

**Universidade Federal de Campina Grande
Centro de Ciências e Tecnologia
Pós-Graduação em Engenharia Química**

**Estudo da Cinética da Secagem de Leveduras
Saccharomyces. cerevisiae para Uso Como Fonte
Protéica na Ração Animal**

Suelandia Nicácio de Sá

**Campina Grande – PB
Junho - 2002**

**ESTUDO DA CINÉTICA DA SECAGEM DE LEVEDURAS *S. cerevisiae*
PARA USO COMO FONTE PROTÉICA NA RAÇÃO ANIMAL**

Suelandia Nicácio de Sá

Dissertação apresentada como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Química, ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Química do Departamento de Engenharia Química da Universidade Federal de Campina Grande.

Orientadores: Prof^ª Dra. Odelsia Leonor Sánchez de Alsina
Prof. Dr. Flávio Luiz Honorato da Silva

Campina Grande - PB
Junho-2002



S111e Sa, Suelandia Nicacio de
Estudo da cinetica da secagem de leveduras *S. cerevisiae* para uso como fonte proteica na racao animal / Suelandia Nicacio de Sa. - Campina Grande, 2002.
57 f.

Dissertacao (Mestrado em Engenharia Quimica) -
Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciencias e Tecnologia.

1. Secagem 2. Leveduras 3. Proteinas 4. Dissertacao - Engenharia Quimica I. Alsina, Odelsia Leonor Sanchez de II. Silva, Flavio Luiz Honorato da III. Universidade Federal de Campina Grande - Campina Grande (PB)

CDU 66.041.453(043)

**ESTUDO DA CINÉTICA DA SECAGEM DE LEVEDURAS *S. cerevisiae*
PARA USO COMO FONTE PROTÉICA NA RAÇÃO ANIMAL**

por

Suelandia Nicácio de Sá

Dissertação aprovada em 25 de junho de 2002.

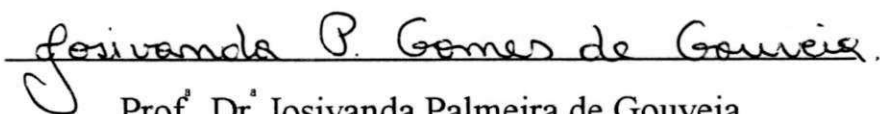
Banca Examinadora



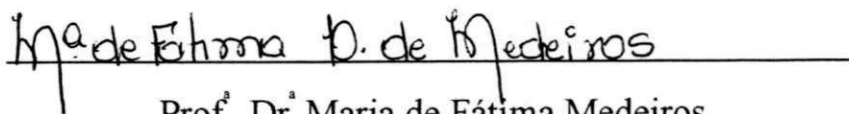
Prof.^a Dr.^a Odelsia Leonor Sanchez de Alsina
(Orientadora)



Prof. Dr. Flávio Luiz Honorato da Silva
(Orientador)



Prof.^a Dr.^a Josivanda Palmeira de Gouveia
(Examinadora)



Prof.^a Dr.^a Maria de Fátima Medeiros
(Examinadora)

DEDICATÓRIA

Aos meus pais FRANCISCO
MARIANO DE SÁ e ISABEL
FERREIRA NICÁCIO DE SÁ por
me apoiarem em todos os
momentos de minha vida.

AGRADECIMENTOS

À DEUS

Aos Professores Orientadores: Prof^ª. Dra. Odelsia Leonor Sánchez de Alsina e Prof. Dr. Flávio Luiz Honorato da Silva pela orientação e dedicação a este trabalho.

Ao Laboratório de processamento de produtos Agrícola (em especial à Profa Rossana Maria Feitosa de Figueirêdo, pela oportunidade de desenvolver parte da pesquisa.

Ao Prof. Dr. Shiva Prasad pelo apoio e colaboração durante a orientação do estágio docência.

Aos meus colegas e amigos, Alfredina, Andréa, Ana Paula, Glêdes, Joelma, Kleberon, Milene, Rucilana, Shefora, Wilma, Vimário, que sempre me apoiaram.

A Profa Eliane Rolim Florentino pelo apoio, incentivo e amizade.

A Prof^ª Dr^ª Josivanda Palmeira Gomes de Gouveia, meus sinceros agradecimento pela dedicação nas correções.

Ao meu noivo Guilherme Varela, minha alma gêmea, pelo carinho e compreensão.

Aos meus primos Fabiana, Jailton, Aninha e Jailson pela participação na minha vida.

Aos funcionários do Laboratório de Operações José Lopes e Nogueira.

Ao Coordenador do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Química Luis Gonzaga Sales Vasconcelos, pelo incentivo e ajuda.

As secretárias do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Química Maria José e Maricé, por todo serviço prestado durante todo curso.

RESUMO

O emprego de levedura, como fonte protéica não convencional, especialmente as do gênero *Saccharomyces cerevisiae*, tem tido um crescimento significativo nos últimos anos. Quando a levedura é destinada a alimentação de animais ruminantes deve estar na forma inativa e conservando as suas características nutricionais, como proteína e também das exigências dos padrões de mercado quanto a cor, granulometria e teor de umidade. A produção de levedura seca surge como uma das soluções para amenizar os problemas agropecuários da região Nordeste. O processo de secagem é uma forma viável para a conservação do produto, facilitando a estocagem, o transporte e a comercialização. Neste trabalho foram realizadas uma série de ensaios relativos ao processo de secagem de leveduras. Curvas experimentais foram obtidas utilizando estufa com circulação forçada do ar nas faixas de temperatura de 34, 40, 55, 70 e 75 °C e velocidade do ar 0,1; 0,2; 0,4 e 0,6m/s-1. As curvas com os resultados experimentais foram obtidas durante os períodos de pré-aquecimento a taxa constante e taxa decrescente de secagem. A umidade crítica entre os dois períodos independe da faixa de temperatura. Para o período de taxa decrescente aplicou-se um modelo difusional fikiano. Também foi realizado o levantamento de isotermas de dessorção, que é de fundamental importância para quantificar a higroscopicidade do produto, nas temperaturas de 30, 40 e 45 °C. Estas curvas foram ajustadas através dos modelos matemáticos de HENDERSON, GAB e BET. O modelo de GAB foi o que melhor se ajustou aos dados experimentais nas faixas de temperatura estuda. O valor nutricional não chega a ser comprometido com o aumento de temperatura visto que maior temperatura diminui o tempo de secagem.

SIMBOLOGIA

aw	atividade de água
A	área da superfície exposta (m ²)
dx/dt	taxa de secagem
CGAB	constante de Guggenheim
CBET	constante de BET
f	o fator de correlação calculado para o HCl
H	coeficiente de transferência de massa (w.m ⁻² .°C ⁻¹)
Hl	calor de condensação do vapor de água pura
K	fator de correção das propriedades das moléculas multicamada com respeito ao volume de líquido
P	pressão parcial de vapor d' água de um produto
P0	pressão de vapor d' água pura a mesma temperatura
Ta	temperatura ambiente, (°C)
Tbu	temperatura de bulbo úmido (°C)
T	temperatura (°C)
UR	umidade relativa (%)
X (bs)	umidade base seca (bs)
X	conteúdo de umidade de equilíbrio (g)
Xm	conteúdo de umidade na monocamada
Wi	massa (g)
Ws	massa seca (g)
Xi	umidade inicial (g)
V	volume real de HCl utilizado na titulação (ml)
X1 e X2	constantes do modelo de Henderson

Letra Grega

α	Coefficiente do calor de sorção
----------	---------------------------------

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

SIMBOLOGIA

CAPÍTULO I.....	1
1 – INTRODUÇÃO.....	1
CAPÍTULO II.....	3
2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	3
2.1 – Histórico da Produção de Levedura.....	3
2.2 – Valores Nutritivos das Leveduras.....	4
2.3 – Utilização da Levedura na Alimentação Animal.....	6
2.3.1 – Benefício do Emprego de Levedura.....	9
2.4 – Aspectos de Comercialização.....	9
2.5 – Caracterização de Sólidos.....	10
2.5.1 – Métodos de Medida de Dimensões de Partículas.....	11
2.6 - Secagem.....	12
2.7 – Secagem de Levedura.....	12
2.8 – Cinética de Secagem.....	14
2.9 – Mecanismos de Secagem.....	14
2.10 – Período a Taxa Constante.....	16
2.11 – Período a Taxa Decrescente.....	17
2.11.1 – Modelo difuncional.....	17
2.12 – Aplicações da Psicrometria a Secagem.....	18
2.13 – Atividade de Água.....	19
2.13.1 – Isoterma de Equilíbrio Higroscópico.....	21
2.14 – Descrição das Isotermas.....	21
2.15 – Planejamento e Otimização de Experimentos.....	23
CAPÍTULO III.....	25
3 – MATERIAL E MÉTODOS.....	25
3.1 – Material Utilizado.....	25

3.1.1 - Levedura.....	25
3.2 - Atividade de Água (aw).....	26
3.3 - Parâmetros Físico-químicos.....	27
3.4 - Obtenção das Curvas de Cinética de Secagem.....	30
3.5 - Planejamento Experimental.....	31
CAPÍTULO IV.....	33
4 - RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	33
4.1 - Isotermas de Equilíbrio Higroscópico.....	33
4.2 - Cinética de Secagem.....	37
4.2.1 - Período de Secagem à Taxa Constante.....	40
4.4 - Período de Secagem à Taxa Decrescente.....	49
4.5 - Qualidade do Produto.....	55
4.5.1 - Granulometria.....	55
4.5.2 - Teor Proteico.....	56
CAPÍTULO V.....	59
5 - CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS.....	59
CAPÍTULO VI.....	61
6 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	61
APÊNDICE A.....	64
APÊNDICE B.....	73

LISTA DE FIGURAS

4.1 – Isotermas para as temperaturas de 30, 40 e 45 °C para levedura comercial seca ...	34
4.2 – Curva de secagem a 34 °C e 0,4 m.s ⁻¹	37
4.3 – Curva da derivada dx/dt a 34 °C e 0,4 m.s ⁻¹	38
4.4 – Curvas de secagem a 55 °C e 0,1 m.s ⁻¹	38
4.5 – Curva da derivada dx/dt a 55 °C e 0,1 m.s ⁻¹	39
4.6 – Curva de secagem a 70 °C e 0,1 m.s ⁻¹	39
4.7 – Curva da derivada dx/dt a 70 °C e 0,1 m.s ⁻¹	40
4.8 – Curva de secagem no período de taxa constante a 34 °C e 0,4 m.s ⁻¹	42
4.9 – Curva de secagem no período de taxa constante a 40 °C e 0,2 m.s ⁻¹	42
4.10 – Curva de secagem no período de taxa constante a 40 °C e 0,6 m.s ⁻¹	43
4.11 – Curva de secagem no período de taxa constante a 55 °C e 0,1 m.s ⁻¹	43
4.12 – Curva de secagem no período de taxa constante a 55 °C e 0,4 m.s ⁻¹	44
4.13 – Curva de secagem no período de taxa constante a 55 °C e 0,4 m.s ⁻¹	44
4.14 – Curva de secagem período de taxa constante a 55 °C e 0,4 m.s ⁻¹	45
4.15 – Curva de secagem no período de taxa constante a 55 °C e 0,4 m.s ⁻¹	45
4.16 – Curva de secagem período de taxa constate a 55 °C e 0,7 m.s ⁻¹	46
4.17 – Curva de secagem no período de taxa constante 70 °C e 0,1 m.s ⁻¹	46
4.18 – Curva de secagem período a taxa constante 70 °C e 0,6 m.s ⁻¹	47
4.19 – Curva de secagem período a taxa constante a 76 °C e 0,4 m.s ⁻¹	47
4.20 – Estimativa da difusividade para $V_{ar} = 0,4 \text{ m.s}^{-1}$ e $T = 34 \text{ °C}$	49

CAPÍTULO I

1 - INTRODUÇÃO

O Proálcool teve como meta inicial o emprego de etanol como combustível em 95% dos automóveis até final do século XX, com isto era necessário uma produção de mais de 40 bilhões de litros. A partir de 1985, 10 anos depois da implantação do programa, houve reavaliação das metas. A previsão inicial da elevação progressiva do preço do barril de petróleo não se confirmou. Nestes últimos tempos, praticamente não ocorreram alterações significativas no preço do barril de petróleo, conseqüentemente o preço do barril de álcool etílico ficou sempre superior ao preço do barril de gasolina (SILVA, 1998).

Nesta perspectiva, surgiu uma preocupação dos pesquisadores e técnicos desta área, em busca de alternativas para redução do custo na produção de álcool etílico. Uma solução encontrada foi estudar o potencial dos subprodutos da indústria de álcool etílico, a fim de assegurar o poder de competição do programa, tais como o uso com maior valor agregado do bagaço, da vinhaça, do óleo fúsel e levedura.

Os segmentos da indústria alcooleira identificaram a levedura como grande potencial de produção tanto para exportação como para ser empregada no mercado interno. A biomassa de levedura é uma ótima fonte protéica.

O emprego de fontes protéicas ditas não convencionais na alimentação animal e humana vem crescendo, principalmente com o emprego da proteína de levedura, produzida em grandes quantidades nas indústrias produtoras de álcool etílico, no Brasil.

A levedura é utilizada no processo de fermentação alcoólica, podendo ser aproveitada parcialmente sem que diminua sua eficiência fermentativa. A levedura seca é empregada na composição de ração animal como fonte protéica e de vitaminas. Com as constantes secas que assolam a região surge a necessidade de procurar novas fontes de proteínas para os animais, entre elas estão as leveduras visto que possuem uma grande massa protéica. O emprego de fontes não convencionais está tendo um relevante crescimento destacando-se as proteínas obtidas de levedura, que são produzidas em grandes escalas nas indústrias produtoras de álcool etílico, no Brasil.

Para que a levedura seja comercializada deve estar dentro dos padrões de qualidade exigidos pelo mercado, especialmente no que diz respeito à cor, à granulometria, ao teor de proteínas e à umidade.

A secagem é um procedimento muito importante para a conservação de produtos por diminuir a atividade de água, prevenindo o aparecimento de microrganismos indesejáveis, o empedramento durante o armazenamento permitindo assim uma melhor conservação do produto. Durante a secagem não deve ocorrer a desnaturação da levedura devendo-se obter um produto com percentual de umidade uniforme (FURCO, 1996).

Diante do exposto este trabalho objetivou estudar o processo de secagem de leveduras observando a cinética e os fatores que interferem na viabilidade e qualidade das leveduras secas, para ser utilizadas como fonte protéica para suplemento alimentar de animais.

CAPÍTULO II

2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 - Histórico da Produção de Levedura

A levedura é um microrganismo unicelular, pertencente ao grupo dos fungos, não possui micélio típico que são comuns aos fungos. As leveduras são empregadas na fabricação de pão desde 2300 a. C no Egito (PEIXOTO, 1996).

Durante o século XIX, as leveduras de uso doméstico eram subproduto das cervejarias e destilarias; era um fermento instável e de qualidade variável, composta de diversas linhagens. O fermento a partir de cultura pura só veio a ser produzido anos mais tardes. No ano de 1868, nos EUA, os irmãos Fleischman iniciaram a fabricação de leveduras prensadas conhecidas popularmente como fermentos frescos. Este fermento foi apresentado oficialmente em 1876 durante a Exposição do Centenário da Filadélfia (PEIXOTO, 1996).

A levedura do gênero *saccharomyces* inclui as mais importantes leveduras, entre elas as leveduras produtoras de álcool, fabricação de cerveja, de vinho, e para obtenção da enzima invertase. Tradicionalmente, a levedura tem sido usada na indústria de alimentos, como agente de fermentação, na fabricação de pães, cervejas e vinhos, e na forma inativa, como suplemento nutritivo em produtos naturais, além do uso como matéria-prima para produção de autolisados e extratos de levedura (DZIEZAK, 1987).

Estas leveduras, normalmente, se multiplicam através da gemulação multipolar e por formação de ascósporos. As células produzidas são longas e de aspecto esféricos ou ovulados.

A *Saccharomyces cerevisiae* quando provem de cepas selecionadas é aplicada não só em processos fermentativos, mas como suplemento dietético, nos casos de carência de vitaminas do complexo B, e também como fonte de proteína em ração animal ou alimento humano. As leveduras são classificadas com base na sua atividade.

Leveduras ativas são aquelas empregadas para fermentação e como fonte de componente nutricional e *flavor*. Enquanto, as leveduras inativas não possuem capacidade fermentativa, são empregadas como alimento nutricional e *flavor*. Quando elas são provenientes dos processos destinados à sua multiplicação são chamadas primárias, as leveduras obtidas como subprodutos de indústrias fermentativas são definidas como levedura secundária (FALANGHER, 1978).

Pertencem ao grupo de leveduras ativas as leveduras de panificação, de cervejaria, de destilaria e de vinho.

A levedura de panificação (*S. cerevisiae*) encontra-se em três formas: prensada, seca ativa e seca ativa instantaneamente, a diferenças entre elas se dá quanto a sua atividade e estabilidade.

Quando as leveduras provem dos processos que tem por objetivo a sua propagação são chamadas leveduras primárias, já quando estas provêm dos subprodutos de indústrias fermentativas são ditas leveduras secundárias (FALANGHER, 1978).

Além das leveduras *S. cerevisiae*, estão as *Candida utilis* e a *Kluyveromyces fragilis* que possuem crescimento primário.

Segundo PEIXOTO (1996) uma definição clássica de levedura alimentar, também conhecida como levedura seca é células de leveduras, vivas ou mortas, crescidas e desidratadas por processos especiais de fermentação e secagem, de modo a se obter um pó, para uso com suplemento alimentar e *flavor*.

2.2 - Valores Nutritivos das Leveduras

Os valores nutricionais das leveduras podem ser avaliados em termos de seus componentes. De acordo com BRESSANI (1971) as leveduras devido ao seu poder nutricional foram usadas primeiro como fonte de vitaminas, uma vez que representam uma das mais ricas fontes de vitaminas do complexo B. A quantidade destas vitaminas é relativamente alta. A Tabela 2.1 mostra as principais vitaminas encontradas na levedura *S. cerevisiae*.

Tabela 2.1 - Vitaminas do complexo B presentes em leveduras

VITAMINAS	<i>S. cerevisiae</i> ($\mu\text{g g}^{-1}$)
TIAMINA	136,0
RIBOFLAVINA	28,0
ÁCIDO NÍCOTINICINICO	525,0
PIRIDOXINA	40,0
ACIDO PANTOTENICO	69,5
BIOTINA	1,0
ACIDO PARA-AMINOBENZOICO	5,0
COLINA	3800
INOSITOL	3900

FONTE: REED (1973)

A composição aminoácida da proteína de levedura pode ser empregada como parâmetro inicial para determinar o valor nutricional das proteínas. A proteína é dita de bom valor nutricional quando sua composição de aminoácidos fundamentais estão em quantidades adequadas e equilibradas, de modo a estarem próximas dos valores estabelecidos pelo padrão de referência da FAO (1985).

Segundo a FAO (1985) as composições aminoacídicas das proteínas de levedura, destacam-se por apresentar um alto teor de lisina, teores adequados de treonina e triptofano. Embora o perfil aminoacídico não seja comparável a proteínas de origem animal ele se iguala as melhores proteínas de vegetal como a soja. Na Tabela 2.2 encontram-se as faixas de aminoácidos essenciais encontrados na levedura *S. cerevisiae*.

De acordo com KRIDER et al. (1982) a composição química depende de uma série de fatores; tais como: a natureza do substrato utilizado; grau de aeração do meio e espécie de levedura. De todos estes fatores o primeiro é o mais importante. Ele é quem irá interferir nas taxas de crescimento, na composição e principalmente nas proteínas e lipídios.

Tabela 2.2 - Aminoácidos encontrados nas leveduras

AMINOÁCIDOS	CONTEÚDO (g 16 g ⁻¹ N ⁻¹)
LISINA	6,5 – 10,5
VALINA	5,0 – 7,0
LEUCINA	6,5 – 10,0
ISOLEUCINA	5,0 – 7,0
TREONINA	5,0 – 7,0
METIONINA	2,0 – 3,5
FENILALANINA	4,0 – 5,5
TRIPTOFANO	0,5 – 1,5
CISTINA	0,5 – 1,5
HISTIDINA	2,5 – 4,0
TIROSINA	1,5 – 5,0
ARGININA	4,0 – 5,5

FONTE: KINSELLA (1987)

2.3 – Utilização da Levedura na Alimentação Animal

O emprego de proteínas unicelulares ou leveduras na alimentação animal é muito antiga. Encontra-se na literatura trabalhos datados do início do século passado sobre a adição deste produto em ração de animais domésticos. Dentre os microrganismos, as leveduras têm se destacado como uma excelente fonte de proteínas, por suas características não patogênicas, podendo ser usadas tanto como alimento humano quanto como ração (MARTINES-FORCE, 1992).

Quando as leveduras são usadas na ração animal, não há necessidade de remoção dos ácidos nucléicos (SCHRIMSHAW, 1986). Com exceção dos primatas e do homem, onde o ácido úrico é o produto final do metabolismo e é excretado, os outros mamíferos e demais animais terrestres, possuem uricase, que degrada o ácido úrico em alantonina e uréia. Nas aves, o principal produto de degradação não é a uréia e sim o ácido úrico, porque nestes animais a uréia não é sintetizada a partir da amônia (CHRISTIAN e WALTHO, 1964).

Os dados da Tabela 2.3 ilustram os valores padrões exigidos pela legislação brasileira para que a levedura seca possa ser empregada na ração animal.

Tabela 2.3 - Valores mínimos e máximos exigidos pela legislação brasileira para comercialização de levedura seca

Umidade (máximo).....	12,00%
Proteína Bruta (mínimo).....	40,00%
Fibra bruta (máximo).....	3,00%
Matéria Mineral (máximo).....	8,00%
Aflatoxinas (máximo).....	50 ppb

FONTE: PORTARIA N.º 07, DE 09 DE NOVEMBRO DE 1988.

MATTOS et al. (1983) estudaram ratos em crescimento onde a levedura de fundo de dorna substituiu 0, 50 e 100% de caseína como única fonte protéica e observaram que o ganho de peso foi significativamente maior para animais que receberam a levedura como única fonte proteica. A taxa de eficiência proteica não diferiu entre os tratamentos. O autor sugere que se deve utilizar quantidades semelhantes da fração de nitrogênio protéico da levedura e da caseína. Deve ser observado o teor de nitrogênio, não protéico da levedura quando a mesma for utilizada na alimentação de animais que não possuam a capacidade de utilizar esta forma de nitrogênio. A levedura de leite de levedo e de fundo de dorna possui cerca de 80% do nitrogênio na forma de proteína, tais valores foram encontrados na literatura para outros tipos de leveduras (ROSE & HARRISON, 1970).

MATTOS et. al. (1983) alimentando fêmeas de ratos em fase de crescimento e observando que não ocorreu nenhuma alteração histológica no fígado, rins, baço e intestinos dos animais que tinham na sua dieta a levedura como única fonte proteica. Estes autores citaram o emprego de levedura obtida por leite de levedo para alimentação de ruminantes, avaliando uma série de ensaios realizados com vacas em fase de lactação. No primeiro ensaio foram estudados 12 animais da raça holandesa em início de lactação com uma média de produção de leite de 20 kg.dia⁻¹. A dieta era composta além da silagem de milho, por um concentrado que tinha como suplemento protéico o farelo de algodão, nos níveis de 0, 1, 2 e 2,4 kg de levedura. As dietas experimentais foram dadas aos animais no período de 30 dias, sendo intercaladas entre estes 30 dias uma dieta pobre de proteína. Foi observado que não houve diferença significativa no teor de proteína do leite nos animais que receberam a levedura como única fonte proteica. Após a adição de levedura seca na silagem foi observado que ocorreu maior digestibilidade da matéria seca, matéria orgânica e da proteína bruta.

No segundo ensaio também foram estudados 12 vacas em fase de lactação, só que o estudo foi em um período mais longo (21 semanas) em que houve a divisão de animais em dois grupos, metade recebia um concentrado, com 40% de levedura e a outra metade recebia 40% de silagem, em percentagem corresponde a 4 kg de levedura, durante todo período experimental. Foi observado um aumento na produção de $1,7 \text{ kg} \cdot (\text{cab} \cdot \text{dia})^{-1}$ nos animais que recebiam a levedura (15,3 kg *versus* 13,7 kg) e um aumento de 0,2 unidades percentuais no teor de gordura (3,5% *versus* 3,3%). Em ambos estudos foram analisados o balanço de nitrogênio, e observaram que é melhor utilizar o nitrogênio da levedura comparado ao nitrogênio do farelo, indicando um melhor balanceamento em aminoácidos da levedura em relação às exigências para produção do leite.

CAMPOS NETO (1996) citado por BUTOLO(1996) também fez uma avaliação do valor nutritivo da levedura seca, como suplemento alimentar para gado de corte. Os animais eram pesados no início dos experimentos e a cada 28 dias até o final dos testes, e foi observado um aumento de $250 \text{ g} \cdot (\text{cab} \cdot \text{dia})^{-1}$ de peso cabeça dia. Os autores concluíram que a proteína mineral proporciona aos animais de corte durante a seca invernal, maiores ganhos de peso em função de um maior consumo de gramas de proteína bruta por cabeça dia. E que a levedura obtida nas usinas sucro-alcooleiras é possível utilizá-la como suplemento protéico. A levedura deve ser dada aos animais após o processo de secagem, visto que a levedura no estado natural possui um elevado percentual de água e deteriora-se facilmente. A composição da levedura seca pode variar dependendo das condições durante o processo de fermentação alcoólica, principalmente em relação a proteína bruta e mineral, sendo necessário analisar o produto antes de ser usado. Os resultados destes experimentos mostram que a adição de levedura na ração das vacas em fase de lactação está ligado ao aumento da eficiência digestiva, maior porcentagem de proteína e gordura no leite e conseqüentemente maior produção. O fornecimento de levedura para vacas em fase de lactação em torno de no máximo 4kg por dia, não causou nenhum efeito patológico, não ocorrendo nem uma alteração fisiológica nos animais que participaram dos experimentos.

PÁDUA et al. (2000) estudaram a importância da parede celular de levedura *Saccharomyces sp* como fonte de fibra na alimentação, este trabalho tinha como principal objetivo estudar a influência da adição de 10 e 20% da fração parede celular de levedura (*Saccharomyces sp.*) a uma dieta hipercolesterolêmica (5% gordura de coco mais 2% de colesterol) em ratos Wistar. Utilizou-se como padrão uma dieta de caseína (AIN-93G) com 5% de celulose. Foram também utilizadas dietas hipercolesterolêmicas com 10 ou 20% de celulose, para comparação avaliando-se os índices de digestibilidade, do valor biológico e

utilização líquida aparentes da proteína, quociente de eficiência alimentar, velocidade de trânsito do conteúdo intestinal, comprimento do intestino delgado e as concentrações séricas de lipídios totais, triacilgliceróis e colesterol total. A fração parede celular, assim como a celulose provocou uma diminuição da digestibilidade da proteína e do quociente de eficiência alimentar, mas não se observou influência no valor biológico da proteína e no ganho de peso. A adição de 10 ou 20%, tanto de parede celular como de celulose promoveu aumento da velocidade de trânsito do conteúdo intestinal e aumento no comprimento do intestino delgado. A fração parede celular nas concentrações de 10% (1º ensaio) ou 20% (2º ensaio) promoveu abaixamento nos níveis de triacilgliceróis séricos, contudo não influenciou no abaixamento das concentrações de lipídios totais e de colesterol total.

Dentre as diversas aplicações da levedura seca, pode-se destacar o benefício que ela gera quando é empregada na alimentação animal, como ganho de qualidade e produtividade para o produtor (PEIXOTO, 1996). Em ruminantes: aumenta a taxa de ganho de peso, o rendimento de leite e o conteúdo de proteínas e gordura do leite. Em gado de corte: aumenta a eficiência de alimentação e ganho de peso vivo e também aumenta a digestibilidade, principalmente em termos de fibras.

Segundo FURCO (1996) os produtores de ração preferem a levedura que possua cor clara, com granulometria menor que 0,5mm. Normalmente, a mistura de levedura nas rações animais pode variar de 6 a 20 % sobre o peso final da ração.

Os maiores problemas encontrados na levedura seca são: teor de proteína abaixo de 30%; umidade acima de 10%; baixo teor protéico, bolor e empedramento são provocados devido ao excesso de umidade durante o armazenamento.

2.5 - Caracterização de Sólidos

O problema de caracterizar um sólido particulado e de prever as suas características é executado em toda as engenharias. Os Engenheiros Químicos encontram os sólidos particulados ao efetuarem muitas operações unitárias, por exemplo, na coleta de poeiras, que constituem parte de qualquer processo de obtenção de produtos sólidos, como o de fabricação de catalisadores em muitas reações químicas industrialmente importantes.

Em duas classes caem as propriedades destes sólidos: as que pertencem à partícula isolada e as que são pertinentes aos vazios existentes entre as partículas. Na primeira classe

estão a dimensão e a forma da partícula, o seu volume, a área superficial e a massa. As propriedades do material sólido retido pelas partículas também estão nesta classe. Exemplos são a condutividade térmica, a densidade do sólido, o calor específico, a dureza e a higroscopicidade. Na segunda classe, está a fração de vazios do sistema, a densidade real do agregado de sólidos e de vazios, a área superficial por unidade de volume e muitas outras características secundárias, como a permeabilidade e o ângulo de repouso. Como são evidentes, as propriedades da fase constituída pelos vazios entre as partículas sólidas dependem das propriedades das partículas, mas as propriedades da fase devem ser expressas de modo que seja levada em conta a influência de todas as partículas presentes, este é um problema fácil quando todas as partículas são idênticas, mas muito difícil quando as partículas existem numa faixa de dimensões, com uma diversidade de forma e até, em alguns casos, com diferenças de composição (CARNEIRO, 1981).

2.5.1 - Métodos de Medida de Dimensões de Partículas

O método de exprimir as dimensões das partículas depende dos dispositivos de medida adotados. O mais comum entre eles é o das peneiras padronizadas. Neste dispositivo, a fase sólida é colocada no topo de uma série de peneiras. Cada peneira tem abertura menor que a da precedente. Quando as peneiras são sacudidas, as partículas passam através delas até que seja atingida uma que tenha as aberturas muito pequenas para as partículas passarem. O tamanho das partículas coletadas em qualquer peneira é expresso como um comprimento médio apropriado entre as aberturas da peneira imediatamente anterior e a abertura da peneira coletora.

Um segundo método de medição consiste em medir realmente as partículas e efetuar um levantamento estatístico. Quando as partículas são pequenas, coloca-se uma amostra do material na lâmina de um microscópio e cada partícula é medida por meio de um micrômetro. Um terceiro método de medida de tamanho é o de separar a amostra de acordo com as velocidades de sedimentação.

Embora os três métodos de determinação das dimensões das partículas não levem a respostas idênticas, parece que não há uma fronteira muito definida entre eles. As medições são feitas pelas análises em peneiras sempre que as dimensões das partículas estão dentro das

faixas que podem ser tratadas pelas peneiras. Normalmente usam-se peneiras padronizadas da série Tyler ou da série americana.

Ao se efetuar a análise granulométrica, as peneiras são empilhadas, de modo que sobre uma peneira esteja outra de furos maiores. Sob a peneira do fundo é inserida uma bandeja cega. A amostra é colocada na peneira do topo, depois do que se adapta uma tampa à pilha, e o conjunto de peneiras é grampeado numa máquina vibratória. A ação de agitação das peneiras influencia a eficiência do ensaio das peneiras, e por isso é desejável que o movimento seja reproduzível (GOMIDE, 1980).

Através da Equação 2.1, pode-se calcular a fração retida em cada peneira e este valor é sempre igual ou menor do que 1.

$$\Delta x = \frac{m_r}{m_t} * 100 \quad (2.1)$$

em que:

Δx – fração retida, decimal;

m_r - massa retida, g;

m_t – massa total, g.

Existem na literatura diversos modelos de distribuição, neste trabalho, foi empregado o modelo de GATES-GAUDIN-SCHUMANN que é expresso por:

$$x = (D/K)^m, D \leq K \quad (2.2)$$

em que:

m - parâmetro do modelo, adimensional;

K – comprimento, m;

D - diâmetro da partícula, mm.

2.6 - Secagem

A secagem é um processo combinado de transferência de calor e massa, reduzindo a quantidade de água (MELO, 1994). Dois processos fundamentais e simultâneos ocorrem na secagem: transferência de massa na forma líquida para evaporar o líquido; transferência de massa na forma líquido ou vapor dentro do sólido e vapor na superfície. Tais processos podem ser observados baseando-se no mecanismo interno do escoamento do líquido ou pela interferência das condições externas como, temperatura, umidade, escoamento do ar (PERRY & CHILTON, 1980).

A secagem visa assegurar a conservação da levedura por meio da redução da atividade de água afim de inibir o desenvolvimento de microrganismos indesejáveis ao produto. Esta redução deve ser dada até o ponto onde não venha comprometer a qualidade nutricional do produto, ou seja, não deve desnaturar as proteínas.

2.8 - Cinética de Secagem

No processo de secagem o transporte de massa em um meio sólido é amplamente explicado através da lei de Fick expressa em termo de gradiente de umidade. Um dos primeiros estudiosos a interpretar o processo de secagem como um fenômeno difusivo foi Lewis (SHERWOOD, 1939) que também confirmou que a difusão interna de um líquido predomina nos mecanismos internos de transferência de umidade.

Segundo MARIZ (1986) o modelo difusional, foi criticado devido as discrepâncias observadas entre os valores experimentais e teóricos. A principal crítica foi àquela relacionada ao coeficiente de difusão constante (independente da temperatura e do teor de umidade) e alteração da forma e tamanho do sólido durante a secagem.

O coeficiente de difusão raramente é constante, visto que é variável com o teor de umidade e com a temperatura (PERRY & CHILTON, 1980).

A cinética de secagem está relacionada com as mudanças de umidade e temperatura em função do tempo que ocorre no produto durante o processo de secagem e através dela é possível se determinar a quantidade de água evaporada, tempo de secagem, consumo de

energia (LIMA, 2001). As mudanças da quantidade de umidade em um produto são controladas pela transferência de calor e massa (STRUMILLO & KUNDRA, 1986).

2.9 - Mecanismos de Secagem

A retirada de água de um produto, durante a secagem, ocorre através da vaporização térmica, com ar aquecido. Essa vaporização térmica acontece a uma temperatura inferior à de ebulição da água, dependendo da pressão de vapor no ar secante, temperatura e velocidade do ar secante.

- **PRESSÃO DE VAPOR DE ÁGUA** - é uma pressão parcial exercida pelo vapor d'água presente no ar. A pressão varia em função das concentrações de água contida no produto e de vapor d'água no ar. A evaporação depende da diferença entre a pressão de vapor e da água existente entre o produto e o ar. À medida que esta diferença cresce também ocorre um aumento na taxa de evaporação.
- **TEMPERATURA** - quanto maior a temperatura do ar, menor será sua umidade relativa e maior a quantidade de energia fornecida pela mesma, favorecendo uma melhor condição de secagem. Mas, altas temperaturas podem provocar alterações indesejáveis do produto comprometendo as qualidades nutricionais do mesmo.
- **VELOCIDADE DE DIFUSÃO DA ÁGUA NO PRODUTO** - de modo geral, os materiais possuem duas ou mais fases distintas de secagem: uma que ocorre a uma taxa de evaporação constante e as demais fases a taxa de evaporação é decrescente e a secagem é controlada pela difusão.
- **VELOCIDADE DO AR** - a taxa de evaporação aumenta em geral com a velocidade do ar de secagem, principalmente, na fase inicial. No período de taxa decrescente a transferência de massa está limitada pela velocidade de difusão de água do interior para a superfície do produto.

A secagem de sólidos ocorre em três períodos. O primeiro período é definido como período de aquecimento; o segundo período de secagem é a taxa constante e o terceiro é o período de taxa decrescente. Segundo HALL (1971) se a umidade inicial de um produto for menor que a crítica, todo o processo de secagem se dá no período de taxa decrescente.

Na secagem de alimentos, em muitos casos é difícil se determinar o teor de umidade crítica. Um dos empecilhos é o uso de uma velocidade de secagem que não leva em consideração a área superficial do encolhimento dos alimentos durante a secagem (CHARM, 1963).

Vários autores (PEREIRA & QUEIROZ, 1987; HALL, 1971) dizem que a razão de secagem é proporcional à diferença entre a umidade contida no material e a umidade de equilíbrio do produto (Equação 2.3).

$$\frac{dX}{dt} = -K(X - X_0) \quad (2.3)$$

em que:

K - constante que depende do modelo;

t - tempo, minutos;

X - umidade, bs.;

X₀ - umidade inicial, bs.

2.6.3 - Período de Secagem a Taxa Constante

A taxa de secagem a período constante é calculada empregando a equação de transferência de massa ou a equação de transferência de calor. Visto que a superfície do material está úmida e a temperatura do mesmo ser igual a temperatura de bulbo úmido do ar de secagem quando se despreza a transferência de calor por condução e a radiação, daí a taxa de secagem é representada por:

$$W_s * \frac{dX}{dt} = k * A * (U_s - U_a) = K_p * A(P_s - P_a) \quad (2.3)$$

em que:

dX/dt - taxa de secagem, adimensional;

h - coeficiente de transferência de massa ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$);

A - área da superfície exposta, cm^2 ;

U_s - umidade de saturação do ar ambiente a temperatura de bulbo úmido, $^\circ\text{C}$;

U_a - umidade do ar ambiente, $\text{kg H}_2\text{O} \cdot (\text{kg ar seco})^{-1}$.

Para se determinar o coeficiente de transferência de calor

$$\lambda \cdot w = h \cdot A \cdot (T_h - T_o) \quad (2.4)$$

em que:

λ - calor latente de vaporização da água na T_o , $\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$;

T_h - temperatura de bulbo úmido, $^\circ\text{C}$;

T_o - temperatura da estufa, $^\circ\text{C}$.

A velocidade de secagem durante o período de taxa constante depende de três fatores: dos coeficientes de transporte de energia e massa; da área da superfície onde ocorre a troca de calor e massa e da diferença entre as temperaturas ou das pressões de vapor do ar que envolve o produto e da superfície do produto. O mecanismo interno de migração de água não influencia a velocidade de secagem durante o período de taxa constante (FORTES & OKOS, 1980).

2.6.4 - Período de secagem a Taxa Decrescente

O primeiro período da taxa decrescente é onde ocorre a desidratação da superfície insaturada. Para se determinar o tempo médio de secagem nesta fase do período a taxa decrescente é empregado a lei de Fick.

2.6.4.1 - Modelo Difusional

Através de modelos matemáticos que considerem como mecanismo principal a difusão de acordo com a segunda lei de Fick é possível determinar a evaporação de água durante a secagem de um sólido.

Quando a lei de Fick é aplicada a um sistema unidimensional e homogêneo, é dado através da equação (CRANK, 1975).

$$\frac{\partial X}{\partial t} = D \frac{\partial^2 X}{L^2} \quad (2.5)$$

A solução da Equação do modelo difusional para placas planas e considerando que não há qualquer tipo de resistência externa (assim sendo, a umidade na superfície é a umidade de equilíbrio com o ar de secagem) é dada por:

$$\frac{X - X_e}{X_i - X_e} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n-1)^2} \exp\left(- (2n-1)^2 \frac{\pi^2 D^* t}{L^2}\right) \quad (2.6)$$

Considerando na Equação 2.6 que o coeficiente de difusão e a espessura da amostra são constante durante o processo de secagem. Utilizando a lei de Fick para tempos muito longos, a equação anterior foi simplificada para o primeiro termo da série assumindo a seguinte forma:

$$\frac{X - X_e}{X_0 - X_e} = \frac{8}{\pi^2} \exp\left(- \frac{\pi^2 D}{L^2} t\right) \quad (2.7)$$

em que:

X – umidade do sólido no tempo t , $g \cdot g^{-1}$, (b.s);

X_e – umidade de equilíbrio do sólido, $g \cdot g^{-1}$, (b.s);

D – difusividade, $m.s^{-2}$;

t – tempo, s;

L – espessura, m;

X_0 – umidade no início do período de taxa decrescente.

O coeficiente de difusão (D) pode ser obtido através da inclinação das linhas de uma reta, $\ln \frac{(X - X_e)}{X_c - X_e}$ em função do tempo.

A partir dos valores de D pode-se fazer um estudo quantitativo das características de secagem em relação às variáveis do planejamento experimental que são controladas, velocidade do ar e temperatura.

Segundo LIMA (2001) a taxa decrescente de diferentes produtos, pode ser explicada através do encolhimento e endurecimento superficial e propuseram modelos matemáticos que consideram esses fenômenos. Neste trabalho com levedura também não foi considerado o efeito encolhimento.

2.7 - Secagem de Levedura

O processo de secagem é de fundamental importância nas operações da biotecnologia, devido à alta sensibilidade dos produtos microbiológicos às condições ambientes.

De acordo com TAEYMANS e LENGES (1983) a secagem de uma biomassa formada por células microbianas é empregada para, deixar a biomassa em condições físicas atraentes e de maneira que facilite a estocagem, o transporte e a comercialização, bem como impedir o crescimento de microrganismos e maior parte das reações enzimáticas e químicas de degradação.

GRABOWSKI et al. (1997) estudaram a secagem e a viabilidade de leveduras de padeiro, em leite fluidizado e leite de jorro. Os experimentos de secagem foram realizados nas seguintes temperaturas de ar secante: 40, 50 e 60 °C, com uma altura inicial do leito de 10, 20 e 30cm, verificando a perda de peso e a viabilidade da célula a cada 3 minutos. Mediante os resultados obtidos os autores concluíram que a secagem de levedura deve começar e

continuar o processo em leito de jorro até que os grânulos alcancem 35% de umidade e continuar o processo em leito fluidizado para reduzir a demanda de ar quente. Observaram que para secagem de grânulos com classificação D segundo Geldart, quando secos em leito de jorro e depois em leito fluidizado aumenta a vida útil da levedura.

QUADRI et al. (1996) estudaram o processo de secagem e inativação de leveduras *S. cerevisiae* utilizando estufa com circulação forçada de ar. Estabeleceram diferentes faixas de temperaturas (55, 65, 75, 90 e 120⁰C) associando as mesmas à atividade fermentativa. Concluíram que no processo de secagem e inativação não deve ultrapassar a temperatura de 75 °C e deve-se trabalhar em um curto espaço de tempo. Os autores não constataram perdas dos valores nutricionais, isto em tempo curto do processo, mais verificaram alterações indesejáveis na aparência, odor e estrutura, ocorrendo um decréscimo de solubilidade e de capacidade de reidratação. Tais alterações podem comprometer a comercialização do produto. A partir destes resultados sugerem novos estudos sobre o processo de secagem e verificação de alteração das propriedades.

RHEINBOLDT et al. (1987) estudaram a sangria e a secagem de levedura com o objetivo de recuperar levedura na fermentação alcoólica, fazendo o balanço de levedura em uma destilaria na produção de biomassa e da sangria potencial sem que ocorresse a queda do rendimento fermentativo, e a manutenção da estabilidade do processo. O processo foi dividido em quatro partes: recuperação de etanol, desaguamento mecânico, termólise e secagem por secador do tipo leito fluidizado horizontal. Os autores concluíram que durante o processo ocorreram reduções significativas nos custos operacionais. A rede de secadores foi substituída por apenas um secador, com maior eficiência térmica, com regulagem estável e pouca manutenção, obtendo assim uma excelente qualidade. O processo de secagem de levedura através do processo CTC possui taxas de retornos internos favoráveis até 40% e rentabilidade maior do que a de outros processos que eram usados anteriormente. Sugerem que o mercado de levedura seca seja ampliado a fim de maior aproveitamento deste subproduto.

2.8 - Aplicações da Psicrometria a Secagem

Na maioria dos processos de secagem a água é o líquido evaporado e o ar é usado como gás de purga. A psicrometria trata da determinação das propriedades de mistura de gás e vapor. O sistema ar vapor de água é o mais encontrado.

Os princípios utilizados para a determinação das propriedades do sistema- ar-vapor de água são os mesmos para outros sistemas, como uma exceção pertinente. Enquanto a razão psicrométrica (razão entre o coeficiente de transferência de calor e o produto do coeficiente de massa pelo calor úmido) pode ser tomada igual à unidade, onde para outros sistemas em geral a razão é diferente deste valor. Esta diferença faz com que a temperatura de saturação adiabática seja diferente da temperatura de bulbo úmido.

Através do diagrama das cartas psicrométricas determina-se as propriedades físicas do ar para ser utilizadas nas equações de transferência de calor e massa. Atualmente existem vários programas comerciais que permitem a determinação das propriedades psicrométricas. Neste trabalho foi utilizado o Programa computacional Winmetrix 2000.

2.9 - Atividade de Água

A atividade de água (a_w) é o parâmetro que indica a disponibilidade de água para o crescimento microbiano (deteriorantes ou não) e para o surgimento de reações deteriorantes e indesejáveis, entre tais reações pode-se citar: o escurecimento; a oxidação e a hidrólise (VITTALI, 1987).

Um número significativo de alimentos tradicionais, conservados através da redução da atividade de água, são desidratados, e possuem faixa de a_w consideravelmente baixa ($a_w < 0,60$).

Segundo TREYBALL (1994) a quantidade de umidade de equilíbrio é um fator de relevante importância para o processo de secagem, visto que representa o valor limite para uma determinada condição de umidade relativa e temperatura. Assim, pode-se definir a umidade de equilíbrio como sendo o conteúdo de umidade que este apresenta quando a

pressão de vapor de água em sua superfície é igual a pressão de vapor de água no ar que o envolve.

De acordo com LABUZA et al. (1972), TEXEIRA NETO & QUAST (1997) a relação existente entre a água e outros compostos de um produto determinado a sua higroscopicidade e torna-se uma característica essencial que possui influencia nas diversas etapas do processamento, armazenamento e consumo de materiais biológicos. Mediante a estes estudos os autores concluíram que a maior ou menor intensidade com que a água se liga ao alimento pode ser definida como a atividade de água.

$$a_w = \frac{P}{P_0} \quad (2.8)$$

em que:

P - pressão parcial de vapor da água de um produto, mm Hg;

P₀ - pressão de vapor da água pura a mesma temperatura T, mm Hg;

a_w = atividade de água.

A atividade de água de uma forma quantitativa é representada como sendo proporcional à umidade relativa do ar em equilíbrio com o produto (Equação 2.9).

$$a_w = \frac{UR}{100} \quad (2.9)$$

em que:

a_w - atividade de água;

UR - umidade relativa, %.

A atividade de água é uma propriedade fundamental para a conservação e armazenamento de um alimento sendo um parâmetro muito mais importante que o pH, teor de umidade e outras propriedades estudadas nos alimentos. Ela não é só função do conteúdo de água, é também função das substâncias as quais exercem o efeito de ligação de água na estrutura do alimento. Desta forma alimentos que possuem em sua estrutura a mesma quantidade de umidade podem deste modo, ter diferentes atividade de água dependendo, do seu conteúdo de água ligando substâncias a sua estrutura (HEIDELBAUG & KAREL, 1975).

CHEFTEL (1988) estudando atividade de água em microorganismos verificou que: os microrganismos não se desenvolvem para $a_w < 0,8$; a maior parte das enzimas se mostram inativas para $a_w < 0,8$; o escurecimento não enzimático dos açúcares redutores em presença de grupos aminas, apresentam no máximo para $a_w \cong 0.6$ à 0.7 ; a oxidação dos lipídios é estimulada à atividade de água muito baixa. Diante deste estudo e conclusões do autor é possível dizer que o estado de conservação ideal para produtos biológicos, sem aditivos e refrigeração., esta na faixa de a_w entre $0,25$ e $0,35$

2.10 - Isoterma de Equilíbrio Higroscópico

Isotermas são representações gráficas ou analíticas da dependência da atividade de água e o teor de umidade de um produto alimentício a temperatura e pressão definidas, e são determinadas experimentalmente.

Podem ser classificadas em isotermas de adsorção e dessorção, de acordo com a determinação da umidade do produto, seja durante o processo de umedecimento ou de secagem.

As isotermas de dessorção de umidade em um alimento dão informações indispensáveis ao desenvolvimento do processo como por exemplo a concentração e a desidratação. É através da isoterma que se determina o valor da monocamada de água ligada ao alimento. Segundo SANTINI (1996) não se deve retirar água em quantidade inferior a monocamada, visto que este é o limite abaixo do qual se inicia as reações químicas indesejáveis no produto, além de ser nesta região onde irá ocorrer um desperdício maior de energia para a retirada da água residual do produto.

2.11 - Descrição das Isotermas

Os modelos matemáticos que representam as isotermas de dessorção são de fundamental importância, visto que através de um certo número de pontos experimentais é possível ajustar uma isoterma e assim fazer a correspondência entre teor de umidade do

produto analisado X (bs) e atividade de água (a_w) sendo possível fazer extrapolações de valores de difícil determinação experimental.

Existem vários modelos propostos na literatura, entre eles pode-se citar: BET, GAB e HENDERSON.

A equação de BET é o modelo mais usado, fornecendo um bom ajuste dos dados para uma grande variedade de alimentos que possuam uma atividade de água na região entre 0,05 à 0,45 de atividade de água, sendo representada pela equação 2.10.

$$\frac{a_w}{(1-a_w)X} = \frac{1}{X_m C} + \frac{C-1}{X_m C} a_w \quad (2.10)$$

em que:

a_w - atividade de água;

X_m - conteúdo de umidade na monocamada;

C - constante do modelo.

A equação de GAB (Guggenheim-Anderson-de Boer) com três parâmetros é um melhoramento das teorias de BET e Langmuir e tem sido sugerida por diversos estudiosos (SCHAR e RUERG, 1984; LOMAURO et al., 1984; BIZOT, 1985). A equação é expressa como:

$$\frac{X}{X_m} = \frac{C * K * a_w}{(1 - k * a_w)(1 - K * a_w + C * k * a_w)} \quad (2.11)$$

em que:

C - constante do modelo;

K - fator de correção com respeito ao volume de líquido.

Este modelo apresenta uma boa descrição para uma grande variedade de isotermas de alimentos na faixa de atividade de água de 0 a 0,90. Os parâmetros determinados através da equação de GAB podem ser obtidas diretamente através da regressão não-linear.

O modelo de HENDERSON é expresso através da equação:

$$1 - a_w = \exp(B_2 X^{B_1}) \quad (2.12)$$

em que:

a_w - atividade de água;

B_1 e B_2 - constantes do modelo;

X - umidade, bs.

2.12 - Planejamento e Otimização de Experimentos

O planejamento é uma importante ferramenta para se realizar o estudo de variáveis, podendo ser definido como uma especificação detalhada das operações experimentais que devem ser executadas ordenadamente.

A primeira etapa a ser executada, durante um planejamento, é determinar quais serão os fatores e as respostas de interesse para o sistema em estudo. Estes fatores, isto é, às variáveis controladas pelo experimentador, podem ser tanto qualitativos como quantitativos. A segunda etapa é definir claramente qual objetivo almejado com os experimentos, porque isso determinará que tipo de planejamento deve ser utilizado (BARROS NETO et al., 1995).

Uma das vantagens do planejamento é ser possível fazer um agrupamento das variáveis, diminuindo significativamente o número delas em estudo ou o número de variáveis de cada nível. Podendo desta maneira ser reduzido significativamente a quantidade de experimentos a ser realizados. Desta maneira, as técnicas de planejamento de experimentos podem ser aplicadas com o mínimo de tempo e custos e com a ferramenta estatística estabelecer níveis de confiança dos resultados (BOX et al., 1978).

Em processos industriais, de desenvolvimento e de pesquisa, é muito comum a existência de vários fatores ou variáveis que afetam a qualidade global do produto final. A tarefa de otimização pode ser prolongada e dispendiosa se uma ferramenta adequada não for utilizada. A metodologia de planejamento experimental e análise de superfície de resposta vem sendo considerada como uma ferramenta eficaz e imprescindível para o desenvolvimento de processos, principalmente quando um grande número de variáveis está envolvido.

O avanço da informática e o uso rotineiro de micro-computadores viabilizaram o uso de softwares de última geração, exigindo do usuário somente conhecimentos básicos de informática e estatística para interpretação dos resultados.

Ao profissional cabe, então, investir mais tempo na compreensão do processo, definindo as variáveis relevantes a serem estudadas (temperatura, velocidade, tempo de reação, concentrações, etc.) e as respostas desejadas (consistência, sabor, cor, aroma, pureza, rendimento, produtividade, etc.). Assim, é possível otimizar as condições de processo, maximizando rendimentos, produtividade e viabilidade comercial, minimizando custos, ou mesmo conduzindo o processo à obtenção de um produto com as especificações desejadas,

com o uso da metodologia de planejamento experimental e análise de superfície de resposta, obtendo resultados com altos índices de confiabilidades.

CAPÍTULO III

3 - MATERIAIS E MÉTODOS

O desenvolvimento experimental do projeto foi realizado no Laboratório de Transferência em Meios Porosos e Sistemas Particulado e Laboratório de Armazenamento e Processamento de Produtos Agrícolas (DEQ/DEAg), ambos da Universidade Federal da Paraíba.

O trabalho consistiu em levantar as curvas de isotermas nas temperaturas de 30, 40 e 45 °C, as curvas de cinética de secagem em estufa com circulação de ar nas temperaturas de 34, 40, 55, 70 e 76 °C da levedura *S. Cerevisea*, para utilização das leveduras na ração animal.

Para avaliar a qualidade final do produto foram analisados granulometria e teor de proteínas.

3.1 - Material Utilizado

3.1.1 - Levedura

O microorganismo utilizado neste estudo foi a levedura do gênero *Saccharomyces cerevisiae*, ativa do tipo comercial (marca Fleischmann). Sua umidade inicial foi de 69%.

Para determinação das curvas de secagem foi utilizado estufa com circulação forçada de ar (MA-035).

3.2 - Atividade de Água (a_w)

As amostras eram pesadas em células plásticas aproximadamente 8,0g utilizando balança analítica com precisão de 0,0001g e levadas à estufa com circulação forçada de ar, na

temperatura de 60 °C por um período de 2 horas. Após este tempo era feita a primeira leitura da atividade de água (a_w) por medida direta no Novasina e posteriormente, pesava-se a amostra e a colocava na estufa. Procedendo-se leituras em tempos de 30 e 60 minutos. Este processo se repetia até que a última leitura no aparelho fosse igual ou maior do que o penúltimo.

Para o levantamento dos dados experimentais das isotermas de desorção de levedura seca, foi utilizado o aparelho Thermoconstanter Novasina (TH-200), o qual é um equipamento específico para se determinar a atividade de água com temperatura controlada.

Neste equipamento a temperatura da câmara é regulada por meio de um controlador localizado no painel frontal do Novasina, que serve para fixar o valor da temperatura ajustada, com variações inferiores a 0,2 °C em toda escala de trabalho nas faixas de temperatura de 0 à 50 °C. A câmara de medição junto com o regulador de temperatura, formam uma pequena câmara climática.

A cabeça de medição contém um sensor de umidade e temperatura. O BSK Novasina é o sensor que mede a umidade de equilíbrio e temperatura de pequenas amostras que neste trabalho foi de aproximadamente 8,0g, que apresenta-se na forma de sólidos. Este equipamento possui um transmissor RTD-20, que converte os sinais da célula plástica de medição. Os valores medidos de UR (a_w) e de temperatura, podem ser lidos diretamente no mostrador frontal do mesmo.

3.3 – Parâmetros Físico-químicos

O teor de umidade das amostras foi determinado através do método gravimétrico com a utilização de balança analítica com precisão de 0,0001g. As amostras de leveduras foram previamente pesadas (100g) e secas em estufa a 105 ± 2 °C por 24 horas (AOAC, 1984).

A umidade inicial foi calculada em base úmida e base seca, respectivamente, de acordo com as equações abaixo:

$$X_i = \frac{W_i - W_s}{W_i} \quad (3.13)$$

$$X_i = \frac{W_i - W_s}{W_s} \quad (3.14)$$

em que:

X_i - umidade inicial;

W_i = massa, g;

W_s = massa seca, g.

A umidade inicial em base seca foi obtida para que se pudesse calcular a umidade da amostra em função do tempo de secagem.

A velocidade do ar foi determinada utilizando-se um anemômetro digital, Lutron modelo AM-4201. A umidade relativa, em porcentagem, foi determinada através do Humidimetro-termo digital, Lutron, modelo HT-3003.

Com o objetivo de definir um modelo de ajuste para a construção das isotermas de dessecção, foram utilizados o programa computacional Origin versão 5.0. O critério utilizado para a escolha do melhor ajuste foi o coeficiente de regressão (R) conforme BARROS NETO et al. (1995).

A granulometria foi determinada mediante peneiras padronizadas. A amostra (100g) era colocada na peneira do topo, depois da qual se adaptou uma tampa, e o conjunto de peneiras era grampeado numa máquina vibratória. A ação de agitação era de cinco minutos na intensidade máxima. Decorrido este tempo, o material era retirado, pesando-se a massa retida em cada peneira específica. A classificação dos grânulos de levedura foi determinado utilizando peneiras padronizadas em 12 polegadas e diâmetro mínimo de 6, 12, 60 e 80 milímetros e calculava-se então a granulometria através da Equação 3.15.

$$\Delta x = \frac{m_i}{m_t} * 100 \quad (3.15)$$

Onde:

Δx – fração retida, decimal;

m_i - massa retida, g;

m_t – massa total, g.

O teor de proteínas totais foi obtido através da determinação de nitrogênio total. O método empregado foi o Método de Kjeldahl (AOAC, 1984) utilizando as diluições recomendadas por EVANGELISTA (1998).

A porcentagem de nitrogênio na amostra é calculado pela equação:

$$\%N = \frac{V * f * 0,0014 * 100}{m} \quad (3.16)$$

Sendo a proteína bruta expressa por:

$$\% N * 6,25 = \% \text{ Proteína Bruta} \quad (3.17)$$

em que:

V - volume real de HCl, ml;

f - fator de correlação calculado para o HCl;

m - massa da amostra, g.

O fator de correlação para o HCl é feita através da titulação com carbonato de sódio anidro (Na_2CO_3) e deve estar próximo da unidade. Utilizamos um fator de 0,987.

O fator de conversão 6,25 é empregado para transformar a porcentagem de nitrogênio em proteína. Para tanto, a literatura considera que as proteínas possuem uma porcentagem de nitrogênio em torno de 16%.

O valor de 0,0014 é um fator de devido ao fato de que 1ml de ácido 0,1N titula 1,401mg N (PELLET & YOUNG, 1978).

3.4 – Obtenção das Curvas de Cinética de Secagem

Para obtenção das curvas de cinética de secagem de levedura foi empregado vários equipamentos, como: balança analítica; Anemômetro Digital; Humidímetro-termo digital e estufa com circulação forçada de ar.

A estufa possui três níveis de prateleiras, com orifícios laterais, onde é possível controlar a velocidade do ar. Em cada compartimento de prateleira existe uma velocidade podendo variar de 0 até $0,9\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$. O controle da vazão do ar é manual abrindo ou fechando a passagem de entrada lateral e superior do ar.

As etapas para o processo de secagem foram realizadas da seguinte forma: pesou-se a mostra; ajustou-se a vazão de ar e temperatura de secagem desejada de acordo com o delineamento experimental; as amostras foram colocadas em placas de Petri; a umidade

relativa do ar de secagem era medida no início e no final do processo; bem como foram prefixados os tempos de cinco minutos até obtenção de peso constante.

3.5 - Planejamento Experimental

Com o objetivo de obter uma boa informação sobre a influência das variáveis no estudo da cinética de secagem de levedura com o mínimo de experimentos, optou-se por empregar um planejamento fatorial 2^2 + configuração estrela, sendo 4 ensaios para o modelo linear, mais 3 ensaios no nível central, com o objetivo de permitir uma estimativa da variabilidade em função do erro experimental e mais 4 para o modelo quadrático, totalizando desta forma 11 experimentos. É de vital importância o senso crítico científico e o conhecimento profundo do processo em estudo, para escolha das variáveis de entrada e as respostas adequadas, bem como o estabelecimento dos níveis adequados das variáveis controladas (BOX et al., 1978).

As variáveis de *entrada* estudadas foram a velocidade do ar e temperatura e a *resposta* o teor de proteína.

A Tabela 3.1 apresenta os valores reais e os níveis codificados das variáveis de entrada. Na Tabela 3.2 encontram-se os valores que representam a matriz do planejamento experimental.

Tabela 3.1 - Níveis da variável velocidade do ar do Planejamento Experimental Fatorial 2^2 + configuração estrela

Variável	Níveis				
	$-\sqrt{2}$	-1	0	+1	$+\sqrt{2}$
V_{ar} (m.s ⁻¹)	0,1	0,2	0,4	0,6	0,7
T (°C)	34	40	55	70	76

Tabela 3.2 - Matriz de Planejamento Experimental Fatorial 2^2 + configuração estrela

Experimentos	T (°C)	V _{ar} (m.s ⁻¹)
1	-1	-1
2	+1	-1
3	-1	+1
4	+1	+1
5	0	0
6	0	0
7	0	0
8	$-\sqrt{2}$	0
9	0	$+\sqrt{2}$
10	$+\sqrt{2}$	0
11	0	$-\sqrt{2}$

CAPÍTULO IV

4 - RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados os resultados do levantamento das isotermas de dessorção, que mostram a relação entre a quantidade de água adsorvida na amostra de levedura *S. cerevisiae* e a umidade relativa do ar em equilíbrio com a mesma. A cinética de secagem nas diversas condições de operação estabelecidos no planejamento e o teor de proteínas.

4.1 - Isotermas de Equilíbrio Higroscópico

A umidade contida em uma amostra é importante não só para o processo mas também para a estabilidade e para determinar o valor da monocamada de água ligada a amostra. Estes valores são conseguidos levantando as isotermas de dessorção.

As tabelas do Apêndice B (1B a 7B) em anexo, mostram os valores da umidade inicial, da massa seca, a atividade de água (a_w) e a umidade na base seca $X_{(bs)}$ à temperatura de 30, 40 e 45 °C incluindo as repetições. Na Figura 4.1 são apresentados os resultados experimentais das isotermas nas três temperaturas estudadas.

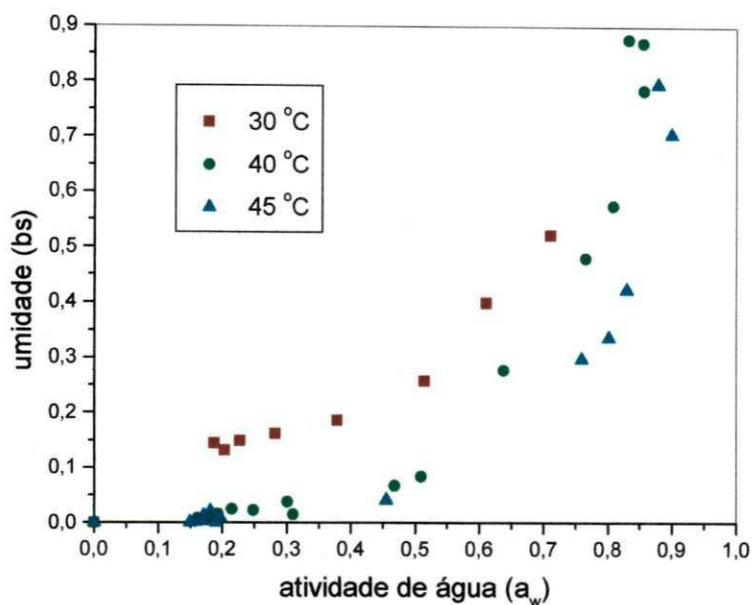


Figura 4.1 – Isotermas para as temperaturas de 30, 40 e 45 °C para levedura comercial seca.

Através dos dados da Figura 4.1 é possível observar que a curva de 30 °C ficou acima das demais, fato esse verificado por vários autores que estudaram isotermas (LABUZA et al., 1972; TEIXEIRA NETO & QUAST, 1997). As isotermas apresentam a forma característica de equilíbrio de material higroscópico. Observa-se também em qualquer ponto uma boa reprodutibilidade, já que os pontos correspondentes às repetições alinham-se ao longo da mesma curva.

Na Tabela 4.1 encontram-se os valores das constantes de Henderson, obtidos mediante ajuste das curvas nas temperaturas estudadas.

Tabela 4.1 – Constantes do Modelo de Henderson para às temperaturas 30, 40 e 50°C

T (°C)	B ₁	B ₂	R
30	1,079	- 2,61	0,984
40	0,783	- 2,16	0,971
45	0,845	- 4,14	0,972

Através dos dados da Tabela 4.1 observa-se que a medida que aumentamos a temperatura os valores das constantes B₁ e B₂ vão diminuindo com a temperatura à 45 °C que tem um valor negativo maior do que os valores encontrados para as faixas de 30 e 40 °C. A diminuição do valor das constantes de Henderson em função da temperatura indica que um

maior fornecimento de temperatura ao processo permite que o teor de água de equilíbrio seja menor, favorecendo assim a secagem. O ajuste foi razoável com coeficiente de correlação acima de 0,97.

Observa-se que o modelo de BET por ser biparamétrico restringe o ajuste dos dados experimentais, bem como, a atividade de água possuir valores maiores que 0,5 como relatos por PARK & NOGUEIRA (1992).

A Tabela 4.2 apresenta, os valores dos coeficientes de BET ajustados nas faixas de temperatura estudada.

Tabela 4.2 - Constantes do Modelo de BET para às temperaturas 30, 40 e 50°C

T (°C)	R	C _{BET}	X _m
30	0,976	8,5	0,154
40	-0,706	0,075	0,526
45	-	-	-

Os valores da Tabela 4.2 representam as constantes para o modelo de BET ajustados para cada uma das temperaturas estudadas. Como se observa na tabela 4.2, tanto a umidade de monocamada X_m com a constante C de BET dependem da temperatura. Devido à baixa qualidade do ajuste e o fato de apenas terem sido determinadas as isotermas a três temperaturas, não foi possível estimar o calor isostérico de sorção bem como outras interpretações termodinâmicas dos resultados obtidos. O modelo de BET não se ajustou à temperatura de 45° C.

A Tabela 4.3 apresenta os valores dos coeficientes de GAB ajustados nas faixas de temperatura estudada.

Tabela 4.3 - Constantes do Modelo de GAB para às temperaturas 30, 40 e 50°C

T (°C)	R	C	X	K
30	0,993	14,708	0,149	1,021
40	0,966	66,606	0,013	1,663
45	0,976	1918628	0,022	1,078

Como observado na Tabela 4.3 os coeficientes de correlação indicam um melhor ajuste de GAB que BET, devido à introdução de um parâmetro a mais, a constante K. Entretanto, o modelo de Henderson, apesar de mais simples, mostrou-se também satisfatório para a representação das isotermas no intervalo de temperaturas estudadas. A constante C de modelo de GAB aumenta, enquanto a umidade da monocamada diminui com o aumento da temperatura. A constante K não apresentou uma tendência definida sendo menos influenciada pela temperatura.

4.2 - Cinética de Secagem

Os resultados obtidos nas cinéticas de secagem de leveduras em estufa com circulação forçada de ar, serão discutidos a seguir.

Resultados típicos são mostrados nas Figuras 4.2 à 4.7 onde se representa o teor de umidade em função do tempo, e suas derivadas para algumas das condições de temperatura e velocidade utilizadas. Outros resultados são mostrados no apêndice A.

As curvas obtidas experimentalmente possuem comportamento semelhante às curvas citadas por alguns autores (SANTINI, 1996 e LIMA, 2001) que estudaram a secagem de produtos em estufa com circulação com elevada umidade inicial. É possível observar que no início da secagem a perda da quantidade de umidade é rápida tornando-se mais lenta ao fim do processo. O tempo final do processo varia e depende da faixa de temperatura e velocidade do ar. Também, de acordo com as figuras, foram observadas na secagem de levedura os períodos da secagem: período de pré-aquecimento, período de secagem à taxa constante e decrescente.

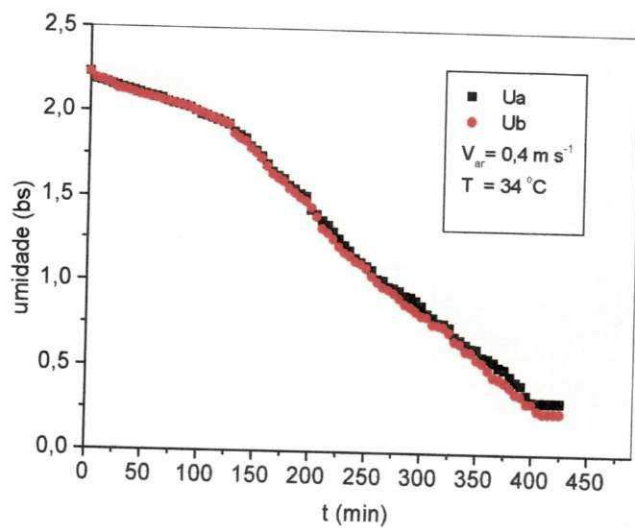


Figura 4.2 - Curva de secagem à $34 \text{ }^\circ\text{C}$ e $0,4 \text{ m.s}^{-1}$.

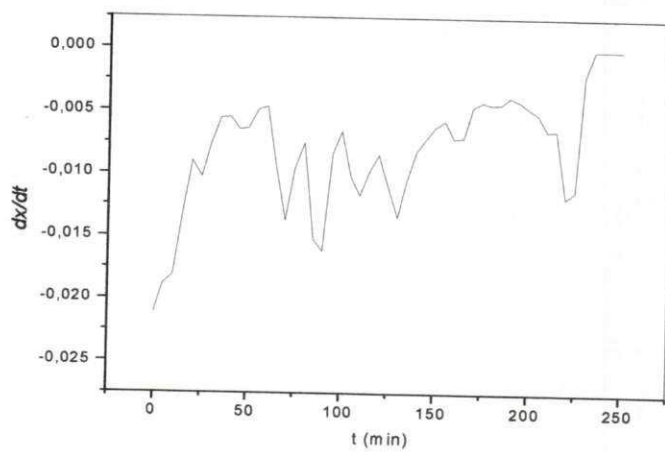


Figura 4.3 - Curva da derivada dx/dt à $34 \text{ }^\circ\text{C}$ e $0,4 \text{ m.s}^{-1}$.

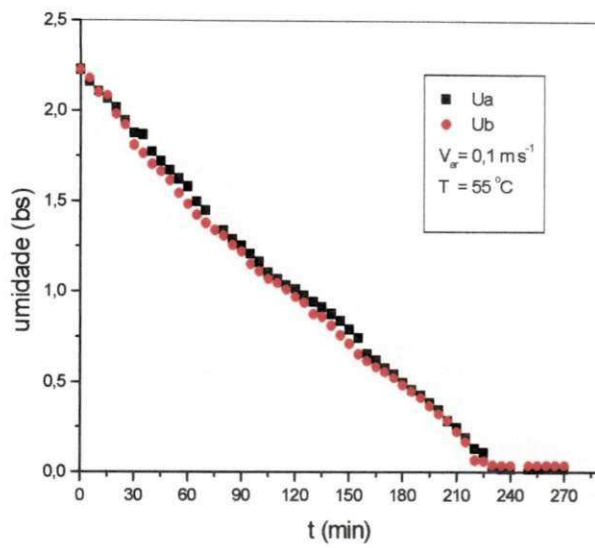


Figura 4.4 - Curvas de secagem à $55 \text{ }^\circ\text{C}$ e $0,1 \text{ m.s}^{-1}$.

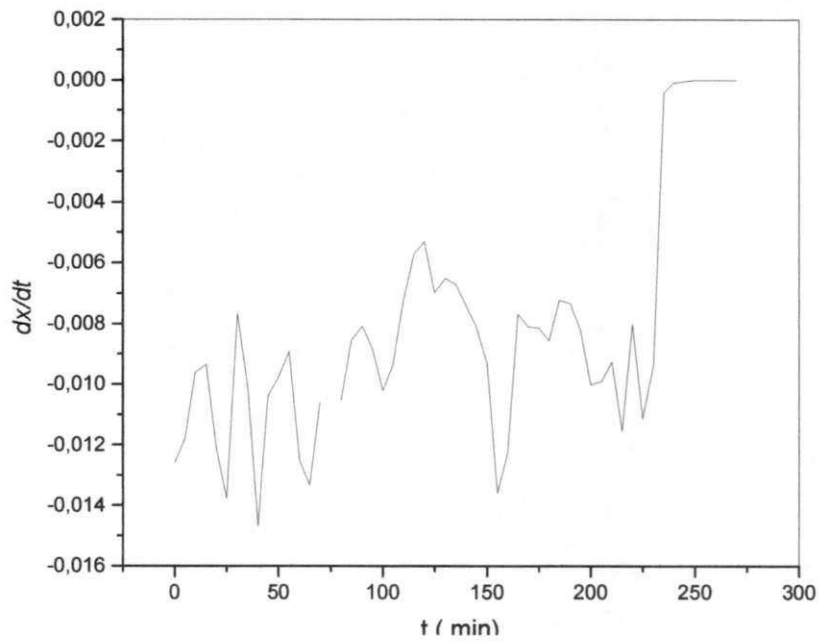


Figura 4.5 - Curva da derivada dx/dt à $55 \text{ }^\circ\text{C}$ e $0,1 \text{ m.s}^{-1}$.

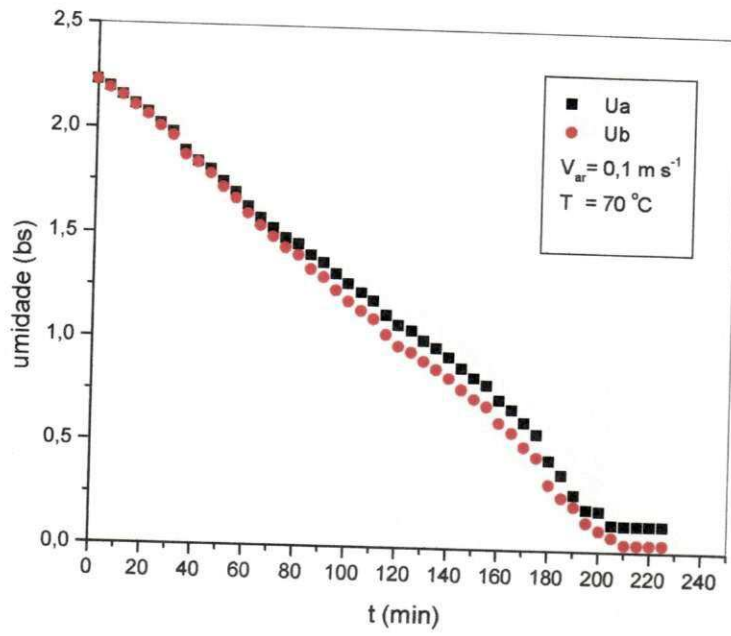


Figura 4.6 - Curva de secagem à $70 \text{ }^\circ\text{C}$ e $0,1 \text{ m.s}^{-1}$.

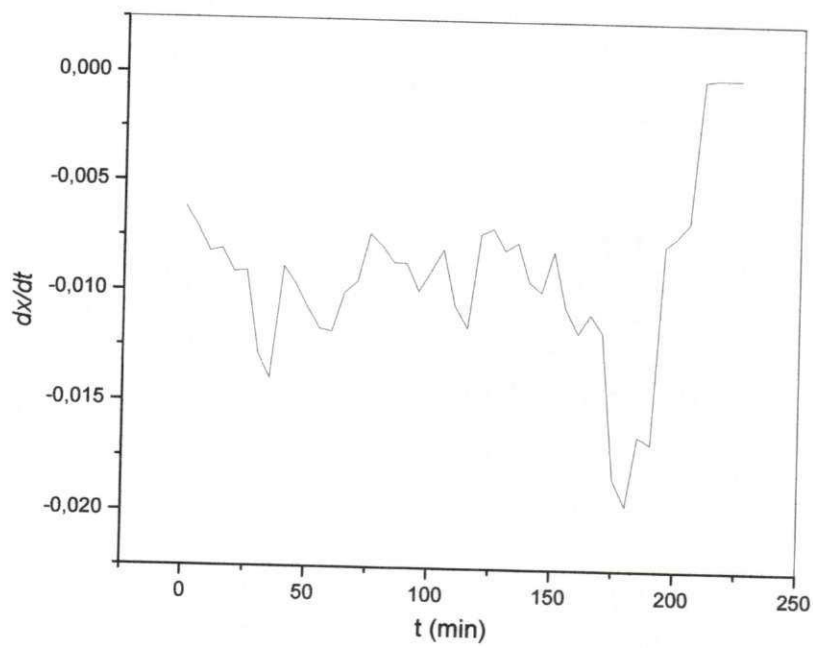


Figura 4.7 - Curva da derivada dx/dt à $70 \text{ }^\circ\text{C}$ e $0,1 \text{ m.s}^{-1}$.

4.2.1 – Período de Secagem à Taxa Constante

Através das curvas de secagem foi possível identificar o período de taxa constante, a umidade crítica e a umidade de equilíbrio. Foram construídos gráficos de umidade em função de tempo, para o citado período. Mediante o ajuste linear dos dados experimentais, foi calculado a taxa de evaporação no período de taxa constante, dada através do coeficiente angular da reta. Nas Figuras 4.8 à 4.18 são mostrados as retas ajustadas com os dados experimentais. Todos os dados experimentais apresentaram coeficientes de correlação superiores a 0,99.

Na Tabela 4.4 são apresentados os resultados obtidos, umidade crítica, umidade de equilíbrio e taxa de evaporação nas diversas condições de operação utilizados na secagem em estufa com circulação de ar. Os tempos totais de secagem também são apresentados.

Como se observa na Tabela 4.4 a umidade crítica variou entre 0,80 e 2,04, sendo que em geral diminui com o aumento da temperatura. O efeito velocidade é menos significativo, não apresentando tendência definida. A transição do período de taxa constante para o período de taxa decrescente ocorre a umidades menores, devido provavelmente a secagem ser mais rápida, nas temperaturas mais elevadas. Com relação ao tempo de secagem, como esperado é menor quanto maior for a temperatura e velocidade do ar. Este fato tem implicações diretas sobre a degradação das proteínas, como será discutido mais adiante.

As umidades de equilíbrio dinâmico, obtidos a partir das curvas de secagem são consistentes com as isotermas determinadas pelo método estático apresentadas no início do capítulo é como esperado diminuindo em geral com a temperatura, embora, naturalmente, dependam também de umidade relativa do ar.

Tabela 4.4 - Dados da umidade de equilíbrio, umidade crítica e taxa de evaporação no período de taxa constante

Amostras	t (min)	T (°C)	V_{ar} (ms^{-1})	X_c (bs)	X_c (bs)	dX/dt
A	430	34	0,4	0,308	2,043	0,036
B				0,245		0,035
A	260	40	0,2	0,202	1,444	0,041
B				0,203		0,043
A	235	40	0,6	0,187	1,510	0,040
B				0,187		0,037
A	270	55	0,1	0,014	1,251	0,037
B				0,035		0,036
A	250	55	0,4	0,007	1,901	0,178
B				0,007		0,196
A	250	55	0,4	0,101	1,788	0,387
B				0,091		0,391
A	250	55	0,4	0,015	1,251	0,241
B				0,035		0,248
A	250	55	0,4	0,038	0,805	0,238
B				0,046		0,239
A	170	55	0,7	0,013	0,868	0,253
B				0,013		0,270
A	225	70	0,1	0,126	1,276	0,155
B				0,036		0,190
A	180	70	0,6	0,009	0,877	0,232
B				0,009		0,233
A	165	76	0,4	0,009	0,877	0,224
B				0,009		0,234

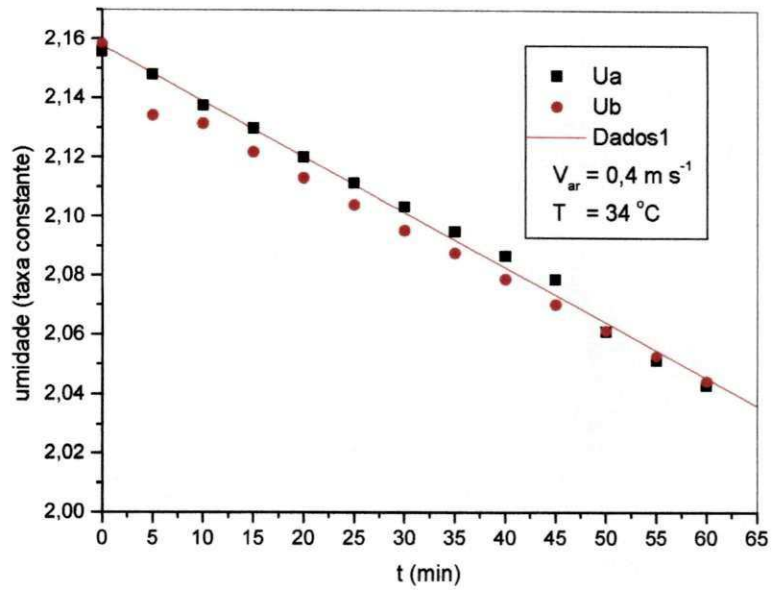


Figura 4.8 - Curva de secagem no período de taxa constante à $34 \text{ }^{\circ}\text{C}$ e $0,4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

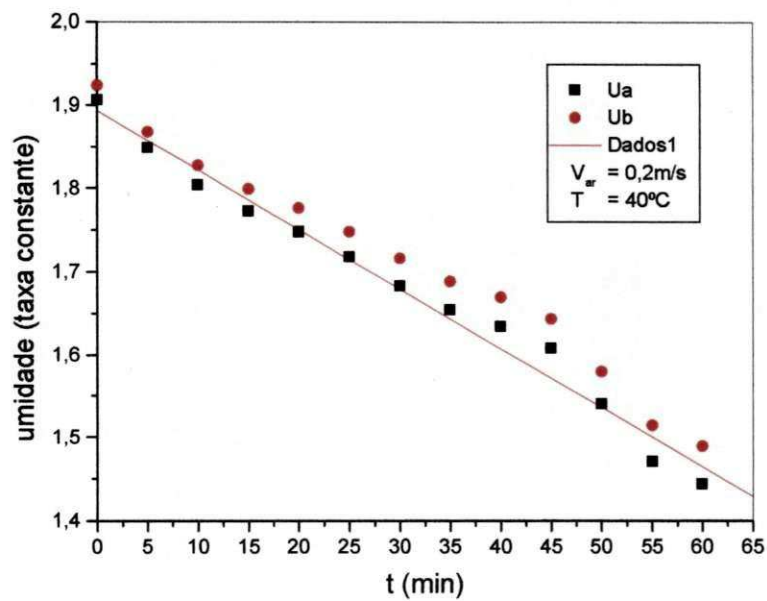


Figura 4.9 - Curva de secagem no período de taxa constante à $40 \text{ }^{\circ}\text{C}$ e $0,2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

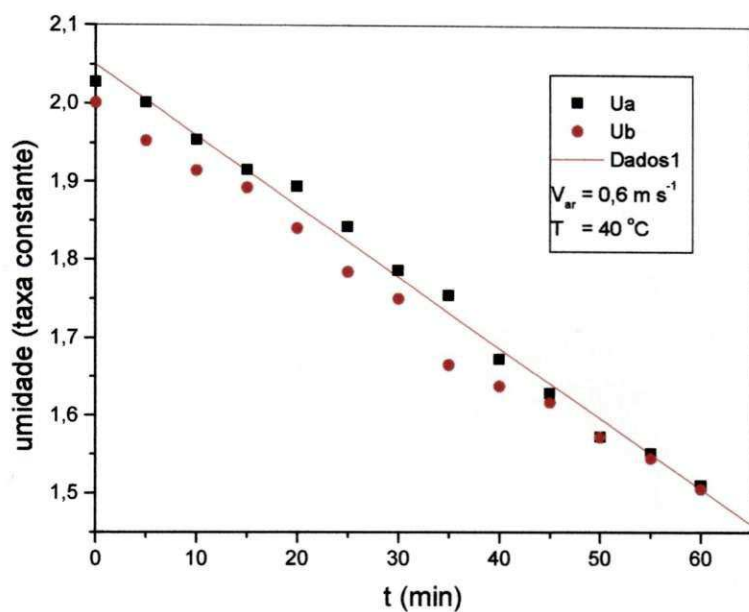


Figura 4.10 - Curva de secagem no período de taxa constante à 40 °C e 0,6 m.s⁻¹.

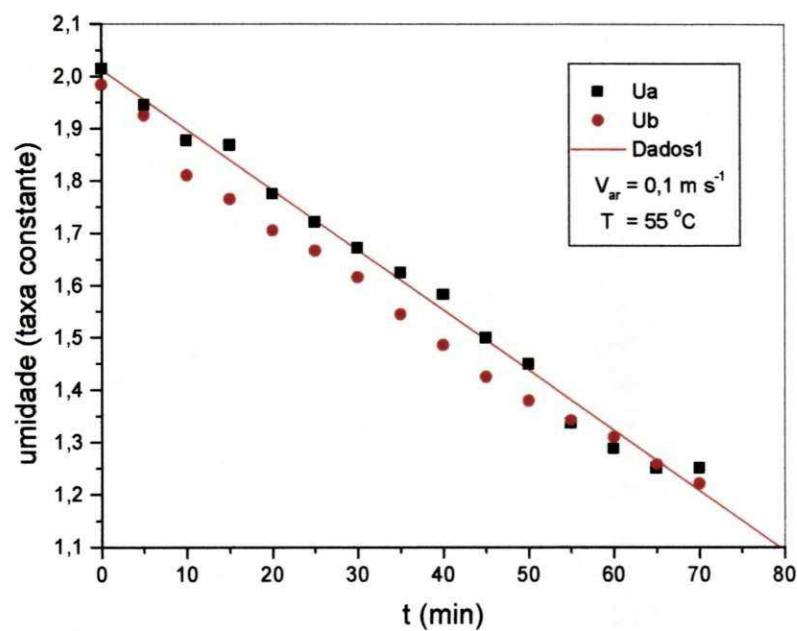


Figura 4.11 - Curva de secagem no período de taxa constante à 55 °C e 0,1 m.s⁻¹.

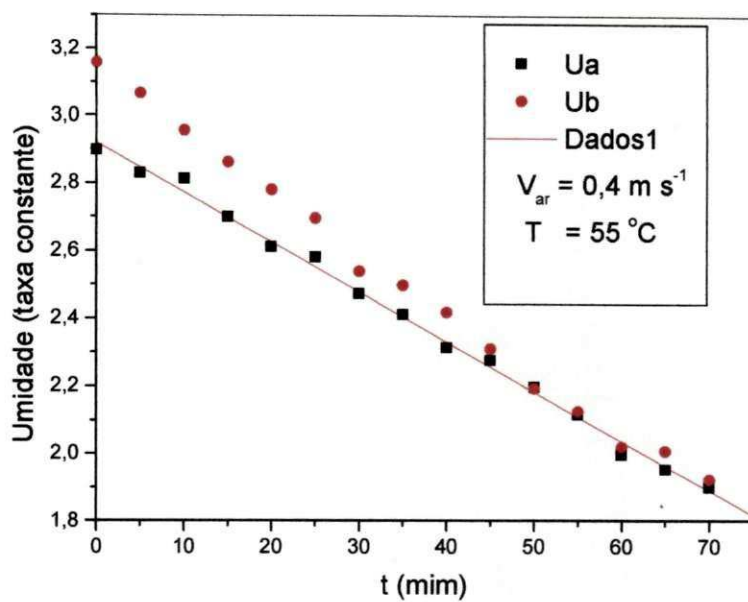


Figura 4.12 - Curva de secagem no período de taxa constante à 55 °C e 0,4 m.s⁻¹.

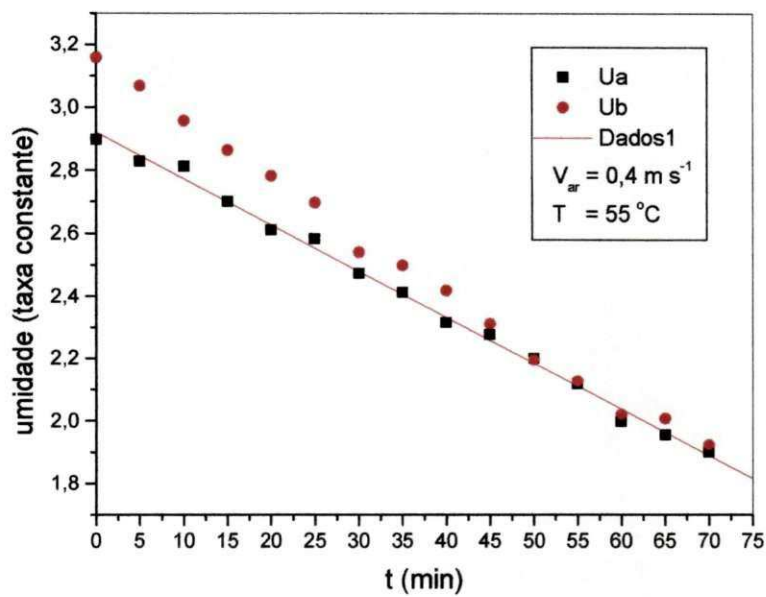


Figura 4.13 - Curva de secagem no período de taxa constante à 55 °C e 0,4 m.s⁻¹.

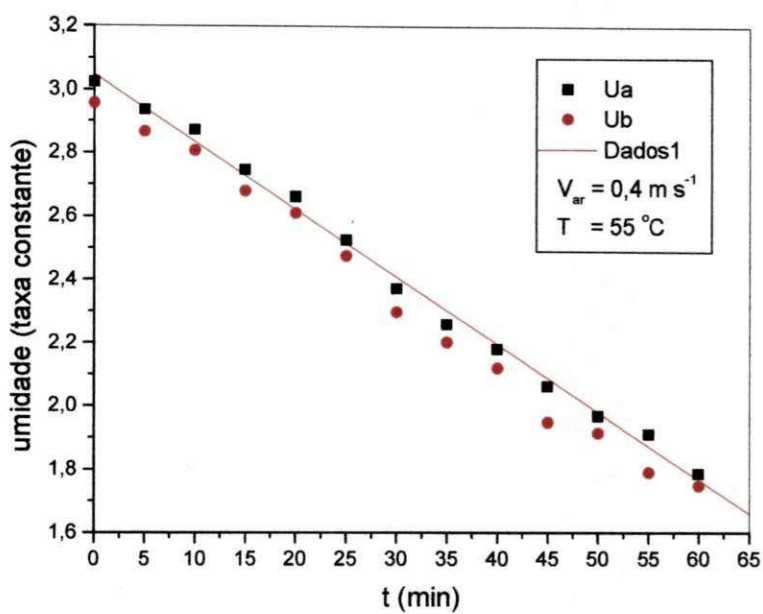


Figura 4.14 - Curva de secagem período de taxa constante à 55 °C e 0,4 m.s⁻¹.

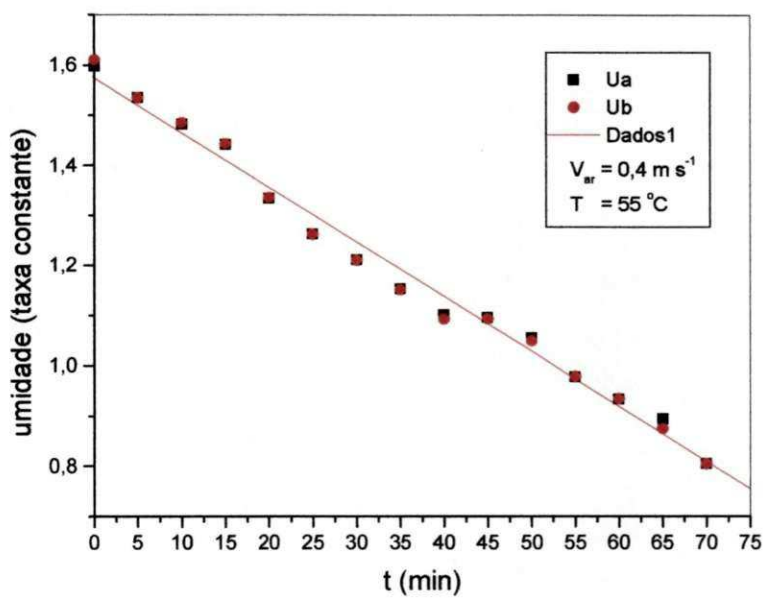


Figura 4.15 - Curva de secagem no período de taxa constante à 55 °C e 0,4 m.s⁻¹.

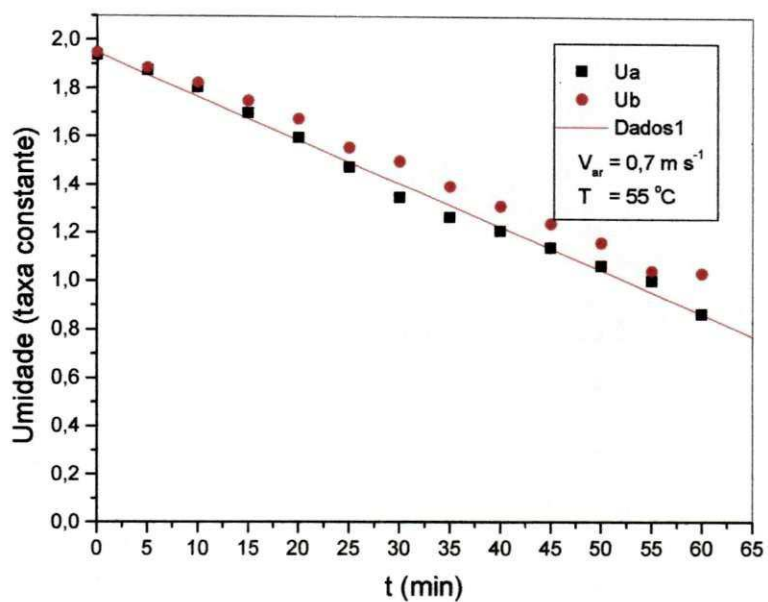


Figura 4.16 - Curva de secagem período de taxa constante à 55 °C e 0,7 m.s⁻¹.

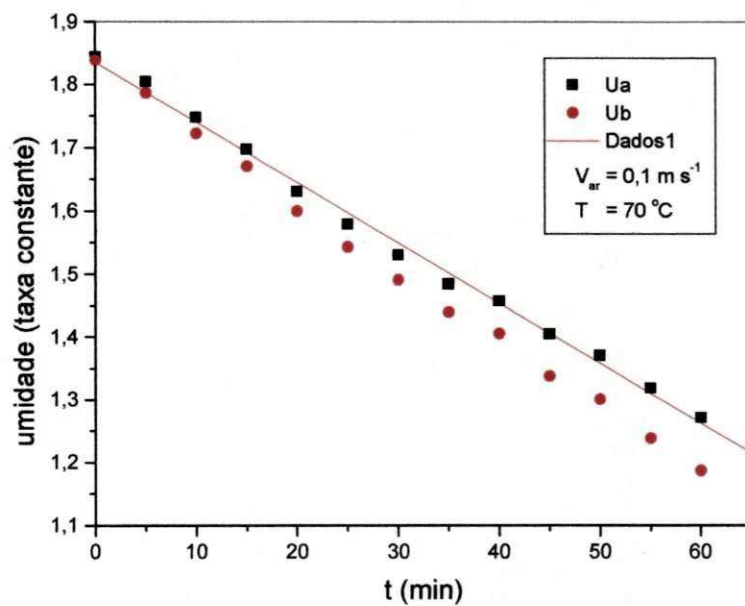


Figura 4.17 - Curva de secagem no período de taxa constante 70 °C e 0,1 m.s⁻¹.

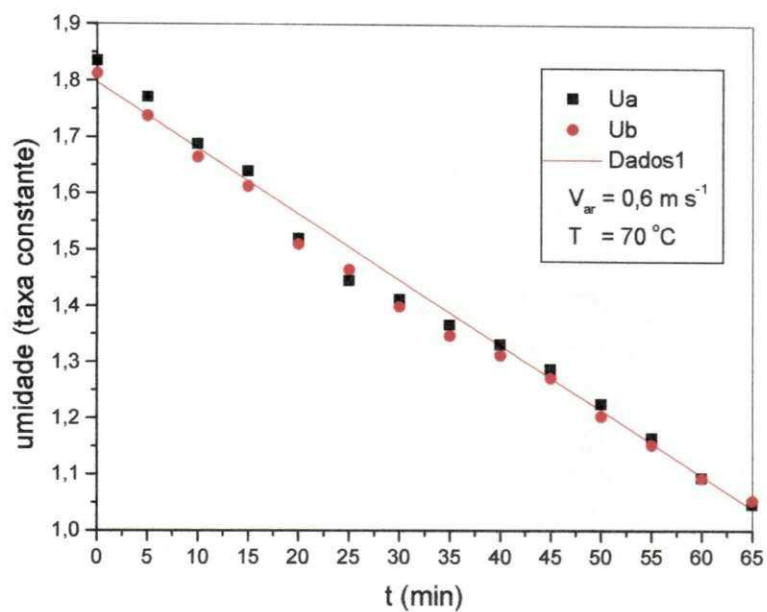


Figura 4.18 - Curva de secagem período a taxa constante 70 °C e 0,6 m.s⁻¹.

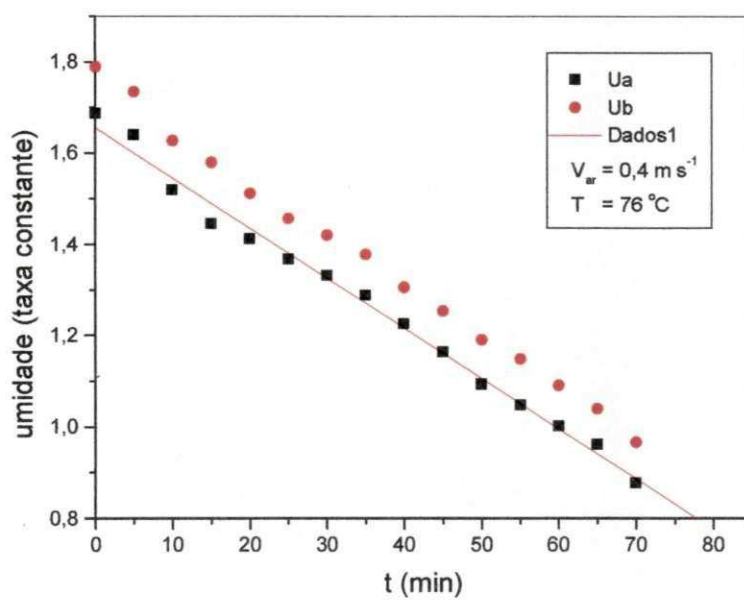


Figura 4.19 - Curva de secagem período a taxa constante à 76 °C e 0,4 m.s⁻¹.

Na Tabela 4.5 encontram-se todos resultados dos coeficientes de transferência de calor e massa, obtidos a partir da taxa de evaporação e utilizando as equações 2.9 e 2.10.

Tabela 4.5 - Parâmetros cinéticos do período de secagem à taxa constante e decrescente

Amostras	t (min)	T (°C)	V _{ar} (m.s ⁻¹)	K (g.cm ⁻² .min ⁻¹)	h (kJ.cm ⁻² .(min.°C) ⁻¹)	Def (cm ² .min ⁻¹)
A	430	34	0,4	4,57 x 10 ⁻¹	2,06 x 10 ⁻³	2,37 x 10 ⁻³
B				4,32 x 10 ⁻¹	1,95 x 10 ⁻³	2,45 x 10 ⁻³
A	260	40	0,2	9,80 x 10 ⁻²	1,67 x 10 ⁻³	1,23 x 10 ⁻²
B				9,24 x 10 ⁻²	1,80 x 10 ⁻³	1,27 x 10 ⁻²
A	235	40	0,6	6,08 x 10 ⁻¹	1,57 x 10 ⁻³	6,34 x 10 ⁻³
B				6,64 x 10 ⁻¹	1,80 x 10 ⁻³	6,38 x 10 ⁻³
A	270	55	0,1	9,41 x 10 ⁻³	8,21 x 10 ⁻⁴	7,89 x 10 ⁻³
B				9,05 x 10 ⁻³	7,89 x 10 ⁻⁴	8,90 x 10 ⁻³
A	250	55	0,4	6,36 x 10 ⁻³	5,55 x 10 ⁻³	2,74 x 10 ⁻¹
B				7,44 x 10 ⁻³	6,50 x 10 ⁻³	2,61 x 10 ⁻¹
A	250	55	0,4	9,56 x 10 ⁻²	8,34 x 10 ⁻³	1,32 x 10 ⁻²
B				9,66 x 10 ⁻²	8,43 x 10 ⁻³	1,36 x 10 ⁻²
A	250	55	0,4	2,19 x 10 ⁻²	8,21 x 10 ⁻⁴	7,89 x 10 ⁻³
B				2,11 x 10 ⁻²	7,89 x 10 ⁻⁴	8,91 x 10 ⁻³
A	250	55	0,4	4,77 x 10 ⁻²	4,17 x 10 ⁻³	2,74 x 10 ⁻²
B				4,85 x 10 ⁻²	4,23 x 10 ⁻³	3,53 x 10 ⁻²
A	170	55	0,7	6,56 x 10 ⁻²	5,45 x 10 ⁻³	3,40 x 10 ⁻²
B				7,01 x 10 ⁻²	5,83 x 10 ⁻³	2,83 x 10 ⁻²
A	225	70	0,1	4,27 x 10 ⁻²	1,82 x 10 ⁻³	1,45 x 10 ⁻²
B				5,11 x 10 ⁻²	2,22 x 10 ⁻³	1,54 x 10 ⁻²
A	180	70	0,6	4,85 x 10 ⁻²	2,49 x 10 ⁻³	1,21 x 10 ⁻¹
B				5,09 x 10 ⁻²	2,61 x 10 ⁻³	1,20 x 10 ⁻¹
A	180	76	0,4	4,85 x 10 ⁻²	2,49 x 10 ⁻³	1,21 x 10 ⁻¹
B				5,09 x 10 ⁻²	2,61 x 10 ⁻³	1,20 x 10 ⁻¹

Embora os coeficientes de transferência dependem das condições psicrométricas do ar e neste trabalho não foi controlada a umidade, que esteve definida pelas condições ambientes, algumas tendências podem ser observadas na Tabela 4.5. Há em geral um efeito positivo da temperatura e da velocidade do ar sobre os coeficientes de transferência de calor e massa. Isto está de acordo com o esperado, já que, no período de taxa constante há predominância de resistência externa, o que explica o efeito velocidade (MARIZ, 1986). Por outro lado, um aumento de temperatura implica em geral num aumento de forças impulsiva diretamente na transferência de calor e também na transferência de massa através da redução de umidade relativa do ar.

4.4- Período de Secagem à Taxa Decrescente

Foi determinado neste estudo o coeficiente de difusão no período de taxa decrescente, mediante o ajuste pela equação 2.7.

As Figuras 4.20 à 4.31 apresentam as retas ajustadas aos dados experimentais no período a taxa decrescente. É possível observar que a maioria dos experimentos se ajustaram bem ao modelo simplificado, embora os desvios são maiores nas temperaturas mais altas, onde há indícios de existência de segundo período de taxa decrescente. Este segundo período nos casos de temperatura acima de 55 °C pode estar associado à difusão de vapor de água ou ao efeito de encolhimento que não foi considerado no modelo.

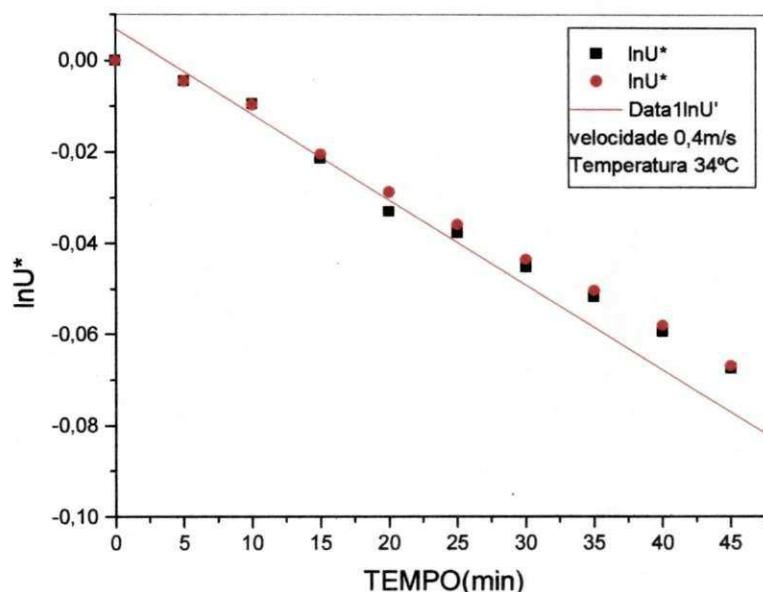


Figura 4.20 - Estimativa da difusividade para $V_{ar} = 0,4 \text{ m.s}^{-1}$ e $T = 34 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

Como se observa na Tabela 4.5 os coeficientes de difusão efetivos estimados de apresentam uma boa reprodutibilidade. Em geral, aumentam com a temperatura, como esperado.

Os valores excepcionalmente baixos nas velocidades de $0,01 \text{ m.s}^{-1}$ são indicativos de que, nessas condições de baixo escoamento do ar, o efeito de resistências externa à transferência de massa não poderia ser desconsiderado, tendo-se um controle misto da

transferência de massa. Já a partir de 0,04m/s o efeito de velocidade é pouco notório, correspondendo a um controle difusional de acordo com o modelo proposto.

4.5 - Qualidade do Produto

4.5.1 - Granulometria

As tabelas que se encontram no Apêndice B (7 B à 11 B) ilustram os resultados da análise granulométrica de amostras de leveduras seca em estufa e deles resulta a distribuição acumulativa de tamanhos onde X representa a fração em massa das partículas menores que a dimensão característica, no caso a abertura da malha de uma peneira. $D_{\#}$

Foi estudada a caracterização do fermento seco onde se verificou que o modelo de distribuição de Gates-Gaudin-Schumann representou bem a amostra, ou seja, $m > 0$. Dos resultados obtidos pode-se concluir que as amostras de leveduras secas em estufa com circulação estão dentro dos padrões de comercialização.

4.5.2 - Teor Proteico

A Tabela 4.4 apresenta os resultados obtidos experimentalmente, a partir da determinação do nitrogênio total.

Tabela 4.6 – Percentagem do teor de proteínas totais

t (min)	T (°C)	Var (m. s ⁻¹)	Teor de Proteínas (%)
<i>IN-NATURA</i>	-	-	69,09
440	34	0,04	12,09
330	40	0,2	31,09
285	40	0,6	48,70
270	55	0,1	48,36
210	55	0,4	50,09
210	55	0,4	50,09

210	55	0,4	50,01
210	55	0,4	50,04
245	70	0,2	44,90
205	70	0,6	51,81
165	76	0,4	57,86

Comparando os dados experimentais contidos na Tabela 4.6 com os dados dos valores mínimos de proteína exigidos pela legislação brasileira (Tabela 2.3) pode-se observar que somente para duas faixas de temperatura estão fora das normas exigidas: as amostras secas às temperaturas de 34 °C com velocidade do ar de 0,4 m.s⁻¹ e à 40 °C e velocidade 0,1m.s⁻¹. Esta queda na quantidade da porcentagem de proteína pode ser explicada levando em consideração o efeito temperatura, associados ao longo do tempo de secagem. Como foi empregada baixas temperatura e velocidade do ar, conseqüentemente o tempo de secagem foi maior. Nas amostras secas a baixa temperatura, além da perda de proteínas, ocorreram reações indesejáveis, as reações de Maillard, que ocasionam o escurecimento da amostra e odor desagradável. Na amostra seca a 40 °C, houve alteração na cor quanto ao odor não houve alterações. Nas demais temperaturas 40, 55, 70 e 76 °C, velocidades do ar na faixa de 0,1, 0,2, 0,4 e 0,6 m.s⁻¹, todas as amostras encontraram-se dentro dos padrões exigidos e com valor protéico maior que 40%.

Foi possível observar através do gráfico de superfície de resposta mostrado na Figura 5.24 que a variável velocidade do ar não apresenta efeito no teor de proteínas, enquanto pode-se observar um aumento do teor de proteína com o aumento da temperatura. O que significa dizer que quanto maior for a temperatura menor é o tempo de secagem. A equação 5.//// apresenta o modelo codificado ajustado por regressão linear dos dados experimentais.

$$\% \text{ Proteína} = 50,05 + 10,21 T + 3,84 V - 7,2 T^2 + 0,59 V^2 - 2,68 TV$$

Obteve-se, através do Programa computacional Statistica versão 5.0, os coeficientes de regressão (R) para o modelo de 0,9 e a relação $F_{\text{cal}}/F_{\text{tabelado}}$ 1,0 e grau de confiança de 0,95%. Deste modo pode-se concluir que os valores experimentais são bem representados pelo modelo ajustado.

As leveduras secas com altas temperaturas 70 e 76 °C apresentaram melhor cor (caramelo bem claro) e odor agradável.

Nesta análise não foi possível determinar o grau de desnaturação das proteínas, comprovando estudos de CHEFTEL (1989) que observou que isto só ocorre quando a secagem se dá em faixa de temperaturas superiores a 65 °C. A velocidade com que a proteína desnatura, depende da temperatura e duplica quando esta se eleva em 10 °C.

CAPÍTULO V

5 - CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS

Para as condições do planejamento realizado nesta pesquisa pôde-se concluir que:

1 - Os modelos de Henderson e de GAB mostraram-se adequados para representar as isotermas de dessecção nas faixas estudadas.

2 - As curvas de secagem apresentam-se bem definidas com períodos de pré - aquecimento, taxa de secagem constante e decrescente.

3 - Para o período de taxa constante, foi possível mediante modelagem dos dados experimentais, calcular a taxa de evaporação e os coeficientes de transferência de massa e calor.

4 - Foi calculado a difusividade baseada na segunda lei de Fick para o período de taxa decrescente.

5 - Foi observado que as constantes C e K nas equações de BET e GAB dependem da temperatura.

6 - O modelo de distribuição de Gates-Gaudin-Schumann representou bem a amostra.

7 - O teor de proteínas dependem estatisticamente da velocidade do ar e da temperatura.

8- As leveduras secas estão dentro dos padrões exigidos pelo mercado possuem teor de umidade de 12%.

Para dar continuidade aos estudos deste trabalho, podemos sugerir:

1 - Complementar os estudos sobre a qualidade do produto, através de análise de cor, viabilidade e qualidade das proteínas mediante aminograma.

2 - Levantar isotermas de equilíbrio em outras faixas de temperatura.

3 - Estudar outros modelos matemáticos para ajustar as isotermas de equilíbrio.

4 - Ensaia outros modelos matemáticos para a cinética de secagem.

CAPÍTULO VI

6 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIATION OF OFFICIAL ANALYTICAL CHEMISTS (AOAC). Official Methods of Analysis. 14 ed. Arlington, Virginia, 1984. 1v. (várias paginações).

BARROS NETO, B. de; SCARMÍNIO, I.S. e BRUNS, R.E. Planejamento e Otimização de Experimentos. Campinas, Editora da UNICAMP, 1995. 299p.

BOX, G.E.P.; HUNTER, W.G.; HUNTER, J.S. Statistics for Experimenters na Introduction Design, Data Analysis and Model Building. Nova York; Wiley, 1978.

BRESSANI, R. The use of yeast in human foods. In: APATELES, R.I.; TANNEMBAUH, S.R. Single-Cell Protein. Cambridge: The University Institute Press, 1971. p.90-121.

BUTOLO, J.E. Uso de biomassa de levedura em alimentação animal: propriedades, custo relativo a outras fontes de nutrientes. In: ITAL -Instituto de Tecnologia de Alimentos. Produção de Biomassa de Levedura: Utilização em Alimentação Humana e Animal (WORKSHOP), p.52-59 Campinas,1996.

CARNEIRO, A.L.M. Caracterização de partículas sólidas. Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE. 1978. (Dissertação de Mestrado).

CHEFTEL, J.C.; CUQ, J.L.; LORIENTE, D. Proteínas Alimentares. Bioquímica, Propriedades Funcionales, Valor Nutritivo, Modificações Químicas. España: Editora Acribia AS. 1988.

CRANK, J. The Mathematics of Diffusion. 2ed., Clarendon University Press Oxford, 1975, 414p.

CHARM, S.E. Dehydration of foods the fundamentals of food engineering. Westport, The AVI Publishing Company Inc., p.252-277, 1963.

CHRISTIAN, J.H.B.; WALTHO, J.A. The composition of staphylococcus aureus in relation to the water activity of the growth medium. *Journal of Genetic Microbiology*. v.35, p.205-213, 1964.

DZIEZAK, J.D. *Yeast And Yeast Derivatives: Definitions, Characteristics And Processing*. Food Technology, Chicago, v.41, n.2, p.103-121, 1987.

EVANGELISTA, J. *Tecnologia de Alimentos*. 2ª ed. Editora Atheneu, 1998.

FAO. Energy and protein requirements. Report of the Joint Expert Consultation Technical Report. Série nº 724, FAO/ WHO And the United Nations University, Geneva, 1985.

FORTES, M.; OKOS, M. Drying Teories: their bases and limitations as applied to foods and grains. In: *Advances in Drying*, ed. Arum S. Mujundar, Hemisphere Publishing Corporation Washington. V.1,p.119-154, 1980

FURCO, A.M. Produção de biomassa de levedura em destilarias de álcool. In: ITAL -Instituto de Tecnologia de Alimentos. *Produção de Biomassa de Levedura: Utilização em Alimentação Humana e Animal (WORKSHOP)*, p.52-59 Campinas, 1996.

GOMIDE, R. *Operações Unitárias - Operações com Sistemas Sólidos Particulados*, São Paulo, 1980.

GRABOWSK, A.S.; MUJUMDAR, RAMASWAMY, H.S.; STRUMILLO, C. Evaluation of fluidized versus spouted bed drying of baker's yeast. *Drying Technology*. p.625-634, v.15, 1997.

HALL, C.W. *Drying farm crops* Ann Arbor, Edwards Brothers, 1971, 336p.

HEIDELBAUG, N.D.; KAREL, M. Stability of low and intermediate moisture foods. In: GOLDBLITH, S.A.; REY, L.; ROTHMAYR, W.W. *Freeze Drying and Advance Food Technology*. New York: Academic Press, 1975. p.643-674.

ITAL - Instituto de Tecnologia de Alimentos. Análise Química de Alimentos. Manual Técnico, Campinas, 1990

KINSELLA, J.E. Funcional proteins from yeast nucleoprotein for foods used metodos for isolation. p.363-391, 1987.

KRIDER, J.L.; BECKER, D.E.; CARROL, E.E.; FAIRBANKS, B.W. The valeu of dried fermetation solubles for sows fed in drylot during gestation and lactation. Journal Anim. Science.

LABUZA, T.P; TANNEMBAUM, S.R. e KAREL, M. Water content and stability of low - moisture and intermediate - moisture food technology, v.24, 543p. 1972.

LIMA, M.F.M. de. Desidratação de polpa de umbu em leite de jorro - Estudos fluidodinâmicos e térmicos. Campina Grande: Departamento de Engenharia Química da Universidade Federal da Paraíba. 1992. 118p. (Dissertação de Mestrado).

LIMA, L.M.O. Estudo do aproveitamento de bagaço de frutas tropicais, visando a extração de fibra. Natal, 2000. (Dissertação de Mestrado).

LOMAURO, C.J.; BAKSHI, A.S.; LABUZA, T.P. Evaluation of food moisture sorption isotherm equations. Par I: Fruit, vegetable and meat products. Lebensmittel-Wissenschaft und Technologie, v.18, p.112-22, 1985.

MATTOS, W.R.S; D'ARCE, R.D.; MACHADO, P.F.& MARCOS, A.L.M. Avaliação da qualidade da proteína de levedura seca (*Saccharomyces spp*). In: Reunião Anual da S.B.Z, 20, Pelotas, 1983. Anais, Pelotas, SBZ,1983, p.119.

MARIZ. T.F. Secagem de casca de caroço de algodão em leite fixo. Dissertação de Mestrado, Campina Grande, 1986.

MARTINES-FORCE, E.; BENITEZ, T. Changes in yeast amino acids pool with respiratory versus fermentative metabolism. Biotechnology and Bioengineering. New York, v.40, p. 643-649, 1992.

PÁDUA, E. A. et al. Importância da parede celular de leveduras (*Saccharomyces sp.*) como fonte de fibra na alimentação. *Ciência e Tecnologia de Alimentos*, Campinas: v.20, n.2 , p.233-239, 2000.

PARK, K.J.; NOGUEIRA, R.I. Modelos para ajuste de isoterma de sorção de alimentos. *Revista Engenharia Rural*, Piracicaba: v.3, n.1, p.80-86, 1992.

PEIXOTO, A.R.; Gengibre e suas aplicações. *Chácaras e quintais.*, São Paulo, v. 113, n.3., p.207-210, 1966.

PELLET, P.L; YOUNG, V.R. *Nutritional Evaluation of Proteins Foods*. Tóquio: United Nations University, 1978.

PEREIRA, A.M., QUEIROZ, D.M. de. *Higroscopia* , CENTREINAR,1987.28p p.332, 1948.

PERRY, R.H.; CHILTON, C.H. *Manual de Engenharia Química*. 5ª edição. Guanabara Dois, Rio de Janeiro ,1980.

PERRY, J. H. *Chemical Engineer's Handbook*, 6 ed. New York. Mc Graw-Hill, 1984. 1v. (várias paginações).

PORTARIA N.º 07 do MINISTÉRIO DA AGRICULTURA de 09 de novembro de 1988

RHEINBOLDT, R.H.H; LEIMER, K.H.; ROSSELL, C.E.V. Sangria e secagem de levedura- Processo CTC. *Boletim Técnico Copersucar*, v.39, p.8-12, São Paulo, 1987.

QUADRI, A.M.N.; SANTINI, P.; QUADRI, M.B. Secagem e inativação de leveduras (*S. cerevisiae*). In: XXIV CONGRESSO BRASILEIRO DE SISTEMAS PARTICULADOS *Anais...*, v.1, Uberlândia, MG ,1996.

REED, G. PEPLER, H.J. *Yeast Technology*. The AVI Publ. CO., Inc.1973.

ROSE, H.; HARRISON, J.N. *The Yeasts* London, Academic Press, v.3., 1970

SANTINI, A.P. Estudo da secagem e da inativação de levedura (*S. cerevisiae*) Santa Catarina, 1996 (Dissertação de Mestrado).

SCHRIMSHAW, N.S. Nutricional and tolerance considerations in the feedings of single cell protein. In International Symposium on Food and Biotechnology, Proceedings of the International Symposium on Food and Biotechnology. Quebec, 1986.

SILVA, F.L.H. Modelagem, simulação e controle de fermentação alcoólica contínua extrativista, UNICAMP, Campinas, 1998 (Tese de Doutorado).

SHERWOOD, T.K. Application of the theoretical diffusion equations to the drying of solids. Transactions of American Institute Chemistry Engineer. v.27, p.310-333. 1991.

STRUMILLO, C.; KUDRA, T. Drying: Principles, applications and design. Gordon and Breach Science Publishers, New York, 1986. 448p.

TAEYMANS, D.; LENGES, J. Sechage de la biomasse. Revue Fermentation Industrial Aliments., v.39, n.2, p.31-44. 1983.

TEIXEIRA NETO, R. O.; QUAST, D. G. Isotermas de adsorção de umidade em alimentos. Coletânea do Instituto de Tecnologia de Alimentos, Campinas, v.8., p.141-197, 1977.

TREYBALL, R.E. Drying. In: Mass Transfer Operations. New York, McGraw-Hill, 1968, p.569-75.

VITALI, A.A. Importância da atividade de água em alimentos. In: Seminário sobre atividade de água em alimentos, v.1, Campinas, ITAL, 1987.

APÊNDICE A

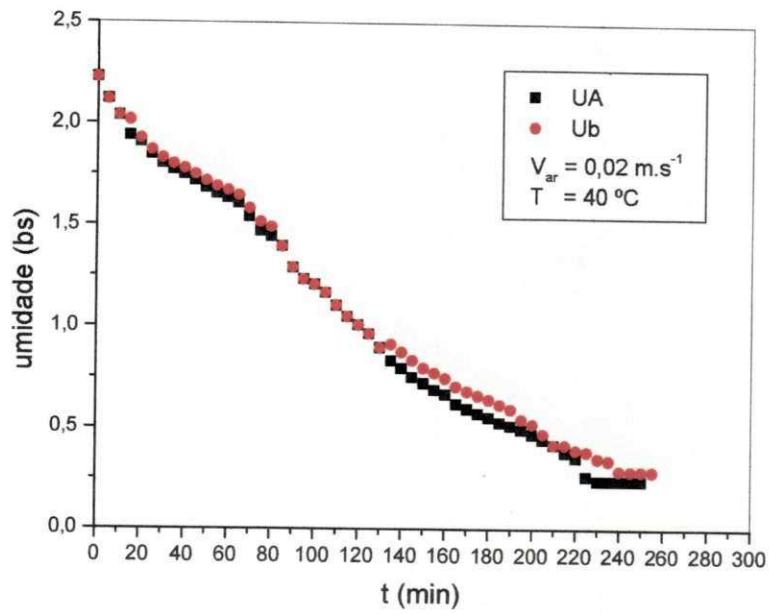


Figura 1A - Curva de secagem a $40 \text{ }^\circ\text{C}$ e $0,02 \text{ m.s}^{-1}$.

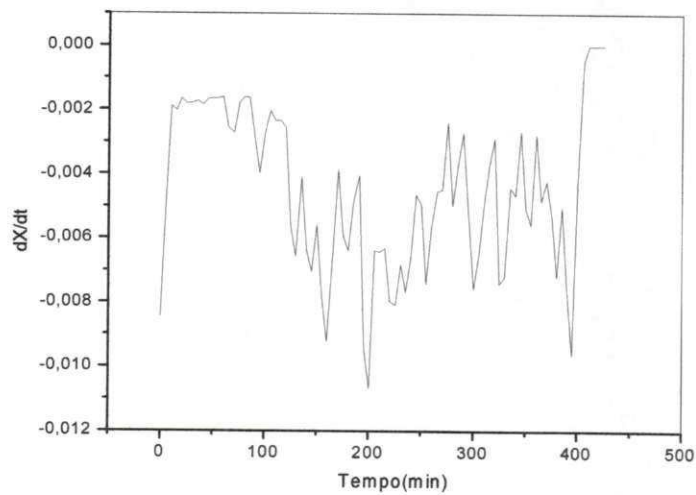


Figura 2A - Derivada da curva de secagem a $40 \text{ }^\circ\text{C}$ e $0,02 \text{ m.s}^{-1}$.

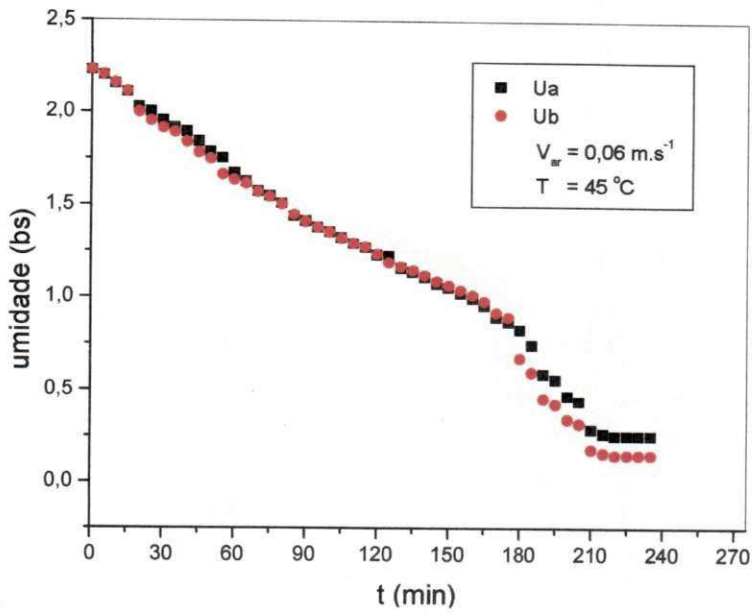


Figura 3A - Curva de secagem à 45 °C e 0,06 m.s⁻¹ .

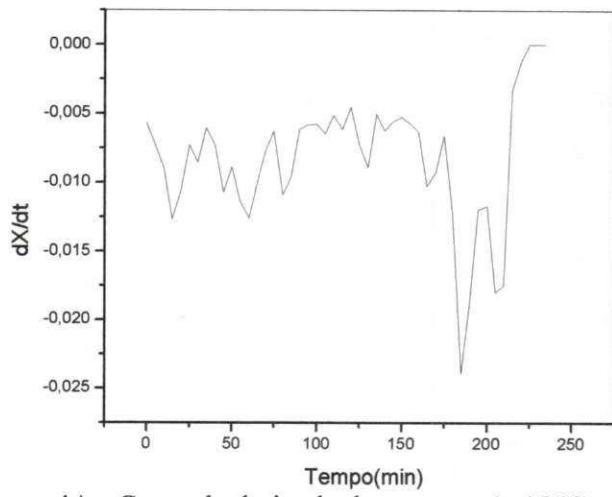


Figura 4A - Curva da derivada de secagem à 45 °C e 0,06 m.s⁻¹ .

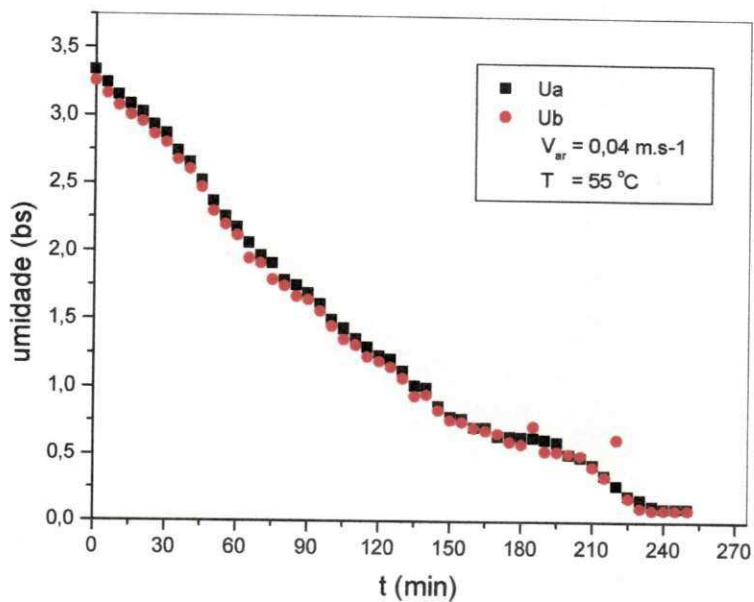


Figura 5A - Curva de secagem à 55 °C e 0,04 m.s⁻¹ (repetição 1).

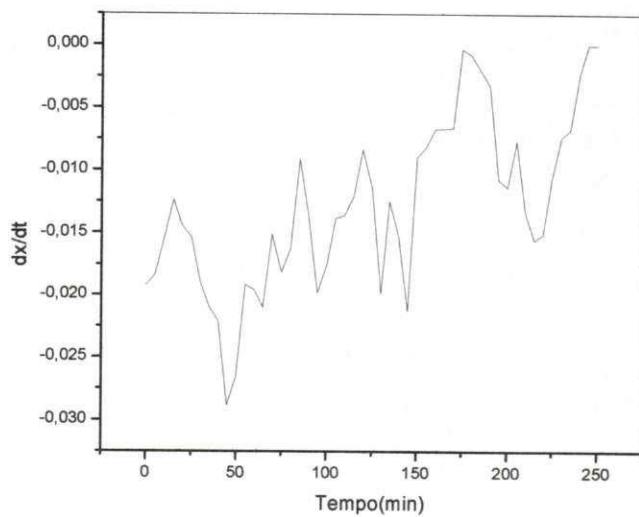


Figura 6A - Curva da derivada de secagem à 55 °C e 0,04 m.s⁻¹ (repetição 1).

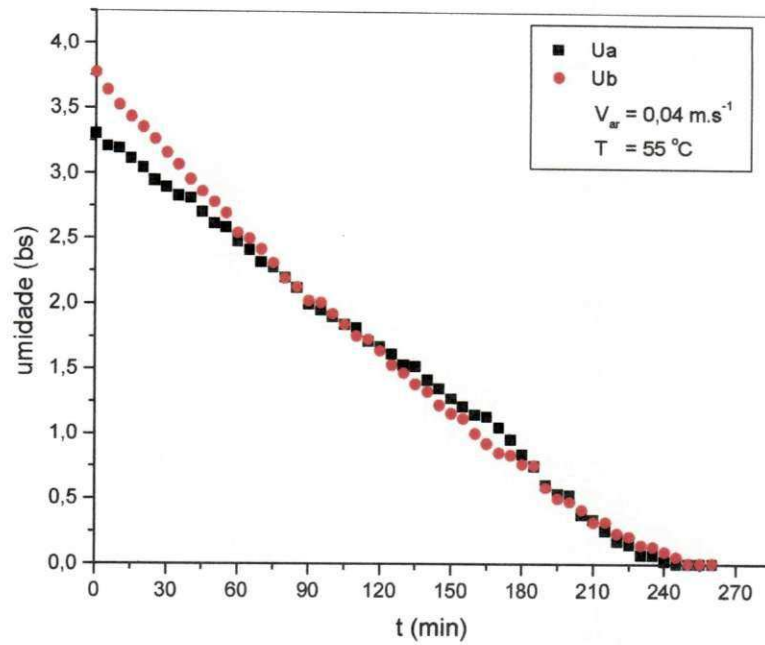


Figura 8A - Curva de secagem à 55 °C e 0,04 m.s⁻¹ (repetição 2).

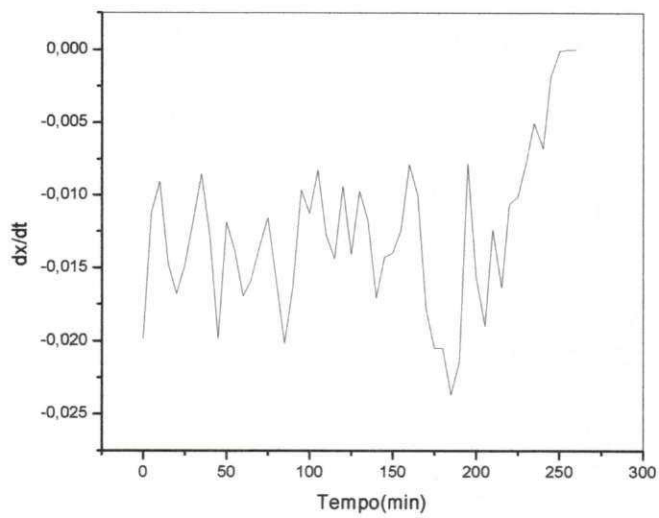


Figura 9A - Curva da derivada de secagem à 55 °C e 0,04 m.s⁻¹ (repetição 2).

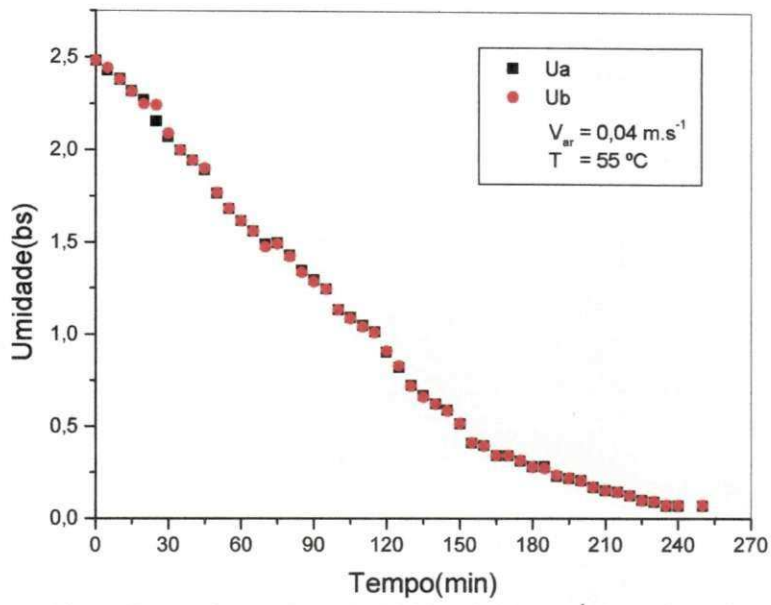


Figura 10A - Curva de secagem à 55 °C e 0,04 m.s⁻¹ (repetição 3).

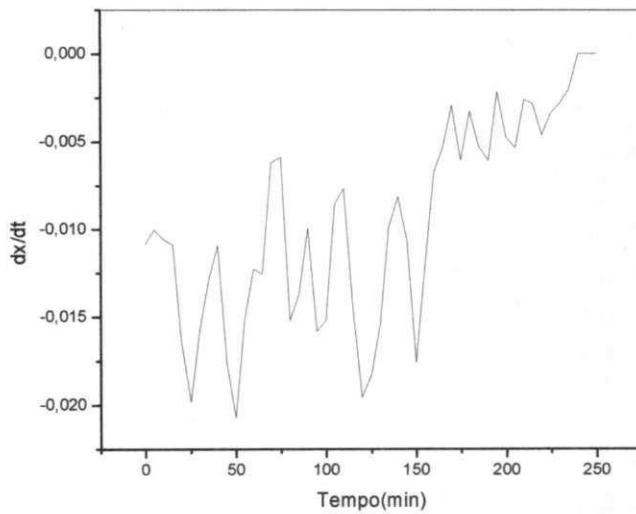


Figura 11A - Curva da derivada de secagem à 55° C e 0,04 m.s⁻¹ (repetição 3).

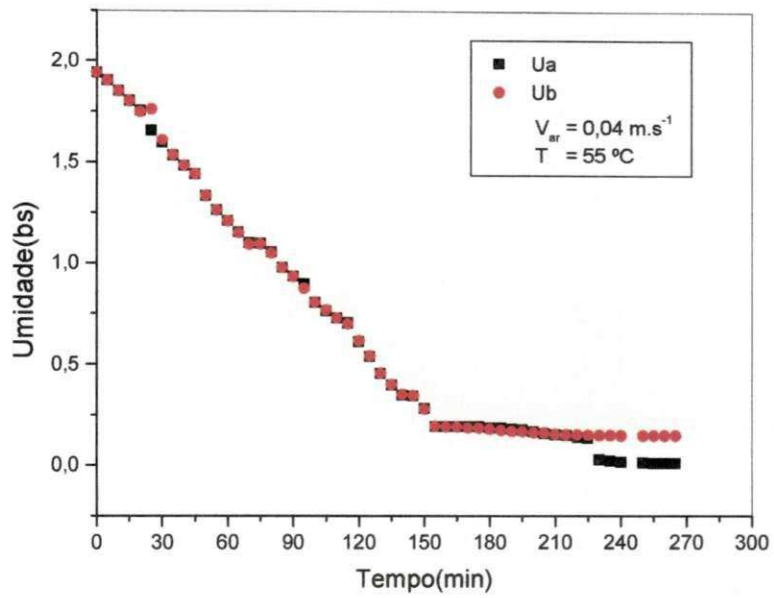


Figura 12A - Curva de secagem à 55 °C e 0,04 m.s⁻¹ (repetição 4).

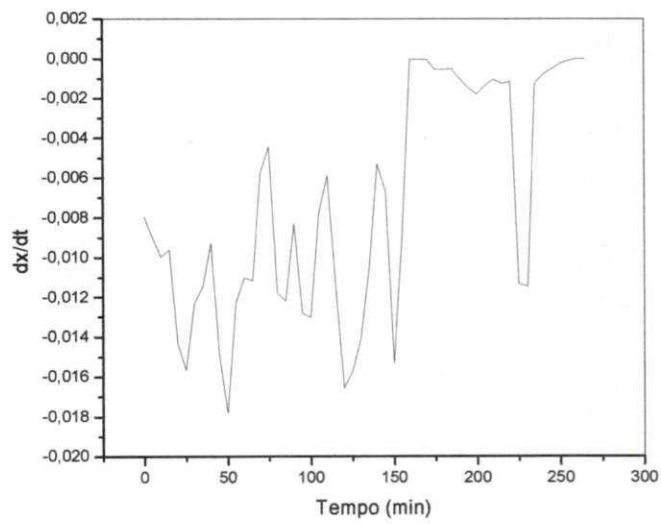


Figura 13A - Curva da derivada de secagem à 55 °C e 0,04 m.s⁻¹ (repetição 4).

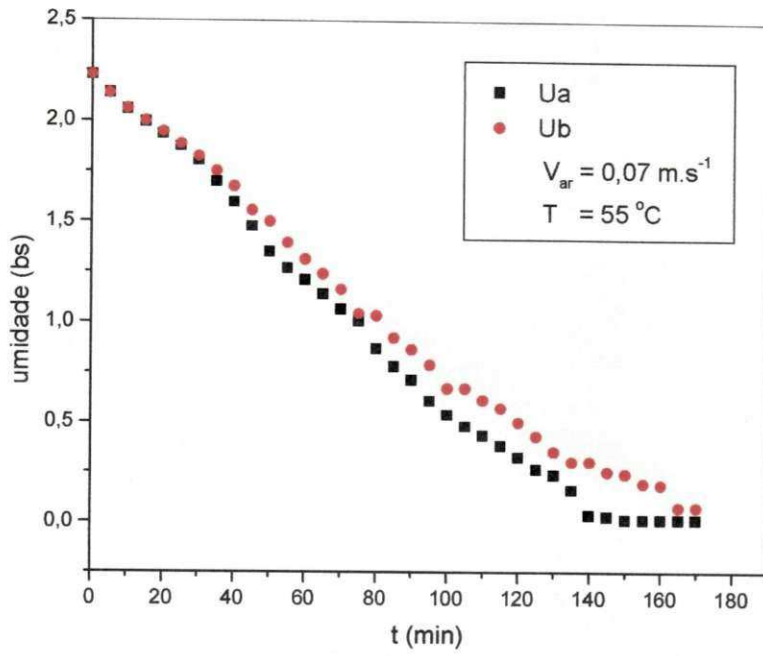


Figura 14A - Curva de secagem à 55 °C e 0,07 m.s⁻¹.

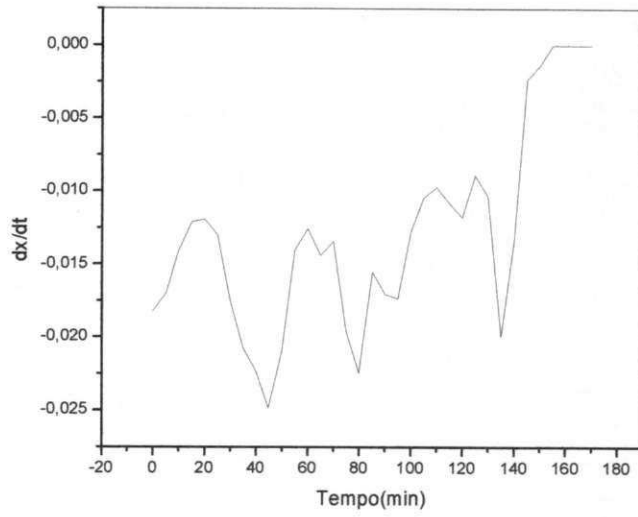


Figura 15A - Curva da derivada de secagem à 55 °C e 0,07 m.s⁻¹.

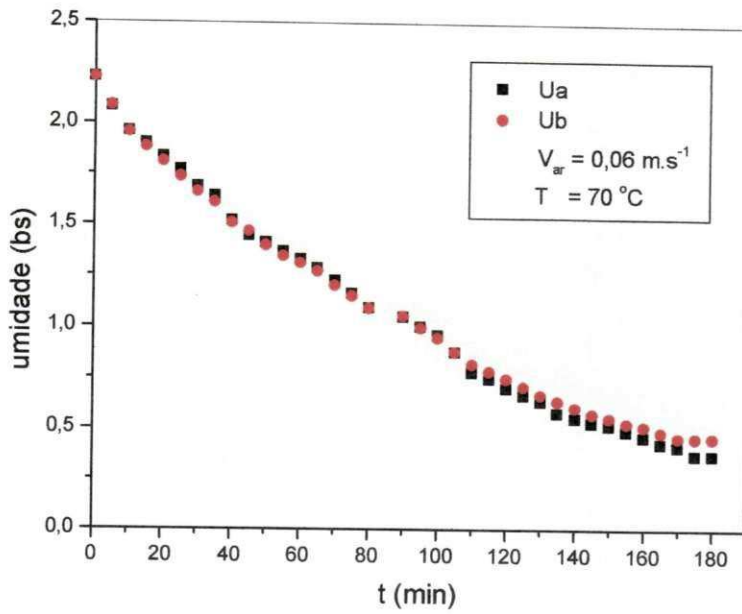


Figura 16A - Curva de secagem à 70 °C e 0,06 m.s⁻¹.

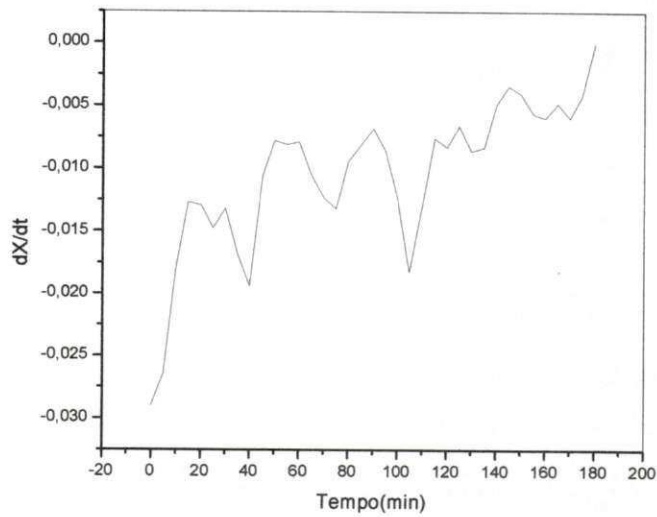


Figura 17A - Curva da derivada de secagem à 70 °C e 0,06 m.s⁻¹.

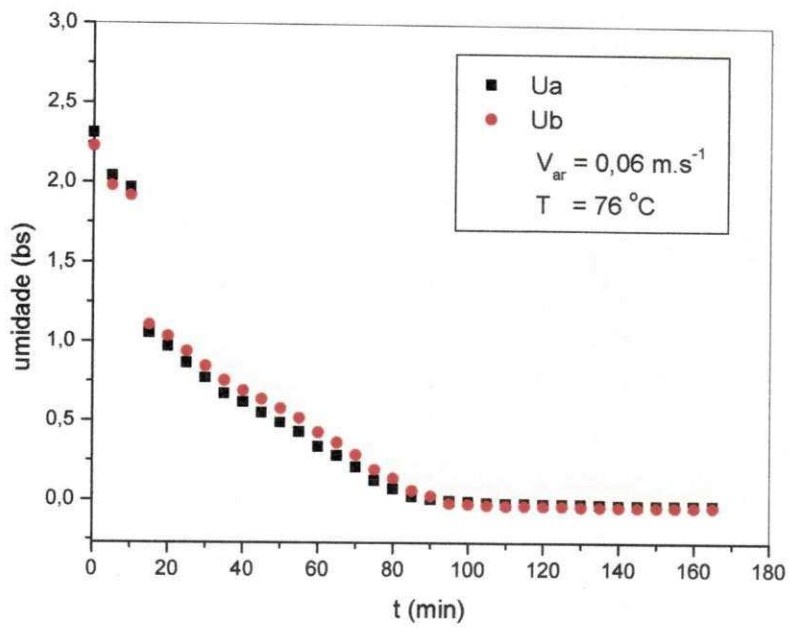


Figura 18A - Curva de secagem à 76 °C e 0,06 m.s⁻¹.

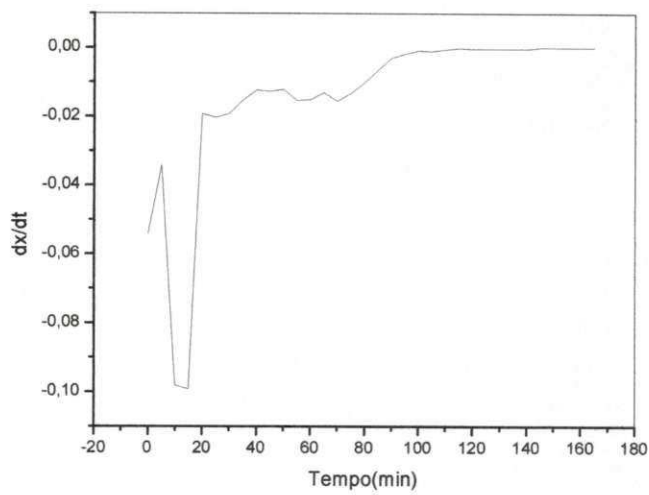


Figura 19A - Curva da derivada de secagem à 76 °C e 0,06 m.s⁻¹.

APÊNDICE B

Tabelas de dados das isotemas de equilíbrio e granulometria

AMOSTRA: Fermento Biológico Fresco "Fleischmann"

MASSA INICIAL: 6,560;

MASSA SECA: 2,0036;

UMIDADE INICIAL: 69%;

SÓLIDO SECO: 31%

Tabela 1B - Dados experimentais da atividade de água e umidade em base seca à 30 °C.

MASSA TOTAL	a_w	X(bs)
3,0935	0,711	0,52119
2,8457	0,611	0,39934
2,5575	0,514	0,25762
2,4122	0,374	0,18617
2,3626	0,282	0,16178
2,3365	0,277	0,14895
2,3261	0,187	0,14383

AMOSTRA: Fermento Biológico Fresco "Fleischmann;

MASSA INICIAL: 6,560;

UMIDADE INICIAL:69%; S

ÖLIDO SECO:31%; MASSA SECA:2,0036;

TEMPERATURA DA ESTUFA :60°C;

TEMPERATURA DO NOVASINA:30°C

Tabela 2B - Dados experimentais da atividade de água e umidade na base seca à 30 °C.

MASSA TOTAL	a_w	X(bs)
3,7694	0,768	0,8094
2,7665	0,618	0,3280
2,6037	0,518	0,2498
2,5006	0,267	0,2003

AMOSTRA: Fermento Biológico Fresco®Fleischmann®(A);

MASSA INICIAL:6,2064;

UMIDADE INICIAL:69 %;

SÓLIDO SECO:31 %;

MASSA SECA: 1,9239;

TEMPERATURA DA ESTUFA: 60°C;

TEMPERATURA DO NOVASINA:40°C

Tabela 3B - Dados experimentais da atividade de água e umidade na base seca à 40 °C

MASSA TOTAL	a_w	X(bs)
3,4343	0,856	0,7850
2,0850	0,509	0,099
1,9965	0,301	0,0875
1,9713	0,215	0,0806
1,9542	0,193	0,0362
1,9518	0,310	0,0579

AMOSTRA: Fermento Biológico Fresco "Fleischmann" (B);

MASSA INICIAL: 5,6686

UMIDADE INICIAL: 69 %;

SOLIDO SECO: 31%;

MASSA SECA: 1,7572;

TEMPERATURA DA ESTUFA: 60°C;

TEMPERATURA DO NOVASINA: 40°C.

Tabela 4B - Dados experimentais da atividade de água e umidade na base seca à 40 °C

MASSA TOTAL	a_w	X(bs)
4,4263	0,871	0,8644
2,7628	0,714	0,2861
2,4354	0,502	0,0921
2,2584	0,169	0,0713
2,2465	0,188	0,0392

AMOSTRA: Fermento Biológico Fresco" Fleischmann;

TEMPERATURA DA ESTUFA: 60°C;

TEMPERATURA DO NOVASINA: 45°C;

UMIDADE INICIAL: 69%;

SOLIDO SECO: 31%;

MASSA INICIAL: 5,5911;

MASSA SECA: 1,8137

Tabela 5B - Dados experimentais da atividade de água e umidade na base seca à 45 °C.

MASSA TOTAL	a_w	X (bs)
2,5445	0,834	0,4029
2,2248	0,821	0,2260
2,1417	0,793	0,1808
2,1395	0,704	0,1796
2,1395	0,654	0,1727
2,1270	0,691	0,1686

AMOSTRA: Fermento Biológico Fresco® Fleischmann

TEMPERATURA DA ESTUFA: 60°C;

TEMPERATURA DO NOVASINA: 45°C;

UMIDADE INICIAL: 69%;

SOLIDO SECO: 31%;

MASSA INICIAL: 5,59711;

MASSA SECA: 1,7332

Tabela 6B - Dados experimentais da atividade de água e umidade na base seca à 45 °C.

MASSA	a_w	X (bs)
2,2741	0,794	0,3120
2,2548	0,704	0,3009
2,23790	0,684	0,2911
2,2290	0,607	0,2860
2,1980	0,598	0,2681
2,1870	0,602	0,2618

Tabela 7B - Resultados de um ensaio de peneiras

Intervalo de diâmetro	Diâmetro médio (in)	Fração retida (%)
-10 + 14	0,0555	2
-14 + 20	0,0394	5
-20 + 28	0,0280	10
-28 + 35	0,0198	18
-35 + 48	0,0140	25
-48 + 65	0,0090	25
-65	0,0041	15

Tabela 8B - Dados experimentais da análise granulométrica da amostra seca à 34 °C

Sistema Tyler	Abertura D _# (mm)	Massa retida (g)	Fração em massa retida ΔX	Fração em massa < D _# , X
16	0,991	7,308	0,1300	> 0,991
35	0,417	37,232	0,7091	0,704
42	0,351	5,887	0,0980	0,384
48	0,295	5,605	0,0920	0,323
60	0,248	2,413	0,0400	0,271
65	0,208	0,563	0,0099	0,228
bandeja	< 0,208	2,248	0,0400	< 0, 208

Tabela 9B - Resultados da análise granulométrica da amostra seca à 40 °C

Sistema Tyler	Abertura D _n (mm)	Massa retida (g)	Fração em massa retida ΔX	Fração em massa < D _n .. X
16	0,991	7,318	0,1193	0,8807
35	0,417	27,2328	0,5078	0,2729
42	0,351	4,897	0,0861	0,1768
48	0,295	3,635	0,0915	0,0853
60	0,248	2,403	0,0294	0,0459
65	0,208	0,573	0,0082	0,0067
bandeja	< 0,208	2,268	0,0267	0,0000

Tabela 10B - Dados experimentais da análise granulométrica da amostra seca á 55 °C

Sistema Tyler	Abertura D _n (mm)	Massa retida (g)	Fração em massa retida ΔX	Fração em massa < D _n .. X
16	0,991	6,108	0,1291	0,7807
35	0,417	28,232	0,6088	0,3719
42	0,351	5,887	0,0964	0,1781
48	0,295	4,615	0,0813	0,0858
60	0,248	1,433	0,0300	0,0559
65	0,208	0,583	0,0092	0,0087
bandeja	< 0,208	1,248	0,0187	0,0000

Tabela 11B - Dados experimentais da análise granulométrica da amostra seca à 70 °C

Sistema Tyler	Abertura D_n (mm)	Massa retida (g)	Fração em massa retida ΔX	Fração em massa < D_n , X
16	0,991	4,108	0,1191	0,7609
35	0,417	30,232	0,7098	0,3820
42	0,351	4,887	0,0869	0,1881
48	0,295	3,705	0,0915	0,0878
60	0,248	1,263	0,0390	0,0579
65	0,208	0,499	0,0097	0,0097
bandeja	< 0,208	1,208	0,0167	0,0000

Tabela 12B - Dados experimentais da análise granulométrica da amostra seca à 76 °C

Sistema Tyler	Abertura D_n (mm)	Massa retida (g)	Fração em massa retida ΔX	Fração em massa < D_n , X
16	0,991	4,108	0,1191	0,7609
35	0,417	30,232	0,7098	0,3820
42	0,351	4,887	0,0869	0,1881
48	0,295	3,705	0,0915	0,0878
60	0,248	1,263	0,0390	0,0579
65	0,208	0,499	0,0097	0,0097
bandeja	< 0,208	1,208	0,0167	0,0000