



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE EDUCAÇÃO E SAÚDE
UNIDADE ACADÊMICA DE SAÚDE
CURSO DE BACHARELADO EM FARMÁCIA

THALYTA MANGUEIRA DUARTE

**ESTUDO CINÉTICO DO PROCESSO DE SECAGEM DAS CASCAS DE OVOS DE
GALINÁCEOS**

CUITÉ – PB

2017

Thalyta Mangueira Duarte

**ESTUDO CINÉTICO DO PROCESSO DE SECAGEM DAS CASCAS DE OVOS DE
GALINÁCEOS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Bacharelado em Farmácia da Universidade Federal de Campina Grande, campus Cuité, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Farmácia.

Orientador:

Prof. Dr. Wellington Sabino Adriano

CUITÉ – PB

2017

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA NA FONTE
Responsabilidade Msc. Jesiel Ferreira Gomes - CRB 15 - 256

D812e Duarte, Thalyta Mangueira.

Estudo cinético do processo de secagem das cascas de ovos de galináceos. / Thalyta Mangueira Duarte. - Cuité: CES, 2017.

47 fl.

Monografia (Curso de Graduação em Farmácia) - Centro de Educação e Saúde / UFCG, 2017.

Orientador: Wellington Sabino Adriano.

1. Cascas de ovos. 2. Cinética de secagem. 3. Adsorvente.
I. Título.

Biblioteca do CES - UFCG

CDU 547.9

THALYTA MANGUEIRA DUARTE

ESTUDO CINÉTICO DO PROCESSO DE SECAGEM DAS CASCAS DE OVOS
DE GALINÁCEOS

Apresentado e aprovado em: 06/03/2017

BANCA EXAMINADORA

Wellington Sabino Adriano

Prof. Dr. Wellington Sabino Adriano - UFCG
(Orientador)

Anderson Angel Vieira Pinheiro

Msc. Anderson Angel Vieira Pinheiro - UFPA
(Membro)

Júlia Beatriz Pereira de Souza

Prof. Dr. Júlia Beatriz Pereira de Souza - UFCG
(Membro)

AGRADECIMENTOS

A Deus pela sua misericórdia, por se fazer presente em minha vida, por me abençoar e manter forte durante essa caminhada.

A minha Mãe Dona Elza (lindaa!), pelo amor incondicional, pelo apoio e sacrifícios feitos para me manter aqui.

A meu Pai José, pelo amor e confiança.

A minha irmã Camilla (a amarela mais linda do mundo!), pelo amor, pela paciência, por entender (às vezes) a minha ausência, pelos sacrifícios e por tudo que aguentou sozinha enquanto eu estava aqui. Saiba que eu te amo e serei eternamente grata.

A Graciete Balbino, Francielly Macedo e Paola Batista, pela amizade fiel durante todos esses anos, pelas tardes de conversas durante o “tradicional café”, pelos momentos de descontração (4 anos em 1 mês é um bom exemplo) tornando essa jornada mais tranquila, meu muito obrigada. Amo vocês e as considero como irmãs, quero estar presente em muitos momentos de suas vidas, mesmo que por vídeo conferência. Sucesso e mais sucesso eu lhes desejo.

A Carlos Emmanuel, que se tornou o filho adotivo de Dona Elza, pela amizade fiel e sincera, pelo cuidado que tem comigo, por aguentar meus estresses quietinho nesses últimos meses e por estar fazendo muito bem o papel de melhor amigo na ausência das meninas. Vou ser eternamente grata a Deus por ter te colocado na minha vida.

A Anderson Angel pela amizade reconstruída, pelo carinho e cuidado durante esses anos, pela torcida, incentivo e pela presença nesse momento de grande importância na minha vida acadêmica, muito obrigada. Tenho você como exemplo de profissional e lhe desejo mais, e mais sucesso.

Ao meu orientador Wellington, por ter me aceitado como orientanda, pela paciência e atenção.

RESUMO

A industrialização gera um número expressivo de cascas de ovos de galinhas, que ainda são consideradas como resíduos destinados principalmente a agricultura, porém, esse resíduo pode ser utilizado para diversas finalidades. Rico em carbonato de cálcio, as possibilidades de reutilização deste resíduo incluem, a preparação de alimentos para animais, a suplementação de cálcio na alimentação humana, como base para desenvolvimento de produtos na indústria cosmética, como também para o desenvolvimento de adsorventes. O presente trabalho teve como objetivo traçar o perfil cinético de secagem de cascas de ovos de galináceos, a fim de usá-la como adsorvente na indústria farmacêutica e/ou alimentícia. As cascas de ovos foram obtidas na Residência Universitária do Campus da UFCG em Cuité – PB, submetidas a um estudo de secagem que determinou os melhores parâmetros, sendo estes, a temperatura (400°C) e maior tamanho de partícula, os quais foram utilizados para o desenvolvimento do estudo cinético, este realizado em quadruplicata. Os dados obtidos foram submetidos aos modelos matemáticos de Page e Henderson & Pabis, que tratados com ajuda do software Origin 7.0 se ajustaram satisfatoriamente ao estudo gerando gráficos que demonstraram a efetividade dos parâmetros utilizados no estudo.

PALAVRAS-CHAVE: Cascas de ovos; Cinética de secagem; Adsorvente.

ABSTRACT

Industrialization generates an expressive number of eggshells from chickens, which are still considered as waste mainly for agriculture, but this residue can be used for various purposes. Rich in calcium carbonate, the possibilities of reuse of this residue include, feed preparation, calcium supplementation in human food, as a basis for product development in the cosmetic industry, as well as for the development of adsorbents. The present work had the objective of tracing the kinetic profile of drying eggshells of chickens, in order to use it as adsorbent in the pharmaceutical and / or food industry. The egg shells were obtained at the UFCG Campus Residency in Cuité - PB, submitted to a drying study that determined the best parameters, being the temperature (400 ° C) and larger particle size, which were used for the development of the kinetic study, this one realized in quadruplicate. The obtained data were submitted to the mathematical models of Page and Henderson & Pabis, that treated with the help of the software Origin 7.0 adjusted satisfactorily to the study generating graphs that demonstrated the effectiveness of the parameters used in the study.

KEYWORDS: Eggshells; Kinetics of drying; Adsorbent.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Estrutura do ovo.....	13
Figura 2 – Secador de bandeja ou câmara.....	21
Figura 3 – Secador de leite fluidizado.....	22
Figura 4 – Secador de forno “ <i>Bin-dryer</i> ”.....	22
Figura 5 – Secador de tambor.....	23
Figura 6 – Secador de tubular.....	24
Figura 7 – Secador esteira a vácuo.....	24
Figura 8 – Umidade do alimento durante o processo de secagem.....	26
Figura 9 – Fluxograma demonstrando a forma de obtenção das amostras.....	33
Figura 10 – Curva de cinética de secagem, obtida pelo modelo de Henderson & Pabis, ajustado aos dados da pesquisa	36
Figura 11 – Curva de cinética de secagem, obtida pelo modelo de Page, ajustado aos dados da pesquisa.....	37

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Parâmetros obtidos dos modelos ajustados aos dados de secagem de cascas de ovos de galinhas, na temperatura de 400°C e tempos de 0 a 100 minutos.....	38
---	----

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Modelos matemáticos utilizados para descrever o processo de cinética de secagem.....	34
--	----

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E FÓRMULAS

a: Constante do modelo

b.u: Base úmida

b.s: Base seca

°C: Grau Celsius

CaCO₃: Carbonato de cálcio

CoA: Casca de ovo de avestruz

CO: Casca de ovo

g: Grama

HAp: Hidroxiapatita

k: coeficiente de secagem

L: Litro

mg: Miligrama

m/m: Massa por massa

mm: Milímetro

µm: Micrómetro

n: Constante do modelo

PB: Paraíba

pH: potencial hidrogeniônico

R²: Coeficiente de determinação

RX: Razão de teor de água do produto, adimensional

SPOA: Subproduto de origem animal

t: Tempo de secagem

U: Umidade

UFMG: Universidade Federal de Campina Grande

X: Teor de água do produto

X_i: Teor de água inicial do produto

X_e: Teor de água equilíbrio do produto

SUMÁRIO

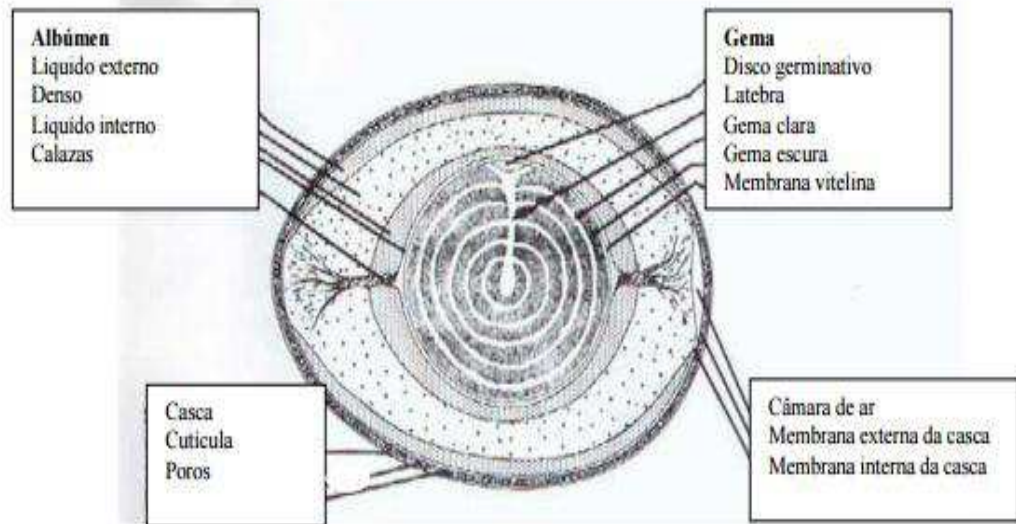
1. INTRODUÇÃO.....	13
2. OBJETIVOS.....	16
2.1. Objetivo geral.....	16
2.1. Objetivos específicos.....	16
3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	17
3.1. Cascas de Ovos.....	17
3.2. Secagem.....	18
3.3. Tipos de secagem.....	19
3.4. Tipos de secadores.....	20
3.5. Cinética de secagem.....	25
3.6. Modelos matemáticos para o processo de secagem.....	27
3.7. Adsorção.....	27
3.7.1. Cinética de adsorção.....	28
3.7.1.1. Modelo cinético pseudo-primeira ordem.....	29
3.7.1.2. Modelo cinético pseudo-segunda ordem.....	29
3.8. Adsorvente.....	30
4. MATERIAL E MÉTODOS.....	32
4.1. Material.....	32
4.1.1. Cascas de ovos.....	32
4.1.2. Trituração e separação.....	32
4.1.3. Secagem.....	32
4.2. Métodos.....	32
4.2.1. Coleta das cascas.....	32
4.2.2. Trituração e separação.....	33
4.2.3. Cinética de secagem.....	33
4.2.4. Tratamento dos dados.....	34
5. RESULTADO E DISCUSSÃO.....	36

6. CONCLUSÃO.....	40
7. REFERÊNCIAS.....	41

1. INTRODUÇÃO

O ovo é um corpo unicelular, formado no ovário ou oviduto. Compõe-se de protoplasma, vesículas germinativas e envoltórios, e contém os nutrientes essenciais para nutrir o gérmen da respectiva espécie (ORNELLAS, 1985).

Figura 1: Estrutura do ovo



Fonte: Adaptado USDA (2000).

A casca de ovo (CO) atualmente tem uma produção significativa pela indústria de produtos e derivados de ovo, considerada como um subproduto de origem animal (SPOA) não destinado ao consumo humano. (AGRA CEAS CONSULTING, 2004).

A casca de ovo pode ser transformada em produtos aproveitáveis e vendáveis, ou seja, agregando ao resíduo valor e amenizando o desequilíbrio ambiental causado pelo descarte incorreto das cascas de ovo, este resíduo vem sendo aplicado na agricultura, com a finalidade de corrigir o pH em solos ácidos, em suplementos alimentares, como fertilizantes, e como bioadsorventes (CARDOSO, 2010).

A industrialização de ovos (ovos em pó, líquidos, congelados, etc.) proporciona vantagens econômicas, extensão da vida útil do produto, facilidades no transporte e conservação, porém, gera um número expressivo de cascas, sendo ainda consideradas como resíduos. Sabendo-se que a casca representa 10% do peso do ovo, o resíduo gerado corresponde a cerca de 5,92 milhões de toneladas por ano em todo o mundo (OLIVEIRA; BENELLI; AMANTE, 2009)

No processamento industrial, a casca provém da etapa de quebra onde o conteúdo do ovo é separado da casca automaticamente (LANA, 2000).

A casca é um composto biocerâmico composta por várias camadas porosas, sendo permeável à água e aos gases. (TINOCO, 1983 *apud* NEVES, 1998). Segundo Brostow et al. (1999), a casca é composta por 94% de carbonato de cálcio, 1% de fosfato de cálcio, 4% de substâncias orgânicas e 1% de carbonato de magnésio. Thapon e Bourgeois (1994) e Hincke et al. (2000) citam valores similares e incluindo cerca de 1,7% do peso total da casca em água (BORON, 2004).

O carbonato de cálcio, maior constituinte da casca, é um cristal amorfo que ocorre naturalmente na forma de calcita, apresentando baixa solubilidade em água (13mg/L, a 18°C) (DURRANT, 1964 *apud* NEVES, 1998).

A maioria dos estudos relacionados à secagem de produtos agrícolas se refere ao efeito de diversas variáveis externas como a temperatura do ar, umidade relativa, velocidade do ar dentre outras sobre o produto durante sua perda de água. Para tanto, modelos matemáticos são utilizados para representar a cinética de secagem frente a estas condições, sendo estes fundamentais para simulações matemáticas de camadas espessas de produto, que irão auxiliar no projeto de novos secadores ou no aperfeiçoamento de secadores já em operação (BERBERT et al., 1995).

Existem três tipos de modelos de secagem usados para descrever a cinética de secagem de produtos agrícolas. O modelo teórico, que considera apenas a resistência interna a transferência de calor e água entre o produto e o ar quente, os modelos semi-teóricos e os empíricos, que consideraram somente a resistência externa a temperatura e umidade relativa do ar de secagem (MIDILLI; KUCUC; YAPAR, 2002; PANCHARIYA; POPOVIC; SHARMA, 2002).

O tratamento do material, no caso, as cascas de ovos de galinhas pelo processo de secagem, vai garantir a purificação do mesmo, permitindo seu armazenamento e utilização por longos períodos sem que ocorra a ploriferação de microorganismos.

O estudo da cinética de secagem é de fundamental importância para a modelagem matemática, a qual tem sido muito usada no projeto e em análise dos processos de transferência de calor e de massa, durante a secagem (FARIA et al., 2012). Sendo assim, o presente trabalho tem como objetivo avaliar a cinética de secagem de cascas de ovos de galinha, utilizando os modelos de Page e Henderson & Pabis, classificados como modelos empíricos, que serão utilizados para analisar a influência da temperatura e do tamanho da

partícula no processo, a fim de usá-las como um adsorvente na indústria cosmética e/ou alimentícia para remoção de corantes em águas residuais.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo geral

Traçar o perfil cinético da secagem de cascas de ovos de galináceos, utilizando modelos empíricos a fim de usá-la como adsorvente na indústria farmacêutica e/ou de alimentos.

2.2. Objetivos específicos

Avaliar se os parâmetros escolhidos para o estudo, tamanho de partícula e influência de temperatura são compatíveis com o método utilizado;

Adequar um modelo matemático ao estudo, a fim de traçar um perfil cinético de secagem das cascas de ovos de galinha.

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1. Cascas de ovos

Anualmente, cerca de 6 milhões de toneladas de cascas de ovos são geradas nas residências e em empresas alimentícias de todo o mundo (OLIVEIRA et al., 2013).

Devido à indefinição de estratégias adequadas para a gestão deste subproduto que contém cerca de 94% (m/m) de CaCO_3 na sua composição (STADELMAN, 2000), a deposição em aterro tem sido tradicionalmente utilizada como destino final. No entanto, as possibilidades de reutilização deste resíduo podem incluir a preparação de alimentos para animais ou de materiais adsorventes para a remoção de corantes e a sua incorporação no solo (PARK et al., 2007; TSAI et al., 2008; MEZENNER; BENSMAILI, 2009).

Serve também como base para desenvolvimento de produtos na indústria cosmética, suplementos alimentares, bases biocerâmicas, fertilizantes, implantes ósseos e dentários e como agente antitártaro em cremes dentais (MURAKAMI, 2006), como agente de remoção de metais pesados em meio aquoso e fonte de cálcio para a produção de hidroxiapatita (OLIVEIRA; BENELLI; AMANTE, 2009).

A membrana da casca é formada por glicoproteínas, constituídas de colágeno tipo I, V e X, úteis na produção de cosméticos. Também é formada de sulfato de queratana e dermatana, que são glicosaminoglicanos úteis na produção de colágenos e síntese de outros produtos, como quitina. Contém também ácido siálico, um sialo-oligossacarídeo que possui propriedades terapêuticas, no desenvolvimento de fármacos (BORON, 2004).

Dupoirieux (1999) estudou o comportamento de implantes de cascas de ovos de avestruz (COA) utilizados em reconstruções ósseas na face de animais. De acordo com os resultados encontrados, foi relatado que a casca de ovo se compara a outros materiais também chamados biocompatíveis. Porém, a sua utilização em seres humanos ainda depende de estudos experimentais mais aprofundados.

Tendo acesso limitado aos alimentos com fonte de cálcio, a população de baixa renda vem sendo alvo de programas que incentivam o consumo de fontes alternativas desse nutriente. Assim, organizações têm utilizado o pó da casca de ovo como fonte de cálcio de baixo custo. O cálcio presente nesse pó é biodisponível, conforme constatado em experimentos *in vivo*, tanto em dieta padrão quanto em dieta à base da mistura arroz-feijão, o

que indica que o produto pode ser uma fonte adequada para suprir as necessidades de cálcio do organismo (LUFT et al., 2005; SOUSA et al., 2001).

A utilização do carbonato oriundo das cascas de ovos como fonte de íons cálcio na síntese de Hidroxiapatita (HAp) já foi relatado em diversos estudos ao longo dos últimos anos (RIVERA et al., 1999; AHMED; AHSAN, 2008; OLIVEIRA; BENELLI; AMANTE, 2009). Esses estudos utilizaram a casca de ovo de galinha como fonte de cálcio para síntese de HAp, o que agrega valor ao resíduo, e proporciona a obtenção de HAp de qualidade por um preço mais baixo que o do mercado.

3.2. Secagem

A secagem é uma das mais antigas técnicas de preservação de produtos, a qual foi praticada pelo homem primitivo, mais tarde pelos persas, gregos e egípcios. A necessidade de se utilizar fontes de calor e modificações que favorecessem a circulação do ar foi verificada a partir da observação do fenômeno na secagem natural. Posteriormente, estas necessidades foram consideradas na construção de secadores (estufas e fornos), precursores dos atuais. Com exceção de regiões desérticas, a secagem natural, submetida aos caprichos da natureza, sempre foi uma ação lenta e propensa à contaminação. A necessidade de escapar de intempéries e conseqüentemente terem segurança e melhor qualidade levou o homem a criar aparatos que protegessem e acelerassem o processo (LIMA, 2001).

A secagem é a operação que tem por objetivo a retirada de água de um produto através de evaporação ou sublimação, quando ele é submetido a condições controladas de temperatura, umidade, pressão, vazão de ar, entre outros. A retirada da umidade dos alimentos tem como objetivo principal sua conservação, pois reduz a proliferação de microrganismos, reduz as reações químicas e as reações bioquímicas indesejáveis. Além disso, a secagem está relacionada também com a redução do peso e volume dos alimentos (GUIMARÃES, 2010).

A secagem consiste em um complexo processo, que envolve a transferência de calor e massa entre o ar de secagem e o produto a ser seco, na qual o aumento da temperatura provoca o aumento da pressão parcial de vapor no produto, provocando a redução no teor de água (LORENZI; MATOS, 2002).

O processo de secagem de um produto pode ser dividido em período de velocidade constante e outro de velocidade decrescente. Durante o período de velocidade constante, a temperatura do produto mantém-se igual à do ar de secagem saturado, e as transferências de calor e massa compensam-se, ou seja, o ar recupera, sob a forma de vapor, o que perdeu sob a

forma de calor. No período de velocidade decrescente de secagem, a taxa de transporte interno de água é menor do que a taxa de evaporação, dessa forma, a transferência de calor do ar para o produto não é compensada pela transferência do vapor de água e, conseqüentemente, a temperatura do grão aumenta, tendendo a atingir a temperatura do ar de secagem (BROOKER; BAKKER-ARKEMA; HALL, 1992).

A difusividade efetiva de umidade varia com as condições de secagem aplicadas ao material (geometria, tamanho) e ao ar (umidade, velocidade, temperatura) e é utilizada para avaliar, comparar o desempenho da operação a diferentes temperaturas (OLIVEIRA et al., 2006).

As informações que as curvas de secagem podem fornecer estão relacionadas ao desenvolvimento do processo de secagem e ao dimensionamento do equipamento. O tempo de secagem referente a uma massa de produtos e o gasto energético, são algumas informações que se pode estimar através desses dados (VILELA; ARTUR, 2008).

3.3. Tipos de secagem

Os métodos de secagem são classificados quanto ao uso ou não de equipamentos, sendo eles classificados como natural ou artificial (GARCIA et al., 2004).

A secagem natural é aquela em que as amostras são secas pela ação do vento e da energia calórica da luz solar (CARVALHO; NAKAGAWA, 2000). Apresenta desvantagens que decorrem do intensivo uso de mão-de-obra, uma vez que as operações geram baixo rendimento e o processo é totalmente dependente das condições climáticas disponíveis (CARVALHO, 1994).

O modo artificial é aquele em que se empregam artifícios para a aceleração do processo de secagem, seja utilizando equipamentos de caráter laboratorial, como muflas, micro-ondas e estufas, ou equipamentos industriais denominados secadores (LUIZ, 2012). Tal método apresenta as vantagens de permitir o controle de parâmetros fundamentais que garantem a eficiência do processo, que são a temperatura e a vazão do ar de secagem e o tempo de exposição da amostra ao ar aquecido, fatores fundamentais para garantir a eficiência do processo (GARCIA et al., 2004; BORTOLAIA, 2011).

A secagem artificial pode ser realizada em altas ou baixas temperaturas. A secagem em baixas temperaturas é um método artificial em que se utiliza ar natural ou ar levemente aquecido (até 10°C acima da temperatura ambiente), em contrapartida, utilizando altas

temperaturas o ar é aquecido a uma temperatura superior a 10°C da temperatura ambiente (SILVA et al., 2008).

Quanto ao funcionamento os secadores podem ser intermitentes ou contínuos, no sistema intermitente, a amostra é submetida à ação do ar aquecido na câmara de secagem a intervalos de tempo, permitindo assim, a homogeneização da umidade e resfriamento quando estão passando pelas partes do sistema onde não recebam ar aquecido (FRANÇA NETO et al., 2010).

No sistema contínuo, as amostras ingressam úmidas, mantém contato com o ar aquecido na primeira câmara, perdem água e se aquecem. Ao passar pela segunda câmara tomam contato com o ar à temperatura ambiente e são resfriados (FRANCO; PETRINI, 2006).

3.4. Tipos de secadores

Há muitos equipamentos de secagem para diferentes finalidades, mas são por volta de 10% os modelos utilizados pelas empresas do ramo alimentício. O grande número de equipamentos se deve ao fato dos inúmeros tipos de substâncias a serem secas, taxas de produção e qualidade final do produto seco (BAKER, 1997).

Muitos equipamentos foram desenvolvidos ao longo dos anos a fim de obter o melhor resultado ao final do processo, de modo que resultassem em um menor gasto energético e melhor qualidade do produto (MÖHLER, 2010).

Os secadores podem ser divididos, basicamente, em dois grandes grupos, dependendo da forma como o calor é transferido para o sólido. Aqueles que expõem o produto diretamente ao ar quente são denominados secadores diretos ou adiabáticos. Por outro lado, aquele nos quais o sólido é seco indiretamente, através do contato com superfícies mantida aquecida por vapor de água, são conhecidos como secadores indiretos e não adiabáticos (MARCINKOWSKI, 2006).

Os secadores adiabáticos ou secagem por ar baseiam-se na troca de umidade por uma corrente de ar quente e seco que atravessa o alimento a ser desidratado. Estes secadores podem ser contínuos ou em batelada (PUHL; NITZKE, 2016).

Tendo como exemplos de secadores adiabáticos: secador de bandeja ou câmara; secador pneumático, secador rotatório, secador de atomização; secador de túnel; secador de esteira; secador de leito fluidizado; secador de forno ou “*Bin-dryer*”.

- Secador de bandeja ou câmara (Figura 2) - É o representante mais comum dentre os secadores em batelada, processo onde o equipamento funciona por determinado período de tempo com produto, para depois ser esvaziado e reabastecido e na sequência reiniciar o processo (TOWLER, 2008). Além da sua versatilidade funcional, seus ciclos de secagem, tempo necessário para desidratar o material presente na bandeja do equipamento, são extremamente flexíveis onde o tempo, a temperatura e o volume de ar podem ser ajustados para atender as especificações precisas de produto (FOUST, 1982).

Figura 2: Secador de bandeja ou câmara.



Fonte: PUHL; NITZKE, 2016.

- Secador de Leito fluidizado (Figura 3) - o secador de leito fluidizado é considerado superior a outros secadores convencionais de leito fixo para a secagem de partículas distribuídas e não pegajosas, com tamanho médio na faixa de 50 μm a 2 mm. Para o processamento de partículas grandes, é essencial aumentar a velocidade superficial do gás, mas isso pode acarretar efeitos negativos na operação do leito, como *slugging* ou canalização (especialmente para partículas com formatos irregulares). Conseqüentemente, várias modificações no leito fluidizado têm sido desenvolvidas, como por exemplo, leito de jorro, leito vibro-fluidizado (PAN et al., 1997).

Figura 3: Secador de Leito fluidizado.



Fonte: DRYNGMACHINESCHINA, 2016.

- Secador de Forno ou “*Bin-dryer*” (Figura 4) - O *Bin-Dryer* ou silo-secador é um silo metálico construído sobre uma base de concreto armado, a qual possui 30 cm acima, um piso plano de aço galvanizado, totalmente perfurado. Esse espaço entre a base e o silo permite a formação de uma câmara de ar. Por essa câmara, mediante um ou mais ventiladores e aquecedores a gás, injeta-se ar quente no silo, o qual vai atravessar toda a massa de grãos que se encontra sobre o piso perfurado. Para se evitar uma secagem excessiva das camadas inferiores de grãos e facilitar o fluxo de ar entre eles (diminuindo a pressão estática), o silo é equipado com um mesclador de roscas verticais, o qual faz os grãos circularem continuamente de baixo para cima, aumentando a separação entre grãos (PUHL; NITZKE, 2016).

Figura 4: Secador de Forno ou “*Bin-dryer*”.



Fonte: GRANFINALE, 2016.

Nos secadores por contato, o calor é transmitido ao alimento por condução, através do contato do produto com uma superfície aquecida. O aquecimento da superfície pode ser

através de vapor, eletricidade ou contato direto com fogo. Duas vantagens destes secadores em relação aos adiabáticos são não necessitar de grandes volumes de ar aquecido e poder realizar a secagem na ausência de oxigênio. Os principais exemplos deste tipo de secadores estão listados a seguir (PUHL; NITZKE, 2016).

- Secador de Tambor (Figura 5) - Também conhecido como secador de rolos, são cilindros metálicos que giram horizontalmente, aquecidos geralmente por vapor de água. A solução a ser seca é aplicada na forma de uma fina camada sobre a superfície externa do tambor. A desidratação acontece pela evaporação do solvente durante a rotação do tambor, e o produto seco é desprendido do cilindro por um raspador (também conhecido como faca ou lâmina), posicionado a cerca de três quartos da rotação completa. A velocidade de rotação, a temperatura da superfície do tambor e a espessura da camada são ajustadas de modo a dar o teor de umidade (ou o teor de solvente residual) desejado para o produto final (DAUD, 2006; FOUST et al., 1982). Os secadores de tambor permitem uma produção elevada e são eficientes e econômicos, principalmente para secagem de soluções viscosas (DAUD, 2006).

Figura 5: Secador de tambor.



Fonte: MECÂNICA INDUSTRIAL, 2016.

- Secador Tubular (Figura 6)- Estes secadores consistem de grandes tubos ou cilindros cuja parede é aquecida por vapor ou diretamente por gases de combustão. O material a ser desidratado percorre o tubo, que gira e possui uma leve inclinação em direção a saída. O alimento perde umidade no contato com as paredes, e o ar úmido é retirado por convecção ou ventilação forçada (PUHL; NITZKE, 2016).

Figura 6: Secador tubular.



Fonte: PORTUGUESE.FABRICDYEINGMACHINE, 2016.

- Secador de Esteira a vácuo (Figura 7) - São secadores construídos de forma a gerar o transporte contínuo de produto a ser desidratado. O transporte do material é realizado por uma esteira, normalmente confeccionada em tela de aço inoxidável, para permitir a passagem do ar quente através da camada de produto disposta sobre ela. A câmara de secagem ou túnel é composta pela união de vários módulos que possuem sistema de aquecimento, ventilação, recirculação e exaustão própria (LIMA NETO, 2008).

Figura 7: Secador de esteira a vácuo.



Fonte: MANUTENÇÃO E SUPRIMENTOS, 2016.

3.5. Cinética de secagem

Pesquisadores estudam o processo referente à secagem, com base nas condições externas do ar, da umidade relativa e da temperatura. Outros, no entanto, ao analisarem estes mesmos processos, buscam compreender as condições internas do produto, onde são evidenciados os mecanismos de movimento de umidade e seus efeitos. Para isso necessita-se de modelos matemáticos com a finalidade de apresentar a diminuição de umidade durante a secagem de produtos. Descrevendo matematicamente uma realidade física através de fórmulas, expressões e equações, é possível representar tal realidade com a melhor aproximação possível (ALVES, 2010).

A cinética de secagem, ou seja, a velocidade com que o alimento perde umidade é controlada pelas características da matriz do alimento e pelas variáveis: temperatura, velocidade e umidade relativa do ar. O conteúdo de umidade de um alimento, durante um processo de secagem, apresenta o comportamento mostrado pela curva da figura 8. Para obtenção dessa curva, amostras do alimento são retiradas de tempos em tempos e a umidade determinada pela Equação 1 (base úmida) ou pela Equação 2 (base seca). Vale observar que as amostras retiradas do processo de secagem estarão quentes e deverão ser resfriadas em dessecadores até uma temperatura próxima da ambiente para a determinação do peso inicial (CELESTINO 2010).

$$U (\% \text{ b.u}) = \frac{(\text{Massa inicial} - \text{Massa final}) \times 100}{\text{Massa inicial}} \quad \text{Equação 1}$$

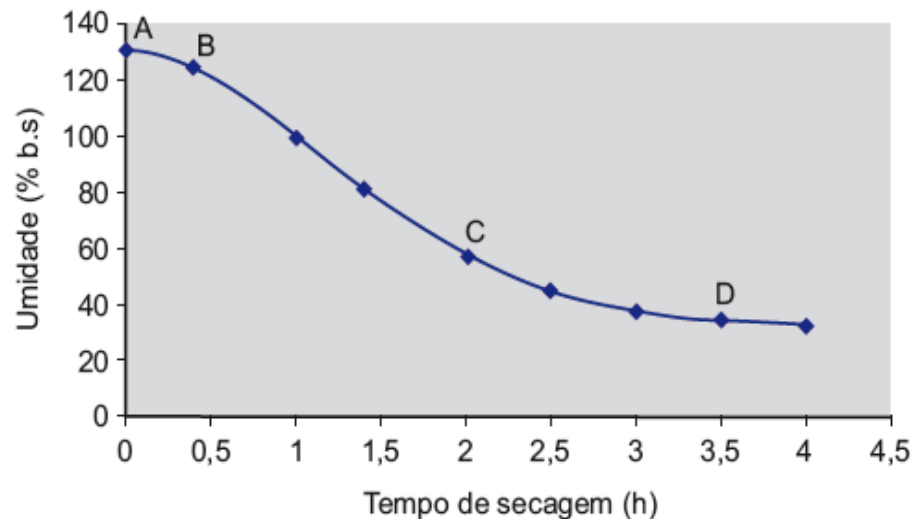
$$U (\% \text{ b.s}) = \frac{(\text{Massa inicial} - \text{Massa final}) \times 100}{\text{Massa final}} \quad \text{Equação 2}$$

Onde:

U = umidade

(% b.u) = porcentagem base úmida

(% b.s) = porcentagem base seca

Figura 8: Umidade do alimento durante o processo de secagem.

Fonte: CELESTINO 2010.

Na figura 1, o segmento AB refere-se ao período de ajuste do material às condições de secagem, no qual sua temperatura varia para atingir o estado estacionário. (AGUIRRE; GASPARINO FILHO, 2002). Durante o período BC, há um filme contínuo de água sobre o sólido, pois a superfície exposta do material está saturada. O movimento de água do interior ocorre com velocidade suficiente para manter as condições de saturação na superfície, uma vez que a quantidade de água disponível no interior do sólido é grande. Enquanto houver quantidade de água na superfície do produto para acompanhar a evaporação, a taxa de secagem será constante. No caso de sólidos ou materiais não porosos, a água removida neste período é basicamente a água superficial. Por outro lado, para materiais porosos, o período de velocidade constante tende a continuar durante um tempo maior, já que a água removida da superfície é substituída pela água do interior do sólido (AGUIRRE; GASPARINO FILHO, 2002; PARK *et al.*, 2014).

O ponto C delimita o fim do período de velocidade constante de secagem e aponta para a umidade crítica. Neste ponto, o movimento do líquido do interior para a superfície do sólido é insuficiente para compensar o líquido que está sendo evaporado, iniciando-se o primeiro período decrescente (PEREDA-ORDOÑEZ *et al.*, 2005; CELESTINO, 2010).

No segmento CD, cada vez menos líquido está na superfície do sólido para evaporar, e essa se torna cada vez mais seca. Do ponto D em diante, tem-se o segundo período de velocidade decrescente, em que a umidade do alimento diminui até alcançar a umidade de equilíbrio para as condições de temperatura e umidade relativa do ar. Quando a umidade de equilíbrio (teor mínimo de umidade) é atingida, o processo de secagem é cessado. (CELESTINO, 2010).

3.6. Modelos matemáticos para o processo de secagem.

Considerando que, de maneira geral, a secagem dos produtos biológicos se dá no período a taxa decrescente e como principal mecanismo de migração de umidade a difusão tem-se, para a descrição deste período inúmeras equações matemáticas propostas, sendo essas classificadas em três categorias: modelos teóricos, semi-empíricos e empíricos (AZZOUZ et al., 2002).

Segundo Farias (2003) as equações empíricas possuem uma relação direta entre o conteúdo de água e o tempo de secagem, enquanto as semi-empíricas são análogas à lei de Newton do resfriamento, assumindo que a taxa de secagem é proporcional a diferença entre o conteúdo de água do produto e seu respectivo conteúdo de água de equilíbrio para as condições de secagem específicas. É comum as equações teóricas utilizarem difusão de líquido ou vapor dentro do produto e aplicarem a equação de difusão.

Os modelos empíricos de Page e de Henderson & Pabis são bastante utilizados para a representação da secagem de produtos agrícolas (MARTINAZZO et al., 2007). O modelo de Page foi originado a partir da modificação do modelo exponencial de Lewis o qual foi adicionado o expoente “n” a variável tempo, como mostra a Equação 3. Já o modelo de Henderson & Pabis se basearam no modelo exponencial que foi modificado pela adição do termo “a” a equação (Equação 4) (DANTAS, 2010).

$$RX = \exp(-k.t^n) \quad \text{Equação 3}$$

$$RX = a.\exp(-k.t) \quad \text{Equação 4}$$

Em que:

- RX = razão de teor de água do produto, adimensional;
- t = tempo de secagem, em minutos;
- k = coeficiente de secagem, h^{-1} ;
- a, n = constantes dos modelos.

3.7. Adsorção

A adsorção é um fenômeno físico-químico onde o componente em uma fase gasosa ou líquida é transferido para a superfície de uma fase sólida. Os componentes que se unem à

superfície são chamados adsorvatos, enquanto que a fase sólida que retém o adsorvato é chamada adsorvente. A remoção das moléculas a partir da superfície é chamada dessorção (MASEL, 1996). A migração destes componentes de uma fase para outra tem como força motriz a diferença de concentrações entre o seio do fluido e a superfície do adsorvente. Usualmente o adsorvente é composto de partículas que são empacotadas em um leito fixo por onde passa a fase fluida continuamente até que não haja mais transferência de massa. Como o adsorvato concentra-se na superfície do adsorvente, quanto maior for esta superfície, maior será a eficiência da adsorção. Por isso geralmente os adsorventes são sólidos com partículas porosas (BORBA, 2006).

Geralmente, a adsorção parece ocorrer como um resultado de forças não balanceadas na superfície do sólido e que atraem as moléculas de um fluido em contato por um tempo finito (BLANCO, 2001).

O processo de adsorção é, por muitas vezes, reversível, de modo que a modificação da temperatura e/ou pressão pode provocar a fácil remoção do soluto adsorvido no sólido (FOUST, 1982).

3.7.1. Cinética de adsorção

Quando um adsorvente é colocado em contato com uma solução aquosa, o equilíbrio entre o adsorvente e o adsorvato não é imediato, pois, as moléculas do adsorvato necessitam de um determinado tempo para serem transportadas até a superfície do adsorvente, e, em seguida para a parte interna. O desenvolvimento de modelos matemáticos para a descrição da cinética do processo de adsorção parte das seguintes hipóteses: o processo de adsorção ocorre sob condições isotérmicas sendo um processo reversível; os mecanismos de transferência de massa na camada limite que circunda o adsorvente e, em seu interior, podem ser classificados como processos difusivos; a etapa de adsorção é mais rápida do que os mecanismos de transporte de intraparticular e interpaticular; a partícula do adsorvente é esférica e isotrópica, e, também assume-se que a fase líquida em torno do adsorvente é completamente misturada (ALÉM SOBRINHO; FERREIRA FILHO, 1997)

As leis de velocidade integradas são úteis quando se deseja confirmar qual é a ordem da reação estudada. As equações são integradas e as formas lineares são usadas para determinar os parâmetros das leis de velocidade ao traçar-se uma curva da concentração da espécie estudada versus tempo (BONIOLO, 2008).

3.7.1.1. Modelo cinético pseudo-primeira ordem

O modelo de pseudo-primeira ordem assume que a taxa de variação da captação do soluto com o tempo é diretamente proporcional a diferença entre a quantidade adsorvida em qualquer tempo. A equação 5 de Lagergren auxília na compreensão do mecanismo de adsorção de adsorvatos em fase líquida (BULUT; AYDIN, 2006).

$$q_t = q_{eq} (1 - e^{-K_1 t}) \quad \text{Equação 5}$$

Sendo, que q_t é a quantidade de adsorvato que foi adsorvido em tempo t (mg m^{-1}), q_e é a quantidade de equilíbrio (mg g^{-1}), K_1 é a constante de pseudo-primeira ordem (h^{-1}) e t é o tempo de contato (h).

A partir da integração da equação 5 com as condições iniciais, $q_t = 0$, para $t = 0$, obtemos:

$$\frac{dq_t}{dt} = K_2(q_e - q_t)^2 \quad \text{Equação 6}$$

3.7.1.2. Modelo cinético pseudo-segunda ordem

O modelo de pseudo-segunda ordem considera que a taxa de variação de captura do soluto com o tempo é diretamente proporcional ao quadrado da diferença entre a quantidade adsorvida no equilíbrio e a quantidade adsorvida em qualquer intervalo de tempo. O modelo assume que a quimiossorção pode ser a etapa de controle da velocidade dos processos de adsorção (SALLEH et al., 2011).

Sendo o modelo representado pela equação 7, em que K_2 é a constante de pseudo-segunda ordem ($\text{g mg}^{-1} \text{h}^{-1}$).

$$\frac{dq}{dt} = K_1(q_e - q_t) \quad \text{Equação 7}$$

Integrando a equação 7, com as condições iniciais $q_t = 0$, para $t = 0$ e $q_t = q_t$, para $t = t$, o modelo cinético de pseudo-segunda ordem não é linear, e é expresso na equação 8.

$$q_t = \frac{K_2 q_e^2 t}{1 + q_e K_2 t} \quad \text{Equação 8}$$

3.8. Adsorvente

A palavra adsorvente aplica-se usualmente a um sólido que mantém o soluto na sua superfície pela ação de forças físicas. Os adsorventes mais comuns incluem a sílica gel, o carvão ativado, a alumina, zeólitas sintéticas e diversas argilas. A escolha dos adsorventes é muito importante. Os sólidos devem ter, entre outras características, boa resistência mecânica para suportar o manuseio. Além disso, os adsorventes são seletivos quanto à capacidade de adsorverem solutos específicos (FOUST, 1982).

A escolha de um adsorvente com elevada capacidade e uma vida longa, disponível em larga escala e com baixo custo de implementação é o primeiro passo para um processo eficaz. Considera-se então de baixo custo, os materiais que requerem pouco processamento, sejam naturalmente abundantes ou subprodutos de outra indústria (SILVA, 2012)

Segundo Ruthven (1988), os adsorventes são materiais com elevada porosidade onde maior parte de sua área superficial está localizada em seu interior. Logo, o processo de adsorção consiste em uma determinada sequência de operações de transferência de massa, onde o soluto é transportado no interior do adsorvente em que está sendo adsorvido.

Estudos foram conduzidos para explorar a possibilidade de aplicações úteis de cascas de ovo, especialmente para águas residuais. A porosidade das cascas de ovos torna-o um material atraente como adsorvente. Estima-se que cada casca de ovo contenha entre 7000 e 17000 poros (PRAMANPOL; NITAYAPAT, 2006; ELKADY et al., 2011). A pesquisa mostrou que as cascas de ovos e a membrana de casca de ovo podem ser utilizadas como um adsorvente para ferro (YEDDOU; BENSMAILI, 2007), cádmio (PARK et al., 2007; KUH; KIM, 2000), cromo (CHOJNACKA, 2005, PARK et al., 2007; GHAZY et al., 2008), chumbo (ARUNLERTAREE et al., 2007), arsénio (OKE et al., 2008), entre outros.

Hoje em dia, há um grande interesse em encontrar novas fontes de carbonato de cálcio puro (DAENGPROK; MINE; GARNJANAGOONCHORN, 2000). O carbonato de cálcio obtido a partir de farinha de ossos, não contém a mesma biodisponibilidade de cálcio obtido a partir de fontes sintéticas. O encontrado nas conchas de ostras contém vestígios de chumbo entre os outros elementos tóxicos potenciais, como alumínio, cádmio e mercúrio (SCHAAFSMA, 1997). Por outro lado, a casca do ovo tem a vantagem de não conter elementos tóxicos (MACNEIL, 1997).

O pó do carbonato de cálcio obtido da casca de ovo pode ser utilizado como agente de remoção de metais pesados em meios aquosos e demonstra ser capaz de remover

significativamente o chumbo de solução aquosa, podendo chegar a 72% de eficiência de acordo com o tempo de contato (VIEIRA et al., 2004).

Segundo estudos feitos por Chraïbi e colaboradores (2016), a casca de ovo mostrou-se um adsorvente eficiente na remoção de fenol, sendo ele mais eficaz que outros adsorventes comparados no estudo.

4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1. Material

4.1.1. Cascas de Ovos

As cascas de ovos foram adquiridas na Residência Universitária da Universidade Federal de Campina Grande, Campus de Cuité – PB, com auxílio das cozinheiras que, atendendo a solicitação, recolheram as cascas dos ovos de galinhas que foram consumidos no local.

4.1.2. Trituração e separação

A trituração do material foi realizada com auxílio de grau e pistilo, e a separação utilizando uma peneira com abertura de malha de 1,68 mm.

4.1.3. Secagem

Foram utilizados cadinhos para acondicionamento das amostras, um forno do tipo mufla microprocessado da marca Fornitec®, com capacidade de temperatura de 1200°C; balança digital analítica Marte® modelo AY220; dessecador; recipientes de vidro para armazenamento das amostras.

4.2. Métodos

4.2.1. Coleta das cascas

As coletas foram feitas por quatro semanas e, durante este período cada amostra obtida era previamente submetida a uma secagem natural, quando se mostravam secas, estas eram armazenadas em recipientes plásticos e levadas ao laboratório de Controle de Qualidade do Centro de Educação e Saúde em Cuité-PB.

4.2.2. Trituração e separação

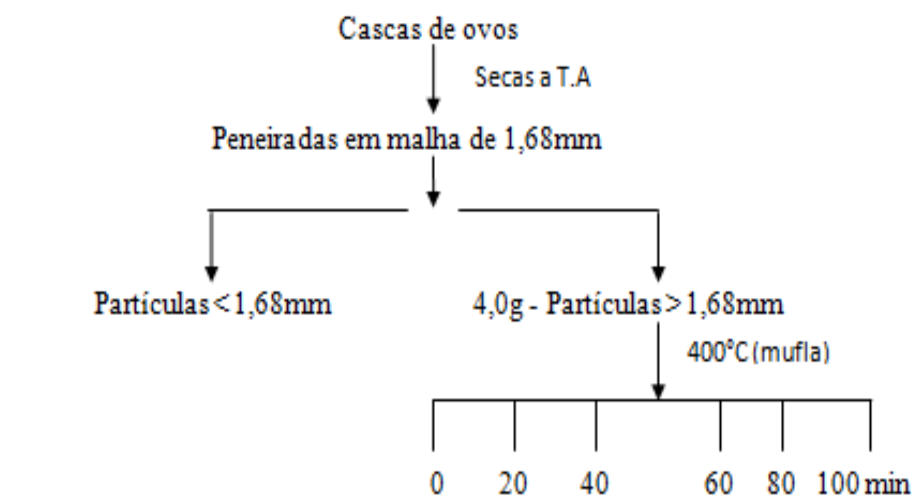
O processo de trituração foi feito utilizando grau e pistilo, as cascas de ovos foram maceradas com a finalidade de que atingissem um tamanho de partícula pequeno. Após esse processo, o material obtido foi peneirado, para que as partículas fossem separadas por tamanho. O que resultou em dois tamanhos de partículas, menores a 1,68mm, correspondendo às amostras que ultrapassaram a malha da peneira e, maiores que 1,68mm representando as que ficaram retidas na malha. Ao fim do processo, as amostras foram acondicionadas em recipientes plásticos, ao abrigo de umidade e luz para posterior utilização.

4.2.3. Cinética de secagem

A partir de dados obtidos em pesquisas anteriores, em que o material de estudo foi tratado pelo processo de secagem, foi observado que os parâmetros que mais influenciaram no processo foram temperatura e o tamanho de partícula.

No estudo, a interação temperatura-massa mostra-se significativa mediante análise estatística, porque ambos os parâmetros influenciam positivamente na secagem, já que quanto maior a massa, maior perda de água irá ocorrer, e quanto maior a temperatura, maior a taxa de secagem (MACEDO, 2016). Com isso, foi traçado um plano de trabalho com enfoque nesses dois parâmetros.

Figura 9: Fluxograma demonstrando a forma de obtenção das amostras.



Fonte: Dados da pesquisa.

Tendo estabelecido as melhores condições para o trabalho, foi determinado que as amostras fossem postas para secar a uma temperatura constante de 400°C e, que estas seriam retiradas a cada 20 minutos, sendo escolhidos 6 tempos: 0, 20, 40, 60, 80 e 100 minutos. Para esse processo foi utilizado como equipamento um forno do tipo mufla microprocessado com capacidade de temperatura de até 1.200°C.

O estudo foi realizado em quadruplicata, em que amostras de 4,0g da partícula com maior tamanho foram separadas com o auxílio de uma espátula e, acondicionadas em cadinhos previamente tarados em uma balança analítica Marte® modelo AY220, previamente zerada. Após a pesagem os cadinhos contendo as amostras eram colocados na mufla, que tinha sua temperatura monitorada a fim de evitar seu superaquecimento que a poderia levar a perda do experimento. Quando retiradas as amostras eram levadas ao dessecador até que atingissem uma temperatura compatível com o ambiente, para em seguida serem pesados novamente e assim fossem feitos os cálculos de comparação entre a massa inicial e final das amostras. Ao fim do processo de pesagem as amostras foram acondicionadas em recipientes de vidro para serem utilizadas na próxima fase do projeto, testando as mesmas no processo de adsorção.

4.2.4. Tratamento dos dados

Após a obtenção das amostras através dos ensaios em quadruplicata, foram feitos cálculos comparando o peso inicial e o peso final destas após a secagem, obtendo assim os dados para o desenvolvimento do processo.

Os modelos matemáticos Page e Henderson & Pabis, descritos na Tabela 1, foram ajustados as curvas experimentais de secagem utilizando-se o programa computacional Origin 7.0. Para se determinar o melhor ajuste de cada equação aos dados experimentais foram utilizados os coeficientes de determinação (R^2).

Quadro 1: Modelos matemáticos utilizados para descrever o processo de cinética de secagem.

MODELO	EQUAÇÃO
Henderson & Pabis	$RX = a.exp(-k.t)$ (1)
Page	$RX = exp(-k.t^n)$ (2)

Em que:

- RX = razão de teor de água do produto, adimensional;
- t = tempo de secagem, em minutos;
- k = coeficiente de secagem, h^{-1} ;
- a, n = constantes dos modelos.

Para o cálculo da razão do teor de água (RX), foi utilizada a equação 5:

$$RX = \frac{X - X_e}{X_i - X_e} \quad \text{Equação 9}$$

Em que:

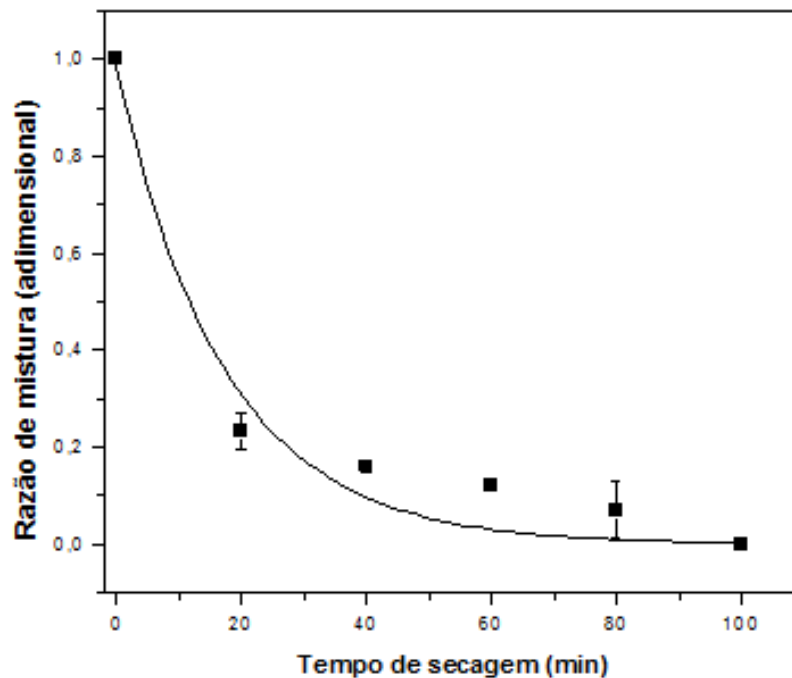
- X = teor de água do produto, decimal b.s.;
- X_i = teor de água inicial do produto, decimal b.s.;
- X_e = teor de água de equilíbrio do produto, decimal b.s.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Estudou-se a cinética de secagem das cascas de ovos de galinha, analisando-se a influência das variáveis operacionais, temperatura e tamanho de partícula, que foram predeterminadas em estudo secagem feitas por Macedo (2016) que, mediante análise estatística comprovou a eficácia destes.

Nas figuras 10 e 11, estão representadas as cinéticas de secagem das cascas de ovos de galinhas, na temperatura de 400°C (temperatura constante) e, nos tempos 0, 20, 40, 60, 80 e 100 minutos, na forma do adimensional de umidade (razão de umidade) em função do tempo.

Figura 10: Curva de cinética de secagem, obtida pelo modelo de Henderson & Pabis, ajustado aos dados da pesquisa.



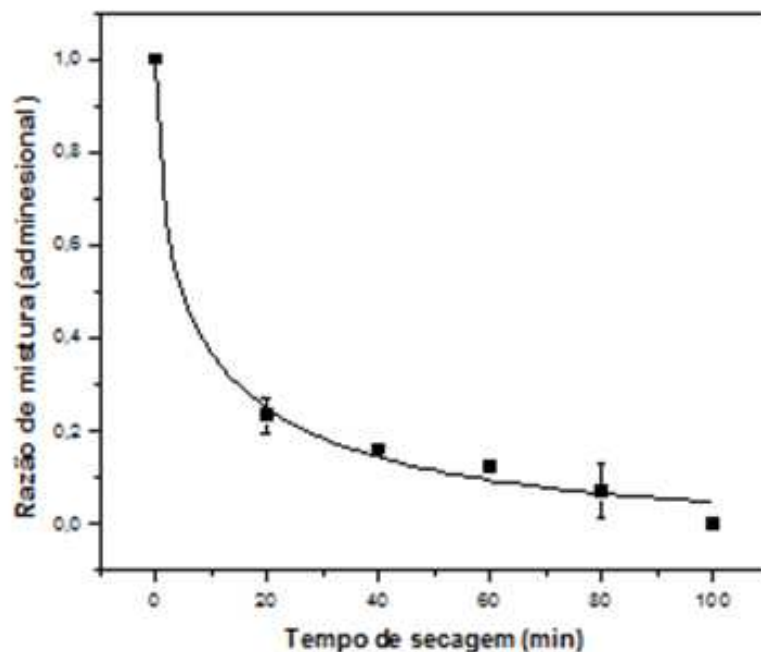
Fonte: Dados obtidos na pesquisa.

Constatou-se nas figuras 10 e 11, que as curvas de secagem foram influenciadas pela temperatura, com a redução gradativa nos tempos sob o efeito da utilização da temperatura constante de 400° C.

Observa-se que a perda de umidade ocorreu rapidamente no início (20 a 40 minutos) e, posteriormente, diminuiu lentamente à medida que se aumentava o tempo de secagem. Esse fenômeno pode estar relacionado com o fato de que, no início do processo há um alto conteúdo de umidade no produto, com a formação de um filme contínuo de água sobre o

sólido, mantendo as condições de saturação na superfície. Já no término da secagem, boa parte do teor de umidade já evaporou e o conteúdo de umidade tem que migrar do interior para a superfície do produto para compensar o que está sendo evaporado. Em um estudo feito por Hofsky (2009), foi encontrada maior taxa de secagem no início do processo de desidratação para abacaxi em fatias, o que corrobora com o presente estudo. Com isso, podemos afirmar que a temperatura foi a variável de maior influência no processo, não descartando a influência do maior tamanho de partícula, comprovando a eficácia do estudo de Macedo (2016), o que pode ser confirmado pelo estudo de Gouveia et al., (2003), que também observaram que a temperatura teve grande influência na cinética de secagem de cajá.

Figura 11: Curva de cinética de secagem, obtida pelo modelo de Page, ajustado aos dados da pesquisa.



Fonte: Dados obtidos na pesquisa.

Sendo assim, o comportamento das amostras durante o processo de secagem a temperatura constante de 400°C pode ser explicado da seguinte forma:

- Nos primeiros tempos de 20 e 40 minutos, a amostra se adapta às condições de secagem e, durante esse período a superfície exposta do material está saturada e a água presente nesta não apresenta resistência para sair.
- Durante o tempo 40 até os 60 minutos, o período de velocidade constante é encerrado e, a umidade nesse ponto é classificada como crítica, isso faz com

que ocorra um aumento da resistência interna da amostra e o movimento do líquido do interior para a superfície seja insuficiente para compensar o que está sendo evaporado.

- Do ponto correspondente aos 60 até os 80 minutos, a quantidade de líquido na superfície da amostra é muito pequena, e esta vai se tornando cada vez mais seca.
- Nos tempos 80 e 100 minutos a umidade da amostra diminui até alcançar o equilíbrio para as condições de temperatura e umidade relativa do ar, quando isso ocorre o processo de secagem é encerrado.

Através das figuras 10 e 11, observa-se apenas uma pequena variação em relação aos modelos estudados, mostrando assim que os dois se adequaram muito bem ao estudo cinético, apresentando um desvio padrão muito pequeno, garantindo uma boa reprodutibilidade do estudo.

Verificou-se um ajuste satisfatório dos modelos de Page e Henderson & Pabis aos dados experimentais de secagem de cascas de ovos de galinhas, apresentando valores para o coeficiente de determinação de, 0,99 e 0,96 respectivamente, o que de acordo com Lomauro et al., (1985) *apud* Derlan et al., (2013), os valores de R^2 devem ser o mais próximo da unidade, indicando assim um bom ajuste. Com isso, constatou-se que o modelo matemático que apresenta melhor concordância com os dados experimentais é o modelo cinético de pseudo primeira-ordem.

Tabela 1: Parâmetros obtidos dos modelos ajustados aos dados de secagem de cascas de ovos de galinhas, na temperatura de 400°C e tempos de 0 a 100 minutos.

MODELOS MATEMÁTICOS	T	PARÂMETROS	
Hendeson e Pabis	400°C	a	k
		0,98631 ± 0,07433	0,05807 ± 0,0104
Page	400°C	k	n
		0,33102 ± 0,12043	0,4798 ± 0,0993

Fonte: Dados obtidos na pesquisa.

Na Tabela 1 têm-se os valores dos parâmetros dos modelos de Henderson e Pabis e Page, ajustados aos dados experimentais da cinética de secagem de cascas de ovos de galinhas.

Em geral o parâmetro “k” representa o efeito das condições externas de secagem, enquanto o “n” reflete a extensão da resistência interna do produto à secagem, para determinadas condições externas (MISRA; BROOKER, 1980). BROOKER et al. (1992) mencionaram que os valores dos coeficientes “k” e “n” variam de acordo com o tipo de produto e a temperatura do ar de secagem.

Observa-se que os valores dos parâmetros k dos dois modelos (Henderson & Pabis e Page) e constante n do modelo de Page diminuíram, mostrando uma baixa resistência tanto interna como externa em relação à temperatura constante de 400°C. E isso vem confirmar que as cascas de ovos de galinha podem ser utilizadas como adsorvente, pois a baixa resistência apresentada vai facilitar a entrada ou aderência do adsorvato na superfície destes, garantindo a eficácia do processo de adsorção a que forem submetidas.

6. CONCLUSÃO

O estudo cinético das cascas de ovos de galinhas para a obtenção de um adsorvente teve seu desenvolvimento concluído com êxito, pois atendeu aos parâmetros preestabelecidos.

Os modelos matemáticos de Page e Henderson & Pabis se ajustaram bem as condições do estudo, apresentando coeficientes de determinação de 0,99 e 0,96 respectivamente. Pode-se perceber também que o tempo de secagem é fortemente influenciado pela temperatura e pelo tamanho de partícula, pois se teve uma perda de umidade maior no início do processo, que foi diminuindo lentamente à medida que se aumentava o tempo de secagem.

Como foi observado nas figuras, nos tempos de 20 a 40 minutos a superfície exposta da amostra está saturada e, a água presente nesta evapora com facilidade. Durante o tempo 40 até os 60 minutos, a umidade é julgada como crítica. Do ponto que corresponde dos 60 até os 80 minutos a amostra se apresenta mais seca. E nos tempos 80 e 100 minutos a umidade da amostra diminui até que encontre o equilíbrio para as condições de temperatura e umidade relativa do ar, fazendo com que o processo de secagem seja encerrado.

O comportamento da umidade das amostras durante o processo de secagem corrobora com estudos realizados anteriormente, mostrando que, quanto maior a massa, maior perda de água irá ocorrer, e quanto maior a temperatura, maior a taxa de secagem.

7. REFERÊNCIAS:

AGRA CEAS Consulting, A.C. - Study on the socio-economic implications of the various systems to keep laying hen - Final Report for the European Commission. Brussels, European Commission, 441p. 2004.

AGUIRRE, J. M.; GASPARINO FILHO, J. Desidratação de Frutas e Hortaliças. Campinas: ITAL: p. 205, 2002.

AHMED, S.; AHSAN, M.; Synthesis of Ca-hydroxyapatite bioceramic from egg shell and its characterization. Bangladesh Journal of Scientific and Industrial Research. V 43, n.4, p. 501-512, 2008.

ALÉM SOBRINHO, P.; FERREIRA FILHO, S. S. Aspectos cinéticos envolvidos no processo de absorção em meios adsorventes fixos utilizados no tratamento de água. In: XIX Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 1997. Foz do Iguaçu. Anais do XIX Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. São Paulo: Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental, 1997.

ALVES, S. B.. Estudo Experimental da Cinética de Secagem do Abacate (*Persea America* Mill.). 103f. Dissertação (Mestrado) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2010.

ARUNLERTAREE, C., KAEWSOMBOON, W., KUMSOPA, A., POKETHITIYOOK, P., PANYAWATHANAKIT, P. Removal of lead from battery manufacturing wastewater by eggshell. Songklanakarin Journal of Science and Technology V.29, n.3, p.857-868, 2007.

AZZOUZ, S.; GUIZANI, A; JOMAA,W.; BELGHITH,A. Moisture diffusivity and drying kinetics equation of convective drying of grapes. Journal of Food Engineering Oxford, v.55, n.4, p. 323-330, 2002.

BAKER, C.G.J. Industrial Drying of Foods, Chapman&Hall, Blakie Academic and Professional, 309 p., 1997

BERBERT, P.A.; QUEIROZ, D.M.; SILVA, J.S.; PINHEIRO FILHO, J.B. Simulation of coffee drying in a fixed bed with periodic airflow reversal. Journal of Agricultural Engineering Research, v.60, n.3, p.167-173, 1995.

BLANCO, M. M. F. S. Remoção de Fenol em Solução Aquosa com Carvão Mineral. 80 f. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Engenharia Química e Engenharia de Alimentos, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2001.

BONIOLO, M. R. Biossorção de urânio nas cascas de banana. 122f. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Autarquia Associada à Universidade de São Paulo, 2008.

BORBA, C. E. Modelagem da remoção de metais pesados em coluna de adsorção de leito fixo. 145 f. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2006.

BORON, L. Citrato de cálcio da casca do ovo: biodisponibilidade e uso como suplemento alimentar. Dissertação (Mestrado) - Departamento de Ciência e Tecnologia de Alimentos, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004.

BORTOLAIA L. A. Modelagem matemática e simulação do processo de secagem artificial de grãos de soja em secadores de fluxo contínuo. 148 f. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

BROOKER, D.B.; BAKKER-ARKEMA, F.W.; HALL, C.W. Drying and storage of grains and oilseeds. Westport: The AVI Publishing Company, 450 p. 1992.

BROSTOW, W.; CASTANO, VM; DAZ-ESTRADA, JR; HERNANDEZ, R.; RODRIGUEZ, JR; RIVERA, EM; ARAIZA, M. Synthesis of hydroxyapatite from eggshells. Materials Letters, V.41, n.3, p.128-134. 1999.

BULUT, Y.; AYDIN, H. A kinetics and thermodynamics study of methylene blue adsorption on wheat shells. Desalination, v. 194, p. 259-267, 2006.

CARVALHO, N.M. A secagem de sementes. Jaboticabal : FUNEP, 165p. 1994.

CARVALHO, N. M.; NAKAGAWA, J. Sementes – Ciência, tecnologia e produção. 4. ed. rev. e ampl., Jaboticabal: Funep, 588. 2000.

CARDOSO, N. F. Remoção do corante azul de metileno de efluentes aquosos utilizando casca de pinhão in natura e carbonizada como adsorvente. 42 f. Tese (Doutorado) - Curso de Química, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

CELESTINO, Sonia Maria Costa. Princípios de Secagem de Alimentos. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 51 p. – (Documentos/Embrapa Cerrados), 2010.

CHOJNACKA, K. Biosorption of Cr (III) ions by eggshells. Journal of Hazardous Materials 121, 167–173, 2005.

CHRAIBI, S.; MOUSSOUT, H; BOUKHLIFI, F; AHLAFI, H; ALAMI, M. Utilization of calcined eggshell waste as an adsorbent for the removal of phenol from aqueous solution. Journal of Encapsulation and Adsorptions Sciences, Vol. 6, n 4, 2016.

DAENGPROK, W.; MINE, Y.; GARNJANAGOONCHORN W. Fermented pork sausage fortified with commercial or hen eggshell calcium lactate. Meat Sci., v. 62, n. 2, p. 199-204, 2000.

DANTAS, S. C. M. Desidratação de polpas de frutas pelo método *foam-mat*. 2010, 100f. Dissertação (Mestrado), Programa de Pós-graduação em Engenharia Química. Natal-RN, 2010.

DAUD, Wan Ramli Wan. Drum Dryers. In: MUJUMDAR, Arun S.. Handbook of Industrial Drying. 3 rd. Singapore: CRC/Taylor and Francis Group, p. 229-240. 2006.

DERLAN, J. M.; SILVA, F. S.; PORTO, A. G.; LEITE, A. L. M. P.; PASTRO, D. C. Análise da cinética de secagem de pimenta Cambuci em diferentes temperaturas e formas de processamento. R. Encicl. Biosf., v.9, n.17, p. 97-107, 2013.

DUPOIRIEUX, L.; Ostrich eggshell as a bone substitute: a preliminary report of its biological behavior in animals – a possibility in facial reconstructive surgery. British Journal of Oral and Maxillofacial Surgery. n.37, p.467–471, 1999.

DRYINGMACHINESCHINA.COM. Máquina de secagem de leite fluidizado. Disponível em: <http://dryingmachineschina.com.pt/1-13-fluidized-bed-drying-machine.html>. Acesso em: 24 out. 2016.

ELKADY, M. F., IBRAHIM, A. M., ABD EL-LATIF, M. M. Assessment of the adsorption kinetics, equilibrium and thermodynamic for the potential removal of reactive red dye using eggshell biocomposite beads. Desalination 278, 412-423, 2011.

FARIA, Rute Q. de et al. Cinética de secagem de sementes de crumbe. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, Campina Grande, v. 16, n. 5, p.573-583, 23 fev. 2012.

FARIAS, R. P. de. Simulação da secagem de produtos biológicos e secador de fluxos cruzados. 2003. 69 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande-PB, 2003.

FOUST, Alan S. et al. Princípios das Operações Unitárias. 2ªed. Tradução por Horácio Macedo, Rio de Janeiro, LTC, 1982.

FRANÇA NETO, J. B.; KRZYZANOWSKI, F. C.; HENNING, A. A.; PÁDUA, G. P. Tecnologia da produção de semente de soja de alta qualidade. Londrina, PR: v.20, n.3, p.26-32, Informativo Abrates: 2010.

FRANCO, D.F.; PETRINI, J. Secagem do Arroz. Pelotas: Embrapa Clima Temperado. dez. 2006. 4p. (Embrapa Clima Temperado Comunicado Técnico, 145), 2006.

GARCIA, D. G.; BARROS, A. C. S. A.; PESKE, S. T.; MENEZES, N. L. Secagem de sementes. Ciência Rural, Santa Maria, v.34, n.2, p.603-608, abr. 2004.

GHAZY, S.E., EL-ASMY, A.A.; EL-NOKRASHY, A.M. Separation of chromium (III) and chromium (VI) from environmental water samples using eggshell sorbent. Indian Journal of Science and Technology. V.1, n.6, p.1-7. 2008.

GOUVEIA, J.P.G. de.; ALMEIDA, F. de A.C.; FARIAS, E. da S.; SILVA, M.M. da.; CHAVES, M. da C.V.; REIS, L.S. Determinação das curvas de secagem em frutos de cajá. Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais, V. Especial, n.1, p.65-68, 2003.

GRANFINALE.COM. Silo secador. Disponível em: <http://www.granfinale.com.br/silo-secador/silo-secador-granfinale.html>. Acesso em: 24 out. 2016.

GUIMARÃES, Pâmela Virgínia Ramos. Secagem de Café: Uma revisão. 45f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Alimentos). Instituto de Ciência e Tecnologia de Alimentos, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

HINCKE, M.T. et al. Eggshell proteins and shell strength: molecular biology of eggshell matrix proteins and industry applications. In: SIM; NAKAI; GUENTER (Eds). Egg Nutrition and Biotechnology. CABI Publishing, Wallingford, 495p. UK, 2000.

HOFISKY, V. A. Cinética de secagem de abacaxi cv pérola em fatias. Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais. v.11, n.2, p.123-128, 2009.

KUH, S.E; KIM, D.S. Removal characteristics of cadmium ion by waste egg shell. Environmental Technology 21, 883-890, 2000.

LANA, G. Q.. Avicultura. Ed. Rural Ltda., p. 173-182. 2000.

LIMA, L. M. O. Estudo do Aproveitamento de bagaço de frutas tropicais, visando a extração de fibras. 108 f. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2001.

LIMA NETO, Hermínio Jácome de. Obtenção de tomate seco através do uso de um sistema solar alternativo de baixo custo. 78 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2008.

LORENZI, H.; MATOS, F. J. A. Plantas medicinais no Brasil: nativas e exóticas. Nova Odessa: Plantarum, 2002.

LUIZ, Marcia Ramos. Estudo Teórico e Experimental de Secagem de Tomate (*Lycopersicon esculentum*). 160 f, Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2012.

LUFT, N. et al. Efeito do cálcio da casca de ovo na mineralização óssea em ratos. In: CONGRESSO NACIONAL DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE ALIMENTAÇÃO E NUTRIÇÃO, São Paulo. Anais... São Paulo: Sociedade Brasileira de Alimentação e Nutrição, p. 328, 2005.

MACEDO, Francielly Ramos de. Estudo da otimização da secagem de casca de ovo: desenvolvimento de um adsorvente. 38 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Farmácia) - Universidade Federal de Campina Grande, Cuité, 2016.

MACNEIL, J. Composition of egg shell. Egg industry, v. 102, p. 15-17, 1997.

MANUTENÇÃO E SUPRIMENTOS. Uso de secador de esteira. 03/09/2012. Disponível em: <<http://www.manutencaoesuprimentos.com.br/conteudo/7098-uso-de-secador-de-esteira/>>. Acesso em: 24 out 2016.

MARCINKOWSKI, Emmanuelle de Almeida. Estudo da cinética de secagem, curvas de sorção e predição de propriedades termodinâmicas da proteína texturizada de soja. 2006. 128 f. Dissertação (Mestrado) - Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.

MARTINAZZO, A. P.; CORRÊA, P. C.; RESENDE, O.; MELO, E. C. Análise e descrição matemática da cinética de secagem de folhas de capim-limão. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 11, n. 3, p. 301–306, 2007.

MASEL, R. I. *Principles of Adsorption and Reaction on solid Surfaces*. New York: John Wiley & Sons, 804 p. 1996.

MECÂNICA INDUSTRIAL. O que é um secador de tambor. Disponível em: <<https://www.mecanicaindustrial.com.br/736-o-que-e-um-secador-de-tambor/>>. Acesso em: 24 out. 2016.

MEZENNER, N.Y. and BENSMAILI, A. - Kinetics and thermodynamic study of phosphate adsorption on iron hydroxide-eggshell waste. *Chemical Engineering Journal*, 147, 2-3: 87-96, 2009.

MIDILLI, A.; KUCUK, H.; YAPAR, Z. A. New model for single-layer drying. *Drying Technology*, v.20, n.7, p.1503–1513, 2002.

MISRA, M.K.; BROOKER, D.B. Thinlayer drying and rewetting equations for shelled yellow corn. *Transaction of the ASAE*, St. Joseph, Michigan, v.12, n.8, p.1254-1260, 1980.

MÖHLER, Bruno Cardoso. Avaliação das características de secagem dos grãos de Soja. 43 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

MURAKAMI, F. S.. Estudo termoanalítico entre carbonato de cálcio industrial e carbonato de cálcio obtido da casca do ovo. V Congresso Brasileiro de Análise Térmica e Calorimetria – V CBRATEC, 2006.

NEVES, M. A. Alternativas para valorização da casca de ovo como complemento alimentar e em implantes ósseos. 86 f. Dissertação (Mestrado) - Departamento de Ciência e Tecnologia de Alimentos, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1998.

OKE, I.A., OLARINOYE, N.O. AND ADEWUSI, S.R.A. Adsorption kinetics for arsenic removal from aqueous solutions by untreated powdered eggshell. *Adsorption* 14, 73–8, 2008.

OLIVEIRA, R. A.; OLIVEIRA, W. P.; PARK, K. J. Determinação da difusividade efetiva de raiz de chicória. *Engenharia Agrícola*, Jaboticabal v. 26, n. 1, p. Jan./Abr. 2006.

OLIVEIRA, D.A.; BENELLI, P.; AMANTE, E.R.. Valorização dos resíduos sólidos: casca de ovos como matéria-prima no desenvolvimento de novos produtos. 2nd Internacional Workshop Advances in Cleaner Production, São Paulo, 2009.

OLIVEIRA, D.A. et al. A literature review on adding value to solid residues: egg shells. *Journal of Cleaner Production*, v.46, p.42-47, 2013.

ORNELLAS, L. H. *Técnica Dietética*. 4^a edição. São Paulo: Atheneu, p.107-114, 1985.

PAN, Y.K.; LI, Z.Y.; MUJUMDAR, A.S.; KUDRA, T. Drying of a root crop in vibro fluidized beds. *Drying Technology*, v.15, n. 1, p.215-223, 1997.

- PANCHARIYA, P. C.; POPOVIC, D.; SHARMA, A. L. Thin-layer modeling of black tea drying process. *Journal of Food Engineering*, v.52, n.4, p.349–357, 2002.
- PARK, H. J.; JEONG, S. W.; YANG, J. K.; KIM, B. G. E LEE, S.M. (2007) - Removal of heavy metals using waste eggshell. *Journal of Environmental Sciences*, 19, 12: 1436-1441, 2007.
- PARK, K. J. B.; PARK, K. J.; ALONSO, L. F. T.; CORNEJO, F. E. P.; FABBRO, I. M. D. Secagem: Fundamentos e equações. *Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais*, Campina Grande, v.16, n.1, p.93-127, 2014.
- PEREDA-ORDOÑEZ, J. A.; RODRIGUES, M. I. C.; ÁLVAREZ, L. F.; SANZ, M. L. G.; MINGIILLÓN, G. D. G. F.; PERALES, L. H.; CORTECERO, M. D. S. 89 Componentes dos alimentos e processos. *Tecnologia de alimentos*. Porto Alegre - RS: editora Artmed, 2005.
- PORTUGUESE.FABRICDYEINGMACHINE.Secador tubular,máquina de secagem tubular. Disponível em: <<http://portuguese.fabricdyeingmachine.com/sale-3057625-tubular-dryer-tubular-scouring-and-bleaching-drying-machine-1600mm.html>>. Acesso em: 24 out. 2016.
- PRAMANPOL, N; NITAYAPAT, N. Adsorption of reactive dye by eggshell and its membrane. *Kasetsart Journal (Natural Science)* 40, 192-197, 2006.
- PUHL, Janice; NITZKE, Julio Alberto. Secagem de vegetais. Disponível em: <http://www.ufrgs.br/alimentus1/objetos/veg_desidratados/secagem_ar.html>. Acesso em: 24 out. 2016.
- RIVERA, E. M.; ARAIZA, M.; BROSTOW, W.; CASTAÑO, V. M.; DÍAZ-ESTRADA, J.R.; HERNÁNDEZ, R.; RODRÍGUEZ, J. R.; Synthesis of hydroxyapatite from eggshells. *Materials Letters*. n. 41, p. 128-134, 1999.
- RUTHVEN, D. M. Zeolites as selective adsorbents - synthetic zeolites are used widely as selective adsorbents in a range of large scale separation processes chemical. *Engineering Progress*, p.42-50, 1988.
- SALLEH, M. A. M.; MAHMOUD, D. K.; KARIM, W. A.; IDRIS, A. Cationic and anionic dye adsorption by agricultural solid wastes: A comprehensive review. *Desalination*, v. 280, n. 1-3, p. 1-13, 2011.
- SCHAAFSMA, G. Bioavailability of calcium and magnesium. *Eur. J. Clin. Nutr.*, v. 51, p. S13-S16, 1997.
- SILVA, S. S. J.; AFONSO, A. D. L.; DONZELLES, S. M. L.; NOGUEIRA, R. M. Secagem e Secadores. In: SILVA, J. S. Secagem e armazenagem de produtos agrícolas. 2. ed. Viçosa: Aprenda Fácil, p.109-146, 2008.
- SILVA, R. C. O.; OLIVEIRA, ROCHA, R. D.C. Utilização de casca de jaboticaba (*Plinia sp.*) como adsorventes na remoção de cromo (VI): Planejamento fatorial, cinética e estudo de equilíbrio. *TECNO-LÓGICA*, v. 16, n. 1; p. 19-24, 2012.

SOUSA, I. A. et al. Biodisponibilidade do cálcio da casca de ovo em rações à base de caseína e da mistura arroz-feijão. In: CONGRESSO NACIONAL DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE ALIMENTAÇÃO E NUTRIÇÃO, Florianópolis. Anais... Florianópolis, 2001.

STADELMAN, W.J. - Eggs and egg products. In: Francis, F.J. (Ed.) -Encyclopedia of Food Science and Technology. New York, John Wiley & Sons, p. 593–599. 2000.

THAPON, J. L. AND BOURGEOIS C. M. L'oeuf et les ovoproduits. *Lavoisier -Technique et Documentation*, Paris. 1994.

TOWLER, G.; SINNOTT, R. Chemical Engineering Design: Principles, Practice and Economics of Plant and Process Design. Burlington: Butterworth-Heinemann, 1245p. 2008.

TSAI, W.T.; HSIEN, K.J.; HSU, H.C.; LIN, C.M.; LIN, K.Y. e CHIU, C.-H. - Utilization of ground eggshell waste as an adsorbent for the removal of dyes from aqueous solution. *Bioresource Technology*, V.99, n.6, p.1623-1629. 2008.

USDA. UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE. Egg-Grading Manual. Washington. n.75, 2000.

VIEIRA, C. A.; FARIA, W. A.; ALVES, R. S.; SILVA, V. V., BARBIERI, R. S., Extração de metais pesados com casca de ovo. III Encontro de Pós-Graduação da UNINCOR, 2004.

VILELA, C. A. A.; ARTUR, P. O. Secagem do açafrão (*Curcuma longa* L.) em diferentes cortes geométricos. *Ciência e Tecnologia de Alimentos*, v.28, p.387-394, 2008.

YEDDOU, N., BENSMALI, A. Equilibrium and kinetic modelling of iron adsorption by eggshells in a batch system: effect of temperature. *Desalination* 206, 127- 134, 2007.