

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA

MARCOS PAULO FELIZARDO

CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E DE SECAGEM DE SEMENTES DE
EMBAÚBA (*Cecropia glaziovii* Snethlage)

SÃO CARLOS

2014

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA

MARCOS PAULO FELIZARDO

CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E DE SECAGEM DE SEMENTES DE
EMBAÚBA (*Cecropia glaziovii* Snethlage)

Dissertação apresentada como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Química, área de concentração em Pesquisa e Desenvolvimento de Processos Químicos.

Orientador: Prof. Dr. Dermeval José Mazzini Sartori

SÃO CARLOS

2014

**Ficha catalográfica elaborada pelo DePT da
Biblioteca Comunitária da UFSCar**

F316cf

Felizardo, Marcos Paulo.

Caracterização física e de secagem de sementes de embaúba (*Cecropia glaziovii* Snethlage) / Marcos Paulo Felizardo. -- São Carlos : UFSCar, 2014.
69 f.

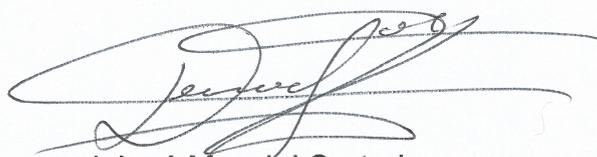
Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal de São Carlos, 2014.

1. Secagem. 2. Propriedades físicas. 3. Esfericidade. 4. Fluidização. 5. *Cecropia*. I. Título.

CDD: 660.28426 (20^a)

MEMBROS DA BANCA EXAMINADORA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DE **MARCOS PAULO FELIZARDO** APRESENTADA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS, EM 28 DE FEVEREIRO DE 2014.

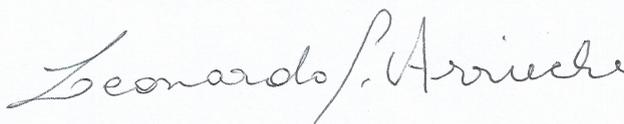
BANCA EXAMINADORA:



Dermeval José Mazzini Sartori
Orientador, UFSCar



José Teixeira Freire
UFSCar



Leonardo da Silva Arrieche
UFES

Dedico este trabalho aos meus pais,
sem eles não teria chegado até aqui,
sem eles não conseguiria continuar.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, a Ele que me deu a vida e que me ajudou a desbravá-la.

Aos meus pais que são meus amigos mais fiéis, não tenho como expressar todo o amor recebido, não tem como agradecer toda a compreensão das minhas peculiaridades e não tinha como existir sem vocês.

A Professora Maria Angélica Martins Costa que acreditou em mim, me apoiou, me ensinou e me encaminhou até a Pós-Graduação em Engenharia Química da UFSCar. Obrigado por me ouvir, me dar conselhos e me apoiar. Obrigado por todo o seu carinho e me inspirar com sua capacidade e amor pelo que faz.

As minhas amigas Karina, Itala e Camila Kleye que toda vez que vou para Itapeva me fazem lembrar bons momentos, e que nada mudou.

Aos meus amigos Diego, Dalington e Anderson que dedicaram horas no celular, me fazendo rir demais, me ouvindo e que nunca me abandonaram apesar das minhas ausências.

A minha amiga Juliana Vieira que tem o dom da sinceridade e sempre mostra a realidade pra mim, nos momentos em que distorço tudo. E nunca me julgou pelos tantos erros cometidos.

As minhas amigas do PPGEQ-UFSCar: Paula, Liliana e Juliana Pereira que sempre estiveram comigo.

E sem sombra de dúvida ao grande Professor Dermeval José Mazzini Sartori, que teve a paciência de me encaminhar e de me ensinar, que teve carinho na hora de me corrigir e que estava presente em todos os momentos.

Ao Professor José Teixeira Freire que apoiou e ajudou muito para a realização deste trabalho.

Aos Professores do Centro de Secagem e aos técnicos do DEQ-UFSCar.

Ao Horto Florestal Navarro de Andrade pela permissão e realização dos testes de germinação das sementes.

Ao CNPq, CAPES, FAPESP e PRONEX/CNPq pelo apoio financeiro.

“Todos os problemas se tornam infantis, depois de explicados.” Sherlock Holmes

RESUMO

A secagem de sementes da espécie pioneira *Cecropia glaziovii* Snethlage é motivada devido às suas características de recuperação de florestas heterogêneas degradadas. Neste trabalho o principal objetivo é a caracterização física e de secagem de sementes de *Cecropia glaziovii* em leito fluidizado em batelada, bem como a qualidade fisiológica. As dimensões e formas das sementes foram obtidas através de análise de imagens, avaliando a reprodutibilidade destas medidas para amostras *in natura* e classificadas por peneiramento. Foi realizada a caracterização de secagem em leito fluidizado com alturas de leitos fixos iniciais de 3 e 5 cm, com temperatura do ar de $(40\pm 2)^{\circ}\text{C}$ e velocidade do ar de secagem de $(1,0\pm 0,3)$ m/s. Foi observado que as dimensões e formas das sementes classificadas por peneiramento apresentam maior reprodutibilidade que as *in natura*. Portanto, foram utilizadas as sementes retidas na peneira de 20 mesh para a caracterização de secagem. Através do adimensional de umidade em função do tempo pode-se constatar que a mistura no leito fluidizado foi homogênea, pois a variação foi desprezível entre as alturas de leito de 3 e 5 cm. Com base no adimensional de taxa de secagem em função do adimensional de umidade observou-se apenas o período de taxa de secagem decrescente, também se constatou que as sementes de embaúba constituem um sistema de partículas poroso e higroscópico nas condições utilizadas neste trabalho. Portanto, através da caracterização física obtiveram-se amostras com reprodução estatística das medidas de dimensões e formas, e para estas sementes foi realizada a caracterização de secagem, obtendo-se a classificação deste sistema de partícula como meio poroso e higroscópico e sem apresentação de período de taxa constante. O índice de germinação das sementes de embaúba foi de 77%, valores adequados para programas governamentais de reflorestamento.

PALAVRAS-CHAVE: Propriedades físicas, Esfericidade, Fluidização, Germinação.

ABSTRACT

The drying of seeds of the pioneer species *Cecropia glaziovii* Snethlage is motivated due to its restoration characteristics of heterogeneous degraded forests. In this work the main goal is the physical and drying characterization of *Cecropia glaziovii* seeds in batch fluidized bed, as well as the physiological quality. The dimensions and shapes of seeds were obtained by image analysis, assessing the reproducibility of these measures for *in natura* samples and those classified by sieving. The drying characterization in fluidized bed drying was performed, with initial fixed bed heights of 3 and 5 cm, with air temperature (40 ± 2)°C and drying air velocity (1.0 ± 0.3) m/s. It was noted that the dimensions and shapes of seeds classified by sieving have higher reproducibility than the *in natura* ones. Therefore, the seeds retained on the 20 mesh sieve were used for the drying characterization. By using the moisture ratio as a function of time, it could be seen that the mixture in the fluidized bed was homogeneous, as the variation between the bed heights of 3 and 5 cm was negligible. Based on the dimensionless drying rate as a function of moisture ratio, only the decreasing rate period was observed. It was also found that the seeds constitute a porous and hygroscopic particulate system in the conditions used in this study. Therefore, samples with statistical reproduction of sizes and shapes were obtained by physical characterization, and for these seeds, drying characterization was carried out, obtaining the classification of the particulate system as porous and hygroscopic medium without reporting constant drying rate period. The germination index of *Cecropia glaziovii* seeds was 77%, this value is consistent with government reforestation programs.

KEYWORDS: Physical properties, Sphericity, Fluidization, Germination.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1	Esquemática das seguintes formas de fluidização: (a) leito fixo, (b) leito fluidizado, (c) Leito borbulhante e (d) Leito empistonado.	9
Figura 2	Esquema da transferência de calor e massa em uma partícula na secagem convectiva.	11
Figura 3	Representação esquemática do leito fluidizado utilizado.	18
Figura 4	Sistema de adaptação e fixação da célula de secagem (a) sistema de vedação e adaptação, (b) prendedor e (c) indicação da área que será fixada.	19
Figura 5	Infrutescências maduras inteiras.	28
Figura 6	Sementes de <i>C. glaziovii</i> extraídas por via úmida.	29
Figura 7	Imagens de sementes de <i>C. glaziovii</i> obtidas através de microscópio óptico com zoom 6,5X.	31
Figura 8	Resultados do teste de Tukey HSD para a diferença entre as medidas das dimensões das duas amostras de sementes <i>in natura</i> .	32
Figura 9	Histograma da esfericidade para as sementes sem peneiramento (<i>in natura</i>), para (a) teste 1 e (b) teste 2.	33
Figura 10	Histograma da faixa de esfericidade de 0,65 a 0,75 para (a) amostra 1 e (b) amostra 2 e os resultados do teste de Tukey HSD para a diferença entre as medidas das dimensões das sementes da faixa de esfericidade correspondente.	34
Figura 11	Histograma da faixa de esfericidade de 0,75 a 0,85 para (a) amostra 1 e (b) amostra 2 e os resultados do teste de Tukey HSD para a diferença entre as medidas das dimensões das sementes da faixa de esfericidade correspondente.	35
Figura 12	Histograma para esfericidade maior que 0,85 para (a) amostra 1 e (b) amostra 2 e os resultados do teste de Tukey HSD para a diferença entre as medidas das dimensões das sementes da faixa de esfericidade correspondente.	36
Figura 13	Distribuição granulométrica das sementes de <i>Cecropia glaziovii</i> .	37
Figura 14	Resultados do teste de Tukey HSD para a diferença entre as medidas das dimensões das duas amostras de sementes retidas na peneira de 18 mesh.	39

Figura 15	Resultados do teste de Tukey HSD para a diferença entre as medidas das dimensões das duas amostras de sementes retidas na peneira de 20 mesh.	39
Figura 16	Resultados do teste de Tukey HSD para a diferença entre as medidas das dimensões das duas amostras de sementes retidas na peneira de 25 mesh.	40
Figura 17	Histograma da esfericidade para as sementes retidas na peneira de 20 mesh, para (a) amostra 1 e (b) amostra 2.	41
Figura 18	Histograma para esfericidade entre 0,75 e 0,85 para (a) amostra 1 e (b) amostra 2 e os resultados do teste de Tukey HSD para a diferença entre as medidas das dimensões das sementes retidas na peneira de 20 mesh.	42
Figura 19	Histograma para esfericidade maior que 0,85 para (a) amostra 1 e (b) amostra 2 e os resultados do teste de Tukey HSD para a diferença entre as medidas das dimensões das sementes retidas na peneira de 20 mesh.	43
Figura 20	Área projetada em função das amostras das sementes retidas nas peneiras de 18, 20 e 25 mesh (amostras 2, 3 e 4, respectivamente).	44
Figura 21	Resultados do teste de Tukey HSD para a diferença entre as médias das áreas projetada entre as peneiras.	45
Figura 22	Diâmetro de Feret máximo em função das amostras das sementes retidas nas peneiras de 18, 20 e 25 mesh (amostras 2, 3 e 4, respectivamente).	46
Figura 23	Diâmetro de Feret médio em função das amostras das sementes retidas nas peneiras de 18, 20 e 25 mesh (amostras 2, 3 e 4, respectivamente).	46
Figura 24	Diâmetro de Feret mínimo em função das amostras das sementes retidas nas peneiras de 18, 20 e 25 mesh (amostras 2, 3 e 4, respectivamente).	47
Figura 25	Queda de pressão média em função da velocidade superficial para <i>C. glaziovii</i> , parametrizada na altura do leito fixo inicial.	48
Figura 26	Adimensional de umidade em função do tempo para $T_{ar} = (40 \pm 2)^\circ\text{C}$ e $v_{ar} = (1,0 \pm 0,3)\text{m/s}$ parametrizada na altura do leito.	52
Figura 27	Adimensional da taxa de secagem em função do adimensional de umidade durante a secagem de sementes de embaúba para $T_{ar} = (40 \pm 2)^\circ\text{C}$ e $v_{ar} = (1,0 \pm 0,3)\text{m/s}$, parametrizada na altura do leito.	53

- Figura 28 Foto das plântulas emergidas em 4 meses, germinadas no Horto Florestal Navarro de Andrade. 58
- Figura 29 Foto das sementes emergidas em campo. 59

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Representação dos experimentos realizados para alturas de leito de 3 e 5 cm.	21
Tabela 2	Valores dos parâmetros das equações para as isotermas de dessorção, Equação (10).	22
Tabela 3	Equações da cinética de secagem utilizadas.	23
Tabela 4	Dimensões e esfericidade das sementes <i>in natura</i> de <i>C. glaziovii</i> .	32
Tabela 5	Parâmetros estatísticos de reprodutibilidade da distribuição granulométrica.	38
Tabela 6	Medidas das sementes de <i>C. glaziovii</i> retidas na peneira de 20 mesh.	40
Tabela 7	Coefficiente angular ajustado na Equação (20) e seus parâmetros estatísticos.	49
Tabela 8	Parâmetros estatísticos dos ajustes das equações de secagem para os adimensionais de umidade em função do tempo de secagem de embaúba, para o ar a $(1,0\pm 0,3)$ m/s e $(40\pm 2)^{\circ}\text{C}$ para as alturas de leitos de 3 e 5 cm.	56

LISTA DE SÍMBOLOS

a,b,c,n	Parâmetros, Tabela 3, dimensionais ou adimensionais.	
A	Área da seção transversal perpendicular ao escoamento.	(mm ²)
Ar	Número de Arquimedes, $Ar = \frac{d_s^3 \cdot \rho_f \cdot (\rho_s - \rho_f) \cdot g}{\mu_f^2}$.	(-)
d	Diâmetro.	(m)
DR	Adimensional da taxa de secagem, Equação (22).	
g	Aceleração da gravidade.	(m/s ²)
H	Altura do leito fixo.	(m)
K	Constante de secagem.	(-)
m	Massa de água.	(kg)
MR	Adimensional de umidade, Equação (9).	(-)
n	Número de sementes da amostra.	(-)
N	Número de pontos para ajuste.	(-)
Q	Calor.	(J)
Re	Número de Reynolds na mínima fluidização, $Re_{mf} = \frac{\rho_f \cdot V_{mf} \cdot d_p}{\mu_f}$.	(-)
R ²	Coeficiente de determinação, Equação (17).	(-)
RMSE	<i>Root Mean Square Error</i> , em português, erro quadrático médio, Equação (19).	(-)
t	Tempo de secagem.	(s)
T	Temperatura.	(°C)
UR	Umidade relativa do fluido.	(-)
v	Velocidade superficial do fluido.	(m/s)
V	Volume.	(m ³)
\bar{x}	Média das amostras.	(-)
X	Umidade do sólido.	(-)

Y	Medida para o ajuste.	(-)
Z	Número de parâmetros da equação a ser ajustada.	(-)

Letras gregas

α	Coeficiente angular, Equação (20).	
ε	Porosidade do sólido, definição na Equação (3).	(-)
μ	Viscosidade dinâmica.	(N/cm.s)
ρ	Massa específica.	(kg/m ³)
σ	Desvio padrão.	(-)
φ	Esfericidade, definição na Equação (5).	(-)
χ^2	Chi-quadrado, Equação (18).	(-)

Subscritos

A	Área da seção transversal do escoamento.
ar	Ar de secagem.
Ap	Aparente, com volume dos poros.
bs	Base seca no tempo (t) de secagem.
b _{so}	Base seca inicial.
eq	Equilíbrio.
exp _i	lézima medida experimental.
f	Fluido.
g	Germinadas.
mf	Mínima fluidização.
o	Inicial.
P	Partícula.
PR	Real da partícula.
pT	Total da partícula.
pred _i	lézimo dado predito, pelo ajuste.
R	Real, sem volume dos poros.

T Total
S Semente.

SUMÁRIO

RESUMO	v
ABSTRACT	vi
LISTA DE ILUSTRAÇÕES.....	vii
LISTA DE TABELAS.....	x
LISTA DE SÍMBOLOS	xi
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
2.1. <i>Cecropia glaziovii</i> Snethlage	4
2.1.1. Espécie nativa e seus benefícios	4
2.1.2. Propriedades físicas das sementes.....	5
2.1.3. Propriedades fisiológicas das sementes	7
2.1.4. Aspectos morfológicos de sementes	7
2.2. Fluidização	8
2.2.1. Diferentes regimes de interação entre fluido e partícula	8
2.2.2. Fluidização de sementes.....	10
2.3. Secagem de sementes	11
2.3.1. Vantagens da secagem.....	12
2.3.2. Efeitos térmicos e mecânicos.....	12
3. MATERIAIS E MÉTODOS	15
3.1. Materiais.....	15
3.2. Coleta e preparação das sementes	15
3.2.1. Coleta das infrutescências	15
3.2.2. Separação das sementes das infrutescências	15
3.3. Caracterização das sementes.....	16
3.4. Unidade de secagem	17

3.5.	Testes de fluidodinâmica	20
3.6.	Caracterização da secagem.....	21
3.7.	Avaliação da qualidade fisiológica da semente.....	23
3.8.	Erros prováveis nas medidas.....	24
3.9.	Crítérios de análise da reprodutibilidade dos dados.....	25
3.10.	Análise e tratamento dos dados.....	27
4.	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	28
4.1.	Coleta das infrutescências	28
4.2.	Separação das sementes das infrutescências.....	29
4.3.	Propriedades físicas das sementes <i>in natura</i>	30
4.3.1.	Propriedades intensivas das sementes <i>in natura</i>	30
4.3.2.	Dimensões e forma	31
4.3.3.	Distribuição granulométrica	37
4.3.4.	Dimensões das sementes entre as peneiras.....	44
4.4.	Determinação da velocidade de mínima fluidização	48
4.5.	Caracterização da secagem.....	51
4.6.	Qualidade fisiológica das sementes.....	57
5.	CONCLUSÕES.....	61
6.	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	63
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	64

1. INTRODUÇÃO

Com os incentivos florestais originados na década de 70, do século XX, os proprietários de grandes áreas iniciaram o plantio de *Eucalyptus* spp. e *Pinus* spp. Esta política desencadeou imensas monoculturas florestais e trouxe lucro aos latifundiários, mas não trouxe recuperação das áreas nativas.

No ano de 2003 a Secretaria de Estado do Meio Ambiente ao se apoiar em diversas pesquisas, promulgou a resolução de nº 47, afirmando que o Brasil está perdendo sua biodiversidade natural, sendo necessário recuperar a diversidade de nossas espécies nativas. Nesta resolução foi disposta uma longa lista de espécies nativas e seus biomas, entre as quais se tem a embaúba vermelha (*Cecropia glaziovii* Snethlage), com adaptação a diversos biomas e suas folhas e raízes apresentam compostos importantes na área da saúde (BACKES; IRGANG, 2004).

A espécie é pioneira, ou seja, suas sementes germinam em clareiras e solos pobres. Isto é positivo, pois na busca de recuperação de áreas degradadas, a embaúba vermelha poderá ser cultivada e posteriormente outras espécies serão inseridas. Com isto constata-se a importância dos estudos com esta espécie para a recuperação da nossa biodiversidade.

Assim, a secagem convectiva, visa reduzir as atividades metabólicas após a obtenção da semente, bem como, reduzir a perda das qualidades física e fisiológica durante o beneficiamento. Com este procedimento, é possível ainda a estocagem adequada das sementes.

Na secagem convectiva, a fluidização é um dos métodos mais conhecidos, devido às altas taxas de transferência de calor e massa presentes no sistema. Esta peculiaridade é impulsionada pela interação entre o fluido e a partícula que ocorre neste tipo de leito.

Tratando-se de um ser vivo no caso de sementes destinadas à geração de mudas, tem-se que configurar de maneira adequada as condições do meio onde se realiza a secagem.

O Grupo do Centro de Secagem tem trabalhado com sementes em diferentes leitos, recentemente está dando enfoque para as sementes de embaúba (*Cecropia glaziovii* Snethlage) em leito fluidizado.

Estudos com a utilização de leito fluidizado para sementes foram realizados no Centro de Secagem da Universidade Federal de São Carlos, entre os quais, podem ser citados, Rizzi Junior (2009) que utilizou o leito fluidizado para a análise da fluidodinâmica e secagem de sementes de gramíneas (*Brachiaria brizantha*), Pereira (2010) que comparou as propriedades físico-químicas de sementes de painço (*Setaria Italica* L.) em leitos fixo e fluidizado, Arrieche, Picelli e Sartori (2010), Picelli, Arrieche e Sartori (2012a, 2012b) e Corrêa (2012) mostraram que a secagem de sementes *C. glaziovii* é promissora.

Na literatura diversos trabalhos comprovaram a complexidade para a caracterização física de sementes, como Araújo *et al.* (2012), Botezelli, Davide e Malvasi (2000), Santos *et al.* (2009) e Harper, Lovell e Moore (1970). Através destes trabalhos pode-se constatar que as sementes variam em relação ao tempo, na mesma espécie e no mesmo fruto.

Trabalhos como de Güner (2007) e Kiliçkan e Güner (2006) comprovaram a importância da caracterização física de sementes para o dimensionamento e projeto de equipamentos.

Neste trabalho, o principal objetivo é a caracterização física e de secagem de sementes de *Cecropia glaziovii*, bem como, a avaliação da qualidade fisiológica destas sementes.

Para alcançar este objetivo, cumpriram-se as seguintes etapas:

- coleta das infrutescências de *Cecropia glaziovii* Snethlage em campo na região Sudoeste do estado de São Paulo;
- separação das sementes das infrutescências através do método de escarificação via úmida;
- caracterização das propriedades físicas e da qualidade fisiológica das sementes *in natura*;
- classificação granulométrica por peneiramento das sementes;

- caracterização das propriedades físicas das sementes separadas por peneiramento;
- escolha e separação das sementes com reprodução estatística das propriedades físicas para a caracterização de secagem;
- medida da queda de pressão do leito de sementes de embaúba em função da velocidade do ar;
- avaliação das medidas de fluidodinâmica do leito de sementes de embaúba e determinação da velocidade média de mínima fluidização;
- análise de reprodutibilidade das medidas da queda de pressão em função da velocidade do ar;
- através da velocidade média mínima de fluidização, realizar o planejamento experimental da caracterização de secagem, e
- realização dos testes de secagem em leito fluidizado, com velocidade acima da mínima fluidização e comparação dos resultados obtidos com a literatura.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A seguir, serão apresentados aspectos importantes das características da embaúba, do processo de secagem convectiva e a secagem de sementes em leito fluidizado.

2.1. *Cecropia glaziovii* Snethlage

Neste item, serão apresentados os principais aspectos da espécie nativa, bem como motivações da escolha da espécie, breve revisão sobre as propriedades físicas utilizadas, conceitos principais de propriedades fisiológicas e por fim, os aspectos morfológicos das sementes.

2.1.1. Espécie nativa e seus benefícios

Esta espécie arbórea tem comportamento sempre-verde, adulta pode chegar a 18 m de altura e DAP (Diâmetro a Altura do Peito, medido a 1,3 m do solo) de 40 cm, localizada em parte da Argentina e do Sul ao Nordeste brasileiro. O seu rápido crescimento é indicado para recomposição florestal, seus brotos servem de alimento aos bichos-preguiças, além da simbiose com as formigas Aztecas, que vivem nas cavidades do tronco e se alimentam das secreções. Pássaros e outros animais também se alimentam dos seus frutos (CARVALHO, 2010; PASSOS; PASSAMANI, 2003).

Existem diversas utilizações desta árvore. A madeira com aproximadamente 410 kg/m³ é aplicada na fabricação de pólvora, caixotaria, brinquedos, aeromodelos, jangadas e tem ótimas características para celulose e papel. A casca pode ser aproveitada em cordoaria e para extração de tanino, assim como lixa para madeira (BACKES; IRGANG, 2004; CARVALHO, 2010).

Alguns trabalhos científicos estudam os extrativos desta espécie na medicina, devido à ação contra bronquite e tosse, sendo também hipotensor e diu-

rético. Na cultura popular utiliza-se chá de suas folhas para favorecer a digestão (BACKES; IRGANG, 2004).

No tocante ao procedimento de coleta, de acordo com Carvalho (2010), as infrutescências devem ser colhidas diretamente da árvore, sendo amontoadas em sacos plásticos, para facilitar a remoção das sementes que são pequenas, mediante a lavagem em água corrente, numa peneira fina (ARRIECHE; PICELLI; SARTORI, 2010).

No item a seguir, serão descritas as principais propriedades físicas utilizadas em sistemas particulados que influenciam nos fenômenos de transporte em leito fluidizado.

2.1.2. Propriedades físicas das sementes

A caracterização do material é muito importante para a secagem convectiva, pois em leito fluidizado as propriedades físicas influenciam na fluidodinâmica do escoamento e com isto nas taxas de transferências simultâneas de calor e massa entre as fases sólida e fluida.

De acordo com Massarani e Peçanha (1988) determinando-se o volume da partícula sem os poros (V_{pR}) e a massa da partícula (m_p), pode se calcular a massa específica real através da Equação (1).

$$\rho_{pR} = \frac{m_p}{V_{pR}} \quad (1)$$

O volume total (V_{pT}) da partícula possibilita o cálculo da massa específica aparente, por meio da Equação (2).

$$\rho_{pA} = \frac{m_p}{V_{pT}} \quad (2)$$

A relação entre a massa específica real e a aparente representa o volume da matéria da partícula sólida pelo volume ocupado total. A partir disto, calcula-se a porosidade das sementes (ε_s) através da Equação (3).

$$\varepsilon_s = 1 - \frac{\rho_A}{\rho_R} \quad (3)$$

Propagando-se os erros da determinação da massa específica real e aparente para a porosidade, segundo Goldemberg (1977), obtém-se a Equação (4).

$$\sigma_{\varepsilon_s} = (1 - \varepsilon) \cdot \sqrt{\left(\frac{\sigma_{\rho_A}}{\rho_A}\right)^2 - \left(\frac{\sigma_{\rho_R}}{\rho_R}\right)^2} \quad (4)$$

Em relação à forma, existem coeficientes que relacionam o quanto a partícula está próxima de uma geometria conhecida, como a esfericidade, que quanto mais próximo da unidade, mais esférica é a forma da partícula. Dentre os diversos conceitos de esfericidade tem-se a Equação (5), entre as mais utilizadas, conforme Massarani e Peçanha (1988).

$$\varphi = \frac{\text{Área}}{\text{Perímetro}^2} \cdot 4 \cdot \pi \quad (5)$$

Entre os trabalhos que abordam as medidas de dimensões de partículas tem-se Walton (1948), que indicou a aplicação do diâmetro de Feret para materiais particulados. Esta determinação baseia-se na medida de duas retas paralelas dispostas em extremidades opostas da imagem projetada de uma partícula, como em uma medida direta por paquímetro.

Além das propriedades físicas, para o caso de sementes é importante o estudo de fatores que indiquem as qualidades fisiológicas dos embriões. No

item a seguir serão apresentadas algumas informações sobre estas propriedades.

2.1.3. Propriedades fisiológicas das sementes

A Secretaria de Meio Ambiente (2003) dispôs especificações de testes de germinação em laboratório, com as análises das sementes germinadas, com tipos de classificação e equações de índices de qualidade fisiológica. Porém para a espécie *Cecropia glaziovii* não foram listados procedimentos e condições para a germinação. Todavia, Godoi e Takaki (2005) estudaram a germinação da espécie em laboratório e indicaram a temperatura de 30°C e iluminação direta por lâmpadas fluorescentes de 15 W como as condições apropriadas, sem a necessidade de tratamento prévio para a quebra de dormência.

Em testes de germinação são comumente consideradas sementes germinadas a protrusão de 2 mm da radícula (GODOI e TAKAKI, 2005). De acordo com Labouriau (1983) a protrusão da radícula ocorre devido ao processo de absorção de umidade dos constituintes hidrofílicos de sementes, não permitindo a avaliação da qualidade fisiológica por um único método.

Arrieche, Picelli e Sartori (2010) realizaram o acompanhamento em campo da germinação, avaliando todas as fases de desenvolvimento da planta em solo no Horto Florestal Navarro de Andrade, localizado no município de São Carlos/SP, até a transferência desta para tubetes. A condução dos testes abrangeu um período de nove meses de avaliação fisiológica das sementes. Este estudo mostra a avaliação da germinação via método direto de semeadura das sementes de embaúba, em campo.

2.1.4. Aspectos morfológicos de sementes

A caracterização de sementes é muito complexa, pois a morfologia é influenciada por diversos fatores externos. Araújo *et al.* (2012) obtiveram grande

variação na avaliação biométrica de frutos e sementes de *Operculina macrocarpa* (L.) Urban. e Botezelli, Davide e Malvasi (2000) verificaram que as propriedades físicas das sementes variaram com a procedência dos frutos de Baru (*Dipteryx alata* Vogel).

Além disto, Santos *et al.* (2009) ao compararem medidas de dimensões das sementes de *Tabebuia chrysotricha* (Mart. Ex A. DC.) observaram diferenças estatísticas das amostras provenientes de diferentes matrizes. Sendo que, as localizações destas matrizes apresentavam pequena variação macroambiental. Possibilitando a comprovação dos efeitos genéticos e/ou microambientais sobre estas propriedades.

Estes resultados trazem a dificuldade da representação estatística das características físicas de sementes, bem como na revisão realizada por Harper, Lovell e Moore (1970), onde com base em diversos trabalhos estes autores afirmam que a dimensão e forma de sementes variam nas mesmas espécies, plantas e frutos. Sendo, que estas propriedades são importantes no dimensionamento e projeto de equipamentos, como nos trabalhos de Güner (2007) e Kiliçkan e Güner (2006).

2.2. Fluidização

Neste item serão apresentados alguns aspectos importantes da fluidização, como interação entre o fluido e a partícula e, também, trabalhos que contribuíram para o desenvolvimento do conhecimento da fluidização de sementes.

2.2.1. Diferentes regimes de interação entre fluido e partícula

O processo de fluidização consiste num leito com um distribuidor por onde escoar um fluido entre o material particulado, as variáveis do processo são reguladas e o fluido percola no material em condições previamente determina-

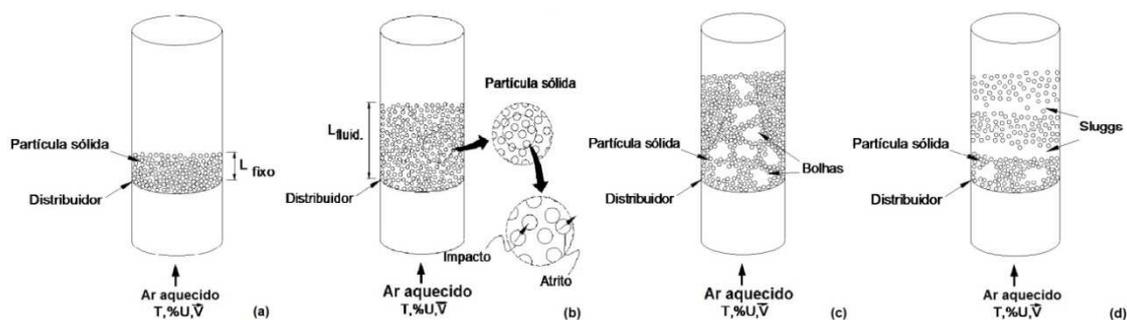
das. Na secagem o fluido normalmente é o ar, assim daqui para frente será feita consideração somente para este fluido.

Em baixas velocidades as partículas ainda se encontram fixas sobre o fundo do leito, onde o processo é conhecido como regime de leito fixo (Figura 1a). Com o aumento da velocidade iniciam-se vibrações e movimentos curtos das partículas, caracterizando a transição entre os leitos fixo e móvel, neste caso o fluidizado, que ocorre com a expansão do volume do leito.

Na velocidade mínima de fluidização o peso do sistema de partículas será igual à força de arraste do ar, suspendendo as partículas, caracterizando o regime de leito fluidizado, como na Figura 1b (DAVIDSON; HARRISON, 1971; KUNII; LEVENSPIEL, 1991).

Aumentando a velocidade surgem as bolhas que aumentam ainda mais o movimento das partículas. Em leitos com pequeno diâmetro a coalescência das bolhas formam “sluggs” que são bolhas que ocupam toda a seção transversal do leito denominado empistonado, nas Figura 1c e Figura 1d representam-se estes tipos de fluidização (KUNII; LEVENSPIEL, 1991).

Figura 1 - Esquemática das seguintes formas de fluidização: (a) leito fixo, (b) leito fluidizado, (c) leito borbulhante e (d) leito empistonado.



(Fonte: Adaptado de Kunii e Levenspiel, 1991)

Inserido estes conceitos, pode-se discutir sobre os avanços do conhecimento deste processo para sementes, que serão dispostos a seguir.

2.2.2. Fluidização de sementes

Para os estudos de fluidização de sementes evidenciam-se diversos fatores importantes. Dentre os trabalhos no Centro de Secagem da UFSCar, no trabalho de Lima (2009) ressalta-se a importância da esfericidade das sementes na homogeneidade e expansão do leito. Acerca desta medida, tem-se o trabalho de Lucas *et al.* (1986) propondo diferentes equações de previsão da velocidade de mínima fluidização para diferentes faixas de esfericidades, reafirmando que esta propriedade tem influência importante sobre a fluidização.

Nos estudos com sementes de linhaça realizados recentemente por Vieira (2012) constatou-se que as sementes de linhaça se orientavam de forma que a maior área ficava perpendicular ao fluxo de ar, com isto, reduzindo a energia necessária para a fluidização entre os diferentes experimentos. Isto se deve a forma não-esférica da partícula utilizada.

Também Rizzi Júnior (2009) realizou estudos experimentais com as sementes de *Brachiaria brizantha*, mostrando que, conforme se aumenta a altura de leito inicial a perda de carga para a fluidização aumenta, com isto sendo necessário o aumento da potência do soprador.

Os resultados comprovaram que a temperatura não influencia nas curvas de fluidização. De acordo com o mesmo autor, as medidas de queda de pressão no leito para velocidades superficiais abaixo da mínima fluidização (ou regime de leito fixo) têm maior reprodutibilidade do que em leito fluidizado.

Assim e de acordo com Ramakers, Ridder e Kerkhof (2004) a fluidização de materiais biológicos é influenciada pela forma, tamanho, distribuição do tamanho e faixa de densidade das partículas.

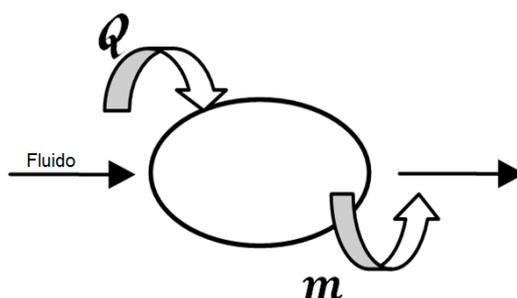
A partir destas informações sobre a fluidização, a seguir encontram-se trabalhos referentes à secagem de sementes.

2.3. Secagem de sementes

A retirada da umidade do interior da partícula consiste em duas etapas principais no beneficiamento de sementes. A primeira é a que o ar aquecido e seco transfere o calor (Q) para a superfície da partícula, evaporando a umidade (m) e arrastando-a para fora do sistema (Figura 2). Com isto, a diferença de concentração da água do centro da partícula para a sua superfície favorece a transferência de massa.

Além disto, há a transferência de calor sensível para o interior da partícula até que a água do centro da partícula atinja a temperatura de bolha, iniciando a evaporação. A partir disto calor latente é transferido do ar para partícula e a água começa sua migração para a superfície, onde é evaporada para o ar, e este ciclo repete-se até que o potencial químico do interior da partícula e o do meio de secagem esteja em equilíbrio termodinâmico, condição em que se atinge o equilíbrio higroscópico na partícula (KUDRA; MUJUMDAR, 2009).

Figura 2 - Esquema da transferência de calor e massa em uma partícula na secagem convectiva.



(Fonte: Acervo Pessoal, 2012)

Freire e Gubulin (1990) classificaram a secagem como um processo isoentálpico, considerando a superfície da semente como limite do volume de controle, o calor latente fornecido para a partícula evapora a umidade do seu interior ao retirar a umidade da superfície, o ar leva a massa de vapor carregando a energia que havia perdido para a fase sólida.

A secagem convectiva envolve diversas variáveis de processos, como: velocidades do ar e da partícula, temperaturas do ar e da partícula e as umidades do ar e da partícula. Os estudos mostram que as temperaturas mais elevadas aumentam a diferença de potencial químico entre a água presente na partícula e o ar, aumentando a vaporização do ar no interior da matriz sólida, bem como a cinética de secagem.

2.3.1. Vantagens da secagem

Mujumdar (1987) afirma que a secagem é de extrema importância em matérias-primas para a indústria, pois proporciona: estabilidade física ao material e aumenta o tempo de estocagem, reduz o custo de transporte e possibilita o controle da qualidade desejada do produto final, entre outras vantagens.

A secagem de sementes reduz a massa de água transportada, reduzindo custos de logística, diminuindo a atividade fisiológica, reduzindo sua deterioração, aumentando o tempo de armazenamento e possibilitando um maior tempo de estoque (BROOKER; BAKKER-ARKEMA; HALL, 1974).

Nos itens a seguir, serão apresentados os principais aspectos dos efeitos térmicos e mecânicos sobre a qualidade fisiológica de sementes.

2.3.2. Efeitos térmicos e mecânicos

A temperatura de secagem pode proporcionar atividades físicas e químicas que podem prejudicar o processo de germinação, dependendo da espécie, genótipo, teor de água, temperatura, tempo de exposição e velocidade de secagem (GARCIA *et al.*, 2004).

A temperatura do ar de secagem também pode causar fissuras superficiais (NOVAIS, 1990) se tornando caminhos para agentes biodeterioradores, que podem prejudicar a qualidade fisiológica da semente a longo prazo. As fissuras podem surgir por ação mecânica e pela velocidade de secagem muito

alta no biomaterial promovendo uma liberação das tensões entre os elementos anatômicos devido à secagem (GARCIA *et al.*, 2004; DEV e RAGHAVAN, 2012; ARRIECHE, 2003).

Por isto é importante conhecer os valores máximos de temperatura com base na preservação da qualidade fisiológica após a secagem, pois também podem alterar as estruturas orgânicas dos nutrientes, reduzindo a reserva energética do embrião até sua germinação, causando a morte prematura da semente (GARCIA *et al.*, 2004).

Porém, por outro lado, com a elevação da temperatura se aumenta a cinética de secagem, reduzindo o tempo de processamento, o recurso energético e o custo operacional (DEV e RAGHAVAN, 2012). Carvalho e Nakagawa (1980) afirmam que para temperaturas de secagem de até aproximadamente 43°C há a conservação das atividades fisiológicas das sementes.

No tocante aos efeitos mecânicos, o leito fluidizado caracteriza-se pelo movimento das partículas dispersas em ar, causando impactos e atritos das partículas entre si ou com as paredes. Para a secagem em leito fluidizado das sementes de *Brachiara brizantha*, Rizzi Junior (2009) constatou que estas interações das partículas não reduziram a qualidade fisiológica do material.

Mesmo com os diversos estudos e grande aprofundamento na secagem convectiva em leito fluidizado, a aplicação a biomateriais como as sementes, ainda tem muito a ser explorada, principalmente para as sementes de espécies florestais. O processamento de um material que tem vida é um desafio devido à necessidade de prolongar a sua preservação, sem reduzir suas atividades fisiológicas e a heterogeneidade da formação morfológica que podem causar variações na forma e dimensão destas partículas.

Os promissores estudos da secagem de sementes de embaúba em leito fluidizado motivam a caracterização física e de secagem das sementes de embaúba.

As características físicas das sementes são importantes para a sua fluidização e secagem. Bem como, a complexidade da descrição estatística das dimensões e formas das sementes encontrada em diversos trabalhos mostra a necessidade da análise destas propriedades para a secagem convectiva.

MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo abordará os materiais, equipamentos e os procedimentos adotados para o desenvolvimento deste trabalho.

2.4. Materiais

Foram utilizadas sementes de *Cecropia glaziovii* S. para a caracterização física e de secagem.

2.5. Coleta e preparação das sementes

2.5.1. Coleta das infrutescências

As coletas das infrutescências foram realizadas na cidade de Buri, localizada na região Sudoeste, do estado de São Paulo, com altitude em torno de 590 metros, latitude de 23° 47' 40".8 S e longitude de 48° 35' 45".5 O ("Croquis de Localização de Marcos de Coordenadas Geográficas," 1958).

Foram selecionadas de 3 a 4 árvores matrizes de populações distantes à aproximadamente 100 metros entre si. Após a coleta, as infrutescências foram limpas e armazenadas, na temperatura de aproximadamente 277 K até o procedimento de extração das sementes (ARRIECHE, PICELLI e SARTORI, 2010).

3.2.2. Separação das sementes das infrutescências

As sementes de *Cecropia glaziovii* S. foram extraídas das infrutescências pelo método de decomposição e escarificação via úmida, conforme reco-

mendado por Arrieche, Picelli e Sartori (2010), quando comparado com o método por via seca (LORENZI e MATOS, 2002).

As sementes foram extraídas por imersão em água, filtradas em centrífuga comercial, com malha filtrante de aproximadamente 0,5 mm, da marca ACME, modelo 11JE21.

Antes do processamento das sementes na unidade experimental de leito fluidizado foi realizada a sua caracterização física, como descrita a seguir.

3.3. Caracterização das sementes

Tendo em vista a análise das sementes para a secagem em leito fluidizado, é necessário o conhecimento das características das partículas. Dentre as quais se tem a massa específica, porosidade, diâmetro de Feret, esfericidade e distribuição granulométrica das sementes.

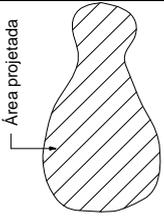
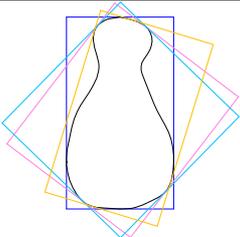
As massas específicas real (ρ_R) e aparente (ρ_A) foram determinadas em triplicatas por meio de um picnômetro a hélio (AccuPyc 1330 V3.03-Micromeritics) e com um picnômetro com hexano, respectivamente.

As dimensões e a esfericidade das partículas foram determinadas por análise de imagens com o auxílio do *software* Image-Pro Plus 6[®]. As sementes foram colocadas sobre papel quadriculado (5x5) mm, com isto a medida de cada lado do quadrado da superfície foi referência para relação de pixel da imagem e medida em milímetros pelo *software*.

Foram realizados dois testes com 465 sementes. O método de medida usado para cada dimensão está descrito no Quadro 1.

A distribuição granulométrica foi determinada com um conjunto de quatro peneiras de 16, 18, 20 e 25 mesh para medidas de aberturas de malhas de 1,18 mm, 1,00 mm, 0,85 mm e 0,71 mm, respectivamente, em peneirador da marca Restch D42759 Haan.

Quadro 1 - Definições e detalhes sobre as medidas realizadas através de imagens.

	<p>Área projetada: área limitada pela borda da projeção da partícula.</p> <p>Perímetro: medida do comprimento de toda a borda da projeção da partícula.</p>
	<p>Diâmetros de Feret máximo e mínimo: representa a maior e a menor medida possível por um paquímetro, respectivamente.</p> <p>Diâmetro de Feret médio: representa a média das medidas por meio de paquímetro.</p>

Fonte: Adaptado de Image Pro Plus (2006)

Para se referir as sementes que foram separadas utilizaram-se índices, onde: 1 corresponde às sementes retidas na peneira de 16 mesh, 2 para sementes na peneira de 18 mesh, 3 para sementes na peneira de 20 mesh, 4 para sementes na peneira de 25 mesh e 5 para as sementes que passaram pela peneira de 25 mesh, que ficaram depositadas no fundo do peneirador.

O peneiramento foi realizado em triplicata com 100 gramas de sementes por duas horas com amplitude de vibração de 3 mm, de acordo com Allen (1990).

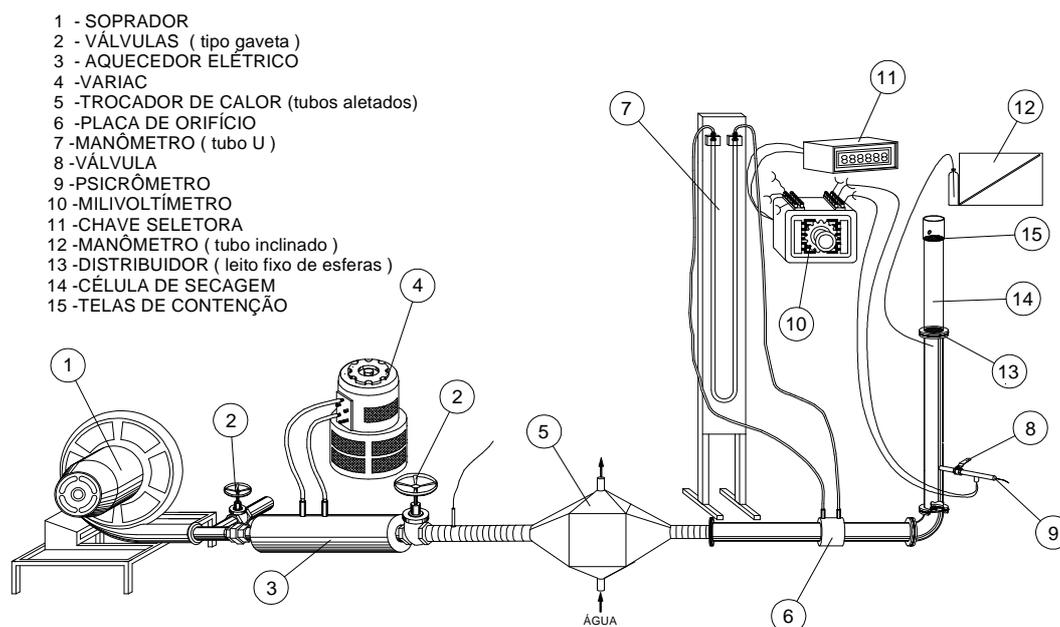
2.7. Unidade de secagem

Na Figura 3 encontra-se esquematizada a unidade de secagem composta basicamente por um soprador (1), marca ZAULI de 10 HP de potência e altura manométrica de 1 m de coluna d'água, cuja vazão é regulada pela válvula tipo gaveta (2) de $5,08 \times 10^{-2}$ m de diâmetro. O ar impelido pelo soprador escoar até o aquecedor elétrico duplo tubo concêntrico (3), constituído por um tubo de aço galvanizado de $10,16 \times 10^{-2}$ m de diâmetro e 1 m de comprimento, envolvido com uma resistência elétrica de fio de níquel-cromo (KANTAL) de $2,0 \times 10^{-3}$ m

de diâmetro e recoberta com miçangas de porcelana com 6,35 mm, fornecendo uma potência máxima de aproximadamente 2,5 kW, a 220 V. A regulação da potência fornecida é feita através do variador de voltagem (VARIAC) (4), marca STP, de 0 a 240 V e 4,5 kW. O resfriamento do ar é através do escoamento por um trocador de calor (tubo aletado), com água como fluido manométrico (5). A vazão do fluido é medida por meio de uma placa de orifício (6) e um manômetro (tubo U) (7). Antes da célula de secagem (14), o ar escoava por um distribuidor constituído de esferas de vidro (13) para homogeneização do escoamento e então o ar percola pelo leito poroso contido na célula de secagem, em seguida é descarregado para a atmosfera. A queda de pressão estática na célula de secagem é medida por um manômetro (tubo inclinado), com água como fluido manométrico e ângulo de aproximadamente 30° (12). O sistema de partículas será delimitado no volume da célula de secagem por telas de contenção (15) (CORRÊA, 2012).

A regulação da vazão de ar no psicrômetro foi feita por uma válvula (8), que permitiu a medida de umidade por meio deste psicrômetro (9) (através das temperaturas de bulbo úmido e bulbo seco). Os termopares Tipo T (cobre-constantan) eram ligados a uma chave seletora (10) e um milivoltímetro (11).

Figura 3 - Representação esquemática do leito fluidizado utilizado.

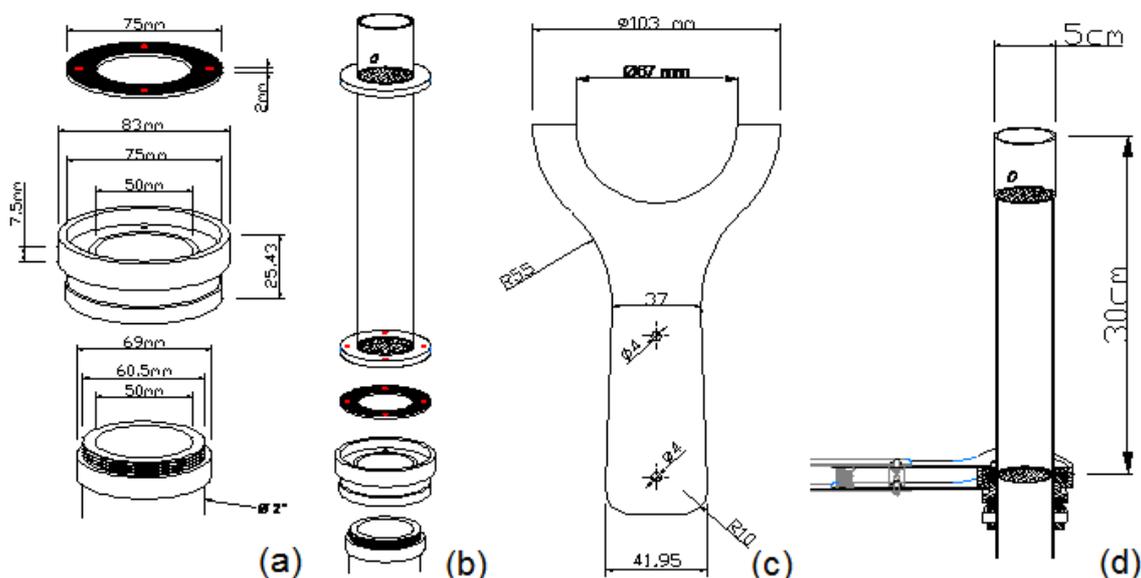


(Fonte: Corrêa, 2012)

O isolamento térmico do equipamento foi feito através da aplicação de mantas e calhas de silicato de cálcio, fabricadas pela ROEKWOOLBRAS S/A e CARBORUNDUM. A proteção mecânica deste isolamento foi realizada com alumínio corrugado do tipo “cal-jack” preso com cintas e selos de alumínio (CORRÊA, 2012).

A célula de secagem de geometria cilíndrica possui área de seção transversal de $(2.277,26 \pm 0,03)$ mm² e aproximadamente 30 cm de altura, construída com material acrílico, devido ao seu peso reduzido comparado a outros materiais. Com o objetivo da obtenção da curva de cinética de secagem foi necessária a retirada da célula de secagem em determinados períodos de tempo. Para isto, utilizou-se um sistema de acoplamento com vedação e um prendedor para fixar a célula de secagem no local indicado, como mostrado na Figura 4 (CORRÊA, 2012).

Figura 4 - Sistema de adaptação e fixação da célula de secagem (a) sistema de vedação e adaptação, (b) prendedor e (c) indicação da área que será fixada.



(Fonte: Corrêa, 2012)

A avaliação da uniformização da velocidade e da temperatura do escoamento do ar na região de entrada da célula de secagem foi realizada por

Corrêa (2012), através do método de Sogab, descrito nas normas da CETESB (1990) e CETESB (1992).

A seguir, serão apresentados os procedimentos que foram realizados para a condução dos testes, de acordo com a ordem: obtenção e caracterização física, teste de fluidodinâmica, testes de secagem e avaliação da qualidade fisiológica das sementes de embaúba, análise estatística e ferramentas utilizadas para análise dos dados.

3.5. Testes de fluidodinâmica

A análise da fluidodinâmica foi realizada para as sementes de *C. glaziovii* através da queda de pressão estática em função da vazão superficial de ar.

Realizaram-se 10 medidas de queda de pressão com as partículas (total) e 10 medidas sem partículas (branco), e então a queda de pressão do leito de sementes foi calculada através do Teorema de Stevin, como na Equação (6).

$$\overline{\Delta P_{Leito_i}} = \gamma_{H_2O} \cdot \text{sen } \theta \cdot (l_{\overline{Total}_i} - l_{\overline{Branco}_i}) \quad (6)$$

onde, $l_{\overline{Total}_i}$ e $l_{\overline{Branco}_i}$ é a média dos comprimentos inclinados em mm de coluna de água na velocidade i para o leito e para o branco, respectivamente. θ o ângulo de inclinação do tubo do manômetro e γ_{H_2O} é o peso específico da água que é de aproximadamente 980 N.m^{-3} , utilizada como fluido manométrico (BRUNETTI, 2005).

Com os desvios padrão da perda de carga total ($\sigma_{l_{\overline{Total}_i}}$) e para o branco ($\sigma_{l_{\overline{Branco}_i}}$) para cada velocidade i . Tem-se a Equação (7) para o erro na queda de pressão do leito através do método de propagação de erros segundo Goldemberg (1977).

$$\sigma_{\Delta P_{Leito_i}} = \left[\frac{\Delta P_{Leito}}{(l_{Total} - l_{Branco})} \right]_i \sqrt{\sigma_{l_{Total}}^2 + \sigma_{l_{Branco}}^2} \quad (7)$$

Com base nas Equações (6) e (7) têm-se os dados de queda de pressão estática no leito de sementes para cada vazão superficial medida, conforme apresentados na Tabela 1

Tabela 1 - Representação dos experimentos realizados para as alturas de leitos fixos de 3 e 5 cm.

u (m/s)	Queda de pressão (Pa)				Média	Desvio padrão
u ₁	ΔP _{1,1}	ΔP _{1,2}	...	ΔP _{1,10}	$\overline{\Delta P_1}$	σ ₁
u ₂	ΔP _{2,1}	ΔP _{2,2}	...	ΔP _{2,10}	$\overline{\Delta P_2}$	σ ₂
u ₁₀	ΔP _{10,1}	ΔP _{10,2}	...	ΔP _{10,10}	$\overline{\Delta P_{10}}$	σ ₁₀

(Fonte: Acervo Pessoal, 2013)

Estes dados foram obtidos no processo de defluidização, ou seja, partindo da vazão máxima e reduzindo a vazão do fluido, sendo que a maior medida de velocidade foi quando as sementes começaram a serem retidas na tela de contenção superior da célula de secagem, (15) na Figura 3. Assim, não abrangendo o regime de interação entre fluido e partícula onde ocorre o transporte pneumático das partículas.

Esta análise foi realizada para as alturas de leitos fixos de 3 e 5 cm, para as quais foram determinadas as velocidades mínimas de fluidização.

3.6. Caracterização da secagem

A umidade das sementes em base seca (X_{bs}) foi determinada pelo método gravimétrico no tempo t de secagem através da Equação (8). Representados pela umidade adimensional (MR), a partir da Equação (9).

$$X_{bs} = \frac{m_{úmida} - m_{seca}}{m_{seca}} \quad (8)$$

$$MR \equiv \left(\frac{X_{bs} - X_{eq}}{X_{bs_0} - X_{eq}} \right) \quad (9)$$

onde, X_{bs_0} é a umidade em base seca no início do processo de secagem.

A umidade de equilíbrio (X_{eq}) foi determinada pela Equação (10), de acordo com de Picelli, Arrieche e Sartori (2012) que representa estatisticamente os dados empíricos das isotermas no domínio de temperaturas de 35, 40, 45 e 50°C e umidade relativa (UR) entre 10% e 85%. Os parâmetros da Equação (10) encontram-se reunidos na Tabela 2.

$$X_{eq} = \frac{a \cdot b \cdot c \cdot UR}{(1 - c \cdot UR) \cdot [1 + (b - 1) \cdot c \cdot UR]} \quad (10)$$

Tabela 2 - Valores dos parâmetros das equações para as isotermas de dessorção, Equação (10).

T (K)	a	b	c
308	0,102	30,01	0,577
313	0,063	22,27	0,618
318	0,059	71,26	0,724
323	0,054	28,21	0,730

(Fonte: Picelli, Arrieche e Sartori, 2012b)

Foram ajustados os parâmetros das equações dispostas na Tabela 3 aos dados experimentais do adimensional de umidade (MR) em função do tempo de secagem (t).

A temperatura do fluido (T_f) foi de $(40\pm 2)^\circ\text{C}$, contida no domínio seguro para a preservação da qualidade fisiológica das sementes, conforme determinado por Carvalho e Nakagawa (1980).

Tabela 3 - Equações da cinética de secagem utilizadas.

Nome	Equação
Lewis	$MR=e^{-K.t} \quad (11)$ <p>Onde $K=a \cdot e^{\frac{-b}{T_f}}$</p>
Page	$MR=e^{-K.t^n} \quad (12)$ <p>Onde $K=a \cdot e^{\frac{-b}{T_f}}$</p>
Overhults	$MR=e^{-(K.t)^n} \quad (13)$ <p>Onde $K=e^{a+\frac{b}{T_f}}$</p>

(Fonte: Barrozo, 1995)

Para decidir sobre a escolha destas equações tomou-se por base os resultados advindos da caracterização da secagem, que foi obtida dos testes conduzidos com a semente de embaúba em leito fluidizado, em batelada, nas condições operacionais utilizadas neste trabalho.

3.7. Avaliação da qualidade fisiológica da semente

A avaliação da qualidade fisiológica das sementes foi realizada via método direto através do acompanhamento de emergência em campo da semente no solo, em canteiros no Horto Florestal Navarro de Andrade, localizado em São Carlos-SP, por um período de quatro meses.

As porcentagens ou índices de germinação (GE) foram calculados por meio da razão entre a quantidade das sementes que germinaram (n_g) e o número total da amostra (n_T), como apresentado na Equação (14).

$$GE = \frac{n_g}{n_T} \cdot 100 \quad (14)$$

Calculou-se o índice de germinação das sementes através da relação de plantas germinadas, após os quatro meses de condução dos testes, o comprimento total (radícula e parte aérea da plântula) e a área superficial foliar.

Os valores foram estimados por meio do software Image-Pro Plus 6[®] através de análise de imagens.

3.8. Erros prováveis nas medidas

Para as medidas de temperatura utilizou-se um milivoltímetro digital, (10) na Figura 3, da marca ENGRO modelo 2000 de 3 ½ dígitos e resolução de 0,1 mV, o que corresponde a um erro provável de 0,25°C.

Para a determinação dos erros prováveis nas medidas de umidade absoluta do ar, utilizadas nas equações psicrométricas (ROSSI, 1987), onde o erro de medida desta variável do processo foi calculado com base no erro das medidas dos termopares para as temperaturas de bulbo seco e de bulbo úmido (0,25°C), (9) na Figura 3. Através da propagação de erro via equação psicrométrica, levou a um erro provável de aproximadamente 4% (NOVAIS, 1990).

O erro da medida da umidade do sólido foi determinado através da balança Gehaka BG 2000, com precisão de 0,001 g. A propagação de erro, conforme Gondemberg (1977), de acordo com a equação de umidade em base seca (Equação 8), conduziu a um erro provável de aproximadamente 1%.

A partir da esquematização apresentada na Figura 3 a velocidade foi obtida a partir da medida da vazão volumétrica do ar na placa de orifício.

A calibração da placa de orifício foi através de uma placa de orifício padrão, determinando o erro da medida para vazão, de acordo com o trabalho de Novais (1990).

Sabendo-se que a vazão do ar de secagem (Q) é igual ao produto da velocidade do escoamento de ar (v) pela área da seção transversal (A) perpendicular ao escoamento de ar, obtém-se a propagação do erro para a medida da velocidade a partir da Equação (15) (GOLDEMBERG, 1977).

$$\sigma_v = v \cdot \sqrt{\left(\frac{\sigma_Q}{Q}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_A}{A}\right)^2} \quad (15)$$

A propagação de erro também foi realizada para a queda de pressão no leito, conforme apresentado na Equação (7), no item 3.5, e para a porosidade como apresentado na Equação (4), no item 2.1.3.

3.9. Critérios de análise da reprodutibilidade dos dados

Os resultados experimentais devem apresentar reprodutibilidade, para isto a média e as distribuições da amostra e da replicata devem ser estatisticamente iguais.

Para a aplicação desta análise foi necessário conhecer a distribuição dos dados. Para a análise da normalidade dos dados estatísticos foi utilizado o teste de Shapiro-Wilk, com hipótese nula de distribuição normal, que era descartada para $p\text{-valor} < 0,05$ (R DEVELOPMENT CORE TEAM, 2011).

Foram utilizadas as funções raiz quadrada e logaritmo neperiano para algumas medidas, obtendo-se $p\text{-valor} > 0,05$, constatando que estas funções normalizavam as distribuições de algumas medidas não-normais (BOTEZELLI; DAVIDE; MALAVASI, 2000; SANTOS *et al.*, 2009; SCAPIM *et al.*, 2002).

A análise de Tukey foi realizada para o conjunto que apresentou distribuição normal ou normalizadas. O teste de Tukey fornece um intervalo de confiança da diferença das médias dos conjuntos de dados obtidos em cada teste.

Se o gráfico com o intervalo de confiança da diferença das médias inclui o valor zero, pode-se afirmar com 95% de confiança que os testes foram reprodutíveis (D'HAINAUT, 1997; R DEVELOPMENT CORE TEAM, 2011).

Para a comparação de conjuntos de dados não-normais foram utilizados o testes de Mann-Whitney e Kruskal-Wallis, que avaliam se há diferença estatística através do valor global e variância de um conjunto de dados, respectivamente.

A hipótese nula permite a afirmação com 95% de confiança que os testes foram reprodutíveis, ou seja, estatisticamente a diferença é desprezível entre as duas amostras tanto para o valor global e como para a variância (D'HAINAUT, 1997).

Para a verificação da reprodutibilidade estatística dos dados com dependência, realizou-se a linearização dos dados obtidos através da Equação (16) com coeficiente linear nulo, de acordo com Arrieche (2003).

$$M=a \cdot M_r \tag{16}$$

A reprodutibilidade dos dados experimentais foi analisada ajustando-se a equação de uma reta aos valores obtidos por um experimento (M) em função de suas replicatas (M_r). Onde para $a=1$ indica que os dados foram totalmente reprodutíveis.

Além disto, para avaliação do desvio padrão entre os dados, o valor do teste t avaliará quantas vezes os desvios padrão são menores que o parâmetro a, a variância explicada (R^2) representa a confiabilidade dos dados e o p-valor com o nível de significância representará em porcentagem o quanto é confiável a afirmação da reprodutibilidade dos experimentos (ARRIECHE, 2003).

Para avaliar os ajustes de parâmetros aos dados experimentais, foram utilizados coeficientes estatísticos, como a variância explicada (R^2) calculado pela Equação (17), o chi-quadrado (χ^2) calculado pela Equação (18) e o RSME

calculado pela Equação (19) (AMIRI CHAYJAN; KAVEH, 2013; PEREA-FLORES *et al.*, 2011; PEREIRA, 2010).

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N [y_{\text{exp}_i} - y_{\text{pred}_i}]^2}{\sum_{k=1}^N \left[\frac{\sum_{j=1}^N y_{\text{pred}_j}}{N} - y_{\text{pred}_i} \right]^2} \quad (17)$$

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^N [y_{\text{exp}_i} - y_{\text{pred}_i}]^2}{N - z} \quad (18)$$

$$\text{RMSE} = \left[\frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N (y_{\text{exp}_i} - y_{\text{pred}_i})^2 \right]^{1/2} \quad (19)$$

Para a escolha do melhor ajuste foram utilizados os seguintes critérios: o coeficiente de determinação próximo da unidade e os menores valores de RMSE e de chi-quadrado.

2.13. Análise e tratamento dos dados

As dimensões e forma das sementes foram analisadas com o auxílio do *software* Image-Pro Plus 6[®]. A construção de gráficos foi realizada nos *softwares* EXCEL 2007[®] e R estatístico versão 3.

Com o auxílio do *software* Statistica 7[®] e a linguagem R foram realizadas as análises estatísticas e o cálculo estatístico necessário de descrição e inferência dos dados e experimentos realizados.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos através dos métodos descritos anteriormente. Encontrando-se inicialmente a coleta das infrutescências, o preparo e a caracterização das amostras das sementes de *C. glaziovii*, em seguida a análise da fluidodinâmica, assim como, a cinética de secagem no leito fluidizado em batelada e a qualidade fisiológica dos embriões.

3.1. Coleta das infrutescências

As infrutescências de *C. glaziovii*, pertencente à família Urticaceae, foram coletadas e selecionadas no estado de maturação fisiológica, como pode ser visto na Figura 5.

Figura 5 - Infrutescências maduras inteiras.



(Fonte: Acervo Pessoal, 2013)

O estado de maturação foi constatado com o amolecimento da parte carnosa e facilitando, desta maneira, a sua separação da estrutura central de sustentação da infrutescência (CARVALHO; NAKAGAWA, 1980).

3.2. Separação das sementes das infrutescências

Um resultado típico das sementes extraídas por via úmida pode ser visualizado na Figura 6.

Figura 6 - Sementes de *C. glaziovii* extraídas por via úmida.



(Fonte: Acervo Pessoal, 2013)

A separação das sementes das infrutescências pode ser realizada tanto por escarificação via úmida como por via seca, conforme comentado anteriormente.

Porém, em trabalhos recentes, como nos realizados por Arrieche, Picelli e Sartori (2010) e Corrêa (2012), demonstrou-se que a separação por meio de escarificação via úmida apresenta uma qualidade fisiológica dos embriões maior em comparação com a realizada por via seca.

Neste trabalho os resultados obtidos reconfirmaram que a separação das sementes das infrutescências de embaúba por meio de via úmida também foi adequada, fornecendo lotes com aproximadamente 100% de pureza. O que era esperado, pois segundo Nogueira e Medeiros (2007) a separação via úmida é indicada para frutos carnosos, devido à água favorecer a operação de es-carificação da polpa.

3.3. Propriedades físicas das sementes *in natura*

Neste item serão apresentados os resultados das medidas das dimen-sões e forma das sementes *in natura*, bem como das separadas por peneira-mento.

4.3.1. Propriedades intensivas das sementes *in natura*

Inicialmente, serão apresentadas as propriedades físicas intensivas das sementes após a extração das infrutescências. Nas condições ambientes de aproximadamente 32°C de temperatura e 65% de umidade relativa do ar a umidade das sementes foi de $(0,164 \pm 0,002)$ bs.

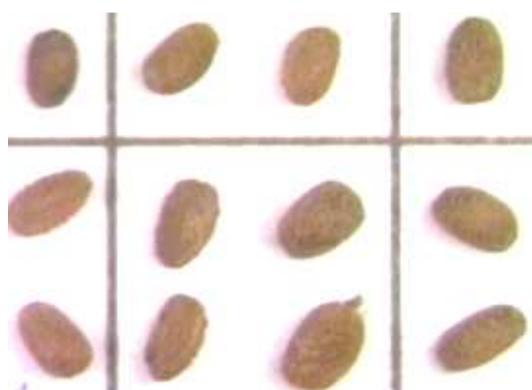
A massa específica aparente foi de $(0,871 \pm 0,007)$ g.cm⁻³, a massa es-pecífica real foi de $(1,166 \pm 0,012)$ g.cm⁻³, através destes dados pode-se calcu-lar pelas Equações (3) e (4) a porosidade e seu desvio padrão que foram de $(25,3 \pm 1,0)$ % que está próximo ao estimado por Firmino *et al.* (2010) para as sementes de *Jatropha curcas* L. (Pinhão manso). Para o teste de Shapiro-Wilk com 95% de confiança pode ser afirmado que as distribuições dos dados são representadas pela normal.

4.3.2. Dimensões e forma

As dimensões e a forma das sementes foram calculadas a partir das imagens obtidas por microscópio óptico de 6,5X zoom, sobre papel quadriculado de (5x5) mm, como mostra o resultado típico apresentado na Figura 7.

Na análise da reprodutibilidade dos resultados, de todas as medidas das sementes *in natura*, foi constatada aderência a curva normal para a área projetada e o diâmetro máximo de Feret. Normalizaram-se os dados de diâmetro mínimo de Feret através da função raiz quadrada.

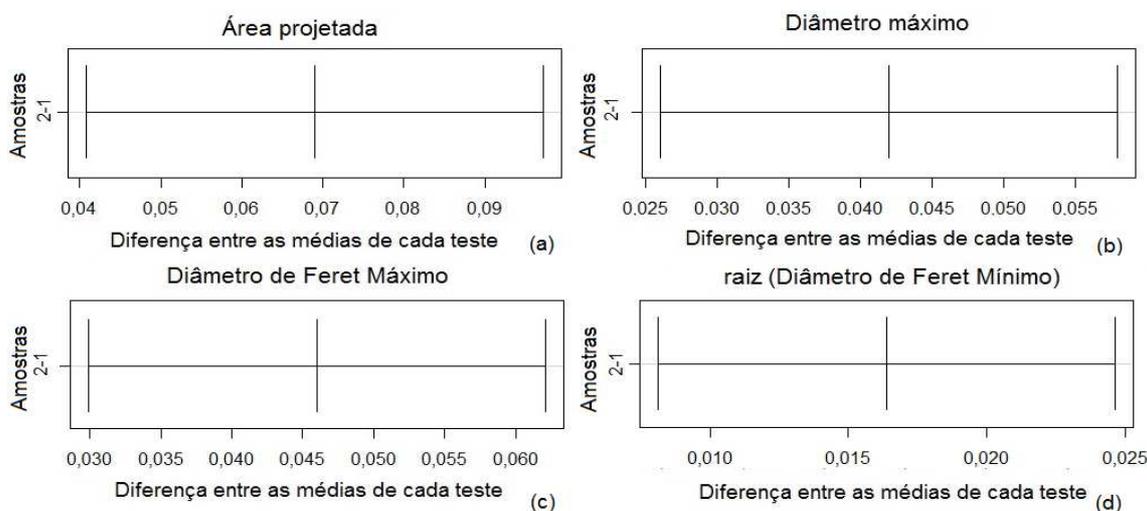
Figura 7 - Imagens de sementes de *C. glaziovii* obtidas através de microscópio óptico com zoom 6,5X.



(Fonte: Acervo Pessoal, 2013)

Na Figura 8 estão apresentados os resultados dos testes de Tukey para as medidas com distribuição normal.

Figura 8 - Resultados do teste de Tukey HSD para a diferença entre as medidas das dimensões das duas amostras de sementes *in natura*.



(Fonte: Acervo Pessoal, 2013)

Na Figura 8 pode ser visualizado que o intervalo de confiança do teste de Tukey para a diferença entre as duas amostras não inclui o zero, portanto as amostras não reproduziram.

Para as medidas das sementes *in natura* obtiveram-se os resultados apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 - Dimensões e esfericidade das sementes *in natura* de *C. glaziovii*.

	Área Projetada (mm ²)	Diâmetro de Feret (mm)			Esfericidade
		Máximo	Médio	Mínimo	
Média	1,31 ^b	1,63 ^b	1,35 ^d	0,98 ^b	0,80 ^c
C.V.(%)	3,72	2,00	2,14	2,34	0,82

^b distribuição normal, com diferença significativa entre as duas amostras.

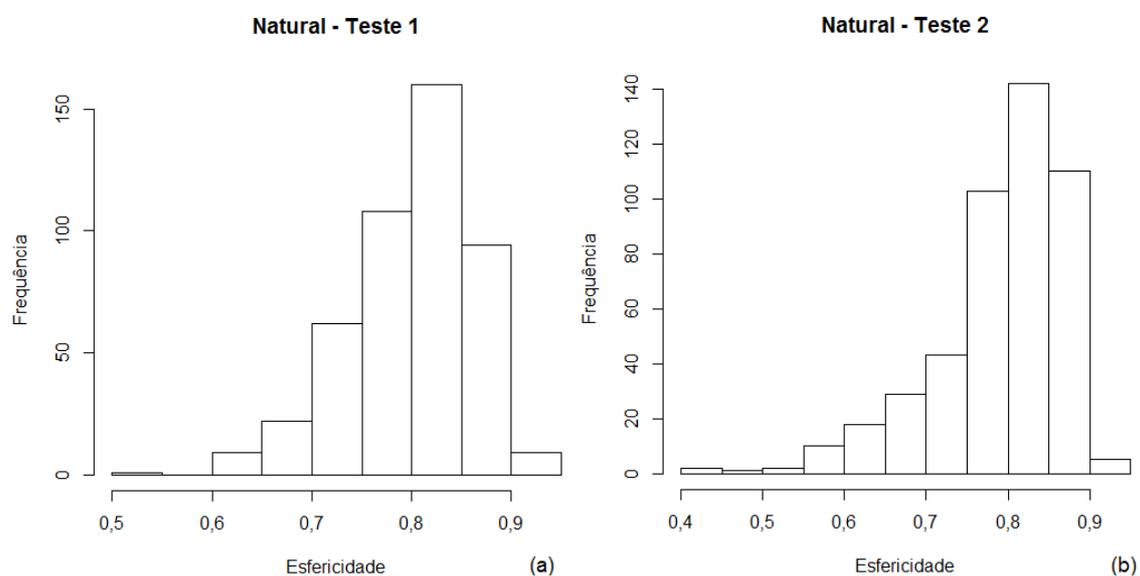
^c distribuição não-normal, sem diferença significativa entre as duas amostras.

^d distribuição não-normal, com diferença significativa entre as duas amostras.

A partir da Tabela 4 constata-se que as esfericidades das sementes de *Cecropia glaziovii* estão próximas aos valores obtidos por Prado (2004) para sementes de mamão com e sem mucilagem, e por Rosso (2013) para sementes silvestres de *Mabea fistulífera* Mart.

Na Figura 9 são apresentados os histogramas das esfericidades das sementes *in natura*.

Figura 9 - Histograma da esfericidade para as sementes sem peneiramento (*in natura*), para (a) teste 1 e (b) teste 2.



(Fonte: Acervo Pessoal, 2013)

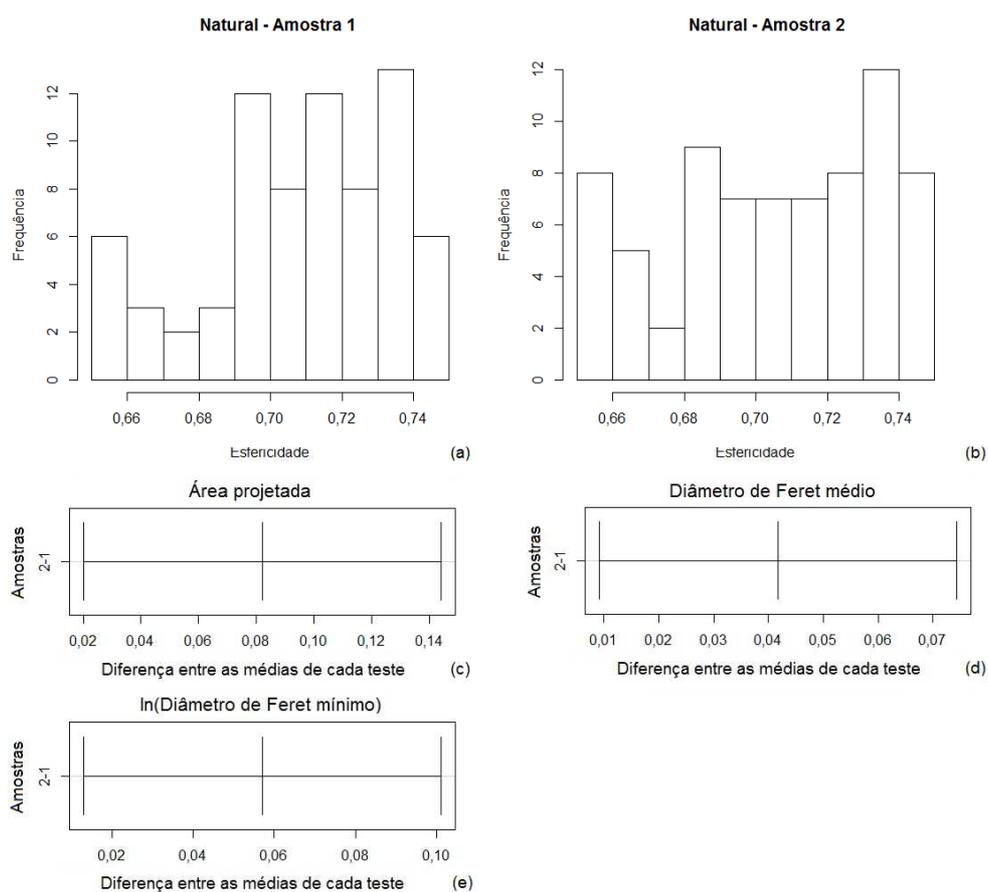
Com base na Figura 9 foram selecionadas 3 faixas de esfericidades, que correspondem aos valores de 0,65 a 0,75, 0,75 a 0,85 e maior que 0,85 para as duas amostras. Com vista que o número de elementos em cada faixa fosse igual entre as amostras, retiraram-se dados da maior amostra até que tivesse o mesmo número de elemento da menor.

Amostras de mesmo número de elementos são necessários para a realização dos testes estatísticos inferenciais. Portanto, foram obtidos 73 elementos para as duas amostras com esfericidade entre 0,65 e 0,75, 232 elementos para as duas amostras com esfericidade entre 0,75 e 0,85 e 109 elementos para as duas amostras com esfericidade maior que 0,85.

Na Figura 10 estão representadas as distribuições da esfericidade na faixa de 0,65 a 0,75 para a amostra 1 (Figura 10a) e para a amostra 2 (Figura 10b), as comparações através do intervalo de confiança do teste de Tukey ($p > 0,05$) foram realizados para os dados com distribuição normal. Conforme o teste de Shapiro-Wilk, as medidas com distribuição normal para as duas amos-

tras são: área projetada (Figura 10c), diâmetro de Feret médio (Figura 10d) e o logaritmo neperiano das medidas de diâmetro de Feret mínimo (Figura 10e).

Figura 10 - Histograma da faixa de esfericidade de 0,65 a 0,75 para (a) amostra 1 e (b) amostra 2 e os resultados do teste de Tukey HSD para a diferença entre as medidas das dimensões das sementes da faixa de esfericidade correspondente.

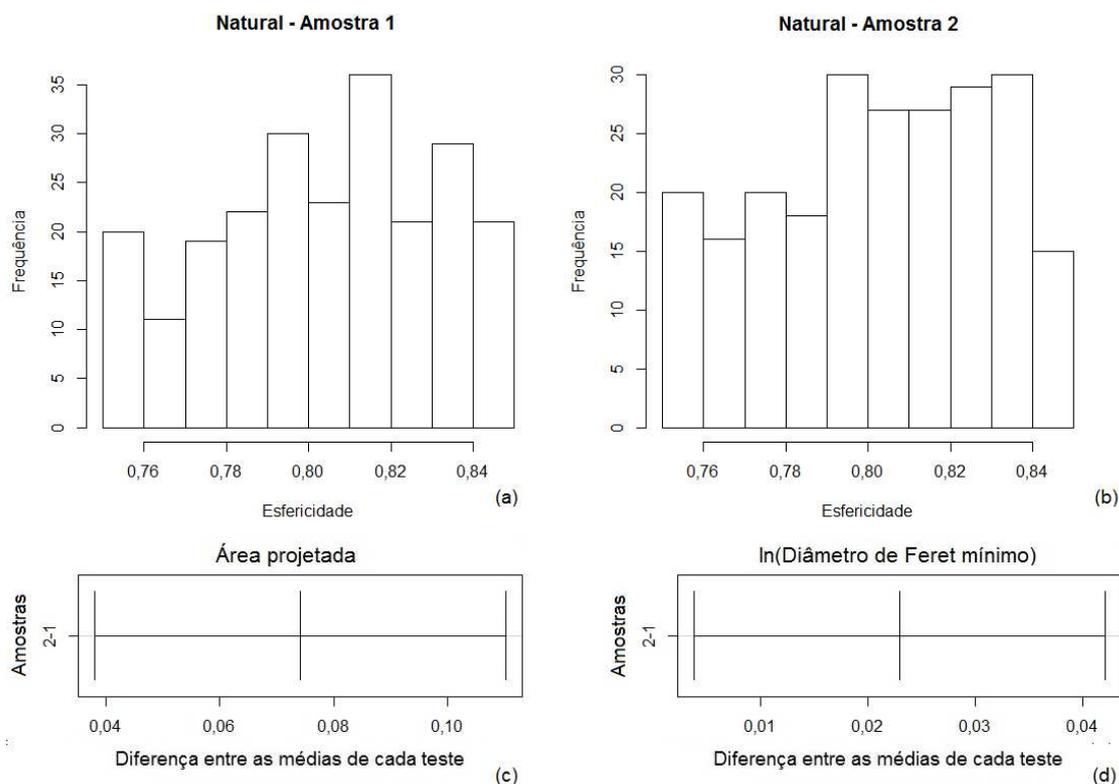


(Fonte: Acervo Pessoal, 2013)

Utilizando os testes de Mann-Whitney e Kruskal-Wallis para distribuições não-normais tem-se que o diâmetro máximo de Feret apresenta variância e valor global sem diferença significativa entre as duas amostras.

A Figura 11 apresenta a análise estatística para os resultados da faixa de esfericidade de 0,75 a 0,85.

Figura 11 - Histograma da faixa de esfericidade de 0,75 a 0,85 para (a) amostra 1 e (b) amostra 2 e os resultados do teste de Tukey HSD para a diferença entre as medidas das dimensões das sementes da faixa de esfericidade correspondente.



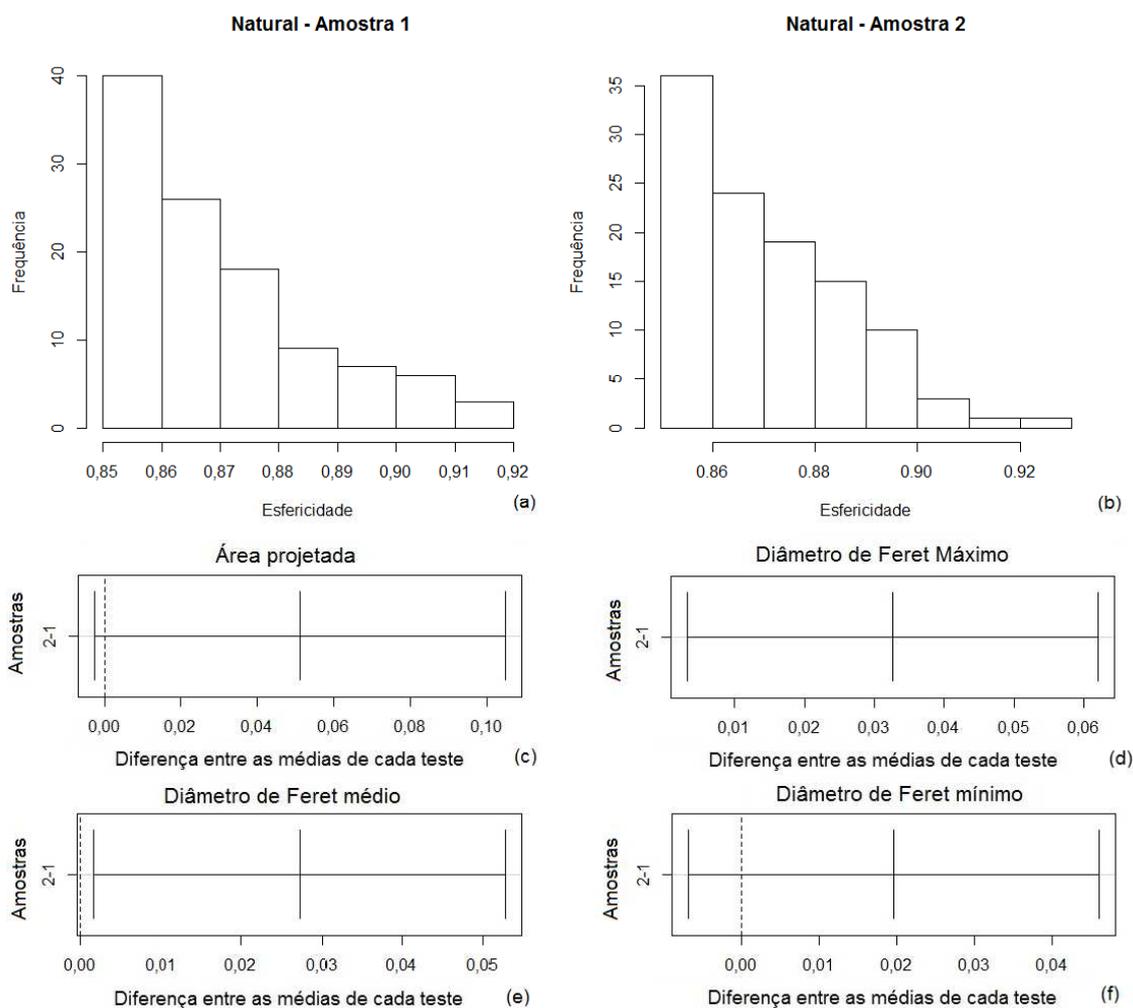
(Fonte: Acervo Pessoal, 2013)

Conforme o teste de Shapiro-Wilk, as medidas com distribuição normal para as duas amostras com esfericidade entre 0,75 e 0,85 são: área projetada (Figura 11c) e o logaritmo neperiano das medidas de diâmetro de Feret mínimo (Figura 11d).

Para o diâmetro máximo de Feret e o diâmetro médio de Feret com distribuição não-normal, os testes não-paramétricos com nível de significância de 95% apresentaram diferença significativa entre as duas amostras, tanto para a variância como para o valor global.

Na Figura 12 podem ser visualizadas as análises estatísticas das medidas para esfericidade maior que 0,85.

Figura 12 - Histograma para esfericidade maior que 0,85 para (a) amostra 1 e (b) amostra 2 e os resultados do teste de Tukey HSD para a diferença entre as medidas das dimensões das sementes da faixa de esfericidade correspondente.



(Fonte: Acervo Pessoal, 2013)

Para as sementes com esfericidade maior que 0,85 de acordo com o teste de Shapiro-Wilk com 95% de confiança todas as propriedades aderem a curva normal. Analisando os intervalos constata-se que ocorre a reprodutibilidade entre as duas amostras para a área projetada, para o diâmetro mínimo de Feret, porém as demais propriedades apresentam intervalos próximos a zero.

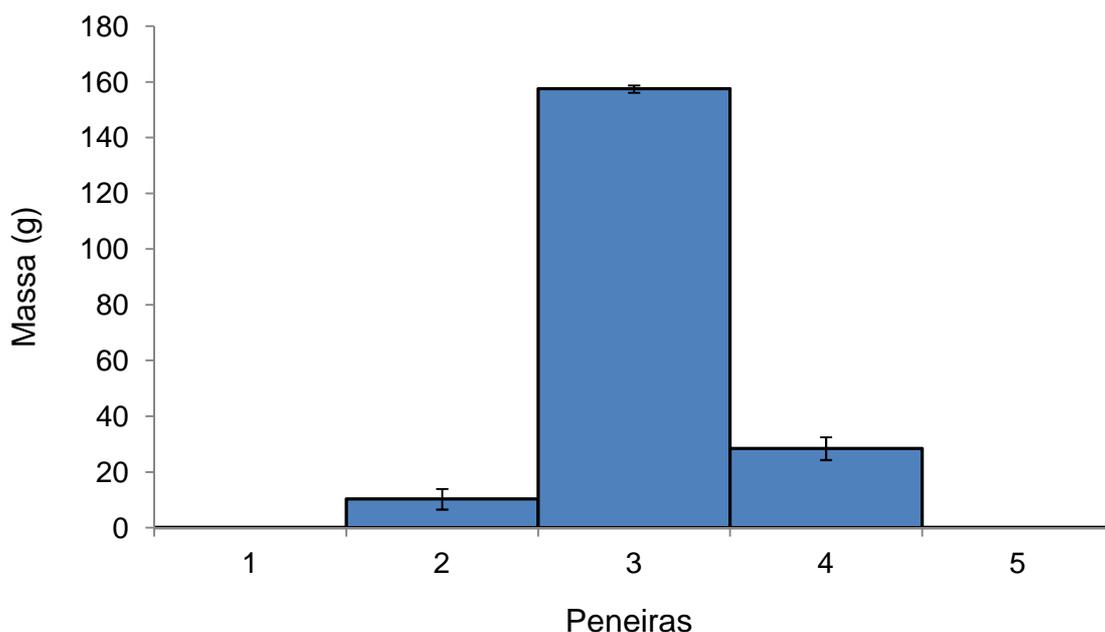
É interessante destacar, que estes dados são os mesmos que foram analisados na Figura 8, apenas foram divididos em faixas menores de esfericidades, mostrando através das análises estatísticas que a forma das sementes

de *Cecropia glaziovii* influencia na distribuição e na reprodutibilidade das medidas das dimensões.

3.3.3. Distribuição granulométrica

Para analisar a reprodutibilidade dos dados, optou-se avaliar a distribuição granulométrica das sementes pelo método de peneiramento. A Figura 13 mostra a massa de sementes retida em cada peneira e seus respectivos desvios padrão. A identificação das peneiras foi realizada conforme os índices descritos no item 3.3.

Figura 13 - Distribuição granulométrica das sementes de *Cecropia glaziovii*.



(Fonte: Acervo Pessoal, 2013)

A avaliação da reprodutibilidade dos dados foi feita com base no valor do coeficiente angular da função linear da Equação (16), conforme já comentado, sendo que, os parâmetros estatísticos para o ajuste realizado estão apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 - Parâmetros estatísticos de reprodutibilidade da distribuição granulométrica.

α Equação (16)	Desvio Padrão	Teste-t	Coefficiente de correlação (R)	Variância explicada (%)
0,9994	0,0138	72	0,9988	99,75

A partir da Tabela 5 verifica-se através do coeficiente angular (α) que 99,94% dos valores da amostra foram reproduzidas pelas replicatas. Assegurado pelo valor do teste-t que mostra que o valor de α foi 72 vezes maior que o desvio padrão, e a alta variância explicada e coeficiente de correlação, para p -valor < 0,05, com nível de significância de 95%. Com isto, tem-se a reprodutibilidade dos dados para os experimentos de distribuição granulométrica (ARRIECHE, 2003).

Foram amostradas 465 sementes em replicatas para cada peneira, exceto para as peneiras 1 e 5, pois a massa de sementes retidas foi muito pequena, não ultrapassando 1,5% do total.

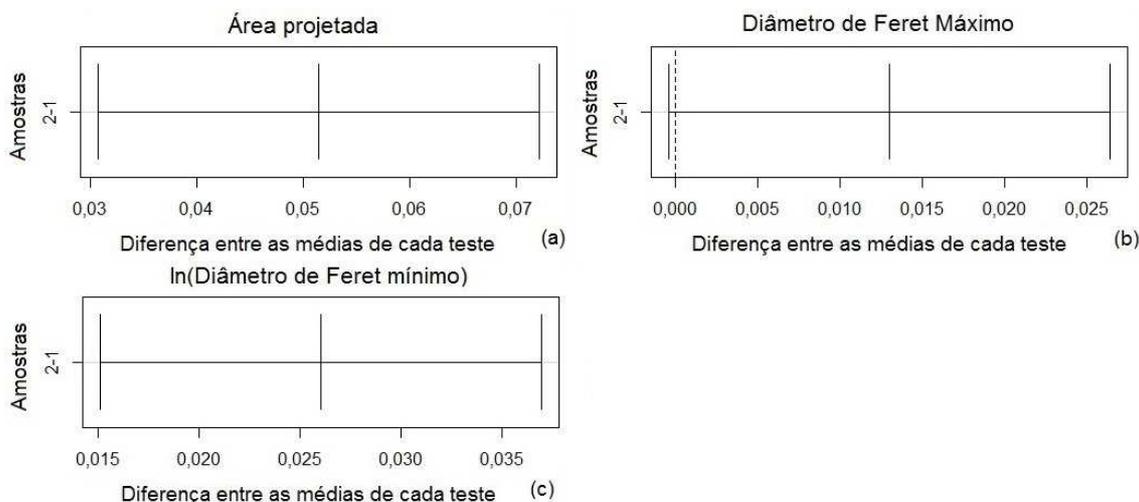
Realizaram-se então as medidas das dimensões (apresentadas no Quadro 1) das sementes retidas nas peneiras de 18, 20 e 25 mesh (índices 2, 3 e 4).

Na Figura 14 são apresentados os resultados das análises estatísticas das dimensões das sementes retidas na peneira de 18 mesh. Tiveram distribuição normal: a área projetada e o diâmetro de Feret máximo. Sendo que, o diâmetro de Feret mínimo foi normalizado pela função logaritmo neperiano.

Com base na Figura 14 pode-se observar que o diâmetro de Feret máximo inclui o valor zero no intervalo, ou seja, esta propriedade reproduziu. Porém a área projetada e o diâmetro de Feret mínimo não reproduziram.

Através dos testes não-paramétricos constata-se que o diâmetro de Feret médio também não reproduziu entre as amostras.

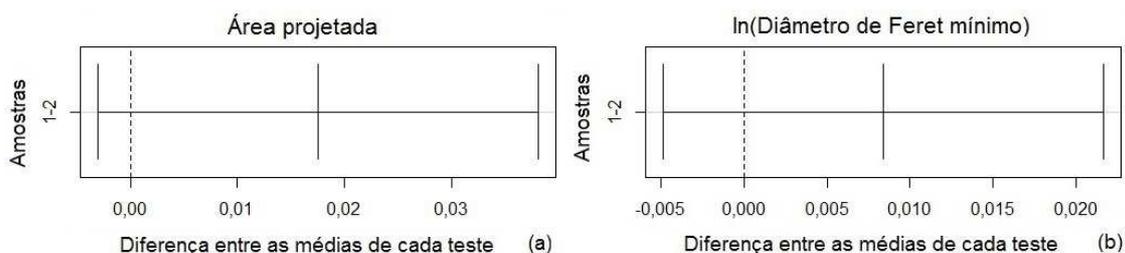
Figura 14 - Resultados do teste de Tukey HSD para a diferença entre as medidas das dimensões das duas amostras de sementes retidas na peneira de 18 mesh.



(Fonte: Acervo Pessoal, 2013)

Na Figura 15 estão apresentados os intervalos de confiança do teste de Tukey da diferença das medidas das dimensões das sementes retidas na peneira 20 mesh. A área projetada teve distribuição normal e o diâmetro mínimo de Feret foi normalizado pela função logaritmo neperiano.

Figura 15 - Resultados do teste de Tukey HSD para a diferença entre as medidas das dimensões das duas amostras de sementes retidas na peneira de 20 mesh.

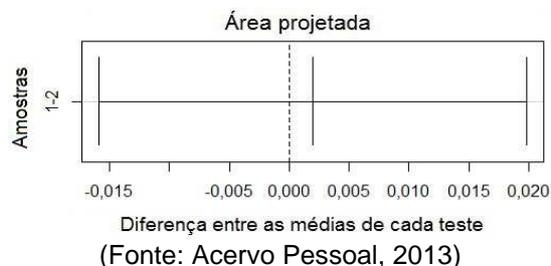


(Fonte: Acervo Pessoal, 2013)

A partir da Figura 15 pode se constatar que há a reprodução entre as duas amostras para a área projetada e o diâmetro de Feret mínimo. De acordo com os testes de Mann-Whitney e Kruskal-Wallis para distribuições não-normais têm-se que o diâmetro de Feret máximo e o diâmetro de Feret médio apresentam variância e valor global sem diferença significativa entre as duas amostras.

Na Figura 16 encontram-se reunidos os resultados do teste de Tukey para as sementes retidas na peneira 25 mesh.

Figura 16 - Resultados do teste de Tukey HSD para a diferença entre as medidas das dimensões das duas amostras de sementes retidas na peneira de 25 mesh.



A partir da Figura 16 constata-se que ocorreu a reprodução para as duas amostras para a área projetada. Conforme testes inferenciais não-paramétricos tem-se que há a reprodução dos diâmetros de Feret máximo, médio e mínimo.

Por meio dos resultados estatísticos expostos da Figura 14 até a Figura 16, constatou-se que as sementes retidas na peneira de 20 mesh apresentaram os melhores resultados. Pois teve o maior número de medidas com distribuições normais com reprodução estatística. Sendo que, o mais importante é que na Figura 13 verifica-se a predominância da massa de sementes contidas nesta peneira, cerca de 80,1% da massa total.

Portanto, na Tabela 6 são mostrados os valores das dimensões e formas destas sementes que serão utilizados nos testes fluidodinâmicos e de secagem em leito fluidizado.

Tabela 6 - Medidas das sementes de *C. glaziovii* retidas na peneira de 20 mesh.

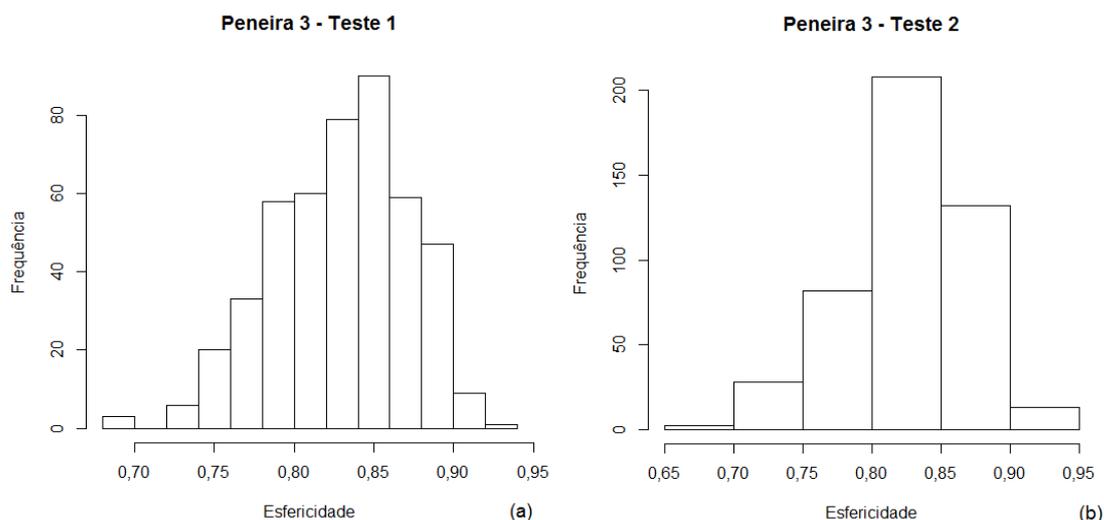
	Área Projetada (mm ²)	Diâmetro de Feret (mm)			Esfericidade
		Máximo	Médio	Mínimo	
Média	1,21 ^a	1,56 ^c	1,30 ^c	0,94 ^a	0,83 ^c
C.V.(%)	1,01	0,26	0,40	0,52	0,31

^adistribuição normal, sem diferença significativa entre as duas amostras.

^cdistribuição não-normal, sem diferença significativa entre as duas amostras.

Visando à análise da influência da esfericidade das sementes separadas por peneiramento sobre as medidas das dimensões, optou-se realizar o tratamento dos dados obtidos da peneira de 20 mesh. As distribuições das esfericidades das 465 sementes amostradas para as amostras 1 e 2 estão reunidos na Figura 17.

Figura 17 - Histograma da esfericidade para as sementes retidas na peneira de 20 mesh, para (a) amostra 1 e (b) amostra 2.



(Fonte: Acervo Pessoal, 2013)

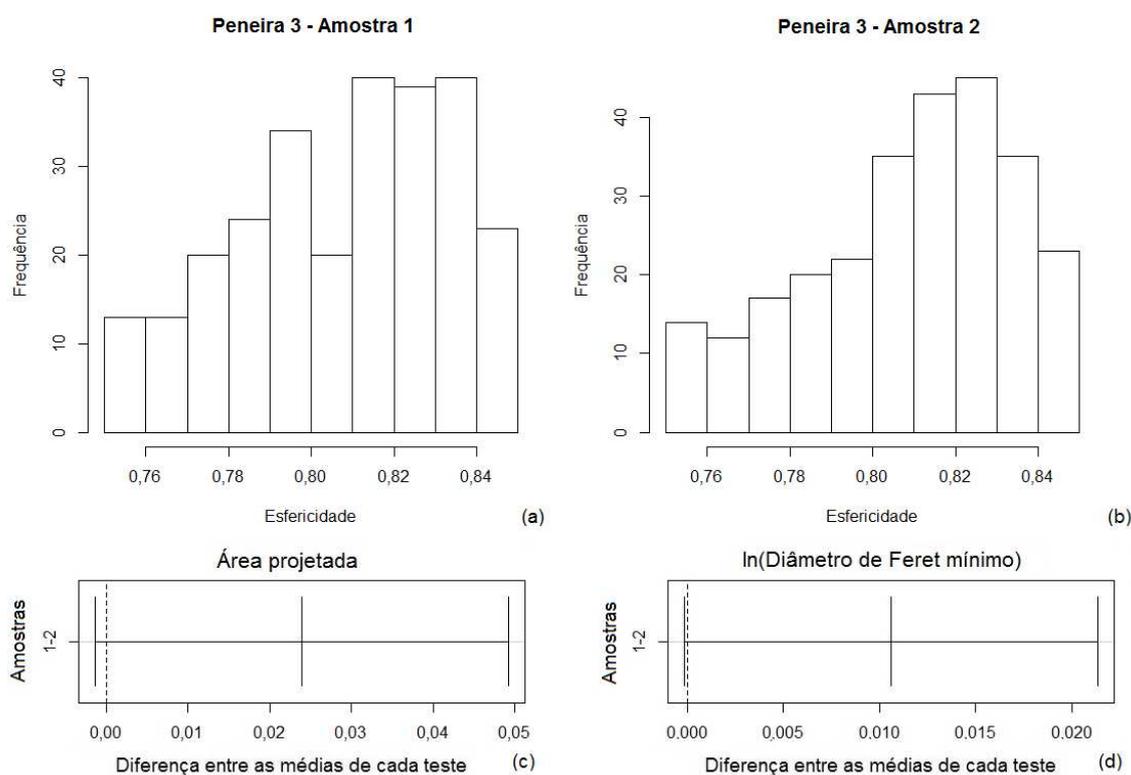
Com base na Figura 17 foram selecionadas 2 faixas de esfericidades, que correspondem às faixas de 0,75 a 0,85 e maior que 0,85 para as duas amostras. Com vista que o número de elementos em cada faixa fosse igual entre as amostras, retiraram-se dados da maior amostra até que tivesse o mesmo número de elemento da menor.

Amostras de mesmo número de elementos são necessários para a realização dos testes estatísticos inferenciais. Portanto, foram obtidos 266 elementos para as duas amostras com esfericidades de 0,75 e 0,85 e 172 elementos para as duas amostras com esfericidades maiores que 0,85.

Na Figura 18 estão representadas as distribuições da esfericidade na faixa de 0,75 a 0,85 para a amostra 1 (Figura 18a) e para a amostra 2 (Figura 18b), as comparações através do intervalo de confiança do teste de Tukey ($p > 0,05$) foram realizados para os dados com distribuição normal. Conforme o

teste de Shapiro-Wilk, as medidas com distribuição normal para as duas amostras são: área projetada (Figura 18c) e o logaritmo neperiano das medidas de diâmetro de Feret mínimo (Figura 18d).

Figura 18 - Histograma para esfericidade entre 0,75 e 0,85 para (a) amostra 1 e (b) amostra 2 e os resultados do teste de Tukey HSD para a diferença entre as medidas das dimensões das sementes retidas na peneira de 20 mesh.

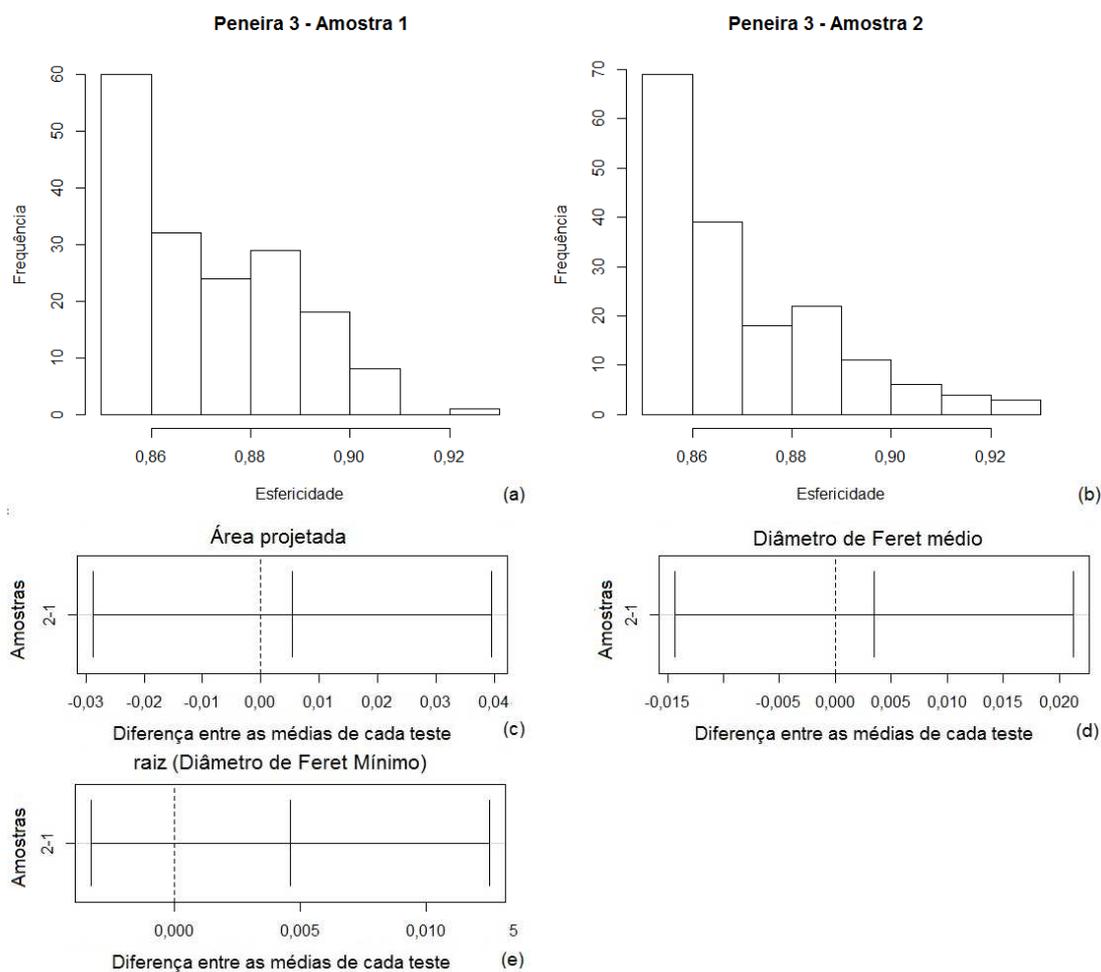


(Fonte: Acervo Pessoal, 2013)

Conforme os testes de Mann-Whitney e Kruskal-Wallis com 95% de confiança que o diâmetro de Feret máximo não reproduziu e o diâmetro de Feret médio reproduziu.

Na Figura 19 têm-se as análises estatísticas de dimensões de sementes com esfericidades maiores que 0,85. Também ocorrendo a reprodução estatística para todas as medidas.

Figura 19 - Histograma para esfericidades maiores que 0,85 para (a) amostra 1 e (b) amostra 2 e os resultados do teste de Tukey HSD para a diferença entre as medidas das dimensões das sementes retidas na peneira de 20 mesh.



(Fonte: Acervo Pessoal, 2013)

Através de testes não-paramétricos do diâmetro de Feret máximo foi confirmada a reprodução entre as amostras, para $p > 0,05$. Verifica-se que conforme ocorreu na Figura 12 obteve-se a normalização das distribuições das medidas e a reprodução estatística entre as amostras para esfericidades maiores que 0,85.

Destes resultados de caracterização de sementes de *C. glaziovii*, verifica-se uma ampla faixa das propriedades físicas extensivas, dificultando a análise estatística descritiva. Além disto, foi demonstrado através de análises estatísticas que a esfericidade das sementes influencia sobre estes dados.

Pode-se demonstrar através dos resultados estatísticos para as sementes de *C. glaziovii* que as dificuldades de caracterização presentes em diversos trabalhos na literatura são devido à forma não esférica destas partículas.

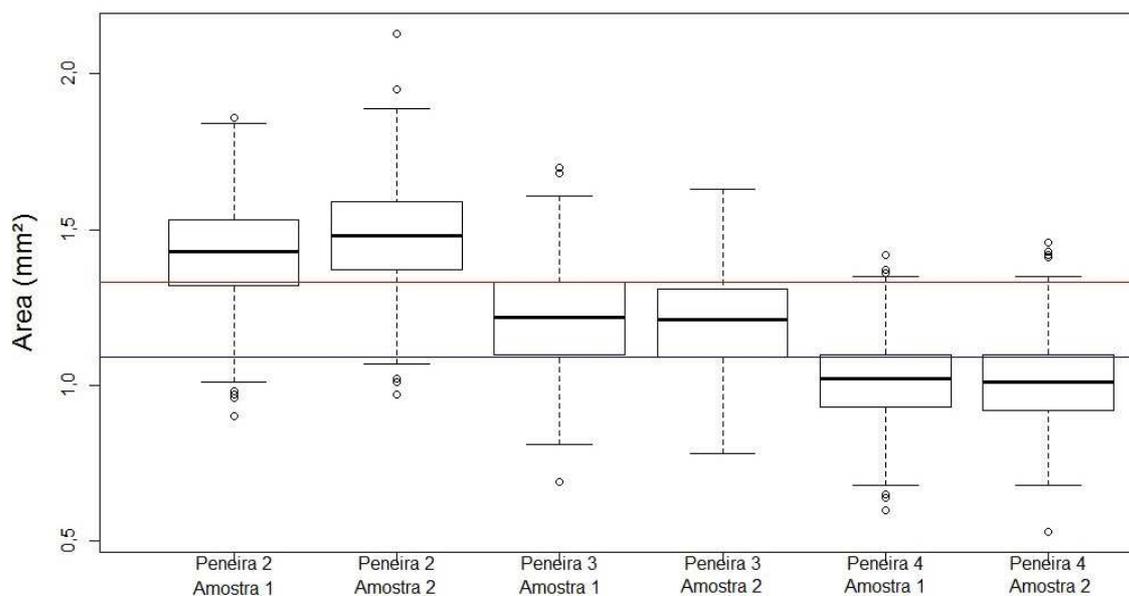
4.3.4. Dimensões das sementes entre as peneiras

Todos estes resultados permitiram a comparação entre as medidas das dimensões e as esfericidades das sementes de *C. glaziovii*, tanto para as amostras em cada peneira, quanto para as sementes sem peneiramento (*in natura*), com o objetivo de avaliar a reprodutibilidade destes dados.

Por fim, neste item serão avaliadas as influências das dimensões das sementes de embaúba sobre o peneiramento.

A Figura 20 apresenta a área projetada para as sementes de embaúba em função das amostras das sementes retidas nas peneiras de 18, 20 e 25 mesh (amostras 2, 3 e 4, respectivamente).

Figura 20 - Área projetada em função das amostras das sementes retidas nas peneiras de 18, 20 e 25 mesh (amostras 2, 3 e 4, respectivamente).

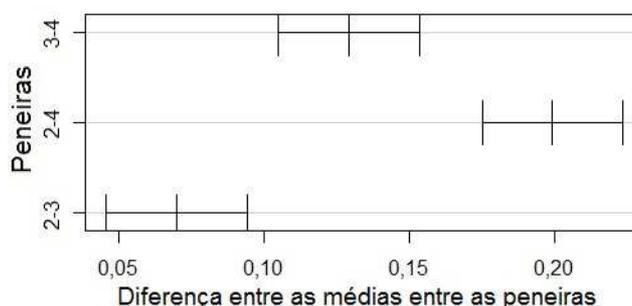


(Fonte: Acervo Pessoal, 2013)

Com base na Figura 20 as medidas de área projetada para as sementes podem ser comparadas. As linhas inferior e superior traçadas na horizontal correspondem ao segundo e terceiro quartil da área projetada da peneira de 20 mesh, delimitando 50% dos elementos que compõem cada amostra. Constatase através disto que a área apresenta diferentes valores entre as peneiras, portanto, o peneiramento influencia sobre a separação da medida de área projetada.

Na Figura 21 estão dispostos os intervalos de confiança entre as diferenças das médias de área projetada entre as peneiras, visto como apresentado anteriormente que esta medida tem distribuição normal para todas as peneiras.

Figura 21 - Resultados do teste de Tukey HSD para a diferença entre as médias das áreas projetada entre as peneiras.



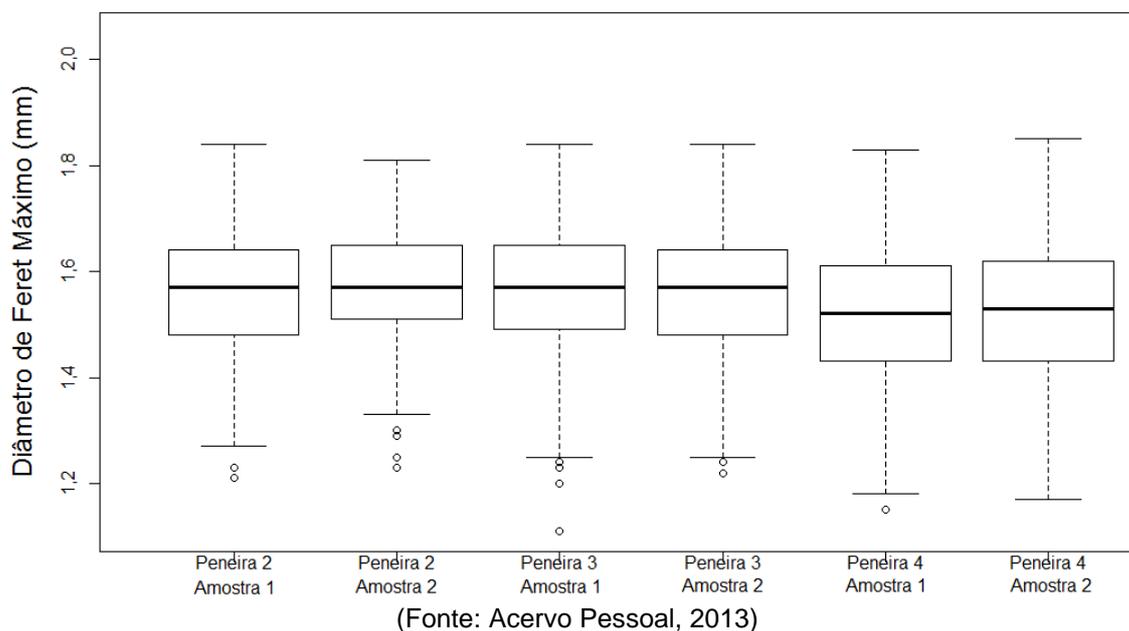
(Fonte: Acervo Pessoal, 2013)

Desta forma, com base na Figura 21, constata-se que no processo de separação das sementes de embaúba a área projetada é estatisticamente diferente entre as peneiras.

Na Figura 22 encontram-se apresentadas as distribuições do diâmetro máximo de Feret em cada peneira para as duas amostras.

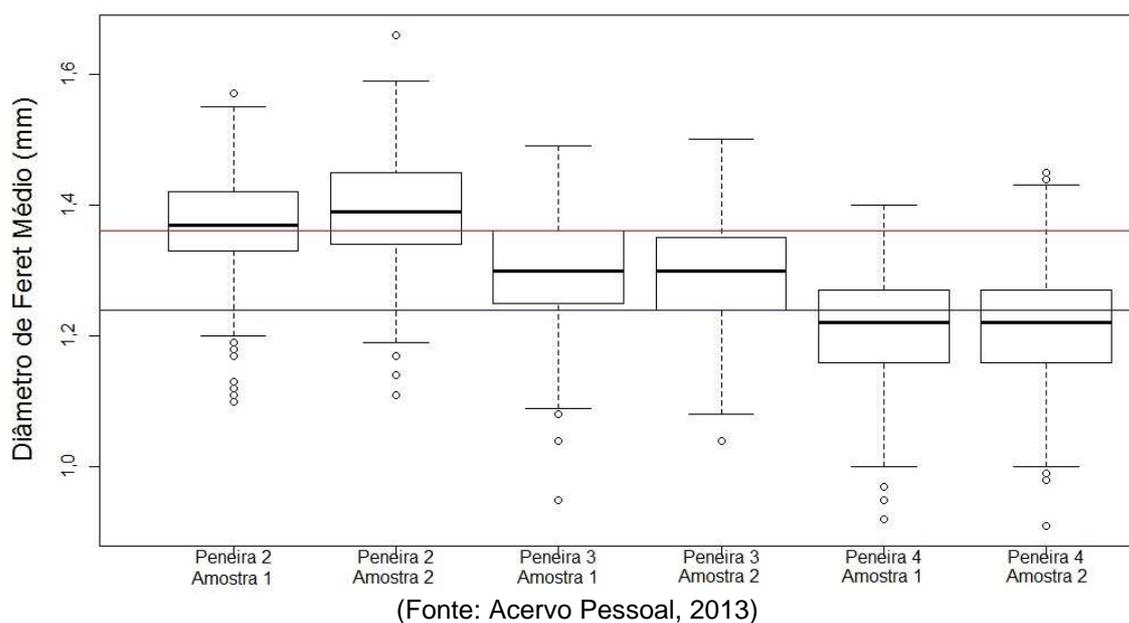
Através dos testes estatísticos de Kruskal Wallis e Man-Whitney as medidas para as peneiras 2 e 3 apresentam diferenças desprezíveis, porém para a peneira 4 a diferença é não desprezível. Porém, observa-se que a diferença tem uma faixa muito reduzida comparada à diferença apresentada para área projetada na Figura 20.

Figura 22 - Diâmetro de Feret máximo em função das amostras das sementes retidas nas peneiras de 18, 20 e 25 mesh (amostras 2, 3 e 4, respectivamente).



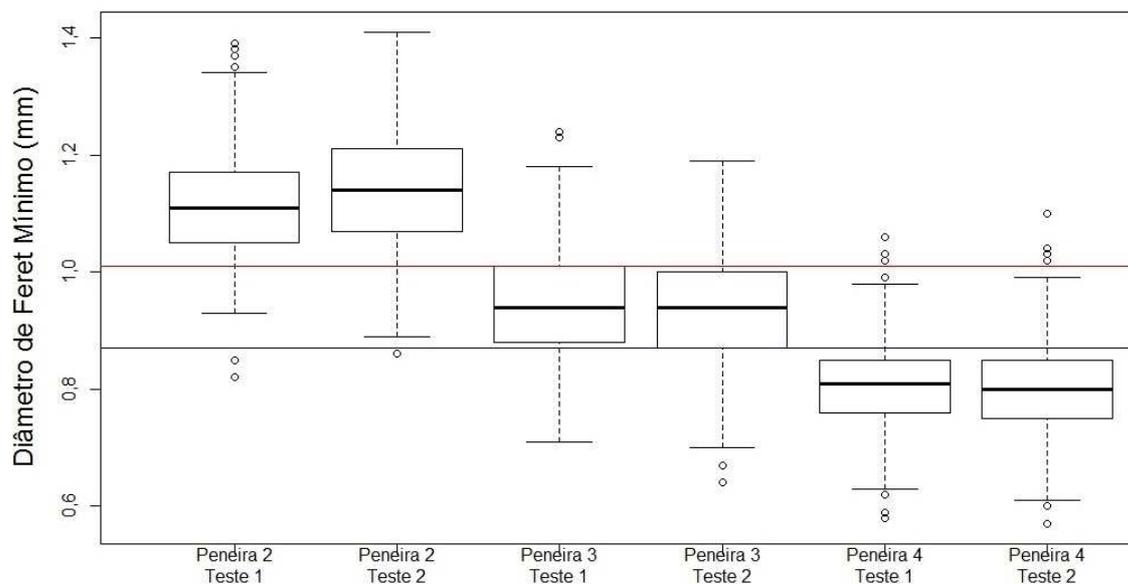
Esta comparação também foi realizada para o diâmetro médio de Feret, como pode ser verificada a partir do resultado mostrado na Figura 23.

Figura 23 - Diâmetro de Feret médio em função das amostras das sementes retidas nas peneiras de 18, 20 e 25 mesh (amostras 2, 3 e 4, respectivamente).



Na Figura 24 tem-se apresentadas as distribuições do diâmetro de Feret mínimo das duas amostras de sementes retidas nas peneiras 2, 3 e 4.

Figura 24 - Diâmetro de Feret mínimo em função das amostras das sementes retidas nas peneiras de 18, 20 e 25 mesh (amostras 2, 3 e 4, respectivamente).



(Fonte: Acervo Pessoal, 2013)

Para os testes não-paramétricos de Mann-Whitney e Kruskal-Wallis com 95% de confiança constata-se que há a diferença entre as peneiras da medida de diâmetro de Feret mínimo e observando a Figura 24 constata-se que esta diferença é maior do que as diferenças das demais medidas apresentadas nas figuras anteriores.

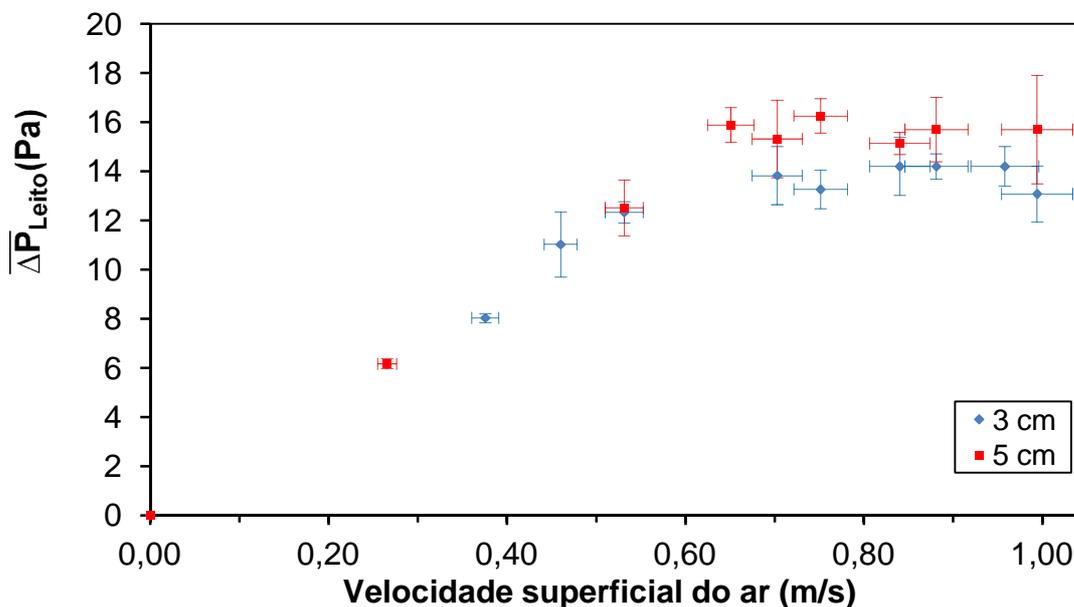
O que era esperado, pois se a passagem da semente pela abertura da malha depende de que seu diâmetro seja menor que o espaço disponível. Então a menor medida deve apresentar uma maior variação entre as peneiras, como foi visto para o diâmetro de Feret mínimo. Tendo em vista que a área projetada e o diâmetro de Feret médio incluem em seu cálculo o diâmetro de Feret mínimo tem-se que as variações apresentadas nestas medidas são função do diâmetro de Feret mínimo.

3.4. Determinação da velocidade de mínima fluidização

Com base na análise estatística da caracterização física destas partículas, constatou-se que as sementes retidas na peneira de 20 mesh demonstraram uma melhor reprodutibilidade, em relação as demais. Assim, estas foram selecionadas para a condução dos testes da fluidodinâmica do leito fluidizado, em batelada, com as sementes de *C. glaziovii*.

Sendo que, os resultados e seus respectivos desvios e erros prováveis de medidas estão apresentados na Figura 25. As dimensões e forma deste material encontram-se reunidos na Tabela 6, no item 3.3.1.

Figura 25 - Queda de pressão estática média em função da velocidade superficial do ar para as sementes de *C. glaziovii*, parametrizada na altura do leito fixo inicial.



(Fonte: Acervo Pessoal, 2013)

Para a determinação da velocidade média mínima de fluidização precisaram ser identificados os regimes de leito fixo e de leito fluidizado.

A partir da Figura 25 identifica-se o regime de leito fluidizado para os valores onde a queda de pressão estática média tem uma variação desprezível com o aumento da velocidade superficial. Compararam-se as distribuições da queda de pressão entre as velocidades através do teste de Tukey para $p > 0,05$, sendo que a normalidade foi confirmada através de Shapiro-Wilk para $p > 0,05$. Para as velocidades do ar em que as quedas de pressão medidas tiveram variação desprezível estatisticamente foi determinado o leito fluidizado e para as demais se constatou o comportamento de leito fixo.

As velocidades superficiais do ar em que se tem o leito fixo foram até aproximadamente 0,53 m/s para as alturas de leitos iniciais de 3 e 5 cm. Ajustaram-se os parâmetros da Equação (20) aos dados experimentais dos intervalos de velocidades selecionadas em regime de leito fixo. Os resultados podem ser encontrados na Tabela 7.

$$\overline{\Delta P}_{Leito} = \alpha \cdot u \quad (20)$$

Tabela 7 - Coeficiente angular ajustado na Equação (20) e seus parâmetros estatísticos.

H_0 (cm)	α (Pa.s/m)	Desvio Padrão	R^2	χ^2	RMSE
3	23,06	7,55	0,9961	0,2867	0,4372
5	23,49	6,58	0,9995	0,0178	0,1089

Para as diferentes alturas de leito fixo tiveram-se diferentes quedas de pressão na fluidização, o que era esperado de acordo com Rizzi Júnior (2009). Para a altura de 3 cm a média das quedas de pressão foi de $(13,58 \pm 2,55)$ Pa e para a altura de 5 cm foi de $(15,67 \pm 2,14)$ Pa.

Com os resultados apresentados calculou-se a velocidade média de mínima fluidização, que foram de $(0,63 \pm 0,14)$ m/s e $(0,71 \pm 0,21)$ m/s para as alturas de leitos iniciais de 3 e 5 cm, respectivamente. Estes resultados foram obtidos igualando a Equação (20) a média das quedas de pressão em regime fluidizado para cada altura de leito.

Observa-se que com a variação das alturas de leito as velocidades médias de mínima fluidização têm uma diferença de 0,08 m/s menor que o menor desvio padrão de 0,14 m/s.

Para cada procedimento de fluidização foi determinada a massa de leito fixo inicial, obtendo-se a massa específica do leito. Utilizando a Equação (3) calculou-se a porosidade "bulk" do leito fixo de partículas, que foi de $(64,7 \pm 0,9)\%$ e $(63,1 \pm 0,8)\%$ para alturas de 3 e 5 cm, respectivamente. Em seu trabalho Lima (2009) fez uma relação da porosidade "bulk" de leito fixo com o número de Arquimedes das partículas e verificou que há uma relação linear entre estas variáveis.

Para as sementes de embaúba o número de Arquimedes foi em torno de $5,83 \times 10^4$. Constatou-se que a porosidade "bulk" do leito fixo para as sementes de *C. glaziovii* estão dentro da faixa de porosidade "bulk" encontrada por Lima (2009) para o mesmo valor de número de Arquimedes.

Na literatura existem diversas equações para a previsão da velocidade de mínima fluidização para materiais inorgânicos, com propriedades físicas bem definidas. Porém, materiais biológicos como as sementes estudadas têm grande variação das dimensões e forma. Com base neste fato, Paudel e Feng (2013) ajustaram os parâmetros da equação de Ergun para partículas de biomassa, como na Equação (21).

$$\text{Re}_{mf} = \left[\left(\frac{k_2}{k_1} \right)^2 + \left(\frac{1}{k_1} \right) \cdot \text{Ar} \right]^{1/2} - \frac{k_2}{k_1} \quad (21)$$

Onde, de acordo com Paudel e Feng (2013), os parâmetros foram de $k_1 = 9,26$ e $k_2 = 280,37$. Sendo que o domínio de validade inclui os valores estimados para as sementes de embaúba.

Utilizando estes dados obteve-se a velocidade de mínima fluidização de aproximadamente 0,71 m/s. Portanto, o valor estimado através desta equação apresentada mostrou concordância com o valor experimental para as sementes

de embaúba, o que era esperado, pois as partículas de biomassa utilizadas apresentam forma não-esférica e características físicas semelhantes.

Com base nestas constatações, confirma-se a importância da análise na caracterização desta natureza de partícula, obtendo-se propriedades com menores desvios e possibilitando a utilização de equações para a estimativa da velocidade de mínima fluidização. Portanto, métodos como o peneiramento possibilitam a redução das incertezas sobre as estimativas de variáveis da fluidização.

3.5. Caracterização da secagem

A caracterização da secagem das sementes de embaúba no leito fluidizado em batelada foi conduzida com velocidade superficial do ar de $(1,0 \pm 0,3)$ m/s, para garantir a fluidização do leito, sem ocorrer o arraste das partículas.

Foram utilizadas as alturas de leitos fixos iniciais de 3 e 5 cm, buscando a operação da unidade experimental com a maior interação possível entre o fluido e as partículas, ou seja, visando aumentar a transferência de calor e massa simultânea entre as fases envolvidas no processo de secagem.

Por se tratar de uma secagem convectiva, deve-se operar na máxima condição de transferência de calor entre o ar e o sistema de partículas. Portanto para aumentar o máximo possível a transferência de calor entre as fases, tem-se que aumentar a diferença de temperatura entre o ar circundante e as sementes.

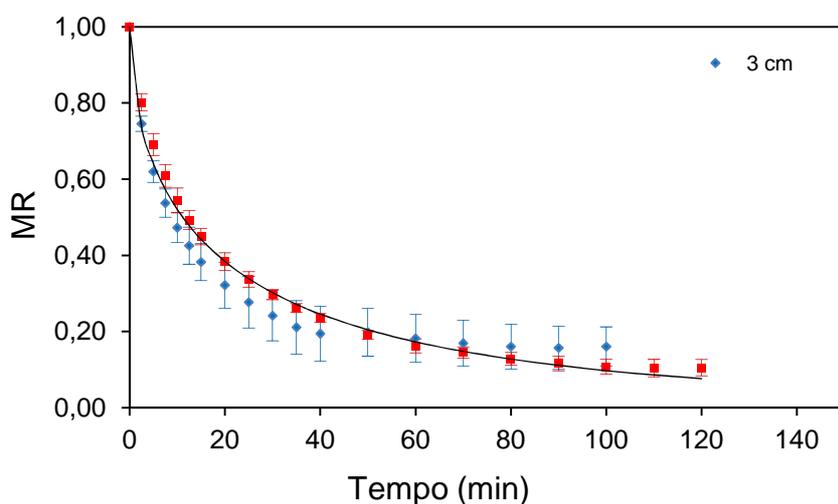
Além destas considerações, a caracterização da secagem neste trabalho, leva em conta as limitações das condições operacionais tendo em vista preservar a qualidade fisiológica das sementes, isto é, a sobrevivência dos embriões.

Por se tratar de um ser vivo deve-se, por conseguinte, respeitar o limite de temperatura com base em Carvalho e Nakagawa (1980), conforme já comentado.

Desta maneira, pretende-se obter a caracterização da secagem convectiva, garantindo a preservação das sementes, minimizando os efeitos térmicos sobre as atividades fisiológicas e heterogeneidade da sua formação morfológica, pois, conforme já se comentou anteriormente, consiste do processamento de um sistema particulado que tem vida.

Na Figura 26 estão apresentados os resultados do adimensional de umidade das sementes em função do tempo de secagem, assim como, seus respectivos desvios, para as duas alturas de leitos utilizadas nos testes de secagem convectiva em leito fluidizado em batelada.

Figura 26 - Adimensional de umidade em função do tempo de secagem para $T_{ar} = (40 \pm 2)^\circ\text{C}$ e $v_{ar} = (1,0 \pm 0,3)\text{m/s}$, parametrizada na altura do leito.



(Fonte: Acervo Pessoal, 2013)

A partir da Figura 26 pode se observar que a diferença entre os adimensionais de umidades em um mesmo tempo para as duas alturas de leito são inferiores aos desvios de medidas correspondentes, o que foi confirmado pelo teste estatístico de Tukey para $p > 0,05$.

Levando em conta a uniformidade da velocidade do ar de secagem constatada por Corrêa (2012), provavelmente, teve-se uniformidade na transferência de calor e massa do ar de secagem para as sementes, e como consequência a uniformidade ao longo do sistema de partículas para o fluido em sua

vizinhança (DAVIDSON e HARRISON, 1971; KUNII e LEVENSPIEL, 1991; SILVA *et al.*, 2012).

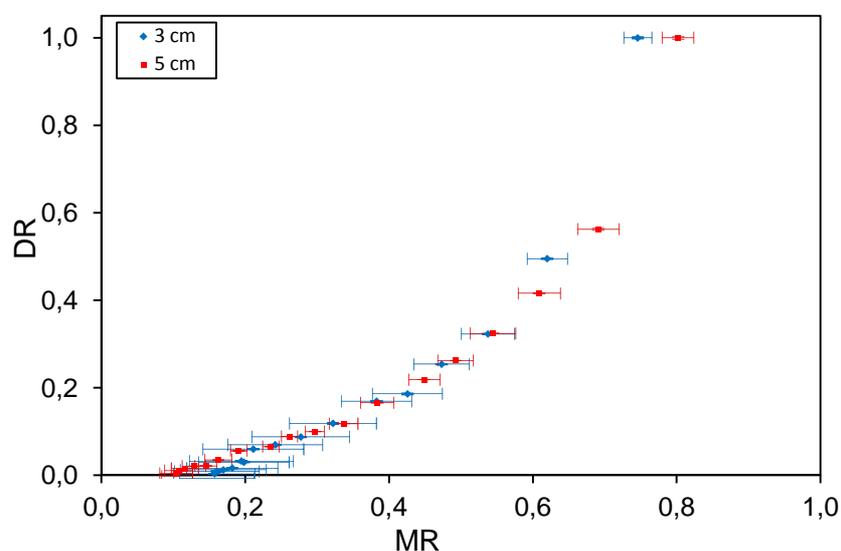
A respeito da umidade inicial das sementes de embaúba, após a extração das sementes das infrutescências por meio de escarificação via úmida, preliminarmente se separou a água livre através de centrifugação e, então foram armazenadas em temperatura de aproximadamente 277 K (LORENZI e MATOS, 2002).

Após estas operações, a umidade inicial das sementes no processo de secagem foi de $(0,31 \pm 0,01)$ em base seca para as alturas de leitos fixos iniciais de 3 e 5 cm.

Com base nos dados referentes às características de secagem (Figura 26), os resultados do adimensional de taxa de secagem (Equação 22) em função do adimensional de umidade, para ambas as alturas de leito, estão apresentados na Figura 27.

$$DR = \frac{\frac{\partial X_{bs}}{\partial t}}{\frac{\partial X_{bso}}{\partial t}} \quad (22)$$

Figura 27 – Adimensional da taxa de secagem em função do adimensional de umidade durante a secagem de sementes de embaúba para $T_{ar} = (40 \pm 2)^\circ\text{C}$ e $v_{ar} = (1,0 \pm 0,3)\text{m/s}$, parametrizada na altura do leito.



(Fonte: Acervo Pessoal, 2013)

Para uma melhor análise da caracterização da secagem, com base nos dados da Figura 27, deve-se fazer a classificação das partículas segundo os resultados de caracterização física, conforme apresentados anteriormente.

Para os resultados de caracterização das sementes, constatou-se uma porosidade de $(25,3 \pm 1,0)\%$ para as sementes de embaúba. Estas sementes são constituídas principalmente de lignina, celulose e hemicelulose (PICELLI, 2011). A celulose e hemicelulose são compostos orgânicos muito hidrofílicos, responsáveis pela higroscopicidade de diversos materiais biológicos, como a madeira, por exemplo (NEUMAN e SAAVEDRA, 1986).

Desta forma as sementes de *C. glaziovii* podem ser classificadas como higroscópicas e porosas. Ou seja, apresentam a capacidade de absorver a água do ar ambiente, mantendo a água presente nos poros das sementes (SANTOS, JANKOWSKI e ANDRADE, 2003).

Observa-se, também, que a composição química das sementes de *C. glaziovii* é semelhante ao de outros órgãos das plantas, como às das madeiras. Podendo ser sugerido, que os mesmos princípios que retém a água nas paredes dos tecidos lenhosos das árvores valem para as sementes (LABOURIAU, 1983; PRATT, 1986; MARCOS FILHO, 2005; CARVALHO e NAKAGAWA, 1980).

As estruturas compostas por celulose garantem a resistência mecânica nestes materiais e também dificultam o transporte de água em seu interior (NEUMAN e SAAVEDRA, 1986; FAHN, 1978).

Desta forma aumentando a resistência interna de transferência de massa no interior destes órgãos, como no caso da madeira de *Eucalyptus grandis*, de acordo com Neuman e Saavedra (1986).

A madeira é um material lignocelulósico, poroso e higroscópico que apresenta o ponto de saturação das fibras variando entre 0,28 a 0,32 em base seca. Abaixo desta umidade predomina o mecanismo de difusão na secagem deste biomaterial (PRATT, 1986).

Com base nesta classificação, a partir da Figura 27, constata-se que o processo de transferência simultânea de calor e massa ocorre à taxa de secagem decrescente, durante toda a operação, indicando a predominância dos mecanismos internos de transferência de umidade do interior das sementes de embaúba para a sua superfície.

O mesmo efeito foi constatado por Barrozo (1995) nas condições utilizadas para a secagem de sementes de soja com baixa umidade inicial e para materiais biológicos de outros órgãos das plantas, como no caso da madeira de *Eucalyptus grandis*, de acordo com Santos, Jankowski e Andrade (2003).

Observa-se que as características físicas e químicas destas sementes contribuíram para a comparação das características de secagem de outras partes das plantas (IPT, 1989; PICELLI, 2011; BROWNING, 1967; ANGYALOSSY-ALFONSO, 1987).

A partir da classificação de partículas realizada por van Brakel (1980) com relação aos aspectos de secagem, foi possível a confirmação, com base na dependência do adimensional da taxa de secagem em função do adimensional de umidade apresentada na Figura 27, que as sementes de embaúba são materiais porosos higroscópicos.

Logo, a secagem de sementes de *C. glaziovii* é caracterizada pela secagem de um meio poroso higroscópico para as máximas condições de transferência de calor e massa, levando em consideração as restrições que visam garantir a preservação de suas qualidades fisiológicas em padrões pré-estabelecidos.

Além disto, com base em Fortes e Okos (1980), a ocorrência da secagem no período de taxa decrescente, implica que a retirada da umidade ocorre por evaporação e condensação.

Com base nisto, segundo Keey (1980) e Brooker, Bakker-Arkema e Hall (1974), a secagem pode ser representada por equações diferenciais para cada período de taxa de secagem. As soluções destas equações diferenciais são representadas pela função exponencial para o período de taxa decrescente, o que confirma a escolha das equações de Barrozo (1995) para a representação

dos dados do adimensional de umidade em função do tempo de secagem para estas sementes.

Levando em conta a condição limite de que no início do processo o adimensional de umidade é igual à unidade, pela sua própria definição apresentada na Equação (9).

A partir disto, foram ajustados os parâmetros das equações apresentadas na Tabela 3 ao conjunto de dados experimentais dos adimensionais de umidade em função do tempo de secagem para as duas alturas dos leitos fixos iniciais. Os parâmetros estatísticos dos ajustes estão apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 - Parâmetros estatísticos dos ajustes das equações de secagem para os adimensionais de umidade em função do tempo de secagem de embaúba, para o ar a $(1,0\pm 0,3)$ m/s e $(40\pm 2)^{\circ}\text{C}$ para as alturas de leitos de 3 e 5 cm.

Equação	R ²	χ^2	RMSE
Lewis	0,9050	0,0102	0,0982
Page	0,9883	0,0007	0,0262
Overhults	0,9883	0,0007	0,0262

Com base nestes resultados (Tabela 8), pode-se observar que os melhores ajustes foram obtidos para as equações de Overhults e de Page para os dados das duas alturas de leitos utilizadas. A partir da Tabela 8 também se pode constatar que os coeficientes estatísticos dos ajustes das equações de Overhults e Page são iguais. Com base em Vieira (2012), optou-se pela equação de Overhults para representar a relação do adimensional de umidade em função do tempo de secagem, conforme apresentada na Figura 26.

Os valores obtidos de coeficiente de determinação (R²), chi-quadrado (χ^2) e RMSE estão próximos aos apresentados nos trabalhos de Pereira (2010) para as sementes de painço, de Perea-Flores *et al.* (2012) para as sementes de *Ricinus communis* e de Amiri Chayjan e Kaveh (2013) para as sementes de *Pistacia atlantica* L., popularmente conhecida como Carvalho pistache.

Na Equação (23) têm-se os parâmetros ajustados para as duas alturas de leito utilizadas.

$$MR=e^{(-0,046 \cdot t)^{0,552}} \quad (23)$$

Na literatura, existem diversos trabalhos de secagem de sementes que apresentaram um melhor ajuste para a equação de Overhults, entre os quais, tem-se, Vieira (2012) para as sementes de linhaça em leito fluidizado, Barrozo (1995) para as sementes de soja em leito deslizante e Arnosti Junior (1997) para as sementes de *Brachiaria brizantha* em secador tipo esteira com escoamentos cruzados.

No próximo item estão apresentados os resultados obtidos no tocante à qualidade fisiológica dos lotes de sementes de *C. glaziovii*.

3.6. Qualidade fisiológica das sementes

A qualidade fisiológica das sementes foi confirmada através de métodos diretos em campo. Após o acompanhamento da semeadura, em lanço, durante 4 meses foi avaliada a qualidade fisiológica, através do índice de germinação, que foi de 77%. Ou seja, seja 77% das sementes semeadas germinaram, de acordo com a definição apresenta na Equação (14).

O valor do índice de germinação determinado para as sementes de *Cecropia glaziovii* está acima da média dos valores apresentados nos trabalhos de Naves *et al.* (1992), que realizaram um estudo para sete espécies frutíferas nativas do cerrado goiano, e assim como, Carrega *et al.* (2011), que estudaram cinco espécies silvestres de amendoim.

Destas sementes germinadas foram amostradas 15 plântulas para obter a dimensão durante o desenvolvimento biológico neste período. As plantas apresentaram de 1 até 2 cm de comprimento e de 0,2 até 27 cm² de área superficial foliar (Figura 28).

A foto típica das plantas em campo pode ser vista na Figura 29.

Figura 28 - Foto das plântulas emergidas em 4 meses, germinadas em canteiros no Horto Florestal Navarro de Andrade.



(Fonte: Acervo Pessoal, 2013)

A partir das Figuras 28 e 29 e dos resultados apresentados pode-se constatar que em 4 meses de acompanhamento, ainda estava ocorrendo emergência das sementes, o que já era esperado de acordo com Arrieche, Picelli e Sartori (2010).

Para as alturas de leito de 3 e 5 cm as massas de sementes obtidas foram de $(24,26 \pm 0,59)$ g e $(42,20 \pm 0,89)$ g, respectivamente em cada leito de partículas. Levando em conta que a massa de 100 sementes foi de $(0,49 \pm 0,02)$ g, pode-se estimar que cerca de 5.000 e 8.600 sementes foram processadas, respectivamente para as cargas de leitos fixos iniciais de 3 e 5 cm.

Considerando o valor do índice de emergência de 77% calculou-se que em torno de 3.850 e 6.622 sementes de *C. glaziovii* foram germinadas para as alturas de leitos de 3 e 5 cm, respectivamente.

Figura 29 - Foto das sementes emergidas em campo.



Fonte: Acervo Pessoal (2013)

Segundo Gonçalves *et al.* (2005) para a recuperação de áreas degradadas são destinadas áreas de 5 m², para cada planta, e com base na Resolução de nº47 de 2003 da SMA (2003), uma espécie não pode ultrapassar o limite de 20% do total da área recuperada. Portanto, neste caso, os cálculos indicam que podem ser recuperadas cerca de 96,25 e 165,55 mil m² de área florestal degradada com as sementes secas em alturas de leito de 3 e 5 cm, respectivamente.

Segundo Brasil (2012), na Lei nº 12.651, de 2012, no âmbito do Sistema Nacional de Informação sobre Meio Ambiente (SINIMA) tem-se a exigência para o Cadastro Ambiental Rural (CAR) de uma propriedade, que esta deve conter uma Área de Preservação Permanente (APP) correspondente a 20% da área total da gleba.

Diante das exigências governamentais, para o caso do leito de 5 cm de altura foram beneficiadas sementes de embaúba necessárias para a recuperação de uma área florestal de cerca de 165,55 mil m², como afirmado anteriormente. Portanto, suficientes para atender à recuperação de uma propriedade

rural de aproximadamente 830 mil m², equivalente a 83 ha ou 34 alqueires paulista.

5. CONCLUSÕES

Nas condições utilizadas neste trabalho mostrou-se que os métodos de coleta e extração das sementes das infrutescências foram adequados. Bem como, as metodologias de determinação das propriedades físicas e de caracterização da secagem das sementes.

A medida de dimensão teve grande dispersão e variabilidade, mostrou-se que um dos motivos é a forma das sementes, quanto mais próximo da esfera, menores foram os desvios e melhor aderência a normal dos dados.

Para a separação por peneiramento foram observadas as mesmas melhorias na caracterização, escolheram-se as sementes da peneira de 20 mesh, com diâmetro de Feret médio de 1,3 mm e coeficiente de variação de 0,40% para a condução dos testes em leito fluidizado.

No tocante à avaliação da fluidodinâmica do leito fluidizado, operando em regime de batelada com sementes de *C. glaziovii*, as velocidades médias de mínima fluidização para as duas cargas de leito demonstraram que a diferença entre as velocidades do ar de 0,08 m/s foi menor do que o desvio de 0,14 m/s calculado. A equação de previsão de velocidade de mínima fluidização para as partículas de biomassa demonstrou concordância com os valores experimentais obtidos, as características das sementes de embaúba estão contidas nos intervalos das propriedades físicas, para os quais os parâmetros da equação foram verificados.

Em relação à caracterização de sementes de embaúba (*Cecropia glaziovii* Snethlage), com base no adimensional de taxa de secagem em função do adimensional de umidade, demonstrou-se que a variação entre as umidades foi desprezível comparando-se as duas alturas de leito.

Também se demonstrou a ocorrência do período de taxa de secagem decrescente, durante o processo, indicado a predominância dos mecanismos internos de transferência de umidade no interior das sementes para a sua superfície.

A forma de dependência entre estes adimensionais, considerando a classificação de partículas advindas da literatura, mostrou através da caracterização da secagem que as sementes de embaúba apresentam características de secagem típicas de materiais biológicos porosos higroscópicos.

Ressalta-se que, neste caso por se tratarem de embriões, demonstrou-se que estas características da secagem convectiva também são válidas para as máximas condições de transferência de calor e massa entre as fases, com base nas restrições que visam preservar as qualidades fisiológicas em padrões pré-determinados.

Entre as equações analisadas, as equações de Overhults e Page tiveram os melhores ajustes, aos dados de cinética de secagem. Com base na literatura, optou-se pela equação de Overhults para representar o adimensional de umidade em função do tempo de secagem.

Demonstrou-se nos testes via método direto de avaliação da qualidade fisiológica das sementes, em campo, que o índice de germinação foi de 77%, e com heterogeneidade das plantas germinadas com comprimento de 1 a 2 cm e área foliar de 0,2 a 27 cm², valores adequados para programas governamentais de reflorestamento.

Para o caso da operação do leito de maior carga, demonstrou-se que foram beneficiadas sementes de embaúba necessárias para a recuperação de uma área florestal em torno de 165,55 mil m².

Suficientes para atender a recuperação, com base no Cadastro Ambiental Rural e no Sistema Nacional de Informação sobre Meio Ambiente em vigor, de uma gleba de terra produtiva de aproximadamente 830 mil m². Implicando que esta espécie pioneira deverá ser alvo de estudos específicos para a recuperação de Áreas de Preservação Permanente.

6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A caracterização física e de secagem convectiva em leito fluidizado das sementes de *Cecropia glaziovii* mostrou diversas lacunas a serem estudadas para este tipo de material. Com isto, além de outras possibilidades, sugerem-se como trabalhos futuros as investigações descritas a seguir.

Caracterização da secagem de sementes de embaúba em leito fluidizado com operação contínua.

Desenvolvimento de testes da avaliação da qualidade fisiológica de sementes de *Cecropia glaziovii* através de métodos indiretos, em laboratório.

Análise dos parâmetros estatísticos das distribuições das propriedades físicas e a influência da forma sobre as medidas das dimensões de outras sementes silvestres.

Análise da secagem de outras espécies de sementes pioneiras em leito fluidizado.

Relacionar a forma da semente, seleção de diâmetros pela fluidização e por peneiramento com a germinação das sementes de embaúba, bem como, para outras espécies silvestres.

Avaliar os efeitos latentes da secagem sobre as qualidades fisiológicas das sementes de embaúba vermelha, assim como, de outras variedades silvestres pioneiras.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMIRI CHAYJAN, R.; KAVEH, M. Physical Parameters and Kinetic Modeling of Fix and Fluid Bed Drying of Terebinth Seeds. **Journal of Food Processing and Preservation**, p. 1–14, 14 abr. 2013.

ANGYALOSSY-ALFONSO, V. **Caracterização anatômica das principais espécies de Eucalyptus L'Hérit.** cultivadas no Brasil. Tese de Doutorado, 1987. 188p. Instituto de Biociências - Universidade de São Paulo.

ARAÚJO, P. C. *et al.* Biometria de frutos e sementes de *Operculina macrocarpa* (L.) Urban ocorrente no semiárido Norte-rio-grandense. **Scientia Plena**, v. 8, n. 4, p. 1–5, 2012.

ARNOSTI JÚNIOR, S. **Desenvolvimento de um secador transportador do tipo esteira com escoamento cruzado e caracterização de sementes de gramíneas.** 1997. 232 f. Tese (Doutorado em pesquisa e desenvolvimento de processos químicos) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 1997.

ARRIECHE, L. da S. **Evolução da forma e encolhimento de um sistema gel durante a secagem por convecção forçada.** 2003. 136 f. Dissertação (Mestrado em pesquisa e desenvolvimento de processos químicos) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2003.

ARRIECHE, L. S.; PICELLI, R. M.; SARTORI, D. J. M. Drying and characterization of pioneer arboreal seeds. In: INTERNATIONAL DRYING SYMPOSIUM, 17., 2010, Magdeburg, Germany. **Anais...** Magdeburg, Germany: DECHEMA, 2010.

BACKES, P; IRGANG, B. **Mata atlântica: as árvores e a paisagem.** Porto Alegre, RS: Paisagem do Sul, 2004. 393 p.

BARROZO, M. A. S. **Transferência de calor e massa entre o ar e sementes de soja em leito deslizante e escoamentos cruzados.** 1995. 163 f. Tese (Doutorado em pesquisa e desenvolvimento de processos químicos) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 1995.

BOTEZELLI, L.; DAVIDE, A. C.; MALAVASI, M. M. Características dos frutos e sementes de quatro procedências de *Dipteryx alata* Vogel (Baru). **Cerne**, v. 6, n. 1, p. 9–18, 2000.

BRASIL. Decreto-lei nº 12.651, de 25 de Março de 2012. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, Poder Executivo, Brasília, DF.

BROOKER, D. B.; BAKKER-ARKEMA, F. W.; HALL, C. W. **Drying cereal grains**, Westport: Avi publishing company, 1974. p. 266.

BROWNING, B.L. - **Methods of Wood Chemistry** - Vol I e Vol II, Interscience Publ. New York, 1967.

BRUNETTI, F. **Mecânica dos fluidos**. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2008. p. 410.

CARREGA, W. C. *et al.* Emergência de plântulas de espécies silvestres de amendoim. **Biotemas**, v. 24, n. 4, p. 31–38, 8 dez. 2011.

CARVALHO, P. E. R. **Espécies arbóreas brasileiras**. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2010. v. 4. 644 p.

CARVALHO, N. M.; NAKAGAWA, J. **Sementes: ciência, tecnologia e produção**. Campinas: Fundação Cargil, 1980. p. 326

CETESB, C. A. DO E. de S. P. **Dutos e chaminés de fontes estacionárias - determinação dos pontos de amostragem: procedimento**. São Paulo, 1990.

CETESB, C. A. DO E. de S. P. **Dutos e chaminés de fontes estacionárias. Determinação da velocidade e vazão dos gases: método de ensaio**. São Paulo, 1992.

CORRÊA, L. J. **Estudo da secagem de sementes de embaúba em leito fluidizado**. 2012. 86 f. Dissertação (Mestrado em pesquisa e desenvolvimento de processos químicos) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2012.

Croquis de Localização de Marcos de Coordenadas Geográficas. São Paulo. Instituto Geográfico Cartográfico (ICG), 1958. Disponível em: <http://www.igc.sp.gov.br/produtos/arquivos/catalog_croquis.pdf>

D'HAINAUT, L. **Conceitos e métodos da estatística**. 2. ed. Lisboa: Função Calouste Gulbenkian, 1997. p. 362.

DAVIDSON, J. F.; HARRISON, D. **Fluidization**. London: Academic Press, 1971. p. 847.

DEV, S. R. S.; RAGHAVAN, V. G. S. **Advancements in Drying Techniques for Food, Fiber, and Fuel**. *Drying Technology*, v. 30, n. 11-12, p. 1147–1159, set. 2012.

FAHN, A. **Anatomia vegetal**. Madrid: H. Blume Ediciones, 1978. p. 643.

FIRMINO, P. T. *et al.* Determinação das propriedades físicas de sementes de pinhão manso. In: Congresso Brasileiro de Mamona e Simpósio Internacional de Oleaginosas Energéticas, 4. 1., 2010, João Pessoa – PB, 2010. **Anais...** Campina grande: Embrapa Algodão, 2010. p. 2025-2030.

FORTES, M; OKOS, M R. Drying theories: their bases and limitations as applied to foods and grains. In: MUJUMDAR, A S. **Advances in drying**. Washington: Hemisphere, 1980. Cap. 5. p. 129-150.

FREIRE, J. T.; GUBULIN, J. C. **Tópicos especiais em sistemas particulados**. v. 3. São Carlos: EdUFSCar, 1990. v. 3p. 382.

GARCIA, D. C. *et al.* **A secagem de sementes**. Ciência Rural, v. 34, n. 2, p. 603–608, abr. 2004.

GODOI, S.; TAKAKI, M. Efeito da temperatura e a participação do fitocromo no controle da germinação de sementes de embaúba. **Revista Brasileira de Sementes**, v. 27, n. 2, p. 87–90, 2005.

GOLDEMBERG, J. **Física geral e experimental**. 3. ed. São Paulo: Nacional, 1977. v. 1p. 525.

GONÇALVES, R. M. G. *et al.* Aplicação de modelo de revegetação em áreas degradadas, visando à restauração ecológica da microbacia do córrego da fazenda Itaqui, no município de Santa Gertrudes, SP. **Revista do Instituto Florestal**, v. 17, n. 1, p. 73–95, 2005.

GÜNER, M. Pneumatic conveying characteristics of some agricultural seeds. **Journal of Food Engineering**, v. 80, n. 3, p. 904–913, jun. 2007.

HARPER, J. L.; LOVELL, P. H.; MOORE, K. G. The shapes and size of seeds. **Annual Review Ecology System**, v. 1, p. 327–356, 1970.

IMAGE PRO PLUS: **Measurements**. Version 6.0: Media Cybernetics, 2006.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO - IPT **Sistema de Informações de Madeiras Brasileiras**. São Paulo: IPT, 1989. 291p. (Relatório No 27 078).

KEEY, R. B. Theoretical foundations of drying technology. In: MUJUMDAR, A. S. **Advances in drying**. Washington: Hemisphere, 1980. Cap. 1. p. 1-22.

KILIÇKAN, A.; GÜNER, M. Pneumatic conveying characteristics of cotton seeds. **Biosystems Engineering**, v. 95, n. 4, p. 537–546, dez. 2006.

KUDRA, T.; MUJUMDAR, A. S. **Advanced Drying Technologies**. 2. ed. New York: CRC Press, 2009. p. 447.

KUNII, D.; LEVENSPIEL, O. **Fluidization Engineering**. 2. ed. Boston: Butterworth-Heinemann, 1991. v. 3p. 491.

LABOURIAU, L. G. **A germinação de sementes**. Washington: Programa de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, 1983. v.4, p. 174.

- LIMA, R. de A. B. **Fluidodinâmica de leitos fluidizados e vibrofluidizados operando com partículas planas**. 2009. 150 f. Dissertação (Mestrado em pesquisa e desenvolvimento de processos químicos) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2009.
- LORENZI, H; MATOS, F. J. A. **Plantas medicinais no Brasil, nativas e exóticas**. Nova Odessa, SP: Instituto Plantarum, 544 p., 2002.
- LUCAS, A. *et al.* Improved equation for the calculation of minimum fluidization. **Industrial & Engineering Chemistry Process design and development**, v. 25, n. 2, p. 426–429, 1986.
- MARCOS FILHO, J. **Fisiologia de sementes de plantas cultivadas**. Piracicaba: FEALQ, 2005. 495p.
- MASSARANI, G.; PEÇANHA, R. P. Dimensão característica e forma de partículas . In: ENCONTRO SOBRE ESCOAMENTO EM MEIOS POROSOS , 14., 1988, **Anais...** Campinas: Universidade Estadual de Campinas, 1988. p. 302 - 312.
- MUJUMDAR, A. S. **Handbook of Industrial Drying**. New York: Marcel Dekker. 1987. 948 p. ISBN 0-8247-7606-2.
- NAVES, R. V. *et al.* Avaliação da emergência de plântulas de espécies frutíferas nativas do cerrado goiano. **Anais Esc. Agron. e Vet.**, v. 22, n. 1, p. 133–141, 1992.
- NEUMAN, R. J.; SAAVEDRA, A. Check formation during the drying of Eucalyptus globulus. **Holz als roh-und werkstoff**, v.50, p.106-110, 1992.
- NOGUEIRA, A. C.; MEDEIROS A. C. S. **Extração e beneficiamento de sementes florestais nativas**. Circular Técnica, Colombo/PR, 2007.
- NOVAIS, A. F. **Análise da aplicação do leito deslizante e escoamentos cruzados na secagem de sementes**. 1990. 90 f. Dissertação (Mestrado em pesquisa e desenvolvimento de processos químicos) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 1990.
- PASSOS, J. G.; PASSAMANI, M. *Artibeus lituratus* (Chiroptera , Phyllostomidae): biologia e dispersão de sementes no Parque do Museu de Biologia Prof. Mello Leitão, Santa Teresa (ES). **Natureza on line**. v.1, n.1, p. 1-6, 2003.
- PAUDEL, B.; FENG, Z. G. Prediction of minimum fluidization velocity for binary mixtures of biomass and inert particles. **Powder Technology**, v. 237, p. 134–140, mar. 2013.

PEREA-FLORES, M. J. *et al.* Microscopy techniques and image analysis for evaluation of some chemical and physical properties and morphological features for seeds of the castor oil plant (*Ricinus communis*). **Industrial Crops and Products**, v. 34, n. 1, p. 1057–1065, jul. 2011.

PEREA-FLORES, M. J. *et al.* Mathematical modelling of castor oil seeds (*Ricinus communis*) drying kinetics in fluidized bed at high temperatures. **Industrial Crops and Products**, v. 38, p. 64–71, jul. 2012.

PEREIRA, A. V. **Caracterização e secagem de sementes de Painço (*Setaria italica* L.)**. 2010. 92 f. Dissertação (Mestrado em pesquisa e desenvolvimento de processos químicos) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2010.

PICELLI, R. M. **Determinação termodinâmica do equilíbrio termodinâmico de sementes silvestres pioneira**. 2011. 59 f. Monografia (graduação em engenharia química) – Departamento de Engenharia Química da Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2011.

PICELLI, R. M.; ARRIECHE, L. S.; SARTORI, D. J. M. Isotermas e mudanças da entalpia e entropia de adsorção de umidade em sementes de embaúba. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA QUÍMICA, 19., 2012, Búzios. **Anais...** Búzios: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2012a.

PICELLI, R. M.; ARRIECHE, L. S.; SARTORI, D. J. M. Determination of thermodynamic equilibrium of pioneering seeds. In: INTERNATIONAL DRYING SYMPOSIUM, 18., 2012, Xiamen, China. **Anais...** Xiamen, China: Xiamen University, 2012b.

PRADO, M. M. **Secagem em leito fixo de sementes com mucilagem**. 2004. 162 f. Tese (Doutorado em pesquisa e desenvolvimento de processos químicos) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2004.

PRATT, G.H. **Timber drying manual**. London: Department of the Environment, 1986. 122p.

R DEVELOPMENT CORE TEAM. R: **A language and environment for statistical computing**. Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2011.

RAMAKERS, B. J.; RIDDER, R. DE; KERKHOF, P. J. A. M. Fluidization behavior of wood/sand mixtures. **Maderas: Ciencia y tecnologia**, v. 6, n. 2, p. 145–153, 2004.

RIZZI JÚNIOR, A. C. **Secagem de sementes de gramíneas (*Brachiaria brizantha*) em leito fluidizado**. 2009. 157 f. Tese (Doutorado em pesquisa e desenvolvimento de processos químicos) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2009.

ROSSO, G. A. **Recobrimento de sementes de frutos silvestres em panela rotatória**. 2013. 117 f. Dissertação (Mestrado em pesquisa e desenvolvimento de processos químicos) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2013.

ROSSI, S. J. **Psicrometria**. FUNAPE, João Pessoa, 1987. 60 p.

SANTOS, G. R. V. dos; JANKOWSKY, I. P.; ANDRADE, A. de. Curva característica de secagem para madeira de *Eucalyptus grandis*. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, n. 63, p.214-220, 2003.

SANTOS, F. S. *et al.* Biometria e qualidade fisiológica de sementes de diferentes matrizes de *Tabebuia chrysotricha* (Mart . Ex A . DC .) **Standl. Scientia Forestalis**, v. 37, n. 82, p. 163–173, 2009.

SCAPIM, C. A. *et al.* Análise exploratória de conjuntos de dados obtidos durante a maturação de sementes de milho. **Revista Brasileira de sementes**, v. 24, n. 1, p. 103–110, 2002.

SILVA, F. R. G. B. da *et al.* Experimental and numerical analysis of soybean meal drying in fluidized bed. **Powder Technology**, v. 229, p. 61–70, 2012.

SMA, SECRETARIA DE ESTADO DO MEIO AMBIENTE, 2003. **Orientação para o reflorestamento heterogêneo de áreas degradadas**, Estado de São Paulo, 19 p.

VAN BRAKEL, A. Mass transfer in convective drying. In: MUJUMDAR, A S. **Advances in drying**. Washington: Hemisphere, 1980. Cap. 7. p. 217-261.

VIEIRA, G. N. A. **Caracterização e secagem de grãos de linhaça marrom (*Linum usitatissimum* L.) em leito fixo e fluidizado**. 2012. 82 f. Dissertação (Mestrado em pesquisa e desenvolvimento de processos químicos) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2012.

WALTON, W. H. Feret ' s Statistical Diameter as a Measure of Particle Size. **Nature**, v. 162, n. 4113, p. 329–330, 1948.