



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA
ENG07053 - TRABALHO DE DIPLOMAÇÃO EM ENGENHARIA
QUÍMICA



Estudo dos Parâmetros de Secagem de produtos *Pet food*

Autor: Flávia Justina Costa

Orientador: Aline Schilling Cassini

Co-orientador: Lígia Damasceno Ferreira Marczak

Porto Alegre, dezembro de 15

Sumário

Agradecimentos	iii
Resumo	iv
Lista de Figuras	v
Lista de Tabelas	vi
1 Introdução	1
2 Fundamentos Teóricos	2
2.1 Produção de <i>Pet food</i>	2
2.1.1 A Indústria de Pet food	2
2.1.2 Processo Produtivo	2
2.2 Secagem de Alimentos	5
2.2.1 Taxa de Secagem	6
2.2.2 Principais Parâmetros que influenciam na secagem	8
2.2.3 Equipamentos de Secagem	11
3 Materiais e Métodos	15
3.1 Curvas de secagem	15
3.2 Ajuste de dados	18
4 Resultados	20
4.1 Curvas de Secagem	20
4.2 Ajuste dos dados experimentais	22
4.3 Análise de Variância	23
4.4 Taxa de Secagem	24
5 Conclusões e Trabalhos Futuros	25
6 Referências	26

Agradecimentos

Agradeço, em primeiro lugar e sempre, a Deus, que me permitiu viver essa vida maravilhosa, e realizar este trabalho, esta faculdade, permitindo-me amar cada passo, abraçar cada dificuldade, e vencer!

Aos meus pais, Danilo e Iris, por serem meus heróis, minha fonte de forças e consolo, pela persistência no incentivo, pela paciência nas minhas faltas e falhas. Este trabalho e essa faculdade que se concluem são pra vocês. Te amo, mãe! Te amo, pai!

A Fernanda, por me dar alegrias nas horas difíceis e por me mostrar a importância de ser transparente sempre! Te amo, mana!

Ao Kelvin, pelo amor que me fascina e me faz bem! Obrigada por entender minhas ausências e me acompanhar nas horas de estudo, e por me ajudar nas horas das tempestades que vieram durante os últimos anos. Te amo!

Às minhas professoras, Lígia e Aline. Corremos contra o tempo e deu tudo certo, e, nesses últimos meses, além de um TCC, ganhei duas amigas! Obrigada por tudo! E também a todos os professores do DEQUI, obrigada por me ensinarem que, para ser engenheira, além de saber fenômenos de transporte, controle, cálculo ou modelagem, é preciso amar o que se faz, assim como vocês demonstram nas aulas.

Às colegas e amigas Fernanda, Luana e Laura, obrigada, gurias, pela amizade, companheirismo, ajuda e força que demos umas para as outras, principalmente nessa reta final!

Aos meus amigos que, mesmo não entendendo minhas ausências, as aceitaram sem me cobrar nada!

Ao Marcelo e ao Mateus, que depositaram em mim confiança e autonomia para realizar este trabalho, apoiando e dando todas as ferramentas que eu precisei. E aos colegas de Hercosul, pelo apoio e ajuda. Obrigada!

Agradeço à UFRGS, ao departamento de Engenharia Química, por me proporcionar esses cinco anos de crescimento em formação técnica e pessoal! Obrigada por não tornarem as coisas fáceis, pois agora posso dar valor de cada hora de estudo, e entender que esse valor é muito alto.

“Sê humilde para evitar o orgulho, mas voa alto para alcançar a sabedoria”. (Santo Agostinho)

Resumo

A secagem é uma das etapas mais importantes do processamento de *Pet foods*, em virtude da segurança alimentar e do ganho econômico que se pode alcançar se essa etapa for realizada de forma adequada. A escolha dos parâmetros de processo é importante devido às características que serão obtidas no produto final. Neste trabalho, foi avaliado o comportamento da secagem de um alimento para cães através do estudo das curvas de secagem do mesmo. As curvas foram obtidas através de experimentos em um secador piloto com ar convectivo, onde foram variadas a altura de camada do produto (h) – 2,5 e 5 cm – e a temperatura do ar de secagem (T) – 70 e 100 °C. A partir dos dados experimentais obtidos de teor de umidade em função do tempo foi feito o ajuste a cinco modelos teóricos. Todos os modelos apresentaram parâmetros de ajustes de boa qualidade, aproximando os coeficientes de determinação da unidade, e, dentre eles, o modelo escolhido para ajustar os dados foi o de Page, por apresentar os melhores resultados no ajuste dos dados experimentais. Uma análise estatística foi realizada a fim de verificar se os parâmetros eram significativos para a determinação das constantes deste modelo: a um nível de confiança de 90% não houve diferenças significativas entre as variáveis, na faixa estudada. Assim, fez-se a ANOVA também para o modelo de Lewis, que é um modelo mais clássico de secagem; verificou-se que houve significância de ambos os parâmetros para a obtenção da constante deste modelo, sendo a altura de camada de produto o parâmetro mais significativo. A secagem do alimento apresentou apenas o período de taxa de secagem decrescente, o que comprova que o processo para este produto se dá apenas através da difusão da água do interior do alimento para a superfície.

Palavras chave: secagem, *pet food*, parâmetros de secagem, curvas de secagem.

Lista de Figuras

Figura 2.1: Esquema do processo produtivo de <i>Pet food</i> (BUHLER, 2000).....	3
Figura 2.2: Esquema de extrusora de rosca simples (FELLOWS, 2000).	4
Figura 2.3: Imagem ilustrativa de uma rosca extrusora, com diferentes seções.	4
Figura 2.4: Curva típica de taxa de secagem de um produto alimentício (HELDMAN; HARTEL,1998)	7
Figura 2.5: Secador contínuo de duas esteiras (BARBOSA-CÁNOVAS; VEGA-MERCADO, 1996).	13
Figura 3.1: Amostra de alimento para cães utilizada nos testes de secagem	15
Figura 3.2: Secador piloto utilizado na determinação das curvas de secagem.	16
Figura 4.1: Influência da altura de camada de produto na curva de secagem (T=70°C) e ajuste do modelo de Page	20
Figura 4.2: Influência da altura de camada de produto na curva de secagem (T=100°C)..	21
Figura 4.3: Influência da temperatura do ar de secagem na curva de secagem ($h = 5$ cm)	21
Figura 4.4: Influência da temperatura do ar de secagem na curva de secagem ($h = 2,5$ cm)	21
Figura 4.5: Taxa de secagem do <i>pet food</i> versus a umidade adimensional, para as quatro condições experimentais estudadas.....	24

Lista de Tabelas

Tabela 2.1: Efeitos causado pelo aumento das condições de operação nos períodos de taxa de secagem constante (R_c) e decrescente (R_D).....	9
Tabela 2.2: Classificação dos secadores	12
Tabela 3.1: Faixa de valores estudados para cada fator.	18
Tabela 3.2: Modelos utilizados no ajuste dos dados das curvas de secagem	18
Tabela 4.1: Resultado do ajuste dos dados experimentais aos modelos de secagem.	22
Tabela 4.2: Resultado da ANOVA para as constantes do modelo de Page.....	23

1 Introdução

No ano de 2014, a indústria do *pet food* do Brasil passou a ser a segunda maior do mundo, tendo-se, ainda, uma estimativa de crescimento para o setor (PET BRASIL, 2015). O processo de produção dos alimentos para animais de estimação, assim como de vários outros alimentos, consiste em diversas operações unitárias, e uma das etapas mais importantes para o controle de qualidade do produto final é a secagem. O processo de secagem, mediante controles adequados de qualidade do produto final, garante segurança ao alimento, diminuindo sua umidade a fim de evitar a proliferação de fungos e bactérias.

A secagem por ar convectivo de um alimento consiste em expor o mesmo a um ar de secagem aquecido, a fim de que este ar retire a umidade do produto através de processos de convecção e de difusão. Estes dois fenômenos sucessivos, a migração de água do interior do corpo úmido até sua superfície e o transporte da água vaporizada da superfície para longe do corpo, acontecem na maioria dos alimentos (VAN ARSDEL e COPLEY, 1963).

Dentre os diversos tipos de secadores industriais existentes, os tipos mais indicados para a indústria de *pet food* são os secadores contínuos de esteiras vertical e horizontal. A escolha do secador está baseada em diversos fatores, incluindo características do alimento a ser seco, economia, custo energético, entre outros (HELDMAN e HARTEL, 1998).

Os parâmetros de secagem são fundamentais para uma boa qualidade de secagem do alimento e influenciam na eficiência de operação dos secadores. Dentre os principais parâmetros que influenciam o processo estão a temperatura, a vazão e a umidade do ar de secagem e altura de camada do produto. A variação destes parâmetros permite avaliar o comportamento do alimento ao longo do processo de secagem, o que possibilita melhorar a segurança e a qualidade do produto final.

Dentro deste contexto, o presente trabalho tem como objetivo avaliar a influência da temperatura do ar de secagem e da altura da camada de produto no processo de secagem de um produto *pet food*. As curvas de secagem deste alimento foram obtidas experimentalmente, variando-se os parâmetros mencionados anteriormente. Além disto, foram avaliados modelos comumente encontrados na literatura para ajustar os dados experimentais de secagem.

2 Fundamentos Teóricos

O presente trabalho baseia-se no levantamento de curvas de secagem para um produto *pet food*. Assim, neste capítulo será apresentada uma breve revisão com os tópicos relevantes para o desenvolvimento do trabalho.

Primeiramente, será apresentado o processo produtivo de *pet food*, seguido de um enfoque teórico sobre o processo de secagem, etapa foco deste trabalho.

2.1 Produção de *Pet food*

2.1.1 A Indústria de *Pet food*

O mercado *pet* brasileiro é o segundo maior do mundo, estando apenas atrás dos Estados Unidos, e alcançou mais de R\$ 16 bilhões em vendas no ano de 2014. Este mercado se divide em quatro segmentos: *Pet Care*, *Pet food*, *Pet Serv* e *Pet Vet*, os quais são responsáveis, respectivamente, pelos cuidados com higiene e beleza do animal, alimentação, serviços e medicamentos veterinários (PET BRASIL, 2015).

O segmento de *Pet food* representa dois terços do faturamento do mercado *pet* e a estimativa é de crescimento, uma vez que o Brasil produz menos de 50% da sua capacidade total. O Rio Grande do Sul representa 7,5% na produção do alimento para animais de estimação no Brasil, enquanto que o estado mais representativo é São Paulo, seguido de Paraná e Minas Gerais (ABINPET, 2015).

2.1.2 Processo Produtivo

Os produtos *pet food* podem ser fabricados a partir de diferentes processos, sendo, o mais usado, o processo de extrusão, seguido de uma etapa de secagem. Este processo foi adaptado das produções de cereais matinais e teve seu início na década de 1950. A extrusão gera os produtos expandidos, com alto conteúdo de umidade (ROKEY, 2006).

O processo produtivo de *pet food* consiste em diversas etapas, conforme mostrado na Figura 2.1.

O primeiro passo na produção do alimento é a seleção das matérias primas. A escolha das mesmas tem grande impacto no produto final, tanto na qualidade nutricional quanto na viabilidade econômica do produto (ROKEY, 2006). Baseados em estudos que indicam quais as necessidades nutricionais para cada tipo de animal, são formuladas as receitas de cada tipo de alimento, levando em conta as proporções e os ingredientes adequados (YAMANAKA e BARBOZA, 2011).

As principais classes de nutrientes que compõem os alimentos *pet* são proteínas, carboidratos e gorduras; as principais fontes destes componentes são as carnes e as farinhas de carne, os cereais e fibras e as gorduras provenientes de aves e bovinos. A fim de enriquecer as formulações, podem ser adicionadas vitaminas antes do pré condicionamento, no chamado *premix*, para que, depois da extrusão, o produto tenha o conteúdo de vitaminas adequado, uma vez que, durante o processo, devido ao

aquecimento e cisalhamento, parte delas pode ser degradada (YAMANAKA e BARBOZA, 2011).

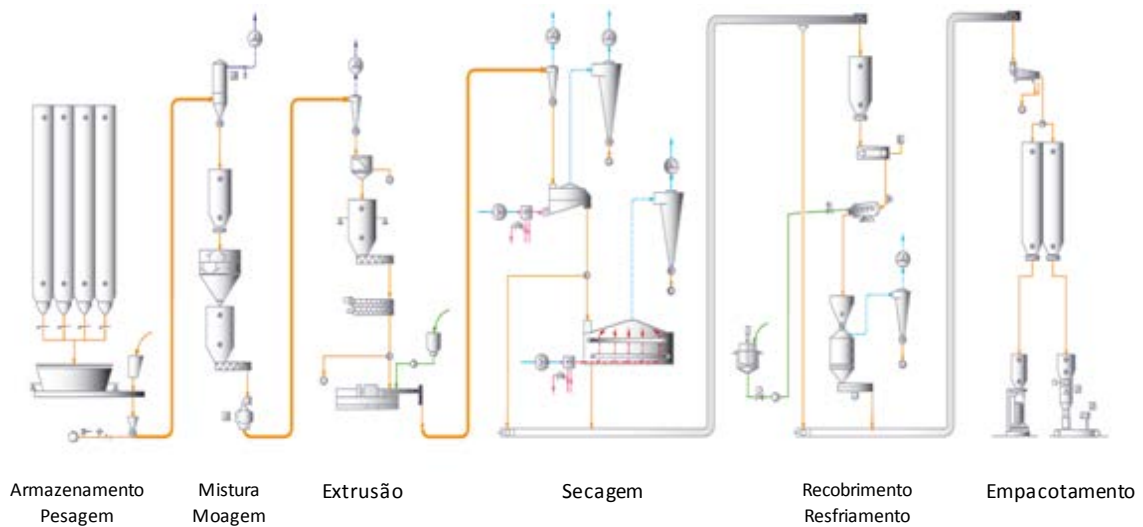


Figura 2.1: Esquema do processo produtivo de *Pet food* (BUHLER, 2000).

Conforme pode ser observado na Figura 2.1, as matérias primas secas (farinhas, cereais) são dosadas conforme a formulação e passam pelo processo de moagem, a fim de formar grânulos menores e de tamanho uniforme. Seguem, então, para um misturador, onde é adicionado o *premix*, que contém os micro ingredientes (vitaminas, sais, entre outros). Essa mistura passa pelo peneiramento, a fim de obter um produto final com granulometria fina e textura homogênea (YAMANAKA e BARBOZA, 2011). Após esse processo de preparação das matérias primas, o produto segue para o processo de extrusão.

O processo de extrusão pode ser definido como a passagem forçada de produto através de uma pequena abertura, produzindo materiais com o formato do molde escolhido (HELDMAN e HARTEL, 1998); é um cozimento a alta pressão, umidade controlada e temperatura elevada, o que confere digestibilidade à matéria prima e dá as características desejadas do produto final. O conjunto extrusor é constituído de sistema de alimentação, pré condicionador, cilindro extrusor, matriz, conjunto de facas e tubo pneumático (YAMANAKA e BARBOZA, 2011). A Figura 2.2 apresenta um esquema de uma extrusora de rosca simples.

No pré condicionador são injetados à matéria prima, água e vapor d'água, a fim de que se alcance um conteúdo de 10 a 25% de umidade. A quantidade total de umidade adicionada, combinada à temperatura do produto e ao tempo de retenção no pré condicionador, podem ser controlados para que se possam alcançar os resultados desejados. O uso do pré condicionador pode garantir um maior tempo de retenção, a diminuição da energia mecânica consumida na extrusão e/ou o aumento na capacidade do sistema de extrusão. Esse sistema é o responsável por grande parte da energia térmica utilizada no processo de extrusão (HELDMAN e HARTEL, 1998; ROKEY, 2006).

O extrusor possui um conjunto de roscas, que são as responsáveis pelo transporte, pressão e cisalhamento do material dentro do cilindro até a matriz. Essa é a etapa onde se aplica a maior parte da energia mecânica utilizada no processo (YAMANAKA e BARBOZA, 2011). Os extrusores podem ser de rosca simples (uma única rosca dentro do

cilindro de extrusão) ou rosca dupla (duas roscas dentro do cilindro extrusor, uma ao lado da outra).

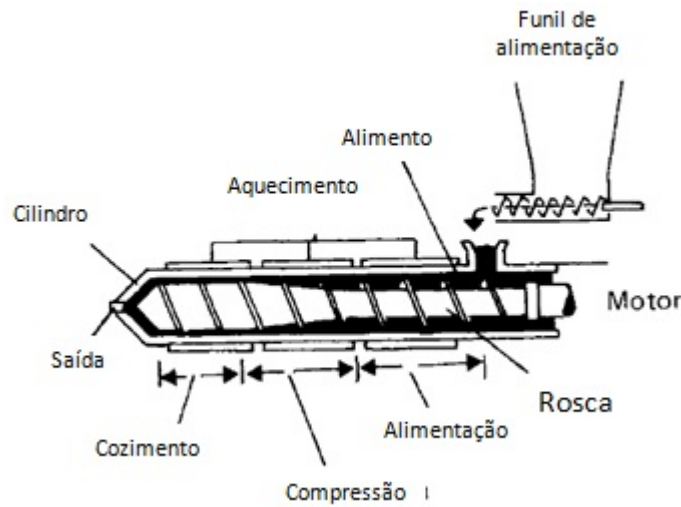


Figura 2.2: Esquema de extrusora de rosca simples (FELLOWS, 2000).

Em um sistema de extrusão com rosca simples, existem várias seções na rosca, com diferentes “passos”, ou seja, com diferentes espaçamentos entre as roscas, onde cada uma delas têm sua função. A Figura 2.3 apresenta um esquema de uma rosca extrusora.

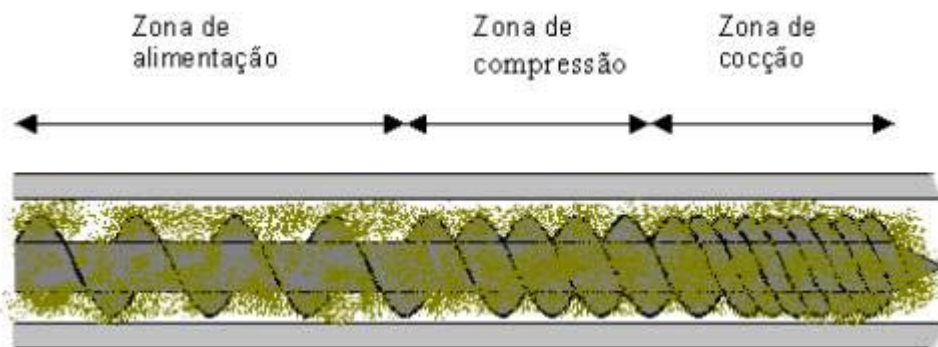


Figura 2.3: Imagem ilustrativa de uma rosca extrusora, com diferentes seções.

A primeira seção é de alimentação, onde os materiais são agrupados no extrusor; é nessa etapa que o material do pré condicionador é recebido, bem como onde os outros ingredientes, como carne e gorduras, são acrescentados. A segunda seção é de transição, onde o material começa a sofrer compressão e inicia-se o cozimento, modificando a estrutura do alimento; é nessa seção que são acrescentados a água e o vapor ao produto. A seção final da rosca é a região de mais elevada pressão, onde há alto cisalhamento e mistura do alimento (HELDMAN e HARTEL, 1998).

A massa cozida sai pela matriz e passa por um conjunto de facas. Ao passar pela matriz o produto sofre uma expansão instantânea, ocasionada pela diminuição brusca de pressão. Nessa etapa, o produto já tem formato e tamanho desejados. As partículas são encaminhadas diretamente, através de um tubo pneumático, até o braço espalhador do secador (YAMANAKA e BARBOZA, 2011).

Conforme comentado anteriormente, o processo de extrusão é seguido por uma etapa de secagem, que tem a finalidade de diminuir a umidade do produto final para fins

de embalagem, transporte e, principalmente, conservação. Um dos equipamentos mais utilizados no processo de secagem de *pet food* é o secador contínuo de esteiras horizontais. O produto enviado da extrusora é espalhado através de um braço por toda a largura da esteira, que se move lentamente, e é seco através do ar aquecido (geralmente entre 90 e 180 °C) que passa através do leito de produto. A grande maioria deste tipo de secadores tem um sistema de recirculação de ar e um sistema de exaustão, para retirada do ar saturado. O secador pode ter uma ou mais esteiras.

Ao sair do secador, o produto passa, ainda, pelo processo de recobrimento com óleo. Este processo tem o objetivo de melhorar a palatabilidade do produto e aumentar seu teor de gordura. Para tanto, o produto sai do secador e segue para um cilindro rotativo no qual o óleo é distribuído através de *spray's*.

A última etapa, antes de seguir para o empacotamento, é a etapa de resfriamento do produto. Esta etapa é fundamental a fim de evitar que a umidade contida no ar quente e no residual de umidade do alimento condensem após o resfriamento do produto na embalagem, causando possíveis problemas de fungos no produto final.

Uma vez que o foco do presente trabalho é a etapa de secagem, uma maior ênfase será dada a este assunto, a seguir.

2.2 Secagem de Alimentos

A secagem refere-se à remoção de um líquido de um sólido por evaporação (PERRY, 1980). No caso dos alimentos, a secagem é usada como técnica de preservação, ou seja, a água é removida para interromper ou desacelerar o crescimento de microrganismos que causam a deterioração do alimento. Além de preservar o alimento, a secagem é usada para reduzir custos ou dificuldades de empacotamento, estocagem e transporte (BARBOSA-CÁNOVAS e VEGA-MERCADO, 1996; GEANKOPLIS, 2010).

Os primeiros registros de utilização de secagem artificial de alimentos são do século XVIII, onde vegetais foram desidratados sob a ação do sol para serem armazenados e enviados para tropas de guerra. Ao longo do tempo, o processo foi sendo utilizado e desenvolvido a partir das necessidades que as guerras exigiam, até que, em 1900, nos Estados Unidos, iniciou-se o desenvolvimento de secadores artificiais (BARBOSA-CÁNOVAS; VEGA-MERCADO, 1996; VAN ARSDEL; COPLEY, 1963).

O entendimento do processo de secagem é facilitado através da definição de alguns conceitos importantes, os quais são apresentados a seguir.

- ***Atividade de água***: descreve o estado da água presente nos alimentos e é um fator muito importante para o crescimento microbiano, pois, abaixo de um valor estabelecido de atividade de água, não há crescimento de microrganismos. Essa propriedade é definida como a razão entre a pressão de vapor de equilíbrio no alimento e a pressão de vapor de saturação, em uma mesma temperatura (BARBOSA-CÁNOVAS; VEGA-MERCADO, 1996).
- ***Temperatura de bulbo úmido***: é a temperatura de equilíbrio dinâmico que uma superfície de água atinge quando a taxa de transferência de calor para a superfície, por convecção, iguala o consumo de calor por transferência de

massa da superfície para o ambiente (PERRY, 1980). Esta temperatura é medida através de um termômetro que fica recoberto com o mesmo líquido que forma o vapor na mistura de vapor e gás (FOUST, 2013).

- Temperatura de bulbo seco: é a temperatura do meio, medida através da imersão de um termômetro (BARBOSA-CÁNOVAS; VEGA-MERCADO, 1996).
- Umidade relativa: é relação entre a pressão parcial do vapor d'água no sistema e a pressão parcial do vapor d'água saturado, na mesma temperatura (BARBOSA-CÁNOVAS; VEGA-MERCADO, 1996).
- Calor úmido: é a quantidade de calor requerida, em *Joule*, para aumentar a temperatura de 1 kg de ar seco, mais o vapor d'água associado, em 1 °C (GEANKOPLIS, 2010).

2.2.1 Taxa de Secagem

O processo de secagem de um material pode ser descrito como uma série de etapas em que a taxa de secagem desempenha um papel fundamental (BARBOSA-CÁNOVAS e VEGA-MERCADO, 1996).

Quando um sólido passa pela etapa de secagem, ocorrem dois processos fundamentais e simultâneos: transferência de calor, para evaporar o líquido, e transferência de massa, na forma de líquido ou de vapor dentro do sólido e na forma de vapor a partir da superfície (PERRY, 1980).

A secagem de uma substância úmida sempre envolve o movimento de uma quantidade de água para fora do corpo. O processo é geralmente considerado resultado de dois fenômenos sucessivos: a migração de água do interior do corpo úmido até sua superfície e o transporte da água vaporizada da superfície para longe do corpo (VAN ARSDEL e COPLEY, 1963).

Na secagem, as moléculas de água devem percorrer o caminho através do alimento até a superfície do mesmo para entrar em contato com o ar de secagem. Uma vez na superfície, as moléculas de água são transferidas para o ar, baseado na diferença de pressão de vapor entre a superfície e o ar. Quando a pressão de vapor do ar alcança o mesmo valor da pressão de vapor na superfície do alimento, a secagem cessa. A curva de secagem pode ser limitada tanto pela taxa interna de migração das moléculas de água para a superfície (difusão), quanto pela evaporação das moléculas de água que já estão na superfície, dependendo das condições de secagem (HELDMAN e HARTEL, 1998).

Os fatores que controlam a taxa de transferência de vapor de água para fora do corpo úmido, quando realizados em uma corrente de ar quente ou numa câmara de vácuo, são determinados pelas características físicas do ambiente, especialmente, pela temperatura, pressão, umidade e velocidade do ar de secagem, e não pelas condições intrínsecas do corpo úmido. Por outro lado, os fatores que determinam a difusão das moléculas de água no interior do corpo podem ser considerados como independentes das condições externas (VAN ARSDEL e COPLEY, 1963).

A curva de secagem é similar para a maioria dos alimentos. Depois de um curto período inicial de equilíbrio, o conteúdo de umidade diminui rapidamente, e quase linearmente, com o tempo. Este período inicial é seguido por um período de taxa de secagem decrescente, no qual a diminuição de umidade com o tempo se dá mais lentamente (HELDMAN e HARTEL, 1998).

A Figura 2.4 mostra uma curva típica de taxa de secagem em função do teor de umidade ao longo do tempo. CRP e FRP representam, respectivamente, os períodos de taxa constante e período de taxa decrescente; X_c representa a umidade na qual a secagem passa do período de taxa constante para o período de taxa decrescente, conhecido como teor de umidade crítico.

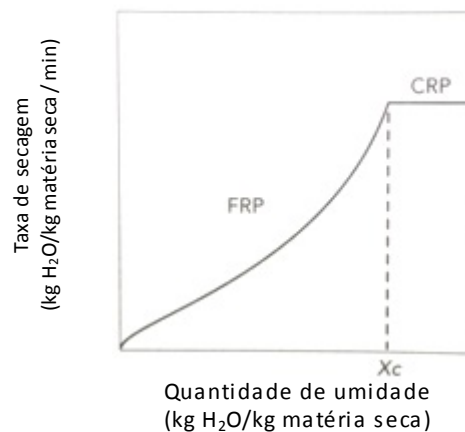


Figura 2.4: Curva típica de taxa de secagem de um produto alimentício (HELDMAN; HARTEL, 1998)

Período de Taxa Constante

O fenômeno de transporte durante a secagem de um material no período de taxa constante ocorre por transferência de massa de vapor de água que está na superfície do material em forma de película para o ar ambiente pela transferência de calor através dos sólidos do alimento (BARBOSA-CÁNOVAS; VEGA-MERCADO, 1996).

O teor de água contido na superfície do sólido é considerado constante e igual à concentração de saturação e a migração de água do interior do produto para a superfície é suficientemente rápida para manter esta concentração. Ou seja, a taxa na qual as moléculas de água chegam na superfície pela migração do interior do sólido é maior ou igual à taxa na qual as moléculas de água são perdidas da superfície para o ar de secagem (HELDMAN e HARTEL, 1998).

A força motriz da secagem no período de taxa constante é a diferença entre a pressão de vapor de água na superfície do alimento (pressão de vapor de saturação) e a pressão de vapor de água no ar de secagem. Conforme comentado anteriormente, os fatores que influenciam a secagem nesta etapa são, principalmente, a velocidade, a temperatura e a umidade relativa do ar de secagem, além do conteúdo inicial de umidade e da área superficial do alimento exposta ao ar de secagem (HELDMAN e HARTEL, 1998).

Quando a migração de umidade do interior do alimento para a superfície for menor do que a vaporização da água na mesma, o período de taxa constante se encerra. A umidade neste ponto é chamada de umidade crítica, como mostrado na Figura 2.4 (HELDMAN e HARTEL, 1998).

Período de Taxa Decrescente

O período de taxa decrescente inicia-se no ponto de umidade crítica. Neste ponto, o teor de água que chega à superfície é insuficiente para manter constante a concentração de saturação; isso acontece porque a perda da umidade na superfície do sólido é mais rápida do que a taxa de difusão das moléculas de água no interior do alimento (GEANKOPLIS, 2010; HELDMAN e HARTEL, 1998).

Nesta etapa, a transferência de massa ocorre por difusão e esta pode ocorrer por diferentes mecanismos. O movimento da umidade através do produto depende tanto da estrutura do poro quanto das interações entre a umidade e o alimento (BARBOSA-CÁNOVAS; VEGA-MERCADO, 1996).

2.2.2 Principais Parâmetros que influenciam na secagem

Existem diversos fatores que influenciam a taxa de secagem, e eles estão relacionados com as condições do processo e com a natureza do alimento a ser seco. Mudanças nas condições de operação de um secador podem afetar a qualidade dos produtos, por isso é importante escolher as condições corretas para uma determinada qualidade e custos ideais da secagem (HELDMAN e HARTEL, 1998; JANGAM, LAW e MUJUMDAR, 2010).

Quanto às condições do processo, deve ser levado em conta o tipo de secador a ser utilizado, bem como as condições de operação do mesmo. Dentre as condições de operação estão a temperatura, a velocidade, a umidade relativa e a pressão do ar de secagem. Cada um dos fatores será apresentado a seguir (HELDMAN e HARTEL, 1998).

- Temperatura: a secagem é aprimorada através da elevação da temperatura. A umidade relativa do ar, em um certo teor de umidade, diminui com o aumento da temperatura. Temperaturas mais elevadas favorecem tanto o período de taxa constante quanto o período de taxa decrescente. No primeiro, a taxa de secagem aumenta devido a uma maior transferência de calor, que resulta em uma maior vaporização. No período de taxa decrescente, o processo de difusão também é mais rápido em temperaturas mais elevadas e as moléculas de água migram mais rapidamente para a superfície. Deve-se, no entanto, observar que uma temperatura excessivamente alta pode causar reações físicas ou químicas não desejadas no alimento. Dessa forma, deve ser estudado o limite para cada tipo de produto.
- Velocidade do ar: a velocidade com a qual o ar de secagem sopra através da superfície do produto impacta na taxa de migração da umidade da superfície para o ar. A evaporação é reforçada pelo aumento na taxa de transferência convectiva de massa como resultado do aumento da velocidade do ar. Assim, um acréscimo na velocidade do ar diminui o período de taxa constante. No

entanto, uma vez que o período de taxa decrescente de secagem não se limita pelas condições externas, a velocidade do ar não tem efeito sobre a secagem nesse período.

- **Umidade relativa:** a umidade relativa do ar de secagem afeta diretamente o período de taxa constante de secagem, pois afeta a força motriz deste período, que é a diferença de umidade entre a superfície úmida do produto e o ar de secagem. Um aumento na umidade relativa do ar diminui a força motriz e, conseqüentemente, reduz a taxa de secagem no período de taxa constante. Da mesma forma que ocorre com a velocidade do ar, a umidade relativa não exerce influência sobre a secagem no período de taxa decrescente, no qual a transferência interna de massa limita a taxa de secagem. Levando em conta todo o processo de secagem, a umidade relativa do ar é o parâmetro que determina a umidade de equilíbrio do produto ao final do processo, quando este é levado até o fim, ou seja, quando a umidade do ar e do alimento atingem o equilíbrio.
- **Pressão:** este parâmetro influencia a relação de equilíbrio da água, e, assim, pode influenciar a secagem. Quando a secagem ocorre sob vácuo, a pressão de vapor é reduzida e a secagem ocorre mais rapidamente no período de taxa constante. No entanto, quando a secagem é limitada pela transferência de massa, ou seja, no período de taxa decrescente, este parâmetro também não exerce influência.

Na Tabela 2.1 estão resumidos os efeitos das condições de operação na secagem, tanto para o período de taxa constante quanto para a taxa decrescente.

Tabela 2.1: Efeitos causado pelo aumento das condições de operação nos períodos de taxa de secagem constante (R_C) e decrescente (R_D)

Parâmetro	R_C	R_D
Aumento da temperatura	Aumenta a taxa, pois aumenta a força motriz	Aumenta a taxa, pois aumenta a difusividade mássica
Aumento da velocidade do ar	Aumenta a taxa, pois aumenta a convecção	Não influencia
Aumento da umidade relativa	Diminui a taxa, pois diminui a força motriz	Não influencia
Aumento da pressão	Diminui a taxa, pois diminui a força motriz	Não influencia

Fonte: (HELDMAN e HARTEL, 1998).

Quanto à natureza do alimento, a seguir são expostos os principais parâmetros que podem exercer influência sobre a secagem.

- Área superficial: quanto menor a distância que a molécula de água deve percorrer para chegar à superfície do produto, mais rápida é a secagem do alimento. Quando o produto está em fatias ou cubos menores, tendo a área superficial aumentada, a secagem é facilitada, pois a distância que a água deve percorrer no interior do alimento é menor, o que aumenta a taxa de secagem no período de taxa decrescente. Quanto maior é a relação entre a área superficial e o volume do corpo, mais curto será o período de taxa constante.
- Orientação dos constituintes: a orientação das microestruturas do alimento afeta o transporte da umidade no interior do mesmo. A migração da umidade pode ter uma diferença significativa em diferentes direções e velocidades, dependendo da orientação dos componentes do alimento.
- Estrutura celular: na maioria dos alimentos, uma porção de água fica no interior das células, enquanto a água remanescente fica externa às células, o que corresponde à interface da estrutura celular. Essa última é mais facilmente removida durante a secagem, porque a remoção da água do interior das células é dificultada por uma resistência adicional dependendo, primeiramente, da migração da umidade através da membrana celular.
- Tipo e concentração dos solutos: os componentes que compõem o alimento determinam a mobilidade das moléculas de água durante a secagem, particularmente em baixos teores de umidade. Os solutos dos alimentos, como açúcares, amidos, sais e proteínas, interagem com as moléculas de água e podem inibir sua mobilidade. Isso ocorre especialmente em altas concentrações de soluto e resulta em produtos com baixa viscosidade e baixa atividade de água, diminuindo as taxas de transporte de umidade e, conseqüentemente, secando o produto de forma mais lenta.

Diversos autores estudaram a influência de diferentes parâmetros de processo na secagem de variados tipos de produtos. Os trabalhos sobre o processo de secagem para a produção de *pet food*, entretanto, são escassos na literatura.

Em um dos poucos trabalhos sobre *pet food* encontrados na literatura, TRAN, HENDRIKS e VAN DER POEL (2011) realizaram um estudo sobre a influência da temperatura e diferentes tempos de secagem sobre a qualidade de produtos extrusados para cães e gatos. Os testes foram realizados com partículas de 4 e 8 mm, com temperaturas de secagem de 80, 120, 160 e 200°C e com tempos de secagem necessários para alcançar umidades finais de 60 e 90 g umidade/kg de massa de produto. Segundo os autores, para alcançar a umidade de 60 g/kg, o tempo requerido foi maior do que para 90 g/kg e as partículas de 4 mm precisaram de um tempo maior do que as de 8 mm para alcançarem a umidade final. Os autores também observaram que a secagem a altas temperaturas (160 – 200°C) podem afetar de forma significativa o conteúdo de alguns nutrientes no alimento, embora a massa específica e a dureza dos produtos estudados não tenham sido afetadas pela variação da temperatura. Por fim, os mesmos destacam que o tempo de secagem não exerceu influência sobre o valor nutritivo do alimento.

SIMIONI, OLIVEIRA e PAGNUSSATT (2004) realizaram um estudo de secagem de grãos de aveia branca em diferentes temperaturas do ar (60, 85 e 110°C) e umidade final (11, 13 e 15%) para avaliar o desempenho energético no processo de secagem. Os pesquisadores observaram que o período de duração da secagem diminuiu com o

aumento da umidade final dos grãos e temperatura do ar de secagem. A velocidade de remoção de água mostrou-se decrescente com o decorrer da secagem. O maior consumo de energia deu-se com as condições de temperatura e umidade finais de 60°C e 11%, respectivamente, devido ao maior tempo necessário para alcançar as condições finais desejadas, em função da menor taxa de remoção de água.

NALESNIK *et al.* (2007) avaliaram os efeitos da secagem sobre as propriedades da proteína concentrada e isolada de soja. Os produtos extrusados, com umidade inicial de 30 e 37% base úmida (bu) foram secos até umidade final de 21% (bu) a 40 °C e até 14% (bu), a 70 °C. Não houve influência significativa sobre a coloração dos produtos. A massa específica do concentrado de soja aumentou ligeiramente com o tempo de secagem para as temperaturas de 40 e 70 °C, e, para a proteína isolada, apenas na temperatura de 70°C. Os autores observaram que o fator que influenciou diretamente na escolha dos tempos e temperaturas de secagem das proteínas de soja é a textura do produto, que sofre variações significativas de acordo com as condições do processo.

CASSINI (2004) realizou o estudo das isotermas de sorção e das curvas de secagem de três tipos de proteínas texturizadas de soja. No estudo das curvas de secagem, foram variados os parâmetros de temperatura do ar de secagem (90, 110 e 130 °C), velocidade do ar de secagem (100, 125 e 150 cm.s⁻¹) e altura da camada de produto (alturas diferentes para cada tipo de amostra, *h1* e *h2*, em cm). O autor observou que a secagem dos produtos estudados se deu unicamente na fase de taxa decrescente de secagem e, nestas condições, a temperatura do ar de secagem e altura de camada de produto, mostraram-se como parâmetros significativos no processo; a velocidade do ar, conforme era esperado, não apresentou influência. As curvas foram ajustadas a um modelo exponencial de duas constantes e a um modelo estático de 10 constantes, que permitiram prever as curvas de secagem dos produtos estudados.

CORAZZA e NEITZEL (2003) desenvolveram um modelo industrial para um secador do tipo esteira de uma indústria de gelatinas, sendo que o leito de produto foi considerado poroso. O modelo proposto para descrever a secagem no leito poroso foi adaptado do modelo de Neitzel (1987), sendo desenvolvido para uma das câmaras de secagem do secador. As variações de umidade foram consideradas unidimensionais e as variáveis da secagem foram funções do tempo e do comprimento do secador.

2.2.3 Equipamentos de Secagem

Existem muitos tipos de secadores e vários deles podem funcionar muito bem para diferentes tipos de produtos alimentícios. A escolha do secador está baseada em muitos fatores, incluindo características do alimento a ser seco (líquido, sólido, particulado, entre outros), economia, custo de capital, entre outros. Todos os secadores desenvolvidos pelas indústrias, por mais que tenham particularidades diferentes entre si, operam com os mesmos princípios gerais de transferência de calor e massa (HELDMAN e HARTEL, 1998).

Mais de 400 tipos de secadores estão listados nas literaturas técnicas, enquanto apenas 50 são comumente encontrados na indústria.

A configuração básica de um secador que trabalha à pressão atmosférica é uma câmara de secagem, onde o alimento é colocado, equipada com ventiladores e dutos que

permitem a circulação do ar aquecido ao redor e através do alimento. O ar é aquecido através da passagem por trocadores de calor ou pela mistura direta com gases de combustão. Este tipo de secador é usado largamente na produção de biscoitos, frutas e vegetais secos e alimentos para animais (BARBOSA-CÁNOVAS; VEGA-MERCADO, 1996).

Os secadores podem ser classificados de acordo com diversos critérios. A Tabela 2.2 lista os critérios e tipos de secadores mais comuns.

Tabela 2.2: Classificação dos secadores

Critérios	Tipos
Modo de operação	<ul style="list-style-type: none"> • Bateladas • Contínuo
Tipo de entrada de calor	<ul style="list-style-type: none"> • Convecção*, condução, radiação, combinação de modos de transferência de calor • Intermitente ou contínuo* • Adiabático ou não adiabática
Estado do material no secador	<ul style="list-style-type: none"> • Estacionário • Em movimento, agitado, disperso
Pressão de operação	<ul style="list-style-type: none"> • Vácuo • Atmosférica
Meio de secagem (convecção)	<ul style="list-style-type: none"> • Ar* • Vapor superaquecido • Gases combustíveis
Temperatura de secagem	<ul style="list-style-type: none"> • Abaixo da temperatura de ebulição* • Acima da temperatura de ebulição • Abaixo do ponto de congelamento
Movimento relativo entre meio de secagem e secagem de sólidos	<ul style="list-style-type: none"> • Co-corrente • Contra corrente • Fluxo misto
Número de estágios	<ul style="list-style-type: none"> • Simples • Múltiplos estágios
Tempo de residência	<ul style="list-style-type: none"> • Curto (< 1 minuto) • Médio (1-60 minutos) • Longo (> 60 minutos)

* Mais comumente usados na prática

Fonte: (JANGAM e LAW e MUJUMDAR, 2010)

Tipos de Secadores

Os principais tipos de secadores utilizados na indústria são de bandejas, a vácuo, contínuos de túnel, rotativos, de tambor e *spray dryers* (GEANKOPLIS, 2010).

Na indústria de *pet food*, os secadores mais usados são do tipo contínuo de esteiras e vertical (ROKEY, 2006). Nos secadores de esteiras, o produto é distribuído em uma esteira perfurada, que se move sobre eixos, fazendo a mesma se movimentar dentro do secador. O ar aquecido, em temperaturas normalmente entre 90 e 180°C passa através do leito de produto a uma velocidade entre 40 e 60 m/min. O fluxo de ar pode ser configurado de acordo com as necessidades do processo, podendo ser configurado de forma concorrente, contra-corrente e/ou transversal (ascendente e/ou descendente) à camada de produto. Quando o ar atravessa o produto de forma perpendicular, a secagem é mais rápida, pois ocorre um maior contato do ar aquecido com o alimento.

Este tipo de secador permite a recirculação do ar quente, fazendo com que o ar úmido possa ser aquecido novamente pelos trocadores de calor e utilizado na próxima zona de aquecimento. As fontes de calor para o aquecimento do ar são diversas, utilizando eletricidade, gás, vapor, entre outras. As vantagens de utilizar este tipo de secador são a alta produtividade em relação ao espaço ocupado e o baixo índice de choques, embora a secagem não seja tão uniforme se comparada a outros tipos de secadores. O secador pode apresentar uma ou mais esteiras, dependendo da configuração requerida do layout da planta e das necessidades de secagem do produto (BARBOSA-CÁNOVAS; VEGA-MERCADO, 1996; ROKEY, 2006).

Na Figura 2.5 pode-se observar um secador horizontal contínuo de duas esteiras que apresenta quatro zonas de secagem distintas entre si. O ar aquecido é empurrado para dentro do secador por ventiladores, localizados na parte superior do secador.

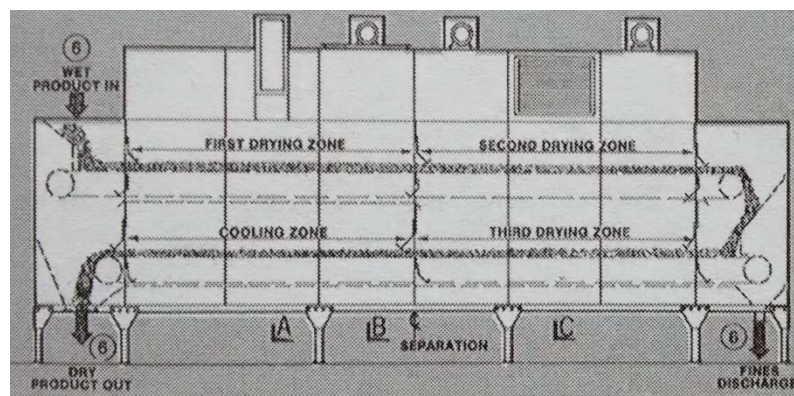


Figura 2.5: Secador contínuo de duas esteiras (BARBOSA-CÁNOVAS; VEGA-MERCADO, 1996).

Alguns processos emergentes de secagem vêm sendo estudados como alternativa aos processos convencionais.

CELMA, LÓPEZ-RODRÍGUEZ e BLÁZQUEZ (2009) descreveram o comportamento de secagem por infravermelho de subprodutos industriais da uva em uma camada fina através de modelos matemáticos. Os experimentos foram realizados em temperaturas de 100, 120, 140 e 160 °C, observando-se um aumento da taxa de secagem em função do

aumento da temperatura. Com isso, houve diminuição do tempo de secagem de 60,5 minutos para 21 minutos. O modelo matemático proposto a partir de uma regressão não linear em conjunto com uma análise de regressão múltipla e os valores das difusividades mássicas para cada temperatura foram obtidos da segunda Lei da Difusão de Fick, e variaram entre $11,013 \times 10^{-9}$ e $26,050 \times 10^{-9}$ m²/s, ao longo da faixa de temperatura.

O experimento foi realizado em um secador com lâmpadas de halogênio, e a amostra foi disposta em uma bandeja, com uma altura de camada de 0,7 cm. A perda de umidade foi registrada a cada 30 s, e o processo foi continuado até umidade final de 38,89% (bs).

A modelagem matemática das curvas de secagem foi feita a partir dos ajustes dos resultados experimentais a modelos matemáticos lineares, potenciais, exponenciais e logarítmicos. O modelo de Midilli, representado pela Equação (2.1), foi o que melhor se ajustou ao comportamento da secagem por infravermelho.

$$M = a \exp(-kt^n) + bt \quad (2.1)$$

3 Materiais e Métodos

3.1 Curvas de secagem

Para a realização deste trabalho foi utilizado como matéria prima um alimento extrusado para cães, fornecido por uma empresa da região do Vale dos Sinos (RS, Brasil). As dimensões das partículas eram de 14 x 8 mm de altura e espessura, respectivamente. O produto pode ser observado na Figura 3.1.



Figura 3.1: Amostra de alimento para cães utilizada nos testes de secagem

O material foi caracterizado com relação à umidade no início e fim de cada experimento de secagem. Para tanto, pesava-se em torno de 8 g de amostra em um recipiente de alumínio (previamente seco e de massa conhecida) e este era colocado em estufa de circulação forçada de ar. As amostras, em duplicata, permaneciam por 3 h sob uma temperatura de 105°C na estufa; a pesagem final era feita na balança da marca Marte balanças e aparelhos de precisão Ltda., modelo AS 5500C, com precisão de 0,01 g.

Para não haver influência da variação da umidade inicial nos resultados das análises, a expressão dos dados de umidade foi dada em função de um adimensional de água livre:

$$X_{adm} = \frac{X}{X_0} \quad (3.1)$$

onde X é o teor de umidade no tempo t e X_0 é o teor de umidade inicial.

As curvas de secagem foram obtidas a partir de experimentos realizados em um secador piloto, com circulação forçada de ar. A Figura 3.2 mostra uma fotografia do secador; os componentes indicados nesta figura estão descritos a seguir:

- 1) ventilador centrífugo de insuflamento, cuja vazão é controlada por um inversor de frequência (vazão máxima de 15 m³ de ar.min⁻¹, em condições ambientes);
- 2) uma resistência elétrica, para aquecimento do ar;

- 3) cabine de secagem com paredes laterais móveis e providas de aberturas (3a e 3b), a fim de tornar possível a inversão da direção do escoamento do ar entre ascendente e descendente; dentro desta, era colocado o cesto para disposição do produto (área = 0,04 m²), com telas de abertura de 7 mm de diâmetro;
- 5) balança semi analítica, marca Marte balanças e aparelhos de precisão Ltda., modelo AS 5500C, com precisão de 0,01 g (capacidade entre 0,5 e 5000 g e precisão de 0,01 g) acoplada ao cesto de produto com isolamento de uma chapa de isopor (5a).

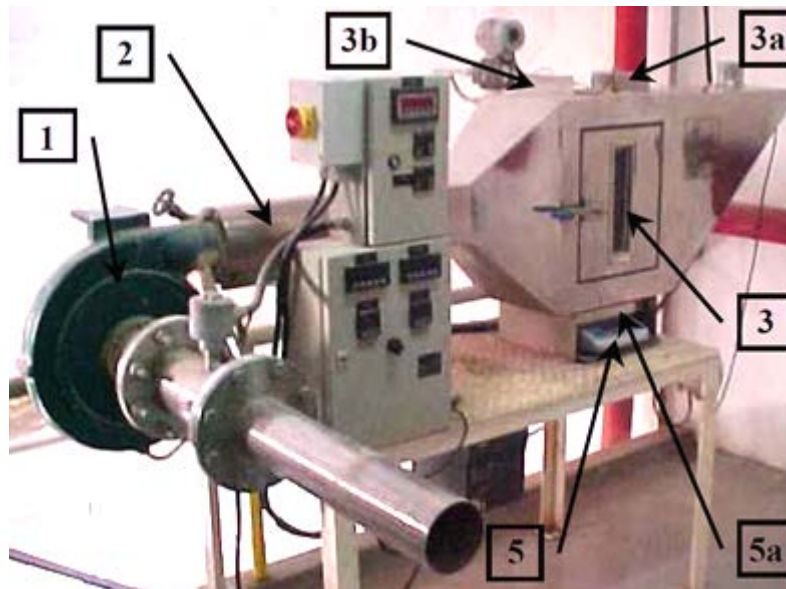


Figura 3.2: Secador piloto utilizado na determinação das curvas de secagem.

O equipamento também possui os seguintes controladores:

- dois medidores de temperatura na entrada do secador, sendo um para escoamento ascendente e outro para escoamento descendente, do tipo PT100, conectados a dois controladores-indicadores PID da marca West, modelo 6100;
- 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 °C ± 0,4 °C, para a temperatura e 0 a 100% ± 2% para a umidade relativa, na saída do secador;
- um medidor de vazão de ar, marca NykonDwyler, cuja faixa de medição varia entre 73,5 e 735 m³.h⁻¹ ± 0,25%.

As amostras de alimento foram coletadas na saída da extrusora e levadas até o laboratório dentro de pacotes fechados, de forma a manter a umidade do produto. As amostras ficaram armazenadas nestes pacotes por, no máximo, 24 horas.

O secador piloto situava-se no Laboratório de Tecnologia e Processamento de Alimentos (LATEPA) do Departamento de Engenharia Química da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (Porto Alegre, RS). A temperatura e umidade relativa do ar foram mantidas constantes devido às necessidades do laboratório.

Os experimentos realizados seguiram os passos descritos a seguir.

- 1) O equipamento era ligado e as temperaturas e vazão do ar era fixadas. Por conseguinte, aguardava-se que as condições se estabilizassem.
- 2) A amostra era acondicionada no cesto de secagem até a altura de camada desejada.
- 3) Desligavam-se, rapidamente, as resistências e o ventilador, inseria-se o cesto com a amostra no interior da cabine de secagem e anotava-se o peso inicial deste.
- 4) Ligava-se o ventilador e as resistências e dava-se início ao experimento.

A cada 90 segundos a massa de produto era anotada, desligando-se rapidamente o ventilador e as resistências, para estabilização da balança. O escoamento do ar de secagem era invertido a cada 270 segundos, a fim de simular as diferentes zonas do secador industrial. O escoamento inicial era ascendente. O final do experimento se deu em 27 minutos, visto que, após esse tempo, a umidade dos produtos já se apresentava inferior a 8 %, a qual corresponde à umidade final desejada aos produtos *pet food*.

As curvas de secagem foram determinadas a partir da variação dos seguintes parâmetros de processo: altura de camada de produto e temperatura do ar. As alturas de camada avaliadas foram de 5 cm e 2,5 cm e as temperaturas foram de 70°C e 100°C. A idéia inicial do presente trabalho era a determinação das curvas de secagem com parâmetros muito próximos daqueles utilizados no secador industrial. Entretanto, devido a limitações do equipamento, acabou-se optando por estes parâmetros. Os valores de altura de camada foram escolhidos em função da limitação superior da balança (5 kg); como o sistema suporte + cesto pesava em torno de 4 kg, não poderia ser adicionada uma massa de produto superior a 1 kg. Em relação à temperatura, pretendia-se avaliar as curvas a 140 °C, entretanto, não foi possível atingir esta temperatura, mesmo em uma baixa velocidade do ar (1 m/s). Assim, a temperatura de 100°C foi escolhida por ser a mais próxima do secador industrial; a temperatura de 70°C foi escolhida aleatoriamente, a fim de avaliar uma possível redução no gasto energético do secador.

A velocidade do ar foi mantida em 1 m/s. A variação deste parâmetro nas curvas de secagem do produto estudado não foi avaliada em função do resultado obtido em trabalhos anteriores. Conforme mencionado anteriormente, CASSINI (2004) determinou as curvas de secagem para três diferentes tipos de proteínas texturizadas de soja (produto muito semelhante as *pet food*), avaliando três velocidades diferentes do ar de secagem (entre 1 e 1,5 m/s) e observou que, uma vez que a secagem destes produtos se dava exclusivamente no período de taxa decrescente de secagem, a velocidade do ar não influenciava a secagem.

Assim, de forma a avaliar a influência dos parâmetros estudados – temperatura do ar de secagem (T) e altura de camada de produto (h) – no processo de secagem utilizou-se um planejamento fatorial de dois fatores (T e h). Este planejamento resultou em um mínimo de 4 experimentos (2×2). A Tabela 3.1 mostra o planejamento realizado com os valores utilizados para cada fator.

Cada experimento foi realizado, no mínimo, em duplicata, resultando num total de 8 experimentos.

O ajuste dos dados obtidos nos experimentos foi realizado a partir de modelos, que serão descritos a seguir.

Tabela 3.1: Faixa de valores estudados para cada fator.

Fatores	(-1)	(+1)
Temperatura (°C)	70	100
Altura de camada (cm)	2,5	5

3.2 Ajuste de dados

Os resultados experimentais da variação da taxa de umidade adimensional *versus* o tempo de secagem foram ajustados para os modelos semi teóricos comumente encontrados na literatura, que são amplamente utilizados em diversos trabalhos para descrever a cinética do processo de secagem. Os modelos matemáticos selecionados estão identificados na Tabela 3.2. Técnicas de regressão não linear foram utilizadas para obter as constantes específicas de cada modelo selecionado, utilizando o *Statistica 12*, com base no método de Levenberg-Marquardt. O coeficiente de determinação (r^2), a redução do qui quadrado (χ^2) e erro médio quadrático (RMSE) foram calculados para cada modelo, a fim de testar sua precisão em reproduzir os dados experimentais. Valores altos de coeficiente de determinação (r^2) e valores baixos de qui quadrado (χ^2) e RMSE indicam boa qualidade de ajuste. Estes parâmetros podem ser calculados a partir das equações descritas a seguir.

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - MR_{pre,i})^2}{N-p} \quad (3.2)$$

$$RMSE = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (MR_{pre,i} - MR_{exp,i})^2 \right]^{1/2} \quad (3.3)$$

Tabela 3.2: Modelos utilizados no ajuste dos dados das curvas de secagem

Número do modelo	Nome do modelo	Modelo	Referências
1	Lewis	$MR = \exp(-kt)$	Bruce, <i>apud</i> (CELMA; LÓPEZ-RODRÍGUEZ; BLÁZQUEZ, 2009)
2	Page	$MR = \exp(-k \cdot t^y)$	Page, <i>apud</i> (CELMA; LÓPEZ-RODRÍGUEZ; BLÁZQUEZ, 2009)
3	Henderson e Pabis	$MR = a \cdot \exp(-k \cdot t)$	Henderson e Pabis, <i>apud</i> (CELMA; LÓPEZ-RODRÍGUEZ; BLÁZQUEZ, 2009)
4	Wang e Singh	$MR = 1 + k \cdot t + y \cdot t^2$	Wang e Singh, <i>apud</i> (CELMA; LÓPEZ-RODRÍGUEZ; BLÁZQUEZ, 2009)
5	Logarithmic	$MR = a \cdot \exp(-k \cdot t) + y$	Togrul e Pehlivan, <i>apud</i> (CELMA; LÓPEZ-RODRÍGUEZ; BLÁZQUEZ, 2009)

onde $MR_{exp,i}$ é a umidade adimensional obtida experimentalmente, $MR_{pre,i}$ é a umidade adimensional predita pelo modelo, N é o número de pontos de dados experimentais (19) e p é o número de constantes do modelo (CELMA; LÓPEZ-RODRÍGUEZ; BLÁZQUEZ, 2009).

Uma análise de variância também foi realizada (a um nível de 90% de confiança) a fim de avaliar se a influência dos parâmetros estudados, bem como o efeito da interação entre eles, era ou não estatisticamente significativa na obtenção das constantes dos modelos que apresentaram o melhor ajuste.

4 Resultados

4.1 Curvas de Secagem

As Figura 4.1 a Figura 4.4 apresentam as curvas de secagem obtidas para a amostra de *pet food*, nas quais a influência da variação dos parâmetros testados – altura da camada de produto (h) e temperatura do ar de secagem (T) – na diminuição da umidade é avaliada. Nestas figuras, as linhas cheias representam o ajuste dos dados experimentais ao modelo de Page, o qual será discutido na seção 4.2.

A Figura 4.1 apresenta a curva de umidade adimensional (X/X_0) com a influência da altura de camada de produto (entre 2,5 e 5 cm) em função do tempo, para as condições constantes de temperatura do ar de secagem em 70°C. A análise do gráfico permite observar que, quanto maior a altura de camada do produto, mais lenta é a diminuição de umidade, ou seja, mais lenta é a secagem. Além disto, para a altura de camada de 2,5 cm, o tempo para se chegar na umidade adimensional em torno de 0,5 é de 16 minutos, sendo que o tempo necessário, para se chegar na mesma umidade com a altura de camada de 5 cm é de 26 minutos.

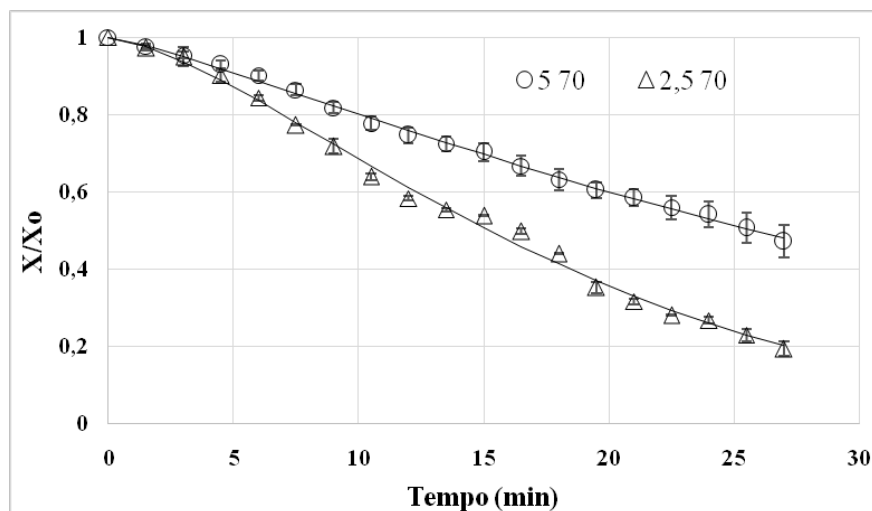


Figura 4.1: Influência da altura de camada de produto na curva de secagem ($T=70^{\circ}\text{C}$) e ajuste do modelo de Page

A Figura 4.2 apresenta a curva de influência da altura de camada de produto em função do tempo para a temperatura de ar constante e igual a 100°C. Pode-se verificar que também há uma redução do tempo de secagem para uma menor altura de camada, mas a influência da altura de camada, neste caso, não é tão pronunciada. Uma hipótese para este comportamento é a influência da temperatura na secagem, a qual será discutida a seguir.

A análise da influência da temperatura do ar de secagem na obtenção das curvas de secagem pode ser observada nas Figura 4.3 e Figura 4.4, nas quais são mantidas constantes a altura de camada em 5 e 2,5 cm, respectivamente.

Observa-se nestas duas figuras, que apenas para a altura de camada de 5 cm existe uma influência da variação de temperatura, enquanto que para a altura de 2,5 cm a variação é bastante sutil. Isso pode ser explicado devido ao fato de que a secagem é mais efetiva na menor altura de camada, no caso, 2,5 cm, enquanto que para 5 cm a secagem

é um pouco mais lenta, possibilitando a influência da variação de temperatura do ar de secagem. Levando em consideração que, para o processo industrial, a altura de camada será igual ou superior a 5 cm, a temperatura é um fator importante que influencia o processo de secagem. Observa-se na Figura 4.3 que para alcançar uma umidade adimensional em torno de 0,5 o produto demora 27 minutos com o ar de secagem na temperatura de 70°C, enquanto que, com o ar a 100°C, o tempo reduz para 21 minutos.

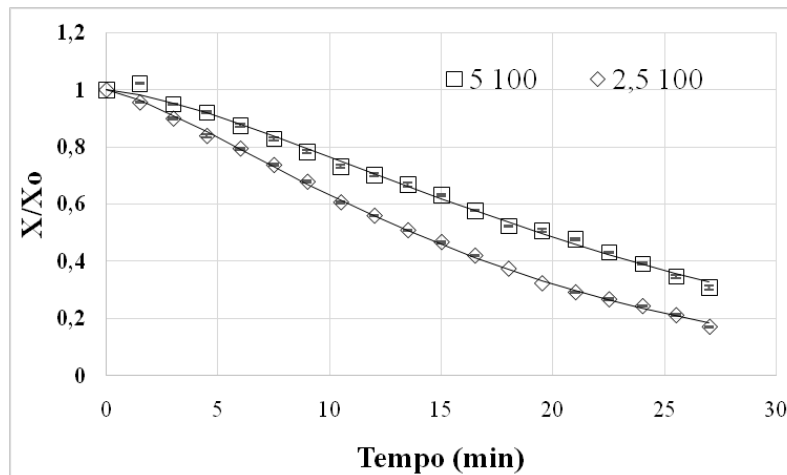


Figura 4.2: Influência da altura de camada de produto na curva de secagem ($T=100^{\circ}\text{C}$)

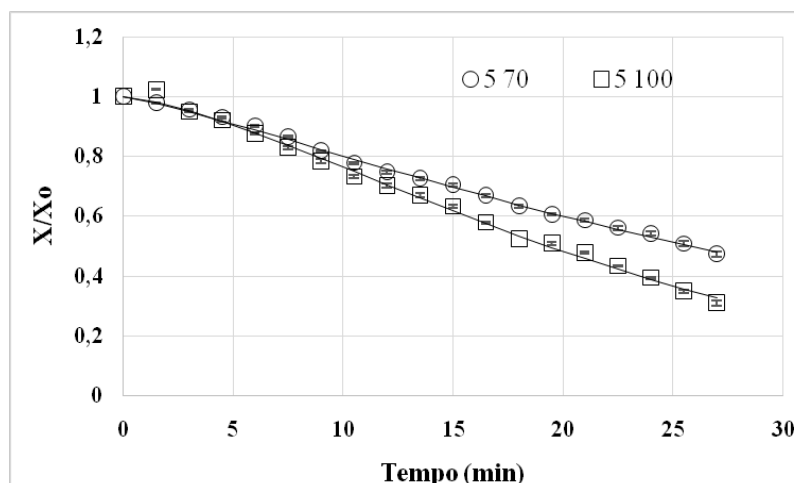


Figura 4.3: Influência da temperatura do ar de secagem na curva de secagem ($h = 5 \text{ cm}$)

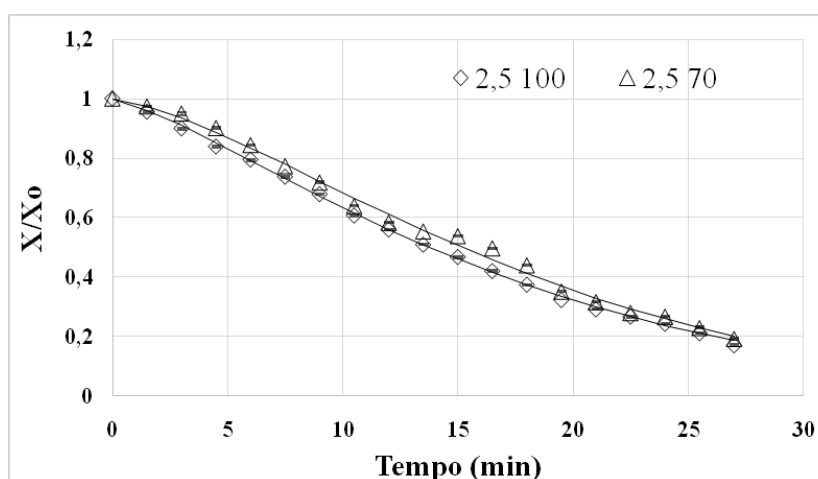


Figura 4.4: Influência da temperatura do ar de secagem na curva de secagem ($h = 2,5 \text{ cm}$)

De uma maneira geral, através da análise das figuras apresentadas, observa-se uma forte influência da altura de camada do produto e uma influência menos pronunciada, mas existente, da temperatura do ar de secagem na diminuição da umidade adimensional do alimento com o tempo.

4.2 Ajuste dos dados experimentais

Uma modelagem eficiente das curvas de secagem é altamente relevante em um processo de secagem (CELMA; LÓPEZ-RODRÍGUEZ; BLÁZQUEZ, 2009).

A partir da obtenção experimental das curvas de secagem, foi testado o ajuste dos dados de umidade adimensional versus o tempo aos modelos descritos na Tabela 3.2. Os resultados destes ajustes estão apresentados na Tabela 4.1. Nesta tabela são mostrados os valores obtidos para as constantes dos modelos (k , γ e a), além do coeficiente de determinação (r^2) e dos valores obtidos de qui quadrado (χ^2) e $RMSE$ para cada conjunto de parâmetros, onde T ($^{\circ}\text{C}$) é a temperatura do ar de secagem e h (cm) é a altura de camada de produto.

Tabela 4.1: Resultado do ajuste dos dados experimentais aos modelos de secagem.

Número do modelo	Parâmetros de secagem		Constante			r^2	χ^2	$RMSE$
	h (cm)	T ($^{\circ}\text{C}$)	k	γ	a			
1	5	70	0,0250			0,9921	0,0004	0,0206
	2,5	70	0,0471			0,9751	0,0036	0,0582
	5	100	0,0343			0,9766	0,0024	0,0474
	2,5	100	0,0527			0,9873	0,0018	0,0415
2	5	70	0,0136	1,2102		0,9989	0,0001	0,0077
	2,5	70	0,0132	1,4544		0,9976	0,0004	0,0180
	5	100	0,0099	1,4332		0,9981	0,0002	0,0137
	2,5	100	0,0223	1,3124		0,9996	0,0001	0,0073
3	5	70	0,0270	1,0337		0,9964	0,0002	0,0139
	2,5	70	0,0533	1,0938		0,9860	0,0021	0,0438
	5	100	0,0393	1,0804		0,9892	0,0012	0,0323
	2,5	100	0,0574	1,0669		0,9925	0,0011	0,0318
4	5	70	-0,0204	0,0000		0,9978	0,0001	0,0109
	2,5	70	-0,0327	0,0001		0,9951	0,0008	0,0259
	5	100	-0,0230	-0,0001		0,9966	0,0004	0,0181
	2,5	100	-0,0404	0,0003		0,9987	0,0002	0,0135
5	5	70	0,0099	-1,2844	2,3004	0,9984	0,0001	0,0092
	2,5	70	0,0145	-1,6161	2,6545	0,9965	0,0006	0,0218
	5	100	0,0028	-8,7588	9,7924	0,9982	0,0002	0,0131
	2,5	100	0,0270	-0,6352	1,6584	0,9989	0,0002	0,0121

Como pode-se observar nesta tabela, para todos os modelos testados, os valores de r^2 se aproximaram da unidade (superiores a 0,97), enquanto que os valores obtidos de χ^2 e $RMSE$ foram bastante baixos em todos os casos, o que caracteriza um bom ajuste dos

dados experimentais a todos os modelos testados. O modelo que apresentou o melhor resultado, entretanto, foi o modelo de Page, número 2 da Tabela 4.1. Este modelo acompanhou melhor as variações ocorridas durante o processo do que os outros modelos. O ajuste dos dados experimentais ao modelo de Page pode ser observado nas figuras 4.1 a 4.4, através das linhas cheias destes gráficos.

4.3 Análise de Variância

Conforme mencionado anteriormente, uma análise de variância (ANOVA) foi realizada a fim de verificar se os efeitos dos parâmetros estudados (temperatura do ar de secagem e altura de camada de produto), bem como o efeito combinado de ambos os parâmetros eram ou não significativos para a obtenção das constantes k e y do modelo de Page.

A Tabela 4.2 apresenta o resultado da análise (valores de F calculado e F tabelado) para estes efeitos, a um nível de 90% de confiança. Se o valor de F calculado for maior que o de F tabelado, o efeito é considerado estatisticamente significativo.

Tabela 4.2: Resultado da ANOVA para as constantes do modelo de Page.

<i>Constante k</i>			<i>Constante y</i>		
Efeito	F calc	F tab	Efeito	F calc	F tab
T	0,72	4,54	T	0,20	4,54
h	3,53	4,54	h	0,46	4,54
$T+h$	4,00	4,54	$T+h$	4,00	4,54

Como pode ser observado nesta tabela, nenhum dos fatores avaliados apresentou efeito estatisticamente significativo, a um nível de confiança de 90%, na obtenção das constantes do modelo de Page.

Valores muito próximos de F calculado e F tabelado, entretanto, foram obtidos para a altura de camada de produto e para o efeito combinado desta, com a temperatura, principalmente na obtenção da constante k do modelo de Page; isso comprova, portanto, o maior efeito da altura de camada na curva de secagem, visualizado nos gráficos.

Em função destes resultados, testou-se, também, através da análise de variância, o efeito da variação dos parâmetros na obtenção da constante do modelo mais clássico de secagem, o modelo exponencial de uma constante, ou seja, o modelo de Lewis (modelo 1, apresentado nas tabelas 3.2 e 4.1). Este modelo também apresentou resultados muito bons quanto ao ajuste aos dados experimentais obtidos, conforme pode ser observado na Tabela 4.1.

A Tabela 4.3 apresenta o resultado da ANOVA (valores de F calculado e F tabelado) para os mesmos efeitos, a um nível de 90% de confiança, para obtenção da constante k do modelo de Lewis.

Como pode ser observado nesta tabela, para a obtenção da constante k do modelo de Lewis, ambos os parâmetros apresentaram-se como estatisticamente significativos; o valor do F calculado para a altura de camada, entretanto, apresentou-se muito superior ao valor de F calculado para a temperatura, corroborando os resultados observados nos gráficos das figuras 4.1 a 4.4.

O efeito de interação entre os dois parâmetros, entretanto, não se apresentou como estatisticamente significativo.

Tabela 4.3: Resultado da ANOVA para a constante do modelo de Lewis.

Constante k		
Efeito	F calc	F tab
T	48,5	4,5
h	386,8	4,5
$T+h$	4,0	4,5

4.4 Taxa de Secagem

A taxa de secagem é expressa como a quantidade de água evaporada ao longo do tempo (kg água/kg sólido seco/segundo). Como pode ser observado na Figura 4.5, a taxa de secagem do produto avaliado, nas condições testadas, não apresenta nenhuma região constante, ou seja, para a secagem desta amostra de *pet food*, o processo de secagem se dá inteiramente pela difusão da água no interior do produto (na região de taxa decrescente de secagem).

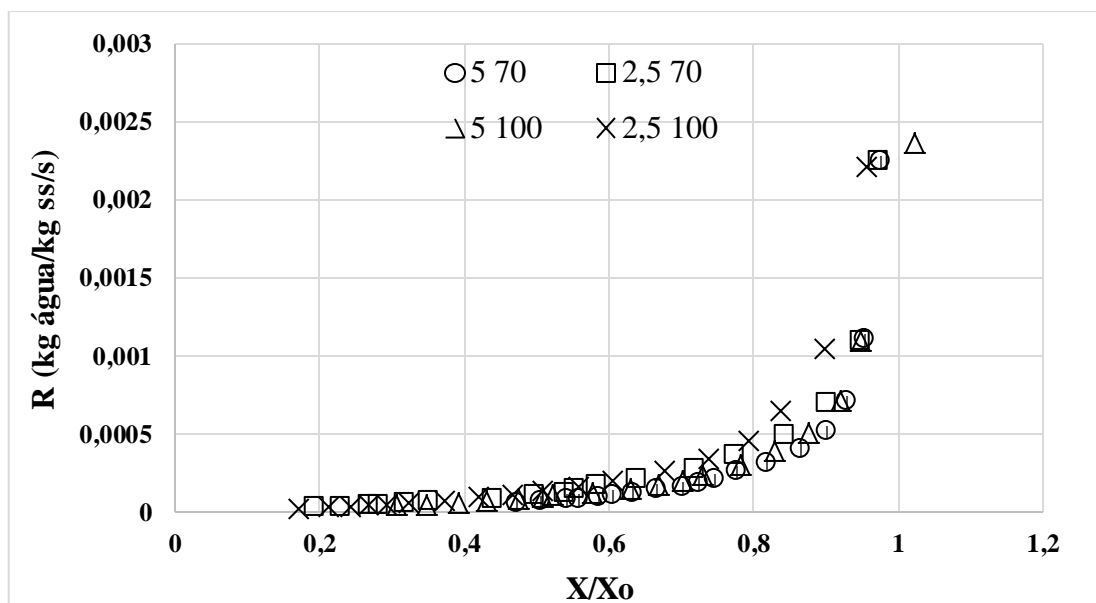


Figura 4.5: Taxa de secagem do *pet food* versus a umidade adimensional, para as quatro condições experimentais estudadas.

Os resultados experimentais obtidos coincidem com outros publicados na literatura, relativos a experimentos realizados com produtos de semelhante formulação ou outros processos de secagem, por exemplo, proteína texturizada e concentrada de soja (CASSINI, 2004; NALESNIK et al., 2007), aveia branca (SIMIONI; OLIVEIRA; PAGNUSSATT, 2004), *pet food* (TRAN; HENDRIKS; VAN DER POEL, 2011).

5 Conclusões e Trabalhos Futuros

Neste trabalho, foi estudada a influência da temperatura do ar de secagem e da altura de camada de produto em um processo de secagem de *pet food*, em um secador piloto. Foram variados os parâmetros de temperatura em 70 e 100°C e a altura de camada de produto, entre 2,5 e 5 cm. A partir do ajuste das curvas a diversos modelos exponenciais e logarítmico, foi possível escolher um modelo que se ajustou de forma adequada aos dados, e que pode prever as curvas de secagem nas condições estudadas.

As curvas de secagem obtidas mostraram que o parâmetro que mais influencia o processo de secagem do *pet food* é a altura de camada do produto dentro do secador. A temperatura do ar de secagem também é um parâmetro importante, porém sua influência não foi observada para alturas de camada muito baixas. Entretanto, especula-se que a pouca influência deste parâmetro foi devido ao pequeno intervalo de temperaturas utilizado e também a problemas operacionais do equipamento.

As curvas de secagem obtidas se ajustaram muito bem aos diferentes modelos testados; o modelo de Page foi o que gerou melhores resultados de r^2 e dos demais parâmetros. Este modelo acompanhou muito bem as variações ocorridas durante o processo, representando muito bem as curvas nas condições avaliadas.

Apesar da influência visual dos parâmetros estudados, a análise de variância, a um nível de 90% de confiança demonstrou que a influência dos parâmetros estudados não foi estatisticamente significativa na obtenção das constantes do modelo de Page.

Para o modelo de Lewis, que é um modelo mais clássico de secagem, verificou-se que os parâmetros apresentaram significância estatística para a obtenção da constante k do modelo, a um nível de confiança de 90%.

Os próximos trabalhos que podem ser realizados a partir dos estudos apresentados até aqui são avaliações com alturas de camada mais elevadas e temperaturas do ar de secagem com maior intervalo entre elas, a fim de se aproximarem mais dos parâmetros de secadores industriais. Para isso, entretanto, ajustes no equipamento piloto são fundamentais.

Poderão também se realizar testes com alimentos de formulações variadas, bem como de tamanhos e formas diferentes, a fim de avaliar a influência das características físicas e químicas do alimento no processo de secagem.

6 Referências

Abinpet. Disponível em: <<http://abinpet.org.br/>>. Acesso em 06/08/2015.

BARBOSA-CÁNOVAS, G. V.; VEGA-MERCADO, H. **Dehydration of Foods**. New York, NY: International Thomson Publishing, 1996.

BUHLER. **Petfood. Production plants from a single source**. [s.l.: s.n.].

CASSINI, A. S. **Análise das Características de Secagem da Proteína Texturizada de Soja**. [s.l.] Dissertação de Mestrado. Universidade do Rio Grande do Sul, 2004.

CELMA, A. R.; LÓPEZ-RODRÍGUEZ, F.; BLÁZQUEZ, F. C. Experimental modelling of infrared drying of industrial grape by-products. **Food and Bioproducts Processing**, v. 87, n. 4, p. 247–253, 2009.

CORAZZA, F. D. C.; NEITZEL, I. Modelagem de secador do tipo esteira : uma aplicação industrial. **Acta Scientiarum Technology**, v. 2, n. 2, p. 133–140, 2003.

FELLOWS, P. J. **Food processing technology**. Cambridge: Woodhead Publishing Limited, 2000.

FOUST, A. S. **Princípios das Operações Unitárias**. Rio de Janeiro: LTC, 2013.

GEANKOPLIS, C. J. **Transport Processes and Separation Process Principles**. 4. ed. Westford, Massachusetts: [s.n.].

HELDMAN, D. R.; HARTEL, R. W. **Principles of Food Processing**. Gaithersburg, Maryland: Aspen Publishers, 1998.

JANGAM, S. V.; LAW, C. L.; MUJUMDAR, A. S. **Classification and Selection of Dryers for Foods**. [s.l.: s.n.].

NALESNIK, C. A et al. The effects of drying on the properties of extruded whey protein concentrates and isolates. **Journal of Food Engineering**, v. 80, p. 688–694, 2007.

PERRY, R. H. **Chemical Engineer's Handbook**. Rio de Janeiro: Guanabara Dois S.A., 1980.

Pet Brasil. Disponível em: <<http://www.petbrasil.org.br/associado/segmento>>. Acesso em 06/08/2015.

ROKEY, G. J. Pet food production . Process description. p. 1–20, 2006.

SIMIONI, D.; OLIVEIRA, M. DE; PAGNUSSATT, F. A. PARÂMETROS OPERACIONAIS NA SECAGEM INTERMITENTE DE AVEIA BRANCA CULTIVAR UPFA 20 TEIXEIRINHA. p. 497–502, 2004.

TRAN, Q. D.; HENDRIKS, W. H.; VAN DER POEL, A. F. B. Effects of drying temperature and time of a canine diet extruded with a 4 or 8mm die on physical and nutritional quality indicators. **Animal Feed Science and Technology**, v. 165, n. 3-4, p. 258–264, 2011.

VAN ARSDEL, W. B.; COPLEY, M. J. **Food Dehydration**. Vol. 1 ed. London, England: AVI Publishing Company, 1963.

YAMANAKA, E. S.; BARBOZA, R. A. B. Pet food : alimentos convencionais e orgânicos. 2011.