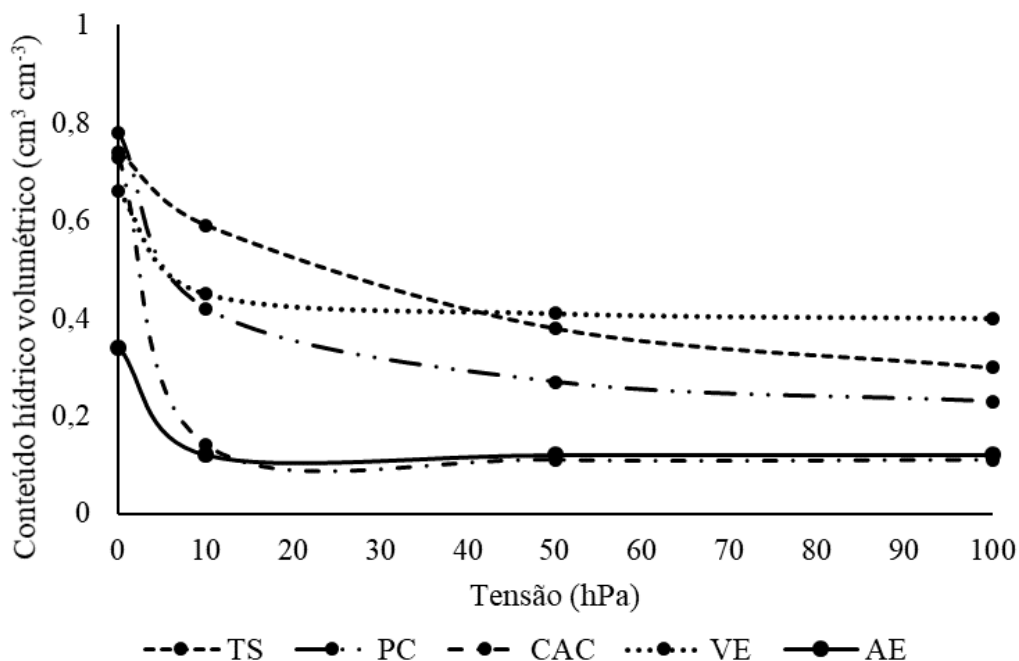


FIGURA 24. Curva de retenção de água dos materiais turfa de *Sphagnum* (TS), pó-de-coco (PC), casca de arroz carbonizada (CAC), vermiculita expandida (VE) e argila expandida (AE) determinada pelo método dos funis de Büchner.

Para a capacidade de retenção de água em 10 hPa os valores variaram de 0,12 a 0,59 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$, sendo o menor valor para a argila expandida e o maior para a turfa de *Sphagnum* (Tabela 3). Em relação à porosidade total, a variação foi de 0,34 a 0,78 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$, sendo o menor valor obtido para a argila expandida e o maior, para o pó-de-coco (Tabela 3).

No que diz respeito ao espaço de aeração, os resultados médios mostraram-se mais altos na casca de arroz carbonizada (0,58 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$), seguido do pó-de-coco (0,36 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$), da argila expandida (0,24 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$), e da vermiculita expandida e turfa de *Sphagnum*, com valores médios de 0,21 e 0,15 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$, respectivamente (Tabela 3).

TABELA 3. Características físicas dos materiais turfa de *Sphagnum* (TS), pó-de-coco (PC), casca de arroz carbonizada (CAC), vermiculita expandida (VE) e argila expandida (AE) determinados pelo método dos funis de Büchner.

Propriedades físicas	Materiais				
	TS	PC	CAC	VE	AE
DU (kg m ⁻³)	228,99	265,82	293,44	344,91	775,14
DS (kg m ⁻³)	96,58	87,66	145,06	117,99	696,12
CRA (cm ³ cm ⁻³)	0,59	0,42	0,15	0,45	0,12
PT (cm ³ cm ⁻³)	0,74	0,78	0,73	0,66	0,36
EA (cm ³ cm ⁻³)	0,15	0,36	0,58	0,21	0,24
AD (cm ³ cm ⁻³)	0,29	0,19	0,04	0,05	0,00
AFD (cm ³ cm ⁻³)	0,20	0,16	0,04	0,05	0,00
AT (cm ³ cm ⁻³)	0,08	0,03	0,004	0,008	0,00
AR (cm ³ cm ⁻³)	0,30	0,23	0,11	0,40	0,12

DU = densidade úmida; DS = densidade seca; CRA = capacidade de retenção de água a 10 hPa; PT = porosidade total; EA = espaço de aeração; AD = água disponível; AFD = água facilmente disponível; AT = água tamponante; AR = água remanescente.

No que diz respeito aos valores de disponibilidade de água, a casca de arroz carbonizada, a vermiculita e a argila expandida apresentaram valores insuficientes para água disponível, apresentando valores próximos a zero e/ou nulos. Enquanto para água remanescente, as maiores médias obtidas foram para vermiculita expandida e turfa de *Sphagnum* (0,40 e 0,30 cm³ cm⁻³, respectivamente) (Tabela 3).

4.1.3 Método alternativo: centrifugação das amostras

4.1.3.1 Estudo do tempo de centrifugação

O estudo do tempo necessário de centrifugação para os materiais turfa de *Sphagnum*, pó-de-coco, casca de arroz carbonizada, vermiculita e argila expandida, foi realizado, independentemente, em cada tensão (10, 50 e 100 hPa), até obter-se o equilíbrio de umidade nas amostras.

Os resultados obtidos a partir da regressão exponencial do conteúdo hídrico volumétrico (cm³ cm⁻³) retido nos materiais após os tempos de centrifugação mostraram um ponto de inflexão na curva próximo aos 30 minutos (Figuras 25 e 26). Isto indica uma tendência ao equilíbrio da umidade após 30 minutos de centrifugação para cada velocidade angular equivalente aos pontos de tensão de 10, 50 e 100 hPa.

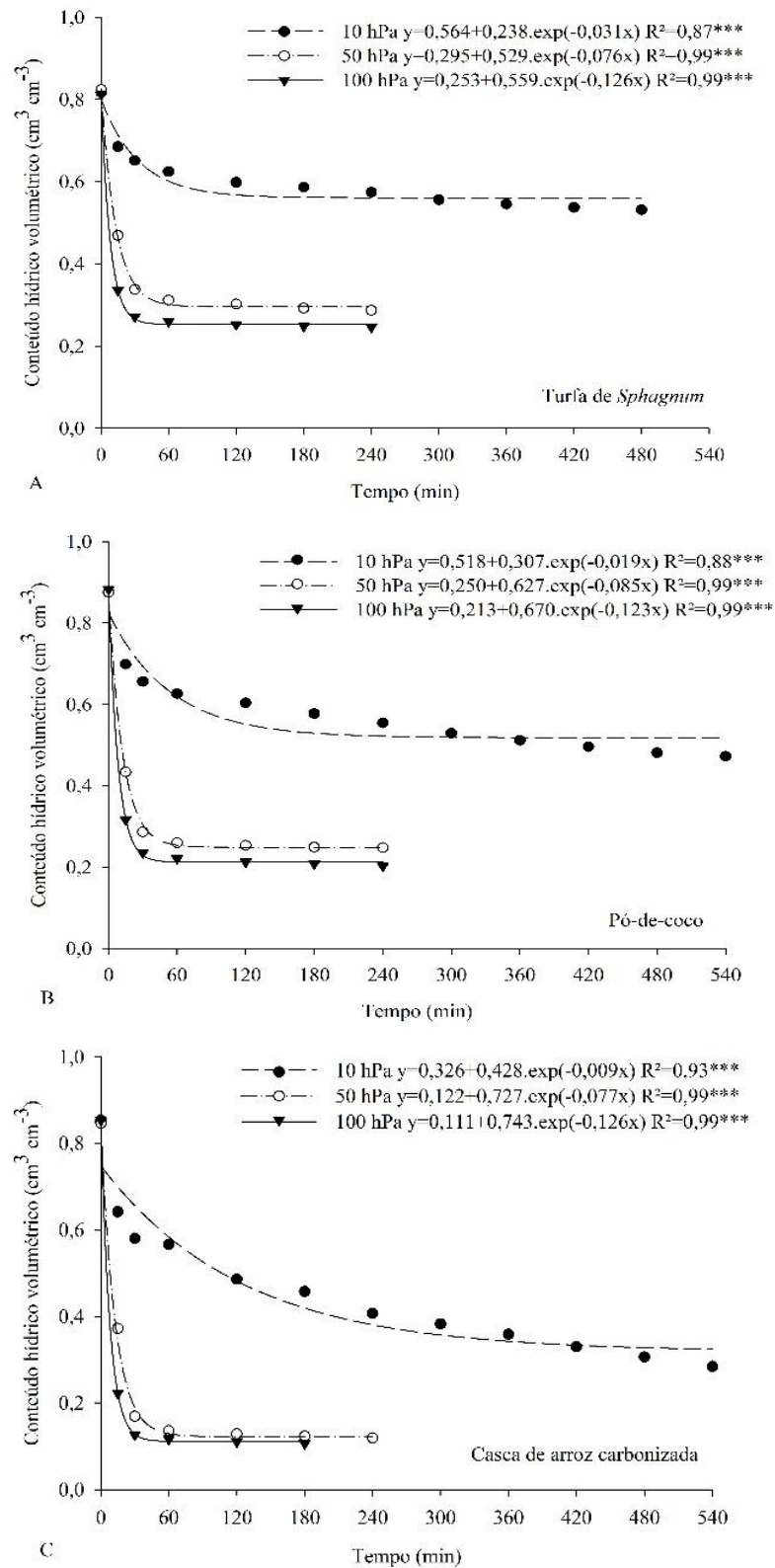


FIGURA 25. Conteúdo hídrico volumétrico ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$) retido em amostras após tempos de centrifugação para velocidades angulares equivalentes a 10, 50 e 100 hPa. A = turfa de *Sphagnum*; B = pó-de-coco; C = casca de arroz carbonizada. *** = $p < 0,001$.

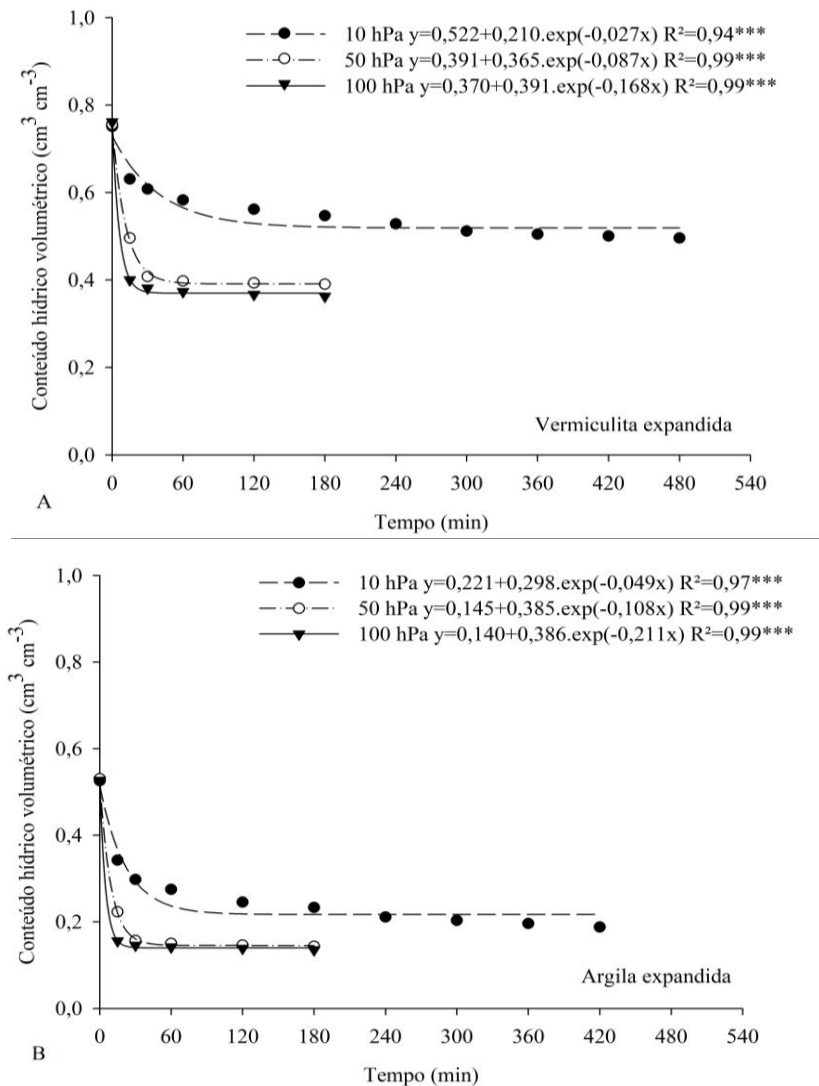


FIGURA 26. Conteúdo hídrico volumétrico ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$) retido em amostras após tempos de centrifugação para velocidades angulares equivalentes a 10, 50 e 100 hPa. A = vermiculita expandida; B = argila expandida. *** = $p < 0,001$.

A partir do modelo exponencial, realizaram-se novos ajustes lineares considerando o conteúdo hídrico volumétrico após os 30 minutos de centrifugação até o último tempo testado para cada material em dada velocidade angular, independentemente (Figuras 27 e 28), já que foi após estes 30 minutos que houve uma tendência ao equilíbrio da umidade remanescente na amostra. Estes ajustes foram realizados a fim de se obter o ponto de estabilização da umidade em função do tempo de centrifugação necessário para extração de toda água disponível em velocidades angulares equivalentes a 10, 50 e 100 hPa.

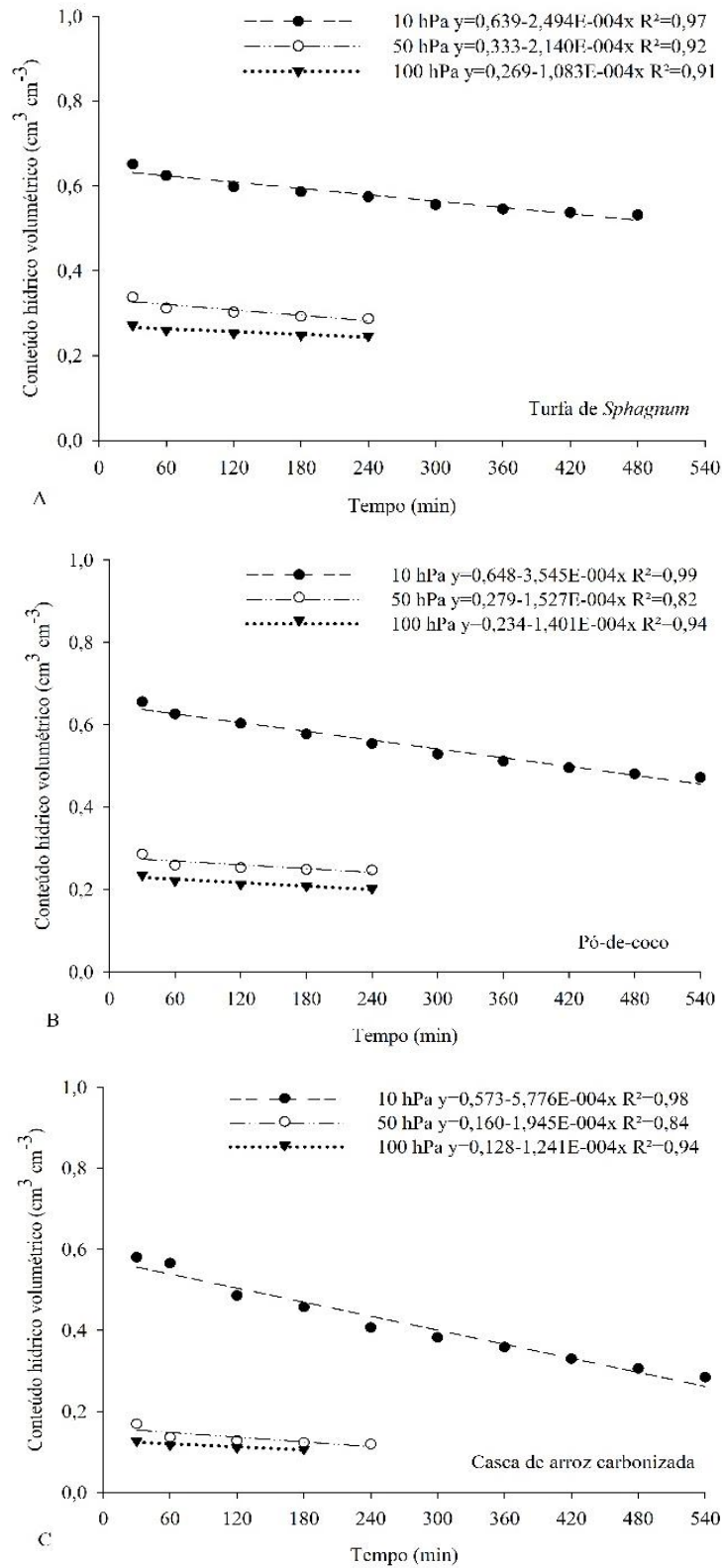


FIGURA 27. Estabilização da umidade em função do tempo de centrifugação para extração da água disponível em velocidades angulares equivalentes a 10, 50 e 100 hPa, medido a partir do conteúdo hídrico volumétrico, após os 30 primeiros minutos de centrifugação. A = turfa de *Sphagnum*; B = pó-de-coco; C = casca de arroz carbonizada.

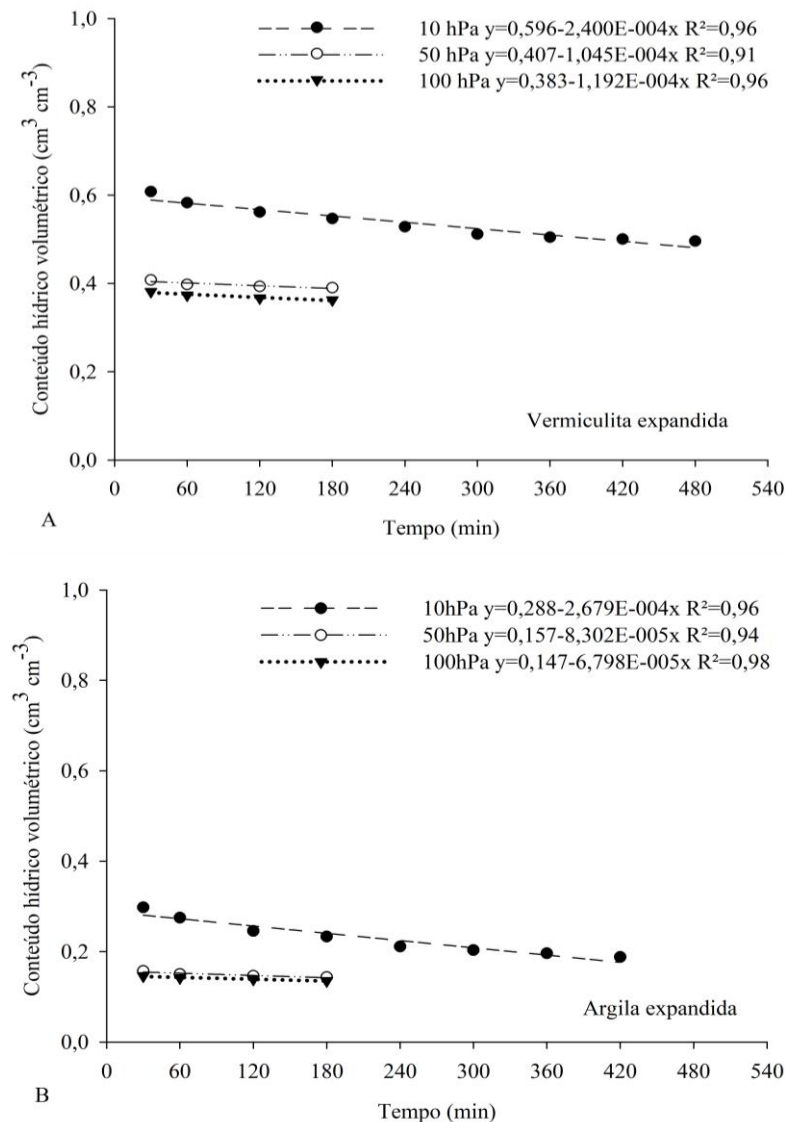


FIGURA 28. Estabilização da umidade em função do tempo de centrifugação para extração da água disponível em velocidades angulares equivalentes a 10, 50 e 100 hPa, medido a partir do conteúdo hídrico volumétrico, após os 30 primeiros minutos de centrifugação. A = vermiculita expandida; B = argila expandida.

As regressões lineares apresentaram coeficientes de determinação (R^2) acima de 0,84 (Figuras 27 e 28), indicando confiabilidade no ajuste do modelo realizado. Desta maneira, tais ajustes confirmam a hipótese do equilíbrio da umidade após 30 minutos de centrifugação para as três velocidades angulares (230; 520 e 730 rpm) equivalentes aos pontos de tensão 10, 50 e 100 hPa, para os materiais turfa de *Sphagnum* (Figura 27A), pó-de-coco (Figura 27B), vermiculita (Figura 28A) e argila expandida (Figura 28B). Entretanto, para a casca de arroz carbonizada (Figura 27C), verifica-se que há decréscimo

no conteúdo hídrico volumétrico à medida que aumenta o tempo de centrifugação para o ponto 10 de tensão (10 hPa), indicando que o tempo necessário para extração de toda água disponível a uma dada tensão varia de acordo com o material analisado.

Com base nos resultados das regressões lineares mostradas nas Figuras 27 e 28, e a fim de proporcionar uma análise para a determinação do tempo necessário de centrifugação, para cada material em cada velocidade angular testada, que possa ser realizada de forma prática pelos laboratórios no momento da centrifugação das amostras, procedeu-se o ajuste de regressões lineares a partir dos dados de massa do conjunto de cilindros para cada três tempos de centrifugação consecutivos.

Quando o coeficiente de determinação (R^2) para as regressões lineares entre três tempos de centrifugação consecutivos foi maior ou igual a 0,97, considerou-se que a umidade remanescente na amostra havia entrado em equilíbrio a partir de determinado período de centrifugação, ou seja, que tempos de centrifugação superiores a estes não estavam extraindo quantidades de água significantes da amostra, e por isso, definindo o tempo necessário de centrifugação.

O tempo de centrifugação necessário para extração da água disponível a uma determinada velocidade angular variou entre os materiais. Para turfa de *Sphagnum*, obteve-se um R^2 de 0,99 para o ajuste linear entre 120, 180 e 240 minutos de centrifugação para o ponto de tensão de 10 hPa. Enquanto, para os pontos de tensão 50 e 100 hPa, o coeficiente de determinação foi maior ou igual a 0,97 para o ajuste entre 60, 120 e 180 minutos (Tabela 4). Com isso, é possível inferir que para este componente em questão são necessários 240 minutos de centrifugação para uma velocidade angular equivalente a 10 hPa de tensão, e 180 minutos para velocidades que correspondem aos pontos 50 e 100 hPa.

Para os materiais casca de arroz carbonizada (Tabela 4) e argila expandida (Tabela 5), os tempos necessários de centrifugação para os pontos 10, 50 e 100 hPa apresentaram o mesmo comportamento do obtido para turfa de *Sphagnum*, ou seja, equilíbrio da umidade nos tempos de centrifugação para 10 hPa em 240 minutos, e para 50 e 100 hPa com 180 minutos. Em contrapartida, para pó-de-coco (Tabela 4) e vermiculita expandida (Tabela 5), os ajustes com coeficiente de determinação igual ou superior a 0,97 foram obtidos entre os tempos de 60, 120 e 180 minutos, para as três velocidades angulares equivalentes à 10, 50 e 100 hPa, ou seja, adotou-se o tempo de 180 minutos de centrifugação, período

considerado suficiente para a obtenção do equilíbrio da água retida nas amostras em velocidades angulares equivalentes as tensão de 10, 50 e 100 hPa.

TABELA 4. Regressões lineares e coeficiente de determinação (R^2) calculados para um intervalo de três tempos de centrifugação, utilizados para determinar o tempo necessário para extrair toda água disponível a uma determinada tensão para os materiais turfa de *Sphagnum*, pó-de-coco e casca de arroz carbonizada.

Tempo (min)	10 hPa		50 hPa		100 hPa	
	Equação	R^2	Equação	R^2	Equação	R^2
<i>Turfa de Sphagnum</i>						
15 a 60	$y=622,95-0,4694x$	0,94	$y=544,55-1,1429x$	0,72	$y=493,72-0,5502x$	0,71
30 a 120	$y=610,52-0,2085x$	0,96	$y=493,45-0,1324x$	0,81	$y=469,45-0,0736x$	0,90
60 a 180	$y=601,96-0,1166x$	0,96	$y=485,75-0,0593x$	0,99	$y=465,57-0,034x$	0,97
120 a 240	$y=594,89-0,0724x$	0,99*	$y=483,95-0,0463x$	0,97	$y=463,04-0,0175x$	0,97
180 a 300	$y=598,85-0,0922x$	0,98	-	-	-	-
240 a 360	$y=598,25-0,0883x$	0,98	-	-	-	-
300 a 420	$y=587,82-0,0573x$	0,99	-	-	-	-
360 a 480	$y=583,41-0,046x$	0,99	-	-	-	-
420 a 540	-	-	-	-	-	-
<i>Pó-de-coco</i>						
15 a 60	$y=623,15-0,5536x$	0,92	$y=525,19-1,2561x$	0,71	$y=480,79-0,6908x$	0,7
30 a 120	$y=606,37-0,2024x$	0,93	$y=467,82-0,1221x$	0,74	$y=449,94-0,0856x$	0,89
60 a 180	$y=600,58-0,1498x$	0,99	$y=458,56-0,0321x$	0,98	$y=445,30-0,0386x$	0,97
120 a 240	$y=600,83-0,1501x$	0,99	$y=456,35-0,0174x$	0,94	$y=444,09-0,0316x$	0,99
180 a 300	$y=600,01-0,147x$	0,99	-	-	-	-
240 a 360	$y=595,97-0,1309x$	0,99	-	-	-	-
300 a 420	$y=586,09-0,1015x$	0,99	-	-	-	-
360 a 480	$y=582,5-0,0924x$	0,99	-	-	-	-
420 a 540	$y=573,29-0,0716x$	0,98	-	-	-	-
<i>Casca de arroz carbonizada</i>						
15 a 60	$y=623,89-0,5632x$	0,76	$y=529,57-1,7026x$	0,70	$y=470,28-0,7542x$	0,65
30 a 120	$y=613,06-0,3978x$	0,94	$y=450,67-0,1488x$	0,74	$y=434,57-0,0623x$	0,91
60 a 180	$y=609,45-0,3271x$	0,93	$y=439,38-0,0395x$	0,99	$y=431,48-0,0309x$	0,98
120 a 240	$y=594,80-0,2443x$	0,97	$y=437,58-0,0277x$	0,99	-	-
180 a 300	$y=593,66-0,2316x$	0,96	-	-	-	-
240 a 360	$y=570,10-0,1473x$	0,99	-	-	-	-
300 a 420	$y=574,35-0,1607x$	0,99	-	-	-	-
360 a 480	$y=574,47-0,1603x$	0,99	-	-	-	-
420 a 540	$y=564,58-0,1385x$	0,99	-	-	-	-

* Em negrito as equações e coeficientes de determinação para os tempos de centrifugação necessários para extrair toda água disponível a uma determinada tensão.

TABELA 5. Regressões lineares e coeficiente de determinação (R^2) calculados para um intervalo de três tempos de centrifugação, utilizados para determinar o tempo necessário para extrair toda água disponível a uma determinada tensão para os materiais vermiculita expandida e argila expandida.

Tempo (min)	10 hPa		50 hPa		100 hPa	
	Equação	R ²	Equação	R ²	Equação	R ²
Vermiculita expandida						
15 a 60	$y=617,31-0,3763x$	0,95	$y=566,9-0,7011x$	0,66	$y=531,83-0,2019x$	0,84
30 a 120	$y=608,27-0,1796x$	0,95	$y=533,68-0,0548x$	0,85	$y=524,67-0,057x$	0,94
60 a 180	$y=601,43-0,1095x$	0,99	$y=530,42-0,0225x$	0,98	$y=522,3-0,0327x$	0,98
120 a 240	$y=599,94-0,1017x$	0,99	-	-	-	-
180 a 300	$y=601,41-0,1078x$	0,99	-	-	-	-
240 a 360	$y=595,63-0,0861x$	0,99	-	-	-	-
300 a 420	$y=583,12-0,048x$	0,93	-	-	-	-
360 a 480	$y=574,52-0,0266x$	0,99	-	-	-	-
420 a 540	-	-	-	-	-	-
Argila expandida						
15 a 60	$y=697,94-0,5299x$	0,88	$y=655,90-0,5201x$	0,65	$y=630,21-0,1069x$	0,83
30 a 120	$y=681,99-0,2055x$	0,96	$y=631,18-0,0407x$	0,89	$y=626,31-0,0279x$	0,92
60 a 180	$y=674,14-0,1203x$	0,96	$y=629,14-0,0205x$	0,99	$y=625,47-0,0203x$	0,99
120 a 240	$y=671,11-0,1049x$	0,98	-	-	-	-
180 a 300	$y=670,35-0,0982x$	0,96	-	-	-	-
240 a 360	$y=657,82-0,0527x$	0,98	-	-	-	-
300 a 420	$y=659,18-0,0576x$	0,98	-	-	-	-
360 a 480	-	-	-	-	-	-
420 a 540	-	-	-	-	-	-

* Em negrito as equações e coeficientes de determinação para os tempos de centrifugação necessários para extrair toda água disponível a uma determinada tensão.

A variação do tempo de centrifugação determinado para cada material e para cada velocidade angular correspondente às tensões testadas, pode estar relacionado com a variabilidade do tamanho e arranjo das partículas dos componentes utilizados como substratos, e por isso não se pode chegar a um tempo de centrifugação geral para todos os materiais utilizados. No entanto, as análises realizadas neste estudo para determinar o tempo necessário de centrifugação a uma dada velocidade angular, permite que este método seja utilizado para determinação da curva de retenção de água de diversos materiais utilizados como substratos, pois conforme os procedimentos de análise propostos, é realizado o ajuste de regressões lineares entre três pesagens subsequentes no momento em que o operador está realizando a centrifugação, considerando-se o equilíbrio

da umidade na amostra quando alcançado o coeficiente de determinação estipulado como adequado.

O estudo de reprodutibilidade dos resultados tem por finalidade estimar a adequação do método proposto, possibilitando obter o número de repetições necessárias a serem realizadas para se chegar a resultados confiáveis (Noguera, 1999; Vence, 2008; Valenzuela, 2009, Vence *et al.*, 2010; Vence, 2012). Este estudo estatístico evidenciou que a variabilidade, demonstrada pelos coeficientes de variação, para os tempos de centrifugação adotados como suficientes (Tabelas 4 e 5) para extração de toda água disponível a uma determinada tensão, foi considerada baixa (Tabela 6). No entanto, esta variação é dependente do material que está sendo analisado e da velocidade angular a que este esteja sendo submetido.

Neste contexto, foi possível observar maior variabilidade para os materiais de origem orgânica (turfa de *Sphagnum*, pó-de-coco e casca de arroz carbonizada) na velocidade angular correspondente a 10 hPa de tensão. Isto indica que seria necessário um número maior de repetições para erros máximos de 10 e 5%. Contudo, para os materiais de origem mineral (vermiculita e argila expandida), seria necessária apenas uma repetição para atender esses valores de erros máximos considerados para todos os pontos de tensão testados (Tabela 6).

TABELA 6. Variabilidade dos resultados de conteúdo hídrico volumétrico demonstrado pelo coeficiente de variação (CV). Erro máximo (ϵ max) calculado para distintas probabilidades ($p < 0,05$ e $p < 0,01$), e número de repetições necessárias (η) calculadas para erros (ϵ) máximos de 10 e 5%, obtidos em centrífuga com velocidade angular equivalente às tensões de 10, 50 e 100 hPa, para os materiais turfa de *Sphagnum*, pó-de-coco, casca de arroz carbonizada, vermiculita expandida e argila expandida.

Materiais	Tensão (hPa)	CV (%)	ϵ max		η	
					$p \leq 0,05$	
			$p \leq 0,01$	$p \leq 0,05$	$\epsilon = 10\%$	$\epsilon = 5\%$
Turfa de <i>Sphagnum</i>	10	9,71	0,16	0,09	3	13
	50	2,13	0,02	0,001	1	1
	100	7,49	0,05	0,03	1	1
Pó-de-coco	10	8,66	0,15	0,08	3	10
	50	2,10	0,02	0,008	1	1
	100	4,65	0,03	0,02	1	1
Casca de arroz carbonizada	10	9,34	0,11	0,06	1	6
	50	3,81	0,01	0,007	1	1
	100	5,90	0,02	0,01	1	1
Vermiculita expandida	10	3,27	0,05	0,03	1	1
	50	5,37	0,06	0,03	1	1
	100	3,27	0,03	0,02	1	1
Argila expandida	10	6,33	0,04	0,02	1	1
	50	6,71	0,03	0,02	1	1
	100	4,61	0,02	0,009	1	1

4.1.3.2 Determinação dos parâmetros da caracterização física dos substratos

Os valores de densidade úmida e seca utilizados neste método são os mesmos daqueles obtidos a partir do método da auto-compactação, e utilizados para o cálculo da quantidade de material a ser utilizado para análise nos funis de Büchner.

Em relação aos atributos que determinam a proporção ar-água dos substratos foi possível observar, a partir da relação entre o conteúdo hídrico volumétrico e as tensões que variam de 0 a 100 hPa (Figura 29), que a casca de arroz carbonizada e a argila expandida foram os materiais com menor capacidade de retenção de água. Entretanto, a vermiculita

expandida foi o material que apresentou o mais alto conteúdo hídrico volumétrico, semelhante aos resultados obtidos com a utilização dos funis de Büchner, em função do elevado conteúdo de água remanescente deste material (Tabela 7).

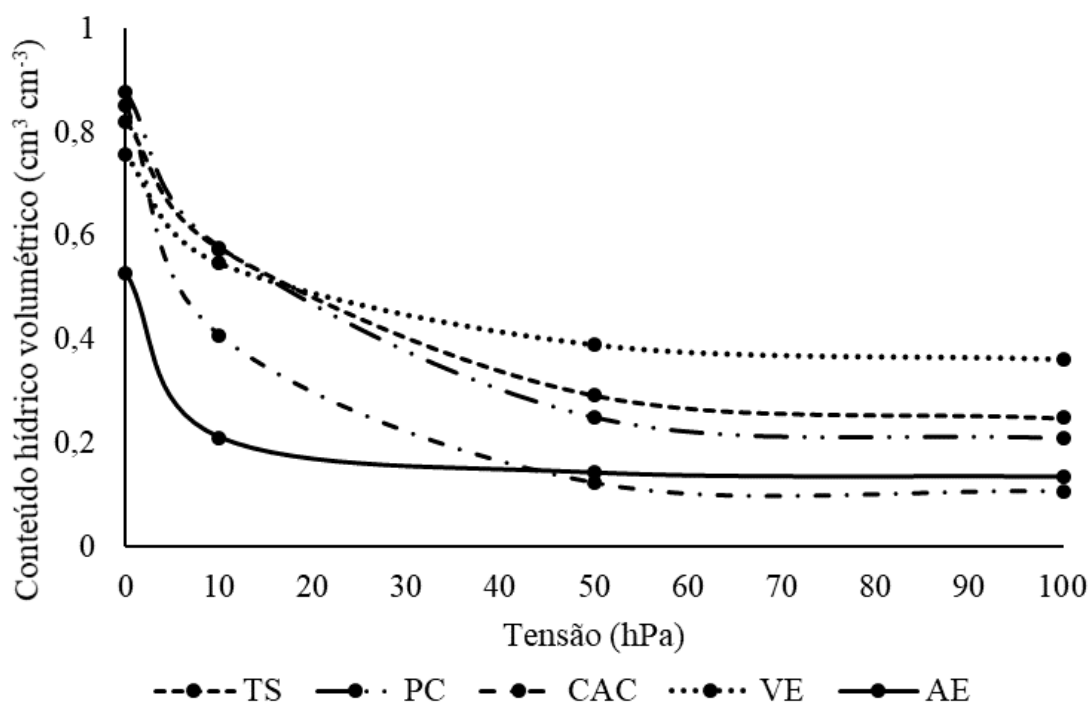


FIGURA 29. Curva de retenção de água dos materiais turfa de *Sphagnum* (TS), pó-de-coco (PC), casca de arroz carbonizada (CAC), vermiculita expandida (VE) e argila expandida (AE) determinada pelo método da centrifugação das amostras.

Em relação à capacidade de retenção de água medida a 10 hPa, os valores médios mais altos foram verificados no pó-de-coco, turfa de *Sphagnum* e vermiculita, seguido da casca de arroz carbonizada e argila expandida (0,58; 0,57; 0,55; 0,41 e 0,22, respectivamente) (Tabela 7).

Os resultados para o parâmetro porosidade total variaram de 0,88 a 0,54 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$, sendo que para turfa de *Sphagnum*, pó-de-coco e casca de arroz carbonizada foram obtidos os valores médios mais altos (0,82; 0,88 e 0,85 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$, respectivamente). Contudo, em relação ao espaço de aeração, as médias mais altas foram observadas na casca de arroz carbonizada (0,44 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$), argila expandida (0,32 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$) e pó-de-coco (0,30 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$) (Tabela 7).

TABELA 7. Características físicas dos materiais turfa de *Sphagnum* (TS), pó-de-coco (PC), casca de arroz carbonizada (CAC), vermiculita expandida (VE) e argila expandida (AE) determinados pelo método da centrifugação das amostras.

Propriedades físicas	Materiais				
	TS	PC	CAC	VE	AE
DU (kg m ⁻³)	228,99	265,82	293,44	344,91	775,14
DS (kg m ⁻³)	96,58	87,66	145,06	117,99	696,12
CRA (cm ³ cm ⁻³)	0,57	0,58	0,41	0,55	0,22
PT (cm ³ cm ⁻³)	0,82	0,88	0,85	0,76	0,54
EA (cm ³ cm ⁻³)	0,25	0,30	0,44	0,21	0,32
AD (cm ³ cm ⁻³)	0,32	0,37	0,30	0,19	0,08
AFD (cm ³ cm ⁻³)	0,28	0,33	0,28	0,16	0,07
AT (cm ³ cm ⁻³)	0,04	0,04	0,02	0,03	0,01
AR (cm ³ cm ⁻³)	0,25	0,21	0,11	0,36	0,14

DU = densidade úmida; DS = densidade seca; CRA = capacidade de retenção de água a 10 hPa; PT = porosidade total; EA = espaço de aeração; AD = água disponível; AFD = água facilmente disponível; AT = água tamponante; AR = água remanescente.

Quanto às características de disponibilidade de água, os três materiais de origem orgânica testados neste estudo (turfa de *Sphagnum*, pó-de-coco e casca de arroz carbonizada) apresentaram os valores médios mais altos de água disponível em relação aos materiais de origem mineral, vermiculita e argila expandida (Tabela 7).

Para a água remanescente os valores variaram de 0,11 a 0,36 cm³ cm⁻³, em que o maior resultado foi obtido para vermiculita expandida e o menor, para a casca de arroz carbonizada. Para a turfa de *Sphagnum*, o valor médio foi de 0,25 cm³ cm⁻³, para o pó-de-coco de 0,21 cm³ cm⁻³, e para a argila expandida, de 0,14 cm³ cm⁻³ (Tabela 7).

4.1.4 Comparação entre métodos de análise

Os gráficos da curva de retenção de água obtidos a partir do método CEN-EN13041, do método dos funis de Büchner e do método da centrifugação das amostras mostram que os resultados para todos os materiais testados, com exceção da argila expandida (Figura 31B), são paralelos entre os três métodos de análise. Para turfa de *Sphagnum* (Figura 30A) e pó-de-coco (Figura 30B) os resultados foram mais altos no método CEN-EN13041. Este efeito se deve à dupla saturação e pré-tensionamento a 50 hPa do método europeu, o que incrementa o conteúdo de água inicial das amostras. Isto pode estar atrelado ao fato de que a maioria dos componentes orgânicos que são utilizados como substratos, como por exemplo a turfa de *Sphagnum* e o pó-de-coco, apresentarem

microporosidade interna e hidrofobicidade, quando secos, dificultando que a sua saturação seja completa (Raviv *et al.*, 2004; Vence, 2012). Por isso, a dupla saturação atua promovendo maior entrada de água nos microporos garantindo a total saturação dos materiais.

No que diz respeito à casca de arroz carbonizada (Figura 30C) e vermiculita expandida (Figura 31A), os resultados obtidos com a centrifugação são bastante semelhantes aos obtidos pelos métodos considerados neste estudo como padrão (CEN-EN13041 e funis de Büchner). Entretanto, para argila expandida, os valores da curva de retenção de água resultante do método baseado na normatização europeia foram mais altos aos verificados com a centrifugação das amostras e com o método dos funis (Figura 31B), isso porque a tensão aplicada nestes sistemas de análise (CEN-EN13041 e funis de Büchner) pode estar sendo inferior àquela contida dentro das partículas deste material. Além disso, a extração de água deste material pelo método da centrifugação das amostras se mostra mais coerente quando comparado com os funis de Büchner, pois verificou-se um leve incremento do conteúdo volumétrico de água da tensão de 10 para 50 e 100 hPa nos funis, o que vem ao encontro da hipótese de que a tensão aplicada nos leitos de areia e nos funis não se distribua de maneira uniforme em toda a amostra, e ainda, que a tensão no interior das partículas seja superior à tensão de análise.

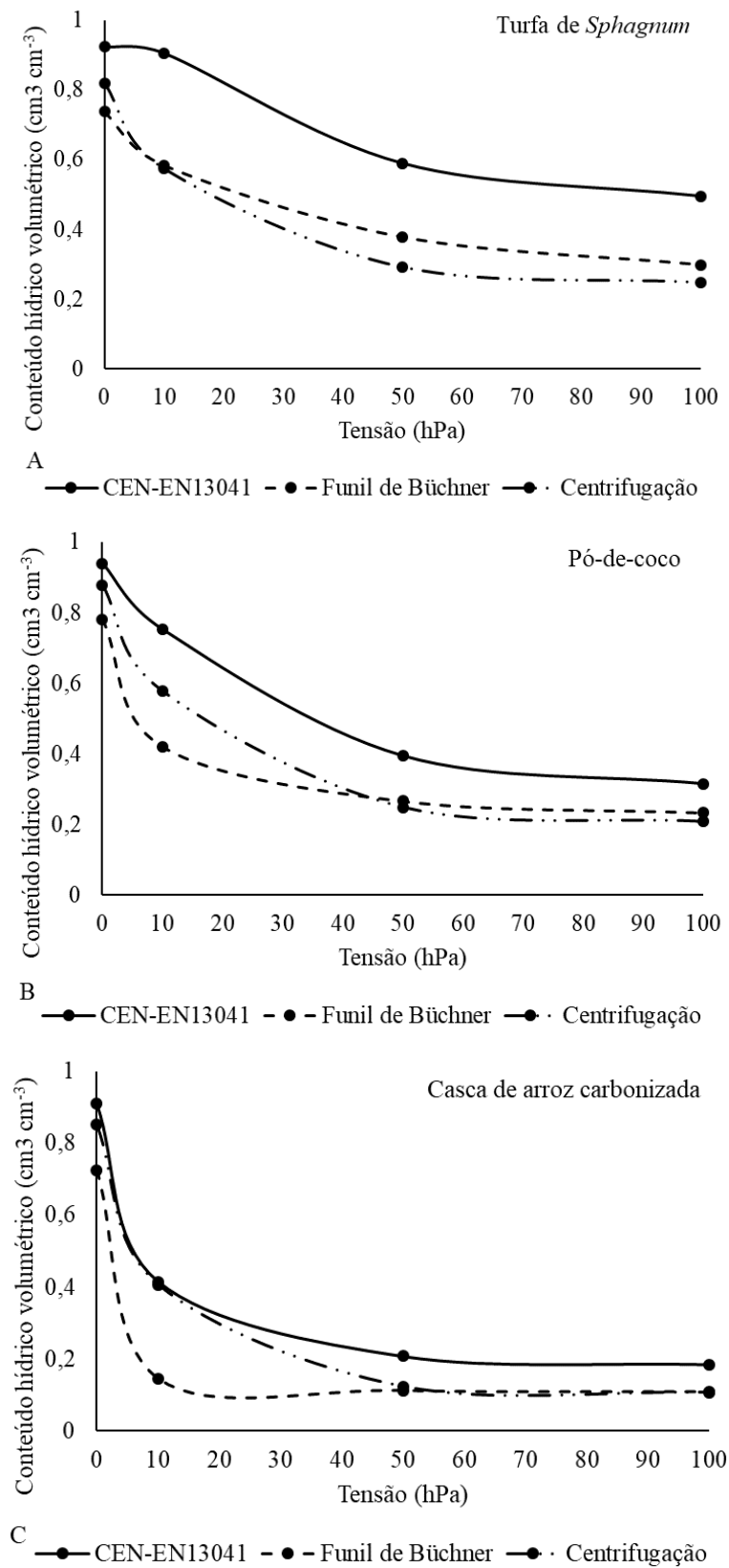


FIGURA 30. Curva de retenção de água dos materiais turfa de *Sphagnum* (A), pó-de-coco (B) e casca de arroz carbonizada (C) determinada pelos métodos de análise CEN-EN13041, funil de Büchner e centrifugação das amostras.

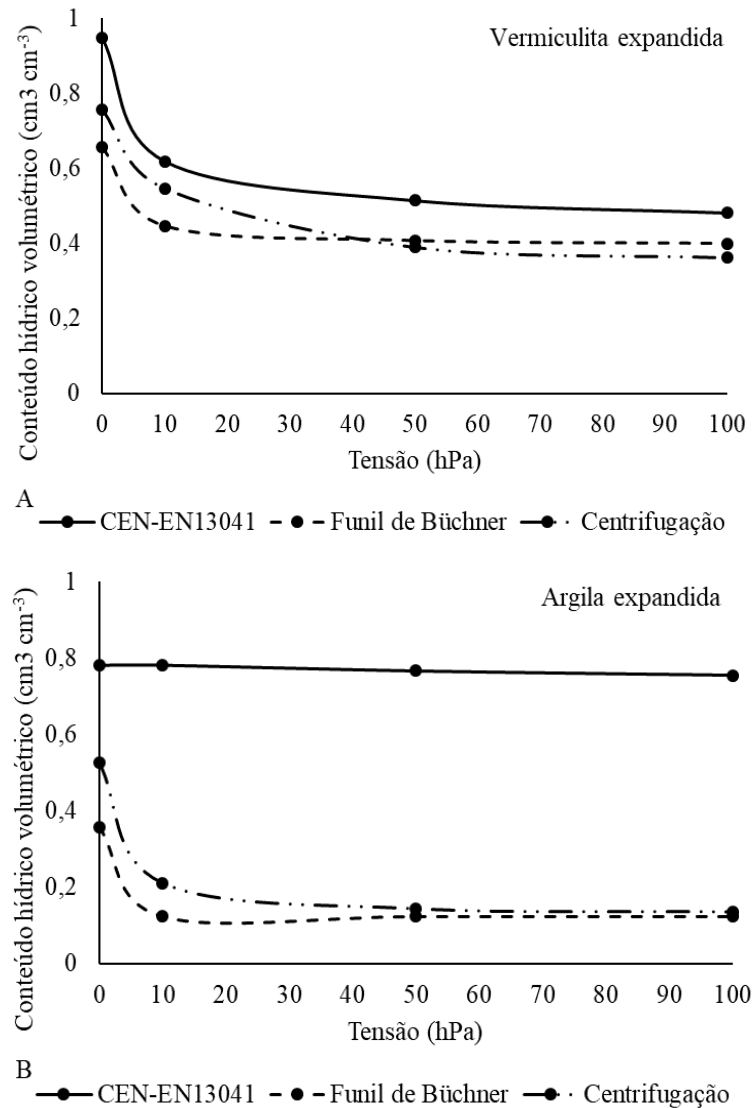


FIGURA 31. Curva de retenção de água dos materiais vermiculita expandida (A) e argila expandida (B) determinada pelos métodos de análise CEN-EN13041, funis de Büchner e centrifugação das amostras.

Segundo Martínez (2002) a argila expandida é um material com estruturas e formas estáveis, e que apresenta partículas com poros internos. Neste sentido, provavelmente a força centrífuga aplicada neste material permitiu a extração da água destes poros internos, o que não foi possível com a aplicação dos outros dois métodos testados (CEN-EN13041 e funis de Büchner). Pois, para o método europeu o conteúdo hídrico volumétrico foi mais alto aos valores obtidos com a centrifugação, e com a utilização dos funis houve equilíbrio da umidade remanescente nas amostras a partir da tensão de 10 hPa, ou seja, não sendo possível extrair água deste material em tensões que variam de 10 a 100 hPa. Este resultado pode ser mais bem explicado a partir do volume de água remanescente contido nas

amostras de argila expandida após serem submetidas à centrifugação, expressando valores inferiores aos apresentados na caracterização pelo método baseado na norma europeia. Diante disso, contata-se que com a centrifugação foi possível extrair água deste material, sendo, por isso, um método mais eficiente em comparação aos funis de Büchner e CEN-EN13041.

Considerando os aspectos físicos envolvidos nas metodologias testadas, no que diz respeito às forças exercidas sobre a água das amostras, o ponto incomum entre os métodos é a forma como a tensão é aplicada. Qual seja: na centrifugação a água é impulsionada por uma força centrífuga positiva, com módulos pré-definidos e comuns entre os métodos (10, 50 e 100 hPa), e nos demais, a força que extrai a água das amostras provém de uma pressão negativa (tensão), a qual só ocorre na presença de capilares interligados (capilaridade entre partículas). Dependendo do material, a conexão destes capilares pode não ocorrer e a tensão aplicada é descontinuada, o que torna a força de coesão das moléculas de água, bem como a adsorção dessas pelas partículas de substratos, superiores em módulo, fazendo com que a água permaneça na amostra. Ou seja, o que o método da centrífuga consegue, e os outros não, é agir retirando a água sem a interferência de fatores como a conexão de vasos. Essa é uma provável causa da ineficiência dos métodos CEN-EN13041 e funis de Büchner na determinação da curva de retenção de água da argila expandida, por exemplo.

A conexão dos vasos entre o material e a superfície onde a tensão é aplicada, pode, ainda, estar sendo influenciada por um terceiro elemento, o tecido voal utilizado para vedação do fundo dos cilindros ou a qualidade do papel filtro colocado entre o material e a superfície de tensionamento, seja no método CEN-EN13041 ou no método dos funis de Büchner. Esses elementos, com características físicas distintas do material em análise, e também da superfície onde é aplicada a tensão, tornam-se pontos vulneráveis à descontinuidade de capilares, que são essenciais para a distribuição da tensão na amostra. Essa camada de voal ou papel, portanto, divide o principal ponto de ligação entre as forças físicas aplicadas, e a amostra, podendo provocar a descontinuidade do filme de água que envolve as partículas, fazendo com que a tensão exercida no ponto de sua aplicação não se distribua de maneira uniforme por toda a superfície de contato da amostra com o leito de areia e/ou os funis de Büchner.

Pelo método da centrifugação, os resultados se mostram, portanto, coerentes em termos de extração de água para materiais de difícil análise, como a argila expandida, pois

não se verificam valores negativos ou nulos quando aplicadas velocidades angulares correspondentes às tensões de 10, 50 e 100 hPa, diferentemente do que ocorre nos métodos que utilizam os funis de Büchner e leitos de areia (CEN-EN13041) como sistemas de tensionamento das amostras. Isto reforça a hipótese de que a centrifugação de amostras é um método viável para determinação de características físicas de substratos, pois proporciona maior confiabilidade dos resultados, viabilizando a determinação das características do conteúdo de ar e água de substratos de difícil análise.

Estudos comparando diversos métodos de análise dos parâmetros relacionados ao conteúdo hídrico volumétrico correspondente às tensões aplicadas (10 a 100 hPa), mostram que os resultados são influenciados por diversos fatores, como pelo efeito da saturação e/ou compactação dos materiais, pelos dispositivos de tensão utilizados, pelo ponto de referência a partir do qual é considerado o tensionamento, pela umidade inicial das amostras durante a determinação da densidade, pela presença de cilindros sobrepostos e pelo volume da amostra (Fermino, 2003; Spier, 2008, Diaz, 2010; Vence *et al.*, 2010; Vence, 2012; Zorzeto *et al.*, 2014). Verifica-se, portanto, que há diferenças nos resultados de análises em função do método de determinação utilizado, principalmente, em função da manipulação das amostras antes e durante as análises.

Em relação ao método do presente estudo, que consiste na centrifugação das amostras, apesar das diferenças na comparação com os dois outros métodos de análise, para todos os materiais testados nas tensões de 10, 50 e 100 hPa, houve correlação positiva e altamente significativa da centrifugação com os outros dois métodos, indicando ser uma metodologia de análise promissora para determinação do conteúdo hídrico volumétrico dos substratos, e conseqüentemente, da sua caracterização física.

Para turfa de *Sphagnum*, a análise de correlação mostrou elevado coeficiente de correlação positivo do conteúdo hídrico volumétrico ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) entre o método CEN-EN13041 e funis de Büchner ($r = 0,986$). Esse resultado foi obtido também quando correlacionado o método da centrifugação com o baseado na normatização europeia (Figura 32A) e com os funis de Büchner (Figura 32B).

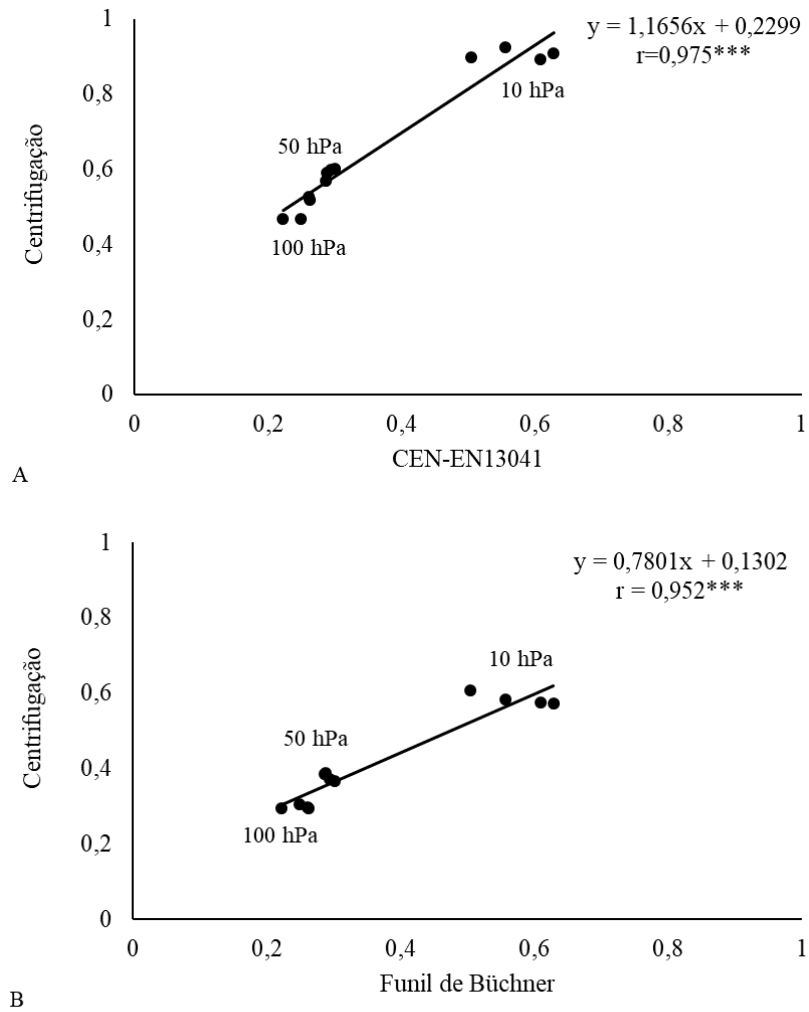


FIGURA 32. Correlação do conteúdo hídrico volumétrico ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$) do material turfa de *Sphagnum*, em função dos métodos de análise para caracterização física de substratos nas tensões de 10, 50 e 100 hPa. *** = $p < 0,001$.

Para o material pó-de-coco os resultados foram semelhantes ao verificado para turfa de *Sphagnum*, obtendo-se coeficientes de correlação com valores superiores a 0,98 para o conteúdo hídrico volumétrico ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$) entre os três métodos de análise (CEN-EN13041, funis de Büchner e centrifugação das amostras) (Figura 33).

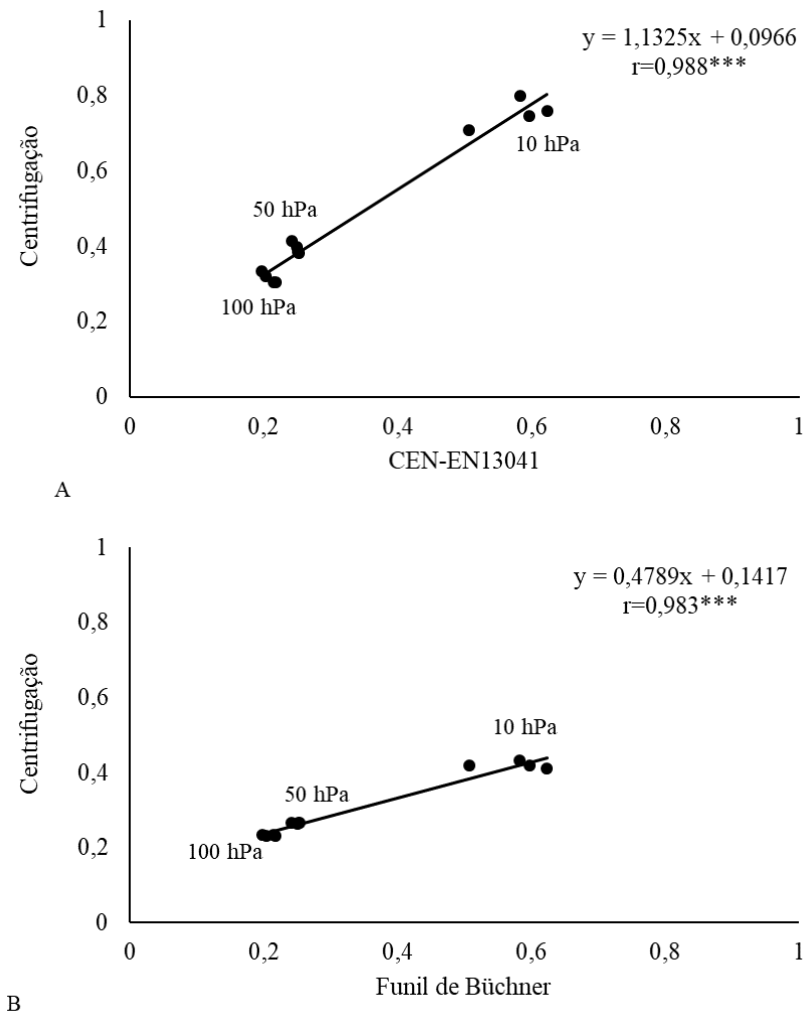


FIGURA 33. Correlação do conteúdo hídrico volumétrico ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$) do material pó-de-coco, em função dos métodos de análise para caracterização física de substratos nas tensões de 10, 50 e 100 hPa. *** = $p < 0,001$.

Em relação à casca de arroz carbonizada (Figura 34) e vermiculita expandida (Figura 35), verificou-se correlação positiva significativa do conteúdo hídrico volumétrico ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$) entre o método europeu (CEN-EN13041) e os funis de Büchner, com coeficientes de correlação de 0,989 e 0,946, respectivamente. Além disso, esses dois métodos considerados neste estudo como padrão (funis de Büchner e CEN-EN13041) também foram correlacionados positivamente com os valores obtidos a partir da centrifugação das amostras nas tensões de 10, 50 e 100 hPa, apresentando coeficiente de correlação de 0,989 (Figura 34A) e 0,915 (Figura 35A) entre a norma europeia e a centrífuga para os materiais casca de arroz carbonizada e vermiculita expandida, respectivamente. Enquanto entre os funis e a centrífuga, os valores do coeficiente de

correlação foram de 0,982 para a casca de arroz carbonizada (Figura 34B) e de 0,947 (Figura 35B) para a vermiculita expandida.

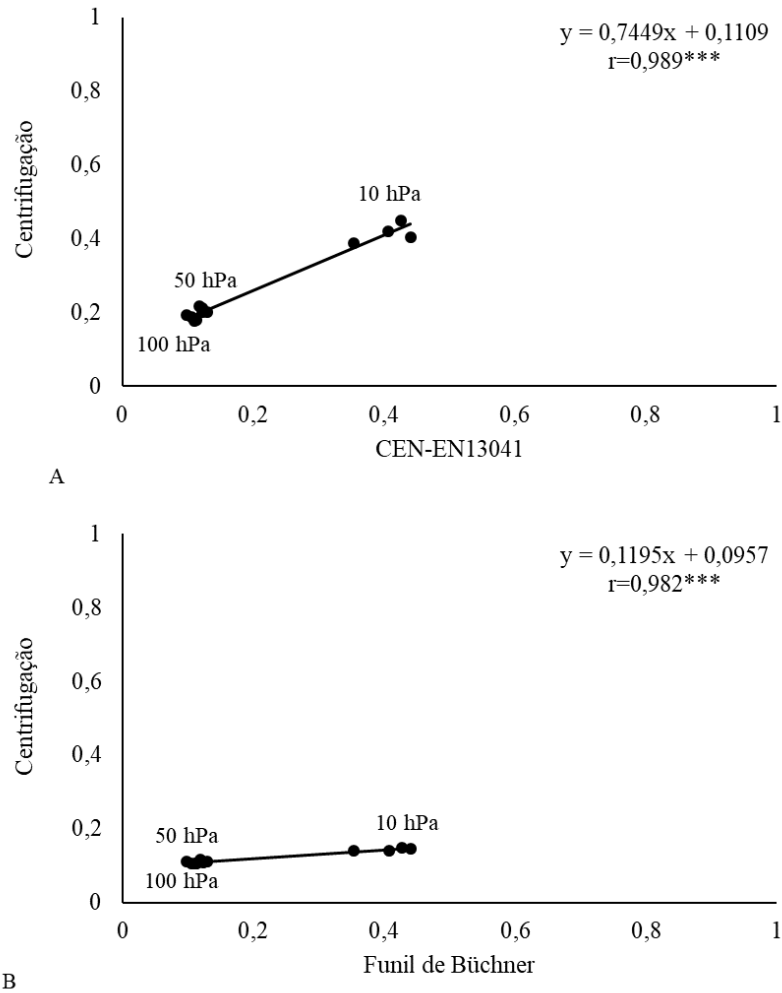


FIGURA 34. Correlação do conteúdo hídrico volumétrico ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$) do material casca de arroz carbonizada, em função dos métodos de análise para caracterização física de substratos nas tensões de 10, 50 e 100 hPa. *** = $p < 0,001$.

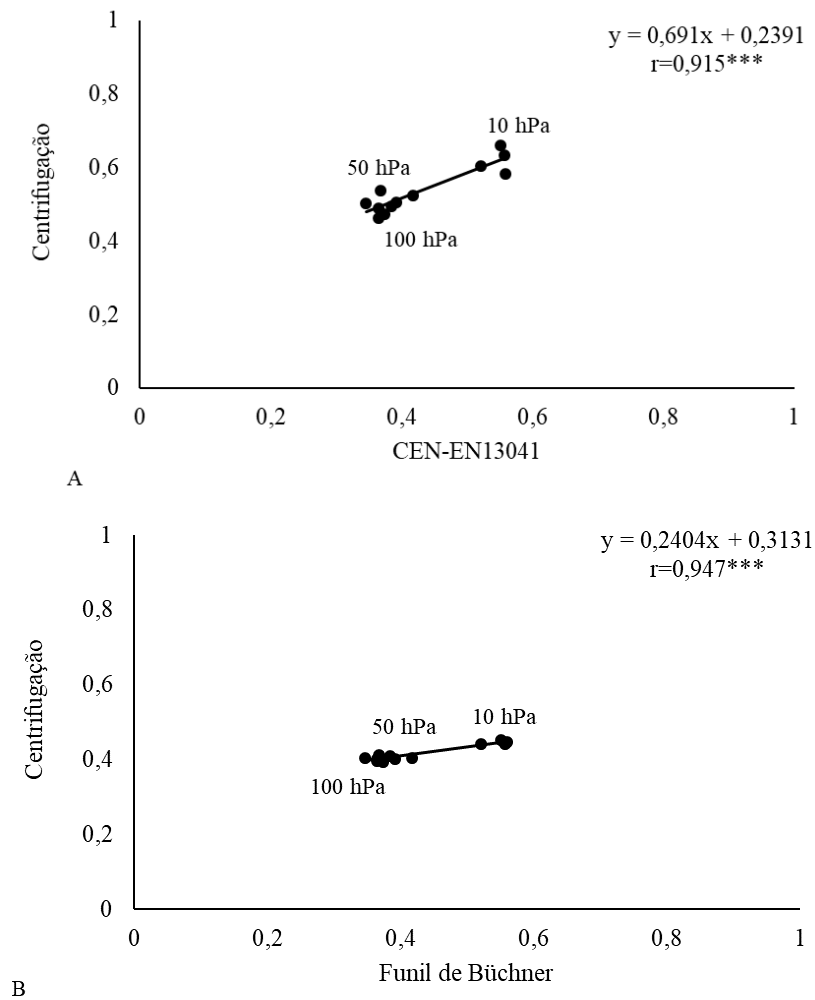


FIGURA 35. Correlação do conteúdo hídrico volumétrico ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) do material vermiculita expandida, em função dos métodos de análise para caracterização física de substratos nas tensões de 10, 50 e 100 hPa. *** = $p < 0,001$.

Para argila expandida (Figura 36), a correlação entre a centrífuga e o CEN-EN13041 foi significativamente positiva, porém com coeficiente de correlação de 0,685 (Figura 36A), inferior ao verificado para os outros materiais. Entretanto, entre a centrífuga e os funis (Figura 36B), e entre este último e o método CEN-EN13041 não houve correlação significativa.

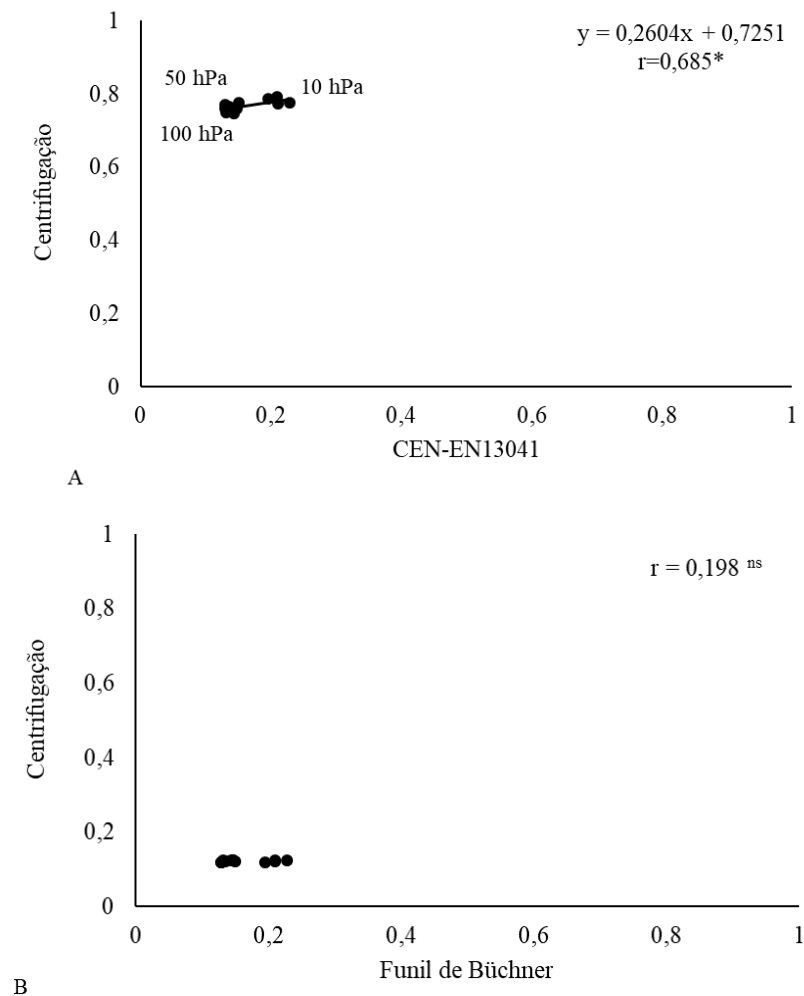


FIGURA 36. Correlação do conteúdo hídrico volumétrico ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$) do material argila expandida, em função dos métodos de análise para caracterização física de substratos nas tensões de 10, 50 e 100 hPa. * = $p < 0,05$; ns = não significativo.

Os resultados da correlação entre os métodos indicam, por definição, uma íntima associação entre os resultados obtidos com a centrifugação de amostras e com os métodos dos funis e do CEN-EN13041, com exceção para a argila expandida. Diante disso, mesmo havendo variações entre os métodos, a correlação positiva para o conteúdo hídrico volumétrico entre os dados obtidos com os funis e os leitos de areia, com os dados obtidos a partir do método que consiste na centrifugação das amostras, indicam, portanto, que a centrifugação constitui uma alternativa de método para caracterização física de substratos.

O menor coeficiente de correlação para argila expandida entre o método europeu e a centrifugação, e o fato do conteúdo hídrico volumétrico obtido com os funis não ser correlacionado com os verificados a partir da centrifugação, devem-se à elevada tensão no

interior das partículas deste material, que dificulta a extração de água em tensões menores ou iguais a 100 hPa.

Com base na Tabela 8 foi possível observar que a variabilidade (coeficiente de variação) dos resultados obtidos a partir dos três métodos (CEN-EN13041, funil de Büchner e centrifugação) pode ser considerada baixa, viabilizando a determinação do conteúdo hídrico volumétrico destes materiais a partir da centrifugação de amostras. Portanto, o método baseado na centrifugação das amostras, mostrou-se viável devido também ao baixo coeficiente de variação verificado para todos os materiais nas três velocidades angulares correspondentes às tensões de 10, 50 e 100 hPa.

TABELA 8. Variabilidade dos resultados de conteúdo hídrico volumétrico demonstrado pelo coeficiente de variação (CV) dos materiais turfa de *Sphagnum*, pó-de-coco, casca de arroz carbonizada, vermiculita expandida e argila expandida, obtidos a partir de três métodos de análise (centrifugação, CEN-EN13041 e funil de Büchner) em tensões de 10, 50 e 100 hPa.

Materiais	Tensão (hPa)	Coeficiente de variação (%)		
		Centrifugação	CEN-EN13041	Funil de Büchner
Turfa de <i>Sphagnum</i>	10	9,71	1,57	2,80
	50	2,13	2,51	2,91
	100	7,49	6,45	1,79
Pó-de-coco	10	8,66	4,98	2,00
	50	2,10	3,50	0,65
	100	4,65	4,46	0,50
Casca de arroz carbonizada	10	9,34	6,42	2,81
	50	3,81	3,93	3,05
	100	5,90	3,90	3,02
Vermiculita expandida	10	3,27	5,43	1,17
	50	5,37	3,64	1,25
	100	3,27	3,69	1,25
Argila expandida	10	6,33	1,18	1,75
	50	6,71	1,10	1,75
	100	4,61	1,16	1,75

A caracterização de propriedades físicas dos materiais turfa de *Sphagnum*, pó-de-coco, casca de arroz carbonizada, vermiculita e argila expandida, obtidas a partir dos dados do conteúdo hídrico volumétrico nas tensões de 0, 10, 50 e 100 hPa pelo método CEN-EN13041, pelo método dos funis de Büchner e pelo método da centrifugação das amostras, demonstrou diferenças significativas entre os métodos.

A comparação entre os dados de capacidade de retenção de água obtidos no tensionamento a 10 cm de coluna de água (10 hPa) demonstrou diferença significativa entre os métodos, em que a partir da determinação pelo método CEN-EN13041 as médias foram maiores em comparação ao método dos funis e da centrifugação, com exceção para a casca de arroz carbonizada (Tabela 9). Este resultado está relacionado ao tratamento inicial das amostras, ou seja, ao efeito do pré-tensionamento a 50 hPa e da dupla saturação permitirem a saturação completa dos materiais.

TABELA 9. Capacidade de retenção de água a 10 hPa, porosidade total e espaço de aeração dos materiais turfa de *Sphagnum* (TS), pó-de-coco (PC), casca de arroz carbonizada (CAC), vermiculita expandida (VE) e argila expandida (AE) em função do método de análise utilizado.

Parâmetros	Métodos	Substratos				
		TS	PC	CAC	VE	AE
Capacidade de retenção de água a 10 hPa (cm ³ cm ⁻³)	CEN-EN13041	0,91 a	0,75 a	0,41 a	0,62 a	0,78 a
	Funil de Büchner	0,59 b	0,42 c	0,15 b	0,45 c	0,12 c
	Centrifugação	0,57 b	0,58 b	0,41 a	0,55 b	0,22 b
	Valor p	*	***	***	***	***
Porosidade total (cm ³ cm ⁻³)	CEN-EN13041	0,93 a	0,94 a	0,90 a	0,95 a	0,78 a
	Funil de Büchner	0,74 c	0,78 c	0,73 c	0,66 c	0,36 c
	Centrifugação	0,82 b	0,88 b	0,85 b	0,76 b	0,54 b
	Valor p	***	***	**	**	***
Espaço de aeração (cm ³ cm ⁻³)	CEN-EN13041	0,02 c	0,19 c	0,49 b	0,33 a	0,00 c
	Funil de Büchner	0,15 b	0,36 a	0,58 a	0,21 b	0,24 b
	Centrifugação	0,25 a	0,30 b	0,44 b	0,21 b	0,32 a
	Valor p	***	***	***	*	***

* p<0,05; ** p<0,01 e *** p<0,001 pela análise de variância (ANOVA), sendo que para porosidade total na casca de arroz carbonizada e vermiculita, espaço de aeração na vermiculita, e capacidade de retenção de água na turfa de *Sphagnum* utilizou-se o teste de Kruskal-Wallis. Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem estatisticamente pelo teste DMS (diferença mínima significativa) de Fisher.

Para a porosidade total, os resultados apresentaram valores médios mais altos quando obtidos pelo método europeu (CEN-EN13041) em comparação com a utilização

dos funis de Büchner e com a centrifugação (Tabela 9). Isto se deve ao fato deste parâmetro ser obtido a partir de método indireto por fórmula que relaciona a densidade seca com a densidade de partículas, calculada a partir de valores de matéria orgânica obtidos por incineração, o que implica que o material perca toda sua estrutura original. Devido a isto, a totalidade dos poros é contabilizada, chegando-se aos reais valores de porosidade que estes materiais apresentam, ao contrário do que se obtém com métodos diretos que se baseiam no conceito de definir a porosidade total como o conteúdo hídrico volumétrico do substrato na tensão de 0 hPa, ou seja, o volume de água que ocupa os poros quando a amostra está saturada.

Neste contexto, os menores valores de espaço de aeração verificados para o método CEN-EN13041 (Tabela 9), são explicados pela elevada capacidade de retenção de água a 10 hPa que estes materiais apresentaram quando analisados a partir deste método. Isto porque a fórmula para o cálculo do espaço de aeração se baseia na diferença entre a porosidade total e a capacidade de retenção de água.

As diferenças nos resultados de porosidade total em função dos métodos de análise utilizados, implicam diretamente nos valores da relação entre ar e água dos materiais, já que a porosidade total corresponde à porcentagem, em volume, do que não se encontra ocupado pela fase sólida das amostras, ou seja, pela proporção de ar e água. Em função disso, no que diz respeito aos parâmetros de disponibilidade de água (água disponível, água facilmente disponível, água tamponante e água remanescente), os resultados apresentaram variação entre os métodos de análise, para cada material, independentemente, do parâmetro analisado (Tabela 10).

As variações obtidas nos parâmetros de disponibilidade de água entre os métodos também são decorrentes da menor capacidade de retenção de água que os materiais apresentaram quando analisados com os funis e com a centrífuga, pois nestes métodos não se fez uso da dupla saturação e do pré-tensionamento das amostras antes destas serem submetidas às análises. Esses valores subestimados se devem à saturação incompleta dos materiais, ou seja, quando os materiais não estão totalmente saturados podem não expressar realmente a quantidade de água que são capazes de reter e disponibilizar para as plantas.

TABELA 10. Água disponível, água facilmente disponível, água tamponante e água remanescente dos materiais turfa de *Sphagnum* (TS), pó-de-coco (PC), casca de arroz carbonizada (CAC), vermiculita expandida (VE) e argila expandida (AE) em função do método de análise utilizado.

Parâmetro	Métodos	Substratos				
		TS	PC	CAC	VE	AE
Água disponível (cm ³ cm ⁻³)	CEN-EN13041	0,41 a	0,44 a	0,23 b	0,14 b	0,03 b
	Funil de Büchner	0,29 b	0,19 b	0,04 c	0,05 c	0,00 c
	Centrifugação	0,32 b	0,37 a	0,30 a	0,19 a	0,08 a
	Valor p	**	***	***	***	**
Água facilmente disponível (cm ³ cm ⁻³)	CEN-EN13041	0,32 a	0,36 a	0,21 b	0,11 b	0,02 b
	Funil de Büchner	0,20 b	0,16 b	0,04 c	0,05 c	0,00 c
	Centrifugação	0,28 a	0,33 a	0,28 a	0,16 a	0,07 a
	Valor p	**	***	***	**	**
Água tamponante (cm ³ cm ⁻³)	CEN-EN13041	0,09 a	0,08 a	0,022 a	0,03 a	0,01 a
	Funil de Büchner	0,08 a	0,03 c	0,004 c	0,008 b	0,00 b
	Centrifugação	0,04 b	0,04 b	0,016 b	0,03 a	0,01 a
	Valor p	**	**	***	*	*
Água remanescente (cm ³ cm ⁻³)	CEN-EN13041	0,50 a	0,31 a	0,18 a	0,48 a	0,75 a
	Funil de Büchner	0,30 b	0,23 b	0,11 b	0,40 b	0,12 c
	Centrifugação	0,25 c	0,21 c	0,11 b	0,36 c	0,14 b
	Valor p	***	**	***	***	***

* p<0,05; ** p<0,01 e *** p<0,001 pela análise de variância (ANOVA), sendo que para água disponível na argila expandida, água facilmente disponível na vermiculita e argila expandida, água tamponante no pó-de-coco, vermiculita e argila expandida, e água remanescente no pó-de-coco utilizou-se o teste de Kruskal-Wallis. Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem estatisticamente pelo teste DMS (diferença mínima significativa) de Fisher.

Neste sentido, fica claro que as principais diferenças verificadas nos parâmetros de caracterização física de substratos em função dos métodos de análise, devem-se, dentre outros fatores, ao tratamento inicial das amostras. Estudos mostram resultados de modificações na quantidade de sólidos por amostra, na porosidade total, na capacidade de retenção de água, na acomodação das partículas e na distribuição do tamanho de poros devido à umidade inicial que as amostras apresentavam antes de serem submetidas às análises (Fonteno, 1993; Gruszynski, 2002; Fermino, 2003; Fermino & Kämpf, 2005; Liz *et al.*, 2008; Vence, 2012; Zorzeto *et al.*, 2014). Contudo, a manipulação inicial das amostras não afeta todos os materiais da mesma maneira, pois estes são dependentes do tipo e tamanho dos poros e do tamanho e compressibilidade das partículas (Vence *et al.*, 2012).

Conforme Zorzeto *et al.* (2014) foram verificadas diferenças na determinação da curva de retenção de água em função dos métodos de análise testados, devido, dentre outros fatores, ao tratamento inicial da amostra. Nesta mesma linha, Vence *et al.* (2010) verificaram diferenças na caracterização física de substratos comerciais em função dos métodos utilizados, o que se deve ao tratamento inicial que as amostras receberam, ou seja, à umidade inicial da amostra quando submetida a caracterização.

Além do efeito do preparo inicial das amostras, os valores das variáveis obtidas pelo método dos funis, em alguns casos, podem estar sendo subestimadas. Essa hipótese se baseia na possibilidade de estar ocorrendo a acomodação das partículas (auto-compactação) após as sucessivas ressaturações entre cada alteração do ponto da coluna de água, ou seja, o volume da amostra dentro dos cilindros de análise é alterado após ser submetido à diferentes tensões. Sendo assim, o volume final da amostra se torna menor que o volume inicial, quando em condições de saturação, o que não é levado em consideração no momento dos cálculos para obtenção de tais parâmetros. Este efeito não ocorre no método europeu (CEN-EN13041), pois de acordo com Vence (2012), a utilização do duplo anel durante a saturação, sendo retirado o anel superior após o tensionamento em 10 hPa, proporciona que as amostras passem pelo processo de auto-compactação naturalmente durante estes processos, evitando que ocorra alteração do volume de amostra nas tensões subsequentes (50 e 100 hPa).

Diante da variação dos resultados obtidos em análises em função, principalmente, do tratamento inicial das amostras, e também por algumas limitações impostas pelos métodos disponíveis atualmente para a caracterização física de substratos, como por exemplo os métodos CEN-EN13041 e funis de Büchner, são necessários estudos buscando propor métodos que disponibilizem resultados confiáveis e com maior repetibilidade. Neste sentido, outros métodos também vêm sendo estudados com o objetivo de determinar a capacidade de retenção de água em substratos. Liz *et al.* (2008) obtiveram rapidez na obtenção dos resultados, além de possibilitar a medição da tensão de água, de forma contínua e paralela, entre tensões de 0 e 11 kPa, simultaneamente, com uso de sensores de cápsula porosa (mini sensor Irrigas[®]). Nesta mesma linha de pesquisa, Spier (2008) encontrou resultados satisfatórios ao utilizar um equipamento baseado em pressão positiva como alternativa para obtenção da curva de retenção de água de substratos de forma mais ágil.

De acordo com Fonteno (1993) para a escolha de um método para caracterização de substratos, deve-se levar em consideração a disponibilidade de equipamentos, a natureza do material a ser analisado, o tipo de amostra disponível, o conhecimento e a habilidade do operador e o propósito para o qual as medições são feitas. Além disso, os resultados obtidos por distintos métodos variam também em função dos materiais utilizados como substratos, havendo a necessidade, portanto, de métodos que proporcionem resultados confiáveis, independentemente do tipo de material analisado, e que sejam de fácil execução.

O método baseado na centrifugação de amostras, além de possibilitar a obtenção de resultados de análise com maior confiabilidade e repetibilidade, também garante rapidez na obtenção do laudo, pois permite a diminuição do tempo necessário para determinação da curva completa de retenção de água dos substratos. Através do método CEN-EN13041 foram necessários 10 dias, e do método dos funis de Büchner 11 dias. Já, a partir da centrifugação de amostras, esta determinação pôde ser realizada em aproximadamente 5 dias, ou seja, o tempo necessário para obtenção de um laudo completo de análise de substratos foi reduzido pela metade do tempo, contribuindo para a melhoria dos procedimentos rotineiros de análise em laboratório.

Em estudo com cinco composições de substrato (100% casca de arroz carbonizada; 75% casca de arroz carbonizada + 25% casca de arroz queimada; 50% casca de arroz carbonizada + 50% casca de arroz queimada; 25% casca de arroz carbonizada + 75% casca de arroz queimada e 100% casca de arroz queimada) a determinação da curva de retenção de água através do método da centrifugação apresentou-se como uma alternativa potencialmente viável, adotando-se um tempo de centrifugação de duas horas para cada tensão testada (Diaz, 2010). Considerando-se cinco diferentes tipos de solo representativos do Bioma Cerrado, também foi possível determinar a curva de retenção de água aplicando-se em cada velocidade angular um período de centrifugação superior a 80 minutos, sendo que períodos de centrifugação inferiores ao equilíbrio alteraram a curva de retenção de água, afetando, principalmente, os valores de umidade nas tensões mais elevadas (Silva & Azevedo, 2001).

A centrifugação das amostras permite, ainda, a determinação da curva de retenção de água de substratos com maior controle das variáveis ambientais. Pois, uma das principais limitações da metodologia que utiliza os funis de Büchner e os leitos de areia, é

a falta de controle da temperatura e umidade relativa do ar no ambiente onde ocorrem as análises, o que interfere no processo, devido, principalmente, ao tempo excessivo em que as amostras ficam submetidas ao tensionamento nesse ambiente, o que pode fazer com que a massa da água evaporada das amostras durante os dias de análise não seja computada, somando erros e reduzindo a repetibilidade, uma vez que o ambiente pode variar de uma análise para outra, inclusive no mesmo laboratório.

Neste contexto, as limitações do tempo necessário para obtenção de resultados, a possibilidade de rompimento da coluna de água, a descontinuidade do filme de água entre a superfície onde está sendo aplicada a tensão e o material em análise e, em alguns casos, a dificuldade de determinação do equilíbrio entre a tensão aplicada e a água retida na amostra de substrato, que se verifica atualmente com o método dos funis de Büchner e do leite de areia (CEN-EN13041), podem ser plenamente superados com a centrifugação das amostras.

4.2 Efeito da preparação inicial das amostras

4.2.1 Padronização da umidade inicial das amostras segundo o método da centrifugação

O conteúdo de água gravimétrica contida nas amostras dos materiais turfa de *Sphagnum*, pó-de-coco, casca de arroz carbonizada e vermiculita expandida mostrou-se diferente entre os métodos de tratamento das amostras. Com a padronização através da centrifugação a uma velocidade angular equivalente a 50 hPa durante 60 minutos, as amostras resultaram em maior conteúdo de água. Para casca de arroz carbonizada, a diferença superou 30 pontos percentuais (Tabela 11).

TABELA 11. Percentual de umidade “atual” (umidade próxima a 50%, segundo Fermino, 2003) e padronizada após centrifugação a uma velocidade angular equivalente a 50 hPa durante 60 minutos, para os materiais turfa de *Sphagnum*, pó-de-coco, casca de arroz carbonizada e vermiculita expandida.

Umidade (%)	Turfa de <i>Sphagnum</i>	Pó-de-coco	Casca de arroz carbonizada	Vermiculita expandida
Atual	65,86	64,36	51,15	57,24
Padronizada	79,86	85,08	82,72	67,61
Valor p	***	***	***	*

* p<0,05; ** p<0,01 e *** p<0,001.

Essa diferença na umidade após a padronização com a centrifugação apresentou influência proporcional nos valores de densidade úmida dos substratos (Figura 37), ou seja, o acréscimo da umidade das amostras proporcionou elevação na densidade úmida, sendo esta diferença mais expressiva para a casca de arroz carbonizada (Figura 37C). Entretanto, para a densidade seca, não houve influência significativa da padronização da umidade inicial das amostras, apresentando valores médios de 97,63; 83,13; 125,83 e 126,07 para turfa de *Sphagnum*, pó-de-coco, casca de arroz carbonizada e vermiculita expandida, respectivamente.

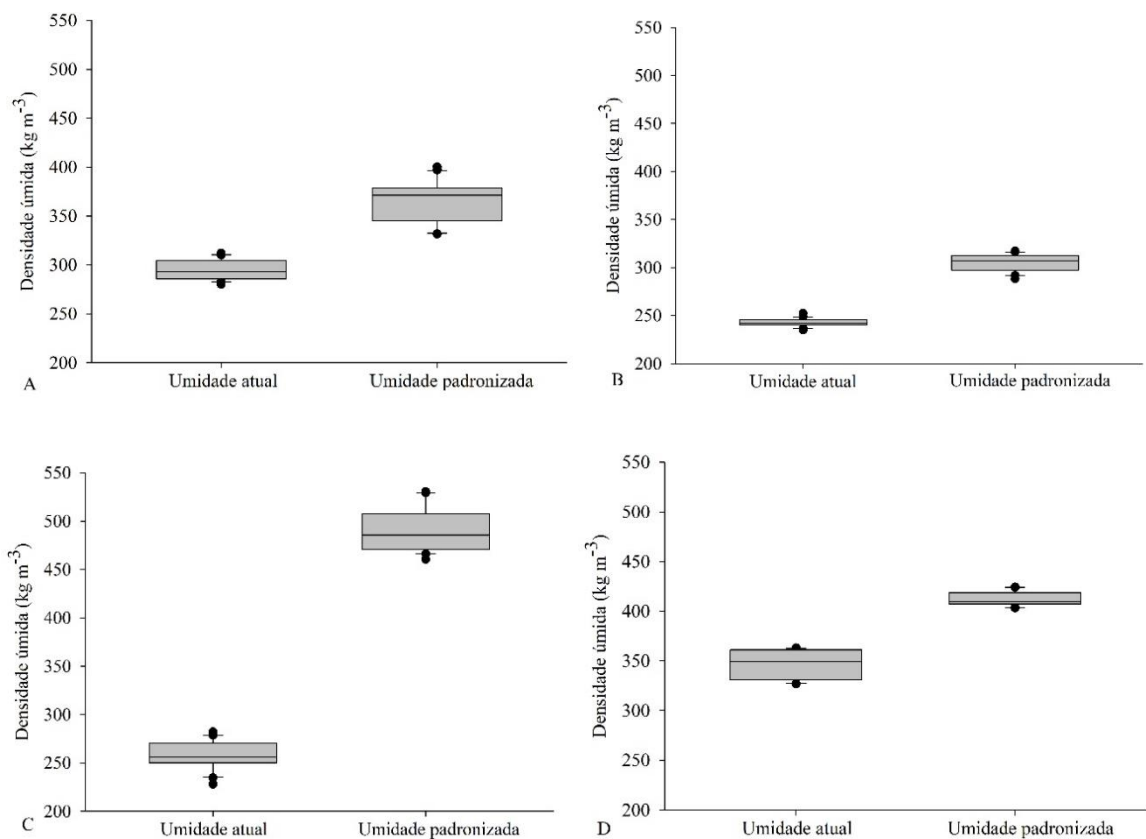


FIGURA 37. Densidade úmida (kg m^{-3}) dos materiais turfa de *Sphagnum* (A), pó-de-coco (B), casca de arroz carbonizada (C) e vermiculita expandida (D), determinada com os materiais na umidade “atual” (umidade próxima a 50%, segundo Fermino, 2003) e após padronização desta umidade em centrifugação a uma velocidade angular equivalente a 50 hPa durante 60 minutos.

Foi possível verificar, ainda, que a variabilidade entre os dados da densidade úmida obtida com as amostras na umidade atual ou com a umidade inicial padronizada foi menor para os materiais turfa de *Sphagnum* (Figura 37A), pó-de-coco (Figura 37B) e vermiculita

(Figura 37D), em relação à casca de arroz carbonizada (Figura 37C). Isto se deve, principalmente, ao fato de a casca de arroz carbonizada ser um material com maior variação no tamanho das partículas, enquanto os outros em questão apresentam maior padronização. Além disso, a maior diferença na densidade úmida da casca de arroz carbonizada antes e após a padronização da umidade inicial, deve-se ao conteúdo de água mais alto que permaneceu nas amostras após a centrifugação. Este resultado está relacionado com o fato de a umidade inicial ser um dos fatores que incide no empacotamento das partículas, e, portanto, o volume que ocupam no recipiente (Vence, 2012).

A densidade é um dos parâmetros mais usados na caracterização dos substratos, pois está relacionada inversamente com a porosidade total, além de seus valores refletirem a aplicação que determinado material pode ter em função do tamanho dos recipientes (Vence, 2012). Trabalhos científicos mostram a grande variabilidade de resultados devido à influência da densidade nos valores de capacidade de retenção de água e espaço de aeração (Fonteno, 1993; Ferraz *et al.*, 2005; Lacerda *et al.*, 2006; Spier, 2008; Fermino, 2014; Pagliarini *et al.*, 2015), o que está diretamente relacionado com a falta de padronização da umidade inicial das amostras. Este resultado da influência da umidade das amostras na densidade úmida também foi observado por Fermino & Kämpf (2012) nos substratos pó-de-coco, areia de rio média lavada, turfa fibrosa *in natura* e Plantmax[®] Hortaça. Isto confirma a importância da padronização da umidade inicial das amostras antes de iniciar a determinação da curva de retenção de água propriamente dita, para que as informações sejam comparáveis, além de evitar a multiplicação de erros nos parâmetros sucessivos. Pois em alguns métodos de análise, a densidade úmida é utilizada para o cálculo da quantidade de material colocado nos cilindros de análise, o que conseqüentemente irá influenciar nos resultados de todas as variáveis obtidas. Dentre estes métodos, cita-se a legislação brasileira de análise de substratos (Brasil, 2007).

Utilizar amostras com umidade de 50%, conforme metodologia descrita por Fermino (2003), é uma forma muito empírica de tratar as amostras inicialmente, pois não se tem certeza da umidade que o substrato está no momento da análise. Além disso, segundo Vence (2012), devido a elevada diversidade de materiais disponíveis para utilização como substratos para plantas, generalizar a padronização da umidade inicial das

amostras com valores prefixados se torna difícil devido, principalmente, ao comportamento quanto a consistência e agregação de cada material.

Zorzeto *et al.* (2014) recomendam a adoção da dupla saturação e da pré-tensão a 50 hPa das amostras antes da determinação da curva de retenção de água, conforme descrito na CEN-EN13041. Estes autores justificam tal recomendação devido a uma saturação mais completa e homogênea das partículas das amostras, proporcionando, desta forma, que os resultados obtidos com a curva representem o mais próximo possível a relação ar-água que estes materiais apresentam. Pois, a saturação simples durante 24 horas, conforme o método dos funis de Büchner, de acordo com Terés *et al.* (2001) tem como consequência a menor eficiência de substituição de ar por água nos poros durante o processo de saturação.

Desta maneira, a padronização da umidade inicial das amostras a partir da centrifugação em velocidade angular equivalente a 50 hPa constitui-se em uma alternativa viável, pois as amostras serão submetidas a dupla saturação e pré-tensionamento, porém em menor tempo do requerido pelo método CEN-EN13041. Pois, enquanto no método europeu as amostras permanecem durante 48 horas no tensionamento a 50 hPa, com a centrífuga este procedimento pode ser realizado em 60 minutos.

4.2.2 Efeito da compactação na caracterização física de substratos

As densidades de empacotamento influenciaram significativamente em todas as propriedades físicas dos substratos turfa de *Sphagnum*, casca de arroz carbonizada e da mistura entre esses dois componentes em proporções volumétricas de 1:1. No entanto, para argila expandida, com exceção da densidade seca, não houve influência da compactação para todos os parâmetros obtidos na caracterização física dos substratos (Tabela 12).

TABELA 12. Análise de variância das propriedades físicas dos substratos argila expandida (AE), turfa de *Sphagnum* (TS), casca de arroz carbonizada (CAC) e da mistura entre esses dois últimos componentes em proporções volumétricas de 1:1, em função da densidade de empacotamento.

Propriedades físicas	AE		TS		CAC		TS + CAC (1:1, v/v)	
	Valor p	CV (%)	Valor p	CV (%)	Valor p	CV (%)	Valor p	CV (%)
DS (kg m ³)	<0,001	1,51	<0,001	2,69	<0,001	4,88	<0,001	0,98
PT (cm ³ cm ⁻³)	0,0616 ^{ns}	2,70	<0,001	1,68	<0,01	4,34	<0,001	1,92
EA (cm ³ cm ⁻³)	0,0591 ^{ns}	4,27	<0,001	8,34	<0,01	*	<0,001	4,86
AD (cm ³ cm ⁻³)	0,7611 ^{ns}	11,38	<0,001	6,05	<0,01	*	<0,001	4,88
AFD (cm ³ cm ⁻³)	0,4839 ^{ns}	5,75	<0,001	5,55	<0,01	*	<0,001	5,11
AT (cm ³ cm ⁻³)	0,4427 ^{ns}	40,54	<0,001	13,69	<0,001	16,74	<0,01	*
AR (cm ³ cm ⁻³)	0,0651 ^{ns}	1,54	<0,001	2,55	<0,001	3,22	<0,01	*
RV	0,0593 ^{ns}	5,29	<0,001	17,38	<0,01	22,41	<0,001	18,08
CH10 (cm ³ cm ⁻³)	0,1496 ^{ns}	1,55	<0,001	1,89	<0,001	8,95	<0,001	1,25
CH50 (cm ³ cm ⁻³)	0,0713 ^{ns}	1,69	<0,001	1,57	<0,001	3,05	<0,01	*
CH100 (cm ³ cm ⁻³)	0,0651 ^{ns}	1,54	<0,001	2,55	<0,001	3,22	<0,01	*

DS = densidade seca; PT = porosidade total; EA = espaço de aeração; AD = água disponível; AFD = água facilmente disponível; AT = água tamponante; AR = água remanescente; RV = razão de vazios; CH = conteúdo hídrico volumétrico; CV = coeficiente de variação; * Análise não paramétrica pelo teste de Kruskal-Wallis; ^{ns} = não significativo.

A densidade seca apresentou acréscimo proporcional ao aumento da quantidade de sólidos por unidade de volume colocados nos recipientes de análise (Tabela 13), para todos os materiais testados. Este resultado confirma a compactação das amostras quando estas foram submetidas às análises.

TABELA 13. Densidade seca e compressibilidade dos substratos argila expandida, turfa de *Sphagnum* (TS), casca de arroz carbonizada (CAC) e da mistura entre esses dois últimos componentes em proporções volumétricas de 1:1, em função da densidade de empacotamento.

Tratamentos	Densidade seca (kg m ⁻³)			
	Argila expandida	Turfa de <i>Sphagnum</i>	Casca de arroz carbonizada	TS + CAC (1:1, v/v)
Solto	573,02 c*	70,81 c	92,10 c	77,69 c
Intermediário	620,73 b	123,29 b	192,10 b	154,70 b
Compactado	666,63 a	195,82 a	276,07 a	233,52 a
Compressibilidade	16%	145%	200%	195%

*Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem estatisticamente pelo teste DMS (diferença mínima significativa) de Fisher ao nível de 5% de probabilidade de erro.

As respostas deste aumento das densidades são dependentes do tipo de material utilizado como substrato, sendo mais especificamente pela estrutura das suas partículas, ou seja, pela capacidade de compressão. A compressibilidade é uma propriedade física inerente à matriz do substrato, referindo-se à capacidade de reduzir o volume da massa quando submetida à ação de determinada força externa. Percebe-se, neste caso, que a argila expandida é um material que apresenta baixa compressibilidade, enquanto a turfa de *Sphagnum*, a casca de arroz carbonizada e a mistura entre essas (1:1, v/v) são materiais com alta compressibilidade (Tabela 13). Isto é, estes materiais apresentam maior mudança de volume como resposta à pressão aplicada.

Os resultados obtidos na caracterização física dos substratos em função das diferentes densidades de empacotamento mostram que a porosidade total, o espaço de aeração e a razão de vazios foram influenciados negativamente pelo aumento da compactação para turfa de *Sphagnum*, casca de arroz carbonizada, e para a mistura entre estes componentes em proporções volumétricas de 1:1. Enquanto para argila expandida não houve diferença entre as compactações (Tabela 14).

Em relação ao espaço de aeração, verificou-se uma porcentagem de redução bastante expressiva do tratamento solto para o compactado, sendo 82; 54 e 75% para turfa de *Sphagnum*, casca de arroz carbonizada e para a mistura entre esses dois componentes (1:1, v/v), respectivamente (Tabela 14). Percebe-se, portanto, que para a turfa, quando analisada como componente único na formulação de substratos, a redução foi mais expressiva, apresentando resultados bastante inferiores àqueles considerados ideais pela literatura, que variam de 20 a 30% segundo De Boodt & Verdonck (1972), e de 30 a 40% segundo Penningsfeld (1978).

A razão de vazios (RV) ou *Void Ratio* (VR) é uma propriedade física que expressa a relação entre o volume de poros e sólidos. Materiais com $RV = 1$ apresentam a mesma proporção entre sólidos e poros, enquanto $RV > 1$ correspondem à maior proporção de poros do que sólidos na matriz do substrato. É um parâmetro importante para comparações entre formulações de substratos, assim como para o monitoramento de possíveis compactações. Neste sentido, o aumento das densidades de empacotamento proporcionou decréscimo na proporção de poros para turfa de *Sphagnum*, casca de arroz carbonizada e para a mistura entre esses dois componentes (1:1, v/v), sendo a porcentagem de perda mais expressiva para turfa de *Sphagnum* (80%) (Tabela 14). Contudo, para a casca de arroz

carbonizada e para a mistura desta com turfa de *Sphagnum* (1:1, v/v), este acréscimo não foi proporcional ao aumento das densidades, pois não houve diferença estatística entre os tratamentos intermediário e compactado (Tabela 14).

TABELA 14. Porosidade total, espaço de aeração e razão de vazios dos substratos argila expandida, turfa de *Sphagnum* (TS), casca de arroz carbonizada (CAC) e da mistura entre esses dois últimos componentes em proporções volumétricas de 1:1, em função da densidade de empacotamento, e a porcentagem de redução nos valores desses parâmetros em relação à compactação das amostras solta e compactada.

Parâmetros	Substratos	Densidade de empacotamento			
		Solto	Intermediário	Compactado	Redução (%)
Porosidade total (cm ³ cm ⁻³)	Argila expandida	0,51 a*	0,49 a	0,48 a	6,0
	Turfa de <i>Sphagnum</i>	0,98 a	0,93 b	0,88 c	10,0
	Casca de arroz carbonizada	0,87 a	0,81 b	0,76 c	13,0
	TS + CAC (1:1, v/v)	0,90 a	0,87 b	0,83 c	8,0
Espaço de aeração (cm ³ cm ⁻³)	Argila expandida	0,34 a	0,33 a	0,32 a	6,0
	Turfa de <i>Sphagnum</i>	0,34 a	0,16 b	0,06 c	82,0
	Casca de arroz carbonizada	0,68 a	0,57 b	0,31 c	54,0
	TS + CAC (1:1, v/v)	0,51 a	0,39 b	0,13 c	75,0
Razão de vazios	Argila expandida	1,02 a	0,98 a	0,94 a	6,0
	Turfa de <i>Sphagnum</i>	38,83 a	13,71 b	7,90 c	80,0
	Casca de arroz carbonizada	6,75 a	4,41 b	3,36 b	24,0
	TS + CAC (1:1, v/v)	9,04 a	6,46 b	5,00 b	45,0

*Médias seguidas pela mesma letra na linha não diferem estatisticamente pelo teste DMS (diferença mínima significativa) de Fisher ao nível de 5% de probabilidade de erro.

Em relação às propriedades referentes a disponibilidade de água para as plantas, para argila expandida não houve efeito conforme o aumento das densidades de empacotamento. Para turfa de *Sphagnum* a média mais alta foi obtida no tratamento intermediário (0,37 cm³ cm⁻³), seguido do tratamento solto (0,33 cm³ cm⁻³) e compactado (0,12 cm³ cm⁻³). Para casca de arroz carbonizada não houve diferença significativa entre as densidades solta e intermediária, porém com acréscimo médio de 61,67% destas para o tratamento compactado. Todavia, para a mistura entre casca de arroz carbonizada e turfa (1:1, v/v), houve aumento proporcional da água disponível com o aumento das densidades de empacotamento (Figura 38A).

Estes mesmos resultados também foram observados para a água facilmente disponível (Figura 38B) e para a água tamponante (Figura 38C). Enquanto para a água remanescente, com exceção da argila expandida, os resultados deste estudo mostram acréscimo proporcional com o aumento das densidades de empacotamento nas formulações de substrato testadas (Figura 38D), sendo este acréscimo mais expressivo na turfa de *Sphagnum*, a qual apresentou valores acima dos considerados adequados pela literatura, os quais devem variar de 0,25 a 0,30 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ (Verdonck & Gabriëls, 1988), nas densidades de empacotamento intermediário e compactado (0,40 e 0,70 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$, respectivamente).

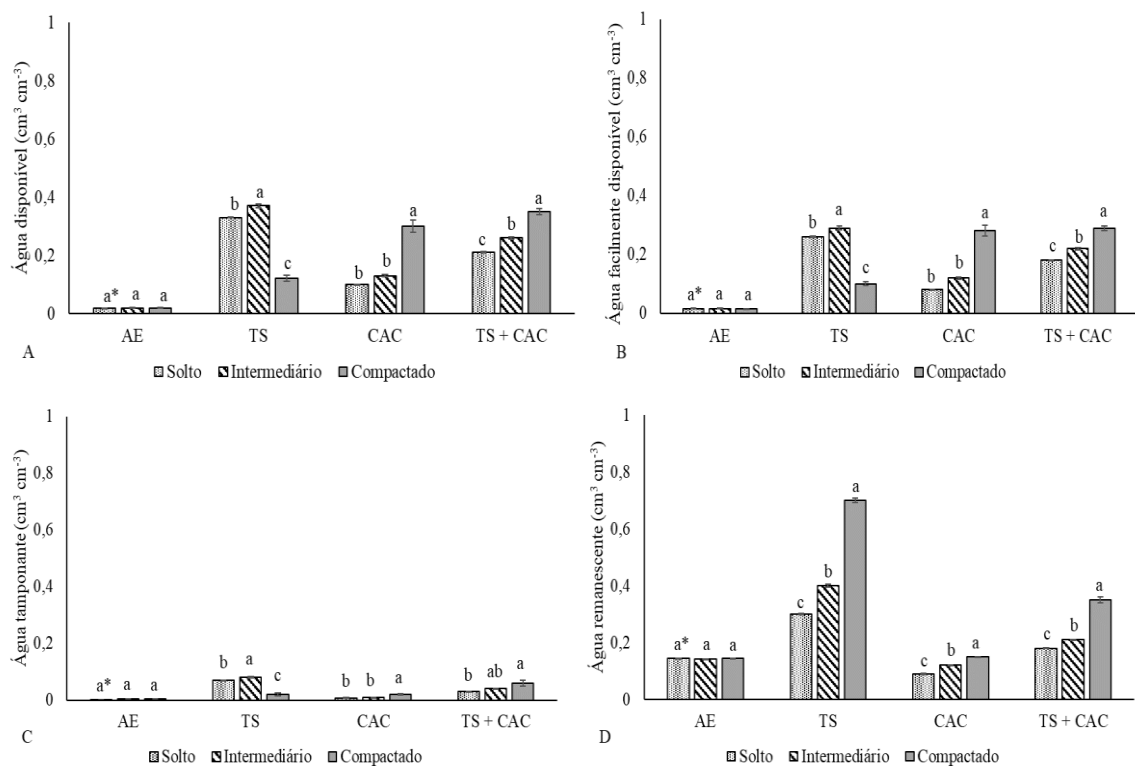


FIGURA 38. Água disponível (A), água facilmente disponível (B), água tamponante (C) e água remanescente (D) dos materiais argila expandida (AE), turfa de *Sphagnum* (TS), casca de arroz carbonizada (CAC) e da mistura entre esses dois últimos componentes em proporções volumétricas de 1:1, em função da densidade de empacotamento. *Médias seguidas pela mesma letra para cada substrato não diferem estatisticamente pelo teste DMS (diferença mínima significativa) de Fisher ao nível de 5% de probabilidade de erro.

A capacidade de retenção de água obtida a partir do conteúdo hídrico volumétrico nas tensões de 0, 10, 50 e 100 hPa, não apresentou alterações em função das densidades de empacotamento para argila expandida (Figura 39A). Entretanto, houve acréscimo à medida que aumentou a densidade de empacotamento para as outras três formulações de substrato

(Figura 39B e Figura 40A-B), sendo esta resposta mais expressiva para a turfa de *Sphagnum* quando analisada como componente único (Figura 39B). Por outro lado, este aumento da capacidade de retenção de água só foi verificado para a casca de arroz carbonizada no ponto 10 de tensão (10 hPa), apresentando pouca variação entre as densidades de nas tensões de 50 e 100 hPa (Figura 40A).

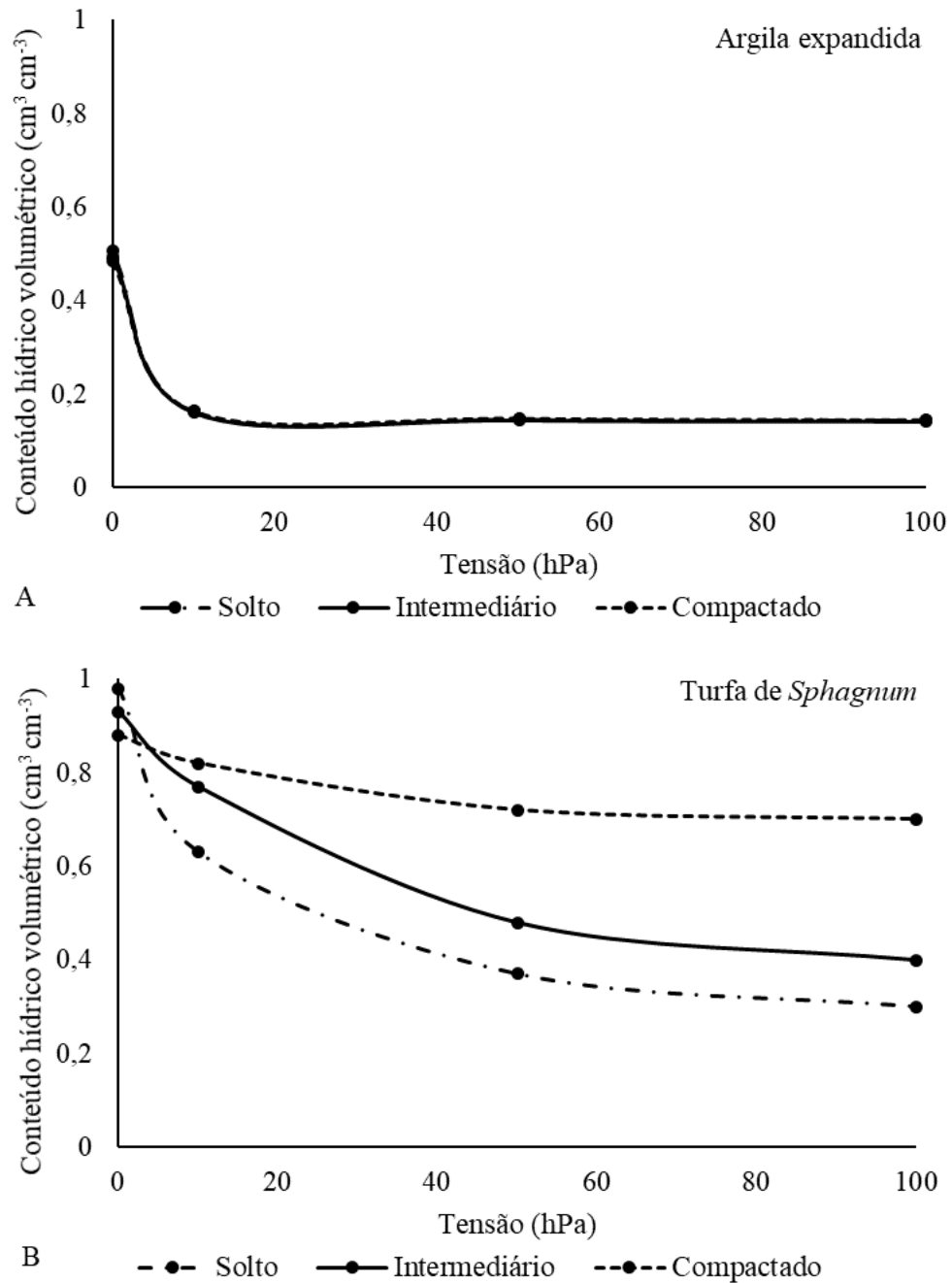


FIGURA 39. Curva de retenção de água dos materiais argila expandida (A) e turfa de *Sphagnum* (B), em função da densidade de empacotamento.

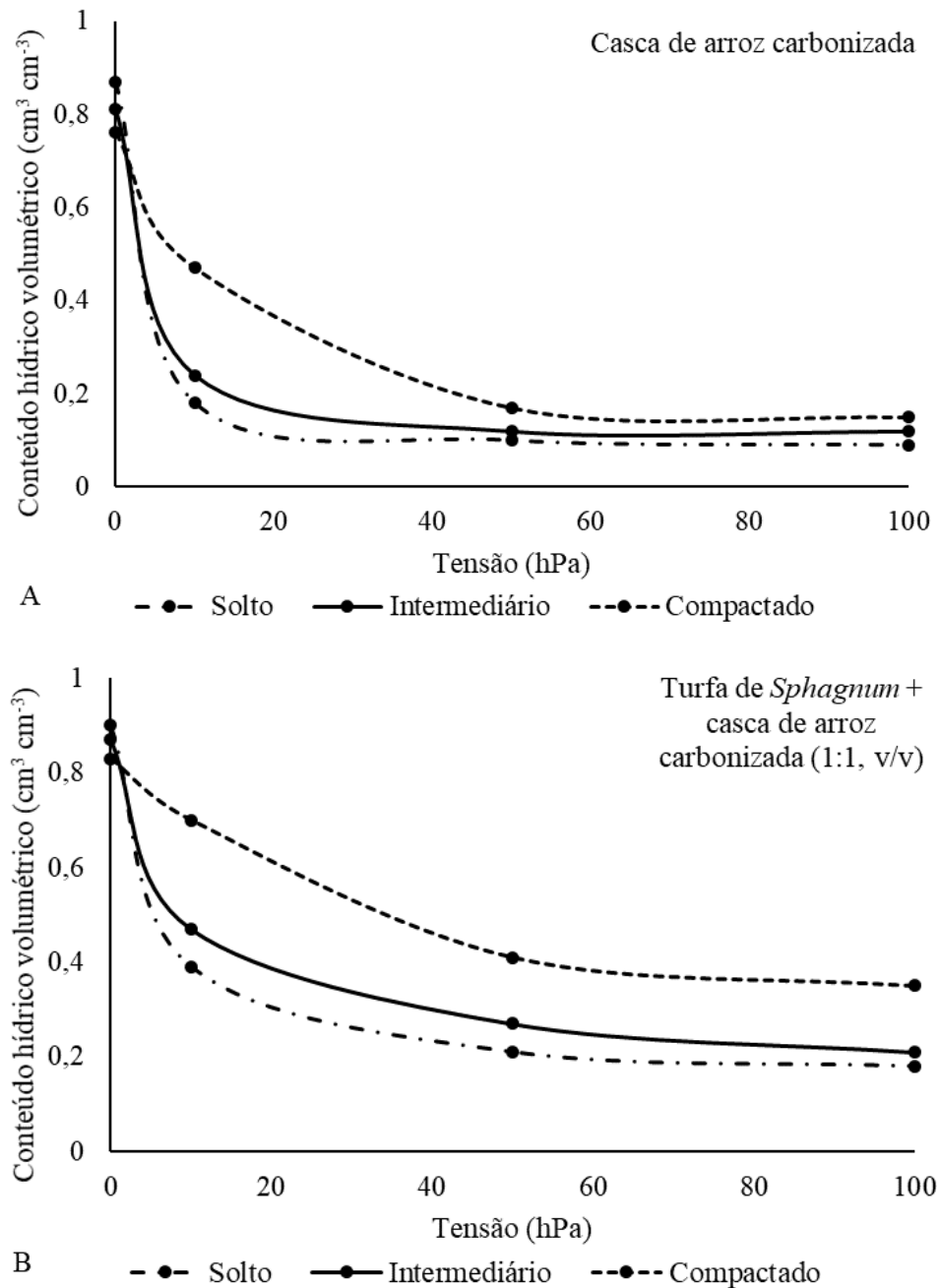


FIGURA 40. Curva de retenção de água do material casca de arroz carbonizada (A) e da mistura deste com turfa de *Sphagnum* em proporções volumétricas de 1:1 (B), em função da densidade de empacotamento.

As alterações na densidade dos substratos quando colocados nos recipientes utilizados durante a análise modificaram suas propriedades físicas, ou seja, o aumento no conteúdo de sólidos por unidade de volume apresenta influência negativa sobre a razão de vazios (relação entre poros e sólidos), porosidade total, espaço de aeração e disponibilidade de água. Contudo, estas respostas são dependentes do tipo de material utilizado como

substrato, ou mais especificamente da capacidade de compressibilidade destes, pois para argila expandida não houve influência da compactação.

A argila expandida apresenta alta estabilidade de estrutura, porém passível de pequena acomodação entre as partículas, sendo considerado um material com baixa compressibilidade. Isto explica o fato de o aumento das densidades de empacotamento não terem influenciado as propriedades físicas deste material.

A turfa de *Sphagnum*, por sua vez, é um material maleável e compressível, ou seja, quando compactado apresenta alterações inter e intra partículas, enquanto para casca de arroz carbonizada, quando as partículas são submetidas à compactação, se fracionam, o que conseqüentemente proporciona alterações na granulometria do material.

Neste sentido, o aumento do volume de água disponível nos materiais que originalmente apresentam elevado conteúdo de macroporos, como a casca de arroz carbonizada, se deve à proporção de partículas de tamanho grande, que quando comprimidas, são fracionadas em partículas de tamanho menor, fechando os espaços maiores entre as partículas, aumentando o volume de microporos. Em contrapartida, para turfa de *Sphagnum*, houve maior proporção de água remanescente à medida que as amostras foram submetidas à compactação, devido a maior predominância de partículas pequenas que se rearranjam aumentando a formação de capilares de baixo calibre, o que aumenta a coesão entre as partículas que formam o capilar e as moléculas de água, diminuindo a capacidade de aeração e aumentando do conteúdo de microporos. Assim, verifica-se que quanto mais se comprime esse tipo de material, maior será a proporção de microporos, diminuindo o espaço de aeração e aumentando a retenção de água.

Substratos com elevado conteúdo de água remanescente podem causar problemas por excesso de umidade para as raízes de algumas espécies (Schmitz *et al.*, 2002), isto porque apresentam considerável dificuldade de drenagem (Kämpf, 2005). Diante disso, segundo Schafer *et al.* (2015), componentes com estas características devem ser utilizados em mistura com condicionadores que apresentem baixos percentuais volumétricos de água remanescente, pois, do contrário, esta dificuldade de drenagem pode acarretar disponibilidade de oxigênio insuficiente para às raízes. Além do mais, este tipo de água só será absorvido pelas plantas em tensões muito elevadas, o que resulta em gasto energético das plantas para tal absorção.

Em estudo realizado por Fernandes & Corá (2004), a fim de avaliar o efeito da densidade na relação ar-água de alguns substratos, verificou-se que o aumento da densidade proporcionou diminuição da porosidade total e espaço de aeração, e aumentou o conteúdo de água tamponante e água remanescente, o que também foi observado no estudo em questão. Estes resultados estão associados ao fato de que, com o aumento da densidade de partículas do substrato por compactação, parte do espaço poroso é ocupado. Assim, as pequenas partículas ocuparam o espaço vazio entre as partículas de tamanho maior, transformando poros grandes em pequenos, o que conseqüentemente, incrementa a capacidade de retenção de água dos substratos. Na mesma linha, em estudo verificando a relação entre a densidade de empacotamento e as propriedades físicas de um substrato comercial, verificou-se que como conseqüência da compactação, a porosidade total diminuiu cerca de 10%, enquanto o espaço de aeração foi reduzido em 70%. De forma inversa, a capacidade de retenção de água aumentou em cerca de 30% e a impedância mecânica ficou aproximadamente sete vezes maior (Kämpf, 2000).

Em relação à impedância mecânica medida na turfa de *Sphagnum*, os resultados demonstraram que quanto maior a densidade de empacotamento do substrato, mais alta é a impedância mecânica, tanto no início, quanto após 125 dias em casa de vegetação, sob manejo de irrigação (Tabela 15).

TABELA 15. Impedância mecânica (kPa) em turfa de *Sphagnum* em função de densidades de empacotamento, para leituras realizadas a 5 e 10 cm de profundidade em tubetes de 55 cm³, antes e após o período de permanência em casa de vegetação (125 dias).

Densidade empacotamento	Antes (0 dias)		Após (125 dias)	
	5 cm	10 cm	5 cm	10 cm
Solto	7,33 c*	35,00 c	10,51 c	28,57 c
Intermediário	64,17 b	112,19 b	54,78 b	79,64 b
Compactado	165,68 a	211,71 a	143,54 a	247,02 a

*Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem estatisticamente pelo teste DMS (diferença mínima significativa) de Fisher ao nível de 5% de probabilidade de erro.

A impedância mecânica está relacionada com a resistência do substrato à penetração das raízes, menor difusão de oxigênio às raízes, aumento da umidade e a ação de hormônios, como o etileno e citocininas. Assim, a resistência do substrato à penetração afeta diretamente as raízes, ocasionando modificações morfológicas que podem tornar-se indesejáveis ao seu desempenho, o que terá como conseqüência menor superfície radicular

para a absorção de nutrientes e água (Schneider, 2000). Neste sentido, o sistema radicular das plantas que crescem em um meio compactado apresenta seu crescimento limitado, onde as raízes, normalmente, exibem formas irregulares e são mais grossas e curtas (Fermino & Kämpf, 2006).

De acordo com Kampf *et al.* (1999b) a pressão de penetração correlaciona-se com a compactação do substrato, apresentando interação entre o grau de compactação e o nível de umidade do substrato. Estes autores testaram a impedância mecânica em turfa, em dois níveis de hidratação e quatro densidades de empacotamento. Valores de pressão mais altos foram observados nas maiores densidades de empacotamento, confirmando o efeito da compactação. A presença de água nas amostras reduziu a impedância nos empacotamentos mais densos, enquanto nas amostras menos compactadas o efeito foi inverso.

A acomodação das partículas, ou seja, o empacotamento dos substratos dentro do recipiente, é o que irá determinar a geometria do espaço poroso, o que estabelece a dinâmica de água e ar (Klein *et al.*, 2000). Assim, o aumento da densidade por compactação proporciona redução da macroporosidade e aumento da microporosidade, gerando substratos com maior capacidade em reter água (Trigueiro & Guerrini, 2003). Em estudo caracterizando fisicamente substratos à base de serragem para o crescimento de mudas de cacaueteiro, verificou-se que o empacotamento das partículas preencheu os espaços vazios no substrato, reduzindo a aeração e, conseqüentemente, influenciando negativamente no crescimento das plantas (Sodré *et al.*, 2007).

Os resultados obtidos no presente estudo demonstram, portanto, o reflexo da acomodação das partículas, onde ocorre diminuição da porcentagem de macroporos devido à compactação, e conseqüentemente há maior proporção de microporos, que são responsáveis pelo armazenamento de água. Dentre estas alterações, destacam-se as ocorridas na retenção hídrica e na impedância mecânica, pois podem ocorrer problemas com excesso de água e dificuldades na penetrabilidade do substrato, prejudicando o desenvolvimento das plantas. Neste sentido, salienta-se a importância do preparo inicial da amostra para análise das referidas características físicas dos substratos, pois isto pode implicar na adoção de planos de manejo equivocados durante o cultivo das plantas, prejudicando, conseqüentemente, seu crescimento e desenvolvimento.

4.2.3 Efeito do tamanho da amostra na caracterização física dos substratos

Os resultados mostram que, em geral, o tamanho da amostra influenciou nos parâmetros de caracterização física dos materiais turfa de *Sphagnum*, pó-de-coco, casca de arroz carbonizada e vermiculita expandida considerados nesse estudo. Em relação à porosidade total e espaço de aeração os valores apresentaram média superior com a utilização do menor tamanho da amostra (cilindros com 53,16 cm³), com exceção do espaço de aeração para o material pó-de-coco, no qual não houve diferença significativa em função do tamanho de amostra utilizado na análise (Tabela 16).

TABELA 16. Porosidade total e espaço de aeração dos substratos turfa de *Sphagnum* (TS), pó-de-coco (PC), casca de arroz carbonizada (CAC) e vermiculita expandida (VE) em função de tamanhos de amostra utilizadas para a análise.

Parâmetros	Volume cilindro (cm ³)	Substratos			
		TS	PC	CAC	VE
Porosidade total (cm ³ cm ⁻³)	53,16	0,80	0,85	0,85	0,73
	381,05	0,74	0,78	0,73	0,66
	Valor p	***	*	***	*
Espaço de aeração (cm ³ cm ⁻³)	53,16	0,21	0,38	0,68	0,27
	381,05	0,15	0,36	0,58	0,21
	Valor p	***	ns	***	***

* p<0,05; ** p<0,01 e *** p<0,001 pelo teste t de Student, sendo que para porosidade total no pó-de-coco e vermiculita expandida utilizou-se o teste de Mann-Whitney. ^{ns} = não significativo.

Quanto aos atributos de disponibilidade de água, verificou-se valor médio mais alto também para água disponível quando utilizados cilindros de 53,16 cm³ para pó-de-coco, casca de arroz carbonizada e vermiculita expandida, enquanto para turfa de *Sphagnum* a média mais alta foi obtida em cilindros de 381,05 cm³. Estes resultados também foram observados para água facilmente disponível e água tamponante, porém, para água facilmente disponível, com turfa, não houve diferença significativa pelo teste t de Student (Tabela 17).

Para água remanescente também houve influência do tamanho da amostra para todos os materiais testados, sendo que para turfa de *Sphagnum* e pó-de-coco as médias mais altas foram obtidas com cilindros de 53,16 cm³, enquanto para casca de arroz carbonizada e vermiculita expandida a superioridade foi verificada com os cilindros de maior volume (381,05 cm³) (Tabela 17).

TABELA 17. Água disponível, água facilmente disponível, água tamponante e água remanescente dos substratos turfa de *Sphagnum* (TS), pó-de-coco (PC), casca de arroz carbonizada (CAC) e vermiculita expandida (VE) em função de tamanhos de amostra utilizadas para a análise.

Parâmetros	Volume cilindro (cm ³)	Substratos			
		TS	PC	CAC	VE
Água disponível (cm ³ cm ⁻³)	53,16	0,26	0,22	0,08	0,08
	381,05	0,28	0,19	0,04	0,05
	Valor p	*	**	***	***
Água facilmente disponível (cm ³ cm ⁻³)	53,16	0,20	0,19	0,08	0,07
	381,05	0,20	0,16	0,03	0,04
	Valor p	ns	**	***	***
Água tamponante (cm ³ cm ⁻³)	53,16	0,054	0,039	0,008	0,013
	381,05	0,080	0,033	0,003	0,008
	Valor p	*	*	***	***
Água remanescente (cm ³ cm ⁻³)	53,16	0,33	0,24	0,09	0,38
	381,05	0,30	0,23	0,11	0,40
	Valor p	***	*	***	***

* p<0,05; ** p<0,01 e *** p<0,001 pelo teste t de Student, sendo que para água disponível e água tamponante na turfa de *Sphagnum* utilizou-se o teste de Mann-Whitney. ^{ns} = não significativo.

Estes resultados mostram que o tamanho amostral influencia diretamente nos resultados de caracterização física dos substratos. Em estudo com amostras de casca de *Pseudotsuga menziesii*, Owen Júnior & Altland (2008) encontraram variações das propriedades físicas desse material em função da altura dos recipientes, onde o aumento da altura resultou em diminuição linear na capacidade de recipiente e aumento no espaço de aeração. Berenguer *et al.* (2004) comparando cultivos de plantas hortícolas em recipientes de 20 e 40 L, usando como substrato a fibra de coco, encontraram diferenças nos rendimentos das plantas e drenagem deficiente nos de menor altura. Além disso, Fernandes & Corá (2002) encontraram que a altura do cilindro porta-amostra afetou a determinação do espaço de aeração em vermiculita.

O efeito das alterações nas propriedades físicas dos substratos resultante de diferentes relações entre a altura e o diâmetro dos recipientes pode apresentar efeitos diretos no desenvolvimento das plantas. Heiskanen (1997) verificou que a forma e o tamanho dos recipientes afetam o conteúdo volumétrico de água e ar, a capacidade de recipiente, devido ao efeito da compactação e da porosidade do meio. Em estudo com *Rhapis excelsa*, a utilização de recipientes com 25 cm de altura revelou-se interessante pela

qualidade das plantas formadas em comparação com recipientes de 40 cm de altura (Luz *et al.*, 2006), o que pode estar relacionado com a baixa capacidade de retenção de água em recipientes com altura superior, devido a elevada drenagem. Resultados semelhantes foram verificados no cultivo de *Criptomeria japonica* (Santos *et al.*, 2000), *Eucalyptus grandis* (Gomes *et al.*, 2003), *Peltophorum dubium* (Brachtvogel & Malavasi, 2010) e *Cabralea canjerana* (Gasparin *et al.*, 2014).

Diante das mais variadas formas e tamanhos de recipientes utilizados atualmente para o cultivo de plantas, os quais apresentam, normalmente, elevada relação altura/diâmetro e reduzido volume de substrato, diferentemente dos cilindros de análise utilizados para caracterização dos substratos, podem ocorrer variações nos resultados obtidos. Segundo Puchalski & Kämpf (2000), os valores de espaço de aeração podem ter sido subestimados e a água disponível superestimada, quando os substratos foram analisados em cilindros com 3 cm de altura, em comparação a real condição nos recipientes testados (com 5 a 14 cm de altura). Portanto, a relação entre o tamanho do recipiente e o espaço de ar indica que a expressão dos dados de propriedades físicas com referência a tamanhos específicos de recipientes pode ser uma ferramenta útil na determinação das proporções de água e ar durante o cultivo em recipientes (Karlovich & Fonteno, 1986).

De acordo com Verdonck & Gabriëls (1988) para análise com objetivo de determinação de características físicas de substratos, deve-se fazer uso de cilindros com maior volume possível, isto porque é recomendado que os volumes de substrato que formam a unidade de análise contemplem toda a heterogeneidade das amostras, evitando que esta não seja representativa.

Diante dos resultados obtidos neste estudo, percebe-se que além do tamanho das amostras, outros fatores relacionados à manipulação dos materiais antes e durante as análises podem causar influência nos resultados dos parâmetros obtidos. Assim, são necessários estudos que proponham métodos para a padronização da preparação inicial das amostras.

5 CONCLUSÕES

A hipótese do trabalho foi confirmada, ou seja, a centrifugação das amostras mostra-se como um método promissor para análise de características físicas de substratos que determinam os parâmetros que compõem a curva de retenção de água, pois além de garantir que a força de tensão realmente atue sobre toda a amostra na determinação da curva de retenção de água de substratos, gerando resultados com confiabilidade e repetibilidade, ainda reduz o tempo de análise, otimizando os procedimentos rotineiros em laboratório.

O preparo inicial das amostras e a forma como elas são acondicionadas antes e durante as análises, no que diz respeito à compactação e ao tamanho amostral, alteram os valores de porosidade total, espaço de aeração, disponibilidade e capacidade de retenção de água dos componentes analisados. Além disso, a centrifugação em velocidade angular correspondente a 50 hPa mostra-se viável para a padronização da umidade inicial das amostras.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Informações científicas referentes a substratos para plantas enfatizam há décadas a importância do conhecimento detalhado dos materiais a serem utilizados como substratos e, principalmente, das suas propriedades físicas. No entanto, ainda não há um método eficiente para a determinação destas características. Além disso, como não existe um substrato considerado como ideal, que independa do sistema de cultivo empregado e do manejo adotado, a determinação correta das características dos materiais utilizados evita a adoção de técnicas de manejo inadequadas durante o cultivo das plantas, prejudicando seu crescimento e desenvolvimento.

Existe ampla diversidade de métodos de análise para determinação das características físicas de substratos com distintos procedimentos para medir as variáveis relacionadas à disponibilidade de ar e água. No Brasil, a determinação dos parâmetros físicos que compõe a curva de retenção de água em substratos ainda não é padronizada e os métodos utilizados, além de demandar muito tempo para obtenção de um laudo completo, podem gerar resultados imprecisos e sem repetibilidade. Por isso, a busca por métodos de análise confiáveis, com maior controle das variáveis envolvidas, e que possa reduzir o tempo necessário para obtenção de um laudo de análise física de substratos é de extrema importância.

A centrifugação de amostras apresenta-se, portanto, como uma alternativa de método para obtenção destes parâmetros que determinam a curva de retenção de água de substratos, desde que seja conduzida de forma adequada. Pois, é possível simular as tensões que determinam a curva de retenção de água de substratos, atualmente utilizadas, em equipamento adequado, compatibilizando a velocidade de trabalho e o raio de ação, associados ao tempo de análise, com maior controle das variáveis ambientais e em menor tempo. Além disso, possibilita a determinação do conteúdo hídrico volumétrico de

materiais de difícil análise, como por exemplo, a argila expandida, conferindo resultados com maior confiabilidade e repetibilidade.

Com base nos resultados obtidos neste estudo, salienta-se, ainda, a importância do controle da manipulação dos materiais na preparação inicial das amostras e durante as análises, quanto à umidade inicial, quantidade de sólidos por unidade de volume e tamanho amostral, pois isso influencia diretamente nos resultados dos parâmetros obtidos, justificando, com isso, a necessidade da adoção de um método para a padronização da umidade inicial. Devido a elevada diversidade de materiais é difícil uniformizar a umidade inicial das amostras com valores gravimétricos ou volumétricos pré-fixados, já que o comportamento quanto à consistência e agregação é distinto dependendo do material que está sendo analisado.

Neste contexto, o recomendado pela VDLUFA na década de 1970 (50% de umidade) não é o método mais adequado quando se trabalha com materiais diversos, em função de que a mesma proporção de água pode ter efeito diferente em função do tipo de material a ser analisado. Ainda, vale ressaltar que mesmo materiais de origem mineral, 50% de conteúdo volumétrico de água pode representar situações extremamente distintas em termos de saturação. Portanto, a correção do teor de umidade inicial das amostras submetendo-as ao tensionamento a 50 hPa, conforme a normatização europeia, parece ser o procedimento mais adequado para reduzir a variabilidade observada nos resultados das análises de rotina. Assim, o método da centrifugação se mostra viável, pois padroniza a umidade inicial das amostras após tensionamento em 50 hPa, em curto espaço de tempo. Todavia, sugere-se a realização de estudos comparando a padronização da umidade inicial das amostras a partir do método europeu (CEN-EN13041) e da centrifugação das amostras, a fim de comprovar os resultados obtidos neste trabalho.

Contudo, para validação do método da centrifugação das amostras, ainda são necessários estudos testando essa metodologia para outros tipos de componentes e/ou formulações, devido à grande diversidade de materiais e combinações que podem ser utilizados como substratos para o cultivo em recipientes. Além disso, novas análises podem ser realizadas com os mesmos lotes de materiais utilizados neste estudo, a fim de confirmar que o método a partir da centrifugação das amostras apresenta menor variabilidade nos resultados, possibilitando, assim, a obtenção de laudos com confiabilidade e maior repetibilidade. Neste sentido, ainda podem ser realizados estudos

com a centrifugação de argila expandida com diferentes granulometrias, em amostras com partículas inteiras e partidas (em “pó”), a fim de propor um método específico para este material.

Estudos testando outros modelos de centrífuga e diferentes volumes de cilindros também podem ser realizados, para comprovar que o método da centrifugação das amostras pode ser empregado em qualquer equipamento que possibilite compatibilizar a velocidade angular e o raio de ação, associados a tempos de ação.

Podem ainda ser realizados estudos com a centrifugação das amostras após o processo de dupla saturação e pré-tensionamento a 50 hPa, buscando evitar resultados equivocados, os quais podem ser expressados devido à falta de saturação completa dos materiais antes de serem submetidos às análises. Não obstante, também são necessários estudos com avaliação do crescimento e desenvolvimento de plantas em recipientes, em função de práticas de manejo adotadas com base em laudos de caracterização física dos substratos, determinados a partir do método da centrifugação das amostras, a fim de verificar as respostas das plantas em função dos valores dos parâmetros obtidos com a centrífuga.

Por fim, com base nos resultados obtidos neste trabalho, foi possível elaborar um protocolo de análise para o método da centrifugação das amostras (Apêndice 1), o qual ainda precisa ser validado em estudos futuros.

7 REFERÊNCIAS

ALMEIDA, K. M. *et al.* Efeito de diferentes proporções de moinha de café na composição de substratos alternativos para produção de mudas de pepino. **Revista de Ciências Agroveterinárias**, Lages, v. 17, n. 4, p. 515-522, 2018.

AMHA, Y. *et al.* Physical, chemical and botanical characteristics of peats used in the horticultural industry. **European Journal of Horticultural Science**, Stuttgart, v. 75, n. 4, p. 177-183, 2010.

BERENGUER, J. J. *et al.* Evaluación del volumen, tiempo de uso y geometría del contenedor en cultivos en fibra de coco. *In: JORNADAS DE SUSTRATOS DE LA SOCIEDAD ESPAÑOLA DE CIENCIAS HORTÍCOLAS - SECH*, 7., 2004, Madrid. **Actas de las [...]**. Madrid: SECH, 2004. p. 163-169.

BERILLI, S. S. *et al.* Componentes fisiológicos e crescimento inicial de mudas de palmeira-garrafa em resposta a substratos com logo de curtume. **Scientia Agraria**, Curitiba, v. 19, n. 1, p. 94-101, 2018.

BILDERBACK, T. E.; FONTENO, W. Improving nutrient and moisture retention in pine bark substrates with rockwool and compost combinations. **Acta Horticulturae**, The Hague, n. 342, p. 265-272, 1993.

BOHNE, H.; GÜNTHER, C. Physical properties of peat determined with different methods. **Acta Horticulturae**, The Hague, n. 450, p. 271-276, 1997.

BOSA, N. *et al.* Crescimento de mudas de gipsofila em diferentes substratos. **Horticultura Brasileira**, Brasília, DF, v. 21, n. 3, p. 514-519, 2003.

BRACHTVOGEL, E. L.; MALAVASI, U. C. Volume do recipiente, adubação e sua forma de mistura ao substrato no crescimento inicial de *Pelthophorum dubium* (Sprengel) Taubert em viveiro. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 34, n. 2, p. 223-232, 2010.

BRAGG, N. C.; CHAMBERS, B. J. Interpretation and advisory application of compost air-filled porosity (AFP) measurements. **Acta Horticulturae**, The Hague, n. 221, p. 35-44, 1988.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Secretaria de Apoio Rural e Cooperativismo. Instrução Normativa nº 14, de 15 de dezembro de 2004. Aprova as

definições e normas sobre as especificações e as garantias, as tolerâncias, o registro, a embalagem e a rotulagem dos substratos para plantas, constantes do anexo desta instrução normativa. **Diário Oficial da União**: seção 1, Brasília, DF, ano 141, n. 242, p. 23, 17 dez. 2004.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Secretaria de Defesa Agropecuária. Instrução Normativa nº 17, de 21 de maio de 2007. Aprova os métodos analíticos oficiais para análise de substratos e condicionadores de solos. **Diário Oficial da União**: seção 1, Brasília, DF, ano 144, n. 99, p. 8, 24 maio 2007.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Secretaria de Defesa Agropecuária. Instrução Normativa nº 05, de 10 de março de 2016. Estabelece as regras sobre definições, classificação, especificações e garantias, tolerâncias, registro, embalagem, rotulagem e propaganda dos remineralizadores e substratos para plantas. **Diário Oficial da União**: seção 1, Brasília, DF, ano 153, n. 49, p. 10, 14 mar. 2016.

BUNT, A. C. Physical properties of mixtures of peats and minerals of different particles size and bulk density for potting substrates. **Acta Horticulturae**, The Hague, n. 150, p. 143-153, 1983.

BURÉS, S. *et al.* Computer simulation to understand physical properties of substrates. **Acta Horticulturae**, The Hague, n. 401, p. 35-39, 1995.

CARON, J. *et al.* Defining critical capillary rise properties for growing media in nurseries. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 69, n. 3, p. 794-806, 2005.

CAVINS, T. J. *et al.* Monitoring and managing pH and EC using the PourThru extraction method. **Horticulture Information Leaflet**, Raleigh, v. 7, p. 1-17, 2000.

CECCAGNO, H. *et al.* Potential of *Pinus elliottii* Engelm. needles as substrate conditioner for the production of “Fepagro C37 Reck” Citrus rootstocks. **Revista Brasileira de Fruticultura**, Jaboticabal, v. 41, n. 3, [art.] e-039, 2019. Disponível em: <http://www.scielo.br/pdf/rbf/v41n3/0100-2945-rbf-41-3-e-039.pdf>. Acesso em: 28 nov. 2019.

COMITÉ EUROPEÉN DE NORMALISATION. EN 13040: 1999. **Mejoradores de suelo y sustratos de cultivo**: preparación de muestras para ensayos químicos e físicos, determinación del contenido de matéria seca, contenido de humedad y de la densidad aparente compactada en laboratorio. Bruxelles: Comité Europeén de Normalisation, 1999a.

COMITÉ EUROPEÉN DE NORMALISATION. EN 13041: 1999. **Mejoradores de suelo y sustratos de cultivo**: determinación de las propiedades físicas, densidad aparente seca, volumen de aire, volumen de agua, valor de contracción y porosidad total. Bruxelles: Comité Europeén de Normalisation, 1999b.

CRUZ, F. R. S.; ANDRADE, L. A.; FEITOSA, R. C. Produção de mudas de umbuzeiro (*Spondias tuberosa* Arruda Câmara) em diferentes substratos e tamanho de recipientes. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 26, n. 1, p. 69-80, 2016.

DE BOODT, M.; VERDONCK, O.; CAPPART, J. Methods for measuring the water release curve of organic substrates. **Acta Horticulturae**, The Hague, n. 37, p. 2054-2062, 1974.

DE BOOT, M.; VERDONCK, O. The physical properties of the substrates in horticulture. **Acta Horticulturae**, The Hague, n. 26, p. 37-44, 1972.

DIAZ, B. C. **Uso da centrífuga para determinação da retenção de água para substratos à base de casca de arroz**. 2010. Tese (Doutorado em Ciências) - Programa de Pós-Graduação em Sistema de Produção Agrícola Familiar, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2010.

FERMINO, M. H. **Métodos de análise para caracterização física de substratos para plantas**. 2003. Tese (Doutorado em Fitotecnia) - Programa de Pós-Graduação em Fitotecnia, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

FERMINO, M. H. **Substratos: composição, caracterização e métodos de análise**. Guaíba: Agrolivros, 2014.

FERMINO, M. H.; KÄMPF, A. N. Considerations about the packing density of growing media prepared under increasing levels of humidity. **Acta Horticulturae**, The Hague, n. 697, p. 147-151, 2005.

FERMINO, M. H.; KÄMPF, A. N. Densidade de substratos dependendo dos métodos de análise e níveis de umidade. **Horticultura Brasileira**, Brasília, DF, v. 30, n. 1, p. 75-79, 2012.

FERMINO, M. H.; KÄMPF, A. N. Impedância mecânica de substratos para plantas submetidos a diferentes tensões hídricas. **Pesquisa Agropecuária Gaúcha**, Porto Alegre, v. 12, n. 1/2, p. 25-30, 2006.

FERMINO, M. H.; MIETH, P. Análise de substratos para produção de mudas de espécies florestais. *In*: ARAUJO, M. M.; NAVROSKI, M. C.; SCHORN, L. A. (org.). **Produção de sementes e mudas: um enfoque à silvicultura**. Santa Maria: UFSM, 2018. p. 167-186.

FERNANDES, C.; CORÁ, J. E. Bulk density and relationship air/water of horticultural substrate. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 61, n. 4, p. 446-450, 2004.

FERNANDES, C.; CORÁ, J. E. Efeito da altura do anel volumétrico na determinação da curva de retenção de água em substratos. *In*: FURLANI, A. M. C. *et al.* (ed.). **Caracterização, manejo e qualidade de substratos para produção de plantas**. Campinas: Instituto Agrônomo, 2002. p. 84.

FERRAZ, M. V.; CENTURION, J. F.; BEUTLER, A. N. Caracterização física e química de alguns substratos comerciais. **Acta Scientiarum. Agronomy**, Maringá, v. 27, n. 2, p. 209-214, 2005.

- FOCHESATO, M. L. *et al.* Alterações das características químicas de três substratos comerciais na produção de mudas cítricas. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 32, n. 4, p. 1040-1046, 2008.
- FONTENO, W. C. Problems e considerations in determining physical properties of horticultural substrates. Substrates in horticulture. **Acta Horticulturae**, The Hague, n. 342, p. 197-204, 1993.
- FONTENO, W. C.; CASSEL, D. K.; LARSON, R. A. Physical properties of three container media and their effect on poinsettia growth. **Journal of the American Society for Horticultural Science**, Alexandria, VA, v. 106, n. 6, p. 736-741, 1981.
- FONTENO, W. C.; HARDEN, C. T. **Procedures for determining physical properties of horticultural substrates using the NCSU porometer**. Raleigh: North Carolina State University, 2003.
- FREITAS JÚNIOR, E.; SILVA, E. M. Uso da centrífuga para determinação da curva de retenção de água do solo, em uma única operação. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 19, n. 11, p. 1423-1428, 1984.
- GABRIËLS, R.; VERDONCK, O. Physical and chemical characterization of plant substrates: towards a european standarization. **Acta Horticulturae**, The Hague, n. 294, p. 249-259, 1991.
- GASPARIN, E. *et al.* Influência do substrato e do volume de recipiente na qualidade das mudas de *Cabralea canjerana* (Vell.) Mart. em viveiro e no campo. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 24, n. 3, p. 553-563, 2014.
- GOH, K. M.; MASS, E. F. A procedure for determining air and water capacity of soilless media and a method for presenting the results for easier interpretations. **Acta Horticulturae**, The Hague, n. 99, p. 81-91, 1980.
- GOMES, J. M. *et al.* Crescimento de mudas de *Eucalyptus grandis* em diferentes tamanhos de tubetes e fertilização N-P-K. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 27, n. 2, p. 113-127, 2003.
- GOMES, J. M.; PAIVA, H. N. **Viveiros florestais: propagação sexuada**. Viçosa, MG: UFV, 2013.
- GONÇALVES, J. L. M.; POGGIANI, F. Substratos para produção de mudas florestais. *In*: CONGRESSO LATINO AMERICANO DE CIÊNCIA DO SOLO, 13., 1996, Águas de Lindóia. **Resumos**. Piracicaba: Sociedade Latino Americana de Ciência do Solo, 1996.
- GRUSZYNSKI, C. **Resíduo agro-industrial “casca de tungue” como componente de substrato para plantas**. 2002. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Fitotecnia, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002.

HEISKANEN, J. Air filled porosity of eight growing media based on Sphagnum peat during drying from container capacity. **Acta Horticulturae**, The Hague, v. 450, p. 277-286, 1997.

HOFFMANN, G. Verbindliche methoden zur untersuchung von TKS und gartnerischen erden. **Mitteilungen der VSLUFA**, Darmstadt, v. 6, p. 129-153, 1970.

KÄMPF, A. N. **Produção comercial de plantas ornamentais**. Guaíba: Agrolivros, 2005.

KÄMPF, A. N. Relação entre densidade de empacotamento e propriedades físicas de um substrato comercial. *In*: ENCONTRO NACIONAL DE SUBSTRATOS PARA PLANTAS, 2., 2000, Florianópolis. **Anais [...]**. Florianópolis: ENSUB, 2000.

KÄMPF, A. N.; HAMMER, P. A.; KIRK, T. Effect of the packing density on the mechanical impedance of root media. **Acta Horticulturae**, The Hague, v. 481, n. 2, p. 689-694, 1999a.

KÄMPF, A. N.; HAMMER, P. A.; KIRK, T. Impedância mecânica em substratos hortícolas. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 34, n. 11, p. 2157-2161, 1999b.

KARLOVICH, P. T.; FONTENO, W. C. Effect of soil moisture tension and soil water content on the growth of chrysanthemum in 3 container media. **Journal of the American Society for Horticultural Science**, Alexandria, VA, v. 111, n. 2, p. 191-195, 1986.

KLEIN, C. Utilização de substratos alternativos para produção de mudas. **Revista Brasileira de Energias Renováveis**, Curitiba, v. 4, p. 43-63, 2015.

KLEIN, V. A. *et al.* Propriedades físico-hídricas de substratos hortícolas comerciais. **Revista Brasileira de Agrociência**, Pelotas, v. 6, n. 3, p. 218-221, 2000.

KRATZ, D. *et al.* Substratos renováveis para a produção de mudas de *Mimosa scabrella*. **Revista Floresta**, Curitiba, v. 45, n. 2, p. 393-408, 2015.

KRATZ, D. *et al.* Utilização de resíduos urbanos e agroflorestais para produção de mudas de *Eucalyptus benthamii* e *Mimosa scabrella*. **FLORAM – Revista Floresta e Ambiente**, Seropédica, v. 20, n. 4, p. 530-537, 2013.

KREIJ, C. *et al.* Extraction of growing media regarding its water holding capacity and bulk density. **Acta Horticulturae**, The Hague, n. 548, p. 409-414, 2001.

LACERDA, M. R. B. *et al.* Características físicas e químicas de substratos à base de pó de coco e resíduo de sisal para produção de mudas de sabiá (*Mimosa caesalpiniaefolia* Benth). **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 30, n. 2, p. 163-170, 2006.

LIZ, R. S. *et al.* Mini sensor Irrigas® na determinação da curva de retenção de água em substratos para hortaliças. **Horticultura Brasileira**, Brasília, DF, v. 26, n. 4, p. 504-509, 2008.

LUZ, P. B. *et al.* Desenvolvimento de *Rhapis excelsa* (Thunberg) Henry ex. Rehder (Palmeira-ráfia): influência da altura do recipiente na formação de mudas. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 30, n. 1, p. 31-34, 2006.

MARTÍNEZ, P. F. Manejo de substratos para horticultura. *In*: FURLANI, A. M. C. *et al.* (ed.). **Caracterização, manejo e qualidade de substratos para produção de plantas**. Campinas: Instituto Agrônomo, 2002. p. 53-76.

MARTINEZ-FARRÉ, F. X. Propuesta de metodología para la determinación de las propiedades físicas de los sustratos. *In*: JORNADAS DE SUSTRATOS DE LA SOCIEDAD ESPAÑOLA DE CIENCIAS HORTÍCOLAS, 1., 1992, [Villaviciosa]. **Actas de las [...]**. Madrid: SECH, 1992. v. 294, p. 55-66.

MINER, J. A. **Sustratos: propiedades y caracterización**. Madrid: Ediciones Mundi-Prensa, 1994.

MONTEIRO, A. B. *et al.* Características físico-hídricas de substratos formulados com lodo de esgoto na produção de mudas de acácia-negra. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 29, n. 3, p. 1428-1435, 2019.

MOTA, C. S. *et al.* Physiology and quality of *Eugenia dysenterica* DC seedlings grown in vermiculite and rice husk-based substrates. **Revista Brasileira de Fruticultura**, Jaboticabal, v. 40, n. 1, [art.] e-049, 2018. Disponível em: <http://www.scielo.br/pdf/rbf/v40n1/0100-2945-rbf-40-1-e-049.pdf>. Acesso em: 10 out. 2019.

NOGUERA, P. **Caracterización y evaluación agronómica del residuo de fibra de coco: un nuevo material para el cultivo en sustratos**. 1999. Tese (Doutorado em Química) - Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos, Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, 1999.

OCONOR, E. F. *et al.* Influencia del sustrato en la calidad de la plana *Swietenia mahagoni* (L.) Jacq., cultivada en contenedores. **Revista Cubana de Ciencias Forestales**, Pinar del Río, v. 7, n. 3, p. 283-296, 2019.

OROZCO, R.; MARFÀ, O.; BURÉS, S. Water status of graded perlites. **Acta Horticulturae**, The Hague, n. 401, p. 137-143, 1995.

OWEN JÚNIOR, J. S.; ALTLAND, J. E. Container height and douglas fir bark texture affect substrate physical properties. **HortScience**, Alexandria, VA, v. 43, n. 2, p. 505-508, 2008.

PAGLIARINI, M. K. *et al.* Caracterização física e química de substratos com diferentes proporções de resíduo de celulose. **Ornamental Horticulture**, Viçosa, MG, v. 21, n. 1, p. 33-38, 2015.

PENNINGSFELD, F. Substrates for protected cropping. **Acta Horticulturae**, The Hague, n. 82, p. 13-22, 1978.

PICKEN, P.; REINIKAINEN, O. Horticultural peat raw material and its physical characteristics in Finland, Sweden and Baltic States. **Acta Horticulturae**, The Hague, n. 891, p. 337-343, 2009.

PUCHALSKI, L. E. A.; KÄMPF, A. N. Efeito da altura do recipiente sobre a produção de mudas de *Hibiscus rosa-sinensis* L. em plugs. In: KÄMPF, A. N.; FERMINO, M. H. (ed.). **Substratos para plantas: a base da produção vegetal em recipientes**. Porto Alegre: Gênese, 2000. p. 209-215.

PUUSTJÄRVI, V. Physical properties of peat used in horticulture. **Acta Horticulturae**, The Hague, n. 37, p. 1922-1929, 1974.

RAVIV, M.; WALLACH, R.; BLOM, T. J. The effect of physical properties of soilless media on plant performance: a review. **Acta Horticulturae**, The Hague, v. 644, p. 251-259, 2004.

RAVIV, M.; LIETH, J. H. **Soilless culture: theory and practice**. Amsterdam: Elsevier, 2008.

SAHIN, U.; ANAPALI, O.; ERCISLI, S. Physico-chemical and physical properties of some substrates used in horticulture. **Gartenbauwissenschaft**, Stuttgart, v. 67, n. 2, p. 55-60, 2002.

SAIDELLES, F. L. F. *et al.* Casca de arroz carbonizada como substrato para produção de mudas de tamboril-da-mata e garapeira. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v. 30, p. 1173-1186, 2009. Supl. 1.

SANTOS, C. B. *et al.* Efeito do volume de tubetes e tipos de substratos na qualidade de mudas de *Cryptomeria japonica* (L.F.) D. Don. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 10, n. 2, p. 1-15, 2000.

SCHAFER, G. **Produção de porta-enxertos cítricos em recipientes e ambiente protegido no Rio Grande do Sul**. 2004. Tese (Doutorado em Fitotecnia) - Programa de Pós-Graduação em Fitotecnia, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

SCHAFER, G.; SOUZA, P. V. D.; FIOR, C. S. Um panorama das propriedades físicas e químicas de substratos utilizados em horticultura no sul do Brasil. **Ornamental Horticulture**, Viçosa, MG, v. 21, n. 3, p. 299-306, 2015.

SCHMITZ, J. A. K.; SOUZA, P. V. D.; KÄMPF, A. N. Propriedades químicas e físicas de substratos de origem mineral e orgânica para o cultivo de mudas em recipientes. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 32, n. 6, p. 937-944, 2002.

SCHNEIDER, F. **Importância do substrato na aclimatização e pós-aclimatização de *Limonium platyphyllum***. 2000. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Fitotecnia, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2000.

SILVA, E. M.; AZEVEDO, J. A. **Período de centrifugação adequado para levantamento da curva de retenção de água em solos do Bioma Cerrado**. Planaltina: Embrapa Cerrados, 2001. (Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 8).

SODRÉ, G. A.; CORÁ, J. E.; SOUZA JÚNIOR, J. O. Caracterização física de substratos à base de serragem e recipientes para crescimento de mudas de cacaueteiro. **Revista Brasileira de Fruticultura**, Jaboticabal, v. 29, n. 2, p. 339-344, 2007.

SPIER, M. **Ajuste de metodologias para análise física de substratos e teste do resíduo de cana-de-açúcar para o cultivo de plantas**. 2008. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Fitotecnia, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.

STEEL, R. G. D.; TORRIE, J. H. **Bioestadística: principios y procedimientos**. México: McGraw-Hill, 1988.

STUEPP, C. A. *et al.* Use os renewable substrates for ex vitro production of *Melaleuca alternifolia* Cheel clones plants by mini-cuttings technique. **Cerne**, Lavras, v. 23, n. 4, p. 395-402, 2017.

TERÉS, V. *et al.* Physical properties of the substrates. **Acta Horticulturae**, The Hague, v. 559, p. 663-668, 2001.

TRIGUEIRO, R. M.; GUERRINI, I. A. Uso de biossólido como substrato para produção de mudas de eucalipto. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, n. 64, p. 150-162, 2003.

VALENZUELA, O. R. **Caracterización y evaluación agronómica de materiales regionales usados en la formulación de sustratos para plantas**. 2009. Tese (Doutorado em Ciências Agrárias) - Universidad Nacional de Rosario, Rosario, 2009.

VENCE, L. B. Disponibilidade de água-aré em sustratos para plantas. **Ciencia del Suelo**, Buenos Aires, v. 26, n. 2, p. 105-114, 2008.

VENCE, L. B. *et al.* Métodos de medición de densidad en sustratos para producción de plantas. *In*: CONGRESO LATINOAMERICANO DE LA CIENCIA DEL SUELO, 19.; CONGRESO ARGENTINO DE LA CIENCIA DEL SUELO, 23., 2012, Mar del Plata. **Anais [...]**. Buenos Aires: AACS, SLCS, 2012.

VENCE, L. B. **Métodos de determinación de parâmetros que estiman la disponibilidad de agua-aire em substratos para plantas y su relación com la respuesta vegetal.** 2012. Dissertação (Mestrado) - Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires, Buenos Aires, 2012.

VENCE, L. B.; VALENZUELA, O.; SVARTZ, H. Caracterización física de sustratos com fines comerciales: densidad y capacidad de retención de agua medidas por diferentes métodos. *In: ENCONTRO NACIONAL DE SUBSTRATOS PARA PLANTAS*, 7., 2010, Goiânia. **Anais [...]**. Goiânia: UFG, CNPQ, 2010.

VERDONCK, O.; CAPPAERT, I. M.; DE BOODT, M. Physical characterization of horticultural substrates. **Acta Horticulturae**, The Hague, n. 82, p. 191-200, 1978.

VERDONCK, O.; GABRIËLS, R. Substrate requirements for plants. **Acta Horticulturae**, The Hague, n. 22, p. 119-123, 1988.

WALLACH, R.; SILVA, F.; CHEN, Y. Hydraulic characteristics of tuff (scoria) used as a container medium. **Journal of the American Society for Horticultural Science**, Alexandria, VA, v. 117, n. 3, p. 415-421, 1992.

WEVER, G.; VAN WINKEL, A. Interlaboratory study CEN-Methods for the analysis of growing media and soil improvers. **Acta Horticulturae**, The Hague, n. 644, p. 597-601, 2004.

ZORZETO, T. Q. *et al.* Caracterização física de substratos para plantas. **Bragantia**, Campinas, v. 73, n. 3, p. 300-311, 2014.

8 APÊNDICE

APÊNDICE 1:

Protocolo para determinação dos parâmetros que compõem a curva de retenção de água de substratos para plantas a partir do método que consiste na centrifugação das amostras

Equipamentos:

- Centrífuga, com capacidade de, no mínimo, 200 rpm;
- Conjunto de cilindros com suporte que possa ser acoplado no rotor da centrífuga. Os cilindros devem ter na sua base um coletor da água drenada, com volume mínimo de 50% do volume interno do respectivo cilindro, conforme exemplificado na Figura 1;
- Balança digital (capacidade 0,1 g);
- Proveta plástica graduada (500 mL), com suporte (Figura 2);
- Estufa de secagem (temperatura mínima de 60 °C).

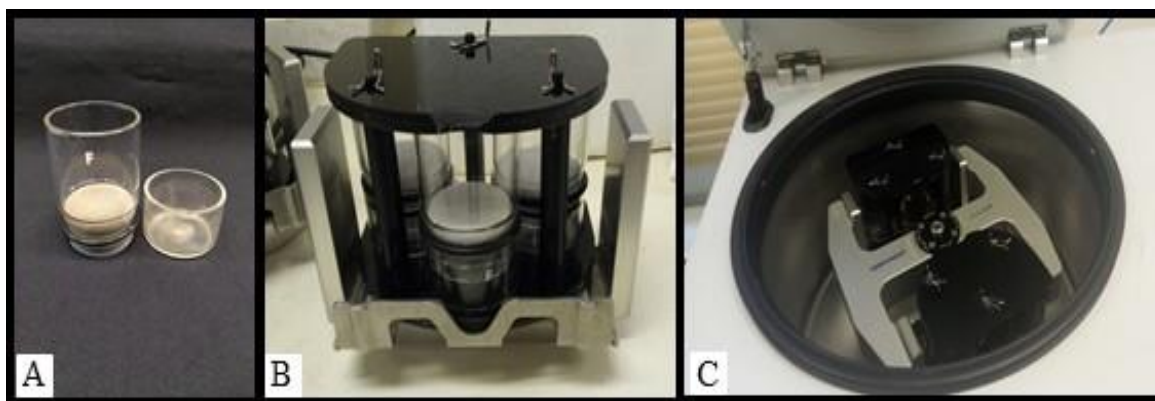


FIGURA 1. Cilindro com placa de vidro sinterizada e reservatório coletor para água drenada (A) e estrutura de plástico rígido que serve como suporte para os cilindros (B) acoplado em rotor de placas da centrífuga Eppendorf (modelo 5804R) (C).



FIGURA 2. Suporte para proveta com argola fixada a 10 cm de altura.

Métodos:

1. Definição do número de rotações por minuto (rpm) na centrífuga:

As tensões (10, 50 e 100 hPa) devem ser simuladas aliando-se a velocidade angular, a altura da amostra e o raio medido do ponto mais externo da amostra ao ponto central da centrífuga. Assim, a velocidade angular (rpm) para cada potencial, deve ser calculada de acordo com as equações 1 e 2.

Equação 1: $\omega = K \sqrt{h}$

$$\text{Equação 2: } K = \frac{60}{2\pi} \sqrt{\frac{6 \times 981 \times 10,1957}{L(3 Re - L)}}$$

Onde: ω = velocidade angular em rpm;

\bar{h} = tensão em kPa;

$K = x$, em unidades convenientemente transformadas de modo que o valor da rotação resulte em rpm para uma tensão dada em hPa;

L = comprimento da amostra de substrato (cm);

Re = raio medido do ponto mais externo da amostra até o do ponto central da centrífuga (cm), conforme demonstrado na Figura 3.

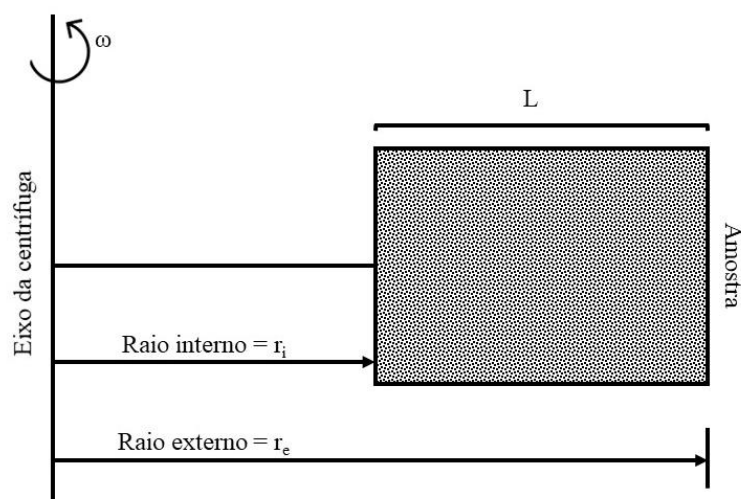


FIGURA 3. Representação esquemática de uma amostra em centrífuga.

2. Padronização da umidade inicial das amostras:

Antes da padronização da umidade inicial das amostras, quando estas são recebidas pelo laboratório, devem ser submetidas à determinação da umidade atual, com base na equação 3:

$$\text{Equação 3: } UA (\%) = \frac{\text{massa úmida (g)} - \text{massa seca (g)}}{\text{massa úmida (g)}} \times 100$$

Posteriormente, são seguidos os procedimentos para padronização da umidade inicial:

- a. Os cilindros são preenchidos com subamostras e deixados saturar submersos em água até 2/3 de sua altura, durante 24 horas;
- b. Cilindros são retirados da água, obtendo-se, imediatamente, o peso saturado. Salienta-se a importância de usar um prato com massa previamente determinada para colocar os cilindros no mesmo instante em que são retirados da água, a fim de não perder água por drenagem;
- c. As subamostras são submetidas à centrifugação durante 60 minutos em velocidade angular correspondente a 50 hPa de tensão, sendo, posteriormente, pesadas em balança digital;
- d. As subamostras são levadas à estufa a 65 ± 5 °C até massa constante para determinação da umidade padronizada, segundo equação 4.

$$\text{Equação 4: } U (\%) = \frac{\text{massa úmida após centrifugação a 50 hPa (g)} - \text{massa seca (g)}}{\text{massa úmida após centrifugação a 50 hPa (g)}} \times 100$$

Após conhecido o volume de água das subamostras submetidas à centrifugação, realiza-se a uniformização da amostra total, levando-se em consideração esse percentual de umidade correspondente à equação 3. Assim, a umidade padronizada será correspondente à umidade que permanecer no substrato após centrifugação com força equivalente a uma tensão de 50 hPa, durante 60 minutos.

3. Determinação da densidade:

Após padronização da umidade inicial das amostras, preencher uma proveta plástica transparente e graduada de 500 mL, até a marca de 300 mL. Após, esta proveta é deixada cair sob a ação do seu próprio peso, de uma altura de 10 cm por 10 (dez) vezes consecutivas. Com auxílio de uma espátula nivela-se a superfície levemente, e lê-se o volume obtido (mL). Em seguida pesa-se o material úmido (g) e leva-se à estufa para secagem a 65 ± 5 °C até peso constante.

O procedimento deverá ser realizado em triplicata, e em todas elas com material não usado nas demais, ou seja, o material da subamostra que for sendo usado em cada uma das unidades da triplicata deve ser descartado.

Os valores de densidade úmida (DU) e densidade seca (DS) serão obtidos aplicando-se as equações 5 e 6, respectivamente.

$$\text{Equação 5: } DU \text{ (kg m}^{-3}\text{)} = \frac{\text{massa úmida (g)}}{\text{volume (mL)}} \times 1000$$

$$\text{Equação 6: } DS \text{ (kg m}^{-3}\text{)} = \frac{\text{densidade úmida (kg m}^{-3}\text{)} \times (100 - \text{umidade (\%)})}{100}$$

4. Determinação do tempo de centrifugação:

Para o preenchimento dos cilindros, a quantidade de material deve ser calculada a partir da densidade úmida dos substratos, conforme o volume de cada cilindro (equação 7), para garantir a uniformidade de volume.

$$\text{Equação 7: massa de substrato} = \frac{\text{volume do cilindro (mL)} \times \text{densidade úmida (g L}^{-1}\text{)}}{1000}$$

- a. Os cilindros são preenchidos e deixados saturar submersos em água até 2/3 de sua altura, durante 24 horas;
- b. Cilindros são retirados da água, obtendo-se, imediatamente, o peso saturado. O volume de água contida na amostra neste momento corresponde ao ponto zero de tensão (0 hPa). Salienta-se a importância de usar um prato com massa previamente determinada para colocar os cilindros no mesmo instante em que são retirados da água, a fim de não perder água por drenagem;
- c. Transferência dos cilindros para a centrífuga, previamente ajustada para velocidade angular (rpm) correspondente à tensão de 10 cm de coluna de água (10 hPa), sendo determinado o tempo de centrifugação conforme procedimentos que seguem:
 - Para cada velocidade angular, independentemente, as amostras são submetidas à centrifugação por tempo indeterminado, sendo que a cada 30 minutos de centrifugação, determina-se, por meio de pesagem, o conteúdo de água presente na amostra;

- Com os valores de massa dos cilindros para cada três tempos de centrifugação consecutivos, realizam-se ajustes de regressão linear.
 - Quando o coeficiente de determinação (R^2) para as regressões lineares entre três tempos de centrifugação consecutivos for maior ou igual ao coeficiente de determinação considerado como adequado pelo laboratório, determina-se que a umidade remanescente na amostra entrou em equilíbrio, e por isso, dando encerramento à centrifugação.
- d. Após a centrifugação, as amostras são levadas à estufa a 65 ± 5 °C até massa constante, a fim de estabelecer o conteúdo de água que permaneceu nas amostras após a centrifugação em velocidade angular correspondente a cada tensão pré-determinada.

Estes mesmos procedimentos, independentemente, devem ser realizados para velocidades angulares que correspondem às tensões de 50 e 100 hPa.

O número e o volume dos cilindros podem variar conforme o tipo de centrífuga empregada. No entanto, recomenda-se a utilização de um volume amostral não menor do que 300 cm³ por análise, mesmo que esse volume corresponda à soma das subunidades, às quais poderão ter volume adequado à capacidade da centrífuga. Contudo, é importante mencionar que não tentamos subunidades menores de 60,96 cm³.

5. Determinação das características físicas dos substratos:

A construção da curva de retenção de água é efetuada com os valores de umidade volumétrica obtidos através dos percentuais de água retida para cada tensão.

De posse destes dados, são obtidas as seguintes características:

Capacidade de retenção de água:

$$\text{Equação 8: CRA (cm}^3 \text{ cm}^{-3}\text{)} = \frac{\text{volume de água retido na tensão 10 hPa (cm}^3\text{)}}{\text{volume do cilindro (cm}^3\text{)}}$$

Porosidade total:

$$\text{Equação 9: PT (cm}^3 \text{ cm}^{-3}\text{)} = \frac{\text{volume de água retido na tensão 0 hPa (cm}^3\text{)}}{\text{volume do cilindro (cm}^3\text{)}}$$

Espaço de aeração:

$$\text{Equação 10: EA (cm}^3 \text{ cm}^{-3}\text{)} = \frac{\text{volume de água retido em 0 hPa (cm}^3\text{)} - \text{volume de água retido em 10 hPa (cm}^3\text{)}}{\text{volume do cilindro (cm}^3\text{)}}$$

Água disponível:

$$\text{Equação 11: AD (cm}^3 \text{ cm}^{-3}\text{)} = \frac{\text{volume de água retido em 10 hPa (cm}^3\text{)} - \text{volume de água retido em 100 hPa (cm}^3\text{)}}{\text{volume do cilindro (cm}^3\text{)}}$$

Água facilmente disponível:

$$\text{Equação 12: AFD (cm}^3 \text{ cm}^{-3}\text{)} = \frac{\text{volume de água retido em 10 hPa (cm}^3\text{)} - \text{volume de água retido em 50 hPa (cm}^3\text{)}}{\text{volume do cilindro (cm}^3\text{)}}$$

Água tamponante:

$$\text{Equação 13: AT (cm}^3 \text{ cm}^{-3}\text{)} = \frac{\text{volume de água retido em 50 hPa (cm}^3\text{)} - \text{volume de água retido em 100 hPa (cm}^3\text{)}}{\text{volume do cilindro (cm}^3\text{)}}$$

Água remanescente:

$$\text{Equação 14: AR (cm}^3 \text{ cm}^{-3}\text{)} = \frac{\text{volume de água retido em 100 hPa (cm}^3\text{)}}{\text{volume do cilindro (cm}^3\text{)}}$$