



Avaliação das Características de Secagem dos Grãos de

Soja

Bruno Cardozo Möhler

Orientadora: Profa Dra. Aline Schilling Cassini

Porto Alegre

2010

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA
TRABALHO DE CONCLUSÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA

Avaliação das Características de Secagem dos Grãos de Soja

Bruno Cardozo Möhler

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito
parcial para obtenção do grau de Engenheiro Químico.

Orientadora: Profa Dra. Aline Schilling Cassini

Porto Alegre, Dezembro de 2010

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais e irmã, por todo o amor e dedicação incondicional que me

forneceram ao longo desta jornada;

Aos meus amigos pelo apoio dado em momentos difíceis;

A UFRGS pelo ensino de qualidade fornecido neste período;

A minha orientadora, Profa Dra. Aline Schilling Cassini pela paciência e auxílio na

realização do trabalho;

E a todos que de certa forma contribuíram para a realização de mais um objetivo.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	v
LISTA DE TABELAS	vi
RESUMO	vii
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA E CONCEITOS FUNDAMENTAIS.....	3
2.1. Histórico e composição	3
2.2. Problemática de armazenamento.....	4
2.2.1. Teor de umidade	5
2.2.2. Atividade de água.....	5
2.3. Secagem	6
2.4. Curva de secagem	8
2.5. Equações da cinética de secagem	11
2.6. Mecanismos de transporte de umidade no interior de sólidos	12
2.7. Importância dos parâmetros de processo	13
2.8. Equipamentos.....	14
2.9. Produção de proteína isolada de soja	17
3. MATERIAIS E MÉTODOS	18
3.1. Equipamento de secagem	18
3.2. Material	19
3.3. Procedimento experimental.....	20
3.3.1. Obtenção das curvas de secagem	20
3.3.2. Análise de umidade	21
3.3.3. Ajuste dos dados experimentais	21
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	23

4.1.	Curvas de secagem	23
4.2.	Umidade do grão	24
4.3.	Ajuste dos dados experimentais	26
4.3.1.	Equação de Lewis	26
4.3.2.	Equação de Brooker	27
4.3.3.	Equação de Henderson e Henderson	28
4.3.4.	Equação de Page	29
4.4.	Dificuldades e possíveis erros experimentais	31
5.	CONCLUSÕES.....	32
	Referências bibliográficas	33
	Anexo 1	35
	Fluxograma de obtenção da Proteína Isolada de Soja.....	35

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Composição do grão de soja. Fonte: KAWAGA, 1995.....	3
Figura 2: Esquema da transferência de calor e massa.....	7
Figura 3: Curva da cinética de secagem.	9
Figura 4: Curva de secagem	9
Figura 5: Principais tipos de secadores aplicados à secagem de grãos.	14
Figura 6: Processo de secagem dos grãos de soja	18
Figura 7: Secador piloto	18
Figura 8: Gráfico de umidade adimensional x tempo.....	23
Figura 9: Gráfico de umidade adimensional x tempo	24
Figura 10: Gráfico de massa de água removida (g) x tempo.	25
Figura 11: Gráfico de Pareto.	26
Figura 12: Gráfico do ajuste do modelo de Brooker	28
Figura 13: Gráfico de Pareto para a constante “k” do modelo de Page.	30
Figura 14: Gráfico de Pareto para a constante “d” do modelo de Page.	30

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Relação entre temperatura e taxa de respiração para grão.....	4
Tabela 2: Modelos teóricos de secagem.....	11
Tabela 3: Experimentos realizados.....	21
Tabela 4: Quantificação da umidade do grão após secagem.....	25
Tabela 5: Resultado do ajuste dos dados experimentais ao modelo de Lewis.....	27
Tabela 6: Resultado do ajuste dos dados experimentais ao modelo de Brooker.....	27
Tabela 7: Resultado do ajuste ao modelo de Henderson e Henderson.....	28
Tabela 8: Resultado do ajuste dos dados experimentais ao modelo de Page.....	29
Tabela 9: Comparação entre os resultados dos ajustes aos modelos.....	29

RESUMO

A soja possui alto valor nutricional agregando um alto teor protéico, que é de grande interesse para a indústria de alimentos. O grão pode ser usado tanto para alimentação de animais como para alimentação de humanos. Porém, sua composição química é extremamente complexa e varia de acordo com o tipo genético, solo de cultivo, clima da região, entre outros. Porém, esta, precisa ser tratada antes de ser consumida, devido à existência de fatores antinutricionais em sua composição. A aplicação de calor é fundamental para a inativação destes fatores que, além disso, é de extrema importância também no processo de estocagem da soja, pois a umidade contida no grão colabora para o aparecimento de fungos e insetos e acelerara a taxa de respiração do grão, principal fator de perda de massa durante a estocagem. A diminuição da umidade dos grãos de soja é obtida a partir da secagem destes grãos antes da estocagem dos mesmos. Este tratamento térmico, entretanto, não pode ser demasiado severo em termos de tempo e/ou temperatura, pois, assim como os fatores negativos, os nutrientes da soja também podem ser destruídos com a aplicação de calor. O objetivo deste trabalho é, portanto, levantar as curvas de secagem dos grãos de soja, submetidos à secagem primária, e comparar diferentes condições de temperatura e velocidade do ar de secagem no teor final de umidade atingido pelo grão. O ajuste dos dados experimentais obtidos a modelos clássicos disponíveis na literatura é também avaliado no decorrer do trabalho. Para as curvas de secagem, constatou-se que a variação da velocidade do ar de secagem pouco influencia na cinética de secagem, entretanto, a temperatura é um fator que provoca grande influência na retirada de umidade dos grãos de soja. Os resultados experimentais das curvas teóricas foram ajustadas de forma eficiente para os modelos estudados no intervalo de valores de temperatura e velocidade do ar utilizados experimentalmente, mostrando que qualquer um dos modelos testados poderia ser utilizado para prever o comportamento das curvas de secagem dos grãos de soja nas condições estudadas.

1. INTRODUÇÃO

A soja foi descoberta há cerca de 5 mil anos no nordeste da China. Após a domesticação da cultura, a soja se espalhou de forma lenta para o sul da Ásia e somente no final do século XV e início do século XVI que chegou à Europa.

Em um primeiro momento, a soja serviu apenas de enfeite nos jardins de países da Europa e, então, no século XVIII, pesquisadores europeus aprofundaram estudos reconhecendo a soja como uma leguminosa de potencial para extração de óleo e nutriente animal, levando, mais tarde, a um destaque efetivamente internacional, sendo cultivada comercialmente nos Estados Unidos.

No Brasil, a soja foi cultivada pela primeira vez na Estação Agropecuária de Campinas, em 1901, e foi introduzida oficialmente no Rio Grande do Sul em 1914. Porém, a expansão da soja no Brasil aconteceu apenas nos anos 70, com o interesse crescente da indústria de óleo e a demanda do mercado internacional.

Atualmente, os Estados Unidos, o Brasil, a Argentina, a China e a Índia são os maiores produtores de soja do mundo e, nos últimos anos, as exportações e importações da soja continuam aumentando; o aumento na produção mundial de grãos de soja foi da ordem de 16% nos últimos cinco anos. O Brasil mantém-se na segunda posição como maior produtor e exportador de soja do mundo. Neste período, enquanto a produção brasileira de soja em grãos aumentou 17,5%, a exportação aumentou 31,5%. (Desenbahia, 2010).

A soja, apesar de ser um vegetal, possui alto valor nutricional agregado a um alto teor protéico, que é de grande interesse para a indústria de alimentos. O grão pode ser usado, tanto para alimentação de animais, como para alimentação de humanos. Porém, sua composição química é extremamente complexa e varia de acordo com o tipo genético, solo de cultivo, clima da região, entre outros.

A soja é largamente utilizada para extração de óleo vegetal e, atualmente vem sendo muito utilizada para produção de proteína isolada de soja (PIS), devido sua composição ser em média de 40% de proteína, 35% de carboidratos, 20% de óleo e 5% de cinzas, quantidade de proteína bastante elevada quando comparada com outros grãos.

Entretanto, esta fonte de proteínas utilizada tanto para alimentação de animais quanto para humanos, precisa ser tratada antes de ser consumida, devido à existência de fatores antinutricionais em sua composição. Esses fatores prejudicam o aproveitamento dos nutrientes, podendo, em alguns casos, ser até causadores de doenças. Como característica,

os fatores antinutricionais presentes na soja são termossensíveis, ou seja, podem ser inativados pela aplicação de calor. O calor, por sua vez, é fundamental no processo de estocagem da soja, pois a umidade contida no grão colabora para o aparecimento de fungos e insetos além de acelerar a taxa de respiração do grão, principal fator de perda de massa durante a estocagem. A diminuição da umidade dos grãos de soja é obtida a partir da secagem destes grãos antes da estocagem dos mesmos. Este tratamento térmico, entretanto, não pode ser demasiado severo em termos de tempo e/ou temperatura, pois, assim como os fatores negativos, os nutrientes da soja também podem ser destruídos com a aplicação de calor, sem falar no fator econômico de gastos de operação que menor serão quanto menor o tempo e mais baixa a temperatura utilizada no processo de secagem.

Segundo BERN *et al.* (2008), não há muitos estudos relacionados à secagem dos grãos de soja. A maioria das recomendações de secagem encontradas na literatura baseia-se em dados limitados ou extrapolações feitas a partir de estudos relacionados à secagem de grãos de milho.

Dentro deste contexto, uma avaliação criteriosa deve ser feita a respeito das melhores condições de secagem dos grãos de soja visando à produção de PIS, ou seja, visando à manutenção do maior percentual protéico possível nos grãos. O objetivo deste trabalho é, portanto, levantar as curvas de secagem dos grãos de soja, submetidos à secagem primária, e comparar diferentes condições de temperatura e velocidade do ar de secagem no teor final de umidade atingido pelo grão. O ajuste dos dados experimentais obtidos a modelos clássicos disponíveis na literatura é também avaliado no decorrer do trabalho.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA E CONCEITOS FUNDAMENTAIS

2.1. Histórico e composição

A conservação dos alimentos sempre foi algo de extrema importância para o homem, principalmente a partir do momento na qual este deixou de ser nômade; passou a criar animais e a plantar. Junto com esta mudança na forma de obter o sustento, alterou os hábitos alimentares da população, que passou a contar com um excedente de produção que poderia ser consumido nos períodos de escassez. Porém, de nada adiantaria este excedente se não fosse possível conservá-lo. Os métodos de conservação passaram dos mais rudimentares, como envolver os alimentos na gordura, azeite, vinagre e salgar, até métodos mais sofisticados como a aplicação de frio e calor. Estes com o objetivo de inibir, retardar ou acabar com o desenvolvimento microbiano e enzimático.

Com o passar do tempo, estudos provaram que estes fatores de degradação estão intrinsecamente ligados ao teor de água existente no alimento. Esta água pode ser a umidade do produto (água total da amostra – facilmente medida em laboratório), ou a água presente de outra forma, chamada de atividade de água (conceito mais apurado que indica a quantidade de água disponível para reações de degradação do alimento).

Em relação ao grão de soja, a umidade de colheita é de cerca de 16 a 18% sendo que a umidade ideal para o armazenamento está entre 9 e 12% (ideal para períodos de 1 a 5 anos). Valores inferiores a estes acarretam um importante problema: o desprendimento da casca do grão e a conseqüente quebra do mesmo, formando o chamado meio grão, que promove um aumento da área de ataque do oxigênio e de microorganismos, favorecendo a taxa de respiração e a perda de proteína. O outro extremo também é problemático, pois a umidade inicial existente favorece as reações enzimáticas e a proliferação de fungos, degradando o grão de forma acelerada.

Na Figura 1 pode-se observar a composição média dos grãos de soja. É importante ressaltar o significativo valor de 38% de proteína contida no grão, 30% para carboidratos, 18% para óleo e 14% de umidade e cinzas.

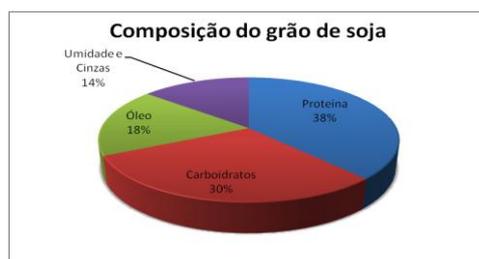


Figura 1: Composição do grão de soja. Fonte: KAWAGA, 1995.

2.2. Problemática de armazenamento

O grão de soja mesmo durante o armazenamento continua a respirar. Devido a este processo oxidativo, as sementes estão sujeitas a transformações contínuas. Em contato com o oxigênio, a matéria orgânica é transformada em CO₂, e H₂O, liberando energia na forma de calor. A combustão completa da glicose produz:



A respiração do grão é acompanhada do consumo da matéria do mesmo e da conseqüente perda de nutrientes do produto; além disso, ocorre a geração de CO₂. É através da determinação da concentração de CO₂ que muitos parâmetros podem ser avaliados na conservação de grãos.

Para se obter sucesso no armazenamento, o grão e a atmosfera presentes devem ser mantidos sob condições que inibam ou previnam o crescimento de microrganismos e insetos que causam deterioração.

Um fator que gera uma mudança significativa nos grãos durante a armazenagem é a temperatura. Assim como a umidade, ela é considerada um fator de elevada importância por promover a deterioração acelerada do grão. A oxidação da glicose, fruto do processo de respiração, é um processo exotérmico e libera calor que aquece o ambiente de armazenamento, acelerando, por sua vez, o processo de respiração com o aumento de temperatura. De acordo com a Tabela 1, a seguir, é possível verificar que a temperaturas acima de 40°C ocorre uma diminuição drástica na taxa de respiração devido à inativação de enzimas.

Tabela 1: Relação entre temperatura e taxa de respiração para grão.

Relação da temperatura com a taxa de respiração	
Temperatura (°C)	Respiração (mg CO ₂ /24h)
25°C	33,6
30°C	39,7
35°C	71,8
40°C	154,7
45°C	13,1

Fonte: D'ARCE 2010.

2.2.1. Teor de umidade

Visto que a umidade contida nas sementes é de vital importância para o armazenamento dos grãos, o teor de umidade de um sólido é definido a seguir.

O teor de umidade dos produtos pode ser expresso tanto em base úmida como em base seca. O teor de umidade em base úmida é a relação entre a massa de água e a massa total de produto, como mostra a Equação 1.

$$U_{bu} = m_{H_2O} / m_t \quad (1)$$

onde,

U_{bu} é o teor de umidade em base úmida, %;

m_{H_2O} é a massa de água contida no produto, kg;

m_t é a massa total do produto, ou seja, massa de produto seco mais massa de água, kg.

O teor de umidade em base seca é a relação entre a massa de água contida no produto e a massa de matéria seca (Equação 2).

$$U_{bs} = m_{H_2O} / m_{ms} \quad (2)$$

U_{bs} é o teor de umidade em base seca, decimal;

m_{H_2O} é a massa de água contida no produto, kg;

m_{ms} é a massa de matéria seca, kg.

Segundo Harrington (1972), o alto teor de umidade das sementes é o mais significativo causador da perda de matéria-prima, pois proporciona altas taxas de respiração e promove o aparecimento de fungos e bactérias.

2.2.2. Atividade de água

Como visto anteriormente, a umidade é um dos principais fatores que afetam o armazenamento; entretanto, nem toda a umidade do grão colabora para sua deterioração. A água existente nas sementes pode ser dividida em duas formas através de um outro conceito, a atividade de água.

A atividade de água (A_w) faz referência ao quão disponível esta água está no alimento, ou seja, é a força com que a água se liga a diferentes componentes da substância, podendo encontrar-se livre, permitindo o crescimento dos microorganismos e reações químicas, ou estar ligada, mais difícil de ser eliminada e que não é utilizada como solvente não estando relacionada ao desenvolvimento de microorganismos.

Segundo ORDOÑEZ (2005), a água ligada interage de maneira diferente na matéria, pois, não atua como solvente e “não” atua como reagente. O crescimento e a atividade metabólica dos microorganismos exige a existência de água disponível e a medida mais comum utilizada para expressar este nível de água livre, denomina-se Índice de Atividade de Água, A_w , medida esta que está intimamente ligada ao conceito de estabilidade do alimento. A atividade de água é determinada pela Equação 3:

$$A_w = P/P^0 \quad (3)$$

e define-se como a relação existente entre a pressão de vapor (P) de uma solução ou de um material (é específico para alimento) com relação à pressão de vapor da água pura (P^0) à mesma temperatura. Portanto, a água presente no material exerce uma pressão que depende da quantidade de água, da concentração de solutos na água e da temperatura. Matematicamente falando, a atividade de água é sempre inferior a um, pois uma solução sofre abaixamento da pressão de vapor (propriedades coligativas) e esta somente atingirá o valor de um quando for apenas água.

Com o intuito de minimizar esta água excedente, o homem desenvolveu métodos que promovessem tal efeito gerando condições desfavoráveis ao desenvolvimento de microorganismos no produto e pela quase total eliminação de suas atividades metabólicas; e hoje o método industrial mais aplicado é o processo de secagem.

2.3. Secagem

Dentre os processos de preservação aplicados a alimentos, a secagem possui a vantagem de ser um método de baixo custo e de simples operação, quando comparada com a refrigeração, irradiação, tratamentos químicos, entre outros (ROSSI e ROA, 1980).

O processo de secagem objetiva a retirada parcial da água da substância, por meio de dois processos que ocorrem simultaneamente: a transferência de calor do ar para o

material e a transferência de massa (água) do material para o ar (FOUST *et al.*, 1982). O processo de secagem necessita de gradientes que sirvam de força motriz para ocorrer fluxo da massa de água para o ar de secagem. O vapor de água é retirado do material através de um fluxo originado pela diferença de pressão parcial de vapor; assim, o aumento de temperatura da superfície provoca um aumento da pressão de vapor, contribuindo para o fluxo de vapor o que provoca a redução da umidade do material (VILLELA, 1991). Este processo demanda gasto de energia térmica para a evaporação da água e esta, ao evaporar, esfria o ar de secagem pela perda de calor sensível e o ar recupera, na forma de vapor de água (calor latente). A Figura 2 mostra de forma simplificada o processo de secagem, na qual o ar quente com baixa umidade relativa chega até a superfície do material, onde uma parcela de umidade é retirada e levada junto com este ar de secagem por fim carregado de vapor de água.

A Figura 2 ilustra o processo de secagem.

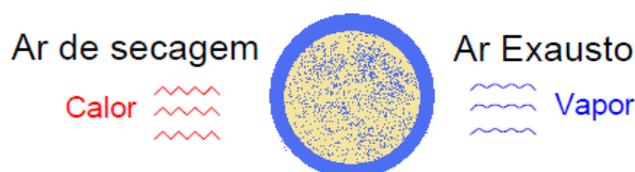


Figura 2: Esquema da transferência de calor e massa.

De forma simples, podemos distinguir dois tipos de secagem: natural e artificial.

A secagem natural faz proveito das energias solar e eólica para reduzir a umidade da matéria. O material que está sendo seco a partir deste método quase não sofre risco de danificação mecânica e térmica; mas, a eficiência está diretamente ligada às condições psicrométricas do ar ambiente, de modo geral, podendo ser um empecilho para a secagem. A secagem artificial, por sua vez, possibilita uma rápida remoção parcial da umidade, evitando alterações fisiológicas, e consiste, principalmente, na ventilação de ar aquecido ou não através do produto.

Para a secagem de sementes, BAUDET *et al.* (1999) e OHJA (1974) se referem à secagem como um processo de extrema importância para o armazenamento de sementes; é também o processo comercial mais utilizado para preservação, pois permite a redução do teor de água em níveis adequados mantendo a qualidade fisiológica, química, a boa aparência e a qualidade inicial nutritiva do grão.

A secagem de sementes, mediante ventilação forçada de ar (artificial) promove, essencialmente, dois processos simultâneos:

- I. transferência de água da superfície da semente para o ar circundante, que ocorre quando a pressão parcial de vapor na superfície da semente é maior do que a no ar circundante;
- II. movimento de água do interior para a superfície da semente, em virtude do gradiente de potencial hídrico entre as duas regiões.

A secagem artificial é largamente utilizada na indústria como um método para preservar as condições ideais das sementes, direcionando a um posterior processamento. Entretanto, apresenta riscos, devido à utilização de altas temperaturas. Estes danos podem ser irreversíveis e a operação exige conhecimento e cuidados necessários à preservação da qualidade inicial do material (CARVALHO, 1994; MIRANDA *et al.* 1999).

Outro fator importante que deve ser levado em conta, é que sementes que apresentam alto teor de umidade em sua estrutura são mais suscetíveis a danos térmicos (HARRINGTON, 1972). Porém, sabe-se também que o dano térmico ocorre durante a última fase da secagem, quando o teor de água da semente é menor, provocando a redução da velocidade de evaporação e à elevação da temperatura da semente que tende a alcançar a do ar de secagem.

2.4. Curva de secagem

A melhor forma de apresentar os dados coletados a partir de experimentos é através de curvas de secagem podendo estas ser apresentadas de duas formas diferentes:

- I. taxa de evaporação versus teor de umidade média, através da curva de cinética de secagem;
- II. teor de umidade médio versus tempo.

A taxa de evaporação pode ser representada matematicamente como a variação do teor de umidade média dividida pela variação de tempo.

$$\text{Taxa} = - dX/dt \quad (4)$$

Segundo FOUST *et al.* (1982) o processo de secagem de um material apresenta quatro fases bem distintas, sendo apresentadas de maneira diferente nas Figuras 3 e 4.

A partir da observação das Figuras 3 e 4, é possível a descrição mais detalhada das diferentes fases de secagem:

- I. Período inicial ou transitório: é a primeira fase da secagem apresentados nas Figuras 3 e 4 como o caminho entre A e B. É de curta duração e há variação na temperatura do sólido até que o equilíbrio térmico seja atingido. Se durante esta etapa a transferência de calor por radiação e condução forem desprezíveis frente à convecção, a temperatura de equilíbrio será a temperatura de bulbo úmido; caso contrário, será superior. Outro ponto a ressaltar é que se a temperatura inicial do sólido for inferior à temperatura de equilíbrio, o sólido se aquecerá (A -> B); do contrário, esfriará (A' -> B).

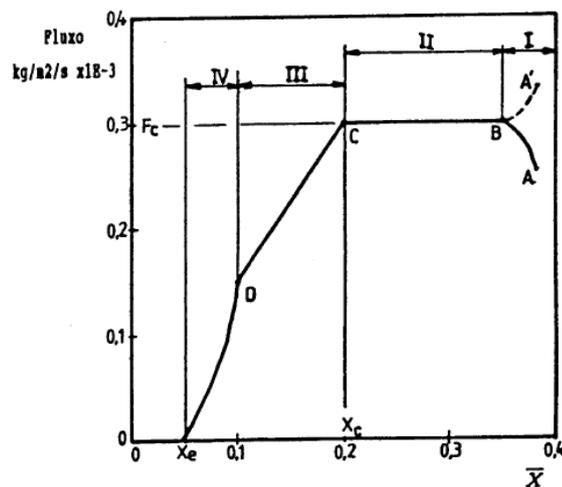


Figura 3: Curva da cinética de secagem, apresentando o fluxo de evaporação em função do teor de umidade.

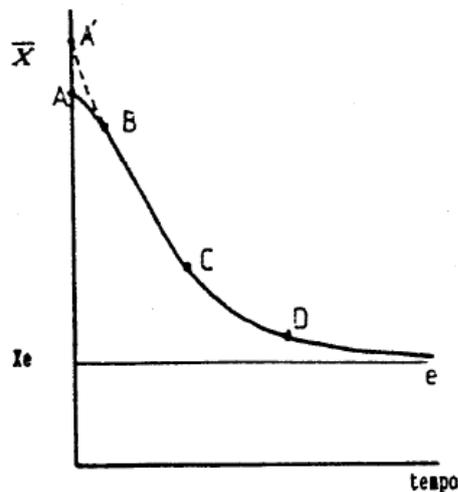


Figura 4: Curva de secagem, apresentada pela variação da umidade em função do tempo.

- II. Período de taxa de secagem constante: esta fase é caracterizada por um filme líquido contínuo de umidade que envolve a superfície do sólido. À medida que esta água é retirada da superfície do sólido, ocorre a migração da água existente nos interstícios da matéria sólida de uma forma rápida, mantendo a existência do filme constante. Neste período, há um equilíbrio na transferência de calor do ar para a superfície e a energia absorvida na evaporação da camada líquida. A cinética de evaporação depende apenas das condições do ambiente externo, tais como temperatura, velocidade do ar de secagem e umidade relativa do ar. Etapa correspondente à linha entre B e C.
- III. Primeiro período de taxa decrescente: a partir do ponto C, chamado de ponto crítico, o teor de umidade é correspondente a X_c (umidade crítica), assim, evidencia-se que neste ponto a umidade não ligada torna-se mais escassa no material e os poros deste não apresentam um fluxo hídrico capaz de suprir a evaporação do filme externo. Regiões secas aparecem na superfície do material e a cinética de evaporação passa a ser controlada pela estrutura interna do material, levando a uma redução na taxa de evaporação.
- IV. Segundo período de taxa decrescente: no instante em que o ponto D é atingido, a superfície do material não possui mais o filme de água e a desaceleração da taxa de evaporação se intensifica ainda mais e o mecanismo do transporte de água depende fortemente do gradiente de concentração de umidade. Variáveis como a velocidade e umidade relativa do ar deixam de ser relevantes.

Para produtos agrícolas que possuem uma estrutura complexa quando comparados com materiais homogêneos podem ser definidas duas fases distintas para sua secagem:

- I. taxa constante de secagem;
- II. taxa decrescente de secagem.

A fase de taxa constante pode ser observada na secagem de produtos biológicos com umidade inicial bastante elevada. Normalmente, quando a umidade é elevada, a resistência interna ao transporte de água é muito menor que a resistência externa à remoção de umidade da superfície. A fase de taxa decrescente caracteriza-se pela descontinuidade do fluxo de água na superfície de evaporação. A resistência interna ao transporte de umidade torna-se maior que a resistência externa (BROOKER *et al.*, 1974).

As sementes, em geral, não apresentam o período de secagem à taxa constante ou esta etapa dura apenas instantes, porque o mecanismo de transporte da umidade depende da resistência à transferência de água que é muito elevada no seu interior, tornando o tempo de evaporação superficial desprezível (FOUST *et al.*, 1982; BROOKER *et al.*, 1974).

No período de taxa decrescente de secagem, a taxa de transporte interno de água é menor do que a taxa de evaporação; assim o calor transferido do ar para as sementes não é absorvido pela água para virar vapor e, em consequência, a temperatura da semente aumenta, tendendo à temperatura do ar de secagem (HALL, 1980; FOUST *et al.*, 1982). Isto pode se apresentar como um problema, pois, a altas temperaturas ocorre a degradação da proteína de soja.

2.5. Equações da cinética de secagem

Existem na literatura, inúmeros modelos cinéticos de secagem que visam representar e pré-dizer o comportamento de diferentes produtos durante a secagem.

A maior parte das equações cinéticas de secagem apresentadas na literatura não são lineares, o que dificulta a estimação de parâmetros. O conhecimento da cinética para a secagem de materiais orgânicos nas mais variadas condições é de extrema importância para o design do equipamento e modelagem do processo (BARROZO *et al.*, 2004).

A Tabela 2 apresenta algumas destas equações encontradas na literatura (BARROZO *et al.*, 2004), onde XR é a umidade adimensional, K uma constante do modelo e t o tempo.

Tabela 2: MODELOS TEÓRICOS DE SECAGEM

Equações da cinética de secagem	
Equação	Modelo
$XR = \exp(-Kt)$ (5)	Lewis
$XR = C \exp(-Kt)$ (6)	Brooker
$XR = C \left[\exp(-Kt) + \frac{1}{9} \exp(-9Kt) \right]$ (7)	Henderson e Henderson
$XR = \exp(-Kt^d)$ (8)	Page

A Equação 5 foi proposta por Lewis, em 1921, através da analogia com a lei de Newton para o resfriamento. As Equações 6 e 7 são simplificações da solução do modelo de difusão.

2.6. Mecanismos de transporte de umidade no interior de sólidos

O transporte de umidade no interior de sólidos depende basicamente de dois potenciais, o gradiente de concentração de umidade e o gradiente de temperatura. Se a temperatura for muito elevada, deve-se considerar a influência de um terceiro gradiente, o de pressão.

Devido a grande complexidade da estrutura de alguns materiais, torna-se difícil qualificar e quantificar o mecanismo e fenômeno envolvido na secagem. De acordo com KEEY (1982) são apresentados os seguintes mecanismos de transporte de umidade no interior de um sólido poroso:

- I. difusão de líquido;
- II. difusão de vapor;
- III. movimento de líquido por capilaridade;
- IV. efusão de vapor através dos microporos;
- V. processos de evaporação-condensação sucessivos;
- VI. filtração de líquido e movimentação da fase gasosa devido a gradientes de pressão elevados.

A velocidade de difusão de um líquido é bastante baixa, pois o contato íntimo entre as moléculas de um líquido limita até um certo ponto sua capacidade de se mover. Essa característica é responsável pela relativa lentidão com que um líquido se difunde através de um sólido.

Na fase inicial da secagem, o movimento do líquido por capilaridade é mais acentuado devido ao alto teor de umidade.

A difusão do vapor será mais acentuada quanto há a existência de fortes gradientes, tais como a concentração de líquido e na pressão parcial de vapor, efeitos mais significativos na parte final do processo de secagem.

Em um estudo realizado por PRACHAYAWARAKORN *et al.* (2006), verificou-se que à medida que ocorria a secagem do grão de soja o coeficiente de difusão variava junto com a umidade. Esse estudo comparou dois métodos de secagem, através de ar aquecido e através de vapor superaquecido. Como resultado, obteve que o coeficiente de difusão foi maior para a secagem com ar aquecido.

2.7. Importância dos parâmetros de processo

Vários parâmetros têm influência na qualidade da secagem e também estão relacionados a custos de operação. Estes parâmetros modificam diretamente o tempo necessário para reduzir a umidade das sementes ao nível seguro para armazenamento. Os principais fatores a considerar são: temperatura, umidade relativa e vazão do ar, umidade inicial e final, tipo de grão, altura da camada de produto, entre outros.

YOSHIDA e MENEGALLI (2000) secaram milho super doce a uma temperatura de 50 °C e velocidade do ar de 1,28 e 0,75 m.s⁻¹, concluindo que a taxa de secagem tem um pequeno aumento quando se trabalha com valores de velocidade maiores. Logo, a velocidade do ar tem pouca influência sobre a cinética de secagem. Outro autor, GOUVEIA (1999) variou três diferentes níveis de velocidade do ar (1,0, 1,5 e 2,0 m.s⁻¹) com diferentes temperaturas (35, 50 e 65 °C) e obteve curvas de secagem de gengibre; o autor constatou que, para um mesmo tempo de processo, a temperatura exerce maior influência do que a velocidade do ar de secagem.

A variação da vazão de ar a ser utilizada para a secagem possui maior poder de influência quando a umidade inicial do produto for elevada. Para o grão de soja BARROZO (2006) concluiu que o processo de secagem a 35°C com diferentes velocidades o cálculo da umidade foi praticamente o mesmo, indicando que a resistência a transferência de massa convectiva é pequena.

Segundo CASSINI (2004) outro fator relevante no processo de secagem de alguns produtos é a altura de camada do produto. Os resultados apresentados quando a altura variou de 3 cm para 6 cm de proteína texturizada de soja constataram que o tempo era em

torno de 350 segundos para atingir uma umidade adimensional de 0,25, contra, aproximadamente, 1175 segundos para uma altura de camada de 6 cm.

2.8. Equipamentos

Ao longo dos anos, muitos equipamentos foram desenvolvidos para se obter um melhor resultado ao final do processo. Resultado que está diretamente ligado à qualidade final do produto e a um menor gasto energético, pois, na indústria de alimentos a etapa de secagem é responsável por 10% da energia total do setor.

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).

Secadores a altas temperaturas são os mais indicados para a secagem de grãos, utilizando temperaturas variadas, dependendo do produto a ser seco e finalidade do processo. Temperatura esta, no mínimo 10°C superior a ambiente. A seguir, a Figura 5 mostra os equipamentos mais indicados pra a secagem de grãos.

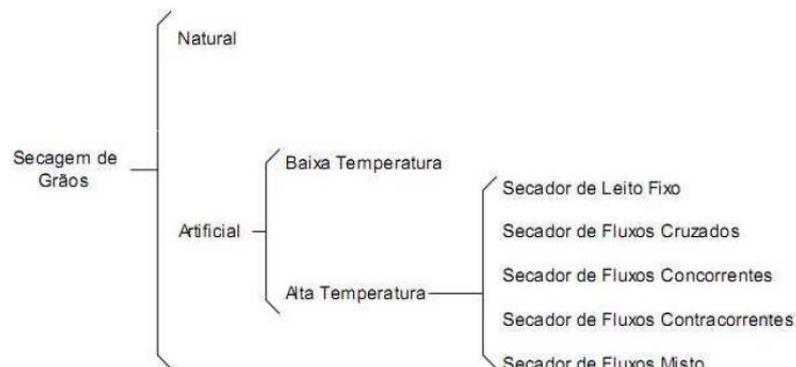


Figura 5: Principais tipos de secadores aplicados à secagem de grãos.

Os mais utilizados de acordo com o sentido do fluxo do ar de secagem, são os secadores descritos a seguir.

Secador de leito fixo

É o tipo de secador mais simples de todos por se caracterizar pela passagem de ar forçado através dos grãos que permanecem estáticos; a secagem de leito fixo ocorre da base para o topo da camada de grãos. Não é muito eficaz devido uma limitação na área de secagem e, de tempos em tempos, o ideal é promover uma agitação para uniformizar a secagem.

Secagem de fluxo contínuo

Consiste em submeter os grãos a uma corrente de ar, enquanto elas fluem continuamente através do secador. A secagem de fluxo contínuo leva em conta o fluxo de ar em relação ao fluxo do produto e os secadores podem ser classificados em quatro grupos principais.

Secador de fluxos cruzados

Bastante utilizado em todo o mundo, são de fácil construção e operação, alinhados ao baixo custo inicial em relação a outros secadores. Normalmente, trabalham de forma intermitente e podem possuir um local de armazenamento na parte superior chamado de câmaras de repouso, melhorando o aproveitamento energético durante a secagem e, ainda por cima, possibilitando a obtenção de produto final com melhor qualidade.

São equipados com mecanismos de reversão do ar e misturadores de grãos. O reaproveitamento de parte do ar de exaustão constitui melhoria para os secadores de fluxos cruzados. Esta técnica consiste em expelir para o ambiente externo o ar saturado proveniente do primeiro estágio de secagem; o ar dos estágios subseqüentes é misturado ao ar que passa pelas zonas de resfriamento e direcionado para a fonte de aquecimento para ser reutilizado.

Secador de fluxos concorrentes

Nos secadores de fluxos concorrentes, ar e grão fluem no mesmo sentido. O ar mais quente encontra o grão mais úmido e a alta taxa de evaporação causa rápido resfriamento desse ar. Isso possibilita o uso de temperaturas mais elevadas que as utilizadas em secadores de fluxos cruzados. O produto final é homogêneo quanto à temperatura e umidade devido ao decréscimo contínuo da temperatura do ar de secagem e, respectivamente, dos grãos, gerando menores danos físicos. Estes secadores de fluxos concorrentes apresentam boas características qualitativas do grão e eficiência energética.

Secador de fluxos contracorrentes

Para o fluxo ser contracorrente o ar aquecido é forçado a passar pela massa de grãos em sentido contrário ao fluxo de grãos. Nesse tipo de secador, à medida que o produto vai descendo pela coluna de secagem sua temperatura vai sendo aumentada gradualmente, atingindo o valor máximo no final da coluna de secagem que coincide com o ponto de entrada do ar aquecido. É conveniente, neste tipo de secador, trabalhar no sistema de seca-aeração, pois o grão apresenta elevada quantidade de energia armazenada na forma de calor sensível. Toda a massa de grãos recebe o mesmo tratamento evitando-se, assim, a supersecagem dos grãos. A pré-limpeza dos grãos é essencial para prevenir acidentes devido ao uso das altas temperaturas de secagem.

Secador de fluxos misto

Neste tipo de secador, o grão é secado pela mistura de fluxos cruzados, concorrentes e contracorrentes. Os secadores de fluxos mistos são muito caros e requerem um bom sistema de controle de poluição do ar, ao contrário dos secadores de fluxos cruzados. Existe uma necessidade em reduzir os custos de fabricação de equipamentos e o preço dos serviços prestados, porém isto não exclui a constante busca na melhoria da qualidade do produto processado. O objetivo final no processo de pós-colheita é manter inalteradas as qualidades dos produtos, sendo que estas dependem do uso final a que se destinam. Para o trigo, a qualidade na panificação é essencial; para a soja alta extração de óleo, no caso do arroz alto rendimento de engenho.

Silos Secadores

Suas principais características são: os grãos localizados na entrada do ar secam primeiro e quase sempre atingem a temperatura do ar de secagem, enquanto que os grãos localizados na saída permanecem mais frios e úmidos, permitindo assim um gradiente de umidade entre a entrada e a saída do ar. É necessária uma agitação mecânica para homogeneizar a secagem no final. Neste tipo de secador, os grãos são secos em bateladas ou continuamente. A baixa taxa de secagem contribui para melhor qualidade do produto. Outra particularidade deste sistema é que, ao término da secagem de toda a safra, o silo secador poderá ser utilizado para armazenar a produção.

2.9. Produção de proteína isolada de soja

Dentre os produtos protéicos a base de soja, o mais valorizado pelo mercado é a proteína isolada de soja (PIS). Atualmente, vem sendo utilizada junto à indústria alimentícia devido às inúmeras propriedades industriais que apresenta.

A PIS é um produto praticamente livre de carboidratos e de gordura, tendo mais de 90% de proteína em peso seco (THE SOLAE COMPANY, 2005).

A produção de PIS tem início com o recebimento dos grãos de soja, estes são encaminhados para o local de armazenamento e passarão por um processo térmico de secagem. Esta etapa é muito importante e contribuirá para diferentes eficiências, dependendo o objetivo final de produção. A seguir, será apresentado um fluxograma com as possíveis rotas para obtenção de diferentes produtos a partir da soja.

Os diferentes produtos possuem um processamento inicial comum: secagem, seleção, descascamento, laminação e extração; somente após estas etapas ocorre a distinção no processo: parte será óleo e outra parte passará a ser farinha desengordurada (54% de proteína base seca).

O primeiro ponto chave a ser levado em consideração é que, apesar da etapa de secagem ser a mesma, deve-se ter um cuidado especial quando o objetivo for a obtenção de PIS. A leguminosa pode ser seca a altas temperaturas, o que levaria a inativação de fatores antinutricionais e a extração de óleo não seria prejudicada, porém, se a intenção é de produzir PIS, a alta temperatura degrada a proteína e esta etapa é crucial para uma boa eficiência do processo.

A principal preocupação na etapa de secagem voltada à produção de PIS é atingir a estabilidade física e química do grão garantindo uma menor perda de matéria prima.

O Anexo 1 mostra o fluxograma de obtenção de produtos oriundos da soja. No início do processo ocorre a separação do óleo e a produção de uma farinha desengordura de soja; esta, por sua vez é a precursora de diferentes produtos, tais como a proteína isolada e a proteína texturizada de soja, entre outros. A primeira etapa de secagem, logo após a recepção da soja, é uma etapa em comum, porém altas temperaturas durante a secagem, que provocariam a degradação da proteína, em nada prejudicaria a extração de óleo.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. Equipamento de secagem

Para a obtenção das curvas de secagem através do processo mostrado na figura 6, utilizou-se o secador piloto mostrado na Figura 7.

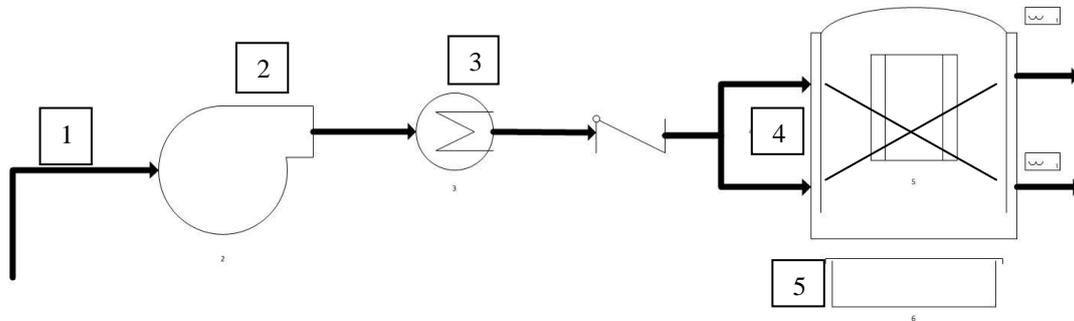


Figura 6: Processo de secagem dos grãos de soja, onde (1) Entrada de ar a temperatura ambiente, (2) Ventilador centrífugo, (3) Resistências, (4) Escolha do tipo de fluxo e (5) Balança.

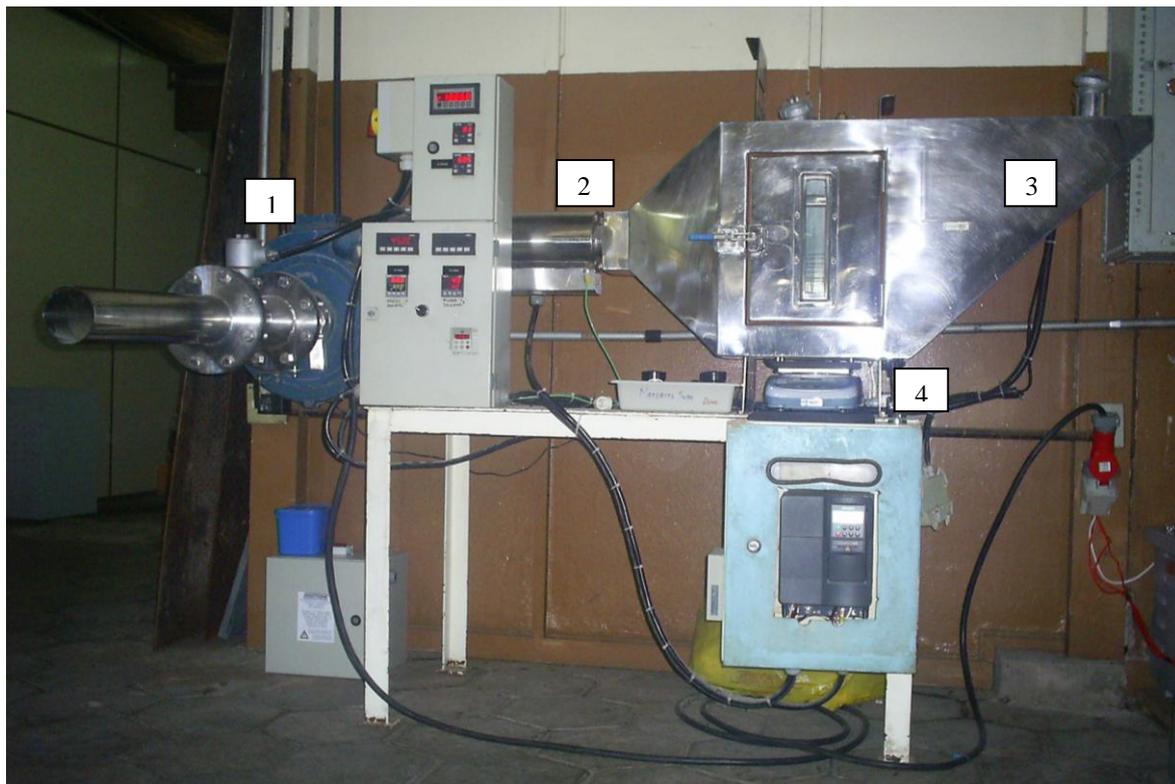


Figura 7: Secador piloto, onde (1) entrada de ar a temperatura ambiente e ventilador centrífugo, (2) resistências, (3) saída do ar de secagem, (4) balança semi-analítica.

Este secador de leito estático possui os seguintes componentes em seu sistema de funcionamento:

1. ventilador centrífugo para admissão de ar (vazão máxima: $15 \text{ m}^3 \text{ de ar} \cdot \text{min}^{-1}$, em condições ambientes) a vazão é controlada por um inversor de frequência;
2. resistências elétricas para aquecimento do ar: sistema composto por três resistores em paralelo capaz de atingir a temperatura de 180°C , apresentando também termômetros associados a um controlador;
3. cabine de secagem de leite estático que também apresenta a possibilidade da inversão de fluxo de ar (ascendente e descendente) através da existência de paredes móveis na cabine;
4. balança semi-analítica (precisão de $0,1 \text{ g}$) localizada abaixo da cabine e em contato com o cesto contendo os grãos;

O equipamento possui também os seguintes sensores e controladores:

- medidores de temperatura (termopares) na entrada do secador (um para escoamento ascendente e outro para escoamento descendente) do tipo Pt100, conectados a dois controladores-indicadores PID da marca West, modelo 6100;
- outro medidor de temperatura do produto, na cabine de secagem semelhante ao descrito no item anterior;
- um medidor de temperatura e de umidade de saída do ar de secagem, marca Testo – Hygrotest 650, cuja faixa de operação é de -20°C a $180^\circ\text{C} \pm 0,4^\circ\text{C}$, para a temperatura e 0 a $100\% \pm 2\%$ para a umidade relativa, na saída do secador;
- um medidor de vazão de ar, marca Nykon Dwyler, cuja faixa de medição varia entre $73,5$ e $735 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \pm 0,25\%$.

Através destes controladores, é possível o controle da temperatura e da vazão de entrada do ar, bem como o monitoramento das condições do ar de saída.

3.2. Material

O material utilizado no processo de secagem foram grãos de soja colhidos em Outubro de 2010, a amostra foi fornecida pela empresa Solae do Brasil Ind. e Com. de Alimentos LTDA. (Esteio, RS, Brasil). O grão possuía uma umidade inicial de $10,4\% \text{ B.s.}$

3.3. Procedimento experimental

3.3.1. Obtenção das curvas de secagem

Os experimentos foram realizados seguindo procedimento que se encontra detalhado a seguir.

Após verificar se a balança não estava em contato com nenhuma parte do secador (o que poderia provocar alteração no resultado da massa medida), ligava-se o equipamento. Ajustava-se a vazão de operação e, em seguida, a temperatura a ser empregada no procedimento experimental (é importante à realização nesta ordem, pois se a resistência for ligada antes, pode superaquecer e queimar os resistores).

Quando atingida as condições desejadas e estas não variavam mais, os grãos de soja eram colocados dentro do cesto do secador até uma altura de 2,5 cm, correspondente a uma massa em torno de 800 g de produto, mantida como padrão para todos os experimentos.

Desligavam-se, por um instante a resistência e o ventilador e o cesto contendo a soja era introduzido na cabine de secagem. Ligava-se, novamente, o ventilador e as resistências e dava-se início ao experimento e à coleta dos dados de variação da massa do produto com o tempo.

O fluxo do ar de secagem era, inicialmente, ascendente, o que provocava um maior desprendimento inicial dos pós presentes na amostra. Entretanto, era possível alterar o sentido fluxo para uma secagem mais uniforme, prática comum para produtos alimentícios. O fluxo era então invertido entre ascendente e descendente a cada 120 segundos junto com a leitura da balança.

Ao longo dos procedimentos experimentais foram variados os parâmetros de temperatura e velocidade do ar de secagem mantendo-se altura de camada de produto constante. Assim, para a obtenção das curvas de secagem, foram utilizadas temperaturas de 60, 90 e 120°C e velocidades de 0,45, 0,55 e 0,65 m.s⁻¹.

Com o intuito de avaliar a influência destes parâmetros na umidade final do grão (após 62 min de secagem), foram necessários sete experimentos, realizados através de um planejamento fatorial 2² com repetição no ponto central, conforme mostrado na Tabela 3.

TABELA 3: EXPERIMENTOS REALIZADOS

Experimentos		
Exp.	Temperatura (°C)	Velocidade m.s ⁻¹
1	60	0,45
2	60	0,65
3	90	0,55
4	90	0,55
5	90	0,55
6	120	0,45
7	120	0,65

3.3.2. Análise de umidade

Após finalizada a etapa de secagem, a soja era coletada em pequenas cápsulas e postas em um dessecador para que a amostra esfriasse sem entrar em contato com a umidade ambiente. Assim, atingido a temperatura ambiente, a amostra era colocada em uma estufa, a 105 °C, até peso constante. O produto, totalmente seco, voltava para o dessecador até esfriar e, então, era pesado em uma balança analítica (AOAC, 1990).

Através do conhecimento dos valores de massa inicial da soja e massa final após secagem e retirada total de umidade na estufa, é possível o cálculo da umidade tanto em base seca como em base úmida através das Equações 1 e 2, apresentadas na seção 2.2.1.

3.3.3. Ajuste dos dados experimentais

A partir da obtenção experimental das curvas de secagem do grão de soja, ajustaram-se os dados de umidade adimensional versus o tempo com os modelos apresentados pelas Equações 5, 6, 7 e 8 em suas essências exponenciais.

Para realização do ajuste, utilizou-se o *software* Statistica 8.0; para a avaliação da qualidade do ajuste, observaram-se o Erro Médio Relativo (EMR, em %, Equação 9) e o coeficiente de regressão linear, R². Valores de EMR inferiores a 10% indicam a boa qualidade do ajuste (AGUERRE *et al.*, 1989).

$$EMR = \frac{100}{N} \sum_{i=1}^N \frac{|V_{EXP} - V_{CALC}|}{V_{EXP}} \quad (9)$$

Nesta Equação 9 é o número de dados experimentais e V_{EXP} e V_{CALC} são, respectivamente, os valores obtidos experimentalmente e aqueles preditos pelo modelo.

Para a realização da análise estatística (ANOVA), a 95% de confiança, utilizou-se também o software Statistica 8.0.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. Curvas de secagem

Neste estudo, foram determinadas as curvas de secagem de grãos de soja com o ar nas temperaturas de 60, 90 e 120°C, a diferentes velocidades 0,45, 0,55 e 0,65 m.s⁻¹ conforme descrito na seção 3.2.1.

Partindo-se de 800g de soja em grãos, totalizando uma altura de 2,5 cm de camada, foi possível obter os gráficos apresentados nas Figuras 8 e 9.

A Figura 8 são apresentadas as curvas de secagem dos grãos de soja (umidade adimensional versus o tempo) obtidas com o ar a duas temperaturas diferentes (60 e 120°C) e na velocidade de 0,65 m.s⁻¹.

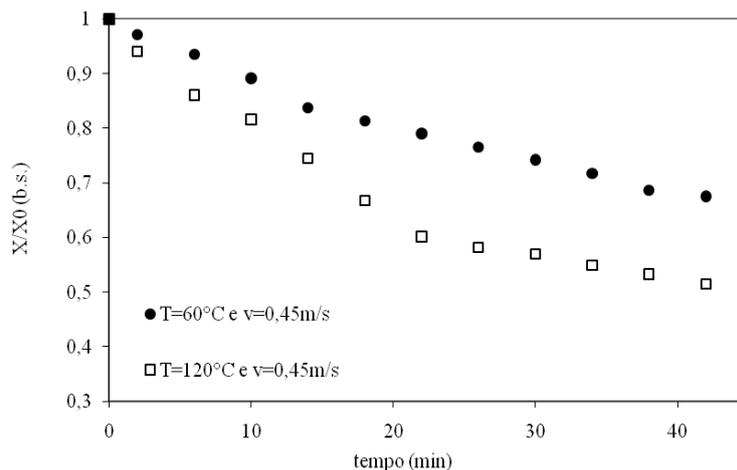


Figura 8: Gráfico de umidade adimensional x tempo demonstrando a influência da temperatura do ar na curva de secagem do grão de soja.

Pode-se observar na Figura 8 que a influência da temperatura do ar de secagem é bem marcante para o processo; neste caso, a taxa de secagem se apresenta maior para a temperatura de 120°C, para um fluxo de ar constante. A curva da temperatura mais elevada atinge um menor nível de umidade para um tempo constante, ou uma mesma umidade em menor tempo, do que a curva de 60°C, demonstrando uma maior variação da umidade pelo tempo.

Outro parâmetro estudado foi a influência da velocidade do ar de secagem. A Figura 9 apresenta as curvas de secagem dos grãos de soja (umidade adimensional versus o tempo) obtidas com duas velocidades do ar de secagem diferentes (0,45 e 0,65 m.s⁻¹) e na temperatura de 60°C. É possível perceber que a diferença na curva de secagem provocada

pela diferença de velocidade do ar não se apresenta de forma tão pronunciada o que permite dizer que as curvas praticamente se sobrepõem.

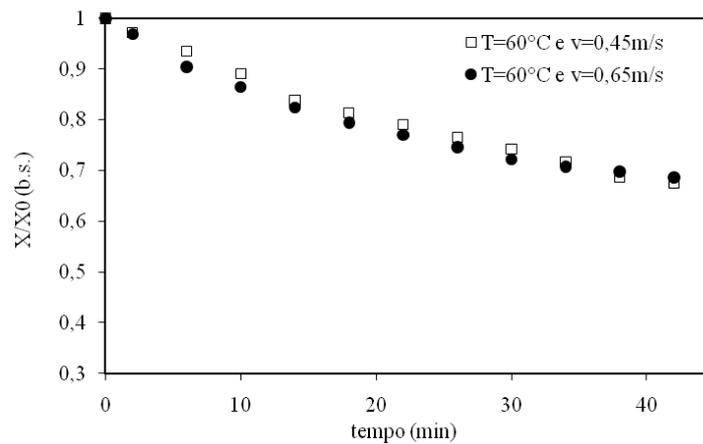


Figura 9: Gráfico de umidade adimensional x tempo demonstrando a influência da velocidade do ar na curva de secagem do grão de soja .

CASSINI (2004), em estudo de secagem feito com proteína de soja texturizada também observou a menor influência da velocidade do ar de secagem frente a variação de temperatura deste mesmo ar na umidade final obtida e/ou no tempo de processo.

A grande influência da temperatura do ar e a não influência da velocidade pode ser explicada pela cinética de secagem da leguminosa, que parece ocorrer no período de taxa decrescente de secagem, período no qual a taxa de evaporação é controlada pela difusão interna de umidade que ocorre no grão (para a qual a diferença de temperatura entre o centro do grão e sua superfície é determinante) e não pela evaporação desta umidade a partir da superfície (para a qual a velocidade do ar exerce papel fundamental), predominando, assim, o efeito da temperatura do ar de secagem, frente à velocidade.

4.2. Umidade do grão

Para análise de umidade do grão após o final da secagem, uma amostra foi coletada ao final de cada experimento e todas as amostras foram secadas em uma estufa, e a fim de ilustrar a remoção de água durante o experimento de secagem, a Figura 10 apresenta a massa de água removida em relação ao tempo em três experimentos ($T = 60^{\circ}\text{C}$ e $v = 0,45\text{ m.s}^{-1}$, $T = 90^{\circ}\text{C}$ e $v = 0,55\text{ m.s}^{-1}$ e $T = 120^{\circ}\text{C}$ e $v = 0,65\text{ m.s}^{-1}$).

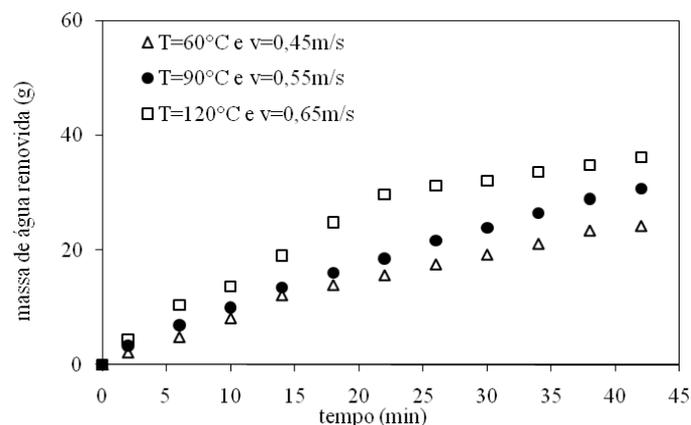


Figura 10: Gráfico de massa de água removida (g) x tempo.

A análise da Figura 10 comprova que a quantidade de água removida aumenta com a elevação da temperatura.

Depois de finalizada a etapa de secagem, é de extrema importância a quantificação da umidade restante no grão de soja. A Tabela 4 apresenta os resultados finais de umidade obtidos em cada experimento, após 62 min de secagem.

Na Tabela 4, é possível observar que mesmo o grão sem passar pelo processo de secagem já possuía um baixo teor de umidade cerca de 9,5% de umidade base úmida. Este valor encontra-se bem próximo do valor ideal para armazenagem. Observa-se, também, o impacto da temperatura do ar de secagem na variação do teor final de umidade e a pequena influência da velocidade do ar neste mesmo parâmetro.

TABELA 4: QUANTIFICAÇÃO DA UMIDADE DO GRÃO APÓS SECAGEM

	Temperatura °C	Velocidade do ar (m.s ⁻¹)	B. úmida (%)	B. seca (%)	Desvio Padrão (B.s.)
Padrão	-	-	9,5	10,4	0,25
Exp. 1	60	0,45	7,4	8,0	0,24
Exp. 2	60	0,65	7,3	7,8	0,10
Exp. 3	90	0,55	4,1	4,3	0,11
Exp. 4	90	0,55	4,6	4,8	0,07
Exp. 5	90	0,55	4,5	4,8	0,08
Exp. 6	120	0,45	2,7	2,7	0,03
Exp. 7	120	0,65	2,9	2,9	0,16

Uma análise estatística (ANOVA), realizada a 95% de confiança, corrobora com este resultado, como pode ser observado na Figura 11, que apresenta o gráfico de Pareto obtido nesta análise. Nesta figura, para $p=0,05$, apenas a temperatura mostrou-se como parâmetro significativo.

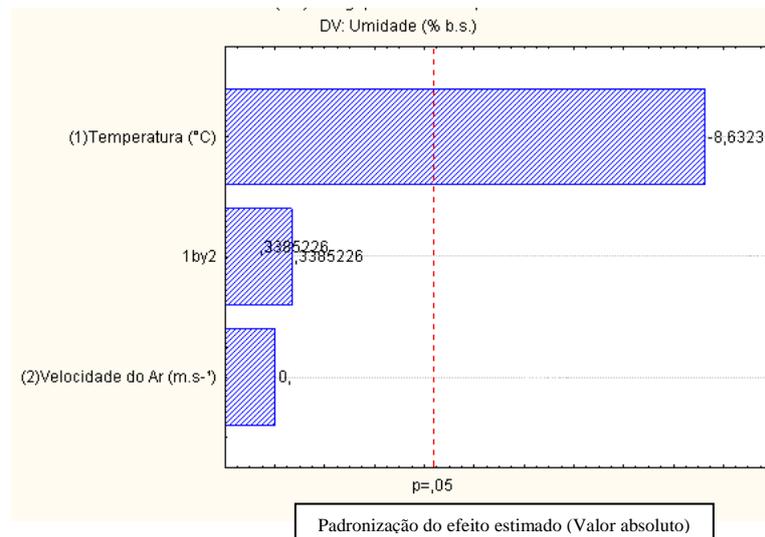


Figura 11: Gráfico de Pareto demonstrando a temperatura como único parâmetro significativo.

4.3. Ajuste dos dados experimentais

A partir da obtenção experimental das curvas de secagem do grão de soja, ajustaram-se os dados de umidade adimensional versus o tempo com os modelos apresentados pelas Equações 5, 6, 7 e 8 em suas essências exponenciais. Para este ajuste, foram consideradas as curvas obtidas nos experimento de secagem.

A seguir, serão apresentados os resultados dos ajustes destas curvas de secagem aos modelos exponenciais, o R^2 e o EMR gerado em cada ajuste.

4.3.1. Equação de Lewis

Utilizando-se o modelo de Lewis (Equação 5) foi possível obter o valor da constante K, calcular o EMR e, junto a curva do modelo, verificar o R^2 . A Tabela 5 apresenta estes valores obtidos para cada experimento.

TABELA 5: RESULTADO DO AJUSTE DOS DADOS EXPERIMENTAIS AO MODELO DE LEWIS

T (°C)	V (m.s ⁻¹)	K (min ⁻¹)	EMR (%)	R ²
60	0,45	0,009276	2,48	0,966
60	0,65	0,009656	3,83	0,912
90	0,55	0,014604	1,14	0,997
90	0,55	0,012793	1,21	0,995
90	0,55	0,016332	1,65	0,996
120	0,45	0,017176	6,82	0,921
120	0,65	0,017787	1,20	0,997

O modelo de Lewis é um modelo matematicamente simples e apresenta um bom resultado de R² para as curvas experimentais.

4.3.2. Equação de Brooker

Como apresentado anteriormente, o modelo de Brooker (Equação 6) também foi utilizado para o ajuste experimental das curvas. Os resultados são mostrados na Tabela 6.

TABELA 6: RESULTADO DO AJUSTE DOS DADOS EXPERIMENTAIS AO MODELO DE BROOKER

T (°C)	V (m.s ⁻¹)	C	K (min ⁻¹)	EMR (%)	R ²
60	0,45	0,978899	0,009063	1,34	0,989
60	0,65	0,954192	0,008257	2,66	0,955
90	0,55	0,994850	0,014441	1,12	0,998
90	0,55	0,981965	0,012232	0,66	0,998
90	0,55	0,983513	0,015795	1,21	0,998
120	0,45	0,942149	0,015203	5,28	0,946
120	0,65	0,994608	0,015614	1,21	0,998

A exemplo do modelo anterior, a equação de Brooker apresenta bons resultados para as curvas experimentais com valores altos de correlação.

A equação de Brooker possui um significado físico quanto a sua interpretação por ser a simplificação analítica do modelo difusivo. A seguir, é apresentada a Figura 12 (Statística 8.0) ilustrando o ajuste do modelo de Brooker para secagem de grãos de soja com a exclusão dos últimos pontos. Estes foram excluídos devido ao baixo teor de umidade que ocorre no final do processo (o que aumenta um pouco o erro em relação aos ajustes, em

função de erros experimentais mais pronunciados quanto menor a massa de produto medida).

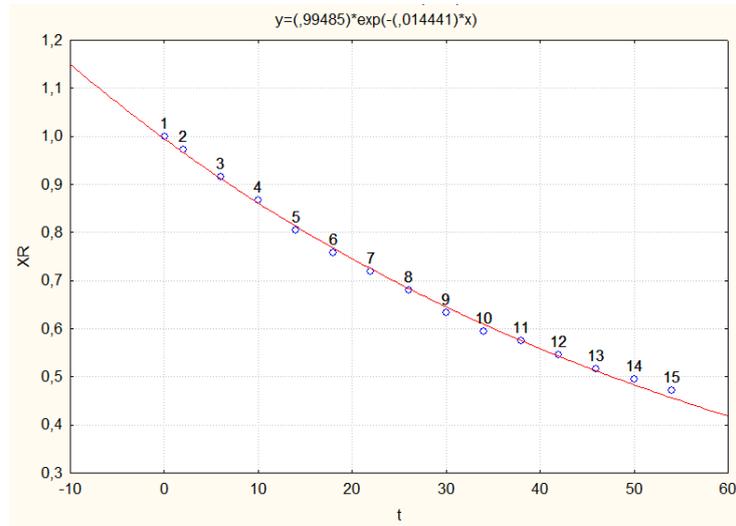


Figura 12: Gráfico do ajuste do modelo de Brooker para secagem de grãos de soja (Exp. 3 T=90°C e v=0,55m.s⁻¹).

4.3.3. Equação de Henderson e Henderson

Os resultados do ajuste dos dados experimentais ao modelo da Equação (7) são apresentados na Tabela 7.

TABELA 7: RESULTADO DO AJUSTE DOS DADOS EXPERIMENTAIS AO MODELO DE HENDERSON E HENDERSON

T (°C)	V (m.s ⁻¹)	C	K (min ⁻¹)	EMR (%)	R ²
60	0,45	0,897621	0,007154	0,65	0,997
60	0,65	0,875580	0,006491	1,84	0,981
90	0,55	0,919858	0,012330	1,11	0,996
90	0,55	0,905203	0,010177	0,98	0,997
90	0,55	0,911374	0,013687	0,94	0,998
120	0,45	0,874436	0,013185	3,89	0,971
120	0,65	0,920910	0,013485	1,76	0,994

O modelo de Henderson e Henderson mostrou bons resultados de correlação com baixo valor de erro médio relativo (EMR).

4.3.4. Equação de Page

Para o modelo de Page, equação (8), os resultados obtidos para as constantes, R^2 e EMR, encontram-se na Tabela 8.

TABELA 8: RESULTADO DO AJUSTE DOS DADOS EXPERIMENTAIS AO MODELO DE PAGE

T (°C)	V (m.s ⁻¹)	K	d	EMR (%)	R ²
60	0,45	0,018379	0,822628	0,68	0,997
60	0,65	0,033336	0,655287	0,85	0,995
90	0,55	0,017574	0,948084	0,73	0,999
90	0,55	0,018417	0,898261	0,46	0,999
90	0,55	0,023803	0,897325	1,12	0,997
120	0,45	0,050326	0,694752	3,01	0,981
120	0,65	0,017496	0,971099	1,17	0,998

BARROZO *et al.* (2004) avaliou a secagem do grão de soja para os modelos testados neste trabalho e obteve resultados bastante semelhantes, ou seja, observou que os modelos avaliados representavam muito bem os dados experimentais da secagem da soja em grãos nas condições estudadas.

A Tabela 9 apresenta, a título de comparação, os valores médios de EMR(%) e R^2 obtidos com os ajustes dos dados experimentais aos quatro modelos propostos.

TABELA 9: COMPARAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS DOS AJUSTES AOS MODELOS

Experimento	Lewis		Brooker		Henderson e Henderson		Page	
	EMR (%)	R ²	EMR (%)	R ²	EMR (%)	R ²	EMR (%)	R ²
1	2,48	0,966	1,34	0,989	0,65	0,997	0,68	0,997
2	3,83	0,912	2,66	0,955	1,84	0,981	0,85	0,995
3	1,14	0,997	1,12	0,998	1,11	0,996	0,73	0,999
4	1,21	0,995	0,66	0,998	0,98	0,997	0,46	0,999
5	1,65	0,996	1,21	0,998	0,94	0,998	1,12	0,997
6	6,82	0,921	5,28	0,946	3,89	0,971	3,01	0,981
7	1,2	0,997	1,21	0,998	1,76	0,994	1,17	0,998
Média	2,62	0,969	1,93	0,983	1,60	0,991	1,15	0,995

Como podem ser observados na Tabela 9, os resultados obtidos para todos os modelos foram muito bons; em função dos valores um pouco inferiores gerados no ajuste ao

modelo de Page, as Figura 13 e 14, a seguir, apresentam o diagrama de Pareto gerado na análise estatística (ANOVA) da obtenção das constantes deste modelo (K e d, respectivamente) em função dos parâmetros da secagem (T e v).

Como pode ser observado na Figura 13, todos os parâmetros, bem como a interação entre eles, se mostraram significativos para a obtenção da constante K do modelo de Page. Por outro lado, observa-se, pela Figura 14, que nenhum parâmetro, e nem a interação entre eles, se mostrou estatisticamente significativo para a obtenção da constante d do modelo de Page.

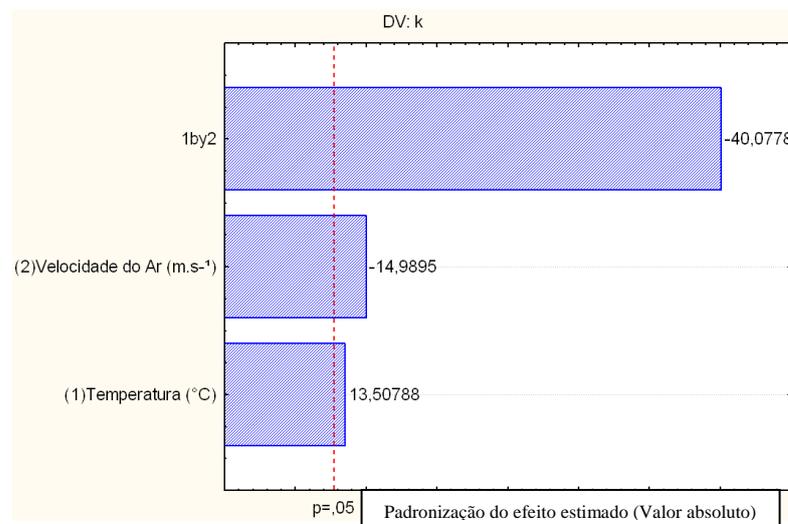


Figura 13: Gráfico de Pareto para a constante “k” do modelo de Page.

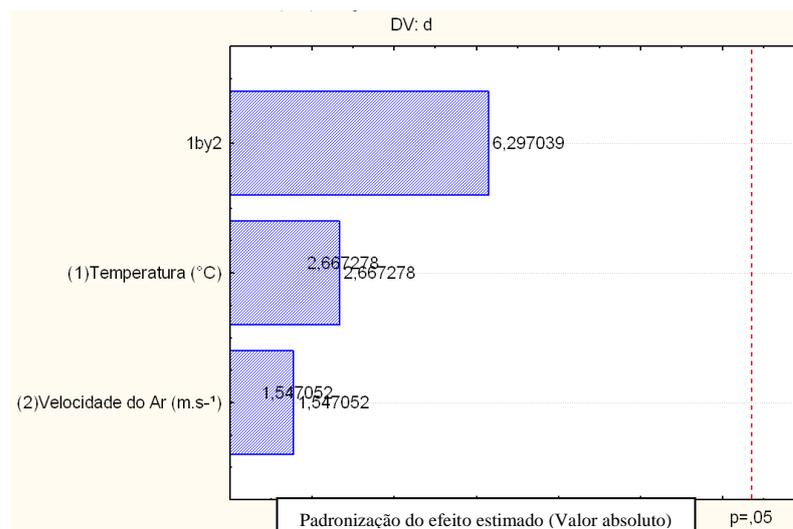


Figura 14: Gráfico de Pareto para a constante “d” do modelo de Page.

4.4. Dificuldades e possíveis erros experimentais

Durante os experimentos algumas dificuldades se fizeram presentes e são discutidas a seguir.

Altas temperaturas: como a secagem se processava em altas temperaturas, um bom isolamento térmico era fundamental para o melhor funcionamento da balança. Inicialmente utilizou-se uma placa de EVA para isolar o ar de secagem da balança, porém, esta deformou-se com a temperatura de 90°C. Então, este material foi substituído por um material cerâmico. Ao final dos experimentos, verificou-se um pequeno aumento da temperatura da balança o que pode ter provocado uma descalibração da mesma.

Perda de massa: junto à soja, traços de outras partículas constituíam a amostra. A amostra foi peneirada e separada de alguns pós, porém, durante o processo de secagem, principalmente nas temperaturas mais altas, a casca do grão ficava ressecada e acabava por, em alguns casos, se desprender do grão. A casca era arrastada pelo ar de secagem para fora do cesto quando a entrada deste ar era ascendente. Assim, estas partículas deixavam de contabilizar no valor medido pela balança.

Baixo teor de umidade: como o grão de soja possuía baixo valor de umidade (em torno de 10%) e o intervalo de coleta de dados ser de apenas 2 minutos, os valores apresentavam uma pequena variação que por vezes poderia ser mascarado pela oscilação da balança, dificultando as medidas.

5. CONCLUSÕES

Neste trabalho objetivou-se a obtenção das curvas de secagem para o grão de soja a diferentes temperaturas e velocidades do ar de secagem e, assim, ajustar estes dados aos modelos teóricos de secagem apresentados na literatura.

Para as curvas de secagem, constatou-se que a variação da velocidade do ar de secagem pouco influencia na cinética de secagem, entretanto, a temperatura é um fator que provoca grande influência na retirada de umidade dos grãos de soja. Esse resultado pode ser explicado pela cinética de secagem da leguminosa, que ocorre no período de taxa decrescente, período posterior ao da taxa constante (na qual a substância apresenta uma superfície com um filme de água). Assim, a taxa de evaporação no período de taxa decrescente de secagem é controlada pela difusão interna que ocorre no grão, predominando o efeito da temperatura do ar de secagem, frente à velocidade. Este resultado foi confirmado por uma análise estatística (ANOVA).

Verificou-se também que para esta época do ano, a soja já é colhida com baixo teor de umidade (entre 9 e 10%), logo, para esta época do ano, uma condição mais amena de secagem é suficiente para manter a qualidade do produto por um grande período de tempo de armazenagem. Entretanto se a soja estivesse inicialmente com uma umidade superior (fato comum para outras épocas) um novo estudo seria necessário para verificar tal condição de secagem.

Os resultados experimentais das curvas teóricas foram ajustadas de forma eficiente para os modelos estudados no intervalo de valores de temperatura e velocidade do ar utilizados experimentalmente, mostrando que qualquer um dos modelos testados poderia ser utilizado para prever o comportamento das curvas de secagem dos grãos de soja nas condições estudadas. Os ajustes apresentaram valores de R^2 bem próximos à unidade. Porém, o modelo de Page apresentou valores um pouco superiores de R^2 e EMR levemente inferiores aos demais modelos.

A secagem da soja é um processo no qual alguns cuidados devem ser tomados, pois, por ser um grão rico em proteína, de alto valor econômico, sua secagem pode degradar este composto. Durante a secagem a 120°C, por exemplo, observou-se um odor característico da queima do produto e, ao final do processo, uma mudança na coloração do grão foi também visualizada; este, que era inicialmente amarelo, tornou-se marrom. Este fato não foi verificado através da quantificação de proteína degradada, devendo esta quantificação ser motivo de estudo de trabalhos futuros.

Referências bibliográficas

AGUERRE, R. J.; SUAREZ, C.; VIOLLAZ, P. Z. New BET type multi-layer sorption isotherms. Part II: Modelling water sorption in foods. *Lebensmittel-Wissenschaft und Technologie* 1989, 22(1): 192-195.

AOAC (1990) – Association of Official Analytical Chemists. *Official Methods of Analysis*: 930.04. Moisture content in plants, 1, p. 949.

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

BARROZO M.A.S.; HENRIQUE H.M.; SARTORI D.J.M.; FREIRE J.T. The use of the orthogonal collocation method on the study of the drying kinetics of soybean seeds. *Journal of Stored Products Research* 42 p.348–356, 2006.

BARROZO, M.A.S.; SARTORI, D.J.M. and FREIRE, J.T. A STUDY OF THE STATISTICAL DISCRIMINATION OF THE DRYING KINETICS EQUATIONS, Uberlândia MG, p. 219 – 225, 2004.

BAUDET, L.M.L.; VILLELA, F.A.; CAVARIANI, C. Princípios de secagem. *Seed News*, Pelotas-RS, n.10, p.20-27,1999.

BERN, C.J., HANNAL M.H., WILCKE W.F. *Harvesting, Storing, and Post-Harvest Management of Soybeans*. In: Johnson, L.A., White, P.J., Galloway, R. *Soybeans - Chemistry, Production Processing, and Utilization*, Vol. 2. New York: AOCS Press, 2008.

BOLDUC, F. Development of a natural convection drier for on-farm use in developing countries. Manhattan, Kansas State University. (M.S. Thesis), p. 99, 1978.

BROOKER, D.B.; BAKKER-ARKEM A, F.W.; HALL, C.W. *Drying cereal grains*. Westport, AVI Publishing, 265p. 1974.

CARVALHO, N.M. A secagem de sementes. *J aboticabal* : FUNEP, p.165, 1994.

CASSINI A. S. Análise das Características de Secagem da Proteína Texturizada de Soja. Dissertação de mestrado. 2004.

D'ARCE, Marisa A. B. Reginato. Pós colheita e armazenamento de grãos. Disponível em: <http://www.esalq.usp.br/departamentos/lan/pdf/2444armazenamentograos.pdf>. Acesso em Out. 2010.

Desembahia. BOLETIM ANUAL DO MERCADO DE GRÃOS: SOJA, Safra 2008/09 e Expectativas para 2009/10 disponível em: < http://www.desembahia.ba.gov.br/recursos/news/video/%7B01E4C0AE-9E81-452E-AD95-93EA7D04CCB9%7D_Rel%20Soja%202009.pdf> Acessado em Out. de 2010.

FOUST, A.S.; WENZEL, L.A.; CLUMP, C.W.; MAUS, L.; ANDERSEN, L.B. *Princípios das operações unitárias*. Rio de Janeiro, Guanabara Dois, 1982. 670p.

- GOUVEIA, J.P.G. Determinação das curvas de secagem em frutos de cajá. Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais, Campina Grande, Especial, n.1, p.65-68, 2003
- HALL, C.W. Drying and storage of agricultural crops. Westport, AVI Publishing, 382p, 1980.
- HARRINGTON, J.F. Seed storage and longevity. In: KOZLOWSKI, T.T. Seed biology. New York : Academic, V.3, p.145-245, 1972.
- KAGAWA, A. ed. Standard table of food composition in Japan. Tokyo: University of Nutrition for women, p. 104-105, 1995.
- KEEY R. B. Progress towards the drying behavior of material. Proceedings of the third international drying symposium, Vol.1, 7-21, John C. Ashworth Ed. University of Birmingham, 1982.
- KREYGER, J. Practical observations on the drying of seed. Seed Science and Technology. Zurich, 1:645-70, 1973.
- KRZYZANOWSKI F. C. WEST S. H. FRANÇA J. B. DRYING SOYBEAN SEED USING AIR AMBIENT TEMPERATURE AT LOW RELATIVE HUMIDITY p.77-83, 2006.
- LASSERAN, J.C. Princípios gerais de secagem. Revista Brasileira de Armazenamento, Viçosa, 3(3): 17-45, 1978.
- MIRANDA, L.C.; DA SILVA, W.R.; CAVARIANI, C. Secagem de sementes de soja em silo com distribuição radial do fluxo de ar. I. Monitoramento físico. Pesq agropec bras, Brasília, v.34, n.11, p.2097-2108, 1999.
- OHJA, T.P. Drying of paddy in post-harvest prevention of waste and loss of food grain. Tóquio: Asia Productivity Organization, 375 p, 1974.
- ORDÓÑEZ, J.A. Tecnologia de Alimentos - Componentes dos Alimentos e Processos. Vol. 1. Tradução: Fátima Murad. Artmed Editora, Porto Alegre, p.25-31; 201-203. 2005.
- PRACHAYAWARAKORN S.; PAVEENA P.; SOMCHART S. Heating process of soybean using hot-air and superheated-steam fluidized-bed dryers, p.770-778, 2006.
- ROSSI, S.J.; ROA, G. Secagem e armazenamento de produtos agropecuários com uso de energia solar e ar natural. São Paulo: Academia de Ciências do Estado de São Paulo, p.295, 1980.
- SODHA, M.S.; BANSAL, N.K.; KUMAR, A.; BANSAL, P.K.; MALIK, M.A.S. Solar crop drying. Boca Raton, CRC Press, v.1. 141p, 1987.
- VILLELA, F.A. Efeitos da secagem intermitente sobre a qualidade de sementes de milho. 104f. Tese (Doutorado em Produção Vegetal) - Esalq-USP. 1991.
- YOSHIDA C., MENEGALLI F. C. "Estudo da cinética de secagem do milho superdoce em leito fixo" Anais do XXIV ENEMP, Vol I, 307-317, 1996.

Anexo 1

Fluxograma de obtenção da Proteína Isolada de Soja

