

Universidade Estadual de Maringá



CENTRO DE TECNOLOGIA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

JULIANO KATAYAMA GROFF

**Redimensionamento e análise térmica de equipamento de secagem contínua
utilizando princípios fundamentais de transferência de massa e calor**

PEM
Pós-Graduação em Engenharia Mecânica | UEM

**Maringá
2015**

JULIANO KATAYAMA GROFF

**Redimensionamento e análise térmica de equipamento de secagem contínua
utilizando princípios fundamentais de transferência de massa e calor**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica do Departamento de Engenharia Mecânica, Centro de Tecnologia da Universidade Estadual de Maringá, como requisito parcial para obtenção do título de mestre em Engenharia Mecânica.

Área de concentração: Ciências Térmicas

Orientador: Prof. Dr. Oswaldo Curty da Motta Lima
Coorientadora: Prof.^a Dr.^a Luiza Helena Costa Dutra
Sousa

**Maringá
2015**

"Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)"
(Biblioteca Setorial - UEM. Nupélia, Maringá, PR, Brasil)

G874r Groff, Juliano Katayama, 1986-
Redimensionamento e análise térmica de equipamento de secagem contínua utilizando princípios fundamentais de transferência de massa e calor / Juliano Katayama Groff. -- Maringá, 2015.
94 f. : il. (algumas color.).
Dissertação (mestrado em Engenharia Mecânica)--Universidade Estadual de Maringá, Dep. de Engenharia Mecânica, 2015.
Orientador: Prof. Dr. Oswaldo Curty da Motta Lima.
Coorientador: Prof.^a Dr.^a Luiza Helena Costa Dutra Sousa.
1. Transferência de calor - Secador convectivo - Gelatina. 2. Gelatina - Processo de secagem - Secador convectivo I. Universidade Estadual de Maringá. Departamento de Engenharia Mecânica. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.

CDD 23. ed. -621.40225
NBR/CIP - 12899 AACR/2

Maria Salete Ribelatto Arita CRB 9/858
João Fábio Hildebrandt CRB 9/1140

Maringá
2015

JULIANO KATAYAMA GROFF

**Redimensionamento e análise térmica de equipamento de secagem contínua
utilizando princípios fundamentais de transferência de massa e calor**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica do Departamento de Engenharia Mecânica, Centro de Tecnologia da Universidade Estadual de Maringá, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica pela Comissão Julgadora composta pelos membros:

COMISSÃO JULGADORA

Oswaldo Curty da Motta Lima
PEM/Universidade Estadual de Maringá (Presidente)

Sérgio Henrique B. de Faria
DEQ/ Universidade Estadual de Maringá (UEM)

Maraisa Lopez de Menezes
DPQ/Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPr)

Aprovado em: 27 de fevereiro de 2015.

Local de defesa: Sala do Departamento de Engenharia Química, Bloco D-90, *campus* da Universidade Estadual de Maringá

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador professor Dr. Oswaldo Curty da Motta Lima pela paciência, incentivo e ajuda técnica.

A professora Dra. Luiza Helena Costa Dutra Sousa pela disponibilidade e ajuda constante.

A professora Dra. Silvia Luciana Fábaro Rosa, coordenadora atual do programa de pós-graduação em Engenharia Mecânica, que me ajudou e me incentivou a concluir o trabalho.

Aos professores do programa de pós-graduação em Engenharia Mecânica pelo ensino e incentivo.

A todos os meus colegas de curso, pela amizade, colaboração e incentivo, em especial ao Otávio Celso, Bruna Arruda, Rodrigo Bacarin e Tiago Camargo.

Aos funcionários do DEM/PEM e DEQ pela ajuda nos documentos e testes laboratoriais.

Aos professores e amigos da UEM campus Umuarama pela ajuda em troca de horários, ajuda técnica e científica em especial Adalberto Takeda, Jorge Barbarotto, Otavio Montanher, José André Mota, Daniel Drehmer e Rodrigo Camilo.

À CAPES, pelo suporte financeiro, sem o qual este trabalho não poderia ter sido realizado.

Aos meus pais Jorge Luiz Groff e Helena Katayama Groff pelo apoio constante em tudo na minha vida.

GROFF, J. K. **Redimensionamento e análise térmica de equipamento de secagem contínua utilizando princípios fundamentais de transferência de massa e calor.** [Resizing and thermal analysis for continuous drying equipment using fundamental principles of mass transfer and heat]. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2015.

RESUMO

Analisar o equipamento de secagem de gelatina, seu redimensionamento e avaliação térmica baseada nos fenômenos de transferência de massa e calor. Industrialmente, equipamentos são desenvolvidos e comercializados, seus métodos e critérios não são divulgados e cada empresa possui suas características para a operacionalização de tal equipamento, muitas vezes, baseado apenas em tentativa e erro. Como forma de avaliar tal método e tornar útil esta intermediação são propostos, de forma sistemática, critérios e hipóteses para avaliação de secador do tipo esteira de gelatina partindo de testes laboratoriais em equipamento descontínuo em ensaios de secagem a 30, 40, 52, 60, 70 e 80 °C até atingir a umidade de equilíbrio, os respectivos balanços de massa e energia por câmara, o redimensionamento do equipamento simulando a velocidade da esteira em 6 m/h, 12 m/h, 18 m/h e 24 m/h, todas suas características e também uma análise térmica. Como forma de validar o método e propor melhorias para futuros projetos do mesmo equipamento, com as mesmas funções, foi realizada uma comparação com dados de um equipamento industrial que opera há vários anos. O método proposto demonstra a possibilidade de aumento de velocidade até 18 m/h com erro de no máximo 31,6% para a umidade final, a impossibilidade de secagem inicial a temperaturas acima de 52°C e o uso do balanço energético aproximando a gelatina como um cilindro oco. Concluindo, é possível a utilização de análise laboratorial como forma de otimização deste equipamento e também como uma alternativa futura para melhorias operacionais e de projeto.

Palavras-chave: Secagem. Secador convectivo. Secagem de gelatina. Secador de esteira.

GROFF, J. K. **Resizing and thermal analysis for continuous drying equipment using fundamental principles of mass transfer and heat** [Redimensionamento e análise térmica para equipamento de secagem contínua utilizando princípios fundamentais de transferência de massa e calor]. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2015.

ABSTRACT

Analyze the gelatin drying equipment, resizing and its evaluation based on the thermal mass and heat transfer phenomena. Industrially, equipments are developed and marketed, its methods and criteria are not disclosed and each company has its characteristics for the operation of such equipment, often based only on trial and error. In order to evaluate this method and make this useful intermediation are proposed in a systematic manner, criteria and assumptions for assessing dryer track-type gelatin starting from laboratory tests in batch equipment at 30, 40, 52, 60, 70 and 80 °C until the moisture balance, their mass and energy balances for each camera, resizing the equipment simulating the speed of the treadmill 6 m/h, 12 m/h, 18 m/h and 24 m/h, all its features and also a thermal analysis. In order to validate the method and propose improvements for future projects of the same device with the same function, a comparison of industrial data equipment operated for several years was performed. The proposed method shows the possibility of increasing speed up to 18 m/h with an error of at most 31.6% to the final moisture, the impossibility of initial drying at temperatures above 52°C and using the energy balance approaching the gelatin as a hollow cylinder. Thus, it is possible the use of laboratory analysis as a means of optimization of this equipment as well as a future alternative to operating improvements and design.

Keywords: Drying. Convective dryer. Drying gelatin. Belt dryer.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
2 OBJETIVO	12
2.1 OBJETIVO GERAL	12
2.2 OBJETIVO ESPECIFICO	12
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	13
3.1 A GELATINA	13
3.1.1 Composição da gelatina	14
3.1.2 Propriedades físicas e químicas	14
3.1.3 Aplicações	16
3.1.4 O processo de fabricação	16
3.2 A SECAGEM	19
3.3 CURVAS DE SECAGEM.....	21
3.3.1 O Material sólido	25
3.3.1.1 Sólidos granulares ou cristalinos	25
3.3.1.2 Sólidos amorfos, fibrosos ou gelatinosos	26
3.3.2 O agente de secagem	26
3.3.3 Condições internas de secagem	28
3.3.4 Condições externas de secagem	30
3.3.5 Local de secagem	30
3.4 SECAGEM DE ALIMENTOS.....	35
3.5 EQUIPAMENTO DE SECAGEM	36
3.5.1 Análise e seleção do equipamento	36
3.5.2 Tipos de secadores	38
3.5.3 Escolha do equipamento	40
3.5.3.1 Avaliação inicial	40
3.5.3.2 Comparação entre secadores	41
3.5.3.3 Ensaios de secagem.....	41

3.5.3.4 Escolha final	41
3.6 SECAGEM DA GELATINA	41
3.7 PROJETO E OTIMIZAÇÃO DO SECADOR	47
3.8 SECADOR CONVECTIVO DO TIPO ESTEIRA	48
4 METODOLOGIA	50
4.1 MATERIAIS	50
4.2 A MATÉRIA-PRIMA	51
4.3 EQUIPAMENTO EM ESCALA DE BANCADA	51
4.3.1 Componentes	51
4.3.2 Método de operacionalização	52
4.3.3 Método de análise	53
4.3.3.1 Análise qualitativa da secagem da gelatina	53
4.3.3.2 Análise quantitativa da secagem da gelatina	54
4.4 CONSTRUÇÃO DA CURVA DE SECAGEM.....	55
4.4.1 Ajuste dos parâmetros da curva de secagem	55
4.5 EQUIPAMENTO DE SECAGEM INDUSTRIAL.....	56
4.6 ANÁLISE DE REDIMENSIONAMENTO E CONDIÇÕES MECÂNICAS OPERACIONAIS	56
4.6.1 Comprimento do secador por tempo de secagem	57
4.6.2 Velocidade da esteira e comprimento do secador em função da altura do leito.....	57
4.6.3 Velocidade da esteira e comprimento do secador em função da vazão mássica	57
4.7 BALANÇO DE MASSA.....	58
4.8 EFEITO DA VELOCIDADE DA ESTEIRA NO PROCESSO DE SECAGEM.....	58
4.9 BALANÇO ENERGÉTICO.....	61
4.10 DETERMINAÇÃO DA EFICIÊNCIA EM TERMOS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR E MASSA.....	63

4.10.1	Parâmetros de transferência de calor e massa no equipamento.....	63
4.10.2	Parâmetro de transferência de massa para o ensaio de secagem	64
4.11	PERFIL DE UMIDADE DO AGENTE DE SECAGEM	66
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	67
5.1	ANÁLISES QUALITATIVAS DO TESTE DE SECAGEM.....	67
5.2	CURVAS DE SECAGEM DA GELATINA.....	68
5.3	AJUSTE DA CURVA DE SECAGEM	70
5.4	CARACTERÍSTICAS DO EQUIPAMENTO INDUSTRIAL.....	71
5.5	ANÁLISE DE REDIMENSIONAMENTO E CONDIÇÕES MECÂNICAS OPERACIONAIS.....	74
5.5.1	Comprimento do secador por tempo de secagem	74
5.5.2	Velocidade da esteira e comprimento do secador em função da altura do leito.....	75
5.5.3	Velocidade da esteira e comprimento do secador em função da vazão mássica	75
5.6	BALANÇO DE MASSA GERAL.....	76
5.7	EFEITO DA VELOCIDADE DA ESTEIRA NO PROCESSO DE SECAGEM.....	77
5.8	BALANÇO DE ENERGIA GERAL.....	80
5.8.1	Análise das necessidades energéticas ao longo do equipamento.....	80
5.8.2	Análise do consumo do vapor	81
5.9	DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS DE EFICIÊNCIA EM TERMOS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR E MASSA.....	82
5.9.1	Coeficiente de transferência de massa por convecção durante ensaio laboratorial.....	84
6	CONCLUSÃO	84
	REFERÊNCIAS.....	86

1 INTRODUÇÃO

Grande parte das indústrias de transformação possuem muitas características em comum e processos semelhantes, porém, devido ao produto que é produzido e comercializado, existem particularidades na sua produção e diferenciação nos seus equipamentos.

Na fase final do processamento, em muitas indústrias, encontra-se um equipamento responsável por fazer a retirada da umidade. Este processo muitas vezes é necessário devido à própria qualidade do produto ou em questões econômicas para o transporte do mesmo, o que faz deste equipamento algo essencial e fundamental em todo final de processo.

No mercado existem mais de 200 tipos de secadores (ERBAY, 2010), equipamento responsável pela retirada da umidade, porém, os secadores são fabricados e testados baseados em matéria-prima de uso comum, ao invés de ser utilizado um material mais específico para o equipamento. Desta forma, pode-se afirmar que existe uma defasagem e muitas indústrias utilizam secadores que não são tão adaptados ao produto em questão. Além disso, o valor do investimento é muito superior ao custo de desenvolvimento e fabricação do equipamento, sem mencionar a flexibilidade que muitos fabricantes não possuem.

A concepção de secadores otimizados tornou-se um problema e, às vezes, um desafio. Não estando facilmente disponível a avaliação do tipo adequado de equipamento, sua estrutura em forma de fluxograma associado, sua construção e condições de funcionamento de cada unidade envolvida na concepção global. No entanto, a maioria dos esforços de projeto neste campo enfrentam problemas de extrema dificuldade, relacionados a condições de secagem que incluem inúmeros fenômenos interligados e opostos, principalmente devido à natureza complexa deste processo (KIRANOUDIS et al., 1996).

Como forma de solucionar este impasse, tratando o projeto do equipamento em uma abordagem diferente, é necessária a utilização de algo mais específico, que atenda de forma pontual cada produto, respeitando seus padrões de qualidade e que, conseqüentemente, sejam acessíveis ao empreendimento. O resultado poderá gerar uma alternativa para mudanças operacionais e de projeto no equipamento, tornando-o mais específico para o produto.

2 OBJETIVO

2.1 OBJETIVO GERAL

Este trabalho tem por objetivo geral propor uma análise de redimensionamento de equipamento para secagem contínua de gelatina e sua avaliação térmica baseada nos fenômenos de transferência de massa e calor e a cinética de secagem específica da matéria-prima.

.

2.2 OBJETIVO ESPECÍFICO

O objetivo específico é a análise de um equipamento de secagem industrial baseando-se nas propriedades físicas da gelatina, iniciando por testes laboratoriais para a caracterização do material em termos físicos e de cinética de secagem, desenvolvimento de balanços de massa e energia, análise de redimensionamento do equipamento industrial e avaliação térmica do mesmo.

Cada etapa será verificada com referência na literatura ou de forma experimental e cada resultado poderá influenciar outras etapas. O resultado final será, como forma de avaliar o método, comparado com dados da literatura e de um equipamento real que opera em uma indústria de gelatina.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 A GELATINA

A gelatina é uma molécula de proteína desnaturada, solúvel em água e obtida por hidrólise parcial do colágeno derivado da pele, tecido conjuntivo branco de ossos de animais (GHOSHAL et al., 2010). No entanto, o surto da doença da vaca louca (BSE) na década de 1980, acelerou a procura de formas alternativas. As fontes abastecedoras de colágeno para a produção de gelatina são os curtumes, abatedouros, processadores de produtos cárneos e similares. Matérias-primas para a produção de gelatina são abundantes e de baixo custo em todo o mundo (BAE et al., 2009).

A gelatina consiste em três cadeias polipeptídicas prolongadas, cada uma em formato de uma hélice, sendo sua estrutura em tripla hélice e estabilizada pela formação de intercadeias que possuem ligações de hidrogênio. Durante o processo de desnaturação, a estrutura é dividida para formar moléculas isoladas numa solução aquosa. Algumas cadeias de gelatina podem se reassociar umas as outras para formar um colágeno semelhante a um helicoidal triplo. Sabe-se que a presença de água ligada desempenha um importante papel estrutural e funcional em muitas proteínas. Nessas proteínas, a água ligada forma pontes de hidrogênio vinculadas com a tripla hélice. Espera-se que o desenrolar desta hélice seja acompanhada pela dissociação da água ligada com a estrutura da gelatina (CHI-AN DAI et al., 2006).

Sua composição básica consiste de 84 a 90 % de proteínas, 1 a 2 % de sais minerais e 8 a 15 % de água. Não contém conservantes, aditivos, gorduras, carboidratos, purina ou colesterol, sendo um colágeno desnaturado com baixa antigenicidade e relativamente barata. Ela tem sido amplamente aplicada como material para microesferas, vedantes, adesivos de tecidos e transportadores para sistemas de distribuição de drogas (SAITO et al., 2004).

Segundo Shyamkuwar et al. (2010), a gelatina tem larga aplicação em alimentos, produtos farmacêuticos, e indústrias fotográficas. Ao contrário do colágeno, que não expressam antigenicidade em condições fisiológicas, é completamente reabsorvível *in vivo* e suas propriedades físico-químicas podem ser adequadamente moduladas.

O colágeno, devido aos diferentes tipos de cadeias formadas pelas diversas proteínas existentes em sua composição, apresenta diferentes conformações e,

assim, dão origem a vários tipos de moléculas proteicas, não é solúvel em água, já que participa das funções mecânicas dos organismos nos ossos e na pele. No entanto, sua versão hidrolisada, a gelatina, é solúvel em meio aquoso, o que a torna utilizável nas indústrias alimentícias, farmacêuticas, fotográficas, entre outras.

3.1.1 Composição da gelatina

A estrutura da gelatina é composta de L-aminoácidos unidos por ligações peptídicas. A gelatina possui quantidades específicas de 18 aminoácidos distintos que se unem para formar cadeias polipeptídicas de aproximadamente 1.050 aminoácidos por cadeia, a estrutura primária. Três cadeias polipeptídicas assim formadas se agrupam entre si, em forma de espiral à esquerda, para dar lugar à estrutura secundária. Na estrutura denominada terciária, esta espiral se enrola e dobra-se para formar uma nova espiral à direita (tripla hélice). O conteúdo em aminoácidos do colágeno e, conseqüentemente, da gelatina é de cerca de 27% de glicina, 16% de prolina, 14% de hidroxiprolina, e os 43% restantes são compostos de outros 17 aminoácidos, boa parte aminoácidos básicos e ácidos. Dos aminoácidos ácidos (aspártico e glutâmico), aproximadamente 1/3 está presente na forma amida como glutamina e asparagina. A cisteína, assim como o triptofano, são totalmente ausentes e a metionina é única com enxofre. (GMIA, 2012)

A ligação peptídica é obtida pela eliminação de água, condensando um grupo carboxila de um aminoácido com o grupo amina de outro aminoácido. Desse modo, a gelatina é constituída de várias cadeias, as quais podem ser livres ou ligadas entre si, formando uma macromolécula polidispersa com peso molecular entre 10.000 e centenas de milhares.

3.1.2 Propriedades físicas e químicas

A gelatina possui várias propriedades intrínsecas e variáveis, o que torna diversificado o seu aproveitamento para diversos setores das mais variadas indústrias. Exemplos dessa variabilidade são a solubilidade, capacidade de formar gel, viscosidades, *bloom* entre outras. Seu valor energético é compreendido entre

1350 e 1450 kJ para cada 100 gramas (ou 350 e 370 kcal), contribuindo como alimento funcional, pois auxilia no metabolismo. A capacidade calorífica da gelatina é definida pela correlação encontrada por Skuratov (1946):

$$C_{p_{gel}} = C_{ps} + X_{gel}C_{pl} \quad (3.1)$$

Em que:

$C_{p_{gel}}$ é o calor específico da gelatina úmida (J/kg gelatina seca.K); C_{ps} é o calor específico da gelatina seca (J/kg gelatina seca.K); C_{pl} é o calor específico da água na fase líquida (J/kg água.K); X é a umidade da gelatina (kg água/kg gelatina seca); $C_{ps} = 1192$ (J/kg gelatina seca.K) e $C_{pl} = 4000$ (J/kg água.K).

A gelatina, a temperatura de cerca de 40°C, em solução aquosa, se transforma em gel quando arrefecida até temperatura ambiente, desde que sua concentração seja elevada o suficiente. No entanto, a principal desvantagem da gelatina como uma matéria-prima é a sua fraca resistência mecânica, o que pode limitar suas possíveis aplicações como material biomédico (SHYAMKUWAR et al., 2010).

Quanto à solubilidade ela possui natureza hidrofílica, relativamente insolúvel em água fria, porém, hidrata-se prontamente em água quente. Quando adicionado água fria os grânulos de gelatina intumescem, absorvendo de 5 a 10 vezes o seu peso em água. Aumentando a temperatura, as partículas de gelatina intumescidas dissolvem-se formando uma solução que gelifica quando resfriada. A firmeza da gelatina depende de sua concentração e da firmeza intrínseca da gelatina usada, a qual é função tanto da sua estrutura quanto do seu peso molecular.

Por ser um polímero, a natureza macromolecular da gelatina produz viscosidades em soluções que, para muitas temperaturas e concentrações, apresentam propriedades reológicas Newtonianas. A clareza de uma solução de gelatina é um fator crítico em uma ampla gama de aplicações, sejam elas técnicas ou alimentícias, sendo também um indicador de eficiência no processo de filtração.

Os parâmetros analisados em termos de microbiologia são a contagem total de bactérias (CTB), coliformes totais, coliformes fecais e *E. coli*. O cuidado microbiológico na fábrica é de grande importância, já que a contaminação implica

em rejeição comercial do produto. A etapa com grande possibilidade de contaminação é a secagem, pois é o momento que o ar atmosférico entra em contato direto com material úmido e nutritivo. A configuração do equipamento pode gerar pontos de concentração de umidade e ar estagnado, o que pode acarretar o acúmulo de microrganismos e, conseqüentemente, de contaminação. (GMIA, 2012)

3.1.3 Aplicações

Uma das grandes aplicações da gelatina é na indústria de fármacos. Pelo fato de ser uma proteína de fácil absorção pelo organismo, inúmeros tipos de remédios são feitos, como é o caso de comprimidos que compreendem a aglutinação de material particulado pelo uso de calor, que durante a prensagem recebe o formato desejado.

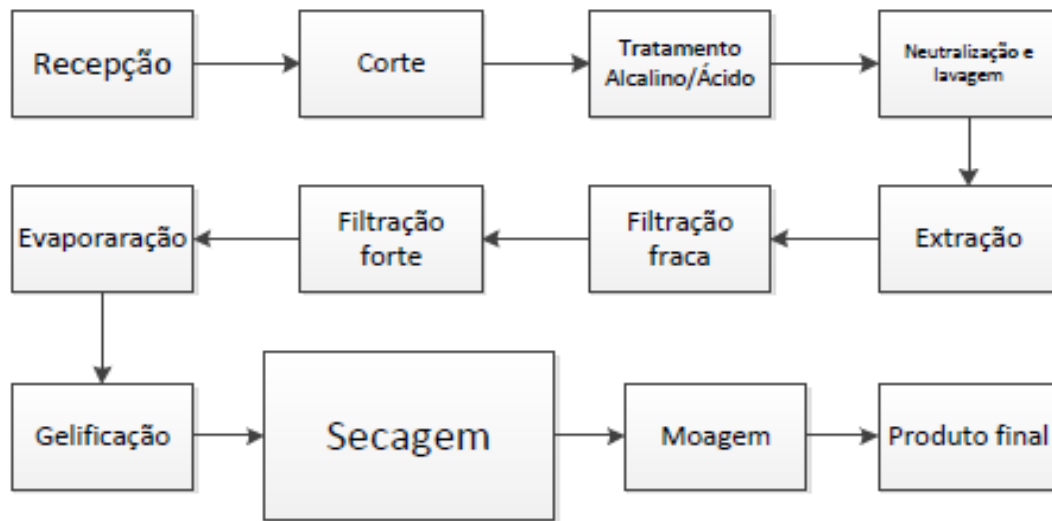
Como alimento moderno e devido à sua capacidade natural de melhorar a aparência, a consistência e o sabor dos alimentos, é utilizada em muitos processos da indústria de alimentos, para a produção de sobremesas, confeitados, gomas, caramelos, balas, pastilhas comestíveis, iogurtes, queijos, produtos cárneos, bebidas e panificação.

Na indústria de produtos lácteos como iogurtes e queijos, a gelatina atua como um protetor coloidal, prevenindo a sinérese e ajustando a consistência do produto. Produtos lácteos com baixo teor calórico servem-se da capacidade da gelatina de ligar água, formar emulsões e manter a estabilidade. (GMIA, 2012)

3.1.4 O processo de fabricação

É comum o uso dos termos tipo “A” e tipo “B” como forma de classificar a gelatina pela origem de sua matéria prima. A produção de gelatina do tipo A é feita exclusivamente com pele suína. A pele, geralmente um couro mais flexível que a pele do tipo B, é recebida de abatedouros e frigoríficos, vem refrigerada a uma temperatura de 10°C e é mantida em câmara fria até o momento do corte. Pela Figura 3.1, observa-se o fluxograma simplificado do processo de fabricação da gelatina.

Figura 3.1 – Fluxograma do processo de produção da gelatina

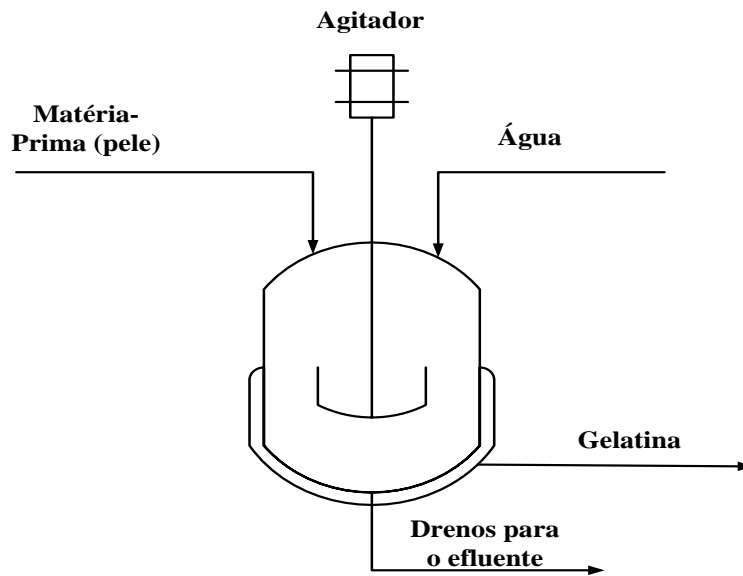


Fonte: Autoria própria

A pele passa pelo sistema de corte e é então transportada para o triturador que funciona como um moedor de carne. Sua principal função é deixar a pele na granulometria desejada para a extração da gelatina. Após o corte, a pele segue para os tanques de extração, no caso da pele suína, ou para tanques chamados de tanques de calado, no caso da pele bovina. Nos calados, a pele sofre um tratamento alcalino, onde fica sob a ação de uma solução de hidróxido de sódio com pH maior que 10. A etapa de pré-tratamento realizada para a pele bovina é de extrema importância para que sejam retirados materiais que não são desejados na extração e para que algumas ligações químicas das fibras do colágeno sejam rompidas, facilitando a extração da gelatina.

Para ambos os tipos de pele, após a etapa de hidrólise, há uma reação de neutralização, para que o pH da solução seja aumentado. Nesta etapa, adiciona-se solução de hidróxido de sódio aos tanques de extração a temperatura ambiente e, após a reação, a solução alcalina é drenada. Este processo ocorre dentro dos tanques extratores, local em que a pele se encontra e onde se adicionam água a temperatura superior a 50°C. Esta água aquecida permanece em contato com a superfície de extração por um determinado período. Quanto maior o tempo de contato entre a água e a pele, maior será a quantidade de produto extraído. A alta temperatura, porém, degrada a pele e faz com que a qualidade seja inferior. Na Figura 3.2, apresenta-se um esquema básico do processo de extração.

Figura 3.2: Esquema de extração para um sistema operando em batelada



Fonte: Autoria própria

Quando a gelatina sai da etapa de extração, esta contém impurezas, como gordura, materiais fibrosos e outras partículas em suspensão. Com a finalidade de remover esses elementos indesejados presentes na gelatina, passa-se a solução por um filtro prensa que utiliza terra diatomácea como meio filtrante. A gelatina é misturada em um tanque junto com a terra diatomácea e enviada para o filtro, no qual as impurezas e a terra ficam retidas nas membranas de filtração.

A solução de gelatina com baixa concentração é enviada para uma unidade de ultrafiltração. Essa unidade é composta por módulos e cada módulo é composto por vários *housing*. Em cada *housing* existe uma membrana de filtração que retém proteínas e deixa permear água e sais.

A segunda filtração ocorre de forma semelhante à primeira, também em um filtro prensa, porém, com algumas diferenças, existe diferença na quantidade de quadros e placas do filtro prensa entre a primeira filtração e a segunda, além do tempo de filtração. Essa etapa serve para a remoção de partículas suspensas e que eventualmente precipitaram e não foram retiradas nas etapas anteriores.

Quando a gelatina sai da filtração forte está com uma concentração bem maior do que aquela da entrada na unidade. Porém, essa concentração ainda está bem abaixo da desejada. Dessa forma, a gelatina é enviada para uma unidade evaporadora para que ocorra mais remoção de água, porém, antes de passar pela

evaporação, a gelatina passa por um pré-aquecimento e por uma esterilização, e fica cerca de 5 segundos a uma temperatura em torno de 145°C. Essa evaporadora, é uma unidade de evaporação a vácuo e possui dois efeitos.

Para ser gelificada, a gelatina é submetida a uma troca térmica em um equipamento denominado *votator*, um resfriador sob pressão, consistindo num tubo cilíndrico refrigerado externamente por evaporação de amônia. A gelatina é lançada no interior do cilindro, depositando-se nas paredes à medida que se solidifica. A superfície de resfriamento deste trocador de calor é então raspada, ao mesmo tempo em que impulsiona a gelatina solidificada para a esteira em direção ao secador. Assim, é extrusada e assume a forma de um cilindro contínuo em formato de macarrão que se deposita sobre a superfície da entrada do secador uma esteira perfurada móvel, que adentra a um secador subdividido em câmaras, onde atinge a umidade final desejada. Normalmente, esta umidade se encontra em torno de 10% (base seca), pois até esta umidade a gelatina pode ser considerada um material higroscópico, termo sensível e não poroso, para efeito de secagem (NEITZEL, 1987).

No término da secagem, após o último túnel, há um eixo espiral dentado com finalidade de quebrar a gelatina seca que sai do secador. Em seguida, a gelatina vai para o moinho, onde sofre processo de quebra para assim atingir granulometria aproximadamente iguais. Pode-se observar um esquema geral do processo completo na Figura 3.1.

3.2 A SECAGEM

A transferência de calor e massa tem lugar em um grande número de processos. Esses fenômenos são encontrados em sistemas composto por duas ou mais fases, transferência de calor e massa em sistemas gás-líquido é amplamente encontrado no contexto das várias operações unitárias, incluindo a destilação, extração, absorção e secagem. No entanto, embora os esforços têm sido focado na compreensão e previsão física em tais sistemas, estes problemas continuam com muitas incógnitas (PADOIN, 2014).

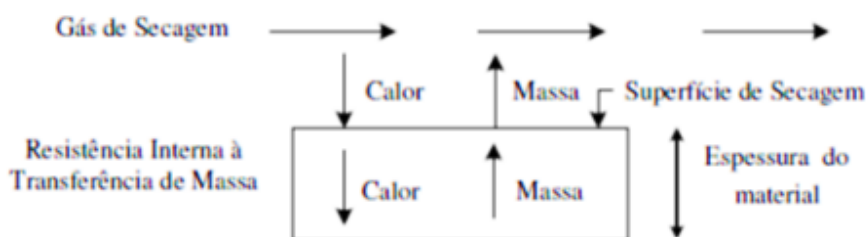
Operações de secagem são amplamente utilizadas como um método de conservação na indústria de alimentos. Os produtos secos têm maior limitação em termos de deterioração, devido à baixa atividade da água, e são facilmente

transportados e armazenado, em função do volume reduzido sem a necessidade de refrigeração, o que representa economia de energia. No entanto, alterações importantes no sabor, cor e aroma podem estar presentes, e dependendo da intensidade do efeito e do processo de secagem, pode-se ocorrer a perda ou inutilização do produto para uma determinada função (PERUSSELLO, 2012).

A secagem é uma das operações unitárias mais antigas, e recentemente se tornando generalizada em diversos setores. Ela tem sido usada na indústria alimentícia, agrícola, cerâmica, química, farmacêutica, papel e celulose, mineração, indústria de polímeros e têxteis para diversos objetivos. Os métodos de secagem são diversificados e cada um com um propósito diferente em cada processo. (ERBAY, 2010)

Este processo é complexo e envolve troca simultânea de calor e a transferência de massa (XUESONG LIU, 2009). Consiste na transferência de um líquido que está contido no sólido úmido para uma fase gasosa não saturada. Tal fenômeno é idêntico ao processo de evaporação, porém há a influência do sólido (FOUST, et al., 1982). A umidade é retirada pelo fornecimento de calor a este por meio de um gás secante que apresenta menor concentração de umidade em relação a concentração de equilíbrio. A tendência é o sistema entrar em equilíbrio mássico e térmico. O esquema deste processo demonstra-se na Figura 3.3.

Figura 3.3 – Esquema de um processo de secagem



Fonte: Geankoplis (1993)

Industrialmente é muito comum o equipamento destinado a secar o material estar no final do processo. (MCCABE, 1993)

A água pode ser retirada por centrifugação, prensagem, evaporação ou outros meios. Em termos industriais ainda o mais rentável é a forma mecânica, o que se

torna aconselhável retirar antes da etapa de secagem o máximo de umidade possível de forma alternativa. A umidade pode estar na superfície do sólido, contido dentro dele ou em ambas as partes.

O sólido por sua vez apresenta-se das mais variadas formas podendo estar na forma de flocos, grânulos, cristais, pós, placas ou folhas contínuas, gerando com isso alguns problemas em questão como os de:

- Mecânica dos fluidos
- Química das superfícies
- Estrutura do sólido
- Dinâmica da transferência de massa e calor

Devido aos fatores mencionados, torna-se impossível o projeto de um equipamento de forma generalizada e simplificada. Características como forma, cor, estabilidade e textura influenciam fortemente no preço de venda do produto, o que comprova a forte dependência do processo de secagem (FOUST et al., 1982).

Alguns produtos exigem ambientes com altas temperaturas e outros moderados, alguns exigem maior tempo de secagem, diferentes formas de contato entre o agente de secagem e o produto e, também, no que diz respeito a movimentação do sólido. Devido a estas particularidades é que existe uma grande variedade de secadores no mercado.

O processo de secagem pode se dividir em direto e indireto, a forma de secar direta se caracteriza pelo agente de secagem manter contato direto com o produto. A secagem indireta possui uma limitação física entre a forma de transferir o calor, como exemplo, uma superfície de contato que transmite calor por condução, ou por micro-ondas, no qual o agente responsável pela evaporação da umidade são ondas eletromagnéticas. (MCCABE, 1993)

3.3 CURVAS DE SECAGEM

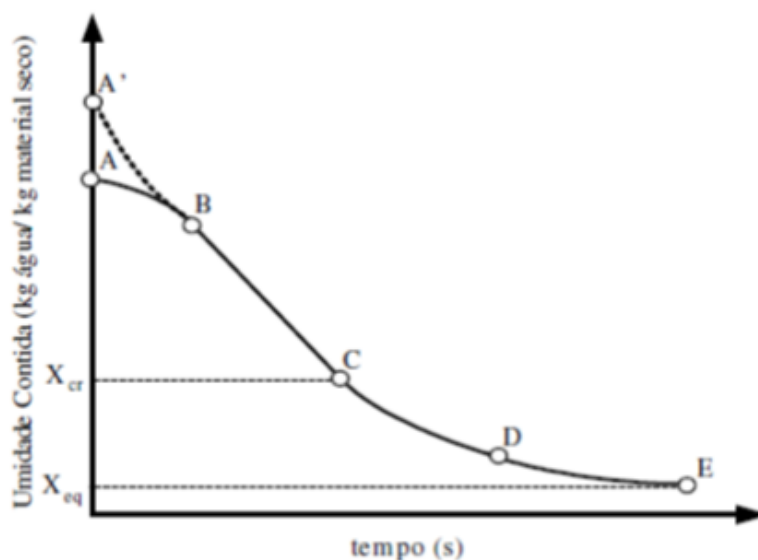
Em geral o comportamento da umidade no processo de secagem é semelhante em muitos materiais estando em secadores diferentes. Porém, cada material apresenta uma particularidade, o conhecimento das isotermas de umidade

de equilíbrio é muito importante para a análise de processos de secagem e armazenamento.

Motta Lima et al. (2004) realizou testes experimentais com fibras de celulose de madeira "Pinnus" e avaliou a influência da temperatura em seu comportamento. Dados de equilíbrio experimentais foram obtidos usando o método tradicional de expor o material sólido para diferentes ambientes e condições de temperatura e umidade relativa do ar, controlada por soluções salinas (método estático), dentro de um forno com recirculação de ar.

Na Figura 3.4, demonstra-se tal dinâmica e o comportamento da umidade.

Figura 3.4 – Curva de umidade de equilíbrio por tempo



Fonte: Foust et al. (1982)

O período inicial de secagem, representado pelas linhas AB e A'B, pode apresentar aumento ou diminuição na taxa de secagem em função do calor sensível, absorvido ou perdido pelo sólido em relação ao meio secante, sofrendo grande influência das características iniciais do agente de secagem. A tendência é atingir a temperatura de equilíbrio e em certos casos, este período é muito curto ou pode ser desprezado (STRUMILLO E KUDRA, 1986).

Denominado de período de secagem a taxa constante, representado pela linha BC, este apresenta uma taxa de remoção de umidade do sólido que permanece constante por um período. Isto se deve inicialmente, a presença de um

filme de água sobre a superfície do sólido que é posteriormente, substituída pela umidade vinda do interior do sólido à medida que a evaporação da umidade da superfície ocorre (GEANKOPLIS, 1993).

A temperatura da superfície do sólido é constante, ocorre a evaporação e a esta temperatura na superfície dá-se o nome de temperatura de bulbo úmido. Este período tem fim exatamente quando a umidade atinge a umidade crítica e a taxa de secagem não se faz mais constante. (FOUST et al., 1982)

O calor necessário para a evaporação da água é denominado de calor latente, este varia de acordo com a temperatura. Brooker et al. (1992) em seu experimento determinou como:

$$h(T) = 2508 + 2,386T \quad (3.2)$$

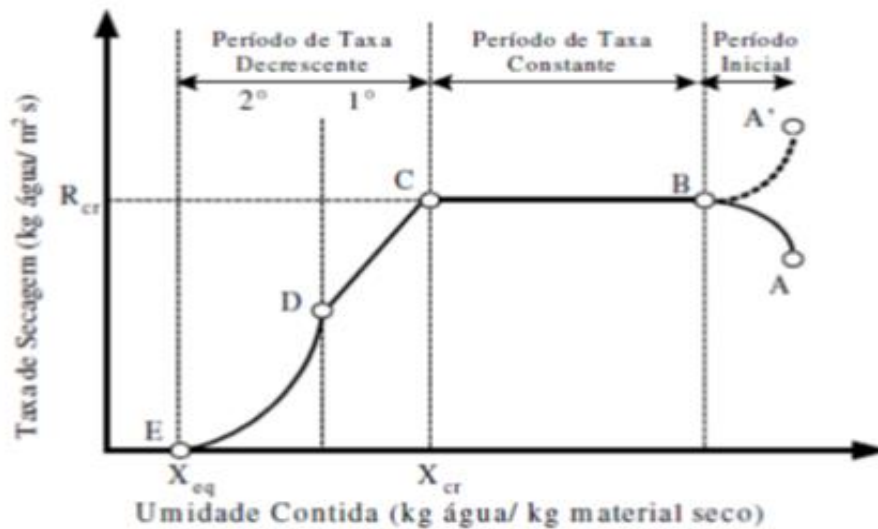
Em que:

$h(T)$ é a entalpia de vaporização (kJ kg^{-1}) e T é a temperatura ($^{\circ}\text{C}$).

Na curva CD o período no qual a taxa de secagem é decrescente (Figura 3.5), a temperatura do sólido aumenta, tendendo a atingir a temperatura do ar de secagem (BROOKER *et al.*, 1992). Há um aumento da temperatura do sólido e pode ocorrer um prolongamento no tempo de atividade superando o tempo no qual a taxa de secagem é constante. A superfície do material sólido se torna pobre em líquido, o movimento do líquido no interior para a superfície é menor do que o líquido retirado da superfície pelo agente de secagem (FOUST, 1982).

No período de taxa decrescente, a secagem é influenciada pela estrutura interna do sólido que gera uma dinâmica na movimentação da água, podendo este ocorrer por difusão, capilaridade, gravidade, sequências de vaporização (condensação e contração) ou gradientes de pressão. Contudo, os mecanismos mais discutidos na literatura são a difusão e a capilaridade. (PERRY E CHILTON, 1973). O conhecimento das isotermas de equilíbrio pode estar relacionado tanto a modelos teóricos existentes na literatura, como a modelos empíricos. Segundo Barrozo *et al.* (1998), os modelos empíricos são mais utilizados que os teóricos pela maior precisão e praticidade com uma ampla faixa de umidade e temperatura do ar.

Figura 3.5 – Taxa de secagem por umidade



Fonte: Foust et al. (1982)

No trabalho de Fiorentin et al. (2010), que secou bagaço de laranja, os autores mostraram que quanto maior a temperatura de secagem, menor o tempo de secagem e que a temperatura influencia tanto o período a taxa constante quanto o período a taxa decrescente de secagem.

Ao final deste período, a taxa de secagem se aproxima lentamente de zero até atingir a umidade de equilíbrio. A pressão de vapor sobre o líquido é igual à pressão parcial de vapor no gás secante, fase esta que se torna impossível retirar mais umidade, sendo denominado segundo período a taxa decrescente.

A secagem de vários produtos pode ser descrita por modelos matemáticos semi-empíricos ou puramente empíricos, os modelos semi-empíricos baseiam-se na analogia com a Lei de Newton para o resfriamento, enquanto que, os modelos empíricos apresentam uma relação entre o conteúdo médio de umidade e o tempo de secagem. Como exemplo, Menezes et al. (2013) analisaram a secagem convectiva em leito fixo do bagaço do maracujá amarelo. Nos ensaios de secagem, foram coletados os valores de massa do bagaço em função do tempo, utilizando-se um secador convectivo. As curvas de secagem e de taxa de secagem foram ajustadas aos modelos propostos por Page e Motta Lima e colaboradores e aos modelos propostos por Hogdes e Toffoli, respectivamente. Outros modelos matemáticos também foram ajustados para cada secagem. Por meio dos resultados,

foi verificado que o modelo de Page (1949) foi o que melhor se ajustou aos dados experimentais de secagem.

3.3.1 O Material sólido

As características específicas de cada produto, associadas às propriedades de secagem do ar e a forma de transferir calor, podem determinar inúmeras condições operacionais. Portanto, é necessário estudar as características dos produtos e as condições do processo em si, a fim de obter-se o produto desejado final com menor demanda energética possível (PERUSSELLO, 2012).

A secagem de partículas sólidas, em um leito na presença de um agente gasoso como transferidor de calor é largamente utilizado comercialmente. Fluxos interagindo mais frequentemente são organizados em contracorrente (secadores de coluna) ou um fluxo cruzado (transportadores de correia com sopro) (NAKORCHEVSKII et al., 1994).

Existem uma infinidade de tipos e classes de materiais que são submetidos à secagem, pode-se dividir este material em 2 classes.

3.3.1.1 Sólidos granulares ou cristalinos

Este tipo de material retém a umidade nos poros, o movimento da umidade é livre e com isso interfere no tempo de secagem no que diz respeito ao período a taxa constante. Sólidos desta forma, em geral inorgânicos, são pouco afetados pelo líquido e sofrem pouco devido ao processo de retirada de umidade. Logo existe pouca preocupação sobre o produto seco. Há uma possibilidade de se trabalhar em ampla faixa de temperatura em que a umidade de equilíbrio se aproxima de zero. (FOUST et al., 1982)

A secagem por convecção de materiais porosos é de interesse para muitas aplicações industriais, como a produção de materiais de construção (betão, tijolo, placa de gesso, etc.), processamento de alimentos, madeira e produção de papel. Previsões precisas de calor por convecção e transferência de massa em interfaces

de materiais ao ar poroso são essenciais em muitas aplicações de engenharia. (DEFRAEYE, BLOCKEN E CARMELIET, 2012)

Para os processos de secagem, existem termos importantes para se definir como os tipos de umidade:

- Umidade em base seca (b.s.): é a umidade contida no sólido, usualmente descrita em termos mássicos, por meio da seguinte relação: massa de água por massa de sólido seco.
- Umidade em base úmida (b.u.): é a quantidade de umidade do material como a porcentagem de peso do sólido úmido, na forma de: massa de água por massa de sólido úmido. (SILVA, 1995).

3.3.1.2 Sólidos amorfos, fibrosos ou gelatinosos

Em termos de processo, o que caracteriza este tipo de material é a retenção da umidade interna, ou umidade ligada. Esta, por sua vez, se movimenta de forma lenta, ocorrendo por difusão ou capilaridade e fazendo com que a velocidade de secagem seja controlada por este mecanismo interno.

Este tipo de material apresenta teor de umidade de equilíbrio elevada, são fortemente afetados pela remoção da água, podendo ocorrer rachadura superficial e possibilidade de formação de camada impermeabilizante. Exemplo: Ovos, detergentes, colas, cereais, amido etc. (FOUST et al., 1982)

3.3.2 O agente de secagem

Para a secagem convectiva o agente é o ar atmosférico que é responsável por transferir o calor necessário para gerar a evaporação do excedente de água e, após isso, retirar o vapor d'água em excesso para fora do equipamento. Para avaliar aspectos termodinâmicos do ar e água, utiliza-se um banco de dados de propriedades dos mesmos, podendo ser traduzido na forma de carta contendo vários gráficos que se inter-relacionam, mais conhecido como carta psicrométrica.

A psicrometria traduz as propriedades termodinâmicas do ar e, conseqüentemente, possuem terminologias importantes, tais como, a umidade

absoluta, massa de vapor de água transportados por massa de ar seco. Quando a pressão parcial do vapor de água no ar, a uma dada temperatura é igual à pressão de vapor de água à mesma temperatura, o ar está saturado e a umidade absoluta é denominada umidade de saturação.

A umidade relativa é definida como a pressão parcial do vapor de água no ar dividida pela pressão de vapor de água a uma dada temperatura de saturação. O ponto de orvalho, ou temperatura de saturação, é a temperatura a que uma determinada mistura de vapor de água e de ar saturado, por exemplo, a temperatura na qual a água exerce uma pressão de vapor igual a pressão parcial de vapor de água na mistura.

No eixo horizontal (Figura 3.6 – anexo), observa-se a temperatura do ar seco, linhas transversais em direção à curva de saturação representam a temperatura de bulbo úmido, temperatura esta que se encontra imediatamente sobre o sólido submetido à secagem. Demais propriedades termodinâmicas podem ser observadas na Figura 3.6 (anexo), uma importante ferramenta para o cálculo em processo de umidificação e secagem. (PERRY E CHILTON, 1973)

O ar responsável pela realização da secagem convectiva carrega consigo vapor d'água, este que depende da concentração do vapor d'água para evitar precipitação. O líquido deve ser aquecido a uma temperatura em que a sua pressão de vapor é igual ou maior que a pressão parcial do gás de secagem. Durante o processo, é importante manter o ar o mais próximo possível da curva de saturação, porém, não atingi-la. Esta se caracteriza por apresentar a máxima quantidade de água que o ar pode transportar sem que haja condensação prematura.

Parisb (1978) propôs uma equação geral para a umidade relativa em função da pressão ambiente, da temperatura de bulbo úmido e bulbo seco.

$$U(T, T', p) = 10^{-\left\{c_1 + \left[\frac{b_1}{T+d}\right]\right\}} \cdot (T+d)^{-a_1} \left[10^{\left\{c + \left[\frac{b}{T'+d}\right]\right\}} (T'+d)^a - (f + gT')p(T - T') \right] \quad (3.3)$$

Em que:

T é a temperatura de bulbo seco; T' é a temperatura de bulbo úmido; a= -4,9283; b= -2937,4; c= 23,5518; d= 273,15; f: 6,6.10⁻⁴; g: 7,57.10⁻⁷; k: 0,21668; a1= -4,9283; b1= -2937,4 e c1= 23,5518

3.3.3 Condições internas de secagem

As condições internas de secagem refletem na velocidade de secagem, dependendo estritamente do sólido úmido. Nesse caso, através e sobre o sólido é onde ocorre o fenômeno de transferência simultânea de calor e massa.

Muitos mecanismos diferentes podem estar envolvidos no transporte da umidade durante o processamento, como o calor acoplado e a transferência de massa (secagem, cozedura) ou difusão multicomponente de solutos e água (desidratação osmótica, salga). A água pode migrar em fases gasosa e líquida dentro de poros dificultando significativamente o processo. Um dos interesses da modelagem dos fenômenos de transporte de massa é que se torna possível compreender, quantificar e organizar em uma hierarquia os diferentes mecanismos envolvidos no transporte de massa global e, com isso, definir a melhor estratégia para os objetivos que se almeja.

De um ponto de vista macroscópico, os fenômenos de transporte de massa em produtos alimentares dependem principalmente da natureza das substâncias de difusão e da sua estrutura. Geralmente, o produto de interesse que se presume ser constituído por uma solução aquosa (mistura de água, sal, açúcares e outros componentes solúveis) retida dentro de uma rede tridimensional sólida mais ou menos deformável é considerado componente não solúvel (chamados de matéria seca). Do ponto de vista teórico, os fenômenos de transporte de massa para o sistema de multicomponentes podem ser modelados utilizando fisicamente três abordagens diferentes:

- generalização da lei de Fick;
- utilização de termodinâmica irreversível;
- utilização da equação de Stefan-Maxwell.

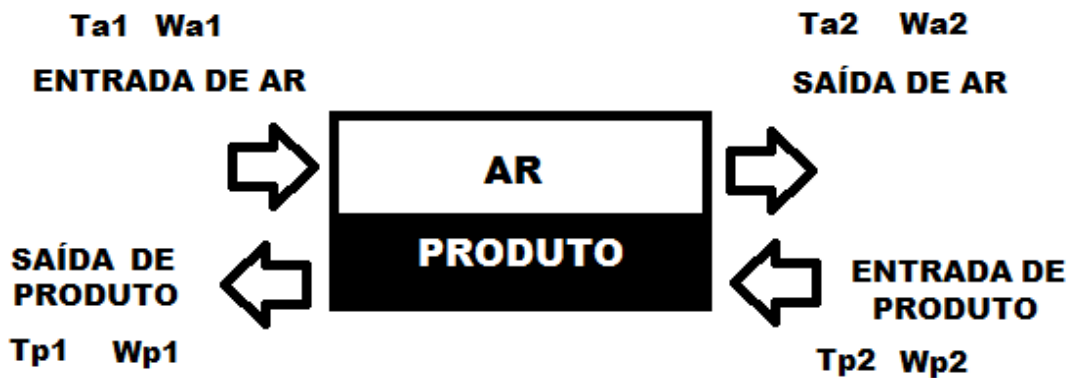
Estas três abordagens são, respectivamente, com base na cinética, termodinâmica e considerações hidrodinâmicas. (BERTRAND, 2007)

A transferência de calor pode ocorrer de três maneiras: condução, convecção e irradiação, existem um predomínio da forma com que o calor é trocado dependendo do equipamento e do formato do sólido.

O coeficiente de transferência de calor depende principalmente da velocidade do ar. Ambas as funções de transferência são estabelecidas por meio de

experimentos de secagem. O ar e o material, que migram através de conexões superficiais são caracterizados pela sua temperatura e teores de umidade. Assim, cada ligação onde há calor e rede de transferência de massa está associada a uma temperatura e varia com o teor de umidade. O mecanismo de transferência de calor e a rede de transferência de massa podem ser representados por um bloco, como mostrado na Figura 3.7. (SEBASTIAN et al., 1996)

Figura 3.7 – Modo de transferência de calor e massa



Fonte: Adaptado de Sebastian et al. (1996).

A massa se movimenta de acordo com o formato e forma do sólido, podendo se locomover por difusão ou capilaridade internamente e existindo até uma dinâmica de vaporização e condensações consecutivas até atingir a superfície do sólido e sendo arrastado pelo agente de secagem.

No trabalho de Silva (1995) foi considerado o leito fixo recheado com partículas cilíndricas e que assumem usualmente a igualdade entre os fatores de Colburn para a transferência de calor, j_h , e de massa, j_d . Assim foi calculado o coeficiente de transferência de massa através das seguintes equações:

$$j_h = \frac{2,06}{\epsilon} \cdot \left(\frac{deG}{\mu f}\right)^{-0,51} \quad (3.4)$$

$$h_c = j_h \cdot C_{pf} \cdot G \left(C_{pf} \cdot \frac{\mu f}{k_f}\right)^{-2/3} \quad (3.5)$$

$$k_y = j_d \cdot G / Sc^{2/3} \quad (3.6)$$

Em que:

h_c é coeficiente de transferência de calor convectivo (J/m^2Kh); C_{pf} é a capacidade calorífica a pressão constante do gás (J/kgK); G é o fluxo mássico do gás (kg de ar seco/ m^2h); μ_f é a viscosidade do gás (kg/mh); k_f é a condutividade térmica do gás (J/mKh); ϵ é a porosidade do leito; d_e é o diâmetro da esfera com a mesma área da partícula (m); k_y é o coeficiente de transferência de massa (kg água/ $m^2h\Delta Y$) e Sc é Número de Schimit do ar.

Numerosas obras lidam com a modelagem da transferência de massa entre um produto e seu ambiente circundante e o transporte de massa no interior do produto em particular durante a secagem. Waananen et al. (1993) relataram uma lista de mais de 150 modelos matemáticos desenvolvidos entre 1907 e 1992 para a modelagem de transporte de massa em sólidos porosos durante a secagem.

3.3.4 Condições externas de secagem

Uma análise externa traduz condições e características já a nível industrial e de projeto de equipamento. São analisadas características como a temperatura do ar que será mantida nas varias fases, a velocidade do ar necessária para gerar condições adequadas de secagem mantendo a qualidade do produto, juntamente com a qualidade do ar, esta que carrega consigo umidade, na qual é necessário monitoramento ao longo do secador.

Existe a possibilidade de atuação de vários fenômenos ao mesmo tempo. Em termos industriais os mecanismos internos possuem pouco efeito no processo ou no equipamento em si e, na grande maioria das vezes, são ignorados ou negligenciados, com pouca preocupação ou problemas no processo e qualidade do material.

3.3.5 Local de secagem

O local onde o material sofre o processo de retirada de umidade possui características peculiares e está de acordo com o tipo de sólido, podendo ser encontrado os tipos: estático, cinético, fluidizado e diluído.

O leito estático possui como característica a permanência das partículas sem movimento (Figura 3.8).

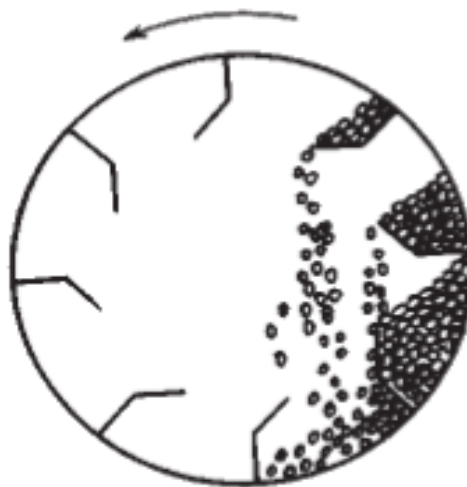
Figura 3.8 – Sólido em leito estático



Fonte: Perry e Chilton (1973)

O leito do tipo cinético, diferentemente, causa movimento das partículas no seu interior (Figura 3.9)

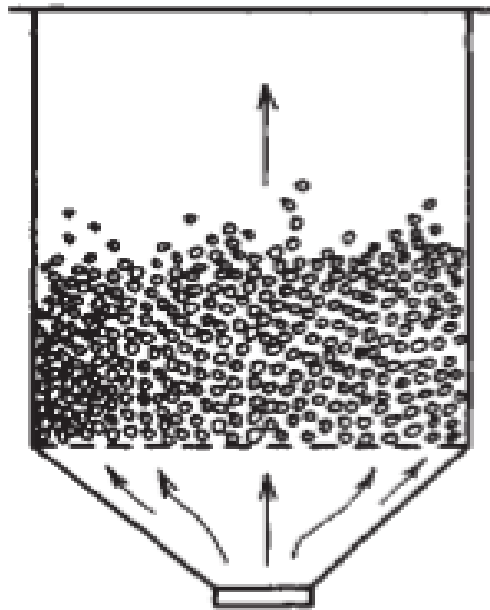
Figura 3.9 – Sólido em leito em movimento



Fonte: Perry e Chilton (1973)

O tipo fluidizado mantém o material particulado em condição expandida sustentando-o por meio da força de arraste do gás de secagem (Figura 3.10).

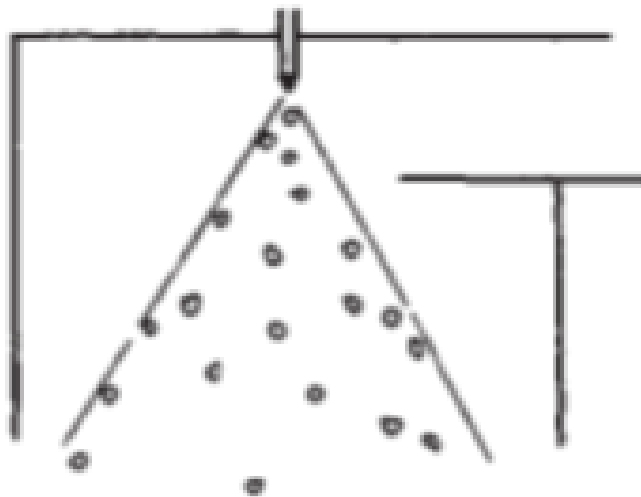
Figura 3.10 – Sólido em leito fluidizado



Fonte: Perry e Chilton (1973)

A forma diluída mantém as partículas separadas, o que impossibilita a influência de uma partícula sobre a outra (Figura 3.11).

Figura 3.11 – Sólido em concentrações diluídas

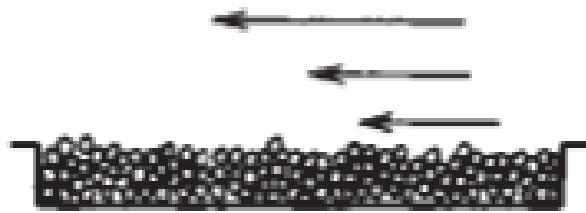


Fonte: Perry e Chilton (1973)

Outro aspecto importante está relacionado com a forma como o gás, agente de secagem, entra em contato com o material sólido, podendo o gás manter uma

corrente paralela ou perpendicular. Quando o gás atravessa o leito de forma paralela (Figura 3.12), é possível encontrar as configurações concorrentes, na direção de saída do produto, contra corrente ou de fluxo cruzado (Figura 3.13). No escoamento perpendicular, o gás pode barrar no sólido, atravessar os sólidos (Figura 3.14) ou arrastar o sólido e, conseqüentemente, o excesso de umidade (Figura 3.15).

Figura 3.12 – Fluxo de ar paralelo em um leito estático



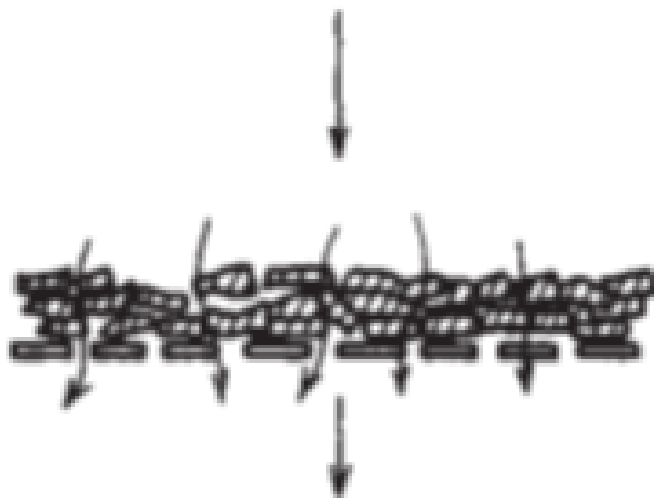
Fonte: Perry e Chilton (1973)

Figura 3.13 – Fluxo cruzado em um leito em movimento



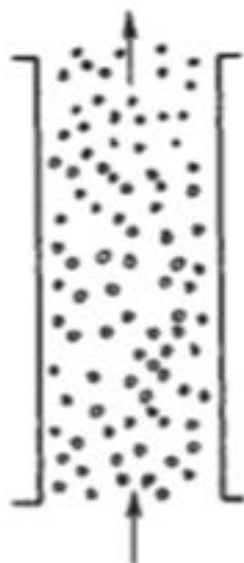
Fonte: Perry e Chilton (1973)

Figura 3.14 – Fluxo de ar perpendicular e atravessando o leito



Fonte: Perry e Chilton (1973)

Figura 3.15 – Fluxo de ar arrastando a matéria prima



Fonte: Perry e Chilton (1973)

Para a melhor escolha da configuração entre gás e sólido, deve-se levar em consideração uma adequada exposição entre a superfície do sólido e do gás e, também, as características do sólido como: superfície de contato entre o equipamento e o gás, tamanho e peso das partículas. (PERRY, 1973)

3.4 SECAGEM DE ALIMENTOS

As características dos alimentos são muito influenciadas pela umidade contida nas mesmas. A estabilidade do produto é de especial preocupação, pois muitas reações químicas e enzimáticas (ou seja, a oxidação, escurecimento) são dependentes da água. A maioria dos processos utilizados pela indústria de alimentos utiliza-se de transferência de umidade no processamento, muitas vezes juntamente com transferência de calor (ou seja, refrigeração, congelamento, cozimento, envelhecimento, salga, e principalmente a secagem). Esses processos devem ser otimizados para reduzir os custos operacionais e maximizar a qualidade do produto. (RUIZ-CABRERA et al., 2005).

A secagem dos alimentos por convecção é comumente aceita como um processo em que o agente convectivo (geralmente o ar) aquece a superfície dos alimentos, este calor produz a evaporação da água e o excesso produz um aumento da temperatura do produto, como consequência da condução de calor no sólido e difusão da água dentro dos alimentos. (GARCÍA-ALVARADO et al., 2014)

Bruin e Luyben (1980) evidenciaram três tipos de problemas na secagem de produtos alimentícios:

- Alterações do produto durante a secagem: os produtos alimentícios dependem da temperatura, da atividade química e do tempo de secagem. O processo de desidratação influencia na qualidade dos alimentos sob vários aspectos, dentre os quais a ocorrência de conversões químicas e mudanças físicas no alimento durante este período;
- Aspectos físicos e matemáticos do processo de secagem: o conhecimento dos fenômenos de transporte e das propriedades termo físicas e de equilíbrio termodinâmico, habilitam a interpretar o comportamento da secagem de materiais como uma função do tempo;
- Otimização do processo de secagem: os secadores são selecionados e projetados de tal modo a fornecer a melhor combinação de custo e qualidade, pois no custo da secagem, o consumo de energia é um dos fatores principais.

3.5 EQUIPAMENTO DE SECAGEM

Atualmente, o mais importante em setores industriais, com a exceção de produzir produtos de alta qualidade para os mercados, é aumentar a produtividade e reduzir os custos de produção. Em geral, a produção de produtos agrícolas e industriais está relacionados com a secagem, quer por um método natural ou utilizando energia a partir de outra fontes, resultando em uma menor taxa de produção ou de produtos de alto custo (KUSTUREE et al., 2010).

De modo geral, a indústria quando necessita de equipamento próprio para obter o produto desejado, com a umidade pré-estabelecida, encontra no mercado uma infinidade de equipamentos, com as mais variadas formas e características singulares. Estas dependem do processo e as condições, tais como: a temperatura da câmara de secagem, pressão, a velocidade do ar (se o gás de transporte é o ar), a umidade relativa e o tempo de retenção do produto. Todas essas características devem ser determinadas de acordo com a alimentação, produtos, propósito e método. A secagem utiliza intensivamente energia de processo, com o valor de consumo de 10% a 15% do total de energia disponível, em todas as indústrias dos países desenvolvidos (ERBAY, 2010).

3.5.1 Análise e seleção do equipamento

A seleção do tipo de secador é uma das áreas de estudo mais complexas e mal entendidas em tecnologia de secagem. Tem sido amplamente negligenciado na literatura, devido à dificuldade em definir quantitativamente um modelo ideal. Há um grande número de tipos de secadores disponíveis dentro de cada característica de processo. O requisito básico para o secador é que deve atingir uma relação necessária de secagem em um tempo aceitável, ser capaz de manusear o material e produzir, com qualidade, um produto aceitável. Além disso, o equipamento deve possuir um tamanho adequado e custos proporcionais à indústria que o possui e que atende toda a segurança e requisitos ambientais relevantes. (KEMP e BAHU, 1995)

O produto de certa forma, levando em consideração suas características, molda o tipo de equipamento necessário. O projeto em si do equipamento deve levar em conta alguns fatores como:

- Cinética de secagem;
- Variação das condições ao longo do secador;
- Área de transferência térmica;
- Configuração do escoamento do gás;
- Variáveis de operação;
- Fator financeiro.

Kiranoudis (1996) em seu trabalho indica tópicos relacionados à estratégia de projeto para um tipo de secador estudado. Dado um determinado produto com uma vazão pré-definida, uma umidade inicial desejada, sob restrições impostas pela termodinâmica, construção e qualidade do produto, os seguintes tópicos devem ser determinados:

- A configuração ideal, quando esta não é clara, elementos transportadores, seções de secagem, bem como o número de câmaras por secção em estrutura de fluxograma.
- O dimensionamento adequado dos equipamentos e características de construção.
- Os melhores pontos de ajuste de controladores (condições operacionais).

Veladat (2013) realizou um estudo que apresenta uma análise bidimensional da transferência de calor e massa durante o processo de secagem de massas com distribuições em estado estacionário de velocidade e temperatura do ar que flui em torno da massa. Usando esses perfis e estes valores, a solução do calor acoplado e equações de transferência de massa dentre os efeitos das condições operacionais, tais como a velocidade, temperatura e a umidade relativa do fluxo de ar foram estudadas juntamente com a velocidade de secagem da massa. A análise dos resultados mostrou que os efeitos da temperatura do ar sobre a taxa de secagem é mais importante do que o efeito da velocidade do ar.

A quantidade necessária de energia para secar um determinado produto depende de muitos fatores, como umidade inicial, conteúdo em umidade final desejada, a temperatura do ar de secagem e velocidade. Para otimização da estrutura de um sistema de energia, há a necessidade de desenvolver primeiro um

modelo do sistema. Por isso, um melhor conhecimento da cinética de secagem poderá melhorar o projeto e a operação de forma eficiente de modo a economizar energia. (XUESONG LIU, 2009)

Vários materiais que submetidos a uma secagem na produção industrial requerem abordagem diferentes para este processo. Em muitos casos, o tempo de secagem torna-se importante por causa da taxa de produção. Em outro caso, o tempo é menos importante, mas a qualidade dos produtos, isto é, o seu aspecto e bom estado mecânico ou o valor biológico, no caso de produtos alimentares ou medicamentos. Em todos os casos, é importante a minimização do uso de energia sendo este processo demorado. Para cumprir esses requisitos, é preciso uma análise em métodos especiais de secagem, ou seja, para métodos combinados em que são utilizadas diferentes fontes de fornecimento de energia. (PROMMAS, 2012)

Segundo Silva (1995), o consumo de energia para a concentração da gelatina por meios térmicos é muito maior para o processo de secagem em comparação a outros, conforme mostrado na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Consumo de energia Base: (kg vapor/kg água evaporada)

Evaporador simples efeito	110-120
Evaporador triplo efeito	30-40
Secador esteira	240-350

Simulações numéricas do funcionamento de um secador são geralmente realizadas utilizando equações diferenciais, incluindo balanços de massa e energia e funções de transferência. As funções de transferência envolvem termos experimentais, tais como a taxa da umidade evaporada ou o calor transferido. A taxa depende da temperatura média, teor de umidade ou a velocidade do ar e tudo isso pode variar em função das características do produto. (SEBASTIAN et al., 1996)

3.5.2 Tipos de secadores

Alguns dos secadores mais comuns encontrados são: bandeja, túnel, rotativo, tambor, pulverizadores, dentre outros.

Secadores do tipo bandeja são os mais simples, podendo ser do tipo descontínuo, o equipamento mantém o material úmido sobre bandejas que se posicionam em prateleiras. São adequados a produtos que exigem modificações das condições de secagem à medida que o processo avança.

Secadores transportadores em formato de túnel são do tipo contínuo e convectivo, neste todo o calor se transfere ao material por convecção. É um processo quase adiabático, em que as partículas devem possuir um formato considerável para com isso ser possível a formação de um leito. A vazão do gás deve ser de forma moderada evitando, assim, a fluidização do leito. A taxa de secagem é alta devido à grande área de transferência térmica, sendo que a maior parte do tempo do processo ocorre no período à taxa constante.

A família mais popular de secadores é a que envolve a secagem convectiva, dessa forma o calor sensível do agente de secagem é fornecido à superfície do material, por convecção. O agente de secagem que flui passado ou através do corpo remove a água evaporada e transporta-a para fora do secador. Esse modelo de secagem inclui três tipos básicos de secador: correias transportadoras, leito fluidizado e rotativos. A secagem por convecção se aplica a praticamente a todos os setores da indústria química, envolvendo desidratação de materiais que vão desde produtos alimentícios a minerais inorgânicos. (KIRANOUDIS, 1996)

O tipo recomendado para sólidos granulares são os rotativos, pois possuem seus eixos inclinados, devido ao material ser de diâmetro reduzido, sendo importante manter uma superfície de sustentação impenetrável. Quando o material é pastoso e com uma grande quantidade de umidade, devem-se utilizar mecanismos mecânicos para a retirada da umidade, como exemplo, raspadores mecânicos, em forma de parafuso ou tambores.

Para substâncias sensíveis, em que é importante manter pouco tempo de contato por questões de deterioração da matéria-prima, são recomendados secadores do tipo pulverizadores. Neste o material é disperso tornando as gotículas de água tão pequenas que a evaporação da umidade em excesso é facilitada devido à alta área de contato.

Um secador de correia transportadora é constituído por câmaras de secagem colocadas em série. O melhor desempenho é conseguido quando estas câmaras são agrupadas em seções de secagem com características diferenciadas. Todas as

câmaras numa dada seção de secagem estão equipadas com uma correia transportadora comum, um equipamento aquecedor de ar, ventiladores e vapor, operando para aquecer os trocadores de calor. (KIRANOUDIS, 1996)

É prática comum que dentro de cada câmara, a temperatura e a umidade do fluxo de ar de secagem são controlados. Em secadores que possuem leito fluidizado, a fase sólida é completamente dispersa em partículas numa corrente de gás que flui verticalmente como uma consequência do efeito de flutuação do gás. Devido à agitação no leito fluidizado, uma boa mistura da fase sólida é normalmente conseguida. A fluidização existe quando a velocidade superficial do gás varia entre dois valores extremos correspondentes a suspensão e efeitos de arrastamento. Geralmente, a temperatura da fase sólido-gás é controlada por meio da válvula de vapor. Em secadores rotativos contínuos, os sólidos granulares de escoamento livre são passados através de um cilindro rotativo e são regados por um gás quente em movimento, geralmente contracorrente com a fase sólida (KIRANOUDIS, 1996).

3.5.3 Escolha do equipamento

Para a escolha correta do tipo de equipamento são necessárias etapas e uma avaliação criteriosa levando em consideração, o produto, processo e os custos.

3.5.3.1 Avaliação inicial

A avaliação inicial é baseada na manipulação do produto, nesse caso, leva-se em consideração a continuidade do processo. Realiza-se uma análise das características físicas do material, ação corrosiva, abrasiva, material particulado resultado de arraste, toxidez e inflamabilidade. Quanto às características do processo, se avalia o tipo de umidade, sendo livre, ligada, ou ambas, o teor de umidade inicial e final, temperatura de secagem admissível e o tempo de secagem.

3.5.3.2 Comparação entre secadores

É a etapa na qual se avalia o custo-benefício em termos físicos e financeiros. Leva-se em consideração a capacidade necessária para atender a demanda, se a operação é contínua ou descontínua, processos e equipamentos anteriores e posteriores. Analisa-se a qualidade do produto, possibilidade de contração, contaminação, uniformidade da umidade, decomposição do produto e secagem em excesso.

3.5.3.3 Ensaio de secagem

Esta etapa se caracteriza por ser mais prática, são avaliadas condições operacionais ótimas, forma de manusear o material e estabelecer as condições operacionais em escala piloto para, então, em termos de projeto, definir em escala industrial. Com isso, é possível ponderar custos iniciais, operacionalidade do equipamento e flexibilidade do mesmo.

3.5.3.4 Escolha final

Na etapa final definem-se os detalhes do equipamento, sua implantação, manutenção e o sistema gerencial.

3.6 SECAGEM DA GELATINA

A gelatina se caracteriza por apresentar um formato cilíndrico cujo comprimento é muito superior ao seu diâmetro. Nesse caso, requer cuidados a serem submetida no processo de secagem. É necessário um suporte que mantenha o produto fixo e que ao mesmo tempo movimente-o, esse material é altamente sensível à temperatura podendo se liquefazer a qualquer momento. Possui capacidade calorífica de acordo com Skuratov (1946) de 1192 J/kg K.

Secadores projetados para a gelatina são do tipo túnel, contendo uma esteira de transporte, pelo fato de o produto exigir suporte devido sua fragilidade e um

processo de secagem lento com temperaturas amenas e controláveis. Industrialmente, o processo é estacionário e o funcionamento é intermitente, uma indústria de gelatina não para, nesse caso o secador é o equipamento principal que coordena toda a fábrica.

A umidade pode ser calculada em termos de umidade em base seca ou em base úmida, dessa forma:

$$\% \text{ de umidade (Base úmida)} = \frac{(m_1 - m_2) \times 100}{m_A} \quad (3.8)$$

$$\% \text{ de umidade (Base seca)} = \frac{(m_1 - m_2)}{m_2} \times 100 \quad (3.9)$$

Em que:

m_1 é a massa do cadinho (+) massa da amostra; m_2 é a massa do cadinho (+) massa da amostra após estufa e m_A é a massa do cadinho + massa da amostra (-) a massa do cadinho

As características térmicas da gelatina exigem que o secador seja subdividido em câmaras independentes para que o perfil de temperatura de secagem seja crescente, apropriado para a gradativa redução de umidade da gelatina (NEITZEL, 1990).

Um extrusor alimenta a esteira com os filamentos cilíndricos úmidos (70% em base úmida) de gelatina de maneira uniforme, fazendo com que a camada de gelatina sobre a esteira tenha uma espessura não superior a 15 cm. O secador de esteira industrial se encontra instalado na parte superior de um túnel, longo o suficiente para acomodar câmaras de secagem consecutivas e isotérmicas, com área de secagem de 16,6 m² e comprimento aproximadamente de 4,15 m cada uma. A gelatina permanece não mais que 18 minutos em cada câmara de secagem.

Para o produtor, o armazenista ou o comerciante, interessa o teor expresso em base úmida. Para a determinação do teor de umidade, existem alguns métodos distintos, dentre os quais podem-se evidenciar o método de estufa, o método por meio de destilação e o método utilizando infravermelho.

Existe uma dificuldade adicional em se secar a gelatina devido ao efeito da temperatura sobre o gel. Para umidades elevadas, o ponto de fusão é baixo, da ordem de 30°C e cresce à medida que o teor de umidade diminui. Isto gera a necessidade de o secador operar com um perfil de temperatura crescente, que se adequa à redução de umidade da gelatina conforme a evolução do processo em si (NEITZEL e MASSARANI, 1987). Dessa forma, justifica-se a divisão do secador em câmaras.

Existe uma tendência da gelatina se liquefazer durante a etapa inicial de secagem, gerando a formação de uma crosta seca na superfície, a gelatina não poder ser submetida a temperaturas elevadas e repentinas, visto que isto pode ocasionar perdas de algumas das suas propriedades. (SILVA, 1995)

Cada câmara possui características particulares, dentre elas a variação de temperatura de uma para outra e a forma como é insuflado e retirado o ar. O fluxo de ar, agente de secagem, é transversal ao produto mantendo com isso, um contato maior entre o ar e o produto. O processo se caracteriza por ser lento e gradual e, segundo Neitzel (1987), existem duas fases:

Fase 1: O processo é controlado pela resistência a transferência de massa da superfície do sólido.

Fase 2: A gelatina atinge o valor da umidade crítica e nesse ponto o processo é controlado pela difusão da água no interior, sendo que a partir da umidade crítica a secagem é altamente dependente dos mecanismos de transferência de calor.

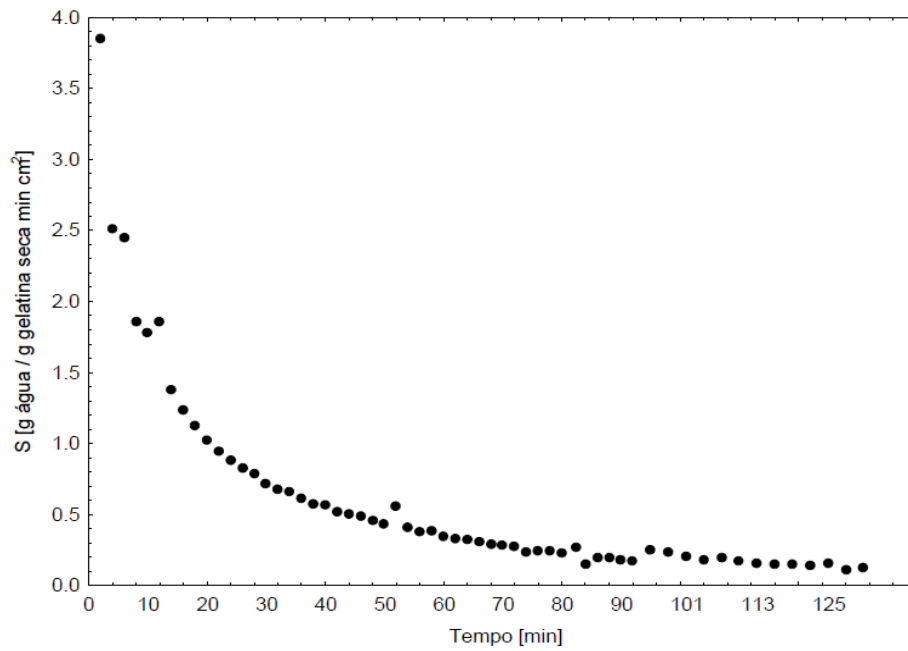
Observa-se o comportamento característico da curva de secagem da gelatina na Figura 3.16.

Bertoli e Neitzel (1987) realizaram a simulação de um secador de esteira e observaram que, quando a gelatina esta em baixa umidade, em torno dos 10% em base seca, a tendência da curva se dispersa, há a presença de inúmeros pontos sem uma tendência lógica. Este fato os levou à realização de avaliações mais rigorosas, relacionadas aos parâmetros tomados como referência em sua pesquisa, tal como a condutividade térmica da gelatina, o coeficiente de difusão e as propriedades que levam ao seu encolhimento.

Muitos trabalhos de secagem de gelatina, em que se trata de sua modelagem matemática, levam em consideração apenas a fase mais simples de secagem, como observado no trabalho de Silva (1995), Figura 3.17. Na prática, o dimensionamento

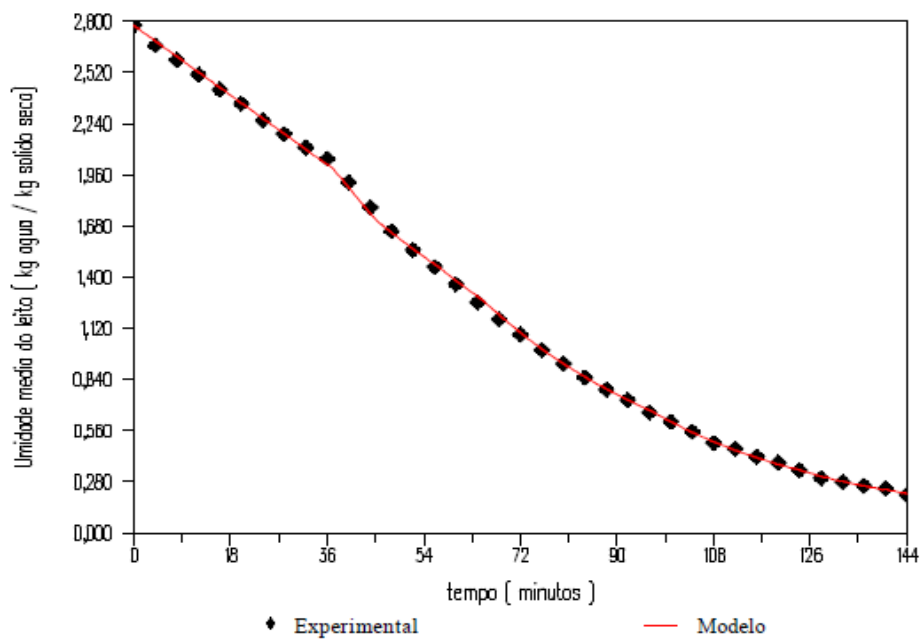
do equipamento não pode se restringir apenas na fase de secagem mais previsível, deve levar em consideração o seu termino até a umidade de equilíbrio e ser estudado as características do produto que leva ao equipamento ideal.

Figura 3.16 – Curva de secagem típica da gelatina



Fonte: Corazza et al. (2003)

Figura 3.17 – Curva de secagem de gelatina em equipamento de bancada



Fonte: Silva (1995)

Uma vez que a gelatina deve ser seca lentamente, uma propriedade importante é a condutividade térmica, que é uma função da umidade, dando condições de, em cada câmara de secagem, submetê-la a temperaturas que facilitem a difusão da umidade do seu interior para o exterior, sem causar danos ao processo e, principalmente, ao produto, evitando que ocorra amolecimento ou fissura dos *noodles*. (SOUSA, 1996)

Quando uma película fina de gelatina inicialmente hidratada é deixada exposta para secar a partir da superfície, alterações na estrutura superficial do material e as propriedades mecânicas locais na região de secagem ocorrem. O filme é simultaneamente submetido a grande deformação (acima de 20%), um padrão periódico de rugas aparece sobre a superfície da gelatina ao longo do comprimento da amostra na direção da força aplicada. Estas rugas são distribuídas uniformemente sobre a superfície da gelatina o que muda com a composição da amostra. (RIZZIERI et al., 2006)

Ao passar pelas câmaras (1 a 10), a gelatina é seca com fluxo de ar quente transversal ao seu leito. O sentido do fluxo de ar é indicado pelas setas na Figura 3.18. O ar usado para secar a gelatina é previamente filtrado e desumidificado na Central de Tratamento de Ar (CTA) por processos de compressão e liquefação da umidade utilizando como fluido de processo a amônia. Ao passar de uma câmara para outra, ele é aquecido por um trocador de calor. Dessa forma, sua umidade relativa diminui, aumentando o potencial de secagem e o gradiente para a transferência de massa. (CORAZZA et al., 2003)

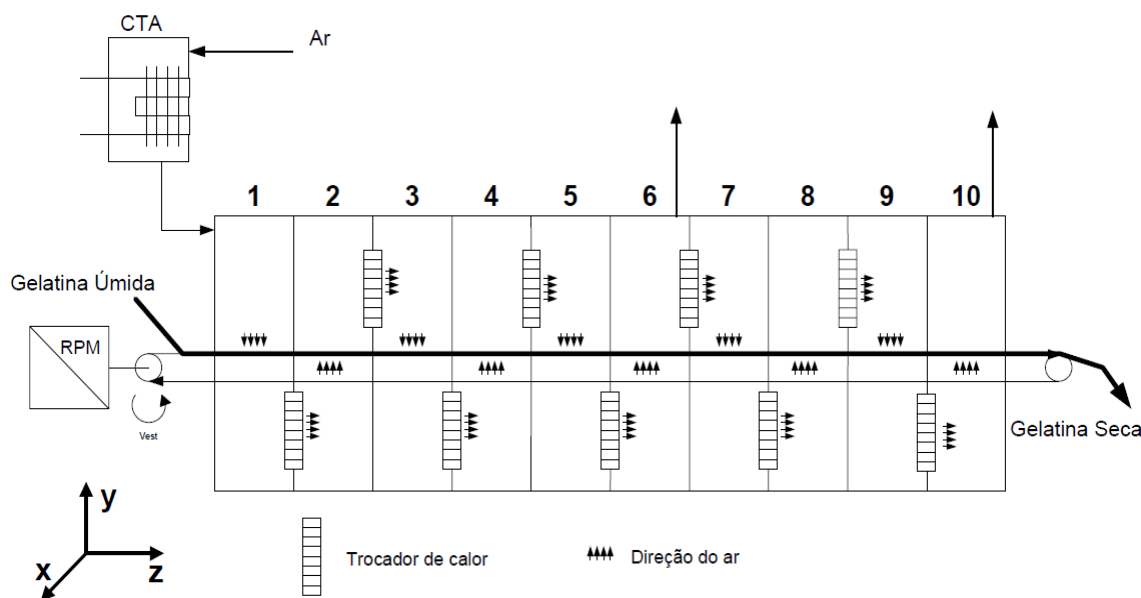
Ao longo do processo, a porosidade do leito varia tornando-se menor ao longo do equipamento, pois ocorre a contração do produto que segundo Neitzel (1987) o valor médio é de 0,53. Porém, a porosidade do leito de gelatina não é constante ao longo do secador, uma vez que, conforme a gelatina seca, ocorre uma contração no volume do leito poroso. Então, considera-se que a porosidade aumenta de forma linear com a diminuição da umidade no leito de gelatina, conforme a Equação 3.10.

$$\epsilon = \epsilon_0 (1 + (\alpha - X_s)) \quad (3.10)$$

Em que:

$\epsilon_0 = 0,528$; $\alpha = 0,054$ e X_s é a umidade da gelatina (g.H₂O/g.sólido).

Figura 3.18 – Esquema de um equipamento de secagem



Fonte: Corazza et al. (2003)

Sousa (1996) analisou a condutividade térmica em função da umidade ao longo do secador e observou que a tendência da evolução da condutividade térmica da gelatina com a umidade obedece aos princípios de transferência de calor apresentados na literatura, ou seja, quando a umidade da gelatina é alta, em torno dos 70%, a condutividade térmica da gelatina pode ser substituída pela condutividade térmica da água, porém, para valores de umidade mais baixos, em torno de 40%, deve-se realizar uma análise dos efeitos trazidos à secagem da gelatina o que, conseqüentemente, poderia mudar o correto dimensionamento do equipamento. Na Tabela 3.2 observa-se a influência da condutividade térmica em termos de umidade da gelatina.

Tabela 3.2 – Condutividade em função da umidade durante a secagem

Câmara	Teor de umidade (gH ₂ O/ggel)	Condutividade (kcal/hm°C)
Extrusor	0,721	0,467
Entrada	0,719	0,455
1	0,578	0,32

Tabela 3.2 – Condutividade em função da umidade durante a secagem - Continuação

Câmara	Teor de umidade (gH ₂ O/ggel)	Condutividade (kcal/hm°C)
2	0,581	0,323
3	0,35	0,223
4	0,22	0,141
5	0,21	0,14
6	0,137	0,136
7	0,122	0,139
Saída	0,111	0,128

Dentre os parâmetros a cerca da cinética de secagem da gelatina Krischer e Kast (1978) determinaram o seguinte valor para a umidade crítica da gelatina $X_c=1,80$ (kg de água/kg sólido seco) e Gregg e Sing (1967) determinaram a umidade de equilíbrio da gelatina em $X_{mx} = 0,095$ (kg de água/kg sólido seco).

Há uma grande mudança do aspecto do produto ao longo das câmaras, na saída do equipamento a gelatina se apresenta rígida e imediatamente após é submetida ao processo de moagem e reduzida a particulados. Estes particulados posteriormente são submetidos à separação de acordo com seu diâmetro e armazenados para a comercialização.

3.7 PROJETO E OTIMIZAÇÃO DO SECADOR

Kiranoudis et al. (1998) desenvolveram um modelo matemático apropriado para o projeto e otimização de secadores do tipo esteira transportadora. O objetivo do projeto foi a avaliação da estrutura ideal em formato de fluxograma, características construtivas e condições operacionais. A metodologia adotada baseou-se na construção de uma superestrutura que envolve um grande número de estruturas secundárias, e otimizá-lo por meio de técnicas de programação matemática não-linear.

Prommas (2012) destaca, para uma análise de otimização, a análise exergética, sendo as características de exergia identificada devido à sua importância em uma vasta gama de aplicações. A análise exergética tem sido cada vez mais utilizada como uma ferramenta útil na concepção, avaliação, otimização e melhoria de sistemas de energia. Ela pode ser aplicada sobre ambos os sistemas e níveis de componentes. Esta análise leva a uma melhor compreensão das influências da termodinâmica e fenômenos ligados ao processo, comparação de importantes e diferentes fatores termodinâmicos, e a determinação das formas mais eficazes de melhorar o processo.

Para Erbay (2009), a análise exergética é uma ferramenta que pode ser utilizada com sucesso na criação e simulação de sistemas de energia e fornece as informações necessárias para a escolha do projeto dos componentes apropriados e o procedimento de operação do equipamento. Esta informação é muito mais eficaz para a determinação na planta o custo de funcionamento, a conservação da energia e do combustível utilizado.

3.8 SECADOR CONVECTIVO DO TIPO ESTEIRA

As características operacionais de projeto de secadores tipo esteira, constituem um importante campo da engenharia de processo, que ainda é regido pelo empirismo. Kiranoudis (1998) aborda aspectos que foram estudados de forma direta com base no raciocínio matemático que descreve o processo de secagem por convecção. Procedimentos de projeto que visam a determinação do equipamento ideal, arranjo, tamanho e as características operacionais para secadores esteira foram realizados por meio da otimização do custo total anual de cada arranjo de equipamento para uma dada capacidade de produção.

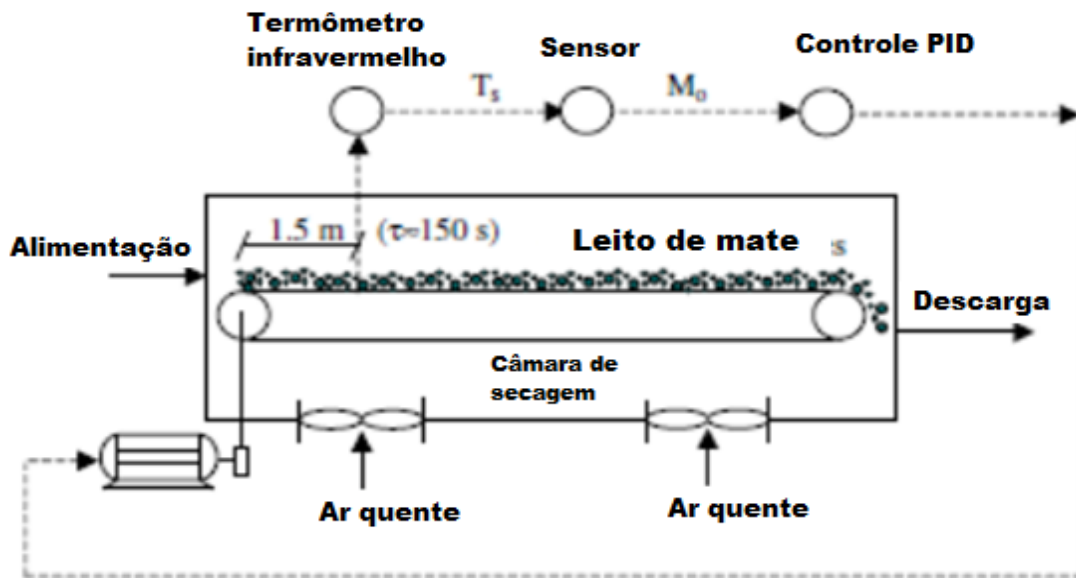
Todos os arranjos de secadores convectivos foram comparados, avaliando as configurações ideais para a vasta gama de valores de capacidade de produção. Neste procedimento, a determinação do secador apropriado e de suas características operacionais correspondentes são consideradas como um problema complexo. Este normalmente é solucionado por meio de métodos empíricos ou semi-empíricos baseados em custos de energia e de capitais.

Segundo Bohner (2013), o problema da secagem irregular ao longo da largura da correia em secadores esteira é uma consequência da distribuição do ar inadequada, levando à diminuição da taxa de transferência de calor e massa. O problema foi descoberto na distribuição do ar em ambos os lados do secador, em virtude do ângulo incorreto de uma aba de distribuição ajustável. Quando o ângulo foi ajustado para 45° , os fluxos de massa de ar de ambos os lados tornaram-se iguais. Além disso, a distribuição de ar através da correia não era homogêneo observado por meio de estudo em medições da temperatura do ar e do produto, e a distribuição de sua umidade. O estudo resultou num fluxo de ar otimizado e uma melhoria significativa no processo.

Jensen (2011) propôs um modelo empírico para controlar a umidade de saída do produto de um secador de correia transportadora. O modelo empírico é aplicado de modo a influenciar a variável de controle de umidade com base nas leituras temporárias virtuais de temperatura na matéria prima de entrada no secador. O sistema utiliza um controlador proporcional, integral e derivativo (PID), que manipula a velocidade da correia transportadora para manter a teor de umidade de saída entre 0,024 e 0,034 em base seca. Os parâmetros do modelo do sensor sintoniza um conjunto de cerca de 2000 dados experimentais de temperatura da superfície e o teor de umidade das folhas de mate. Estes resultados surgiram do lote de experimentos de secagem com temperatura entre 70°C e 120°C para até 9600s, utilizando folhas com teor inicial de umidade variando de 0,14 a 1,7 em base seca. O circuito fechado de respostas para o teor de umidade e temperatura das folhas de mate foi obtido por simulação em um modelo dinâmico. Ele foi representado por um sistema de duas equações diferenciais parciais derivadas do balanço de massa e de energia da água no interior da matéria prima a ser seca. Um esquema de uma planta de secagem de tamanho real das folhas de mate e a estratégia de controle sugerida é ilustrado na Figura 3.19.

Segundo Veladat (2013) o investimento e os custos operacionais básicos do processo de secagem são altos. A tentativa do método usado, de modelagem matemática, proposto por ele para projetar secadores industriais e ter acesso a adequada condição operacional é demorado e caro. Neste contexto observa-se que os efeitos de diferentes parâmetros de tempo e eficiência de secagem tem sido de grande interesse nos últimos anos.

Figura 3.19 – Sistema de controle de umidade



Fonte: Adaptado de Jensen (2011)

4 METODOLOGIA

A metodologia utilizada para o desenvolvimento deste trabalho consiste na realização de revisão bibliográfica para a consolidação dos princípios de transferência de massa e calor aplicados em projetos de equipamentos de secagem convectiva, caracterização experimental do material e do processo de secagem e posterior comparação a um equipamento real que opera industrialmente, como forma de avaliar estratégias e propor soluções na forma de redimensionamento e avaliação das propriedades térmicas do equipamento já existente.

4.1 MATERIAIS

Serão apresentados o material e os métodos que serão utilizados para obter as propriedades térmicas e de cinética de secagem da gelatina, após isso o método de cálculo para determinar os ajustes dos parâmetros para a equação que caracteriza a taxa de secagem. Com base nos dados experimentais, será demonstrada a estratégia que será usada para obtenção dos resultados de redimensionamento do equipamento de secagem bem como sua avaliação térmica e, finalmente, comparada aos valores reais de equipamento em operação.

4.2 A MATÉRIA-PRIMA

O material utilizado para a determinação das propriedades fundamentais no estudo é constituído de amostras de gelatina *in natura*. As amostras foram recolhidas antes do início da secagem, ou seja, após o processo de solidificação quando submetida à extrusora. A gelatina devido às suas propriedades físico-químicas apresenta comportamentos diferenciados que podem, com isso, alterar os resultados da análise térmica. Dentre estas propriedades é importante se ater quanto à solubilidade, ela pode se dissolver facilmente em água quente, e a estabilidade térmica, pois a gelatina pode se decompor a temperaturas superiores a 100 °C.

A amostra foi coletada no dia dos testes e mantida em temperatura inferior a 4°C, garantindo a total preservação de suas características físico-químicas. A coleta foi realizada em sacos plásticos esterilizados, transferidos para o Laboratório de Processos de Separação do Departamento de Engenharia Química da UEM.

4.3 EQUIPAMENTO EM ESCALA DE BANCADA

Para determinar as propriedades térmicas e de cinética de secagem utilizou-se de um equipamento em escala laboratorial para a secagem do produto e de dados do equipamento industrial em operação para a comparação das condições operacionais que foram propostas. Os dados experimentais servem para determinar as características operacionais necessárias de acordo com o material úmido, e os dados industriais, para a comparação de que a análise é válida para a aplicação. O material foi seco até que a umidade de equilíbrio coincidissem com os dados retirados do equipamento industrial, sendo proposto um ajuste baseado neste aspecto para, com isso, ser possível a realização correta do redimensionamento e análise térmica.

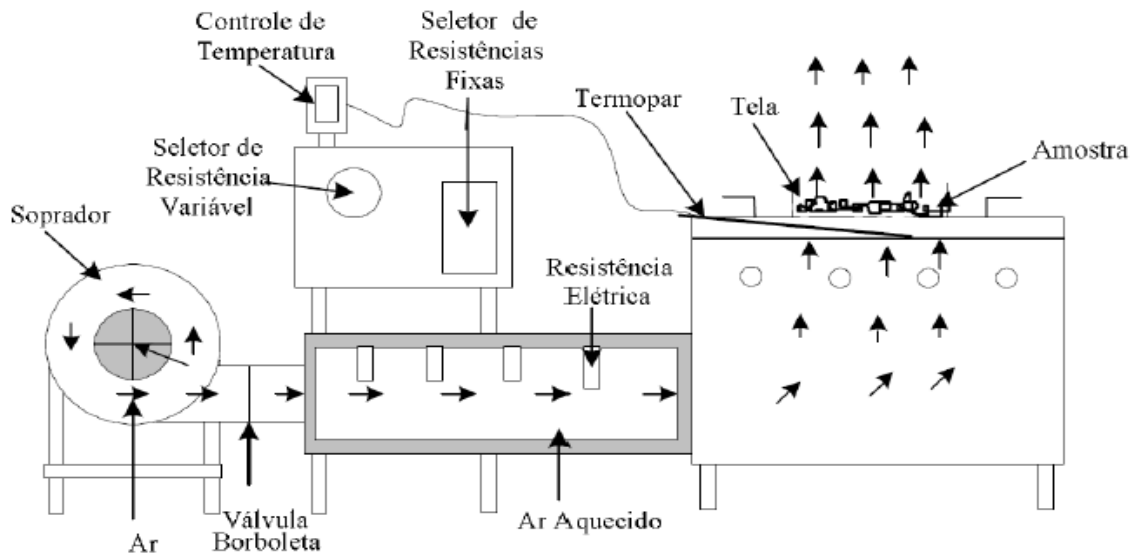
4.3.1 Componentes

Para determinar o perfil de umidade foram realizados testes de secagem do material em escala laboratorial. Para isso, foi necessário um equipamento que permitisse o processo ser realizado em temperatura e velocidade do ar constante.

Na sequência, apresenta-se a lista dos instrumentos necessários e também pode ser observada, na Figura 4.1, o arranjo dos mesmos.

- Soprador
- Válvula borboleta
- Seletor de resistência
- Resistência elétrica
- Termopar
- Câmara e dutos
- Tela perfurada
- Anemômetro
- Isolante
- Balança
- Estufa

Figura 4.1 – Equipamento de secagem em nível laboratorial



Fonte: Luz (2006)

4.3.2 Método de operacionalização

Aciona-se o soprador e pela válvula borboleta controla-se a vazão do ar de modo a manter uma vazão adequada e compatível com o processo. Por meio do

seletor de resistência variável, regula-se a corrente elétrica que atravessará o duto de ar objetivando o aquecimento do mesmo. De posse de um termopar e um controlador de temperatura ajusta-se a temperatura do ar de aquecimento, para com isso, mantê-lo uniforme durante o processo de secagem.

Utilizou-se uma tela perfurada para manter a uniformidade do ar que atravessa o material a ser seco. Acima da tela definiu-se a direção do ar, o agente de secagem, que melhor se adapte ao produto, nesse caso a direção do ar foi transversal à matéria prima.

Para quantificar a velocidade com que o vapor d'água se desprende da matéria-prima, foi necessário dispor de balança e cronômetro, e com isso, obtém-se o registro do peso do material por tempo do início ao fim da secagem. Por fim por meio de uma estufa obteve-se a massa de material completamente seco possibilitando assim a realização do cálculo da massa inicial.

4.3.3 Método de análise

Para obter dados confiáveis e adaptáveis ao equipamento foi necessário primeiramente realizar uma análise sensorial que depende do observador e do comportamento da matéria-prima úmida e seca juntamente de sua qualidade final. A análise sensorial foi realizada baseando-se na textura, aparência, consistência e cor da gelatina. Após a análise qualitativa foram traçadas as isotermas de secagem e, posteriormente, definiu-se as melhores condições para a secagem do material.

4.3.3.1 Análise qualitativa da secagem da gelatina

Após o equipamento de secagem estar configurado de modo a proporcionar todas as condições uniformes submeteu-se o material úmido sobre um suporte perfurado e o suporte acima da tela perfurada onde flui ar de secagem. Nesse ponto devem-se realizar os seguintes ensaios qualitativos:

- Ensaio de secagem a uma velocidade de ar mínima no qual o ar possui um valor de Reynolds que caracteriza o processo como início de convecção forçada, e temperatura máxima permitida no qual a gelatina sofre processo de derretimento.

- Ensaio de secagem a uma velocidade máxima no qual a amostra sofre fluidização e temperatura mínima possível, neste caso a temperatura ambiente.
- Ensaio de secagem a temperatura e velocidade do ar moderadas, ou seja dentro os limites apresentados anteriormente.

A gelatina é muito sensível a altas temperaturas o que pode provocar derretimento da mesma e tornando a tela perfurada impermeável ao ar. Quanto a vazão de ar, a limitação se encontra no peso da gelatina que dependendo da velocidade do ar pode fluidizar as amostras.

4.3.3.2 Análise quantitativa da secagem da gelatina

Após análise qualitativa é possível determinar as melhores condições de secagem em termos grosseiros, ou seja, seus extremos de temperatura e taxa do ar de secagem que poderia vir prejudicar a qualidade do produto final.

De posse dos extremos de temperatura e taxa do ar de secagem, e definido a direção do ar em contato com o material realizou-se os seguintes conjuntos de ensaios na forma de baterias de ensaios:

- Ensaio 1: Taxa do ar de secagem constante de aproximadamente 2 m/s e temperatura de aproximadamente 30°C;
- Ensaio 2: Taxa do ar de secagem constante de aproximadamente 2 m/s e temperatura de aproximadamente 40°C;
- Ensaio 3: Taxa do ar de secagem constante de aproximadamente 2 m/s e temperatura de aproximadamente 50°C;
- Ensaio 4: Taxa do ar de secagem constante de aproximadamente 2 m/s e temperatura de aproximadamente 40°C até a umidade crítica, e em seguida aumento brusco da temperatura para 60°C;
- Ensaio 5: Taxa do ar de secagem constante de aproximadamente 2 m/s e temperatura de aproximadamente 40°C até a umidade crítica, e em seguida aumento brusco da temperatura para 70°C;
- Ensaio 6: Taxa do ar de secagem constante de aproximadamente 2 m/s e temperatura de aproximadamente 40°C até a umidade crítica, e em seguida aumento brusco de temperatura para 80°C.

4.4 CONSTRUÇÃO DA CURVA DE SECAGEM

A curva de taxa de secagem foi obtida a partir dos dados de umidade por tempo em 100 pontos coletados com intervalo de tempo de 3 minutos. A curva de taxa de secagem foi obtida utilizando o método numérico conforme (MOTTA LIMA et al 2004). O procedimento de cálculo da taxa de secagem no ponto i segue as equações 4.1, 4.2 e 4.3.

$$\left(\frac{\Delta X}{\Delta t}\right)_i \text{ entre } i-1 \text{ e } i \quad (4.1)$$

$$\left(\frac{\Delta X}{\Delta t}\right)_i \text{ entre } i \text{ e } i+1 \quad (4.2)$$

$$\left(\frac{\Delta X}{\Delta t}\right)_i = \left[\left(\frac{\Delta X}{\Delta t}\right)_{i-1} + \left(\frac{\Delta X}{\Delta t}\right)_{i+1}\right]/2 \quad (4.3)$$

Em que:

X é a umidade em um determinado tempo em $(g_{H_2O}/g_{sól-seco})$ e t , o tempo de secagem.

4.4.1 Ajuste dos parâmetros da curva de secagem

Para o ajuste dos parâmetros de secagem utilizaram-se modelos propostos na literatura partindo dos mais simples até os mais complexos. Nesse caso, iniciou-se por: Henderson e Pabis (1961), Yaldiz et al. (2001) e Ozdemir e Devres (1999). O software livre utilizado foi o *Lab curve Fiting v 7.2.48*. Com base no melhor ajuste, assume-se como equação fundamental para cálculo de balanços e análise térmica. São apresentados os modelos utilizados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Modelos de ajuste de curvas a período de secagem a taxa decrescente

Modelo	Equação	Referências
Henderson e Pabis	$X=A\exp(-kt)$	Henderson e Pabis (1961)
Logaritmo	$X=B\exp(-kt)+c$	Yaldiz et al. (2001)
Exponencial 2 termos	$X=C\exp(-k_0t)+D\exp(-k_1t)$	Ozdemir e Devres (1999)

Em que:

X é a umidade; t é o tempo de secagem e A,B,C,D,c,k,k₀,k₁: são parâmetros.

Para a sua análise térmica é necessário desenvolver um modelo de equação que traduza a dinâmica do processo de transferência de massa e calor simultâneos. Para isso são necessários:

- Cálculo de balanços de massa do sólido e do ar
- Cálculo de balanços energéticos do sólido e do ar
- Determinação dos parâmetros de eficiência em termos de transferência de massa e calor

4.5 EQUIPAMENTO DE SECAGEM INDUSTRIAL

O equipamento do tipo esteira em escala industrial para a secagem de gelatina em geral são semelhantes em várias indústrias e possui dimensões e operação semelhantes. As características operacionais do equipamento serão utilizadas como forma de comparar os resultados provindos da análise de redimensionamento e análise térmica do processo.

4.6 ANÁLISE DE REDIMENSIONAMENTO E CONDIÇÕES MECÂNICAS OPERACIONAIS

Existem variações do equipamento em termos operacionais e de projeto, porém, dentre os equipamentos observados podem-se destacar em comum: dimensões das câmaras praticamente idênticas, largura da esteira transportadora basicamente idêntica com as dimensões do comprimento de cada câmara e tempo de secagem semelhante aos ensaios laboratoriais.

Pelo processo iterativo utilizando a linguagem Visual Basic e o software Microsoft Excell 2003[®] simulou-se o comprimento total do equipamento em função do tempo de secagem para os respectivos três casos. Os tópicos 4.6.1 a 4.6.3

descrevem parâmetros próximos ao equipamento real e são utilizados como forma de obter resultados comparativos operacionais do equipamento.

4.6.1 Comprimento do secador por tempo de secagem

Considera-se:

- Vazão mássica constante igual a 2450 kg/h;
- Altura inicial do leito de secagem de 0,05m;
- Densidade média da gelatina de 817,6 kg/m³ correspondente a média ponderal da densidade da água em 70% (1000 kg/m³) e 30% (392 kg/m³) da gelatina seca;
- Largura do equipamento de 4 m.

4.6.2 Velocidade da esteira e comprimento do secador em função da altura do leito

Considera-se:

- Vazão mássica constante igual a 2450 kg/h;
- Densidade média da gelatina de 817,6 kg/m³ correspondente a média ponderal da densidade da água em 70% (1000 kg/m³) e 30% (392 kg/m³) da gelatina seca;
- Largura do equipamento de 4 m;
- Tempo de secagem de 252 min.

4.6.3 Velocidade da esteira e comprimento do secador em função da vazão mássica

Considera-se:

- Densidade média da gelatina de 817,6 kg/m³ correspondente a média ponderal da densidade da água em 70% (1000 kg/m³) e 30% (392 kg/m³) da gelatina seca;
- Largura do equipamento de 4 m;
- Tempo de secagem de 252 min.

4.7 BALANÇO DE MASSA

O cálculo é realizado como uma forma de comparar a situação real e determinar o desempenho do equipamento e como consequência, poderia levar a um aumento de produtividade e redução de gastos energéticos. Também inclui a possibilidade de geração de inúmeros cenários o que acarreta a possibilidade de um aumento de vazão sem necessariamente modificar as características de construção do equipamento. Para um dado volume de controle, a equação geral é apresentada pela Equação 4.4:

$$\frac{d(m)_{vc}}{dt} + \Delta(\dot{m})_{cor} = 0 \quad (4.4)$$

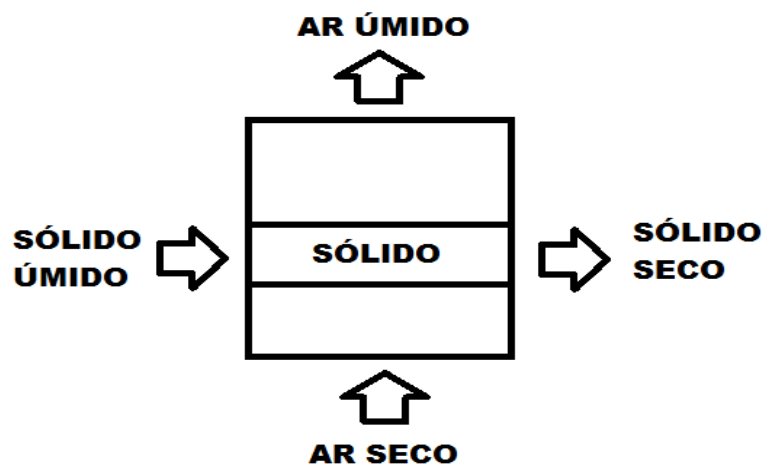
Em que:

Cor são as correntes de processo; m é a massa do volume de controle (kg) e \dot{m} é a vazão mássica da corrente de processo (kg/s).

4.8 EFEITO DA VELOCIDADE DA ESTEIRA NO PROCESSO DE SECAGEM

Na Figura 4.2, demonstra-se o elemento infinitesimal que traduz os dois fenômenos ocorrendo de forma simultânea.

Figura 4.2 – Secagem de um elemento infinitesimal



Fonte: Autoria própria

Serão admitidos como hipóteses simplificadoras os seguintes tópicos:

- Escoamento do gás em uma dimensão e de forma transversal
- Escoamento do sólido em uma dimensão e na direção axial
- Tempo de residência médio do material que atravessa o secador constante
- Existe transferência de calor por convecção e condução, porém a troca térmica relacionada à radiação será desprezada
- Transferência de massa é estritamente da fase sólida para fase gasosa
- Transferência de água do gás para o sólido é desprezível
- A perda de carga em todas as fases do processo é desprezível
- O material úmido possui homogeneidade em sua extensão
- O calor específico do sólido possui dependência com a umidade
- O calor específico do ar possui dependência com a temperatura
- Será admitido o gás de secagem como gás ideal
- A velocidade da esteira é constante ao longo do processo
- Temperatura e umidade da fase sólida é função da coordenada x
- Temperatura e umidade da fase gasosa é função da coordenada z
- Perda de calor para o ambiente externo é desprezível

Considerando o elemento infinitesimal da Figura 4.2, assume-se o seguinte balanço:

[Umidade do sólido no elemento infinitesimal t]t – [Umidade no sólido no elemento infinitesimal no tempo t+Δt] = -[Umidade que entra no elemento infinitesimal em x]x + [Umidade que sai do elemento infinitesimal em x+Δx] – [Umidade evaporada]

Traduzindo em termos de equação:

$$M_s X_s|_t - M_s X_s|_{t + \Delta t} = -\dot{M}_s X_s \Delta t|_x + \dot{M}_s X_s \Delta t|_{x + \Delta x} - \dot{M}_s R \Delta t \quad (4.5)$$

$$R = R(X_s, t) \quad (4.6)$$

Em que:

M_s é a massa do sólido úmido; \dot{M}_s : Taxa mássica do sólido úmido; X_s é a umidade contida no sólido; t é o tempo e R é a taxa de secagem.

Sendo a taxa mássica de secagem dada pela Equação 4.7.

$$\dot{M} = \rho_s A_s u \quad (4.7)$$

Em que:

ρ_s é a massa específica do sólido; A_s é a área superficial de contato com o gás de secagem e U é a velocidade axial do sólido.

Substituindo as equações 4.6 e 4.7 em 4.5 e dividindo a nova expressão por Δx e Δt e pelo processo limite $\Delta x \rightarrow 0$ e $\Delta t \rightarrow 0$, chega-se a seguinte equação diferencial:

$$\frac{\partial X_s}{\partial t} = -u \frac{\partial X_s}{\partial x} - R \quad (4.8)$$

A esteira transportadora de sólidos úmidos mantém uma velocidade constante, porém, caso esta velocidade seja modificada existe a possibilidade da diminuição do comprimento do equipamento o que poderá levar ao aumento de produção. Será calculado o efeito de várias velocidades da esteira e o efeito do processo como um todo dado pela solução numérica, em 100 pontos da equação de balanço mássico da Equação 4.8.

Em que:

X_s é a umidade do sólido (g.água/g.sol.seco); x é a distância a partir da entrada do equipamento (m); u é a Velocidade da esteira (m/s) e R , taxa de secagem (g.água/g.sol.seco/s).

Foi avaliada a dinâmica de secagem por comprimento do equipamento e o sólido em movimento em velocidades de 6, 12, 18 e 24 m/h baseado na curva ajustada que melhor representa a dinâmica de secagem. A umidade retirada levará

em consideração um ponto amostral que se movimenta ao longo do secador simulando a dinâmica em conjunta: taxa de secagem e velocidade da esteira.

4.9 BALANÇO ENERGÉTICO

De acordo com a primeira lei da termodinâmica o balanço de energia para o volume de controle é descrito pela Equação 4.9.

$$\frac{d(mU)_{vc}}{dt} + \Delta\left[\left(H + \frac{1}{2}u^2 + zg\right)\dot{m}\right] = \dot{Q} + \dot{W} \quad (4.9)$$

Em que:

m é a massa do volume de controle (kg); U é a energia interna do volume de controle (kJ/kg); H é a entalpia da corrente de massa (kJ/kg); u é a velocidade da corrente (m/s); z é a altura da corrente com relação a um referencial estático (m); \dot{m} : é a vazão mássica da corrente (kg/s); \dot{Q} é a taxa total líquida de calor (kw) e \dot{W} é a taxa total líquida de trabalho (kw)

A entalpia do sólido pode ser calculada utilizando a equação encontrada por Skuratov e Shkitov (1946) conforme mostra a equação 4.10.

$$H_s = (C_{ps} + XC_{pl})T_s \quad (4.10)$$

Em que:

C_{ps} é a capacidade calorífica do sólido (kJ/kg.K) e C_{pl} é a capacidade calorífica da água (kJ/kg.K)

O cálculo do calor necessário para o início da evaporação da água pode ser obtido assumindo a gelatina como um cilindro oco, com isso chega-se na seguinte equação 4.11.

$$\dot{Q} = \left(\frac{T_{ar} - T_s}{\frac{\ln\left(\frac{r_0}{r_i}\right)}{2\pi k} + \frac{1}{2\pi r_0}} \right) dx \quad (4.11)$$

Onde:

k é o coeficiente de condução térmica; r_i é o raio interno do cilindro; r_0 é o raio externo do cilindro e T_{ar} é a temperatura do ar de secagem e T_s é a temperatura do sólido.

O coeficiente de condutividade térmica varia em função da umidade, e por meio de um ajuste linear utilizando uma análise de mínimos quadrados, pode-se obter a partir do trabalho de Sousa (1996) a Equação 4.12.

$$k = 0,5883X_s + 0,0138 \quad (4.12)$$

Em que:

X_s é a umidade do sólido (g.água/g.sol.seco) e k é a condutividade (W/m.K)

O raio externo ao longo do processo sofre contração e nesse caso, será estimado utilizando a porosidade do leito como parâmetro variável dado pela Equação 4.13.

$$\epsilon = 1 - \rho_{ap} / \rho_s \quad (4.13)$$

Em que:

ρ_{ap} é a densidade aparente do leito e ρ_s é a densidade do sólido

Dessa, forma obtém-se uma expressão para o raio externo de cada partícula de gelatina dado pela expressão combinada gerando a Equação 4.14.

$$\frac{1}{r_0} = 2\pi\rho_s(1-\epsilon)dx/Ms \quad (4.14)$$

Em que:

dx é a distância a partir da entrada do equipamento e M_s é a massa de sólido

O calor latente de vaporização da água é variável com a temperatura, sendo dada pela Equação 4.15.

$$h(T) = 2508 + 2,386T \quad (4.15)$$

Em que: T é a temperatura (K)

4.10 DETERMINAÇÃO DA EFICIÊNCIA EM TERMOS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR E MASSA

Através de correlações da literatura mensura-se o quanto o equipamento, em termos de transferência de massa e calor, é eficiente na realização de seu objetivo.

4.10.1 Parâmetros de transferência de calor e massa no equipamento

Como forma de mensurar a eficiência em termos de transferência de calor e massa, utilizam-se as Equações 4.16 e 4.18 em todas as fases do processo de secagem, sendo h o coeficiente de transferência de calor por convecção, k_y o coeficiente de transferência de massa por convecção e Jh o fator de Chilton e Colburn, dado pela Equação 4.17.

$$hc = Jh \cdot C_{pf} \cdot G \left(C_{pf} \cdot \frac{\mu_f}{k_f} \right)^{-2/3} \quad (4.16)$$

$$Jh = \frac{2,06}{\epsilon} \cdot \left(\frac{deG}{\mu_f} \right)^{-0,51} \quad (4.17)$$

$$k_y = Jd \cdot G / Sc^{2/3} \quad (4.18)$$

Em que:

h_c é coeficiente de transferência de calor convectivo (J/m^2Kh); C_{pf} é a capacidade calorífica a pressão constante do gás (J/kgK); G é o fluxo mássico do gás (kg de ar seco/ m^2h); μ_f é a viscosidade do gás (kg/mh); k_f é a condutividade térmica do gás (J/mKh); ϵ é a porosidade do leito; d_e é o diâmetro da esfera com a mesma área da partícula (m); k_y é o coeficiente de transferência de massa (kg água/ $m^2h\Delta Y$) e Sc é Número de Schmit do ar.

4.10.2 Parâmetro de transferência de massa para o ensaio de secagem

Para avaliar o parâmetro de transferência de massa por convecção e sua influência na secagem em escala laboratorial, utilizou-se a correlação sugerida por Geankoplis (1972) para um cilindro isolado, de acordo com as equações 4.19 a 4.23.

$$Jm = \frac{0,281}{Rep^{0,5}} Sc^{0,107} \quad (4.19)$$

$$Jm = \frac{Shp}{Rep Sc^{\frac{1}{8}}} \quad (4.20)$$

$$Rep = \frac{dp \cdot U}{\nu} \quad (4.21)$$

$$Shp = \frac{dp \cdot Km}{Dab} \quad (4.22)$$

$$Sc = \frac{\nu}{Dab} \quad (4.23)$$

Em que:

Rep é o numero de Reynolds; Sc é o numero de Schmidt; Shp é o numero de Sherwood; dp é o diâmetro do cilindro(m); U é a velocidade do ar de secagem(m/s); ν é a viscosidade cinemática(m^2/s); Dab é a difusividade da água para a gelatina(m^2/s) e Km é o coeficiente de transferência de massa por convecção (m/s)

A difusividade varia com a temperatura e pressão, logo, utiliza-se a Equação 4.24 para a correção considerando a pressão constante.

$$D_{ab}(T2) = D_{ab}(T1) \frac{T2^{1,75}}{T1} \quad (4.24)$$

Em que:

$D_{ab}(T1)$ é a difusividade a temperatura de 298,15 K; $D_{ab}(T2)$ é a difusividade a temperatura de secagem; $T1$ é a temperatura ambiente igual a 298,15 K e $T2$ é a temperatura de secagem

A densidade da gelatina varia em função da perda de água, logo, calcula-se a densidade a cada instante em função da umidade em base úmida da amostra, utilizando-se a média ponderal dada pela Equação 4.25.

$$\rho = X_{\text{água}} \cdot \rho_{\text{água}} + X_{\text{gel}} \cdot \rho_{\text{gel}} \quad (4.25)$$

Em que:

$X_{\text{água}}$ é a fração da água na amostra; X_{gel} é a fração de gelatina na amostra; $\rho_{\text{água}}$ é a densidade da água e ρ_{gel} é a densidade da gelatina seca.

Considera-se

- Fluxo de ar no sentido perpendicular a gelatina;
- Contração de volume linear;
- Viscosidade constante igual a 4 mPa.s
- Densidade da água igual a 1000 kg/m³
- Densidade da gelatina seca igual a 392 kg/m³
- D_{ab} a temperatura $T1$ igual a $1,29 \cdot 10^{-11}$ m²/s

4.11 PERFIL DE UMIDADE DO AGENTE DE SECAGEM

O ar como agente de secagem possui uma limitação em termos de retirada de umidade, nesse caso, é necessário um gradiente de concentração. Para uma dada vazão, foi calculada a umidade relativa ao longo do secador representando o potencial em cada câmara para retirar a umidade excedente. A umidade absoluta é dada pela Equação 4.26, sendo as temperaturas de bulbo seco as operacionais do equipamento.

$$U(T, T', p) = 10^{-\left\{c_1 + \frac{b_1}{T+d}\right\}} \cdot (T+d)^{-a_1} \left[10^{\left\{c + \frac{b}{T+d}\right\}} (T'+d)^a - (f + gT')p(T - T') \right] \quad (4.26)$$

Em que:

T é a temperatura do bulbo seco (K); T' é a temperatura de bulbo úmido (K); p é a pressão (atm); a=-4,9283; b=-2937,4; c=23,5518; d=273,15; f=0,00066; g=7,57x10⁻⁷; k=0,21668; a₁=-4,9283; b₁=-2937,4; c₁=2355,18

Pelo balanço de massa, obtém-se a umidade absoluta em cada câmara, por meio da Equação 4.27 e, por processo iterativo, as temperaturas de bulbo úmido e, com isso, o perfil de umidade relativa de cada câmara.

$$H(T, T', P) = k(T+d)^{-1} \left[10^{\left\{c + \frac{b}{T+d}\right\}} (T'+d)^a - (f + g \cdot T')p(T - T') \right] \quad (4.27)$$

Em que:

T é a temperatura do bulbo seco (K); T' é a temperatura de bulbo úmido (K); p é a pressão (atm); a=-4,9283; b=-2937,4; c=23,5518; d=273,15; f=0,00066; g=7,57x10⁻⁷; k=0,21668

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 ANÁLISES QUALITATIVAS DO TESTE DE SECAGEM

Pode-se observar que a gelatina possui grande quantidade de umidade e é extremamente sensível à alta temperatura de secagem. Na situação de secagem, inicialmente a temperaturas brandas, a gelatina seca de forma lenta, porém, com mais qualidade, tendo com base a análise sensorial do observador. Em temperaturas medianas, não seca em seu interior de forma uniforme, formando uma crosta na parte externa. Em temperaturas altas, ela derrete formando uma crosta na base, o que, nos testes e no equipamento industrial, pode bloquear a passagem de ar transversal e, conseqüentemente, diminuir o rendimento da operação. A matéria-prima, antes e depois do processo, é mostrada nas Figuras 5.1 e 5.2.

Figura 5.1 – Gelatina antes da secagem



Figura 5.2 – Gelatina após a secagem



5.2 CURVAS DE SECAGEM DA GELATINA

Pela curva de secagem até a umidade de equilíbrio em 3 temperaturas, Figura 5.3, pode-se observar a influência da temperatura em dois aspectos: a baixas temperaturas, por exemplo, 30°C, a gelatina possui qualidade superior, baseada na análise sensorial, chegando até a umidade de equilíbrio em conformidade ao equipamento industrial. Em temperatura mais alta, 52°C, a retirada de umidade é maior até aproximadamente 50 min de secagem e, em seguida, existe uma estagnação devido ao incrustamento na superfície da gelatina, impedindo a retirada do excesso de umidade.

Como forma de obter o comportamento final da cinética de secagem da gelatina, pode-se analisar a Figura 5.4, que diz respeito às curvas de secagem na fase final até a umidade de equilíbrio e na faixa de temperatura operacional do equipamento industrial. Na temperatura de 52°C, devido ao efeito de incrustação superficial a umidade fica retida no interior exigindo um gradiente maior para a realização da transferência de massa do interior da gelatina para o meio. Na curva de 70°C, o meio possui umidade relativa extremamente baixa, gerando um gradiente maior na transferência de massa e demonstra retirar o excesso de umidade com maior eficiência.

Figura 5.3 – Curva de secagem completa

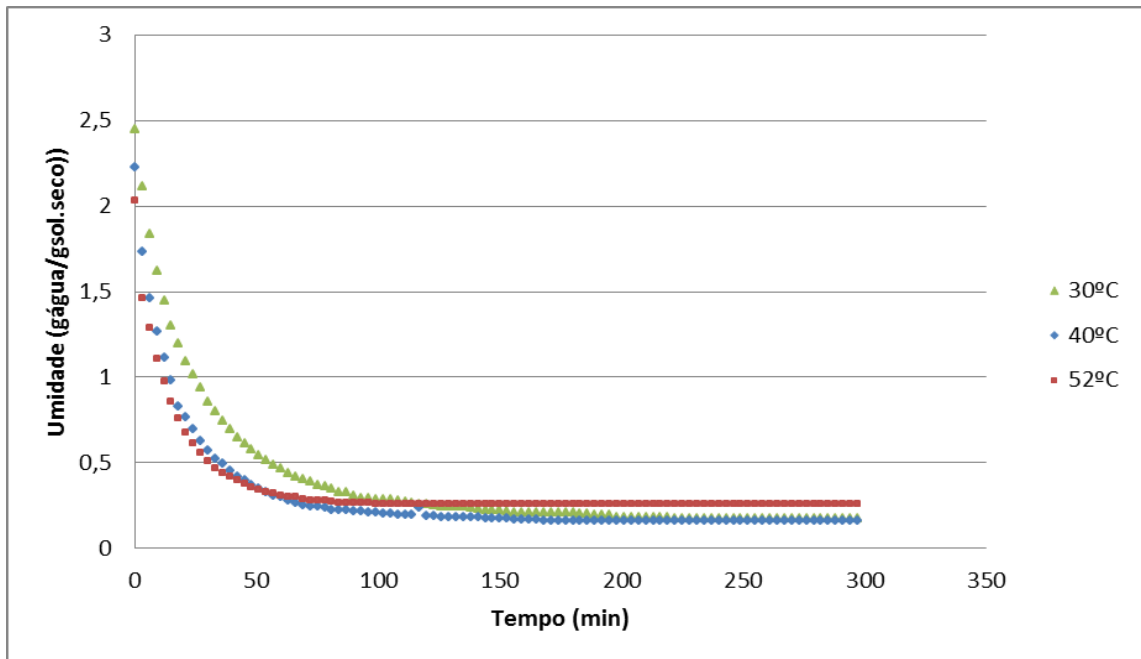
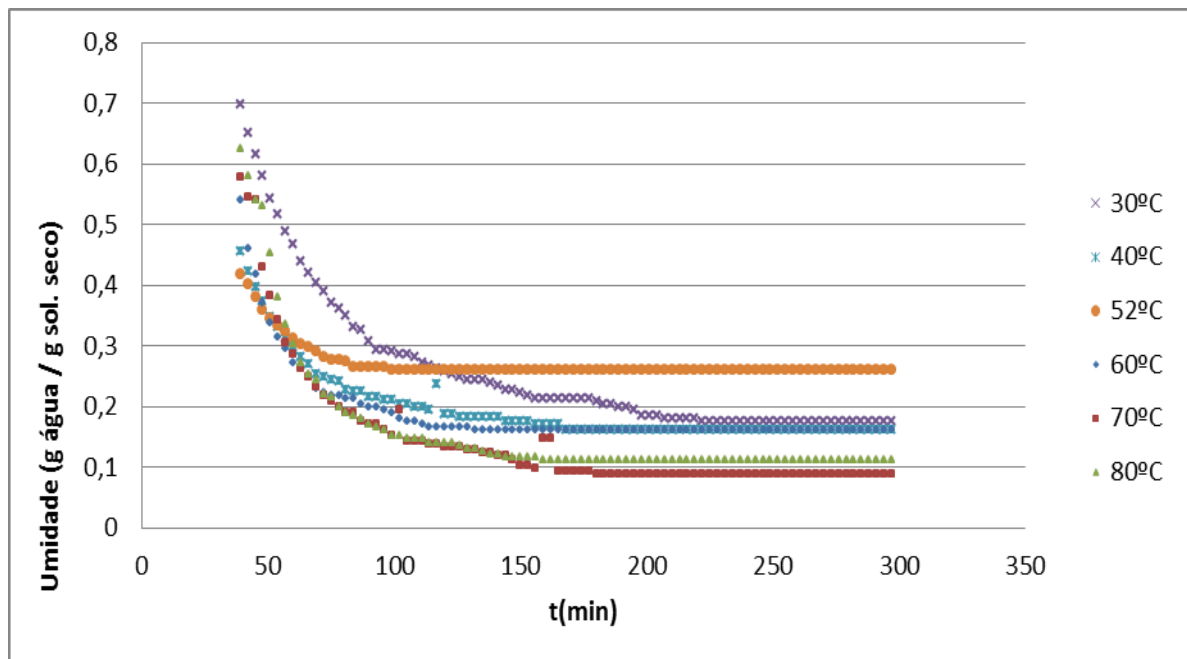
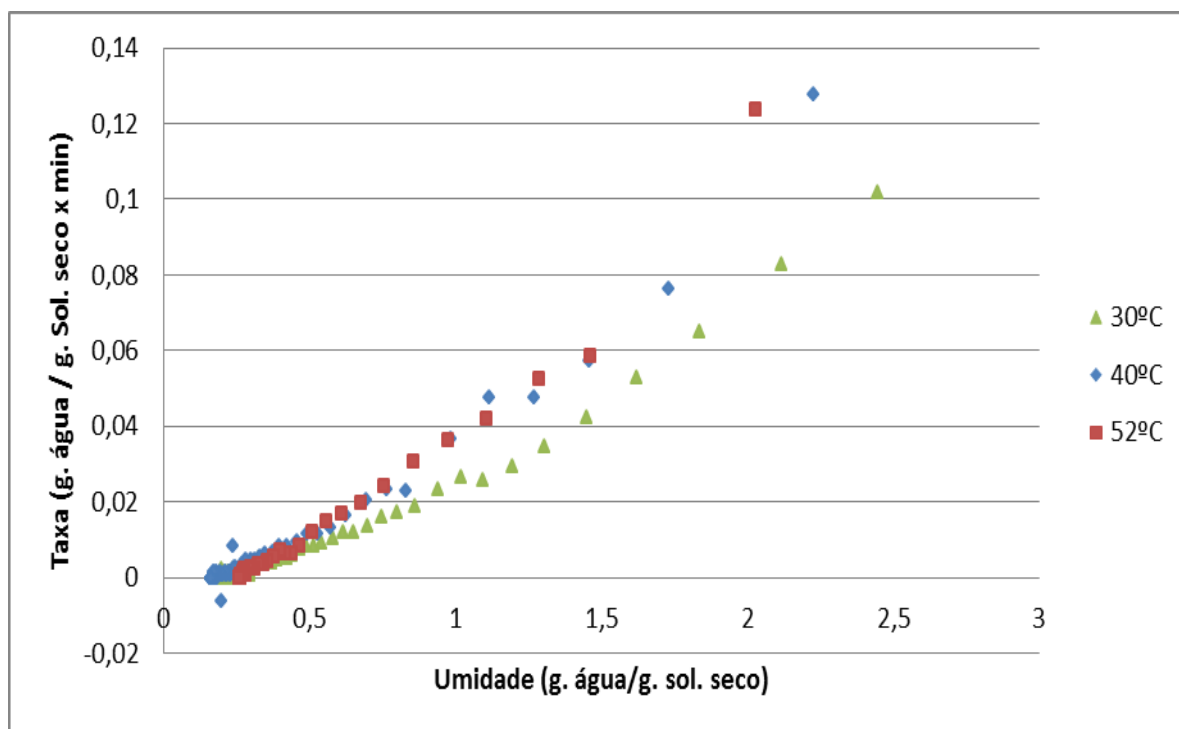


Figura 5.4 – Curva de secagem a baixas taxas



Com relação à velocidade de secagem (Figura 5.5), pode-se observar que não existe grande diferença nos ensaios de secagem a 40°C e 52°C, mas, a 30°C, a secagem é mais lenta. Em compensação, como observado anteriormente, a qualidade da secagem é fortemente influenciada por maiores temperaturas, podendo ocasionar incrustação da superfície e derretimento interno.

Figura 5.5 – Taxa de secagem para os ensaios completos



5.3 AJUSTE DA CURVA DE SECAGEM

Foi realizado o ajuste nas curvas que possibilitou verificar as temperaturas mais adequadas, no caso 30°C, 40°C e 52°C. O modelo exponencial a dois termos ajustou de forma mais proporcional à realidade da cinética de secagem possuindo R^2 de 0,9948; já os modelos Henderson e Pabis e Logaritmo registraram, respectivamente, R^2 de 0,9657 e 0,9914. As curvas do melhor modelo ajustado, exponencial a dois termos, encontram-se nas Figuras 5.6, 5.7 e 5.8, anexo. Os valores dos parâmetros dos modelos encontram-se nas Tabelas 5.1, 5.2 e 5.3.

Tabela 5.1 – Tabela de parâmetros para o modelo Henderson e Pabis

Henderson e Pabis	Parâmetros	
	A	K
Ensaio		
30°C	1,756	-0,03
40°C	0,9315	-0,009
52°C	1,947	-0,021

Tabela 5.2 – Tabela de parâmetros para o modelo Logaritmo

Logaritmo	Parâmetros		
Ensaio	B	k	c
30°C	0,1777	1,871	-0,053
40°C	0,264	1,611	-0,066
52°C	0,2034	2,076	-0,037

Tabela 5.3 – Tabela de parâmetros para o modelo Exponencial a dois termos

Exponencial a dois termos	Parâmetros			
Ensaio	C	k_o	D	k_1
30°C	1,832	-0,06	0,2617	-0,0021
40°C	1,603	-0,068	0,2817	-0,0004
52°C	1,977	0,0452	0,3753	-0,0031

5.4 CARACTERÍSTICAS DO EQUIPAMENTO INDUSTRIAL

O equipamento industrial consiste de 14 câmaras, e cada câmara possui as seguintes características:

Câmara 1: Recebe gelatina que sai da extrusora em uma vazão de aproximadamente 2 ton/h, com umidade de aproximadamente 66% em base úmida. Na parte superior, a temperatura se encontra a 39°C, sofrendo uma queda de 9°C e chegando a 30°C na parte inferior. O ar, após atravessar a esteira de cima para baixo, entra em um conjunto soprador e trocador de calor, sendo aquecido para ser enviado à segunda câmara.

Câmara 2: Ar de secagem entra a 41°C, atravessa a esteira, sofre queda de temperatura de 7°C e atinge a parte superior a 34°C, quando entra em um trocador de calor e em seguida, na câmara 3.

Câmara 3: A 42°C, o agente de secagem atravessa novamente o leito, chegando a 37°C e, mais uma vez, entra em um conjunto soprador e trocador de calor, para se aquecer até 46°C.

Câmara 4: Existe uma limitação por parte do agente de secagem. Nesse caso, é necessário um equipamento para retirar o excedente de ar que está prestes a saturar. Aqui, a corrente de ar se divide em duas: uma entra em um trocador de calor para se aquecer e atingir a câmara 5, e outra, a 42°C, entra em um exaustor.

Câmara 5: Após atravessar o trocador de calor, o ar, na parte superior, se mantém a 48°C, sofre uma queda de temperatura e entra em outro sistema trocador e soprador de ar que visa atingir a câmara 6.

Câmara 6: Após passar pelo trocador da câmara anterior, o ar, a 51°C, sofre leve queda de temperatura, chegando a 49°C e se dividindo em duas correntes.

Câmara 7: Após passar por outro trocador de calor, o ambiente de secagem superior já está a 56°C. Após atravessar o leito, entra em outro sistema soprador e trocador de calor.

Câmara 8: Na região inferior, o sistema está a 59°C, sofre leve perda de temperatura, sendo mantida, nesta câmara, a temperatura nas duas regiões quase constante.

Câmara 9 e 10: Após passar pelo trocador da câmara anterior, o ar se aquece até 61°C e, novamente, entra em outro sistema soprador e trocador de calor, até atingir a câmara 10 e 65°C.

Câmara 11 e 12: A 68°C, da parte superior, o sistema sofre leve queda de temperatura, e entra em outro sistema trocador de calor e soprador.

Câmara 13 e 14: Na parte inferior, o sistema se encontra a 74°C, entra em um sistema trocador de calor e soprador, e se divide em duas correntes.

Câmara de resfriamento: Esta recebe gelatina na umidade ideal para ser comercializada e somente tem a função de resfriar o produto. Também possui um exaustor que retira o ar em excesso.

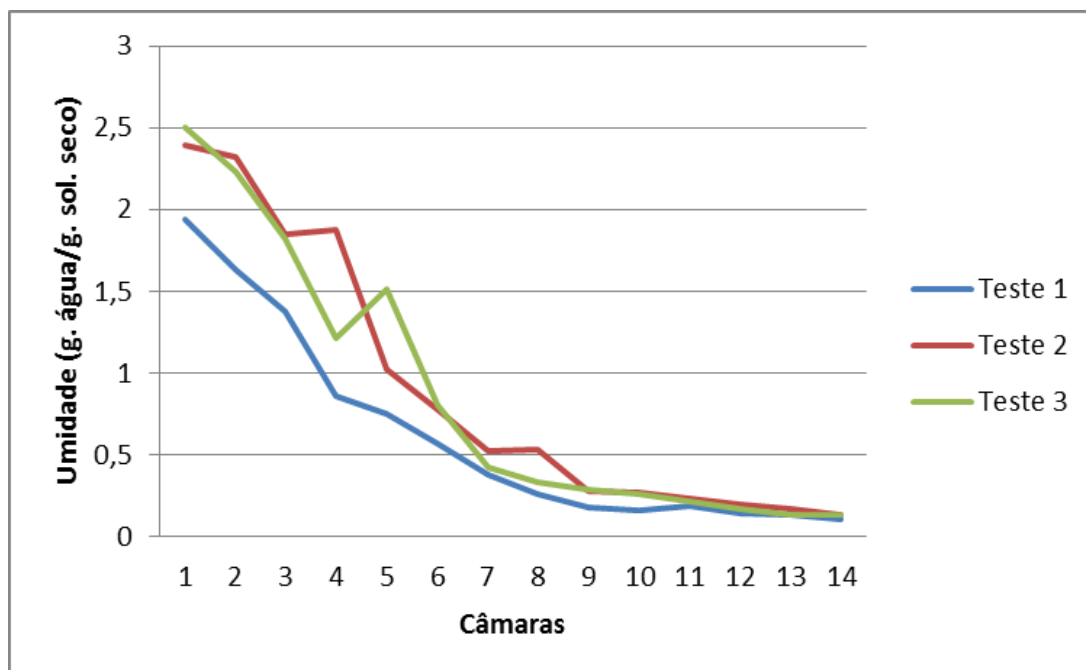
As temperaturas em cada câmara, nos níveis inferiores e superiores, variam de equipamento para equipamento, porém, se mantém na mesma faixa de temperatura conforme mostrado na Tabela 5.4.

Na Figura 5.9 observa-se o perfil de umidade ao longo das câmaras, o que se assemelha com o perfil dos ensaios de secagem. Com isso pode-se observar grande semelhança na dinâmica de retirada da umidade tanto nos ensaios de secagem quanto no equipamento.

Tabela 5.4 – Perfil de temperatura média em cada câmara

Câmara	Temperatura (°C)
1	33,5
2	37,5
3	40,5
4	44,5
5	48,5
6	50,5
7	55,5
8	58,5
9	61,5
10	64,5
11	67,5
12	71,5
13	74,5
14	77,0

Figura 5.9 – Perfil de umidade em cada câmara do equipamento de secagem (b.u.)



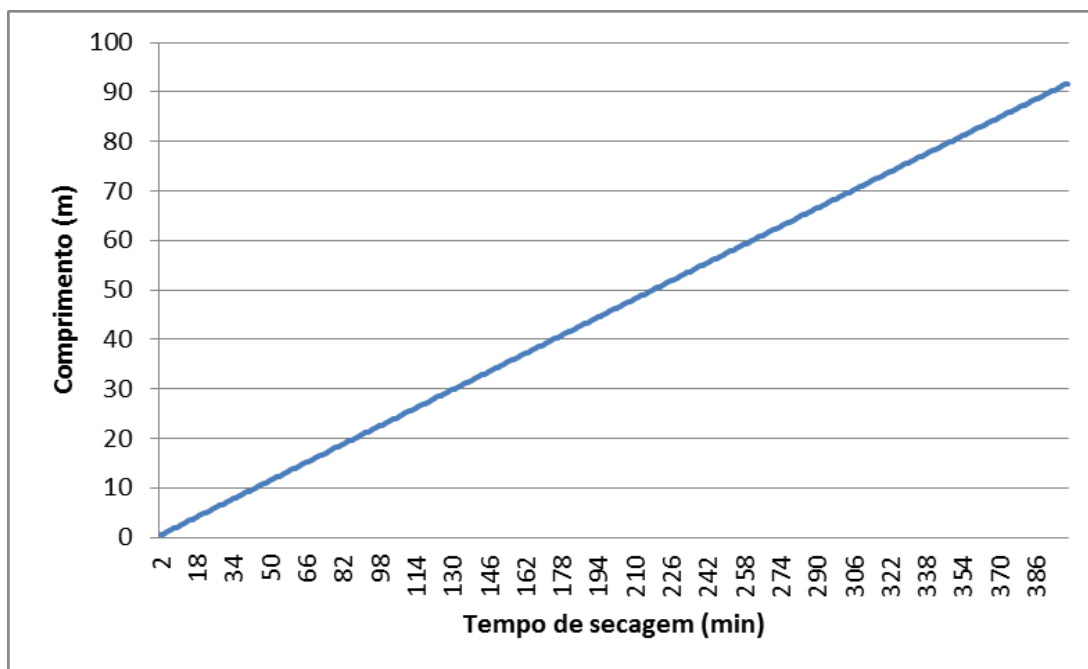
5.5 ANÁLISE DE REDIMENSIONAMENTO E CONDIÇÕES MECÂNICAS OPERACIONAIS

A partir das condições operacionais mencionadas no índice 4.6, é apresentado o comportamento das variáveis envolvidas no processo, como: comprimento do secador, tempo de secagem, velocidade da esteira e comprimento do leito.

5.5.1 Comprimento do secador por tempo de secagem

O tempo de secagem pode variar dependendo da matéria prima e condições ambientais, sendo este um dos principais fatores para um processo eficaz de secagem. Pela Figura 5.10, fazendo uma analogia ao comprimento do secador, observa-se uma dependência linear entre o comprimento do secador e o tempo.

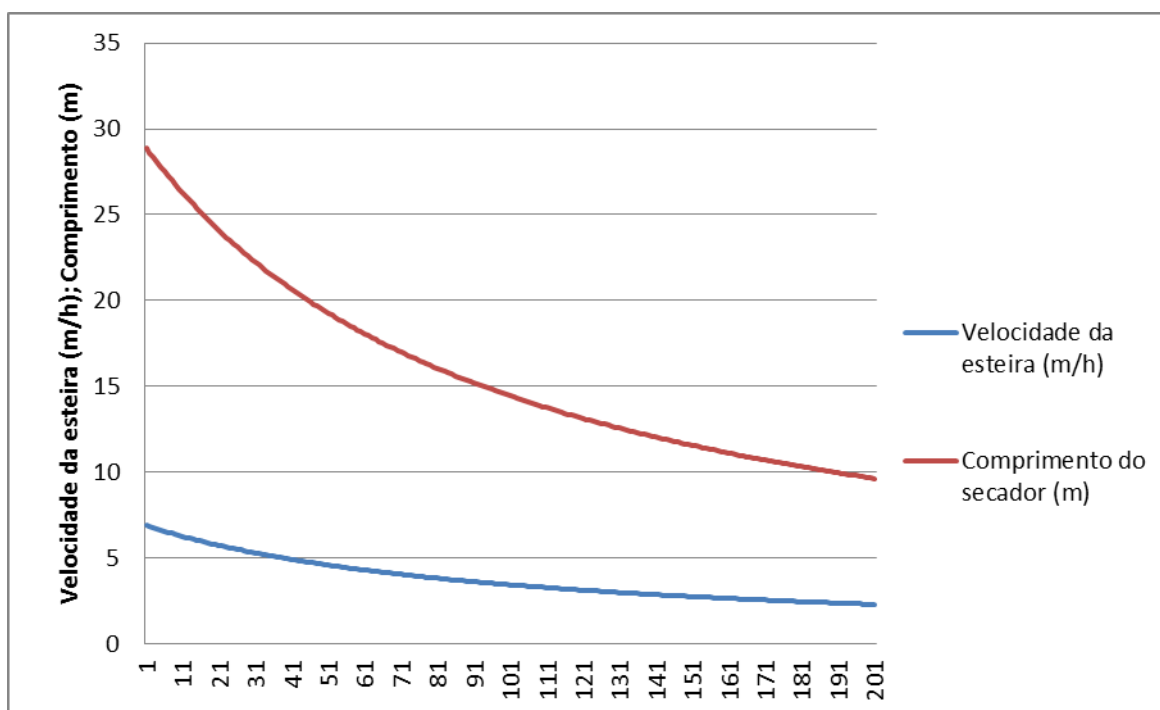
Figura 5.10 – Comprimento do secador por tempo de secagem



5.5.2 Velocidade da esteira e comprimento do secador em função da altura do leito

Observa-se, pela Figura 5.11, que, conforme aumenta-se a altura do leito de secagem, existe uma aproximação entre as curvas de velocidade da esteira e do comprimento do secador de forma a diminuir as duas variáveis. Com isso, pode-se constatar que existindo a possibilidade de aumentar o leito em altura sem comprometer a secagem pode-se diminuir o comprimento do equipamento e com isso permitir a diminuição do custo de implantação.

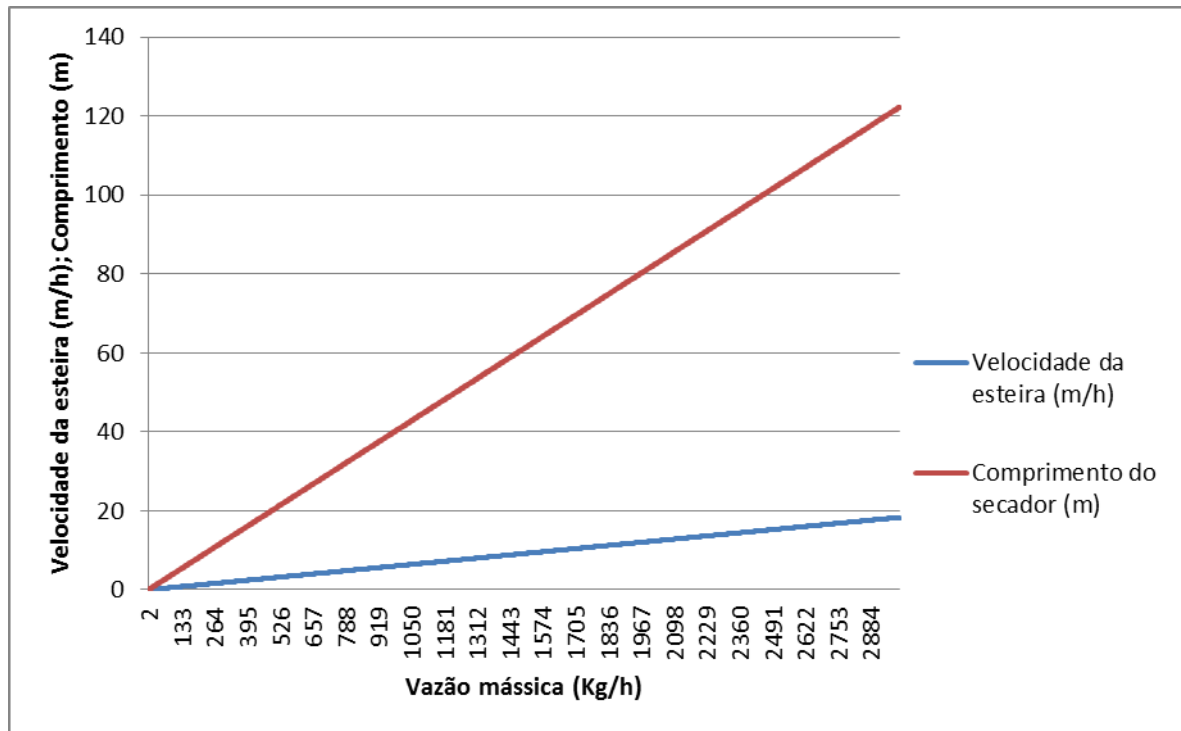
Figura 5.11 – Velocidade da esteira e comprimento do secador em função da altura do leito



5.5.3 Velocidade da esteira e comprimento do secador em função da vazão mássica

Pela Figura 5.12, pode-se demonstrar um *scale up* em termos de vazão mássica de matéria prima, a velocidade da esteira pouco se altera, porém, é necessário um grande aumento em termos de comprimento do equipamento.

Figura 5.12 – Velocidade da esteira e comprimento do secador



5.6 BALANÇO DE MASSA GERAL

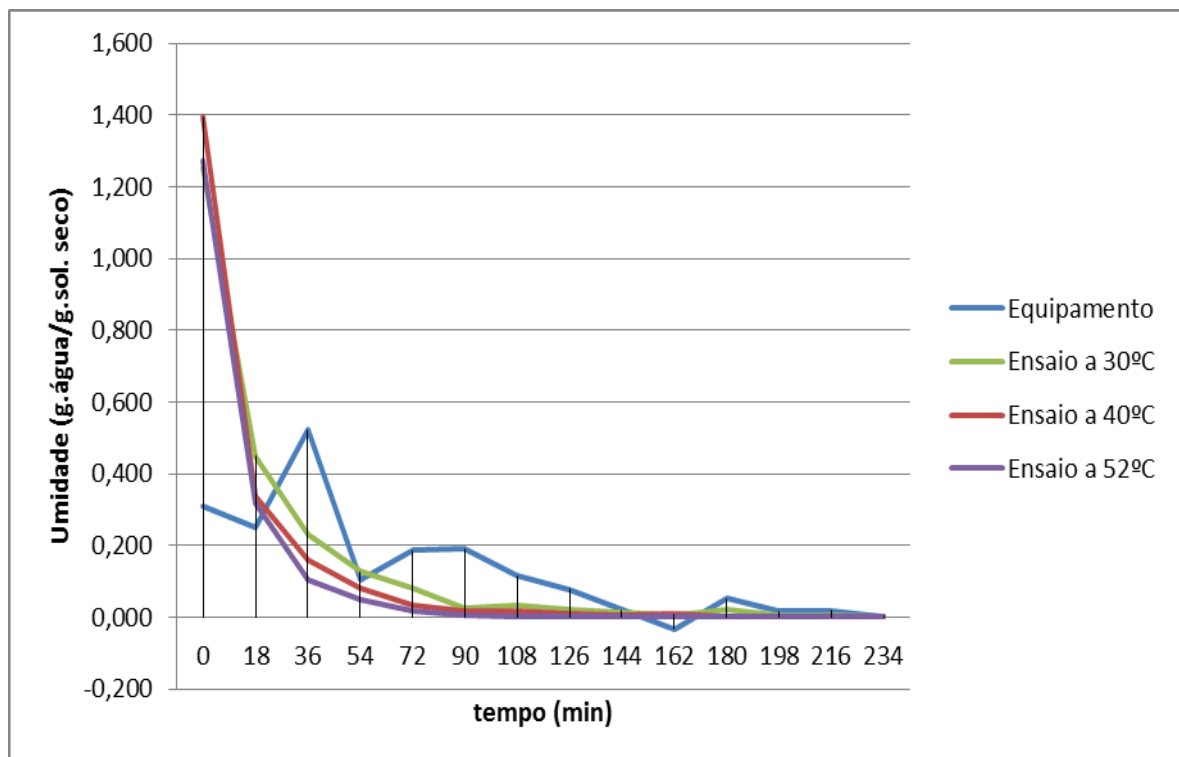
Pelo balanço mássico, observa-se grande remoção de umidade nas 3 primeiras câmaras, conforme a Tabela 5.5. E, com base nos resultados, pode-se obter a umidade absoluta em cada câmara e com isso o perfil de umidade relativa.

Tabela 5.5 – Balanço material por câmara de secagem

Túnel	Vazão total(kg/h)	Vazão de água(kg/h)
1	2450,00	257,89
2	2192,11	208,77
3	1983,33	435,01
4	1548,33	86,92
5	1461,40	155,76
6	1305,64	158,26
7	1147,38	96,94
8	1050,44	64,64
9	985,80	17,19
10	968,60	7,82
11	960,78	8,78
12	952,00	13,94
13	938,06	15,58
14	922,48	3,05

A Figura 5.13 apresenta a queda de umidade nos testes em laboratório e no equipamento industrial. Pode-se observar grande discrepância no início da secagem, indicando uma oportunidade de melhoramento nas primeiras câmaras e, conseqüentemente, a possibilidade de diminuição do comprimento do equipamento ou possibilidade de aumento de produção apenas alterando as condições operacionais do mesmo.

Figura 5.13 – Queda de umidade



5.7 EFEITO DA VELOCIDADE DA ESTEIRA NO PROCESSO DE SECAGEM

Nas Figuras 5.14, 5.15 e 5.16, utilizando a Equação 4.8 e a equação oriunda do ajuste de curva, observa-se grande discrepância na quantidade de umidade retirada quando a esteira opera a baixas velocidades até 10 m da entrada da matéria prima. Após 10 m, a eficiência em retirada da umidade não é significativa, o que demonstra o grande efeito que a umidade ligada gera com relação ao processo.

A umidade final desejada gira em torno de 13% em base seca. Na Tabela 5.5, observa-se a umidade final caso a velocidade da esteira se modifique. Existe grande concordância para a velocidade de 12 m/h e, também, como já demonstrado, um aumento no desempenho para retirada da umidade.

Tabela 5.5 – Umidade de saída média em laboratório e no equipamento industrial

v(m/h)	Umidade-lab (g.água/g.sol. seco)	Umidade-equipamento (g.água/g.sol. seco)	Desvio (%)
6	0,073	0,13	43,7%
12	0,138	0,13	6,4%
18	0,171	0,13	31,6%
24	0,190	0,13	46,5%

Figura 5.14 – Efeito da velocidade do sólido no processo de secagem a 30°C

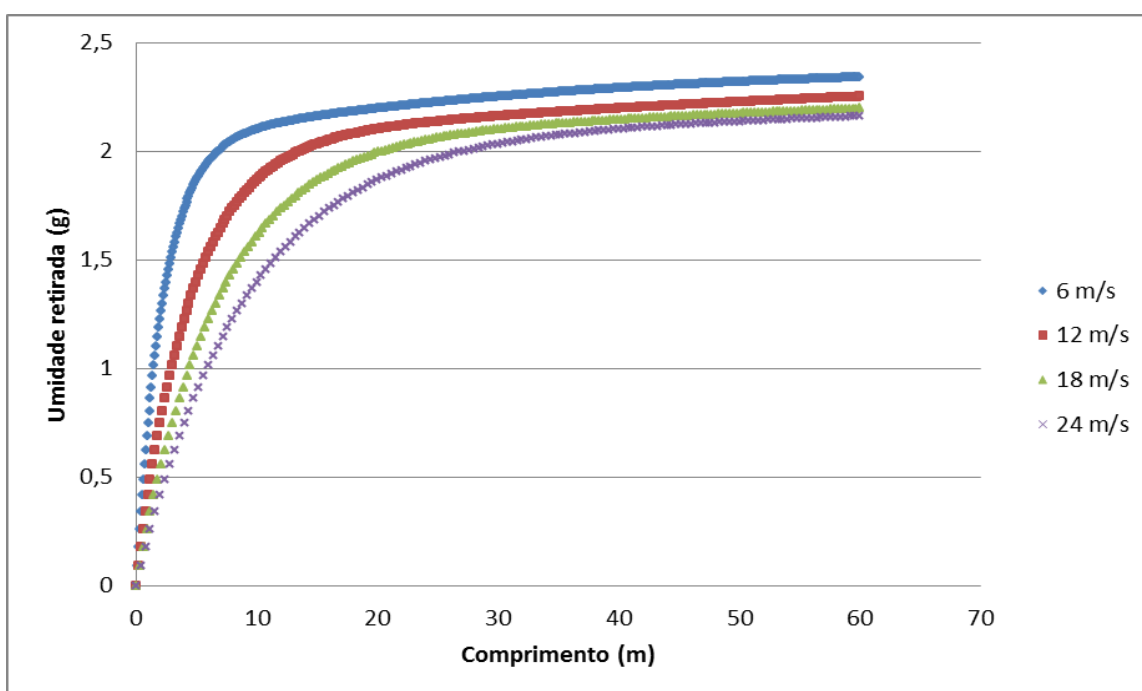


Figura 5.15 – Efeito da velocidade do sólido no processo de secagem a 40°C

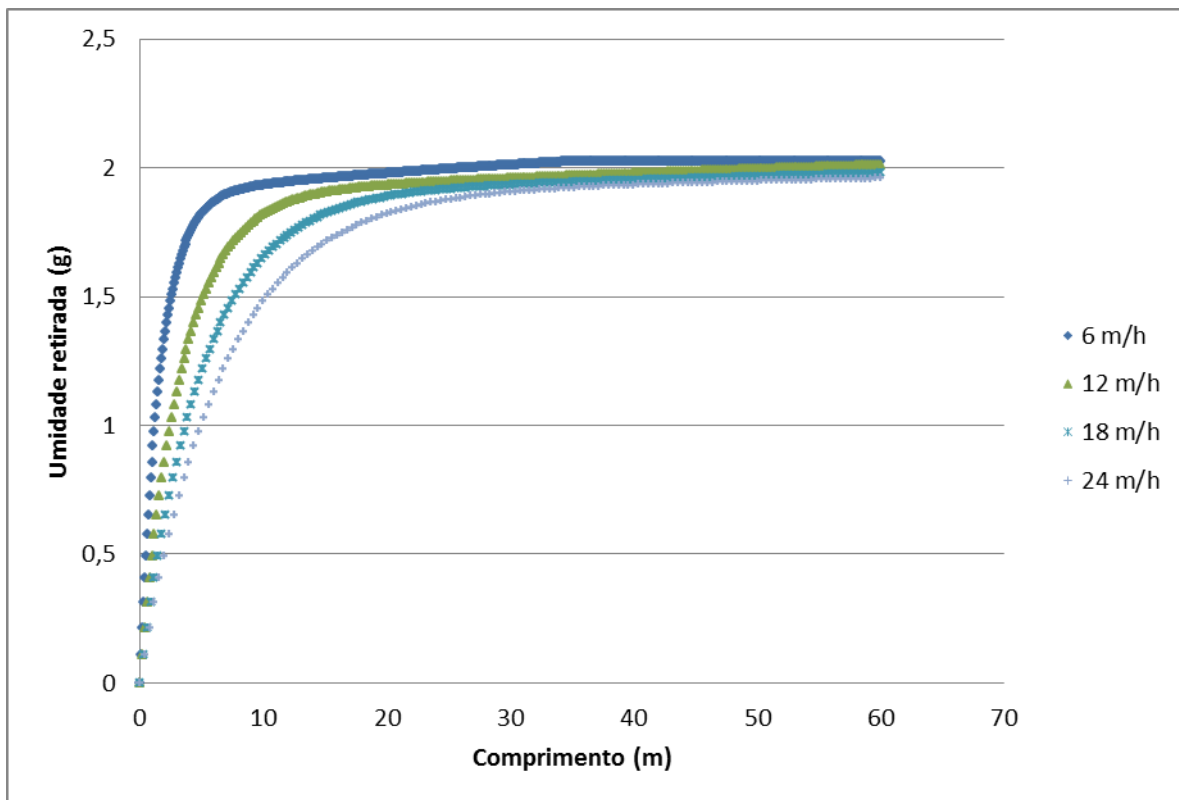
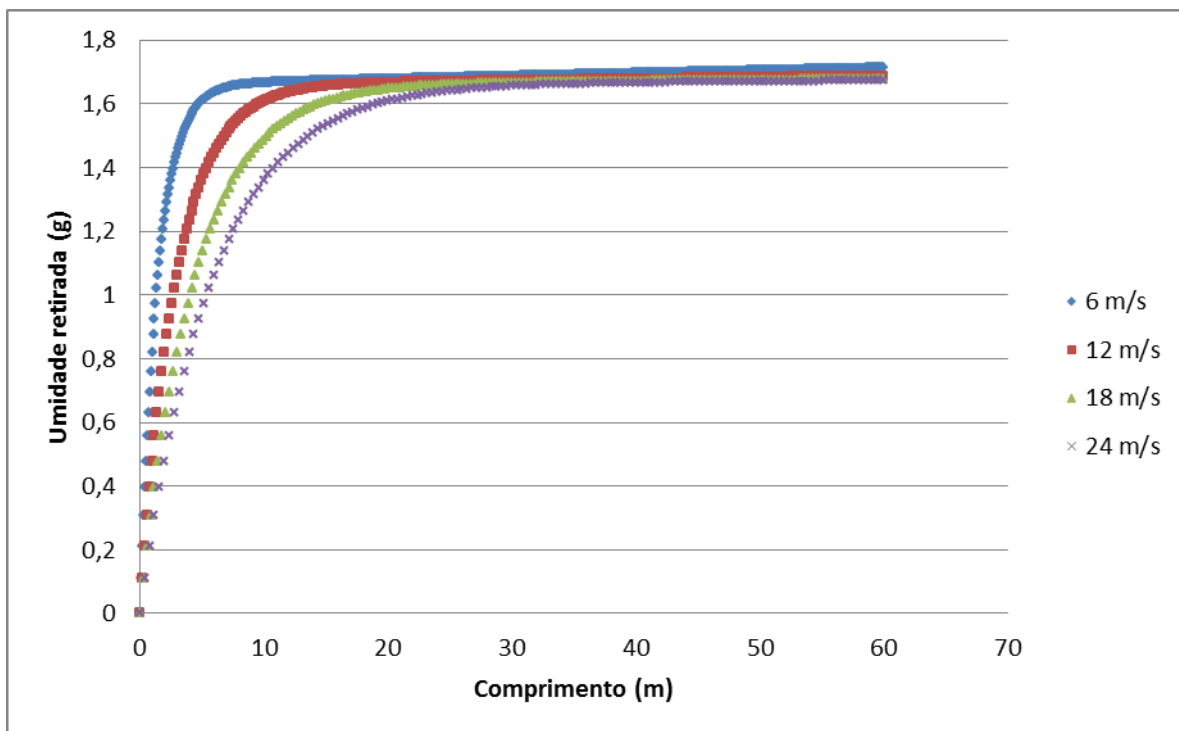


Figura 5.16 – Efeito da velocidade do sólido no processo de secagem a 52°C



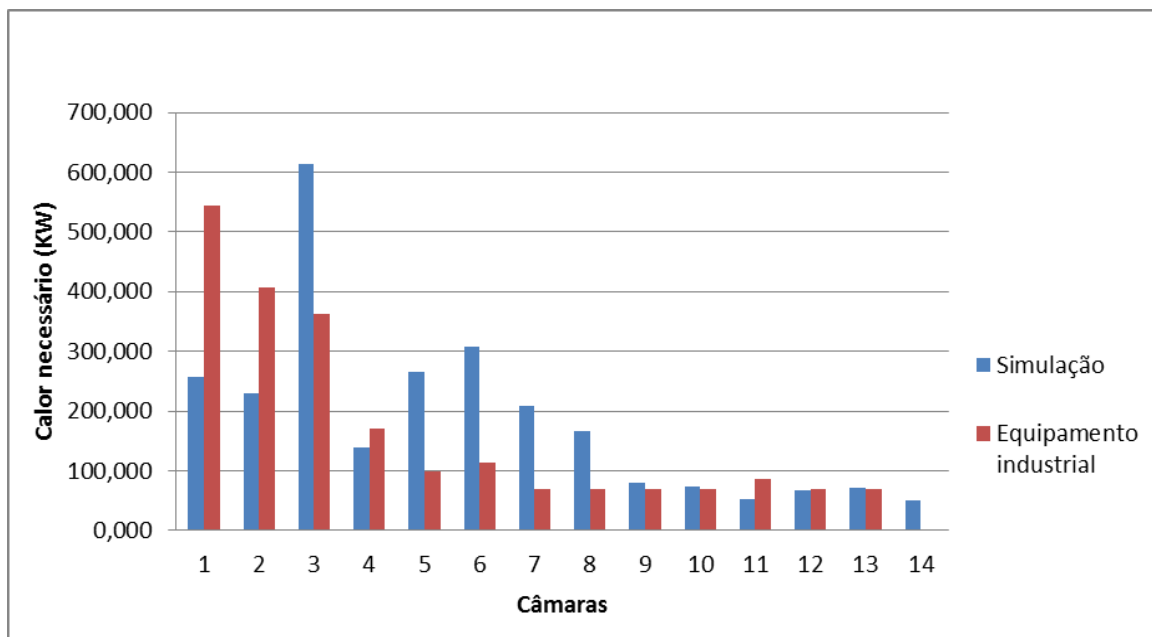
5.8 BALANÇO DE ENERGIA GERAL

Através do balanço de energia para um volume de controle, em cada câmara, obteve-se como resultados as necessidades energéticas e o consumo de vapor.

5.8.1 Análise das necessidades energéticas ao longo do equipamento

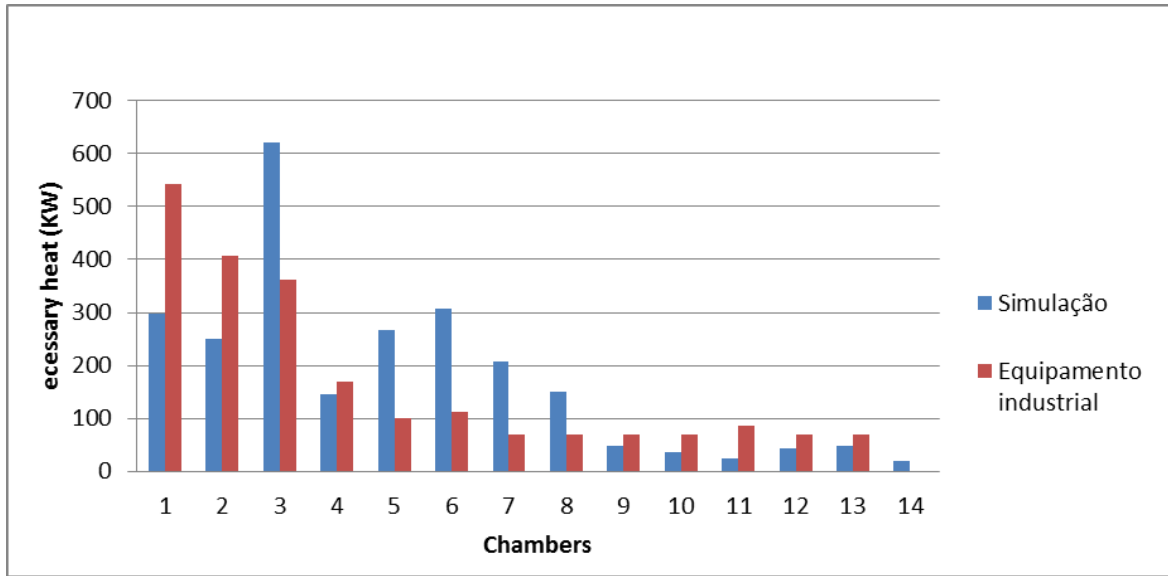
Pela Figura 5.17, que, neste caso, foi calculada a quantidade de energia necessária utilizando o modelo de gelatina oca, pode-se observar grande discrepância entre os valores simulado e obtido experimentalmente no período inicial de secagem.

Figura 5.17 – Quantidade de calor simulada utilizando a gelatina como cilindro oco



Pela Figura 5.18, neste caso, calculada utilizando-se a equação proposta por Skuratov e Shkitov (1946), pode-se observar o mesmo ocorrido na simulação anterior, um desprendimento maior de energia nos primeiros 3 setores de secagem.

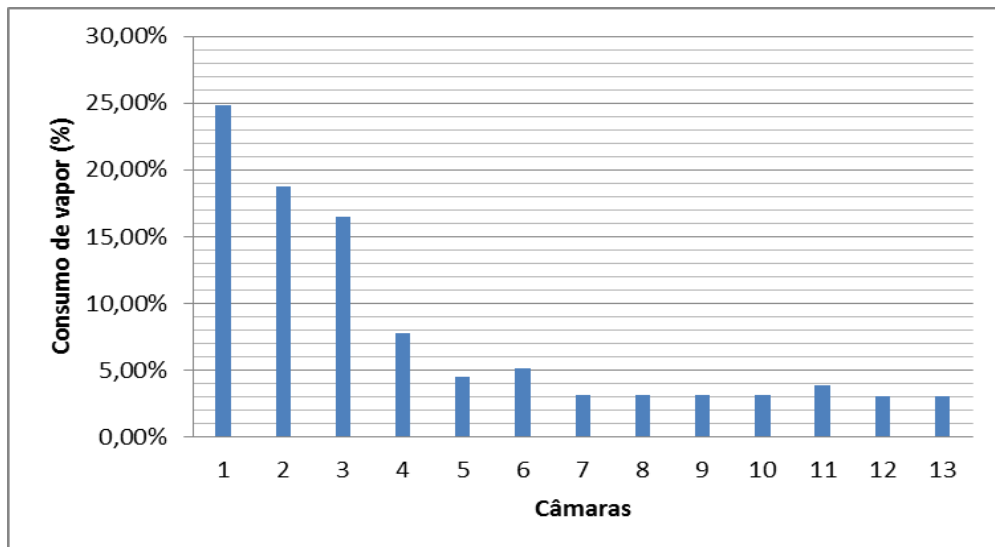
Figura 5.18 – Quantidade de calor simulada - equação proposta por Skuratov e Shkitov (1946)



5.8.2 Análise do consumo do vapor

Dos resultados do balanço de energia e da Equação 4.15, na Figura 5.19, pode-se observar grande necessidade de vapor nas três primeiras câmaras. A explicação está no fato de que, no início do processo, a gelatina possui maior parcela da sua fração em água e nesse caso exige maior necessidade de calor para a vaporização. Após a câmara 5, exige-se menos vapor e a temperatura da câmara se conserva com uma necessidade menor de energia.

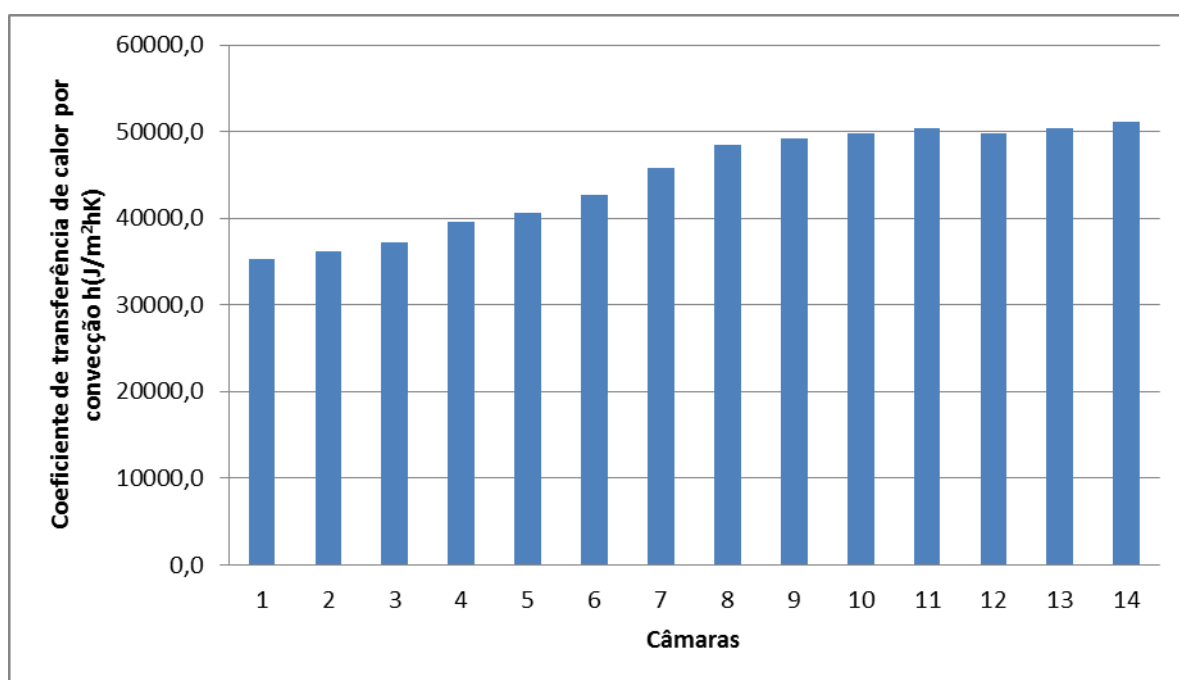
Figura 5.19 – Consumo de vapor ao longo das câmaras onde há troca térmica



5.9 DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS DE EFICIÊNCIA EM TERMOS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR E MASSA

Como resultado do cálculo utilizando as Equações 4.16 a 4.18 (Figura 5.20), pode-se observar a evolução da eficiência na transferência de calor por meio da determinação do coeficiente de transferência de calor. De acordo com a literatura, as trocas térmicas por convecção são mais intensas na parte final da secagem o que justifica maior necessidade de troca térmica. A justificativa baseia-se na dificuldade em retirar a umidade ligada no seio da matéria-prima.

Figura 5.20 – Perfil do parâmetro de transferência de calor por convecção para cada câmara.



Pela Figura 5.21 observa-se aumento gradual do coeficiente de transferência de massa por convecção, esse efeito pode ser explicado devido a baixa concentração de água na gelatina das câmaras finais.

Dos resultados do balanço de massa e das Equações 4.26 e 4.27. (Figura 5.22), observa-se a evolução da umidade relativa. Existe um aumento significativo da câmara 1 a 3 devido ao excesso de umidade e a fase de secagem se encontrar no período a taxa aproximadamente constante. Em 4, observa-se uma queda

considerável devido ao exaustor responsável pela retirada do ar úmido. A partir da câmara 6, existe um decréscimo da umidade relativa devido ao aumento considerável de temperatura e da necessidade de existir um grande gradiente de concentração pois é nesta fase que existe maior dificuldade em secar a gelatina.

Figura 5.21 – Perfil do parâmetro de transferência de massa por convecção para cada câmara.

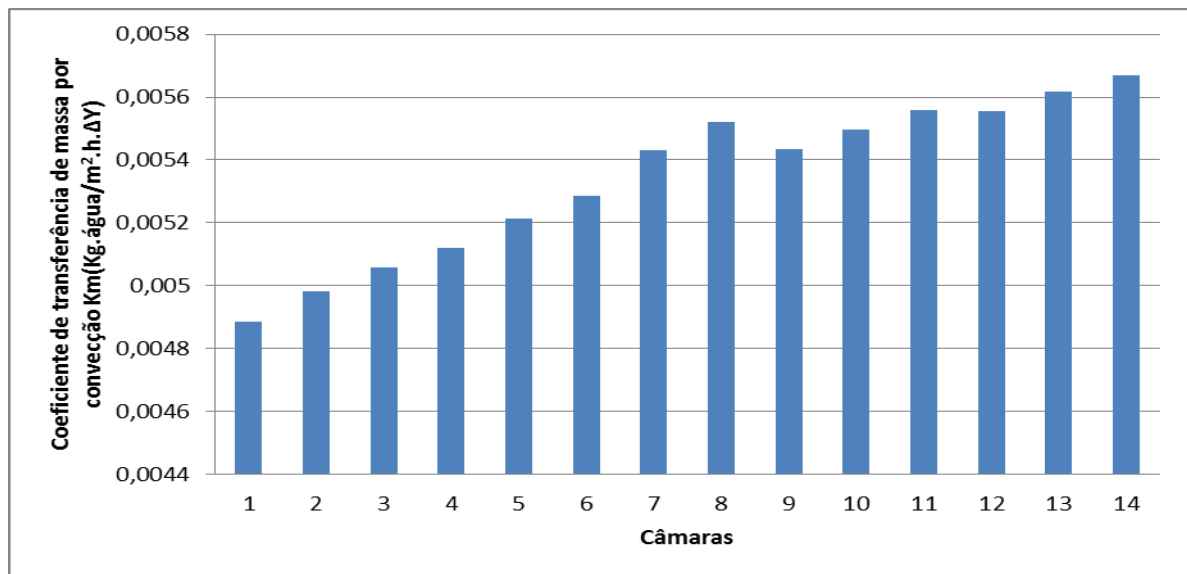
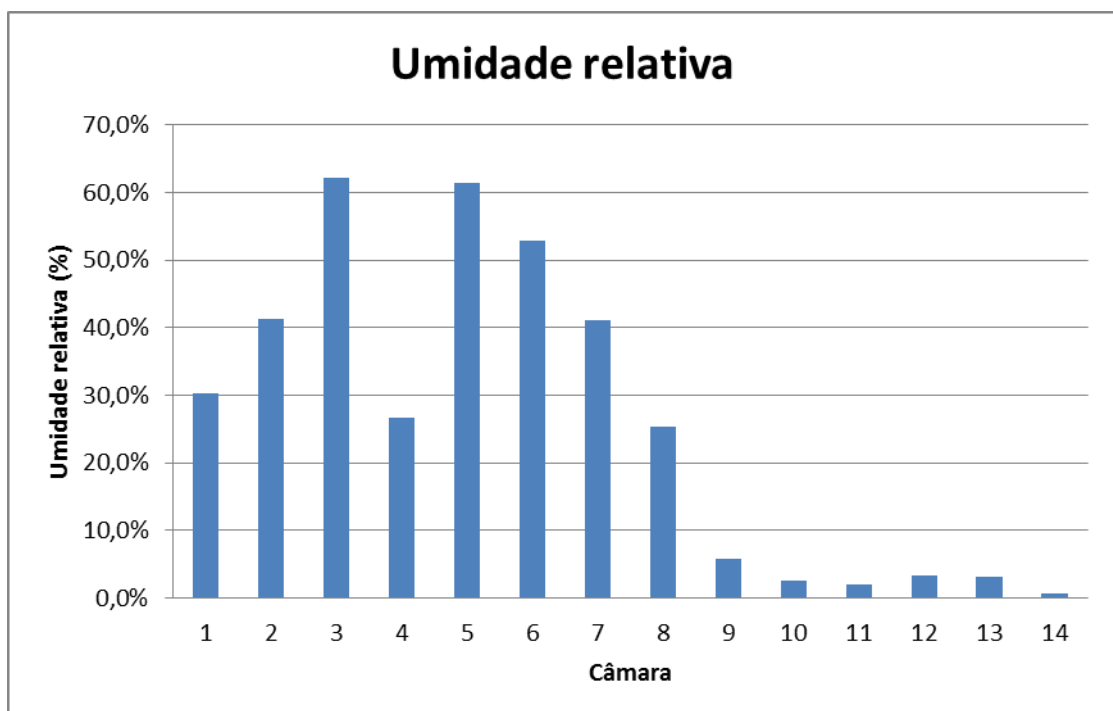


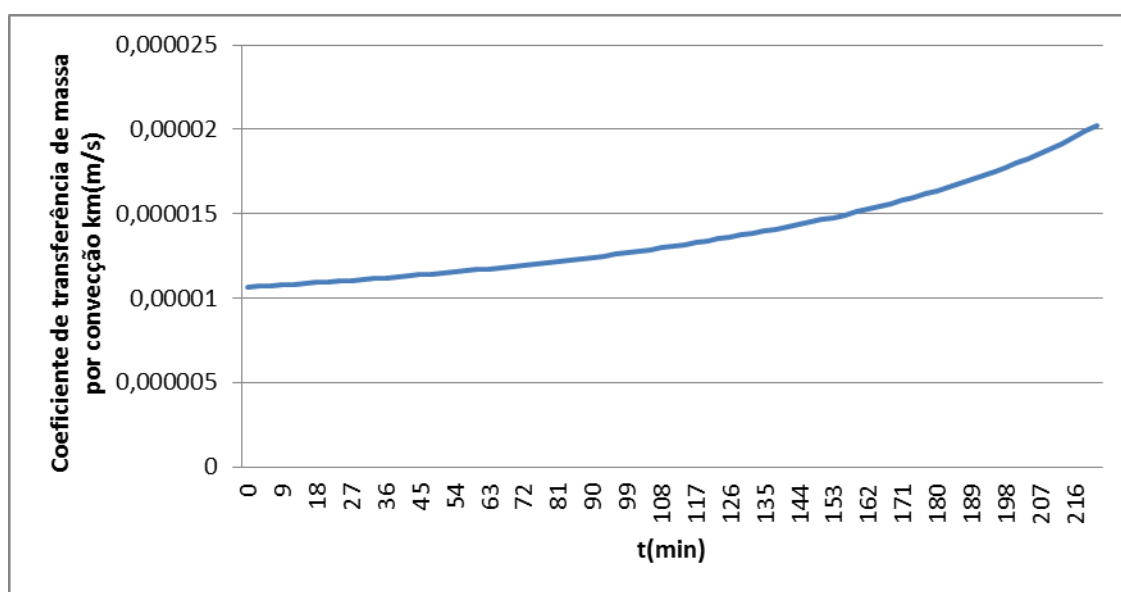
Figura 5.29 – Evolução da umidade relativa ao longo das câmaras



5.9.1 Coeficiente de transferência de massa por convecção durante ensaio laboratorial

Como resultado do cálculo utilizando as Equações 4.19 a 4.23 (Figura 5.30) observa-se um comportamento semelhante observado no equipamento, existe um aumento pequeno, porém, gradual do valor do parâmetro calculado, porém, numericamente o valor deste parâmetro é menor em toda sua faixa se comparado ao equipamento. Com isso, demonstra-se que o equipamento possui uma maior eficiência em transferência de massa que o ensaio a nível laboratorial.

Figura 5.30 – Coeficiente de transferência de massa por convecção no ensaio a 30°C



6 CONCLUSÃO

Conclui-se que são válidos os testes laboratoriais como forma de caracterizar o processo de secagem e entender o comportamento dinâmico da matéria prima de acordo com as condições operacionais que poderão ser impostos no equipamento industrial. O ajuste da curva de secagem foi realizado com sucesso e a curva resultante apresenta uma equação apropriada para cálculos de balanços de massa e energia, o que melhora as chances de obter resultados mais precisos.

Observam-se, também, pontos no equipamento industrial que podem ser modificados como forma de melhorar a retirada da umidade antes das câmaras medianas, até 18min de secagem existe uma diferença de queda de umidade entre o ensaio e o equipamento, de aproximadamente 70%, sendo esta uma alternativa para economia de espaço ou vapor. Também em uma análise da velocidade da esteira observa-se pouca influência da mesma, o que pode apresentar pequenas perdas de qualidade do produto final, nesse caso existe a possibilidade de aumentar a velocidade da esteira em até 18m/h ocasionando erro na umidade final de no máximo 31,6%, mantendo as condições de secagem com o perfil de temperatura crescente.

A análise de redimensionamento demonstra que existe a possibilidade de diminuir o equipamento e manter a velocidade da esteira menor, porém, deve-se impor uma altura do leito de secagem maior, o que necessariamente acarretaria problemas de perda de carga do ar de secagem. Quanto ao perfil de temperatura, pelos resultados apresentados observa-se que necessariamente deve ser mantido um perfil crescente de temperatura para evitar problemas como incrustação superficial ou derretimento, isso pode ser observado no ensaio a 52°C que a secagem se mantém estagnada após a umidade crítica, logo, não é um parâmetro a ser modificado para aumento de desempenho do equipamento.

O balanço de energia demonstrou concordância próxima do equipamento real com exceção da câmara 3, nesse caso o ponto no qual existe a fase final de grande evaporação. Os resultados dos balanços demonstram ser eficiente o método de testes laboratoriais como forma de dimensionar as necessidades energéticas. Por fim, o consumo de vapor foi maior nas primeiras câmaras o que condiz com experimentos laboratoriais que demonstra nesta etapa inicial ser a etapa em que existe evaporação da umidade não ligada. Como sugestão para futuras pesquisas e projeto, recomenda-se a utilização de ensaios laboratoriais, balanços materiais e de energia como forma de prever o dimensionamento do equipamento futuro, determinação de condições operacionais ou mudanças no projeto do equipamento já existente.

REFERÊNCIAS

BAE, H.J., PARK, H.J., HONG, S.I., BYUN, Y.J., DARBY, D.O., ROBERT, M., KIMMEL, R.M., WHITESIDE, W.S. Effect of clay content, homogenization RPM, pH, and ultrasonication on mechanical and barrier properties of fish gelatin/montmorillonite nanocomposite films. *LWT – Food Science and Technology* 42, 2009.

BARROZO, M. A. S., SARTORI, D. J. M., FREIRE, J. T. Transferência de calor e de massa em leito deslizante e escoamentos cruzados. Secagem de sementes de soja. In: FREIRE, J. T. e SILVEIRA, A. M. Tópicos especiais em sistemas particulados. São Carlos: UFSCar, cap. 4, p. 119-159, 1998.

BERTRAND, B.; NOURHE`NE, B.; CATHERINE, B.; JEAN-DOMINIQUE, D. Modelling of moisture and salt transport in gelatine gels during drying at constant temperature, *Journal of Food Engineering*, Genes Champanelle, France, vol. 81, 657–671, 2007.

BERTOLI, A. J & NEITZEL, I. - Secagem de Gelatina - Relatório Interno DEQ/UEM, 1-28, 1987.

BOHNER, M.; BARFUSS, I.; HEINDL, A.; MULLER, J. Improving the airflow distribution in a multi-belt conveyor dryer for spice plants by modifications based on computational fluid dynamics, *biosystems engineering*, Vestenbergsgreuth, Germany, vol. 115, 339-345, 2013.

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

BRUIN, S.; LUYBEN, K. Ch. M. 1980. Drying of food materials. A review of recent developments in *Advances in Drying*, Vol. 1, p. 155-216. Hemisphere Publishing Co., New York. 1980.

CHI-AN DAI; YI-FAN CHEN; MING-WEI LIU. Thermal Properties Measurements of Renatured Gelatin Using Conventional and Temperature Modulated Differential Scanning Calorimetry, *J. of Applied Polymer Science*, *Taipei Taiwan*, vol. 99, 1795-1801, 2006.

CORAZZA, F. C.; NEITZEL, I.; SILVA, E. A. Modelagem de secador do tipo esteira: uma aplicação industrial, *Acta Scientiarum. Technology*, Brasil, v. 25, 133-140, 2003.

DEFRAEYE, T.; BLOCKEN B.; CARMELIET J. Analysis of convective heat and mass transfer coefficients for convective drying of a porous flat plate by conjugate modelling, *International J. of Heat and Mass Transfer*, Switzerland, vol. 55, 112–124, 2012.

DEFRAEYE, T.; BLOCKEN B.; DEROME, D.; NICOLAI, B.; CARMELIET J.: Convective heat and mass transfer modelling at air-porous material interfaces: Overview of existing methods and relevance, *Chemical Eng. Science*, Switzerland, vol. 74, 49-58, 2012.

ERBAY Z.; ICIER, F.; HEPBASLI A.; Exergetic performance assessment of a pilot-scale heat pump belt conveyor dryer. *International Journal of Energy Research*, Izmir, Turkey, 249 a 264, 2010.

FIORENTIN, L. D.; MENON, B. T.; ALVES, J. A.; BARROS, S. T. D.; PEREIRA, N. C.; MÓDENES, A. N.. Determinação da cinética e das isotermas de secagem do bagaço da laranja. *Acta Scientiarum Technology*, Brasil, vol. 32, 147-152, 2010.

FOUST A.S.; L. A. WENZEL; C. W. CLUMP; L. MAUS; L. B. ANDERSEN. *Princípios das Operações Unitárias*. 2ª. ed. Brasil: LTC, 1982.

GARCÍA-ALVARADO, M. A.; F.M. PACHECO-AGUIRRE; RUIZ-LÓPEZ, I.I. Analytical solution of simultaneous heat and mass transfer equations during food drying, *Journal of Food Engineering*, Mexico, vol 142, 39–45, 2014.

GEANKOPLIS, C. J. *Mass transport phenomena*. Nova York: Holt, Rinheart and Winston Inc., 1972.

GEANKOPLIS, C. J. *Drying of Process Materials. Transport processes and unit operations*. 3ed. New Jersey: Prentice-Hall, Cap. 9, p. 520-583, 1993.

Gelatin Manufacturers Institute of America (GMIA). *Gelatin Handbook*, 2012.

GHOSHAL S.; MATTEA C.; STAPF S. Inhomogeneity in the drying process of gelatin film formation: NMR microscopy and relaxation study, *Chemical Physics Letters*, Germany, vol. 485, 343–347, 2010.

GREG, S. J. ; SING, K. S. W. *Adsorption, Surface Area and Porosity*. London, New York, Academic Press, 1967.

HENDERSON, S. M.; PABIS, S. Grain drying theory I: temperature effect on drying coefficient. *Journal of Agricultural Engineering Research*, v. 6, p.169-174, 1961.

JENSEN, S.; MELEIRO L. A. C.; ZANOELO, E. F. Soft-sensor model design for control of a virtual conveyor-belt dryer of mate leaves (*Ilex paraguariensis*). *biosystems engineering* , Brazil, vol.108, 75-85, 2011.

KEMP, I. C.; BAHU, R. E. *A new algorithm for dryer selection*, *Drying Technol*, *New York*, vol. 13, 1563–1578, 1995.

KIRANOUDIS C. T.; MAROULIS, Z. B.; MARINOS-KOURIS, D. Drying of solids: Selection of some continuous operation dryer types, *pergamon*, athens, greece, vol. 20, 177-188, 1996.

KIRANOUDIS C. T. Design and operational performance of conveyor-belt drying structures, *Chemical Engineering Journal*, Greece, vol. 69, 27-38, 1998.

KRISCHER, O.; KAST, W. *Die wissenschaftlichen Grundlagen der Trocknungstechnik*. Band I Dritte Auflage, Springer Verlag, 1978.

KUSTUREE, J.; YAPA, M.; RATTANADECHO, P.; Design and analysis of the commercialized drier processing using a combined unsymmetrical double-feed microwave and vacuum system (case study: tea leaves), *Chemical Engineering and Processing*, Thailand, vol. 49, 389–395, 2010.

Luz, G. R. *Modelagem matemática e análise do secador rotativo de farelo de soja*. Dissertação (Mestrado), Universidade Estadual de Maringá, Maringá-PR, 2006.

McCABE W. L.; SMITH J. C.; HARRIOTT, P. *Unit Operation of Chemical Engineering*, 5ed., USA: McGraw-Hill, 1993.

MENEZES, M. L.; STRÖHER, A. P.; PEREIRA, N. C.; BARROS, S. T. D. Análise da cinética e ajustes de modelos matemáticos aos dados de secagem do bagaço do maracujá-amarelo. *Engevista*, Brasil, vol. 15, 176-186, 2013.

MOTTA LIMA, O. C.; ALVES, C. E. S.; PEREIRA, N. C.; MENDES, E. S. Moisture equilibrium isotherms for pinus long-fiber cellulose. *Acta Scientiarum. Technology*, Brazil, vol. 26, 27-32, 2004.

NAKORCHEVSKII, A. I.; VYLEGZHANIN, A. N.; GASKEVICH, V. Mathematical modeling of convective heat and mass transfer in the drying of solid particles in a bed, *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, Vol. 67,721-726, 1994.

NEITZEL, I.; MASSARANI, G. Análise do Desempenho de um Secador de Esteira, *Anais do XV Encontro Sobre Escoamento em Meios Porosos*, V.II, p.466-477, 1987.

NEITZEL, I. - Considerações sobre a Simulação de um Secador de Gelatina Relatório Interno DEQ/UEM, 5 p.,1990.

OZDEMIR, M.; DEVRES, Y. O. The thin-layer drying characteristics of hazelnuts during roasting. *Journal of Food Engineering*, v. 42, p. 225-233, 1999.

PADOIN, N.; ADRIELI T.O. DAL'TOÉ; LEONARDO P. RANGEL; ROPELATO, K.; SOARES, C. Heat and mass transfer modeling for multicomponent multiphase flow with CFD, *International J. of Heat and Mass Transfer*, Brazil, vol. 73, 239-249, 2014.

PARISB O. O.; TERRIL W. P.. *Equations for the Determination of Humidity from Dewpoint and Psychrometric Data*. Nasa-langley, U.S.A, 1978.

PERRY, R. H.; CHILTON, C. H. Chemical Engineers' Handbook. 5th ed. New York: McGraw-Hill, 1973.

PERUSSELLO, C. A.; MARIANI, V. C.; AMARANTE, A. C. C. A. Numerical and experimental analysis of the heat and mass transfer during okara drying, Applied Thermal Engineering, Brazil, vol. 48, 325-331, 2012.

PROMMAS R.; RATTANADECHO P.; JINDARAT W.; Energy and exergy analyses in drying process of non-hygroscopic porous packed bed using a combined multi-feed microwave-convective air and continuous belt system (CMCB). International Communications in Heat and Mass Transfer, Thailand, 242 a 250, 2012.

RIZZIERI, R.; MAHADEVAN, L.; VAZIRI, A.; A. Donald. Superficial Wrinkles in Stretched, Drying Gelatin Films, *Langmuir, Cambridge*, vol. 22, 3622-3626, 2006.

RUIZ-CABRERA, M.A.; FOUCAT, L.; BONNY, J.M.; RENO, J.P.; DAUDIN, J.D. Assessment of water diffusivity in gelatine gel from moisture profiles. I—Non-destructive measurement of 1D moisture profiles during drying from 2D nuclear magnetic resonance images, Journal of Food Engineering, St-Gene's-Champanelle, France, vol. 68, 209–219, 2005.

SAITO, H.; TAGUCHI, T.; KOBAYASHI, H.; KATAOKA, K.; TANAKA, J.; MURABAYASHI, S. Physicochemical properties of gelatin gels prepared using citric acid derivative. Materials Science and Engineering, 24, 781-785, 2004.

SEBASTIAN, P.; NADEAU J. P.; PUIGGALI J. R. Designing dryers using heat and mass Exchange networks: an application To conveyor belt dryers, *trans icheme , france*, vol 74, 934-943, 1996.

SHYAMKUWAR, A. L.; CHOKASHI, K. P.; WAJE, S. S.; THORAT, B. N. Synthesis, Characterization, and Drying of Absorbable Gelatin Foam, Drying Technology, Mumbai, India, 28, 659–668, 2010.

SILVA E. A.. Secagem de gelatina “análise do perfil de concentração e Temperatura no interior do gel”. [drying of gelatin "analysis and concentration profile Temperature inside the gel "].1995. 138 f. Dissertação de mestrado – Universidade Estadual de Maringá, Brasil,1995.

SKURATOV, S. M. ; SHKITOV, M. S. Spcific heat of water bound by high polymeric substances. Physical Chemistry 53(7), 627-629, 1946.

SOUSA L. H. C. D. Análise da condutividade térmica da Gelatina com variação de umidade - Aplicação ao processo de secagem. [Analysis of the thermal conductivity gelatin with variation of moisture - Application process of drying]. 1996. 128 f. Dissertação de mestrado – Universidade Estadual de Maringá, Brasil, 1996.

STRUMILLO, C.; KUDRA, T. Drying: principles, applications and design. Topics in chemical engineering. Vol.3., Switzerland: Gordon and breach science publishers, 1986.

VELADAT R.; ASHTIANI F. Z.; RAHMANI M.. A rigorous analysis of simultaneous heat and mass transfer in the pasta drying process, Berlin, 1481 a 1488, 2013.

WAANANEN, K. M., LICHTFIELD, J. B., & OKOS, M. R. Classification of drying models for porous solids. Drying Technology, 11(1), 1–40, 1993

XUESONG LIU; ZHIFANG QIU; LONGHU WANG; YIYU CHENG; HAIBIN QU; YONG CHEN. Mathematical modeling for thin layer vacuum belt drying of Panax notoginseng extract, Energy Conversion and Management, China, vol. 50, 928-932, 2009.

YALDIZ, O.; ERTEKIN, C.; UZUN, H.I. Mathematical modeling of thin- layer solar drying of sultana grapes. Energy, v. 26, p. 457-465, 2001.

ANEXO

Figura 5.6 – Modelo Exponencial a dois termos para o ensaio de secagem a 30°C

Modelo: Exponencial a dois termos

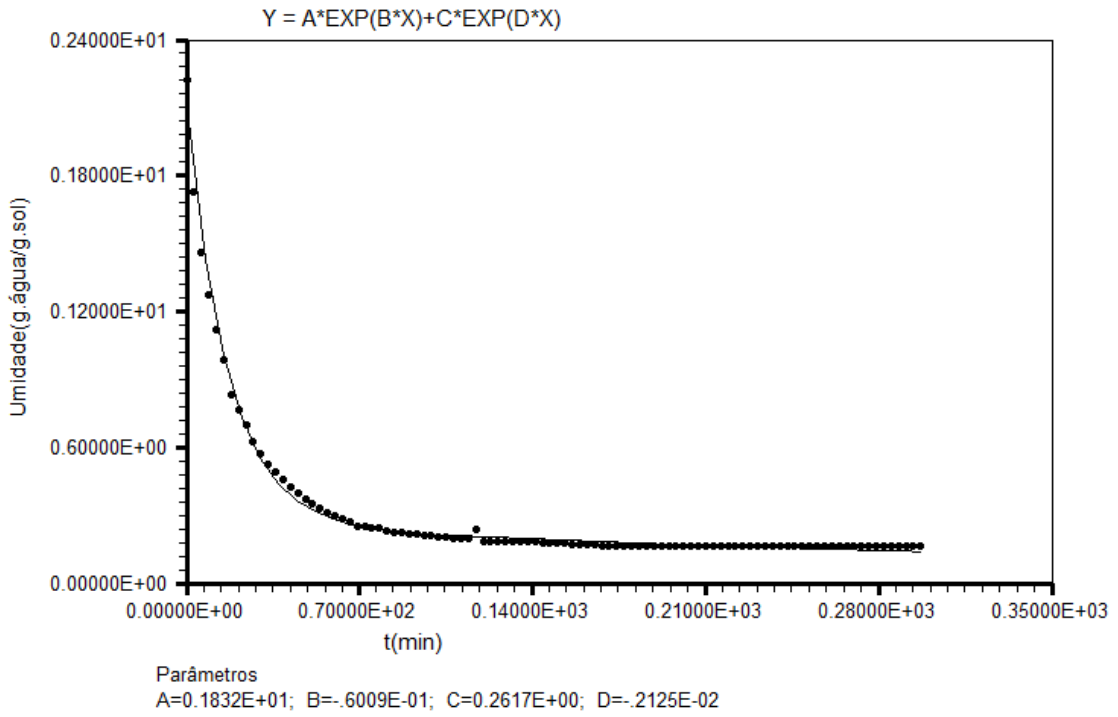


Figura 5.7 – Modelo Exponencial a dois termos para o ensaio de secagem a 40°C

Modelo: Logaritmo a dois termos

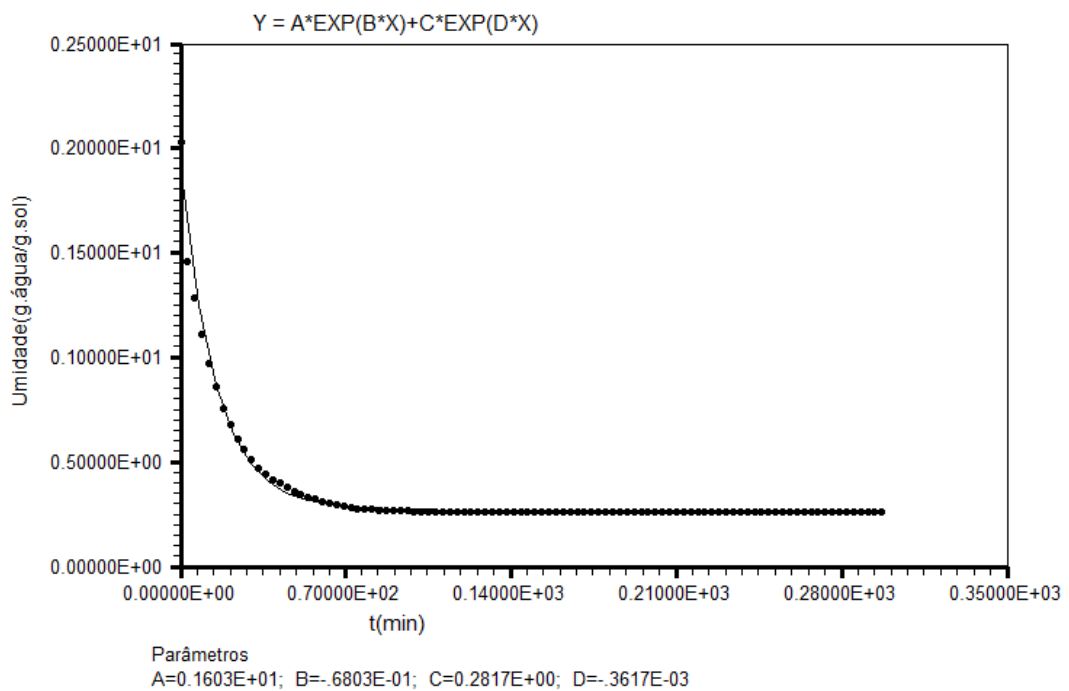


Figura 5.8 – Modelo Exponencial a dois termos para o ensaio de secagem a 52°C

Ensaio 3: Logaritmo a dois termos

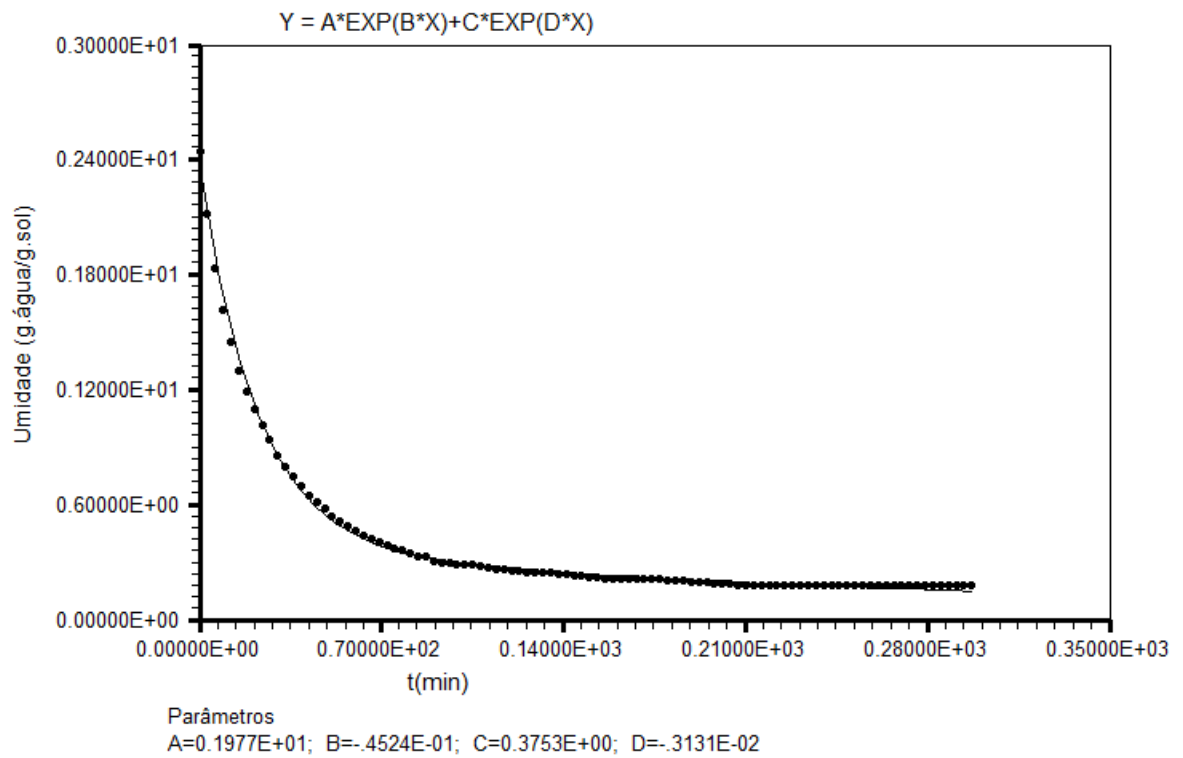


Figura 3.6 – Carta Psicrométrica (PERRY, 1973)

