



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIDADE ACADÊMICA DE ENGENHARIA QUÍMICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA**

Estudo de caracterização e isotermas de sorção do bagaço do
pseudofruto do caju, enriquecido para ração animal

NORMANDO MENDES RIBEIRO FILHO

CAMPINA GRANDE - PB
2010

NORMANDO MENDES RIBEIRO FILHO

**Estudo de caracterização e isotermas de sorção do bagaço do
pseudofruto do caju, enriquecido para ração animal**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química do Centro de Ciências e Tecnologia da Universidade Federal de Campina Grande, em cumprimento às exigências para obtenção do Grau de Mestre.

Área de Concentração: Desenvolvimento de Processos Químicos
Linha de pesquisa: Recursos Regionais e Meio Ambiente

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Odelsia Leonor Sanchez de Alsina (UAEQ/UFCG)

CAMPINA GRANDE - PB
2010



FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCC

R484e

Ribeiro Filho, Normando Mendes

Estudo de caracterização e isotermas de sorção do bagaço do pseudofruto do caju, enriquecido para ração animal / Normando Mendes Ribeiro Filho. — Campina Grande, 2010.

99 f : il. color.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia.

Referências.

Orientadora: Profa. Dra. Odelsia Leonor Sanchez de Alsina.

1. Bagaço de Caju 2. Enriquecimento Protéico 3. Higroscopicidade I. Título.


CDU 66.021(043)

NORMANDO MENDES RIBEIRO FILHO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química do Centro de Ciências e Tecnologia da Universidade Federal de Campina Grande, em cumprimento às exigências para obtenção do Grau de Mestre.

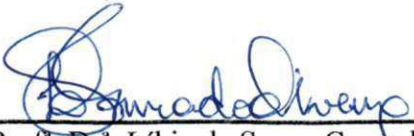
Aprovado em: 26 / 02 / 2010

BANCA EXAMINADORA

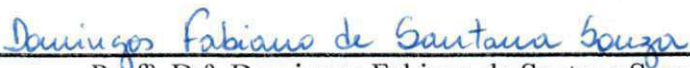


Prof^a. Dr^a. Odelsia Leonor Sanchez de Alsina
Orientadora - (CCT/UFCG)

Prof^o. Dr^o. Flávio Luiz Honorato da Silva
Examinador Externo - (CCT/UFCG)



Prof^a. Dr^a. Líbia de Sousa Conrado Oliveira
Examinadora Interna - (CCT/UFCG)



Prof^o. Dr^o. Domingos Fabiano de Santana Souza
Examinador Externo - (DEQ/CT/UFRN)

A DÚVIDA é a incrível certeza de que começamos a aprender
(Normando Mendes Ribeiro Filho)

A minha mãe, Cristina Garcia Carneiro Ribeiro, que me fez a pessoa que sou e sempre esteve ao meu lado, acreditando e incentivando todo o meu trabalho. **Ofereço e Dedico**

“Na vida a gente sofre hoje para aproveitar o amanhã”
(Cristina Garcia)

AGRADECIMENTOS

À energia infinita que nos guia e fortalece diariamente, por ter iluminado os meus caminhos, me dando força, saúde e vontade de vencer;

À professora Odelsia Leonor Sanchez de Alsina por sua orientação e maternidade na execução deste trabalho e por dividir comigo os seus conhecimentos;

Aos professores: Flávio Luis Honorato da Silva, DEQ/UFCG, pela atenção nos momentos que o procurei e por ter me dado a oportunidade de em seu nome conhecer a professora Odelsia; e Líbia de Sousa Conrado, DEQ/UFCG, pela atenção no desenvolvimento deste trabalho;

Ao agricultor e professor José Pires Dantas, pelo apoio sempre dado, na liberação do laboratório de tecido vegetal do Centro de Ciências e Tecnologia da UEPB, acreditando e incentivando todos que o rodeiam, servindo como exemplo de força, coragem e sabedoria;

À professora Vanusia Pires França por ter me dado apoio, nos momentos mais difíceis da minha graduação e pós-graduação, acreditando sempre em meu potencial, não medindo esforços para me auxiliar nas análises feitas no laboratório de tecido vegetal da UEPB.

À minha mãe, Cristina Garcia Carneiro Ribeiro, que sempre esteve ao meu lado lutando junto comigo para a realização desse sonho;

À minha irmã, Larissa Cristina Garcia Carneiro Ribeiro, pelo seu exemplo como irmã mais velha e amiga;

Aos meus sobrinhos, Bárbara e Henrique, que na ingenuidade dos seus respectivos, 5 e 1 ano, proporcionaram momento de descontração e alegria;

Ao meu primo, amigo e irmão, Ivan Ricarte Carneiro da Cruz, pelo incentivo intelectual e por me fazer o exemplo que não sou;

À Antonielly dos Santos Barbosa, e aos seus pais, Antônio Barboza da Silva e Severina Ramos dos Santos Barbosa, pelo apoio e incentivo;

A meu grande amigo e irmão, Maurílio Beltrão D'Albuquerque Cavalcanti, seus pais (tio Mário e tia Zélia), e sua esposa Suellen Lisboa Cavalcanti, por todas as acolhidas e atenções dadas a minha pessoa, desde a graduação em Química Industrial, até os pontos finais deste trabalho de pós-graduação;

Aos meus grandes amigos, Marcus Vinicius Sobral da Costa, Danilton Oliveira Azevedo e Robson Crispim, pelo apoio nos momentos de alegria de dificuldade;

A todos que correram atrás e ralaram junto nas disciplinas cursadas, em especial: ao chorochora de Milena Tavares, nervosismo de Antonielly Barbosa, desenrolamento de Jackeline Daniela, e a tranquilidade de Simone Gallani, obrigado a todas.

A todos que fazem parte do grupo de MEIOS POROSOS E SISTEMAS PARTICULADOS, pela receptividade, pela compreensão e a atenção durante toda a execução deste trabalho. Desde o cafezinho e ajuda do senhor Zé Lopes e senhor Nogueira, aos colegas que me auxiliaram em análises e me transmitiram suas experiências, em especial: Carlos Bispo, Siumara Alcantara, Hofsky Vieira, Ezenildo Emanuel e Adriano Sant'Ana.

A todas as pessoas que contribuíram, direta e indiretamente, para a realização deste trabalho.

SUMÁRIO

	Pág.:
LISTA DE SIMBOLOS	
LISTA DE QUADROS	
LISTA DE FIGURAS	
LISTA DE TABELAS	
RESUMO	
1. INTRODUÇÃO	10
2. OBJETIVOS	14
2.1 OBJETIVO GERAL	14
2.1.1 Objetivo Especifico	14
2.2 METAS	14
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
3.1. RESÍDUOS AGROINDUSTRIAIS	17
3.2. CAJU (<i>Anacardium occidentale L.</i>)	19
3.2. FERMENTAÇÃO SEMI-SÓLIDA	20
3.2.1. Microrganismos	21
3.3. ATIVIDADE DE ÁGUA	21
3.4. ISOTERMAS DE DESSORÇÃO	24
3.4.1. Modelos Matemáticos para ajuste das Isotermas de sorção	26
3.4.2. Descrição das Isotermas	27
3.4.2.1. Modelo de LANGMUIR	27
3.4.2.2. Modelo de BET	28
3.4.2.3. Modelo de GAB	28
3.4.2.4. Modelo de HALSEY	29
3.4.2.5. Modelo de OSWIN	29
3.4.2.6. Modelo de HENDERSON	29
3.4.2.7. Modelo de PELEG	30
3.4.2.8. Modelo de CHUNG & PFOST	30
3.4.3. Calor Isostérico	30
3.5. SECAGEM	31
3.5.1. Comportamento Geral da Secagem	32

2.5.2. Equações Empíricas	34
4. ESTADO DA ARTE	36
4.1. ENRIQUECIMENTO PROTÉICO, EM RESÍDUOS AGROINDUSTRIAIS	36
4.2. ISOTERMAS DE DESSORÇÃO DE RESÍDUOS AGROINDUSTRIAIS	36
4.3. CALOR ISOSTÉRICO EM PRODUTOS E RESÍDUOS AGROINDUTRAIS	37
4.4. SECAGEM DE PRODUTOS AGROINDUTRAIS	38
5. MATERIAL E MÉTODOS	41
5.1. LOCAL DE REALIZAÇÃO DO TRABALHO	41
5.2. CARACTERIZAÇÃO	41
5.2.1. Preparo do resíduo	41
5.2.2 Fermentação semi-sólida	42
5.2.3 Caracterização do resíduo seco e Enriquecido	42
5.2.3.1 Granulometria	43
5.2.3.2 Densidade aparente	43
5.2.3.3 Densidade real	43
5.2.3.4 Porosidade	44
5.2.3.5 pH	44
5.2.3.6 Cinzas	44
5.2.3.7. Umidade	45
5.2.3.8. °Brix	45
5.2.3.9. Açúcares redutores totais (ART) e Açúcares redutores (AR)	45
5.2.3.10. Fibra Bruta	46
5.2.3.11. Fibra em Detergente Neutra (FDN)	47
5.2.3.12. Fibra em Detergente Ácida (FDA)	47
5.2.3.13. Hemicelulose	47
5.2.3.14. Pectina	48
5.2.3.15. Proteína total	48
5.2.4. Aumento Nutricional Específico	49
5.3. ISOTERMAS DE DESSORÇÃO	49
5.3.1 Modelos matemáticos	50
5.3.2 Cálculos de entalpia	51
5.3.3 Calor Isostérico	51
5.3.4 Superfície exposta da matriz sólida (S_0)	52

5.4. CINÉTICA DE SECAGEM DO BAGAÇO DO PSEUDOFRUTO DO CAJU, <i>IN NATURA</i> E ENRIQUECIDO	53
5.4.1. Modelos matemáticos	53
5.4.2. Cálculo da Difusividade Aparente	54
6. RESULTADOS E DISCUSSÃO	56
6.1 CARACTERIZAÇÃO	56
6.2. ISOTERMAS DE DESSORÇÃO	59
6.2.1. Aplicação de modelos	61
6.2.1.1 Entalpias de adsorção	66
6.2.1.2 Calor Isostérico	69
6.2.1.3 Cálculo de Superfície exposta (S_0)	73
6.3. CINÉTICA DE SECAGEM	73
6.3.1. Cinética de secagem do bagaço do pseudofruto do caju, <i>in natura</i> e enriquecido.	74
6.3.2. Aplicação de modelos	76
7. CONSIDERAÇÕES FINAIS	82
7.1. RESUMO	82
7.1.1. Quanto à Caracterização	82
7.1.2. Quanto às Isotermas	82
7.1.3. Quanto ao Estudo Termodinâmico	83
7.1.4. Quanto à Cinética de Secagem	83
7.2. CONCLUSÃO	84
7.3. PERSPECTIVAS	85
8. REFERÊNCIAS	87
ANEXOS	96
ANEXO I: Isoterma de dessorção de umidade, na aplicação do modelo de BET tri- paramétrico, bagaço de caju <i>in natura</i> e enriquecido, nas temperaturas de 20, 30, 40 e 50°C.	96
ANEXO II: Isoterma de dessorção de umidade, na aplicação do modelo de BET de dois parâmetros, bagaço de caju <i>in natura</i> e enriquecido, nas temperaturas de 20, 30, 40 e 50°C.	97
ANEXO III: Distribuição valores preditos e residuais na aplicação do modelo de BET tri-paramétrico, bagaço de caju <i>in natura</i> e enriquecido, nas temperaturas de	98

20, 30, 40 e 50°C.

ANEXO IV: Distribuição valores preditos e residuais na aplicação do modelo de BET de dois parâmetros, bagaço de caju *in natura* e enriquecido, nas temperaturas de 20, 30, 40 e 50°C. 99

LISTA DE SIMBOLOS

ΔH_c e ΔH_k - função do calor de sorção da água

10 - Fator de conversão

$6,25$ - Fator de correção de proteínas, equivalente a 16% de nitrogênio contido nas proteínas

a - coeficiente angular

A e B - constantes da equação.

ABS - leitura no espectrofotômetro

A_{H_2O} - Área molecular da água

a_w - atividade de água

C e K - constante da equação de GAB

C_0 e K_0 - Constantes ajustadas com o efeito da temperatura

D_{ap} - difusividade aparente (m^2/min)

f - Fator da curva padrão

F - Fator de diluição

fd - Fator de diluição da amostra após o preparo

H_m - calores de sorção de multicamada

H_m - Entalpia de monocamada

H_n - calor de sorção de monocamada

H_n - Entalpia de multicamada

K_0 , K_1 , A_1 , A_2 e N - Parâmetros do modelo cinéticos, ajustados com os dados experimentais

L - Calor latente de vaporização da água livre

L - espessura para uma placa plana (L)

m - Massa da amostra (g)

m_f - Massa final da amostra

m_i - Massa inicial da amostra

mL - Mililitros

N_0 - Número de Avogadro

P - desvio percentual médio (%)

P - pressão de vapor da água no alimento a temperatura T

P_0 - pressão de vapor da água a temperatura T

PM_{H_2O} - Peso molecular de água

q_{st} - Calor isostérico líquido de sorção ($kJ.kg^{-1}$)

R - constante universal dos gases ($8,314kJ.kmol^{-1}.K^{-1}$)

R^2 - Coeficiente de correlação

RU - Razão de umidade adimensional

S_0 - Superfície exposta da matriz sólida (m^2/kg)

T - temperatura (K).

UR - umidade relativa (%)

V - Volume de água usado no preparo da diluição

V_1 - Volume ocupado

V_2 - Volume indicado pelo nível do óleo

$V_{amostra}$ - Volume de H_2SO_4 a 0,025N utilizado para titular a amostra pré-destilada

V_{branco} - Volume de H_2SO_4 a 0,025N utilizado para titular a amostra em branco pré-destilada;

X_0 - umidade inicial, bs

X_{bs} - Umidade em base seca (g de água/g do sólido seco)

X_c - umidade crítica

X_e - Umidade de equilíbrio, bs

XE_{exp} - Umidade de equilíbrio experimental (base seca)

XE_{teo} - Umidade de equilíbrio predito pelo modelo (base seca)

X_m - Umidade de monocamada (b.s)

λ - calor latente de condensação da água pura

λ_m - Entalpia de vaporização média

LISTA DE QUADROS

	Pág.:
QUADRO 3.1: Modelos para ajuste de isotermas de sorção de umidade	27
QUADRO 3.2 Modelos matemáticos para cinética de secagem.	34

LISTA DE FIGURAS

	Pág.:
Figura 3.1:	Fruto do cajueiro e o pseudofruto do cajueiro. 19
Figura 3.2:	Velocidade de reações e crescimento microbiano em função da atividade de água. 22
Figura 3.3:	Isotermas de sorção de umidade típica de alimentos. 25
Figura 3.4:	Conteúdo de umidade contra o tempo 32
Figura 3.5:	Velocidade de secagem em função do conteúdo de umidade do material 33
Figura 5.1:	Bagaço do pseudofruto do caju, <i>in natura</i> e enriquecido, secos triturados 42
Figura 6.1:	Perfil granulométrico do bagaço do pedúnculo do caju, <i>in natura</i> e enriquecido 59
Figura 6.2:	Isoterma de dessorção a 20, 30, 40 e 50°C do bagaço de caju <i>in natura</i> 60
Figura 6.3:	Isoterma de dessorção a 20, 30, 40 e 50°C do bagaço de caju <i>in natura</i> , aproximação na região de monocamada. 60
Figura 6.4:	Isoterma de dessorção a 20, 30, 40 e 50°C do bagaço de caju enriquecido. 60
Figura 6.5:	Isoterma de dessorção a 20, 30, 40 e 50°C do bagaço de caju enriquecido, aproximação na região de monocamada. 60
Figura 6.6:	Isotermas de dessorção de umidade bagaço do pedúnculo do caju <i>in natura</i> nas temperaturas de 20, 30, 40 e 50°C, na aplicação do modelo de GAB. 63
Figura 6.7	Isotermas de dessorção de umidade bagaço do pedúnculo do caju enriquecido, nas temperaturas de 20, 30, 40 e 50°C, na aplicação do modelo de GAB. 63
Figura 6.8:	Distribuição valores preditos e residuais na aplicação do modelo de GAB, bagaço de caju <i>in natura</i> , nas temperaturas de 20, 30, 40 e 50°C. 65
Figura 6.9	Distribuição valores preditos e residuais na aplicação do modelo de GAB, bagaço de caju <i>in natura</i> e enriquecido, nas temperaturas de 20, 30, 40 e 50°C. 65
Figura 6.10	Curvas de $\ln(a_w)$ versus $1/T$, baseadas na equação de Clausius-Clapeyron para bagaço do pedúnculo de caju <i>in natura</i> , em função 69

	da umidade	
Figura 6.11	Curvas de $\ln(a_w)$ versus $1/T$, baseadas na equação de Clausius-Clapeyron para bagaço do pedúnculo de caju enriquecido, em função da umidade.	69
Figura 6.12:	Calor isostérico de dessecção para bagaço de caju <i>in natura</i> em função do teor de água de equilíbrio.	71
Figura 6.13:	Calor isostérico de dessecção para bagaço de caju enriquecido em função do teor de água de equilíbrio.	71
Figura 6.14:	Conteúdo de umidade contra o tempo no processo de secagem do pseudofruto do caju, <i>in natura</i> .	74
Figura 6.15:	Conteúdo de umidade contra o tempo no processo de secagem do pseudofruto do caju, enriquecido.	74
Figura 6.16	Taxa de secagem do bagaço do pseudofruto do caju, <i>in natura</i> , em função do conteúdo de umidade	74
Figura 6.17	Taxa de secagem do bagaço do pseudofruto do caju, enriquecido, em função do conteúdo de umidade	74
Figura 6.18	Razão de umidade bagaço do pseudofruto do caju, <i>in natura</i> , em função do tempo	75
Figura 6.19	Razão de umidade do bagaço do pseudofruto do caju, enriquecido, em função do tempo	75
Figura 6.20	Cinética de secagem do bagaço do pseudofruto do caju <i>in natura</i> à 60°C, com aplicação do modelo de: Lewis, Page, Henderson and Pabis e Dois termos.	77
Figura 6.21	Cinética de secagem do bagaço do pseudofruto do caju enriquecido à 60°C, com aplicação do modelo de: Lewis, Page, Henderson and Pabis e Dois termos	78
Figura 6.22	Distribuição de resíduos da cinética de secagem do bagaço do pseudofruto do caju <i>in natura</i> a 60°C, com aplicação do modelo de: Lewis, Page, Henderson and Pabis e Dois termos.	79
Figura 6.23	Distribuição de resíduos da cinética de secagem do bagaço do pseudofruto do caju enriquecido a 60°C, com aplicação do modelo de: Lewis, Page, Henderson and Pabis e Dois termos.	80

LISTA DE TABELAS

		Pag.:
Tabela 6.1:	Caracterização físico-química bagaço do pedúnculo do caju, <i>in natura</i> e enriquecido proteicamente.	56
Tabela 6.2:	Dados obtidos com a aplicação de ajuste dos modelos matemáticos a partir das isotermas do bagaço de caju <i>in natura</i> e enriquecido.	61
Tabela 6.3:	Apresenta as variações de entalpia de adsorção a partir das constantes C e K, oriundas dos modelos matemáticos.	66
Tabela 6.4:	Parâmetro C da equação de GAB ajustado pelo modelo e calculado em função da temperatura.	67
Tabela 6.5:	Parâmetro K da equação de GAB ajustado pelo modelo e calculado em função da temperatura.	67
Tabela 6.6:	Valores de entalpia de monocamada (Hm) e multicamada (Hn) previstos pelo modelo de GAB.	68
Tabela 6.7:	Valores de calor de sorção do bagaço do pedunculo de caju, <i>in natura</i> e enriquecido.	70
Tabela 6.8:	Modelo de regressão ajustado aos valores experimentais do calor isostérico integral de dessorção (Qst), em kJ kg^{-1} , em função do teor de água de equilíbrio (Xbs), com seus respectivos coeficiente de determinação (R^2).	72
Tabela 6.9:	Valores de superfície exposta do bagaço de caju, <i>in natura</i> e enriquecido, a partir dos dados de monocamada obtidos do modelo de GAB.	73
Tabela 6.10:	Dados obtidos com a aplicação de ajuste dos modelos matemáticos a partir dos dados das isotermas do bagaço de caju <i>in natura</i> e enriquecido	76

RESUMO

RIBEIRO FILHO, N. M. Estudo da secagem de resíduos agroindustriais do processamento pseudofruto do caju enriquecidos para ração animal. Dissertação de mestrado, UFCG, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química. Área de Concentração: Operações e Processos, sob a Linha de pesquisa: Recursos Regionais e Meio Ambiente. Campina Grande/PB, Brasil.

RESUMO - Várias alternativas são propostas para reduzir o impacto das condições climáticas adversas na alimentação de ruminantes, dentre as quais se destaca o uso de resíduos e subprodutos da agricultura e da indústria alimentícia, uma alternativa de grande potencial, pois consiste no aproveitamento de materiais hoje desperdiçados. Um aproveitamento racional e eficiente desses resíduos como substrato para a produção de proteínas microbianas poderá dar resultados satisfatórios na produção de rações, contribuindo também para minimizar os problemas de perdas na industrialização das frutas tropicais. A produção de proteínas microbianas usando como substrato resíduos agroindustriais pode ser realizada por meio de fermentação semi-sólida que, além de requerer baixo investimento de capital e energia, praticamente não produz rejeitos. Os materiais *in natura* e enriquecidos são muito delicados e por isso requerem cuidado durante a secagem, sendo fundamental o conhecimento do comportamento higroscópico do mesmo e a qualidade do produto ao longo do tempo de armazenamento. O cajueiro (*Anacardium occidentale L.*) é uma cultura nativa do Nordeste do Brasil. Em peso, o caju é composto por 10% de castanha e 90% de pedúnculo. Destas, o pedúnculo apresenta a menor percentagem de industrialização. O aproveitamento visa, basicamente, o beneficiamento da castanha e, em menor escala o aproveitamento do pedúnculo, 15%. No processamento do pedúnculo é gerado como resíduo o bagaço, que pode ser aproveitado na alimentação animal através de enriquecimento protéico, por vias fermentativas. Para um correto armazenamento, bem como para a otimização das condições de fermentação, é necessário conhecimento sobre o equilíbrio higroscópico. O objetivo deste trabalho foi estudar o processo de secagem dos resíduos agroindustriais, do processamento do pseudofruto do caju, *in natura* e enriquecidos, com leveduras *Saccharomyces cerevisiae* visando o melhor armazenamento do produto final. O bagaço do pedúnculo de caju foi fermentado com 12% (m/m) de leveduras *Saccharomyces cerevisiae* a uma temperatura de 33°C utilizando um tempo de fermentação de 24h. As leveduras foram inativadas submetendo o enriquecido a uma temperatura de 60 °C durante 2 horas. As isotermas de dessorção foram obtidas nas temperaturas de 20, 30, 40 e 50 °C. A umidade de equilíbrio foi determinada por gravimetria e as atividades, mediante o equipamento Novasina®. Os dados experimentais foram ajustados aos modelos de GAB e BET di e tri-paramétrico. A escolha do melhor ajuste se deu, matematicamente, em função do coeficiente de determinação (R^2) e do desvio médio

RESUMO

relativo (P); e qualitativamente através da distribuição residual. Foi observado que o comportamento higroscópico do bagaço de caju *in natura* difere significativamente do resíduo enriquecido. O enriquecido apresenta menor afinidade pela água, provavelmente devido à presença de grupos hidrofóbicos na membrana do microrganismo, modificações na composição bem como, mudanças estruturais e físicas que acontecem durante a fermentação. A água presente no enriquecido apresentou maior atividade que no bagaço *in natura* indicando menores forças de interação superficial. O bagaço de caju *in natura* apresentou teores nutricionais baixos que são melhorados com o processo de fermentação semi-sólida, observa-se aumento em quase todos os parâmetros nutricionais. A equação de GAB foi a que melhor se ajustou aos dados das isotermas de dessorção do caju, *in natura* e enriquecido. Observando que, quanto maior a presença de proteínas na formulação do bagaço de caju, menor a necessidade de energia para se remover água do produto, através da capacidade hidrofóbica de algumas proteínas e que após o processo de enriquecimento, além de estarem em maior quantidade ainda estão mais estáveis pela proximidade do ponto isoelétrico destas, após o processo de fermentação. Observa-se que ambos os materiais, atingem umidade de equilíbrio (b.s) à aproximadamente 300 minutos. O enriquecido tem maior taxa de secagem que o *in natura*. A difusividade do bagaço *in natura* ($-1,83 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{min}$) é maior que a encontrada no enriquecido ($-1,46 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{min}$). Todos os modelos empíricos aplicados à ambos os materiais ajustaram-se bem aos dados experimentais, com valores de R^2 acima de 0,9, e podem ser utilizados na predição da razão de umidade em função do tempo. O modelo de Page, foi o que melhor se ajustou aos dados experimentais de ambos os materiais e apresentou menores desvios percentuais médios.

PALAVRAS-CHAVE: Bagaço de Caju, Enriquecimento protéico, Higroscopicidade.

INTRODUÇÃO

"OPORTUNIDADE, o esconderijo do desvendar"
(Normando Mendes Ribeiro Filho)

INTRODUÇÃO

1. INTRODUÇÃO

O Brasil é o maior produtor mundial de frutas tropicais e, graças às suas condições de solo e de clima diversificadas, pode também dedicar-se ao plantio de fruteiras de clima temperado e subtropical, produtos com elevado potencial para o mercado externo (MORGADO *et al.*, 2004). Deste potencial, resulta enorme quantidade de resíduos e subprodutos da agricultura e da agroindústria, com características de uso na alimentação de ruminantes (PRADO & MOREIRA, 2002).

A utilização de fontes alternativas de nutrientes, de baixo preço, pode colaborar na diminuição do custo de produção da carne bovina. Além do aspecto de agressão ambiental que os resíduos agroindustriais apresentam, o não aproveitamento dos mesmos constitui desperdício, uma vez que os resíduos podem ser fontes nutritivas para os ruminantes, pois são capazes de substituir componentes normalmente utilizados em rações, sem comprometer o desempenho dos animais que a estarão consumindo. Apresentam ainda, custos reduzidos principalmente para as produções que se encontram próximas das indústrias. Porém, existem algumas limitações que podem fazer com que os resíduos tenham uma utilização mais restrita, entre elas a quantidade de água, que acabam acarretando problemas de transporte, representado pelo alto custo da coleta, a conservação de seus resíduos e a necessidade, em alguns casos, de processos de tratamento para melhoria de seu valor nutritivo. Há muitas possibilidades de uso dos diferentes resíduos gerados pelas agroindústrias e não se pode afirmar que exista uma solução única, e sim usos potenciais de acordo com a situação de mercado e da indústria. Todavia, deve-se levar em consideração o preço do produto, o custo do transporte, já que muitas vezes o valor nutricional destes resíduos não é muito elevado (MAGGIONI & MARQUES, 2007).

Entre os principais resíduos agroindustriais estão os de caju, oriundo do cajueiro, que tem seu aproveitamento industrial realizado principalmente na região Nordeste. Este aproveitamento visa o beneficiamento de castanha e em menor escala o aproveitamento do pedúnculo. Mesmo o Brasil sendo o pioneiro e líder no que diz respeito ao aproveitamento do pedúnculo do caju, e considerando o aproveitamento deste em forma de sucos, doces, geléias, néctares, farinhas e fermentados, só 15% da produção do pedúnculo é utilizada. Uma das causas deste baixo aproveitamento está relacionada ao tempo de deterioração do pedúnculo, que ocasiona excessivas perdas no campo e na indústria (CAMPOS, 2003).

INTRODUÇÃO

Por ser rico em fibras não digeríveis e carente em vitaminas e proteínas, o rejeito da indústria de aproveitamento de pedúnculo de caju tem seu valor nutritivo limitado, sendo simplesmente utilizado como ração animal ou descartado no meio ambiente (CAMPOS *et al.*, 2005).

Para minimizar o impacto ambiental dos resíduos industriais do processamento de alimentos e agregar valor ao produto final, inúmeros estudos têm sido realizados utilizando os resíduos das indústrias alimentícias (CAMPOS *et al.*, 2005; CORREIA, 2004; HOLANDA *et al.*, 1998 *etc.*).

Um aproveitamento racional e eficiente desses resíduos como substrato para a produção de proteínas microbianas poderá dar resultados satisfatórios na produção de rações, contribuindo também para minimizar os problemas de perdas na industrialização das frutas tropicais. A produção de proteínas microbianas sobre os resíduos agroindustriais pode ser realizada por meio de fermentação semi-sólida que, além de requerer baixo investimento de capital e energia, praticamente não produz rejeitos; e pode ser aplicada em diversos substratos (ARAÚJO *et al.*, 2005).

Mediante a utilização de novas técnicas geradas ou adaptadas para as condições da região, através dos resíduos agroindustriais enriquecidos com os fungos *Saccharomyces cerevisiae*, *Candida utilis* e *Aspergillus niger*, pode-se produzir uma fonte alimentar de proteína, vitaminas e energia na alimentação animal, minimizando os gastos com fontes tradicionais de suplemento protéico (OLIVEIRA *et al.*, 2005).

A eficiência da conversão protéica por leveduras depende de fatores como temperatura, suprimento de oxigênio e disponibilidade de nutrientes (BURROWS, 1970) e o tempo médio para dobrar o teor de proteína é de 5 horas em sistema de fermentação por batelada (WORGAN, 1973). Diversos produtos têm sido usados com sucesso para processamento protéico por fermentação microbiana: resíduos de batata-doce (YANG, 1988); bagaço de laranja (MENEZES *et al.*, 1989); resíduos de mandioca (CANOILAS, 1991; MANILAL *et al.*, 1991) e beterraba forrageira (GIBBONS *et al.*, 1984). No entanto, YANG (1988) sugere que, para ser economicamente viável e competitiva, a bio-conversão protéica tem de ser processada no meio rural.

Os materiais *in natura* e enriquecidos são muito delicados e por isso requerem cuidado durante a secagem, principalmente por ser a temperatura a variável que mais influencia as propriedades do material e a qualidade do produto final.

INTRODUÇÃO

Além da secagem, outra etapa importante é a armazenagem; o material deve ser mantido em condições adequadas de forma a inibir ou evitar o crescimento de microrganismos, que podem gerar perdas de qualidade no material, inviabilizando sua utilização na alimentação de ruminantes, logo é de fundamental importância o conhecimento do comportamento higroscópico do mesmo. Para o processo de secagem as isotermas de dessorção têm maior relevância, uma vez que neste processo a umidade é removida do produto.

O processo de enriquecimento anterior ao processo de secagem surge como uma alternativa viável de minimizar a perda do resíduo do pseudofruto do caju, agregando valor ao produto, podendo este ser futuramente utilizado como ração animal.

OBJETIVOS

*"Acreditar é monótono, duvidar é apaixonante,
manter-se alerta: eis a vida."*

(Oscar Wilde)

OBJETIVOS

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GERAL

O objetivo geral deste trabalho foi de estudar a caracterização e a higroscopicidade, através de isotermas de sorção, do bagaço do pseudofruto do caju, *in natura* e enriquecido por via fermentativa, com o fungo *Saccharomyces cerevisiae*, avaliando seus calores de sorção visando o melhor armazenamento do produto final.

2.1.1. Objetivos específicos

Em função da importância e da necessidade do conhecimento das características e higroscopicidade dos resíduos agroindústrias do processamento do pseudofruto do caju enriquecidos, este trabalho desenvolveu-se nas seguintes etapas:

1. Caracterizar o bagaço do pedúnculo de caju, *in natura* e enriquecido;
2. Estudar às isotermas de dessorção do bagaço *in natura* e enriquecidos,
3. Ajustar às isotermas de dessorção usando modelos matemáticos da literatura;
4. Calcular os calores isostéricos de sorção;
5. Estudar á cinética de secagem do bagaço do pedúnculo de caju, *in natura* e enriquecido;
6. Ajustar às curvas experimentais de secagem usando modelos matemáticos disponíveis na literatura;

2.2. METAS

As metas desse trabalho são obter os produtos com maior valor agregado e elevado tempo de armazenamento, tendo como fonte produtora os resíduos da agroindústria do bagaço do pedúnculo do caju. Pretende-se armazenar suplementos protéicos e nutricionais com teor de proteína, de pelo menos, três vezes maior que o valor encontrado nos resíduos *in natura* e com alta digestibilidade. Dessa forma, para atingir as metas acima mencionadas, faz-se necessário estudar as condições operacionais de secagem e armazenamento, bem como, desenvolver e

OBJETIVOS

otimizar o processo, atingindo outra meta que é o desenvolvimento de uma tecnologia viável e econômica para ser executada *in loco* pelo homem do campo (enriquecimento nutricional).

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

*"Quando alguém pensa que ainda pode aprender,
progride espiritualmente; mas quando pensa que
já sabe tudo, torna-se idiota".*

(Friedrich von Logau)

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo trata da revisão bibliográfica, abordando os temas: os resíduos agroindustriais, caju, fermentação semi-sólida e microrganismos capazes de crescer em meio semi-sólido, atividade de água, isoterma de dessecamento, descrição das isotermas, calor isostérico, secagem e modelos empíricos para cinética de secagem.

3.1. RESÍDUOS AGROINDUSTRIAIS

Os resíduos agroindustriais são gerados no processamento de alimentos, fibras, couro, madeira, produção de açúcar e álcool, etc., sendo sua produção, geralmente, sazonal, condicionada pela maturidade da cultura ou oferta da matéria-prima. Os resíduos sólidos são constituídos pelas sobras de processo, descartes e lixo proveniente de embalagens, lodo de sistemas de tratamento de águas residuárias, além de lixo gerado no refeitório, pátio e escritório da agroindústria (DE MATOS, 2005).

Segundo a classificação da ABNT NBR 10004 (2004):

“Resíduos nos estados sólido e semi-sólido, que resultam de atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. Ficam incluídos nesta definição os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água, aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição, bem como determinados líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou corpos de água, ou exijam para isso soluções técnica e economicamente inviáveis em face à melhor tecnologia disponível”

Por serem os resíduos sólidos agroindustriais ricos em nutrientes, toda e qualquer técnica que vislumbre seu aproveitamento na alimentação animal ou agrícola torna-se interessante, tendo em vista que a reciclagem desses nutrientes é recomendável. No caso de não ser possível ou recomendável o aproveitamento desses resíduos “*in natura*”, técnicas de tratamento devem ser aplicadas com o fim de proporcionar transformações vantajosas em suas características químicas ou físicas. (DE MATOS, 2005)

Os resíduos orgânicos gerados pelas indústrias alimentícias acarretam problemas à saúde pública, como geração de maus odores, que são produzidos devido ao grande acúmulo de material orgânico e por falta de oxigênio, e a proliferação de vetores de doenças – moscas, mosquitos, baratas, ratos etc. De acordo com as normas legais brasileiras estes resíduos são

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

classificados como resíduos não-inertes, ou seja, são os resíduos que não apresentam periculosidade, porém não são inertes; podem ter propriedades tais como: combustibilidade, biodegradabilidade ou solubilidade em água.

O Brasil é o maior produtor mundial de frutas tropicais e, graças às suas condições de solo e de clima diversificadas, pode também dedicar-se ao plantio de fruteiras de clima temperado e subtropical, produtos com elevado potencial para o mercado externo (MORGADO *et al.*, 2004). Deste potencial, resulta enorme quantidade de resíduos e subprodutos da agricultura e da agroindústria, com características de uso na alimentação de ruminantes (PRADO & MOREIRA, 2002).

A utilização de fontes alternativas de nutrientes, de baixo preço, pode colaborar na diminuição do custo de produção da carne bovina. Além do aspecto de agressão ambiental que os resíduos agroindustriais apresentam, o não aproveitamento dos mesmos constitui desperdício, uma vez que os resíduos podem ser fontes nutritivas para os ruminantes, pois são capazes de substituir componentes normalmente utilizados em rações, sem comprometer o desempenho dos animais que a estarão consumindo. Apresentam ainda, custos reduzidos principalmente para as produções que se encontram próximas das indústrias. Porém, existem algumas limitações que podem fazer com que os resíduos tenham uma utilização mais restrita, entre elas a quantidade de água, que acabam acarretando problemas de transporte, representado pelo alto custo da coleta, a conservação de seus resíduos e a necessidade, em alguns casos, de processos de tratamento para melhoria de seu valor nutritivo. Há muitas possibilidades de uso dos diferentes resíduos gerados pelas agroindústrias e não se pode dizer que exista uma solução única, e sim usos potenciais de acordo com a situação de mercado e da indústria. Todavia, deve-se levar em consideração o preço do produto, o custo do transporte, já que muitas vezes o valor nutricional destes resíduos não são muito elevados (MAGGIONI & MARQUES, 2007).

O pseudo-fruto do caju é um dos resíduos agroindústrias de potencial nutritivo, que vem sendo desperdiçado nos campos e na indústria. Apesar do aproveitamento industrial do caju ser realizado principalmente na região Nordeste do país. Esse aproveitamento visa, basicamente, o beneficiamento da castanha e, em menor escala o aproveitamento do pedúnculo. Mesmo considerando o aproveitamento do pedúnculo sob a forma de sucos, doces, geléias, néctares, farinhas e fermentados, só 15% da produção do pedúnculo é utilizada. Uma das causas para esse baixo aproveitamento está relacionada ao tempo de deterioração do pedúnculo, que ocasiona excessivas perdas no campo e na indústria (CAMPOS, 2003). Estas

perdas podem ser amenizadas através da utilização deste resíduos na alimentação animal, aplicando técnicas de enriquecimento através de fermentação semi-sólida.

3.2. CAJU (*Anacardium occidentale* L.)

O cajueiro (*Anacardium occidentale* L.) é uma cultura perene, nativa do Nordeste do Brasil encontra-se disseminado em todo o mundo tropical, sendo cada vez maior o interesse em sua exploração econômica, notadamente nas regiões agrícolas menos desenvolvidas, pelas características de geração de emprego e renda. O fruto do cajueiro, compõe-se de castanha - o verdadeiro fruto - e de um pedúnculo hipertrofiado - o pseudofruto. Apesar do potencial de quase toda a área do território brasileiro para o cultivo desta espécie, 96% da área cultivada encontra-se no Nordeste, principalmente nos estados do Ceará, Piauí e Rio Grande do Norte (RAMOS et al., 1996).

A figura 3.1 apresenta o fruto e o pseudofruto do cajueiro disposto no campo.

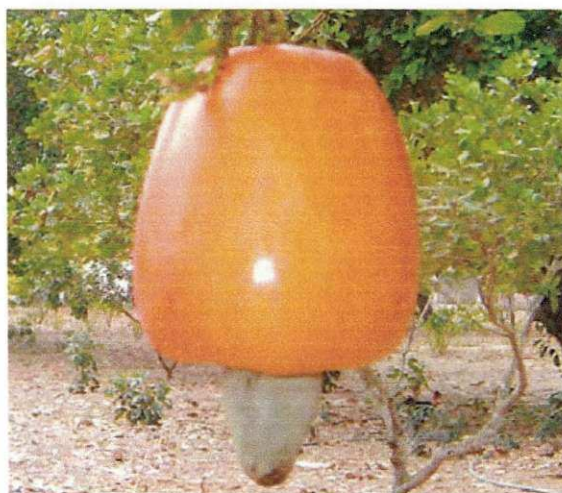


FIGURA 3.1: Fruto do cajueiro e o pseudofruto do cajueiro
Fonte: USAID/BRASIL (2006).

Embora o cajueiro possua um conjunto de produtos de cunho alimentício, o de maior valor econômico é a castanha de caju, onde se extrai a amêndoa utilizada como alimento humano em formas variadas.

Em peso, o caju é composto por 10% de castanha e 90% de pedúnculo. Destas duas partes, o pedúnculo apresenta a menor percentagem de industrialização. Estima-se que o seu aproveitamento visa, basicamente, o beneficiamento da castanha e, em menor escala o

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

aproveitamento do mesmo (CAMPOS, 2003). O grande desperdício do pedúnculo é devido ao reduzido período de pós colheita, associada a pequena capacidade de absorção da indústria, curto período de safra e inexistência de métodos econômicos de preservação da matéria-prima.

A cajucultura desempenha papel de destaque na economia nordestina, em razão da castanha ser o principal produto da pauta de exportação do agronegócio no Ceará. No ano de 2005, a produção de castanha de caju no Brasil de 147.629 toneladas ocupou uma área de 690.131 ha (IBGE, 2006). A supervalorização da castanha juntamente com o curto período de prateleira do pedúnculo faz com que grande parte do mesmo não seja aproveitada. Maiores perdas desse material ocorrem no momento do descastanhamento feito para a indústria de beneficiamento da castanha. Picos de produção do caju concentram-se na época seca do ano, ou seja, época caracterizada pela baixa produção de forragem e elevados preços dos grãos e dos concentrados deles obtidos. Assim, a utilização do pedúnculo do caju desidratado como aditivo na ensilagem, tornaria possível a redução nos custos de produção animal e seria mais uma alternativa alimentar para ruminantes. Normalmente, os que trabalham com o pedúnculo industrializam outros tipos de frutos, visto ser a safra do caju de apenas quatro meses (USAID/BRASIL, 2006).

Uma das formas que vêm a viabilizar e dar melhor características nutricionais ao bagaço do pseudofruto do caju seria a técnica de fermentação semi-sólida por inoculação de leveduras. Esta tem a função de aumentar o teor protéico do meio fazendo uso dos carboidratos existentes.

3.3. FERMENTAÇÃO SEMI-SÓLIDA

Em nível industrial, no Brasil, o processo de fermentação submersa continua sendo o principal sistema de geração de produtos biotecnológicos, sendo insignificante o número de empresas que empregam a fermentação semi-sólida para este fim. Por ser uma técnica ainda não muito difundida, os pesquisadores divergem quanto à definição do processo da fermentação semi-sólida (CAMPOS, 2003; OLIVEIRA, 2007; SCHMIDELL et al., 2001).

Este processo pode ser chamado como fermentação em estado sólido, fermentação em meio semi-sólido ou simplesmente semi-sólida. SCHMIDELL et al. (2001), define como o processo que se refere à cultura de microrganismos sobre ou dentro de partículas em matriz sólida, onde o conteúdo de líquido ligado a ela está a um nível de atividade de água que, por

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

um lado, assegure o crescimento e metabolismo das células e, por outro lado, não exceda à máxima capacidade de ligação da água com a matriz sólida. Tipicamente, este processo, ocorre a uma atividade de água (a_w) entre 0,4 a 0,9, em um estado asséptico e natural (NIGAM & SINGH, 1994).

Para um melhor desempenho do processo fermentativo, a escolha da cepa do microrganismos deve levar em conta detalhes deste processo, como meio de cultura e condições ambientais da fermentação (temperatura e umidade do sistema), pois a fermentação semi-sólida (FSS) tem obtido sucesso com vários tipos de transformação, seja ela por fungos ou bactérias.

3.3.1. Microrganismos para fermentação semi-sólida

Muitos microrganismos são capazes de crescer em substrato sólido, mas só os fungos filamentados podem crescer significativamente na ausência de água livre. Bactérias e fermentos crescem em substrato sólido com teor de umidade de 40 a 70%, como na compostagem ou ensilagem aeróbia ou anaeróbia, mas o crescimento e propagação das células ricas em proteínas sempre requerem água livre (RAGHAVARAO, 2003).

Para obtenção de enriquecidos protéicos, podem ser citados, dentre muitos outros, o uso de culturas de *Rizopus* (ALBUQUERQUE et. al., 2003), *Candida* (CACOILAS, 1991), *Aspergillus* (MORAES, 1999) e *Saccharomyces* (ARAÚJO et. al., 2003).

Segundo PARK & RAMIREZ (1989), as leveduras de panificação são organismos atrativos para produção comercial de proteína em virtude da fácil propagação fermentativa e por não terem relação patogênica com o homem. As leveduras do tipo *Saccharomyces cerevisiae* são empregadas, com alta frequência, na obtenção de produtos de consumo diário, entre eles pães e bebidas alcoólicas, destacando-se as fermentadas e fermento-destiladas.

3.4. ATIVIDADE DE ÁGUA

A água é um componente inerente aos alimentos e, ao mesmo tempo, responsável por criar um ambiente propício ao desenvolvimento e ao crescimento microbiano. O decréscimo no teor de água livre dos alimentos eleva a pressão osmótica deste e, por conseguinte, retarda a proliferação de microrganismos, bem como a atividade enzimática desencadeadora de uma

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

séria de desordens nos alimentos. A eliminação da umidade leva à redução no peso dos produtos, acompanhada pela diminuição do volume, fato que incide na redução dos custos de transporte, embalagem e armazenamento de alimentos (OETTERER et. al., 2006).

Uma grande quantidade de alimentos tradicionais são conservados através do abaixamento da atividade de água, mediante desidratações e possuem uma faixa de a_w considerada baixa ($a_w < 0,60$).

Segundo HEIDELBAUG & KAREL (1975) a atividade de água é uma propriedade fundamental para a conservação e armazenamento, por exercer efeito nas ligações da água na estrutura do alimento. Dessa forma alimentos que possuem a mesma quantidade de umidade podem deste modo, possuir diferentes atividades de água dependendo, do seu conteúdo de água ligada na sua estrutura de um produto, sendo um parâmetro mais importante que o pH, teor de umidade e outras propriedades estudadas nos alimentos.

O valor máximo da atividade de água (a_w) para a água pura é 1. Nos alimentos ricos em água, com a_w acima de 0,90 a formação de soluções diluídas com os alimentos serve de substrato para reações químicas e desenvolvimento microbiano. Quando a a_w está entre 0,40 e 0,80 há aceleração das reações químicas pelo aumento da concentração dos substratos, próximo a 0,60 cessa a atividade microbiana e para a_w inferior a 0,30 atinge-se a zona de adsorção primária (ARAGÃO, 2008). A Figura 3.2 apresenta as velocidades de reação e crescimento microbiano em função da atividade de água.

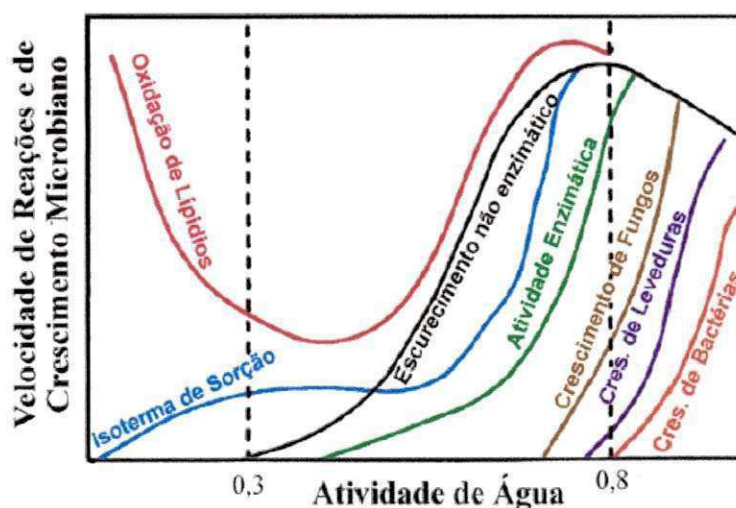


FIGURA 3.2: Velocidade de reações e crescimento microbiano em função da atividade de água.

Fonte: BOBBIO (1992)

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

De acordo com WELTI & VERGARA (1997) a atividade de água é muito adequada para indicar a estabilidade de um produto, levando em conta a interação da água com outros constituintes dos alimentos em condições de equilíbrio termodinâmico e pode ser considerada uma medida indireta da água que está disponível em um produto.

A relação existente entre a água e outros compostos de um produto definem a sua higroscopicidade e torna-se uma característica essencial que vai influenciar em diferentes etapas do processamento, armazenamento e consumo de materiais biológicos (TEIXEIRA NETO & QUAST, 1993).

A atividade de água é definida, na equação 3.1, como a relação entre a pressão de vapor da água no ar e a pressão de vapor da água no ar saturado, medidas à mesma temperatura. Quando se refere à atividade de água de um alimento, isto significa a relação entre a pressão de vapor de água no alimento (P) e a pressão de vapor de água pura (P₀), medidas à mesma temperatura. Tem influência no desenvolvimento de microrganismos em alimentos, velocidade de reações enzimáticas, oxidação de lipídeos, hidrólise e escurecimento não-significativo, assim como na cristalização e retrogradação que podem ocorrer em alimentos (GOUVEIA, 1999).

$$a_w = \frac{P}{p_0} \times 100 \quad (3.1)$$

a_w - atividade de água

P – pressão de vapor da água no alimento a temperatura T

P₀ - pressão de vapor da água a temperatura T

FIGLIORINI (2004), afirma ser a atividade de água um dos principais fatores que governam a conservação ou deterioração dos alimentos, e a define, na equação 3.1, como a razão entre a pressão de vapor da água na superfície do alimento em equilíbrio com o ambiente em que se encontra, e a pressão de vapor do ar em contato com uma superfície de água líquida, e é numericamente igual à umidade relativa do ar em equilíbrio com a umidade do produto, equação 3.2.

$$a_w = \frac{UR}{100} \quad (3.2)$$

UR - umidade relativa (%)

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Segundo PARK et. al. (2001), o estudo da atividade de água pode ser realizado através das isotermas de sorção. Uma isoterma de sorção é uma curva que descreve, em uma umidade específica, a relação de equilíbrio entre uma quantidade de água sorvida por componentes do material biológico e a pressão de vapor ou umidade relativa, a uma dada temperatura. Esta relação depende da composição química dos alimentos (gorduras, amido, açúcar, proteínas, entre outras) sendo determinadas experimentalmente.

3.4. ISOTERMAS DE DESSORÇÃO

As isotermas de sorção são representações gráficas da dependência da atividade de água e teor de umidade de um produto alimentício a temperatura e pressões definidas, e são determinadas experimentalmente. São classificadas de acordo com a determinação da umidade do produto, seja durante o processo de umedecimento ou de secagem em isotermas de adsorção e de desorção (SILVA, 2004).

De acordo com ARAGÃO (2008) são curvas de equilíbrio obtidas a partir dos dados de umidade de equilíbrio do material correspondente às umidades relativas ou à atividade de água para uma determinada temperatura.

Pelas isotermas de sorção compreende-se à possibilidade de atingir um teor de umidade de equilíbrio ideal para conservação do produto, a uma dada temperatura e umidade relativa. O conhecimento das curvas de sorção é indispensável para determinar o teor de água final necessário para estabilizar o produto (ALONSO, 2001).

Segundo EIROA (1997), a isoterma de sorção permite o conhecimento do teor de umidade de equilíbrio de um alimento que se encontra exposto a um ambiente de umidade relativa e temperatura conhecida. Vista de outra maneira a isoterma indica o valor da atividade de água de um alimento que contém uma determinada quantidade de água e é mantido a uma temperatura constante.

As isotermas de sorção dão informações indispensáveis ao processo, através destas que se determina o valor de monocamada da 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 indicam as reações químicas indesejáveis no produto, além de ser esta região onde irá ocorrer um desperdício maior de energia para retirada da água residual do produto. A partir da construção de isotermas, pode-se resolver numerosos problemas de processamento e estocagem de produtos alimentícios.

A Figura 3.3 esquematiza uma isoterma de sorção, típica de produtos alimentícios, normalmente conhecida como “mapa de estabilidade dos alimentos”. Dividida em três zonas, cada uma destas zonas está associado com uma interação diferente da água. A maioria das reações químicas e o crescimento microbiano são reduzidos consideravelmente quando se diminui a atividade de água. Também se pode observar o fenômeno de histerese que provoca relações diferentes entre o conteúdo de umidade e a atividade de água, em adsorção e em dessorção. A histerese parece ser um índice de que o alimento não está em um verdadeiro equilíbrio termodinâmico (SILVA, 2004).

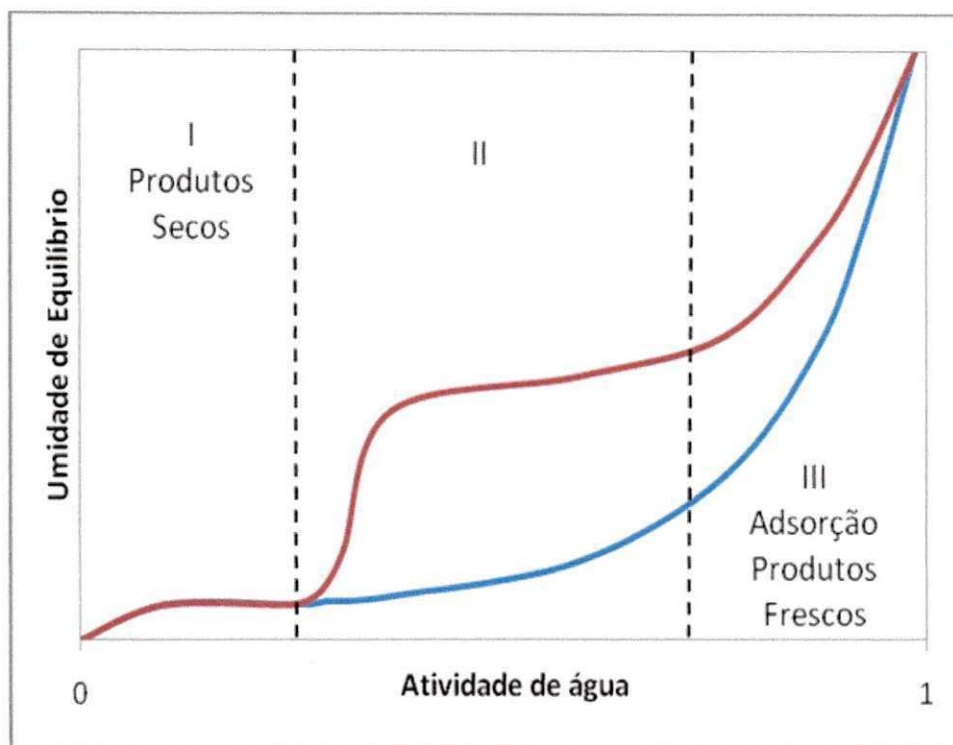


FIGURA 3.3: Isotermas de sorção de umidade típica de alimentos
Fonte: WELTI & VERGARA (1997)

A figura 3.3, apresenta 3 zonas típicas de isotermas. A zona I da isoterma, onde a_w está entre 0 e aproximadamente 0,25, representa água fortemente unida a sítios polares, sendo a mesma difícil de eliminar durante a secagem e no congelamento a -40°C . Esta água que está em uma quantidade pequena, trás um efeito plastificante no sólido e se comporta como parte do mesmo. O limite entre zona I e a zona II se tem associado ao conteúdo de umidade de monocamada do alimento e representa a fração de água que atua diretamente com a superfície de grupos polares. A zona II da isoterma, corresponde aproximadamente a níveis de a_w entre

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

0,25 e 0,80. Nesta zona, a água forma capas adicionais ao redor dos grupos polares denominando-se de “água de multicapa”. Esta água tem propriedades diferentes da água pura. A água da zona I e zona II combinada, representa 5% do total de água em um alimento de alta umidade. A zona III da isoterma corresponde a valores de a_w maiores de 0,80. Frequentemente a proporção de água na parte superior deste zona, se conhece como água disponível. Esta água constitui 95% (m/m) da água total de um alimento de alta umidade, é suficientemente abundante para permitir reações químicas deteriorativas e ao crescimento microbiano (SILVA, 2004).

3.4.1. Modelos Matemáticos para ajuste das Isotermas de sorção

As isotermas de sorção podem ser descritas através de modelos de ajuste matemáticos. Segundo SANTINI (1996), os modelos matemáticos que descrevem isotermas de sorção são de fundamental importância, pois com um certo número de pontos experimentais é possível ajustar uma isoterma teórica e desta forma fazer a correspondência entre conteúdo de umidade do alimento (X) e atividade de água (a_w), podendo-se extrapolar valores para faixas de difícil determinação experimental.

Um grande número de modelos que descrevem as isotermas de sorção são encontrados na literatura, e recomendados por vários pesquisadores para predição do teor de umidade de equilíbrio higroscópico de alimentos (KIRANOUDIS 1997; KAYMAK-ERTEKIN e SULTANOGLU, 2000; PARK *et al.*, 2001).

Diversos pesquisadores, com intuito de prever o comportamento das isotermas propuseram modelos de ajuste de isotermas de sorção, que totalizam cerca de 77 diferentes equações. Estes modelos são empíricos e alguns são apresentados a seguir no quadro 3.1.

QUADRO 3.1: Modelos para ajuste de isotermas de sorção de umidade

NOME DO MODELO	MODELO	Equação
LANGMUIR	$\frac{X_e}{X_m} = \frac{C a_w}{1 + C a_w}$	(3.3)
BET Triparamétrico (BRUNAUER, EMMETT e TELLER)	$X_e = \frac{(X_m C a_w)(1 - (n+1)a_w^n + n a_w^{n+1})}{(1 - a_w)(1 + (C-1)a_w - C a_w^{n+1})}$	(3.4)
BET Diparamétrico (BRUNAUER, EMMETT e TELLER)	$\frac{X_e}{X_m} = \frac{C a_w}{(1 - a_w)(1 + a_w(C-1))}$	(3.5)
GAB (GUGGHENHEIM, ANDERSON e de BOER)	$X_e = \frac{X_m C k a_w}{(1 - k a_w)(1 - k a_w + C k a_w)}$	(3.6)
HALSEY	$a_w = \exp\left(\frac{-A}{X_e^B}\right)$	(3.7)
OSWIN	$X_e = A \left(\frac{a_w}{1 - a_w}\right)^B$	(3.8)
HENDERSON	$1 - a_w = \exp\left[-(K \cdot X_e^n)\right]$	(3.9)
PELEG	$X_e = k_1 a_w^{n_1} + k_2 a_w^{n_2}$	(3.10)
CHUNG & PFOST	$\ln a_w = -\frac{A}{RT} \exp[-B X_e]$	(3.11)

Apesar das dificuldades apresentadas pelas equações teóricas, algumas considerações termodinâmicas são indispensáveis. Uma das importantes implicações das equações de isotermas são as energias de ligação de água traduzidas nas energias de adsorção. A outra importante consideração é acerca dos valores de monocamada molecular de água, indicativas da relação com as reações químicas determinantes da deterioração dos materiais biológicos, (BROD, 2003)

3.4.2. Descrição das Isotermas

3.4.2.1. Modelo de LANGMUIR

Considerando, a condição de equilíbrio aplicada a água livre fornece, termodinamicamente, a taxa de evaporação idêntica à taxa de condensação. Baseada nesta

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

premissa, Langmuir propôs a equação 3.3 (KEEY 1972). Onde, X_e – teor de umidade de equilíbrio, kg.kg^{-1} ; X_m – teor de umidade na monocamada, kg.kg^{-1} ; a_w – atividade de água; e C – constante da equação.

3.4.2.2. Modelo de BET

A equação BET, representada pela equação 3.4, é o modelo bastante utilizado, fornecendo um ajuste dos dados para uma grande variedade de alimentos que possuam uma atividade de água na região de $0,05 < a_w < 0,45$. Foi ampliando o conceito de Langmuir e tecendo considerações da natureza química da água, BRUNAUER, EMMET e TELLER (1938) propuseram para camadas multimoleculares. Para casos especiais deste equação, quando n é igual a 1, a equação fica reduzida a equação de Langmuir (equação 3.3); já quando n tende a infinito, ela se reduz a equação de BET linearizada, equação 3.5.

3.4.2.3. Modelo de GAB

GUGGHENHEIM (1966), ANDERSON (1946) e de BOER (1953) estenderam as teorias de adsorção física de BET, resultando em uma equação tri paramétrica, que permite um melhor ajuste aos dados de sorção dos alimentos até a atividade de água de 0,9, a equação de GAB (PARK e NOGUEIRA, 1992).

Esta, equação 3.6, com três parâmetros é um melhoramento das teorias BET e Langmuir e tem sido sugerida por diversos pesquisadores. Onde X_{eq} é o conteúdo de umidade de equilíbrio em base seca ($\text{g água/g sólidos secos}$), a_w a atividade de água, X_m o conteúdo de umidade de monocamada (base seca), C a constante relacionada com o calor de sorção da monocamada e K a constante relacionada com o calor total de sorção. Os parâmetros C e K foram ajustados em função da temperatura através de equações 3.12 e 3.13 do tipo Arrhenius.

$$C = C_0 \exp\left(\frac{\Delta H_c}{RT}\right) \quad (3.12)$$

$$K = k_0 \exp\left(\frac{\Delta H_k}{RT}\right) \quad (3.13)$$

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Onde, C e K - constante da equação de GAB; C_0 e K_0 - constantes ajustadas com o efeito da temperatura; ΔH_c e ΔH_k - função do calor de sorção da água; R - constante universal dos gases (8,314 J/mol.K); T - temperatura (K).

$$\Delta H_c = H_m - H_n \quad (3.14)$$

$$\Delta H_k = \lambda - H_n \quad (3.15)$$

Onde ΔH_c e ΔH_k são funções do calor de sorção da água: $\Delta H_c = H_m - H_n$ e $\Delta H_k = \lambda - H_n$. nas expressões acima C_0 e K_0 são constantes ajustadas com o efeito da temperatura, H_m e H_n os calores de sorção de monocamada e multicamada de água, respectivamente e λ o calor latente de condensação da água pura.

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 de equação de GAB podem ser obtidos diretamente através da regressão não-linear.

3.4.2.4. Modelo de HALSEY

HALSEY (1948) desenvolveu um modelo, da equação 3.7, para a condensação das camadas a uma distância relativamente grande da superfície. Onde, A e B - constantes da equação.

3.4.2.5. Modelo de OSWIN

Segundo CHINNAN e BEAUCHAT (1985), o modelo de OSWIN, equação 3.8, se baseia na expansão matemática para curvas de formato sigmoideal. Apresenta algumas vantagens sobre os modelos cinéticos de BET e GAB, pois apenas possui duas constantes de fácil linearização.

3.4.2.6. Modelo de HENDERSON

O modelo de Henderson, disposto na equação 3.9, é um das predições empírica mais usadas para isotermas (ASAE, 1991).

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.4.2.7. Modelo de PELEG

O modelo empírico de quatro parâmetros, disposto na equação 3.10, e que tenta conjugar duas tendências em uma equação (PELEG 1993).

3.4.2.8. Modelo de CHUNG & PFOST

Este modelo, expresso na equação 3.11, é baseado na premissa que a variação na energia livre para a adsorção está relacionada com a umidade, CHUNG e PFOST (1967). Onde, A e B – constante da equação; e R – constante universal dos Gases.

3.4.3. Calor Isostérico

O calor isostérico de sorção é um bom parâmetro para estimar a quantidade mínima de calor requerido para remover uma dada quantidade de água e permite algumas deduções sobre a microestrutura do alimento e as mudanças físicas que acontecem em sua superfície (DURAL & HINES, 1993).

De acordo com alguns pesquisadores (WANG & BRENNAN, 1991; SOPADE & AJISERIGI, 1994; SILVA et al., 2002) o conhecimento do calor de sorção, em função do conteúdo de água, é essencial nos estudos de secagem e armazenagem de produtos agrícolas servindo para estimar as necessidades energéticas do processo de secagem.

Para determinação do calor isostérico, diversos pesquisadores consideraram o calor de sorção de umidade dependente da temperatura. Isto é uma consideração conveniente que permite um cálculo facilitado do calor isostérico das isotermas de sorção (SILVA et al., 2002).

Segundo Yoshida (1997), o calor isostérico de sorção é obtido a partir de dados de sorção e é definido como a diferença entre a entalpia da água na fase de vapor e a entalpia da água líquida adsorvida no sólido, a uma dada concentração, isto é, ele representa a quantidade de energia necessária para evaporar a água adsorvida, na fase sólida.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.5. SECAGEM

O interesse por alimentos desidratados tem crescido paralelamente ao aumento da demanda por alimentos “prontos para o consumo” (ROMERO-PEÑA & KIECKBUSCH, 2003).

Na secagem, uma vez que o produto é colocado em contato com o ar quente, ocorre transferência de calor do ar para o produto devido a diferença de temperatura existente entre estes. Simultaneamente, a diferença de pressão parcial de vapor de água existente entre o ar e a superfície do produto proporciona transferência de massa para o ar na forma de vapor de água (RODRIGUES et al, 2002)

Quando o ar é aquecido, o seu potencial de absorção de água aumenta, neste caso algumas de suas propriedades psicrométricas mudam e outras permanecem constantes. As mudanças ocorridas no ar atmosférico após o aquecimento são: incrementos na entalpia específica (kJ/kg de ar seco) e no volume específico do ar seco (m^3/kg de ar seco); decréscimo na umidade relativa (%); a pressão de vapor (kPa) e a razão de mistura (kg de vapor d'água de ar seco) permanece constante. Na secagem, a temperatura do ar diminui, em consequência do aumento de temperatura do produto e do resfriamento evaporativo que acompanha a transferência de umidade. Do mesmo modo, há incremento na umidade relativa (%) e decréscimo na temperatura de bulbo seco ($^{\circ}C$) (SILVA, 2000).

A secagem com ar quente é um processo artificial, mecânico e indispensável, destinado a remover o excesso de umidade até o limite conveniente, sem que ocorram significativas alterações nas propriedades físicas, químicas e biológicas dos alimentos.

Em um produto biológico, parte do líquido encontra-se de forma relativamente disponível, dentro de capilares, enquanto que outra parte encontra-se dentro de células, que durante o processo, migram lentamente por difusão de umidade através de membrana celular. O processo convectivo passa a ser regido pela difusividade, quando a superfície do produto apresenta-se seca, enquanto que seu interior ainda se encontra com alta umidade, causando uma tensão, que pode ocasionar rachaduras no produto (FIOREZE, 2004).

Alguns autores propõem vários mecanismos físicos para descrever a transferência de umidade nos produtos capilares porosos entre os quais se destacam: 1) movimento de líquido devido às forças superficiais (difusão capilar); 2) movimento de líquidos devido a diferença na concentração de umidade (difusão líquida); 3) movimento de líquido devido a difusão da umidade na superfície dos poros; 4) movimento de vapor devido a diferença de concentração de vapor (difusão de vapor); 5) movimento de vapor devido a diferença de temperatura

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

(difusão térmica); 6) movimento de água e de vapor devido a diferença de pressão total (fluxo hidrodinâmico). Os parâmetros destes mecanismos relacionados a variação do conteúdo de umidade com o tempo que tem influência significativa no processo de secagem, envolve as condições externas, como: temperatura do ar de secagem, umidade relativa do ar, velocidade do ar e a geometria da partícula (STRUMILLO & KUNDRA, 1986)

3.5.1. Comportamento Geral da Secagem

O fenômeno de secagem não pode ser generalizado, principalmente quando se trata de materiais biológicos que possuem características intrínsecas muito diferentes entre si. O processo não é um processo uniforme e contínuo com um único mecanismo de controle, possuindo períodos transitórios e distintos. Porém, é possível definir a duração dos períodos que fazem parte de processo (SILVA, 2004).

No estudo de um material, os dados obtidos experimentalmente relacionam em geral o conteúdo de umidade com o tempo. As curvas características de secagem podem ser representadas de diferentes formas e apresentam diferentes períodos de secagem, conforme ilustram as figuras 3.4 e 3.5 (STRUMILLO & KUNDRA, 1986).

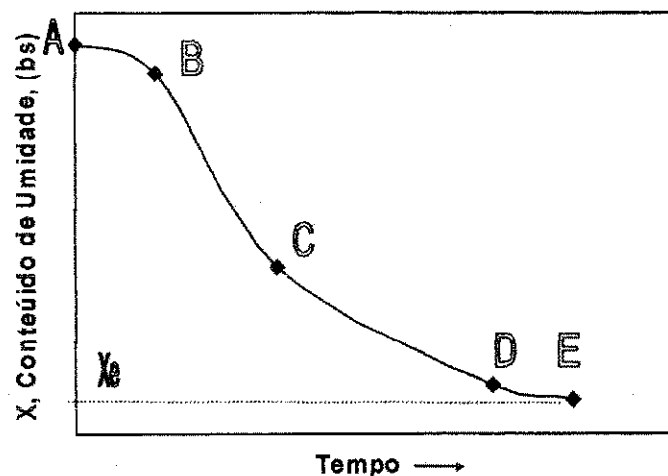


Figura 3.4: Conteúdo de umidade contra o tempo

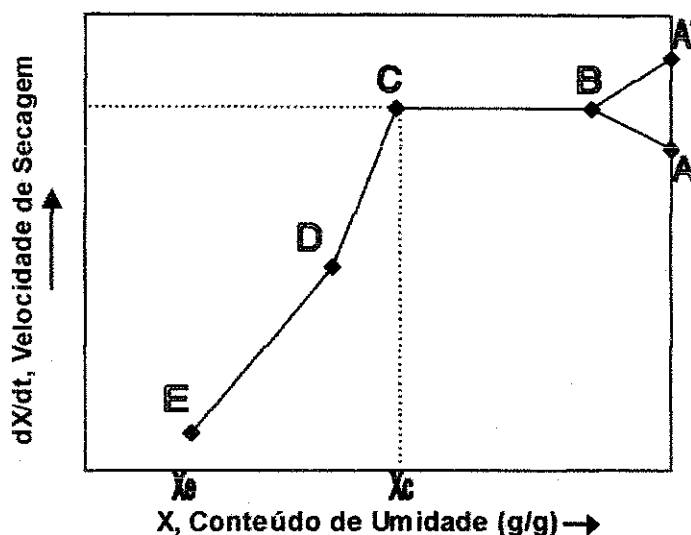


Figura 3.5: Velocidade de secagem em função do conteúdo de umidade do material

Onde: AB- Período de Adaptação; BC – Período de Velocidade Constante; CD – Período de Velocidade Decrescente (1°); C - Teor Crítico do Conteúdo de Umidade; e DE – Período de Velocidade Decrescente (2°)

Nas figuras 3.4 e 3.5, o trecho BC corresponde ao período de velocidade constante, o ponto C corresponde ao fim deste período, tendo como coordenadas a velocidade constante de secagem (dX/dt) e o conteúdo de umidade crítica (X_c). O trecho da curva CD corresponde ao primeiro período de velocidade decrescente onde, na maioria dos casos, a velocidade de secagem decresce linearmente. A partir do ponto D vem a etapa do segundo período de velocidade decrescente, onde o conteúdo de umidade do material diminui até alcançar o conteúdo de umidade de equilíbrio para as condições usadas. A partir daí, a velocidade de secagem é nula e não ocorre mais transferência de massa (TRAVAGLINI et. al., 1997).

O tempo de secagem é diminuído quando se aumenta a temperatura e vazão do ar. A curva de secagem varia conforme o alimento, com os diferentes tipos de secadores, e em resposta às variações das condições de secagem tais como a temperatura do ar, o sentido do ar, a espessura do alimento, dentre outros fatores.

2.5.2. Equações Empíricas para Cinética de Secagem

Alguns modelos matemáticos que descrevem a secagem em camada fina são muito comuns e empregados para prever o comportamento cinético de grãos e frutas. Os modelos matemáticos são representados no Quadro 3.2.

QUADRO 3.2: Modelos matemáticos para cinética de secagem.

Modelo	Equação	Equação
De Lewis	$RU = e^{(-K_1 t)}$	3.16
De Page	$RU = e^{(-K_1 (t)^N)}$	3.17
De Henderson and Pabis	$RU = A_1 e^{(-K_1 t)}$	3.18
Logarítmico	$RU = A_1 e^{(-K_1 t)} + A_2$	3.19
Dois Termos	$RU = A_1 e^{(-K_0 t)} + A_2 e^{(-K_1 t)}$	3.20
Dois Termos Exponenciais	$RU = A_1 e^{(K_1 t)} + (1 - A_2) e^{(K_1 A_1 t)}$	3.21
De Wang e Singh	$RU = 1 + A_1 t + A_2 t^2$	3.22

Nestes modelos K_0 , K_1 , A_1 , A_2 e N são parâmetros do modelo ajustados com os dados experimentais.

Segundo Panchariya et al. (2002) entre os modelos empíricos, o modelo de Dois Termos, o de Henderson and Pabis, o de Lewis, o de Page e o de Page Modificado, têm sido amplamente utilizados.

Alguns destes modelos correspondem a processos de primeira ordem, como o de Lewis e Henderson and Pabis, ou de ordem superior como o de Page. A maioria deles apresenta decaimento exponencial com um ou mais termos, o que pode ser interpretado como uma modificação empírica da solução da Lei de Fick.

ESTADO DA ARTE

“DO CAJU BRASILEIRO SE APROVEITA ATÉ O CHEIRO

Quem do caju só come a castanha

E nunca viu o cajueiro

Não sabe a força tamanha

Deste fruto brasileiro

Se a castanha saborosa

Satisfaz o paladar do

Mundo inteiro, imagine

O maravilhoso caju, maduro

Que dá doce a cajuína

E o suco sempre prazenteiro...”

(BRASIL, 2007)

4. ESTADO DA ARTE

Este capítulo trata do estado da arte, especificando as condições que encontra-se cientificamente, o objeto de estudo, constando de citações de artigos sobre: enriquecimento protéico, dessorção de resíduos agroindustriais, calor isostérico aplicado em resíduos agroindustriais, e secagem de produtos agroindustriais.

4.1. ENRIQUECIMENTO PROTÉICO, EM RESÍDUOS AGROINDUSTRIAIS

HOLANDA et al. (2002) avaliaram proporção de inóculo de *Saccharomyces cerevisiae* e o tempo de fermentação necessário para enriquecer a pasta de pedúnculo de caju por fermentação submersa a temperatura de 35°C. Conseguiram o aumento de 20% do teor protéico do material fermentado, utilizando 5,0% de inóculo de leveduras, com um tempo de fermentação inferior a 24 horas.

CAMPOS (2003) e CAMPOS et al. (2005) estudaram o enriquecimento protéico do bagaço do pedúnculo do caju utilizando levedura *Saccharomyces cerevisiae*, através de fermentação semi-sólida. Neste estudo, a autora realizou o estudo cinético do enriquecimento de forma a otimizar o tempo e o aumento protéico. Assim conseguiu definir que a uma temperatura de 33°C, por um tempo de 24 horas, e inoculando 12% de levedura *Saccharomyces cerevisiae* o aumento protéico chega a 3,5 vezes quando comparado aos valores iniciais do material *in natura*. O emprego da levedura no cultivo semi-sólido do bagaço do pedúnculo de caju viabiliza a obtenção de um concentrado protéico, que poderá posteriormente ser utilizado como fonte alternativa de alto potencial protéico, em ração animal.

4.2. ISOTERMAS DE DESSORÇÃO DE RESÍDUOS AGROINDUSTRIAIS

Moura et. al. (2004) realizaram estudos sobre modelagem matemática para isotermas em polpa de caju, e observaram que a equação de GAB foi a que melhor se ajustou aos dados as isotermas de dessorção. Os demais modelos utilizados (BET, Halsey e Oswin) também se ajustaram satisfatoriamente aos dados experimentais, podendo ser utilizados para o cálculo da umidade de equilíbrio higroscópico das amostras. Afirmaram também que as amostras da

polpa de caju entram em equilíbrio higroscópico com valores distintos dependendo da temperatura a que foram submetidas.

Oliveira et al. (2005) estudaram as isotermas de sorção do resíduo agroindustrial de casca do abacaxi (*Ananas comosus L. Mer*), ajustando aos dados experimentais aos modelos de GAB e Henderson. Afirmaram que o modelo de GAB representou o comportamento dos dados em toda a faixa estudada de atividade de água, enquanto o modelo de Henderson ajustou-se muito bem aos dados experimentais de a_w abaixo de 0,5. Com o aumento da temperatura, em geral, a umidade de equilíbrio e a atividade de água do resíduo da casca do abacaxi decrescem.

Oliveira et. al. (2006) realizaram o estudo das isotermas de dessorção da casca do maracujá (*Passiflora edulis Sims*) utilizando a equação de GAB e BET para representar a dessorção de umidade deste. Afirmaram ainda ser a faixa ideal de atividade de água residual deve estar compreendida entre 0,25 e 0,35, o que corresponde a uma umidade (base úmida) abaixo de 5,3%, para o maracujá *in natura*.

Oliveira et. al. (2009) ao estudarem sobre isotermas de dessorção da coroa do abacaxi, utilizando três modelos BET, GAB e Henderson, observaram que todos estes se ajustaram bem os dados experimentais, principalmente nas temperaturas de 25 e 35°C. Para o armazenamento deste resíduo seco, a atividade de água deve-se ter no mínimo 0,186, correspondente à umidade abaixo de 0,03 na base seca. Caso este material venha a ser utilizado com objetivo de enriquecimento protéico deste resíduo, deve-se iniciar o processo com umidade em base úmida da coroa de abacaxi acima de 84%, ou com uma atividade de água acima de 0,900.

4.3. CALOR ISOSTÉRICO EM PRODUTOS E RESÍDUOS AGROINDUTRAIS

Leite et al. (2004) realizaram o estudo do calor isostérico da polpa de banana variedades maçã e nanica, e observaram que o calor isostérico aumentou com a diminuição do conteúdo de água de equilíbrio para as duas variedades, e que a quantidade de energia requerida na secagem da polpa de banana variedade maçã é maior que na variedade nanica.

Silva et al. (2002) estudaram a dessorção e calor isostérico em polpa de manga, e observaram que o modelo de GAB foi o que melhor se ajustou às isotermas de dessorção e os demais modelos também se ajustaram satisfatoriamente aos dados experimentais, podendo ser

ESTADO DA ARTE

empregados para o cálculo da umidade de equilíbrio higroscópico da polpa de manga e, ainda, o calor de sorção variou positivamente de 104,50 a 355,36 kJ.kg⁻¹.

Corrêa et al. (2005) realizaram trabalho sobre a modelagem das isotermas de dessorção e do calor isostérico de dessorção para grãos de trigo, observaram que os valores do calor isostérico integral de dessorção, para os grão de trigo na faixa de umidade de 12 a 19% (b.s.), variaram de 3735 a 2683 kJ.kg⁻¹.

Resende et al. (2006) estudaram isotermas e calor isostérico de sorção do feijão, e observaram que o calor isostérico aumenta com a diminuição do conteúdo de água do produto, indicando que a redução do teor de água aumenta a energia necessária para a remoção de água. Os valores de calor isostérico para os grãos de feijão na faixa de umidade de 10,10 a 21,71 (% b.s.), variam de 3961 a 2718 kJ kg⁻¹.

Campos et al. (2009) estudaram as isotermas de adsorção e calor isostérico da palma forrageira enriquecida proteicamente e observaram que calor isostérico de adsorção do produto diminui com o aumento da umidade de equilíbrio. Para o armazenamento da palma enriquecida é necessário que a faixa ideal de atividade de água esteja compreendida entre 0,25-0,35, que corresponde a uma umidade (b.s.) menor que 0,03 eliminando, desta forma, qualquer crescimento de micro-organismos.

4.4. SECAGEM DE PRODUTOS AGROINDUTRAIS

Gouveia et al. (2002) realizaram estudo da avaliação da cinética de caju mediante um planejamento experimental, e mostraram que: 1) efeitos significativos da variação da temperatura do ar de secagem sobre a perda do teor de umidade e o tempo de secagem; 2) o modelo empírico de segunda ordem é o que melhor representa a cinética de secagem de caju, podendo ser utilizado para fins preditivos; e 3) A temperatura é o fator controlador do processo.

Marques et al. (2007) estudaram secagem precedida de desidratação osmótica de pseudofruto de caju com termos de comparação entre modelos matemáticos aplicados. Concluíram que o melhor ajuste para os dados experimentais da secagem do caju, com pré-tratamento osmótico, foi obtido com a equação proposta por Cavalcanti Mata, com R²=99,93% em média.

Rodrigues (2006) realizou estudo de secagem de abacaxi em secador de leito fixo e observou que a temperatura e a velocidade do ar de secagem exercem influência no tempo de

ESTADO DA ARTE

secagem. O autor observou que a equação de Lewis é a válida para representar a razão de umidade em função do tempo. O modelo matemático proposto por Thompson para secador de leite fixo, considerando-se as condições experimentais mostrou-se viável e apresentou precisão satisfatória e é válido para simular a secagem de abacaxi.

Silva et al. (2007) estudaram modelos matemáticos aplicados em cinética de secagem de abacaxi em fatias, verificaram que os modelos estudados ajustaram-se bem aos dados experimentais, podendo ser aplicados na predição da secagem de fatias de abacaxi, sendo que o melhor resultado encontrado foi para o modelo de Page.

MATERIAL E MÉTODO

“O pesquisador que não souber o que está procurando não compreenderá o que encontrar”
(Claude Bernard)

MATERIAL E MÉTODO

5. MATERIAL E MÉTODOS

Este capítulo trata dos materiais e métodos analíticos utilizados neste estudo, constando de observações sobre: local e realização do trabalho, caracterização dos resíduos, isoterms de dessorção. Todas as análises foram realizadas em triplicata e em ambos os materiais: *in natura* e enriquecido.

5.1. LOCAL DE REALIZAÇÃO DO TRABALHO

Os experimentos foram realizados no Laboratório de Pesquisa em Meios Porosos e Sistemas Particulados e Laboratório de Engenharia Bioquímica, ambos, da Unidade Acadêmica de Engenharia Química da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG).

O desenvolvimento ocorreu em 3 partes: 1) Caracterização; 2) estudo de Isoterms de dessorção; e, 3) Estudo da cinética de secagem. Todas as análises foram feitas em comparação das amostras *in natura* e enriquecida por via fermentativa.

5.2. CARACTERIZAÇÃO

5.2.1. Preparo do resíduo

Foi utilizado pseudofruto de caju (*Anacardium occidentale L.*) maduro, adquirido na EMPASA da cidade de Campina Grande-PB. O caju foi transportado em caixotes de madeira, lavado em solução clorada a 10%, em seguida com água corrente proveniente da rede de abastecimento da CAGEPA (Companhia de Água e Esgotos da Paraíba), depois separados, pedúnculo e castanha. O pedúnculo foi processado em liquidificador industrial e prensado peneirado para separação do suco. O bagaço úmido foi disposto em bandejas de alumínio e seco em estufa com circulação de ar à 60°C em período de 30 horas, para obter o resíduo seco (BRASIL, 2005). Este foi moído e armazenado em recipientes de vidro, herméticos, a temperatura ambiente.

MATERIAL E MÉTODO

5.2.2 Fermentação semi-sólida

O enriquecimento protéico do bagaço do pedúnculo do caju foi processado por cultivo semi-sólido, usando levedura *Saccharomyces cerevisiae*, Fermento Fleischmann Royal. A concentração da levedura adicionada foi 12% (m/m) à 500g do resíduo em estudo, sendo a temperatura de cultivo fixada em 33°C em estufa de circulação forçada de ar, seguindo as recomendações de CAMPOS (2003).

5.2.3 Caracterização do resíduo seco e Enriquecido

As amostras utilizadas na caracterização, tanto *in natura* quanto enriquecidas, foram tomadas segundo o método do quarteamo, de acordo com a NP-1379 (NP, 1976). O material seco foi vagarosamente misturado para evitar agregação das partículas menores, e então amontoado em forma de cone. O monte em cone foi achatado e dividido em quatro partes, sendo recolhidas duas partes diagonalmente opostas que constituíram a amostra reduzida. Este processo foi repetido até obter a quantidade de material necessária para as análises.

A figura 5.1 apresenta o bagaço do pseudofruto do caju, *in natura* e enriquecido, secos triturados.



Figura 5.1: Bagaço do pseudofruto do caju, *in natura* e enriquecido, secos triturados.

MATERIAL E MÉTODO

Para a caracterização foram determinadas a granulometria, densidade aparente, densidade real, porosidade, pH, cinzas, umidade, °Brix, açúcares redutores totais (ART), açúcares redutores (AR), Fibra Bruta, Fibra FDN e FDA, pectina e proteína total, sendo as análises realizadas em triplicata.

5.2.3.1 Granulometria

A distribuição granulométrica foi feita utilizando-se 100 g do material colocados em conjunto de peneiras PRODUTESTE com 20, 42, 60, 80 e 115 mesh e agitados na frequência nove do agitador mecânico por um tempo de 20 minutos, conforme a NBR – 7181 (ABNT, 1984). O material retido em cada peneira foi pesado e os resultados expressos percentualmente em relação ao peso total do material.

5.2.3.2 Densidade aparente

Para a densidade aparente foram pesados 100 g do material e depois colocados em uma proveta, sem compactação, para determinação do volume ocupado. Os valores foram descritos segundo as recomendações de BRASIL (2005), após aplicação da Equação 5.1:

$$\text{Densidade Aparente} = \frac{\text{massa(g)}}{\text{volume ocupado(cm}^3\text{)}} \quad (5.1)$$

5.2.3.3 Densidade real

A densidade real do resíduo seco foi determinada a partir da relação entre a massa e o volume da amostra, através do deslocamento de um líquido (óleo de cozinha) em uma proveta. Primeiramente foi colocado óleo em uma proveta e verificou-se o volume ocupado (V_1), em seguida adicionou-se uma massa conhecida do resíduo (100 g) e esperou-se que a mesma se depositasse totalmente no fundo da proveta. Por fim, fez-se a leitura do novo volume indicado pelo nível do óleo (V_2). A diferença ($V_2 - V_1$) é o volume real do pó. Desta forma, a densidade real foi determinada pela Equação 5.2:

MATERIAL E MÉTODO

$$Densidade\ Real = \frac{massa(g)}{(V_2 - V_1)(cm^3)} \quad (5.2)$$

5.2.3.4 Porosidade

A porosidade foi determinada conforme a Equação 5.3 (KEEY, 1991):

$$Porosidade = 1 - \frac{Densidade\ Aparente}{Densidade\ Real} \quad (5.3)$$

5.2.3.5 pH

O pH foi medido segundo a metodologia descrita em BRASIL (2005). Preparou-se uma suspensão com 10 mL de água destilada e 1 g da amostra sólida. Após completa homogeneização, seguida de filtração, foi realizada a medida do pH em potenciômetro digital.

5.2.3.6 Cinzas

A determinação de cinzas foi realizada conforme metodologia descrita em BRASIL (2005). Os cadinhos de porcelana vazios foram colocados na mufla e deixados a 550°C. Depois foram deixados em dessecador até atingir temperatura ambiente, pesados vazios e com 1 g da amostra. Foram levados a mufla a 550°C, durante cinco horas, até obter uma cinza de cor clara. Após este tempo foram novamente deixados em dessecador e pesados. Os resultados foram expressos em porcentagem (%), Equação 5.4.

$$Cinzas(\%) = \frac{m_f}{m_i} \times 100 \quad (5.4)$$

Onde, m_f -massa final da amostra, e m_i -massa inicial da amostra

MATERIAL E MÉTODO

5.2.3.7. Umidade

Para análise da umidade seguiu-se o procedimento de BRASIL (2005), a partir da diferença de massa entre a amostra úmida e a seca. Pesou-se 1 g da amostra em recipientes já tarados, deixando secar em estufa a 105°C. Após 24 horas de secagem, as amostras foram colocadas em dessecador até atingirem temperatura ambiente e em seguida pesados em balança analítica. O resultado foi expresso em porcentagem (m/m), assim como descrito na Equação 5.5.

$$X_{bs} = \frac{m_i - m_f}{m_f} \quad (5.5)$$

Onde, m_f -massa final da amostra, e m_i -massa inicial da amostra

5.2.3.8. °Brix

A leitura do °Brix foi feita de forma direta em refratômetro, segundo o procedimento descrito em BRASIL (2005). Utilizou-se 1 g da amostra para 20 mL de água destilada. Esta suspensão foi homogeneizada, deixada em repouso por 30 minutos, filtrada, e então realizada a leitura. O resultado foi multiplicado pelo fator de diluição (F=10) para obter o °Brix, como apresentada na Equação 5.6.

$$°brix(\%) = Leitura(\%) \times F \quad (5.6)$$

5.2.3.9. Açúcares redutores totais (ART) e Açúcares redutores (AR)

A quantificação dos grupos redutores foi realizada com base na redução do ácido 3,5 dinitrosalicílico a 3-amino-5-nitrosalicílico (DNS), simultaneamente com a oxidação do grupo aldeído do açúcar a grupo carboxílico. O procedimento adotado foi o descrito por MILLER (1959).

Para a determinação dos açúcares redutores, dissolveu-se determinada quantidade de amostra em um volume definido de água. Depois transferiu-se 1 mL para um tubo de ensaio

MATERIAL E MÉTODO

contendo 1 mL de solução DNS. A seguir, os tubos foram levados para banho de água fervente por exatos 5 minutos. Após este intervalo, os tubos foram resfriados. Em cada tubo foi adicionado 8 mL de água destilada e feita a leitura imediatamente em espectrofotômetro a 540 nm.

A determinação de ART seguiu o método de Somogy-Nelson (CORREIA (2004). Após a diluição, foi realizada a hidrólise ácida da amostra com adição de ácido clorídrico (HCl) 2 N, seguida de aquecimento. Neutralizou-se essa solução acrescentando solução de hidróxido de sódio (NaOH) a 1 N. Depois foi seguida a mesma metodologia utilizada em açúcares redutores.

Os resultados foram expressos em gramas de açúcares redutores totais ou açúcares redutores por 100 gramas de amostra inicial (g açúcares/100 g amostra seca).

$$AR(g/100g) = \frac{ABS \times f \times V}{m \times 10} \quad (5.7)$$

$$ART(g/100g) = \frac{ABS \times f \times fd \times V}{m \times 10} \quad (5.8)$$

Onde: ABS = leitura no espectrofotômetro; f = fator da curva padrão; fd = fator de diluição da amostra após o preparo; V = volume de água usado no preparo da diluição; m = massa da amostra (g); 10 = fator de conversão.

5.2.3.10. Fibra Bruta

A determinação de fibra bruta seguiu as determinações de Silva (1998). Foi utilizado 1g da amostra pré-seca, e realizada duas digestões: 1) ácida, utilizando 100ml de H₂SO₄ a 0,255N; e a 2) básica, utilizando 100ml de NaOH a 0,313N. Cada digestão teve a duração de 30 minutos, contados a partir da ebulição. Após este processo, o material foi levado a mufla a 500°C por 1 hora. Os valores de fibra bruta foram determinados por técnica gravimétrica de diferença da massa determinada após as digestões e a massa de cinza, de acordo com a Equação 5.9:

$$Fibra\ Bruta(\%) = \%Massa\ Fibrosa - \%cinza \quad (5.9)$$

MATERIAL E MÉTODO

5.2.3.11. Fibra em Detergente Neutra (FDN)

Segundo Silva (1998) o método van soest na determinação de qualidade de forrageiras, divide os nutrientes das forrageiras em dois grupos: 1) FDA (Fibra em detergente Ácido) que engloba o conteúdo celular componente: a) Nitrogenados: proteínas solúveis e nitrogênio não protéico, e b) Não Nitrogenados: Gorduras e solúveis em água (amido e pectina); 2) FDN (Fibra em detergente Neutro) que engloba a parede celular: a) Nitrogenado: Lignocelulose, desta proteínas insolúveis e nitrogênio lignificado; b) Não Nitrogenado: Hemicelulose, Lignina solúvel, lignina insolúvel e celulose.

A fibra FDN, foi determinada tomando 0,5 gramas da amostra para 50mL da solução FDN e levado a digestão por 30 minutos, contados a partir da ebulição. Ao fim do processo, o material foi filtrado à vácuo, e a quantidade de Fibra FDN foi determinada por técnica gravimétrica (SILVA, 1998), através da Equação 5.10:

$$FDN(\%) = \frac{Massa\ Final}{Massa\ Inicial} \times 100 \quad (5.10)$$

5.2.3.12. Fibra em Detergente Ácida (FDA)

A determinação da fibra em detergente ácida (FDA) seguiu o mesmo procedimento adotado para a fibra em detergente neutra, a única modificação é a solução digestora FDA (SILVA, 1998), a quantidade de Fibra FDA foi determinada técnica gravimétrica, Equação 5.11:

$$FDA(\%) = \frac{Massa\ Final}{Massa\ Inicial} \times 100 \quad (5.11)$$

5.2.3.13. Hemicelulose

Segundo determinações de Silva (1998), a hemicelulose é determinada pela diferença entre FDN e FDA. Assim, como consta na Equação 5.12:

MATERIAL E MÉTODO

$$\text{Hemicelulose (\%)} = FDN - FDA \quad (5.12)$$

5.2.3.14. Pectina

Para a determinação de pectina utilizou-se do procedimento de RANGANA (1979). A extração da pectina foi realizada por digestão ácida por duas horas utilizando HCl (0,05 N), mantendo o volume inicial constante seguida de neutralização com NaOH (1 N). As amostras foram deixadas em repouso por 12 horas. Em seguida, sob agitação constante, foi adicionado ácido acético (1 N) e 5 minutos após cloreto de cálcio (1 N). Deixada em repouso por 1 hora e levada à ebulição por 2 minutos, e filtradas em papel Whatman nº 1. O papel de filtro com o precipitado foi mantido em estufa a 105°C até peso constante. As amostras foram resfriadas em dessecador e pesadas. O teor de pectina foi calculado pela porcentagem de pectato de cálcio, apresentada na Equação 5.13.

$$\% \text{ Pectato de cálcio} = \frac{\text{massa do pectato de cálcio} \times 500 \times 100}{\text{mL do filtrado} \times \text{peso da amostra}} \quad (5.13)$$

5.2.3.15. Proteína total

O teor de proteína foi determinado utilizando o método semi-micro Kjeldahl (TEDESCO et al, 1995). A técnica consiste em três etapas: 1) digestão em micro-digestor com controle de temperatura de no mínimo 350°C: Foram utilizados tubos de digestão de 100 mL, onde foram tomados 0,1 g da amostra e adicionados 0,7g de mistura digestora, 1 mL de ácido sulfúrico (P.A.) e 2 mL de peróxido de hidrogênio (P.A.) e levadas a digestão por aproximadamente 6 horas; 2) Diluição do material digerido para 50 mL com água destilada; 3) destilação realizada com NaOH a 10% em excesso para liberação do NH₃, sendo este material capturado pelo indicador ácido bórico; e 4) titulação do destilado utilizando ácido sulfúrico a 0,025N. O resultado foi obtido utilizando a Equação 5.14:

$$PB (\%) = \left[\frac{(V_{\text{Amostra}} - V_{\text{Branco}}) \times 700 \times 5 \times 5}{10000} \right] \times 6,25 \quad (5.14)$$

MATERIAL E MÉTODO

Onde: V_{amostra} é o volume de ácido sulfúrico a 0,025N utilizado para titular a amostra pré-destilada; V_{branco} é o volume de ácido sulfúrico a 0,025N utilizado para titular a amostra tomada como branco pré-destilada; o fator 6,25 é oriundo a consideração que as proteínas tem 16% de nitrogênio.

5.2.4. Aumento Nutricional Específico

O aumento nutricional específico (ANE) foi calculado nos parâmetros que apresentaram enriquecimento específico do parâmetro, calculado através da Equação 5.15:

$$ANE = \frac{\text{Valor do nutriente no material enriquecido}}{\text{Valor do nutriente no material in natura}} \quad (5.15)$$

5.3. ISOTERMAS DE DESSORÇÃO

A atividade de água das amostras, *in natura* e enriquecida, foi analisada diretamente em equipamento Thermoconstanter Novasina RTD 200 TH2, nas temperaturas de 20, 30, 40 e 50°C. Após escolha da temperatura e estabilização do equipamento, colocou-se aproximadamente 3g da amostra em 3 cubetas plásticas apropriadas, estas foram inseridas no aparelho. A amostra permanecia no equipamento até que o equilíbrio termodinâmico foi alcançado, a a_w e a temperatura foram obtidos por leitura direta no equipamento. Efetuada a leitura da atividade de água, as amostras eram transferidas para cadinhos de alumínio, previamente pesados, para que fossem pesadas e levadas a estufa com circulação forçada de ar, a 60°C. Este processo se repetiu em fase de revezamento das 3 amostras até que atingidos os pontos mais baixos de atividade de água. A partir deste ponto, as 3 amostras foram levadas a estufa, sem circulação de ar, a 105°C por 24 horas para determinação da umidade de equilíbrio (base seca) por método gravimétrico, fazendo uso da Equação 5.5.

As isotermas de dessecção de umidade para cada temperatura estudada foram construídas com os dados de umidade de equilíbrio (base seca) e atividade de água.

MATERIAL E MÉTODO

5.3.1 Modelos matemáticos

Para o ajuste matemático das isotermas de dessorção de umidade, utilizou-se o modelo de GAB (Equação 3.6), BET de três parâmetros (Equação 3.4) e BET (Equação 3.5), com auxílio do software Microcal Origin 6.0, para verificar qual deles melhor representava os referidos dados, e Statística 5.0. Os critérios utilizados para determinação da qualidade do ajuste dos modelos aos dados experimentais foram: desvio padrão, coeficiente de determinação (R^2) e desvio percentual médio (P), calculado pela Equação 5.16.

$$P = \frac{100}{n_e} \sum_{i=1}^{n_e} \frac{|XE_{\text{exp}} - XE_{\text{teo}}|}{XE_{\text{exp}}} \quad (5.16)$$

Onde: P – desvio percentual médio (%); XE_{exp} – umidade de equilíbrio experimental (base seca); e XE_{teo} – umidade de equilíbrio predito pelo modelo (base seca).

Foi avaliada, ainda, a distribuição dos valores residuais em relação aos valores preditos dos modelos ajustados para as isotermas de dessorção nas temperaturas observadas. Para que os ajustes sejam confiáveis, é necessário que esta distribuição seja aleatória, ou seja, os pontos devem estar distribuídos de forma aleatória de modo a caracterizar uma variância constante dos erros.

5.3.2. Cálculos comparativos dos valores das constantes C e K do modelo de GAB

As constantes C e K determinadas pelo modelo de GAB, comparada com os valores calculados a partir das equações tipo Arrhenius, dadas pelas Equações 5.17 e 5.18 para o material *in natura* e 5.19 e 5.20 para o material enriquecido.

$$C = 2,95491 \exp\left(-\frac{13100}{T}\right) \quad (5.17) \quad \text{Enriquecido} \quad C = 3,9579 \exp\left(-\frac{15100}{T}\right) \quad (5.19)$$

$$K = 0,52568 \exp\left(\frac{217}{T}\right) \quad (5.18) \quad K = 0,105189 \exp\left(\frac{716}{T}\right) \quad (5.20)$$

Onde: C e K – constante da equação de GAB; e T – temperatura, K.

MATERIAL E MÉTODO

5.3.3. Cálculos de entalpia

Foram calculadas as Entalpia de vaporização da água (λ), Equação 5.21; Entalpia de monocamada (H_m), Equação 5.22; e entalpia de multicamada (H_n), Equação 5.23:

$$\lambda = 44,72 - 0,03T(^{\circ}\text{C}) - 0,0000921T^2(^{\circ}\text{C}) \quad (5.21)$$

$$H_m = \Delta H_c + H_n \quad (5.22)$$

$$H_n = \lambda_m - \Delta H_k \quad (5.23)$$

Onde: λ - entalpia de vaporização; λ_m - entalpia de vaporização média; H_m - entalpia de monocamada; H_n - entalpia de multicamada.

5.3.4. Calor Isostérico

A partir dos modelos comumente usados para modelagem de isotermas de equilíbrio higroscópico em produtos biológicos, foram obtidos os dados para o desenvolvimento deste trabalho. Um método largamente usado para se calcular o calor isostérico de sorção, seja pelo processo de adsorção ou pelo de dessorção, é dado pela equação do tipo, Clausius-Clayperon, Equação 5.24:

$$\frac{\partial \ln(a_w)}{\partial T} = \frac{q_{st}}{RT^2} \quad (5.24)$$

Onde: a_w é a atividade de água (decimal), T , a temperatura em absoluto (Kelvin), q_{st} o calor isostérico líquido de sorção (kJ.kg^{-1}) e R , constante universal dos gases ($8,314\text{kJ.kmol}^{-1}.\text{K}^{-1}$).

Integrando a Equação 5.20, e assumindo que o calor isostérico líquido de sorção é independente da temperatura, podemos encontrar o calor isostérico líquido de sorção (q_{st}), para cada teor de umidade de equilíbrio, conforme a equação de Wang & Brennan (1991), equação 5.25:

$$\ln(a_w) = -\left(\frac{q_{st}}{R}\right)\frac{1}{T} + C \quad (5.25)$$

Onde, C é a constante do modelo.

Foi plotado um gráfico de umidade em base seca (X_{bs}) e calor isostérico (q_{st}) o qual foi ajustado com o modelo matemático de Sopade & Ajisegiri (1994), equação 5.26:

$$q_{st} = A \times \exp(-B \times X_{bs}) \quad (5.26)$$

O calor isostérico integral de sorção (Q_{st}) em kJ.kg^{-1} , é obtido adicionando-se aos valores de calor isostérico líquido de sorção (q_{st}), ao valor do calor latente de vaporização da água livre (L) de acordo com a equação 5.27:

$$Q_{st} = q_{st} + L = A \exp(-B \times X_{bs}) + L \quad (5.27)$$

Onde, X_{bs} é a umidade em base seca; e A e B são coeficientes do modelo, e L é o calor latente de vaporização da água livre, Equação 5.21, fazendo devida conversão para kJ.kg^{-1} , Equação 5.28:

$$L (\text{kJ/kg}) = \lambda (\text{J/mol}) \times 0,005556 (\text{kJ.mol/kg.J}) \quad (5.28)$$

5.3.5. Superfície exposta da matriz sólida (S_0)

De acordo com Park et. al. (2008) se assumirmos que área molecular da água é de $10,6 \text{ \AA}^2$, podemos calcular a superfície exposta da matriz sólida (S_0), através da equação 5.29:

$$S_0 = X_m \frac{1}{PM_{H_2O}} N_0 (A_{H_2O}) \quad (5.29)$$

Onde: S_0 é a superfície exposta da matriz sólida; N_0 é o número de Avogadro; PM_{H_2O} é o peso molecular de água; A_{H_2O} é a área molecular da água.

Substituindo os devidos valores na equação 5.29 e com o calculo a equação 5.30, que de fato nos dá os valores de área superficial do nosso bagaço, *in natura* e enriquecido, a partir do conhecimento da monocamada deste.

$$S_0 = X_m \left(\frac{1}{18} \text{gmol/g} \right) \times (6 \times 10^{23} \text{moléculas/gmol}) \times (10,6 \times 10^{-20} \text{m}^2) \quad (5.30)$$

$$S_0 = 3,5 \times 10^6 X_m \quad (5.31)$$

Onde, S_0 é expresso por m^2/kg de massa seca.

MATERIAL E MÉTODO

5.4. CINÉTICA DE SECAGEM DO BAGAÇO DO PSEUDOFRUTO DO CAJU, *IN NATURA* E ENRIQUECIDO.

Em ambos os materiais em estudo, foram determinadas atividade de água de 3 gramas da amostra no equipamento Thermoconstanter Novasina RTD 200 TH2. Efetuada a leitura da atividade de água, as amostras eram transferidas para cadinhos de alumínio, previamente pesados, para que fossem pesadas e levadas a estufa com circulação forçada de ar, a 60°C. Este processo se repetiu em fase de revezamento das 3 amostras até que atingida a umidade de equilíbrio, a partir deste ponto as 3 amostras foram levadas a estufa, sem circulação de ar, a 105°C por 24 horas para determinação da umidade de equilíbrio (base seca) por método gravimétrico, fazendo uso da Equação 5.5.

Com os dados experimentais da secagem foram calculados os valores da razão de umidade, Equação 5.32:

$$RU = \frac{X - X_e}{X_0 - X_e} \quad (5.32)$$

Onde: RU - razão de umidade adimensional; X - umidade absoluta, base seca, bs; X_e - umidade de equilíbrio, bs; X_0 - umidade inicial, bs.

5.4.1. Modelos matemáticos

A partir dos valores de razão de umidade foram construídas as curvas de cinética de secagem e aplicados os modelos matemáticos de: Lewis (Equação 3.16), Page (Equação 3.17), Henderson & Pabis (Equação 3.18) e Dois termos (Equação 3.20), foram aplicadas as curvas de secagem utilizando-se o programa computacional STATISTICA versão 5.0, para estimar os seus parâmetros. Para determinar-se o melhor ajuste de cada equação utilizou-se o coeficiente de determinação (R^2), desvio percentual médio (P), utilizando a Equação 5.16.

Qualitativamente, foi avaliada, a distribuição dos valores residuais em relação aos valores preditos dos modelos ajustados. Para que os ajustes sejam confiáveis, é necessário que esta distribuição seja aleatória de modo a caracterizar uma variância constante dos erros.

5.4.2. Cálculo da Difusividade Aparente

O coeficiente de difusão aparente foi calculado a partir da solução analítica da 2ª Lei de Fick para placa plana, considerando apenas um termo da série (Equação 5.33). Desta solução, considerando uma placa plana e linearizando, pode-se obter a inclinação das curvas de $\ln (X-X_e/X_0-X_e)$ em função do tempo de secagem. O critério utilizado para aceitar a adequação linear sobre os pontos experimentais foi a obtenção de um coeficiente linear de determinação $R^2 > 0,90$ para o período decrescente de secagem, utilizando a Equação 5.34:

$$\frac{X - X_e}{X_0 - X_e} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp \left[\frac{-(2n+1)^2 \pi^2 \cdot D_{ap} \cdot t}{L^2} \right] \quad (5.33)$$

$$\ln \frac{X - X_e}{X_0 - X_e} = \ln \frac{8}{\pi^2} - \frac{\pi^2 \cdot D_{ap} \cdot t}{L^2} \quad (5.34)$$

Onde: X - umidade absoluta, base seca, bs; X_e - umidade de equilíbrio, bs; X_0 - umidade inicial, bs; D_{ap} - difusividade aparente; L - espessura para uma placa plana (L)

Os valores de difusividade aparente foram calculados comparando a equação 5.34 à equação da reta, considerando a Equação 5.35:

$$-\frac{\pi^2 \cdot D_{ap}}{L^2} = a = K \quad (5.35)$$

Onde: a - coeficiente angular.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

"As invenções são, sobretudo, o resultado de um trabalho teimoso."

(Santos Dumont)

RESULTADOS E DISCUSSÃO

6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este capítulo trata dos resultados obtidos neste estudo, constando de observações sobre: caracterização; isotermas de dessorção, estudo termodinâmico; e cinética de secagem.

6.1 CARACTERIZAÇÃO

Os resultados de caracterização do resíduo agroindustrial de caju, *in natura* e enriquecido, pré-seco e triturado, está dispostos na Tabela 6.1.

Tabela 6.1: Caracterização físico-química bagaço do pedúnculo do caju, *in natura* e enriquecido proteicamente.

Parâmetros Analisados	Unidade	<i>in natura</i>	Enriquecido	ANE
Densidade Real	g/mL	1,54 ± 0,03	1,48 ± 0,02	-
Densidade Aparente	g/mL	0,69 ± 0,01	0,70 ± 0,01	-
Porosidade	-	0,55 ± 0,008	0,53 ± 0,01	-
pH	-	3,74 ± 0,17	4,58 ± 0,29	-
TSS	°Brix	46,0 ± 1	1,0 ± 0,1	-
AR	g de açúcares/100g amostra seca	36,35 ± 0,29	0,29 ± 0,13	-
ART	g de açúcares/100g amostra seca	38,51 ± 2,66	1,14 ± 0,05	-
Cinzas	%	2,37 ± 0,26	3,38 ± 0,07	1,44 ± 0,15
Umidade	g de H ₂ O/g sólido seco	4,63 ± 0,16	1,55 ± 0,15	-
Fibra Bruta	%	8,21 ± 0,44	5,67 ± 0,97	-
FDN	%	31,56 ± 0,08	57,56 ± 0,23	2,15 ± 0,34
FDA	%	16,51 ± 0,94	21,72 ± 0,61	1,30 ± 0,22
Hemicelulose	%	15,05 ± 0,61	36,03 ± 2,27	3,14 ± 0,69
Pectina	%	8,44 ± 0,09	14,88 ± 0,18	1,76 ± 0,04
Nitrogênio	%	1,29 ± 0,26	3,38 ± 0,53	2,66 ± 0,46
Proteína Total	%	7,84 ± 0,91	20,71 ± 1,93	2,68 ± 0,52

ANE – Aumento Nutricional Específico; pH – potencial hidrogeniônico; TSS – teor de sólidos solúveis; AR – Açúcares Redutores; ART – Açúcares Redutores Totais; FDN – Fibra em detergente Neutra; FDA – Fibra em detergente Ácida.

Observa-se que não há diferenças nas propriedades físicas do material *in natura* e enriquecido, tendo apresentado apenas um ligeiro aumento no pH.

Os valores de densidade aparente encontrados nesse trabalho são próximos dos encontrados por Tavares (2009) para bagaço de caju lavado e sem lavar. Ambos os produtos

RESULTADOS E DISCUSSÃO

estudados estudo apresentam-se dentro da classificação de produtos agrícolas que varia entre: $0,550 < \rho < 1,000 \text{ g/cm}^3$.

As porosidades do leite mostrados na tabela 6.1, para os materiais *in natura* e enriquecido foram 0,55 e 0,53, respectivamente, valores adequadas para que a fermentação ocorra na presença de oxigênio.

Do ponto de vista biológico, o conhecimento do pH de um produto é primordial. Os valores de pH encontrados foram 3,74 e 4,58, *in natura* e enriquecido, respectivamente. Observa-se que o pH do material *in natura* (3,74) aproximou-se dos valores descritos por (2008 Amorim) que encontrou valores de 3,74 e 3,32 para bagaço de pedúnculo de caju lavado e sem lavar, respectivamente. Para o material enriquecido o valor de pH de 4,58, aproximou-se dos descritos por Campos (2003) para pedúnculo fresco (4,5) e de Tavares (2009) que estudou o bagaço do pedúnculo lavado (4,58) e sem lavar (4,33).

Quando visualmente analisados, os bagaços do pedúnculo do caju, *in natura* e enriquecido, não apresentaram problemas de contaminação no armazenamento a temperatura ambiente, baixa umidade e recipientes fechados, assim como descrito por Tavares (2009).

O teor de sólidos solúveis, no material *in natura* e enriquecido foi de 46 e 1°Brix, respectivamente.

O decaimento do teor de açúcares após o enriquecimento era previsto, já que no processo de fermentação semi-sólido utilizado os açúcares do meio são convertidos pelo microrganismo resultando em aumento protéico.

Os valores de cinzas encontrados neste estudo foram maiores que os descritos por Tavares (2009) que encontrou valores de cinzas em bagaço do pedúnculo de caju, lavado e sem lavar, de 1,25 e 1,69%, respectivamente. Lousada Júnior et. al. (2005) observaram valores de cinza para frutas como: Abacaxi (6,8%), Acerola (2,7%), Goiaba (3,4%), Maracujá (9,8%) e Melão (14,6%); onde os valores de acerola são próximos aos do bagaço de caju *in natura*, e os valores encontrados de goiaba são os mais próximos dos valores de bagaço enriquecido. O aumento nutricional específico (ANE) neste parâmetro foi de 1,44.

Os valores de umidade encontrado no material *in natura* (4,63 b.s) foram maiores que os encontrados no bagaço enriquecido os valores de água são baixos (1,55 b.s) isso ocorreu pelo processo de inativação das leveduras a que o material foi submetido. Este processo de inativação remove água do material, mas a presença de grupos hidrofóbicos e hidrofílicos em algumas proteínas impede que o enriquecido sofra secagem total.

Os valores de fibra bruta do material *in natura* e enriquecido foram, respectivamente, 8,21 e 5,67 (%). Lousada Júnior et. al. (2005), determinaram valores de fibra bruta para as

RESULTADOS E DISCUSSÃO

frutas abacaxi (8,4%), acerola (10,5%), goiaba (8,5%), maracujá (12,4%) e melão (17,3%). Os valores de abacaxi e goiaba foram próximos aos do bagaço de caju *in natura* encontrado no presente trabalho. A redução destes valores de fibra bruta pode ter sido ocasionada pela reestruturação das ligninas que formam a fibra bruta.

Quanto à pectina, o bagaço *in natura* apresentou valores de 8,44 (%), enquanto o bagaço enriquecido apresentou valores de 14,88 (%), resultando em um aumento nutricional específico de 1,76. Este aumento se deu pela concentração dos constituintes do material. Os teores de pectina do bagaço *in natura* (8,44%) são próximos aos descritos por Tavares (2009) que identificou valor de bagaço de caju sem lavar (10,94%).

Os teores de FDN, FDA e Hemicelulose do bagaço *in natura* foram 31,56%, 16,51% e 15,05%, respectivamente; estes valores foram aumentados com o processo de enriquecimento para 57,56%, 21,72% e 36,03%, que representam um aumento nutricional de 2,15, 1,30 e 3,14, respectivamente.

Um dos principais pontos deste estudo que é o aumento protéico foi atingido com valores consideráveis, partiu-se de um material *in natura* com valor de proteína total de 7,84 (%) e após o processo de enriquecimento atinge valor de 20,71 (%) este que caracteriza um aumento nutricional específico ou aumento protéico de 2,68. Este aumento aproxima-se dos descritos por Campos (2003) que observou aumento protéico de 2,5 no bagaço de caju enriquecido.

O aumento protéico do bagaço de caju foi superior aos valores identificados por Amorim et. al. (2005), que estudaram o enriquecimento protéico do bagaço da fruta da palma forrageira (*Opuntia ficus-indica* Mill) e identificaram um aumento protéico de 1,46 na mistura raquete-bagaço.

De acordo com Lousada Júnior et. al. (2005) os valores de proteína total observados no bagaço de caju *in natura* (7,84%) são próximos aos valores dos frutos como: abacaxi (8,4%) e goiaba (8,5%); após o processo de enriquecimento os valores do bagaço enriquecido (20,71%) são superiores os determinados no maracujá (12,4%) e acerola (10,5%), e melão (17,3%).

A Figura 6.1 apresenta os perfis granulométricos do bagaço do pedúnculo do caju, *in natura* e enriquecido.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

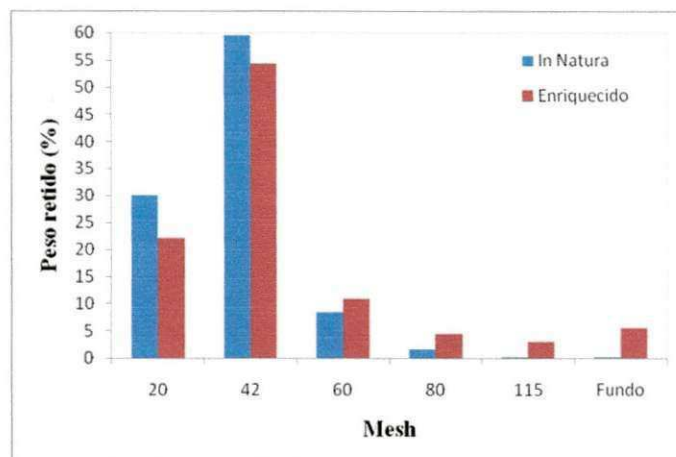


Figura 6.1: Perfil granulométrico do bagaço do pedúnculo do caju, *in natura* e enriquecido.

Quanto à distribuição granulométrica (Figura 6.1), tanto para o bagaço *in natura* quanto para o enriquecido, a maioria das partículas apresentam tamanhos em torno de 42 mesh, o que corresponde a 0,355mm, tamanho satisfatório para a fermentação semi-sólida. Correia (2004) observou o mesmo fato trabalhando com a mesma abertura, com bagaço de abacaxi.

Através da figura acima, uma retenção granular em todos os níveis estudados caracterizado, inicialmente, uma diferença física entre os bagaços do pseudofruto do caju, *in natura* e enriquecido

6.2. ISOTERMAS DE DESSORÇÃO

O nível de umidade de um substrato é um dos fatores que mais influenciam o processo e varia com a natureza do substrato, tipo de produto que se deseja sintetizar e necessidade do microrganismo. Níveis de umidade muito altos resultam numa diminuição da porosidade, baixa difusão de oxigênio, aumento no risco de contaminação, redução no volume de gás e redução de troca gasosa. Por outro lado baixos níveis de umidade levam a um crescimento minimizado da população microbiana em relação ao ponto ótimo e baixo grau de utilização do substrato pelos mesmos.

As figuras, 6.2 à 6.5, apresentam os valores experimentais das isotermas de dessorção de umidade para o bagaço do pseudofruto do caju *in natura* e enriquecido. Nas figuras, 6.3 e 6.4, são apresentadas em escala ampliada de modo a melhor observar as regiões próximas à monocamada.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

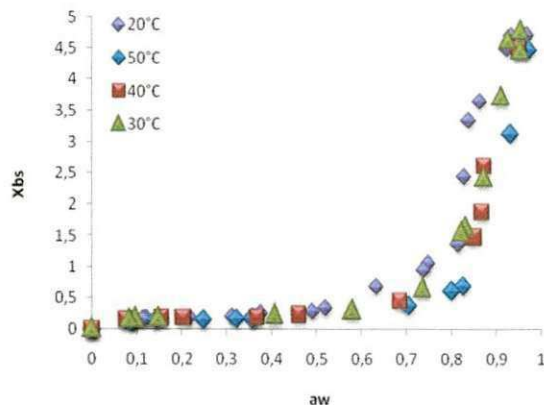


Figura 6.2: Isoterma de dessorção a 20, 30, 40 e 50°C do bagaço de caju *in natura*.

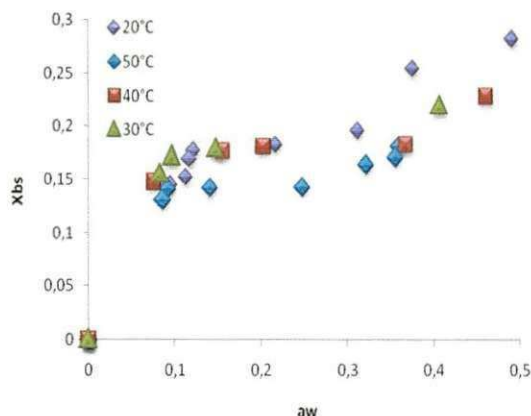


Figura 6.3: Isoterma de dessorção a 20, 30, 40 e 50°C do bagaço de caju *in natura*, aproximação na região de monocamada.

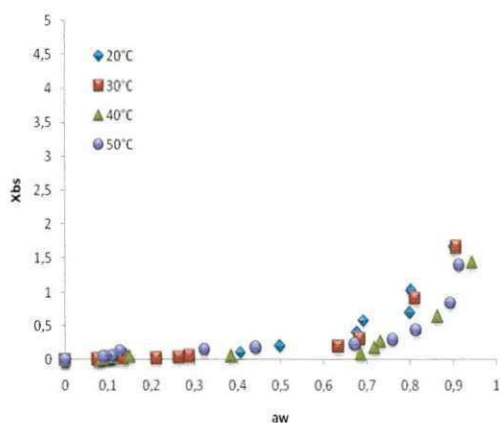


Figura 6.4: Isoterma de dessorção a 20, 30, 40 e 50°C do bagaço de caju enriquecido.

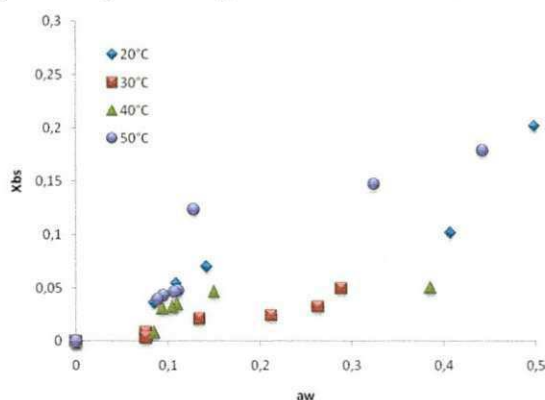


Figura 6.5: Isoterma de dessorção a 20, 30, 40 e 50°C do bagaço de caju enriquecido, aproximação na região de monocamada.

O bagaço de caju *in natura* apresenta alta umidade e atividade acima de 0,9, já o bagaço enriquecido apresenta baixa umidade, comparada ao bagaço *in natura*, e a atividade se mantém acima de 0,9. A atividade de água em ambos os casos é favorável a desenvolvimento das leveduras que varia entre 0,9 a 0,99. Nas condições de armazenamento dos produtos não foi utilizado nenhum tipo de aditivo ou conservante.

As isotermas de dessorção do bagaço de caju *in natura* e enriquecido apresentaram comportamento característico de isoterma tipo II, sendo o bagaço de caju *in natura* apresentado com alta umidade e alta atividade de água; e o bagaço de caju enriquecido apresentou baixa umidade e atividade de água ainda alta. Isso se deve pelo aumento de teor de proteínas e elevação do pH, pois a maioria das proteínas em pH's baixos tendem a desnaturar-se. Este fato é decorrente das interações e das concentrações dos constituintes dos materiais, se comparado o enriquecido com o *in natura*; já que houve um aumento nutricional em quase todos os parâmetros estudados.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.2.1. Aplicação de modelos

A Tabela 6.2 apresenta os valores dos parâmetros correspondentes aos modelos de GAB, BET de três parâmetros e BET e dois parâmetros.

Tabela 6.2: Dados obtidos com a aplicação de ajuste dos modelos matemáticos a partir das isotermas do bagaço de caju *in natura* e enriquecido.

	Modelo	T (°C)	Parâmetro			R ²	P (%)	
			X _m	C	K			
<i>In natura</i>	GAB	20	0,24 ± 0,07	1,67 ± 2,46	1,09 ± 0,02	0,9750	1,88	
		30	0,35 ± 0,38	0,43 ± 0,77	1,02 ± 0,07	0,9902	4,24	
		40	0,15 ± 0,04	2,27 ± 2,37	1,06 ± 0,02	0,9856	1,22	
		50	0,12 ± 0,02	6,22 ± 3,27	1,00 ± 0,03	0,9913	0,67	
	BET Tri-paramétrico	T (°C)	X _m	C	n	R ²	P (%)	
		20	0,34 ± 0,06	4,92 ± 2,65	121,03 ± 0,00	0,9773	2,21	
		30	0,16 ± 0,01	238,21 ± 686,89	192,10 ± 0,00	0,9800	1,78	
		40	0,96 ± 6	0,38 ± 3	42,31 ± 9724995	0,8632	2,69	
	BET	T (°C)	X _m	C	R ²	P (%)		
		20	0,28 ± 0,02	2,96 ± 1,26	0,9774	2,21		
		30	0,47 ± 0,15	0,28 ± 0,16	0,9902	4,29		
		40	0,29 ± 0,04	0,52 ± 0,22	0,9831	1,43		
			50	0,13 ± 0,00	5,46 ± 1,66	0,9913	0,67	
<i>Enriquecido</i>	GAB	T (°C)	X _m	C	K	R ²	P (%)	
		20	0,36 ± 1,8	0,49 ± 2,8	0,94 ± 0,57	0,9696	3,43	
		30	0,10 ± 0,02	0,7 ± 0,3	1,12 ± 0,02	0,9995	3,13	
		40	0,07 ± 0,01	5,67 ± 3,65	1,04 ± 0,02	0,9940	3,60	
	BET Tri-paramétrico	T (°C)	X _m	C	n	R ²	P (%)	
		20	0,25 ± 0,00	2,07 ± 4	50,09 ± 4338923	0,9842	4,79	
		30	98,67 ± 43384	0,0018 ± 1	7,53 ± 0,00	0,9974	4,65	
		40	0,14 ± 0,00	2,19 ± 3	142,62 ± 6506307	0,9914	3,45	
	BET	T (°C)	X _m	C	R ²	P (%)		
		20	0,22 ± 0,05	0,92 ± 0,76	0,9695	3,29		
		30	0,98 ± 0,3	0,05 ± 0,02	0,9993	2,65		
		40	0,095 ± 0,06	1,59 ± 0,74	0,9914	1,30		
				50	0,08 ± 0,005	22,08 ± 19,11	0,9725	2,92

RESULTADOS E DISCUSSÃO

O nível de umidade de um substrato é um dos fatores que mais influenciam o processo e varia com a natureza do substrato, tipo de produto que se deseja sintetizar e necessidade do microrganismo. Níveis de umidade muito altos resultam numa diminuição da porosidade, baixa difusão de oxigênio, aumento no risco de contaminação, redução no volume de gás e redução de troca gasosa. Por outro lado baixos níveis de umidade levam a um crescimento minimizado da população microbiana em relação ao ponto ótimo e baixo grau de utilização do substrato pelos mesmos.

O modelo de GAB apresenta, para ambos os materiais, valores de constante C bastante variável, fato comum, pois esta constante é mais suscetível a variações de temperatura. Já a constante K do modelo de GAB, em ambos os materiais, apresenta-se em torno de 1, isso significa que o modelo de BET pode ser utilizado.

As regiões de monocamada de ambos os materiais em estudo foi melhor representada pelo modelo de GAB que apresenta baixos desvios médios relativos e coeficientes de determinação (R^2) acima de 0,9. No material *in natura* ocorre uma exceção na isoterma a 30°C, que apresenta uma monocamada de 0,35 e um desvio padrão de 0,38, isto pode ser explicado pelo fato desta isoterma possuir pequena quantidade de pontos na região de baixa umidade. Já o material enriquecido, a exceção está na isoterma a 20°C, que apresenta uma monocamada de 0,36 e desvio padrão de 1,8. Este fato também pode ter ocorrido pela pequena quantidade de pontos experimentais existentes na região de baixa umidade.

Os dados do material *in natura* facilitam o trabalho de fermentação para enriquecimento, onde a umidade inicial do material *in natura* circunda os 90% (base úmida), e atividade de água acima de 0,9 e para a conservação e manutenção da qualidade da do bagaço enriquecido seco, é necessário ter no máximo de X_{bs} , aproximadamente, de 0,12 e a_w abaixo de 0,35 para as quatro temperaturas estudadas.

Nas Figuras 6.6 e 6.7 são apresentadas as isotermas de dessorção de umidade a 20, 30, 40 e 50°C, com aplicação do modelo de GAB, BET tri-paramétrico e BET di-paramétrico em comparação com os dados experimentais, na isoterma do bagaço *in natura* e enriquecido.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

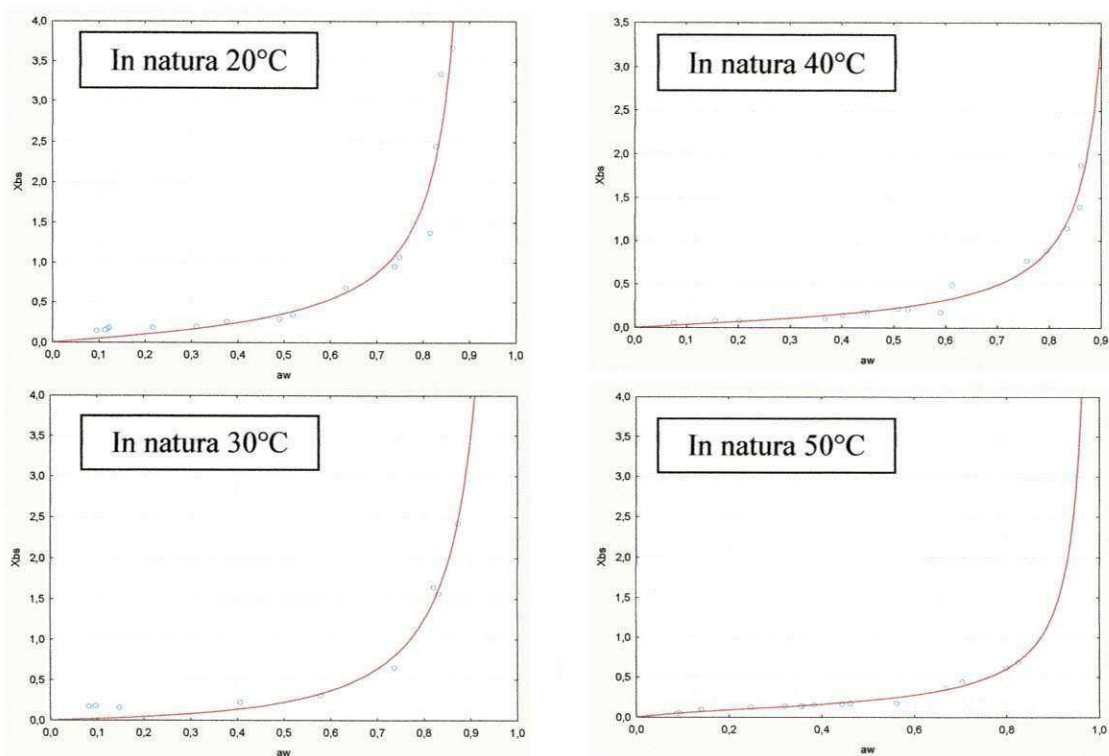


Figura 6.6: Isotermas de desorção de umidade bagaço do pedúnculo do caju *in natura* nas temperaturas de 20, 30, 40 e 50°C, na aplicação do modelo de GAB.

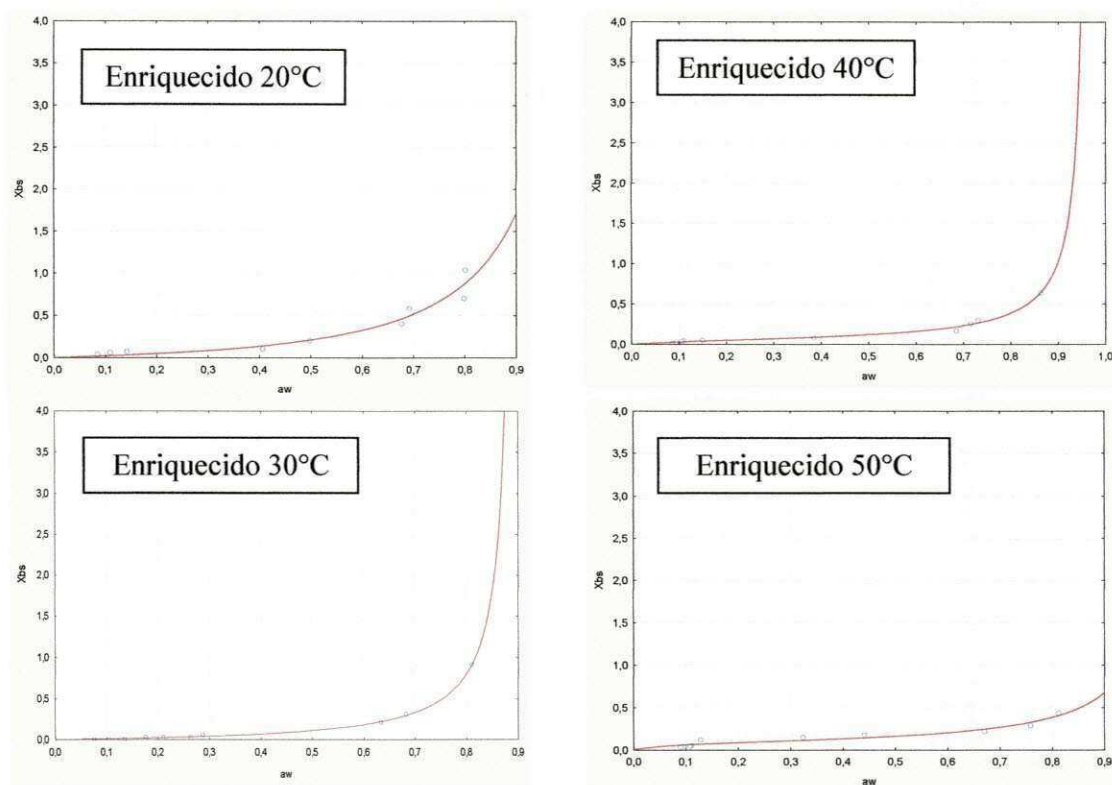


Figura 6.7: Isotermas de desorção de umidade bagaço do pedúnculo do caju enriquecido, nas temperaturas de 20, 30, 40 e 50°C, na aplicação do modelo de GAB.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Observa-se que os bagaços do pseudofruto do caju, *in natura* e enriquecido, ficam com atividades de água (a_w) residual próximas da faixa ideal que está compreendida entre 0,25 a 0,35 (SANTINI, 1996), nas regiões de monocamada de ambos os materiais, desta forma, evita-se qualquer crescimento de microrganismos.

Para que os bagaços, *in natura* e enriquecido, tenham atividades de água abaixo de 0,25, objetivando-se o armazenamento, e convenientemente a utilização da operação unitária de secagem. Não se deve retirar água em quantidade inferior à monocamada que fica abaixo de 0,25 (b.s) para ambos os materiais, sendo este o limite para conservação dos nutrientes dos produtos em estudo. A tentativa de retirar água abaixo da monocamada além de prejuízo nutricional ao produto, acarretará um maior dispêndio de energia para a eliminação.

Moura et. al. (2004) que estudaram modelagem matemática para isotermas em polpa de caju, observou que quanto maior a temperatura menor a monocamada, esta observação foi feita em isotermas de 35, 40, 50 e 60°C. Caso comum este estudo, que observa-se o mesmo fato as isotermas de 20, 30, 40 e 50°C, no bagaço do pseudofruto do caju, *in natura* e enriquecido. Os autores também estudaram a aplicação de modelos matemáticos de GAB e BET, e observaram que o modelo de GAB foi o que melhor se ajustou aos dados experimentais e que o modelo de BET tri-paramétrico pode ser empregado para o cálculo da umidade de equilíbrio higroscópico da polpa de caju. O presente estudo, tanto os dados experimentais do bagaço *in natura* quanto o enriquecido, se adaptaram melhor ao modelo de GAB, já o modelo de BET de dois parâmetros pode ser utilizado para cálculo da umidade de equilíbrio higroscópico do bagaço de caju *in natura* e enriquecido. O modelo de BET tri-paramétrico apresentou bom ajuste a pontos de baixa umidade.

Nas Figuras 6.8 e 6.9 são apresentadas as distribuições residuais das isotermas de dessecção de umidade a 20, 30, 40 e 50°C, com aplicação do modelo de GAB, em comparação com os dados experimentais, na isoterma do bagaço *in natura* e enriquecido.

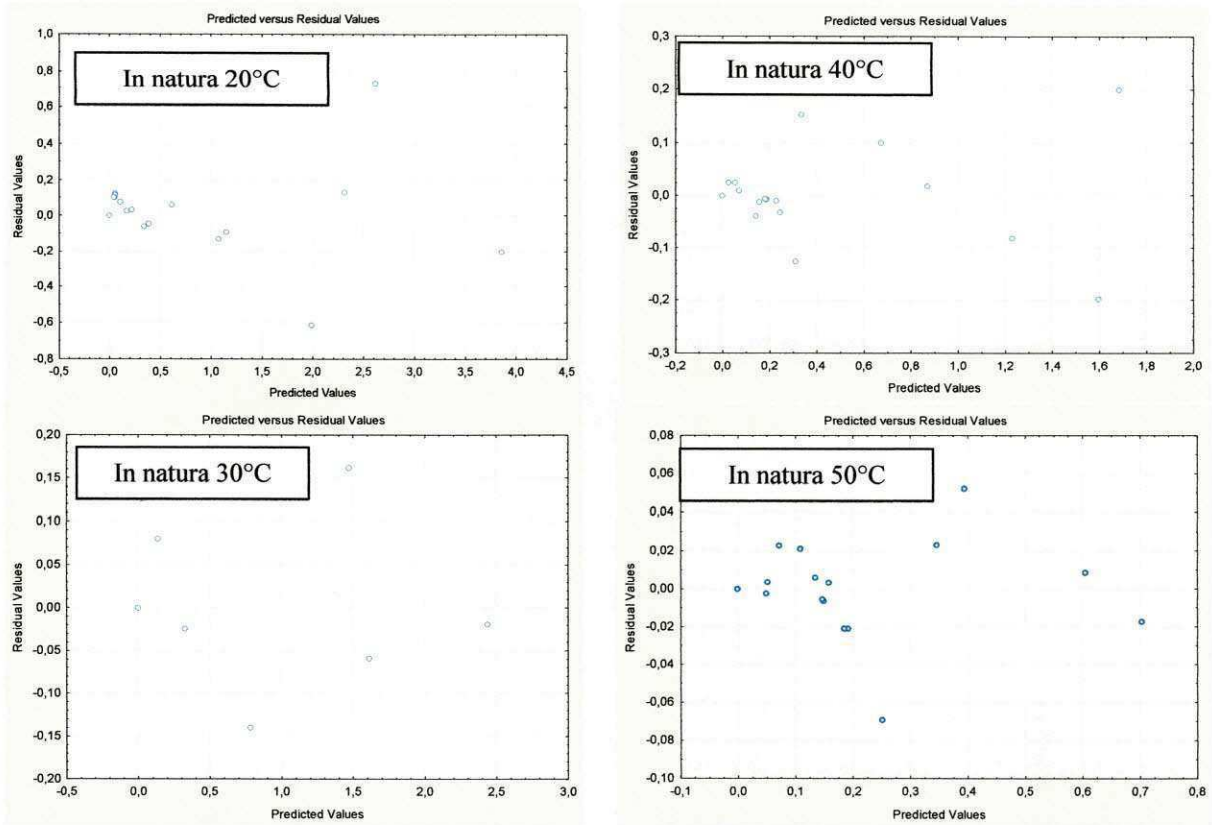


Figura 6.8: Distribuição valores preditos e residuais na aplicação do modelo de GAB, bagaço de caju *in natura*, nas temperaturas de 20, 30, 40 e 50°C.

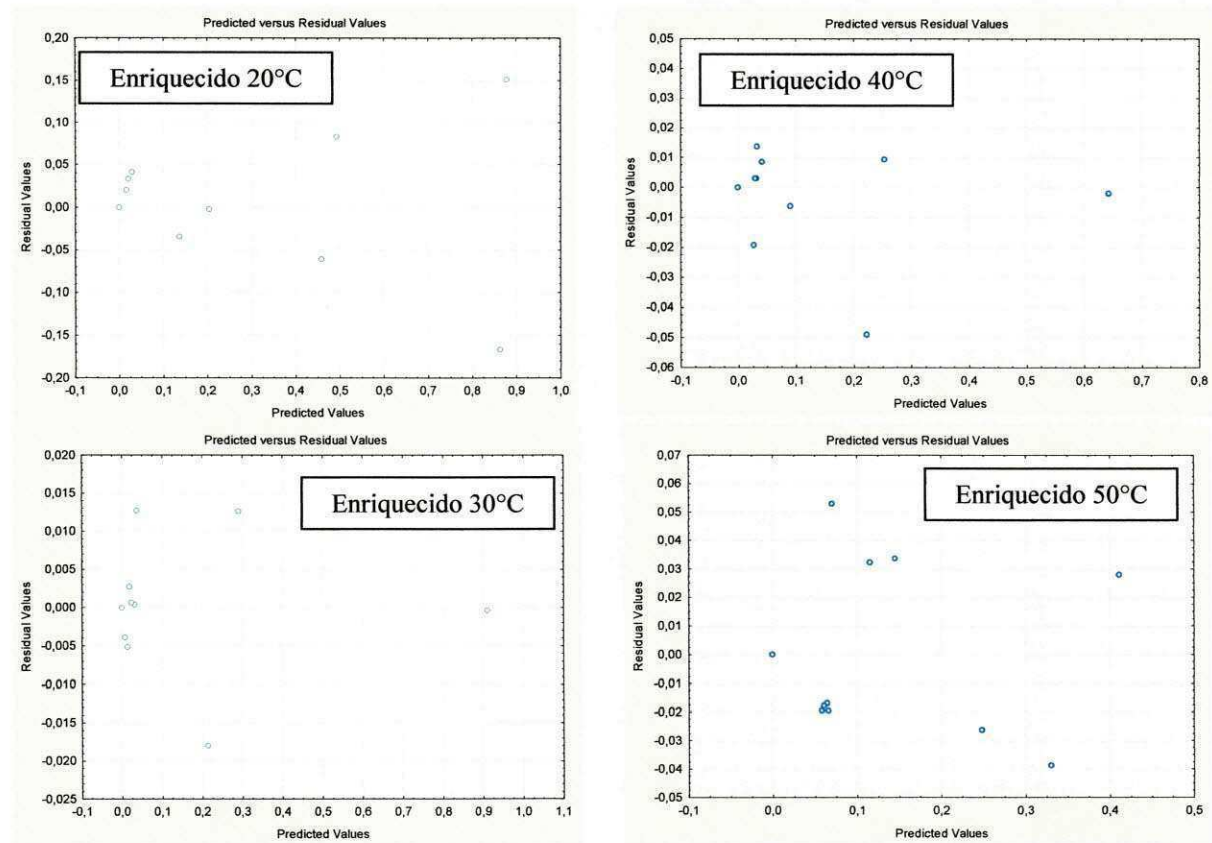


Figura 6.9: Distribuição valores preditos e residuais na aplicação do modelo de GAB, bagaço de caju *in natura* e enriquecido, nas temperaturas de 20, 30, 40 e 50°C.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Todos os modelos apresentaram boa distribuição residual, tanto quando aplicados as isotermas do bagaço *in natura* e enriquecido. Mas em todas as temperaturas estudadas o modelo de GAB foi o que melhor se ajustou aos dados experimentais com valores do coeficiente de determinação em torno de 0,99, menores desvios e distribuição aleatória. Nas observações das isotermas do bagaço enriquecido, também foi o modelo de GAB que melhor se adaptou aos dados experimentais, apresentando coeficiente de determinação em torno de 0,98 e baixos desvios. Todas as temperaturas estudadas (20, 30, 40 e 50°C) apresentaram boa distribuição de resíduos.

6.2.1.1 Entalpias de adsorção

Com os valores descritos na tabela 6.2 foram calculadas as entalpias de sorção nos intervalos de temperaturas correspondentes as equações GAB e BET.

A Tabela 6.3 apresenta as variações de entalpia a partir da constantes C e K de GAB e C para BET tri-paramétrico e di-paramétrico.

Tabela 6.3: Variações de entalpia de adsorção a partir das constantes C e K, oriundas dos modelos matemáticos.

Modelo	Material	ΔH_c (J/mol)	ΔH_k (J/mol)
GAB	<i>in natura</i>	-109.112,94	1.800,00
	Fermentado	-125.815,76	5.950,00
BET Tri-paramétrico	<i>in natura</i>	-103.000,00	-
	Fermentado	-443.000,00	-
BET di-paramétrico	<i>in natura</i>	-121.000,00	-
	Fermentado	-248.455,58	-

Observa-se que para o modelo de GAB, os valores de ΔH_k são positivos, representando que há na multicamada, região de água livre, a necessidade de energia para transição de fase: líquido saturado para vapor saturado. Nas observações do ΔH_c , nota-se valores altos e negativos, significando que na monocamada as interações entre o sólido e a água adsorvida provocam um aumento do nível energético ao ponto da adsorção tornar-se exotérmico. Estas observações são pertinentes tanto para o material *in natura*, quanto para o

RESULTADOS E DISCUSSÃO

bagacho enriquecido. Em todos os modelos observa-se altos valores de ΔH_c , sendo maiores no caso do resíduo enriquecido.

Nas Tabelas 6.4 e 6.5, encontram-se os valores dos parâmetros C e K da equação de GAB, estimadas pelo modelo e os calculados em função da temperatura.

Tabela 6.4: Parâmetro C da equação de GAB ajustado pelo modelo e calculado em função da temperatura.

T(°C)	T(K)	<i>in natura</i>			Enriquecido		
		C (Calculado)	C (modelo)	Desvio	C (Calculado)	C (modelo)	Desvio
20	293,15	0,116	1,671	-1,555	0,169	0,495	-0,326
30	303,15	0,505	0,429	0,076	0,923	0,710	0,213
40	313,15	2,008	2,270	-0,262	4,528	5,670	-1,142
50	323,15	7,327	6,2153	1,1117	20,135	15,426	4,709

Os valores encontrados da constante C calculada, apresentam grades desvios em relação aos valores encontrados desta na aplicação dos modelos. Este fato é comum, pois a constante C é mais suscetível a variações.

Tabela 6.5: Parâmetro K da equação de GAB ajustado pelo modelo e calculado em função da temperatura.

T(°C)	T(K)	<i>in natura</i>			Enriquecido		
		K (Calculado)	K (modelo)	Desvio	K (Calculado)	K (modelo)	Desvio
20	293,15	1,096	1,030	0,066	1,210	0,940	0,270
30	303,15	1,069	1,004	0,065	1,116	1,115	0,001
40	313,15	1,045	0,981	0,064	1,035	1,036	0,001
50	323,15	1,023	0,959	0,064	0,964	0,964	0,000

Os valores da constante K são bastante próximos, em todas as temperaturas estudadas apresentando baixos desvios, que permite usá-los com segurança no programa de simulação matemática. A Tabela 6.6 apresenta os valores de entalpia de monocamada (H_m) e multicamada (H_n) previstos pelo modelo de GAB.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Tabela 6.6: Valores de entalpia de monocamada (H_m) e multicamada (H_n) previstos pelo modelo de GAB.

Modelo	Material	T (°C)	λ (J/mol)	λ_m (J/mol)	H_m (J/mol)	H_n (J/mol)
GAB	<i>in natura</i>	20	44083,16	43545,67	-67368,91	41744,2
		30	43737,11			
		40	43372,64			
		50	42989,75			
	Enriquecido	20	44083,16		-88222,09	37593,67
		30	43737,11			
		40	43372,64			
		50	42989,75			

λ - entalpia de vaporização; λ_m - entalpia de vaporização média; H_m - entalpia de monocamada; H_n - entalpia de multicamada.

A entalpia de dessorção da multicamada é menor que a entalpia de vaporização da água. Isto pode ser explicado por ser uma quantidade menor de energia envolvida na dessorção de água em relação a total vaporização, ou seja, a retirada de água da primeira camada requer um conteúdo menor de energia, e a entalpia de monocamada apresentou um valor bem maior que das multicamadas. Esta diferença é esperada e deve ser explicada pela razão que estando o material com umidade relativamente baixa, a quantidade de água existente nos poros do material possui ligações mais fortes sendo bastante lógica a necessidade de energia mais elevada para retirar a água contida nas no material (SILVA, 2004b). Estas preconizações servem tanto para os valores de bagaço de caju *in natura* e enriquecido.

De acordo com os valores de monocamada e multicamada o bagaço *in natura* necessita de uma quantidade menor de calor para transformar água livre em vapor que o material enriquecido. Este fato, possivelmente, é oriundo do poder hidrofílico de algumas proteínas, onde com o aumento nutricional protéico propiciado pela fermentação, ocasiona em uma quantidade maior do material que retém água pela afinidade de algumas proteínas pela água, o que aumenta a necessidade da calor para secagem deste material. No bagaço *in natura* a água é retida provavelmente apenas nas fibras insolúveis e celulose, que funcionam como esponja, necessitando de uma quantidade menor de calor para retirada de água, tanto nos pontos de alta umidade quanto nos pontos de baixa umidade. Após o enriquecimento ocorre uma redução de fibras insolúveis e aumento do teor protéico do material, logo, a água que não consegue espaço para ligar-se às fibras são adsorvidas nas proteínas pelo poder hidrofílico de algumas destas, aumentando a necessidade de calor para remoção desta água.

6.2.1.2 Calor Isostérico

O calor isostérico, ou simplesmente calor de sorção, determinado nesse estudo, é um importante parâmetro a ser obtido porque, por meio dele, é possível se ter uma idéia sobre a demanda energética nos processos de desidratação e secagem de materiais biológicos. As curvas isostéricas de sorção ($\ln [a_w]$) versus $1/T$ (Figuras 6.10 e 6.11) em função da umidade de equilíbrio das amostras foram obtidas baseadas nos dados das curvas de equilíbrio higroscópico ajustadas pelo modelo de GAB.

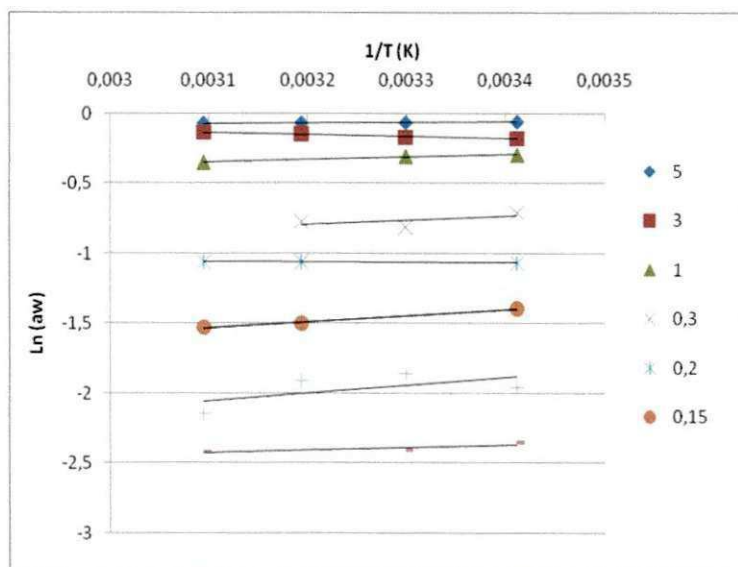


Figura 6.10: Curvas de $\ln(a_w)$ versus $1/T$, baseadas na equação de Clausius-Clapeyron para bagaço do pedúnculo de caju *in natura*, em função da umidade

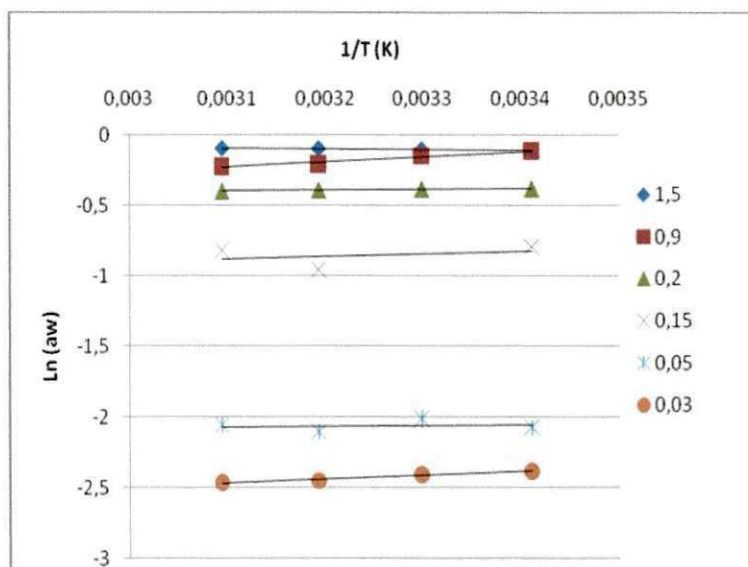


Figura 6.11: Curvas de $\ln(a_w)$ versus $1/T$, baseadas na equação de Clausius-Clapeyron para bagaço do pedúnculo de caju enriquecido, em função da umidade.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

O valor do calor isostérico para cada conteúdo de umidade, corresponde ao valor do coeficiente de inclinação da reta, multiplicado pela constante específica para água (baseada na constante universal dos gases dividido pelo peso molecular da água; $R_{H_2O}=R/PM_{H_2O}=8,314/18= 0,4618 \text{ kJ kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$) conforme propõe a equação de Clausius-Clapeyron. Esses valores se encontram listados na Tabela 6.7.

Tabela 6.7: Valores de calor de sorção do bagaço do pedunculo de caju, *in natura* e enriquecido.

In natura X_{bs}	a_w				R^2	q_{st} (kJ/kg)
	20°C	30°C	40°C	50°C		
5	0,975	0,955	0,952	0,932	0,936	1489,01
3	0,829	0,832	0,85	0,826	0,842	1743,18
1	0,738	0,736	-	0,705	0,909	1826,4
0,5	0,633	0,676	0,686	-	0,893	1864,78
0,4	0,491	-	0,461	-	0,882	1879,05
0,2	0,376	-	0,368	0,36	0,952	1904,95
0,1	0,122	0,148	0,156	0,141	0,912	2433,95
0,05	0,095	0,097	0,076	0,086	0,752	2501,37
Enriquecido X_{bs}	a_w				R^2	q_{st} (kJ/kg)
	20°C	30°C	40°C	50°C		
1,5	0,901	0,906	0,943	0,913	0,987	1595,45
0,9	0,802	0,811	0,863	0,813	0,892	1651,47
0,3	0,692	0,683	0,731	-	0,859	1669,39
0,2	0,677	0,633	0,685	0,672	0,833	1727,19
0,1	0,407	0,288	0,385	0,442	0,834	1736,65
0,08	0,142	0,212	0,15	0,128	0,896	1737,74
0,05	0,109	0,134	0,11	0,111	0,999	1780,71
0,03	0,085	-	0,085	0,089	0,933	1980,64

De acordo com a Tabela 6.7, observa-se que, com a redução do teor de água, ocorre aumento da energia necessária para a remoção de água do produto, representada pelos valores do calor isostérico integral de dessorção (Q_{st}). Tolaba et al. (2004) afirmam ser esta uma observação comum em produtos agrícolas.

No ponto inicial da secagem, o bagaço enriquecido ($X_{bs} \sim 1,5$) necessita de maior quantidade de calor que o bagaço *in natura* ($X_{bs} \sim 5$), para retirada da água disponível, e embora com o decorrer do processo a necessidade de calor aumento para a remoção de água mais íntima do produto, a necessidade de calor torna-se menor em relação ao bagaço *in natura*. Logo, observa-se que, quanto maior a presença de proteínas na formulação do bagaço pseudofruto do caju, menor a necessidade de energia para se remover água do produto, através da capacidade hidrofóbica de algumas destas proteínas.

Nas figuras 6.12 e 6.13, são apresentados os valores do calor isostérico integral de dessorção (Q_{st}), em kJ kg^{-1} , em função do teor de água de equilíbrio (X_{bs}), estimados de acordo com a Equação 4.22, para o bagaço de caju *in natura* e enriquecido, respectivamente.

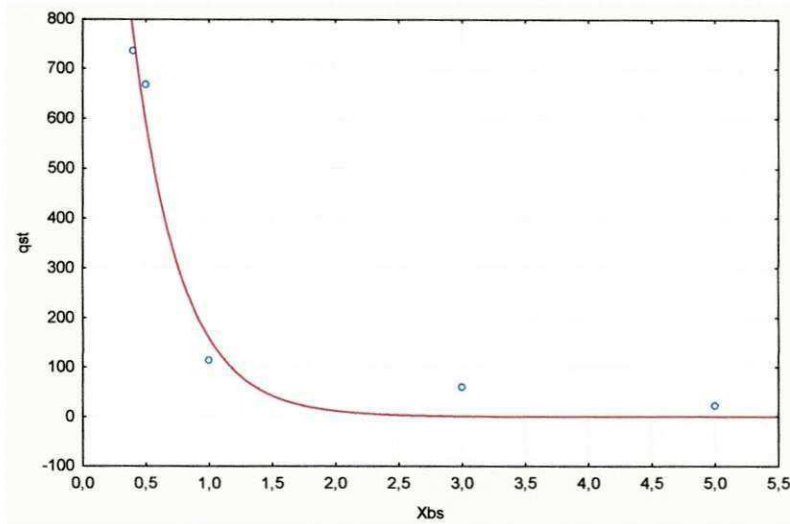


Figura 6.12: Calor isostérico de dessorção para bagaço de caju *in natura* em função do teor de água de equilíbrio.

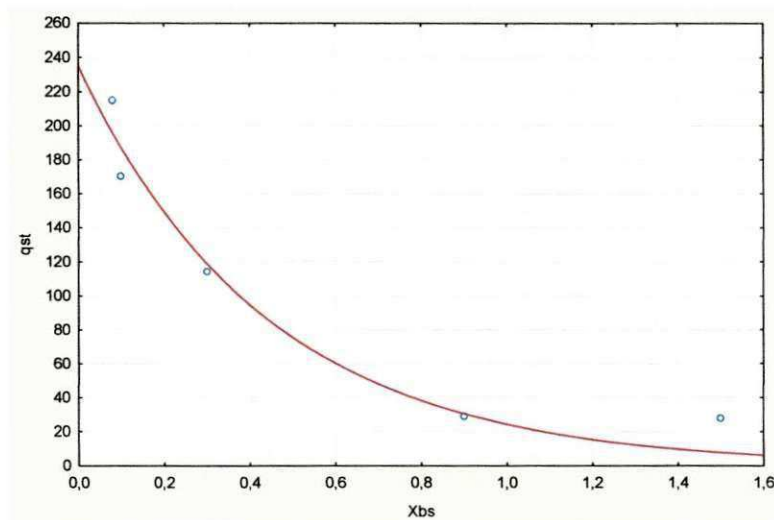


Figura 6.13: Calor isostérico de dessorção para bagaço de caju enriquecido em função do teor de água de equilíbrio.

Observa-se em ambos os materiais, *in natura* e enriquecido, que a medida que o material perde umidade o calor isostérico aumenta, havendo assim, uma maior necessidade de energia para remover o conteúdo de água. De acordo com Leite et al. (2004), isto ocorre

RESULTADOS E DISCUSSÃO

porque, durante a secagem, a temperatura do produto é maior na parte externa que na interna e, devido a isso, forma-se uma camada ressecada na sua superfície, o que dificulta a transferência de calor do ar de secagem para o seu interior à medida que o tempo de secagem aumenta, concentrando toda a umidade restante na sua parte central, sendo necessário uma maior quantidade de calor para que seja retirada mais água e, conseqüentemente, um prolongamento no tempo de secagem, o que acarreta um maior custo na operação de secagem. Vale salientar que nem todos os produtos possuem esta característica, no entanto, para os que a possui, é mais conveniente a secagem intermitente que consiste em secar o produto em um período de tempo alternado, deixando um espaço de tempo durante a secagem para que a umidade concentrada no interior do produto se redistribua nele, facilitando a evaporação da água quando o processo for reiniciado.

A Tabela 6.8 apresenta os modelos de regressão ajustado aos valores experimentais do calor isostérico considerando que: $Q_{st}=q_{st}+L$ (Equação 5.22), onde L é o calor latente de vaporização da água (kJ kg^{-1}) a temperatura média (T) da faixa de estudo e q_{st} é o calor isostérico líquido de sorção, calculado a partir da Equação 5.21.

Tabela 6.8: Modelo de regressão ajustado aos valores experimentais do calor isostérico integral de dessorção (Q_{st}), em kJ kg^{-1} , em função do teor de água de equilíbrio (X_{bs}), com seus respectivos coeficiente de determinação (R^2).

	Modelo	R^2
In natura	$Q_{st}=(2256,54)*\exp((-2,6552)*X_{bs})+2419,4$	0,9996
Enriquecido	$Q_{st}=(235,294)*\exp((-2,2722)*X_{bs})+ 2419,4$	0,9805

Para o material *in natura* os valores de A (2256,54) e B (-2,6552), dos quais apenas o valores de B é próximo aos valores encontrados no material enriquecido ($B_e=-2,2722$). O valores de A do enriquecido ($A_e=235,294$) foi muito menor que o encontrado no bagaço *in natura*. Com base nesses valores, pode-se dizer que o modelo prediz, com precisão, os valores do calor de sorção do bagaço de caju, *in natura* e enriquecido.

Observa-se que as equações utilizadas para ambos os produtos, tanto *in natura* quanto enriquecido, mostraram-se satisfatórias na descrição do fenômeno, apresentando elevada significância dos seus parâmetros e do coeficiente de determinação (R^2).

Para o calor isostérico integral de sorção (Q_{st}), em kJ.kg^{-1} , foram adicionados, aos valores de q_{st} , o valor do calor latente de vaporização da água livre (L), que representa a menor quantidade de energia necessária para evaporar a água

RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.2.1.3 Cálculo de Superfície exposta (S_0)

Na Tabela 6.9 são apresentados os valores de superfície exposta do bagaço do pseudofruto de caju, *in natura* e enriquecido, a partir dos dados de monocamada, obtidos do modelo de GAB.

Tabela 6.9: Valores de superfície exposta do bagaço de caju, *in natura* e enriquecido, a partir dos dados de monocamada obtidos do modelo de GAB.

T (°C)	Xm		$S_0 \times 10^{-5}$ (m ² /kg de massa seca)	
	<i>in natura</i>	Enriquecido	<i>in natura</i>	Enriquecido
20	0,24	0,36	8,400	12,60
30	0,35	0,10	12,250	3,500
40	0,15	0,07	5,250	2,450
50	0,12	0,09	4,200	3,150
Média	0,22	0,16	7,525	5,425

O conhecimento da área de superfície exposta da matriz sólida de materiais biológicos é uma importante consideração. Esta indica a relação com as reações químicas que determinam a deterioração destes materiais.

O bagaço enriquecido apresenta resultados para a área de matriz sólida maior que o bagaço do pseudofruto *in natura*, quando observadas as monocamada da isoterma de 20°C. Nas demais isotermas, 30, 40 e 50°C, o resultado se inverte. Em média, o valor da superfície exposta da matriz sólida do material enriquecido é menor, fato que pode ser explicado pela diminuição de fibra bruta após o processo de fermentação semi-sólida, pela redução de sítios ativos com o aumento protéico do meio.

6.3. CINÉTICA DE SECAGEM

Neste sub-tópico, constam os resultados da cinética de secagem do bagaço do pseudofruto do caju, *in natura* e enriquecido, processados em estufa com escoamento paralelo de ar a 60°C.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.3.1. Cinética de secagem do bagaço do pseudofruto do caju, *in natura* e enriquecido.

As figuras, 6.14 e 6.15, apresentam o conteúdo de umidade contra o tempo no processo de secagem do bagaço do pseudofruto do caju, *in natura* e enriquecido.

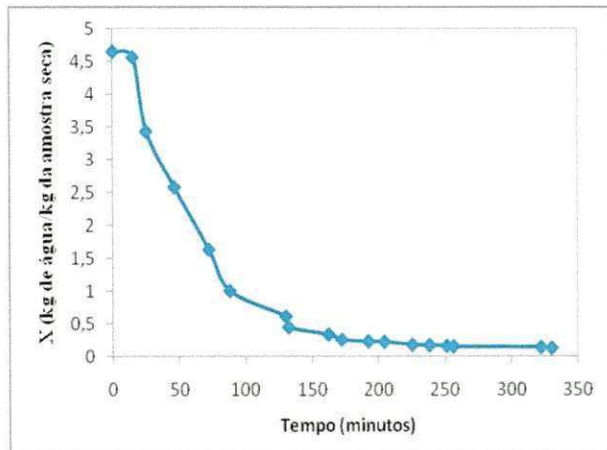


Figura 6.14: Conteúdo de umidade contra o tempo no processo de secagem do pseudofruto do caju, *in natura*.

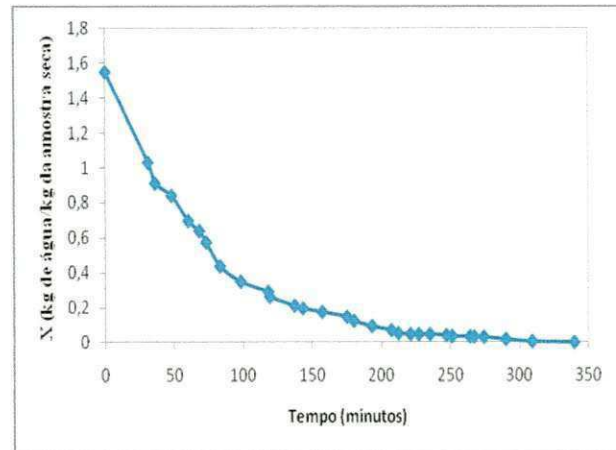


Figura 6.15: Conteúdo de umidade contra o tempo no processo de secagem do pseudofruto do caju, enriquecido.

Apesar do valor da umidade inicial (1,5486 g de água/g de matéria seca) observada no bagaço do pseudofruto enriquecido ser inferior a metade do valor encontrado para o bagaço de pseudofruto *in natura* (4,6577 g de água/g de matéria seca), o tempo necessário para atingir o equilíbrio foi praticamente o mesmo para ambos os materiais, aproximadamente 300 minutos, isso significa que o material *in natura* seca mais rápido de que a do material enriquecido.

As figuras, 6.16 e 6.17, apresentam a taxa de secagem do bagaço do pseudofruto do caju, *in natura* e enriquecido, em função do conteúdo de umidade.

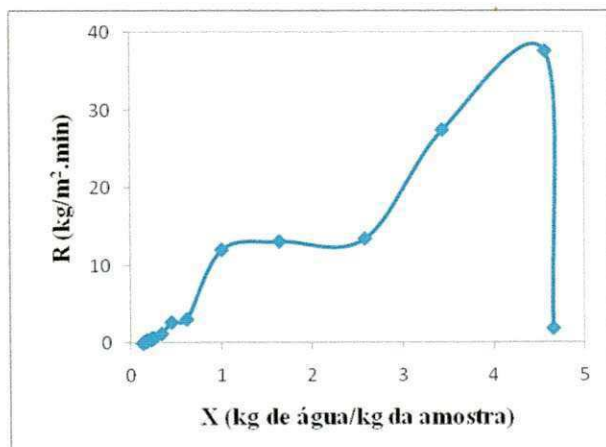


Figura 6.16: Taxa de secagem do bagaço do pseudofruto do caju, *in natura*, em função do conteúdo de umidade

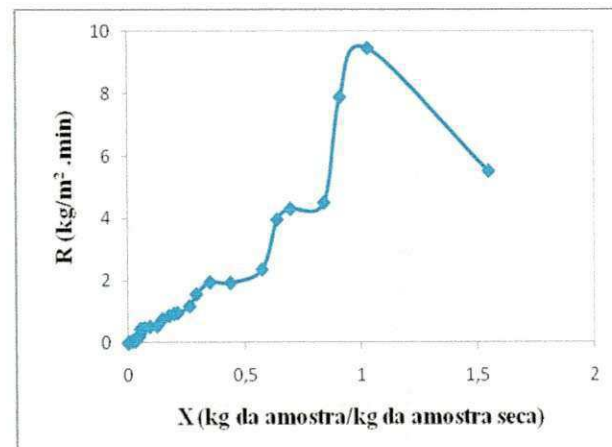


Figura 6.17: Taxa de secagem do bagaço do pseudofruto do caju, enriquecido, em função do conteúdo de umidade

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Observa-se na Figura 6.16 o período de taxa constante de secagem do bagaço *in natura* com uma umidade crítica de 1,64 kg de água/kg de matéria seca. Entretanto, para o material enriquecido, Figura 6.17, não apresentou período de taxa constante, devido ao processo de inativação de proteínas a que o material foi submetido após o processo de enriquecimento por via fermentativa. Este processo de inativação foi realizado por 2 horas a 60°C, mesma temperatura de secagem, o que provocou uma diminuição importante da umidade inicial do material submetido a secagem.

O material *in natura* possui taxa de secagem maior que o material enriquecido pelo fato de possuir região de alta umidade e atingir a umidade de equilíbrio ao mesmo tempo.

Observando a região de taxa decrescente de secagem do bagaço do pseudofruto do caju, *in natura* e enriquecido, a partir das umidades de 1,01 e 1,03 kg de água/kg de matéria seca, respectivamente, nota-se que a taxa de secagem do material enriquecido (1,90 kg/m².min em média), nesta região, é maior que a taxa de secagem do material *in natura* (1,68 kg/m².min em média).

O fato da taxa de secagem do material enriquecido ser maior que a do material *in natura*, no período de taxa decrescente, se deve possivelmente pela característica hidrofóbica de algumas proteínas ocasionada pelo aumento destas no meio enriquecido, provavelmente também explicada pelas umidades de equilíbrio destes materiais, *in natura* e enriquecido, respectivamente, 0,1306 (b.s) e 0,0054 (b.s).

As figuras, 6.18 e 6.19, apresentam a razão de umidade bagaço do pseudofruto do caju, *in natura* e enriquecido, em função do conteúdo de umidade. Estas curvas foram construídas utilizando o intervalo de umidades de 1,6388 à 0,1306 (b.s) e 0,6408 à 0,0054 para os bagaços de pseudofruto *in natura* e enriquecido, respectivamente, para analisar o período de taxa decrescente.

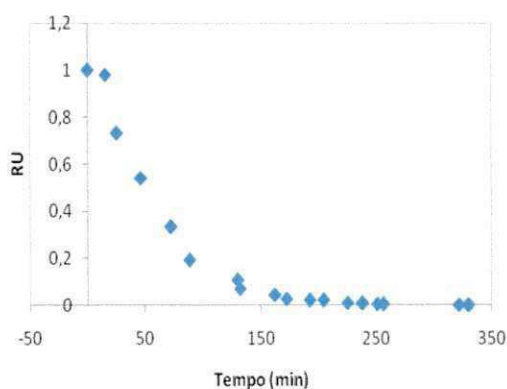


Figura 6.18: Razão de umidade bagaço do pseudofruto do caju, *in natura*, em função do tempo.

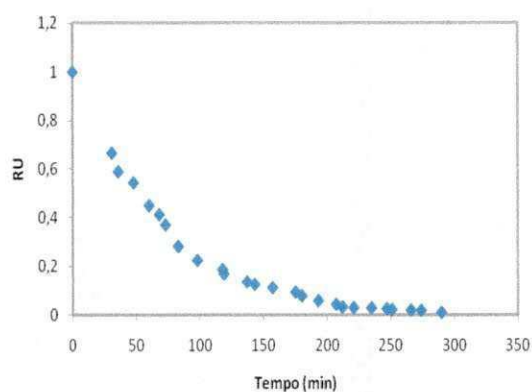


Figura 6.19: Razão de umidade do bagaço do pseudofruto do caju, enriquecido, em função do tempo.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.3.2. Aplicação de modelos

A Tabela 6.10 apresenta os dados obtidos com a aplicação de ajuste dos modelos matemáticos a partir dos dados de cinética do bagaço do pseudofruto do caju *in natura* e enriquecido.

Tabela 6.10: Dados obtidos com a aplicação de ajuste dos modelos matemáticos a partir dos dados de cinética do bagaço do pseudofruto do caju, *in natura* e enriquecido.

	Modelo	Parâmetros				R ²	P (%)
		K*	Dap (x10 ⁸ m ² /min)				
<i>In natura</i>	Difusional	0,020 ± 0,002		1,82		0,9850	7,69
	Lewis	K ₁ 0,016 ± 0,001				0,9864	5,18
	Page	K ₁ 0,003 ± 0,001		N 1,41 ± 0,01		0,9964	2,06
	Henderson and Pabis	A ₁ 1,10 ± 0,02		K ₁ 0,017 ± 0,001		0,9910	3,18
	Dois Termos	A ₁	K ₀	A ₂	K ₁	0,9910	3,18
		0,552±0,000	0,017 ± 0,001	0,552 ± 0,000	0,017 ± 0,001		
<i>Enriquecido</i>	Difusional	0,016 ± 0,001		1,46		0,9850	0,77
	Lewis	K ₁ 0,014 ± 0,000				0,9979	0,62
	Page	K ₁ 0,010 ± 0,001		N 1,067 ± 0,001		0,9986	0,29
	Henderson and Pabis	A ₁ 1,018 ± 0,001		K ₁ 0,014 ± 0,002		0,9981	0,53
	Dois Termos	A ₁	K ₀	A ₂	K ₁	0,9981	0,53
		0,509 ± 0,000	0,014± 0,001	0,509± 0,000	0,014± 0,001		

Os valores encontrados para difusividade aparente do bagaço do pseudofruto do caju, *in natura* e enriquecido, são respectivamente, $1,83 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{min}$ e $1,46 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{min}$, apresentando R² por volta de 0,98.

Todos os modelos empíricos aplicados à ambos os materiais apresentaram valores de R² acima de 0,99, exceto o modelo de Lewis aplicado ao material *in natura*, que apresentou valor próximo, 0,98. O modelo de Page, aplicado a ambos os materiais, foi o que apresentou menores desvios percentuais médios sendo, 2,06 (%) e 0,29 (%), para o bagaço do pseudofruto do caju, *in natura* e enriquecido, respectivamente.

Os valores encontrado para os modelos de Lewis, Page e Henderson and Pabis, para o bagaço do pseudofruto do caju enriquecido, são próximos aos valores encontrados por Silva et

RESULTADOS E DISCUSSÃO

al. (2007) quando realizaram o estudo de modelos matemáticos aplicados em cinética de secagem de abacaxi em fatias.

Em todos os modelos empíricos observam-se pequenas diferenças no parâmetro K, quando comparados ao valor encontrado do coeficiente angular (K) do modelo difusional de Fick. O modelo de Page, neste parâmetro e para ambos os materiais, foi que apresentou maiores divergências quando comparado ao modelo difusional, devido ao tipo de equação, onde o tempo não aparece linearmente.

A Figura 6.20 apresenta a cinética de secagem do bagaço do pseudofruto do caju *in natura* à 60°C, com aplicação do modelo de: Lewis, Page, Henderson and Pabis e Dois termos.

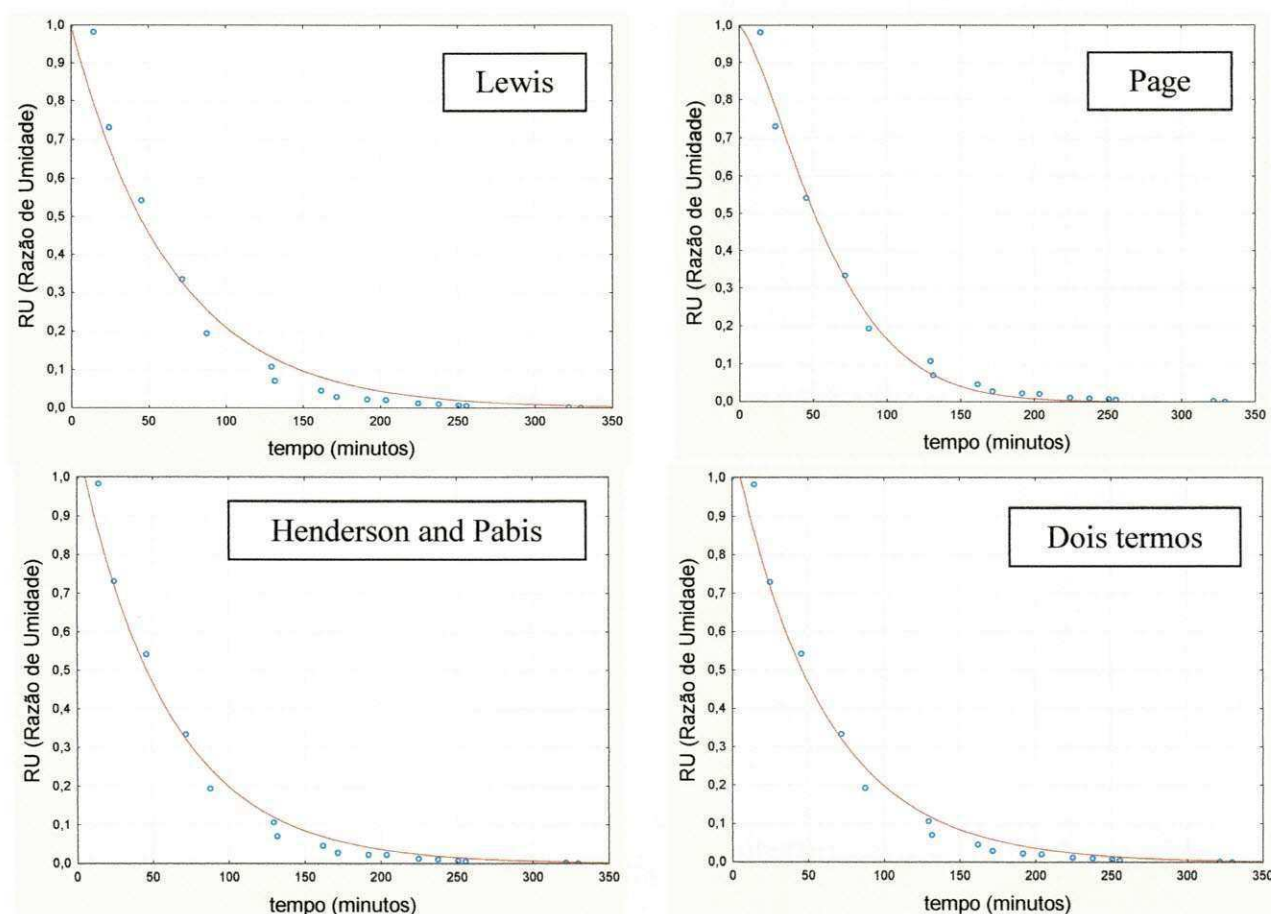


Figura 6.20: Cinética de secagem do bagaço do pseudofruto do caju *in natura* à 60°C, com aplicação do modelo de: Lewis, Page, Henderson and Pabis e Dois termos.

O modelo de Page foi o modelo que melhor se ajustou aos dados experimentais do material *in natura*, tanto nos pontos mais alto de razão de umidade quanto nos pontos mais

RESULTADOS E DISCUSSÃO

próximos ao equilíbrio. Os demais modelos observados, figura 5, para o bagaço do pseudofruto *in natura*, também ajustaram-se bem aos dados experimentais deste material.

Os modelos de Lewis, Henderson and Pabis e Dois termos apresentam-se com curvas idênticas umas das outras, mas com desvios médios maiores que o modelo de Page principalmente na região de baixa umidade, mas podem do ser utilizadas para determinação de razão de umidade.

A Figura 6.21 apresenta a cinética de secagem do bagaço do pseudofruto do caju enriquecido à 60°C, com aplicação do modelo de: Lewis, Page, Henderson and Pabis e Dois termos.

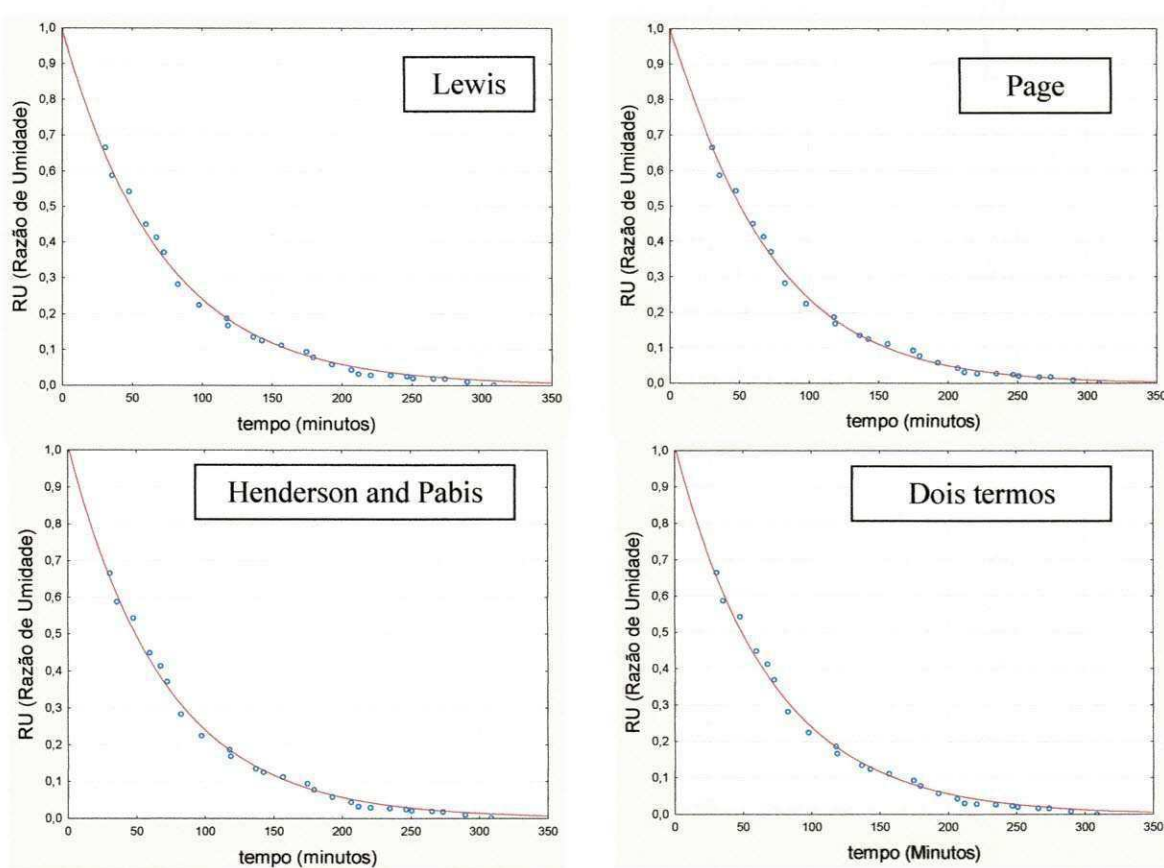


Figura 6.21: Cinética de secagem do bagaço do pseudofruto do caju enriquecido à 60°C, com aplicação do modelo de: Lewis, Page, Henderson and Pabis e Dois termos

Todos os modelos aplicados aos dados experimentais do bagaço do pseudofruto do caju enriquecido por via fermentativa ajustaram-se bem aos dados experimentais, tanto na região de alta umidade, quanto na região próxima ao equilíbrio.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

O modelo de Page foi o que melhor se ajustou aos dados experimentais de ambos os materiais, devido aos baixos desvios percentuais médios (P) observados nos ajustes deste modelo para ambos os materiais.

Observa-se que as curvas geradas a partir do modelo de Page são próximas as curvas geradas por: 1) Sousa et al. (2000) ao trabalharem com a secagem de umbu também verificaram que o melhor modelo ajustado às curvas foi o de Page; e 2) Silva et. al. (2007) observaram que o modelo de Page foi o que melhor se ajustou aos dados experimentais, quando realizaram o estudo de modelos matemáticos aplicados em cinética de secagem de abacaxi em fatias.

Na Figura 6.22 pode se observar a distribuição aleatória dos resíduos para os modelos Lewis, Page, Henderson and Pabis e Dois termos, aplicado aos dados experimentais relativos à secagem do bagaço do pseudofruto do caju *in natura*.

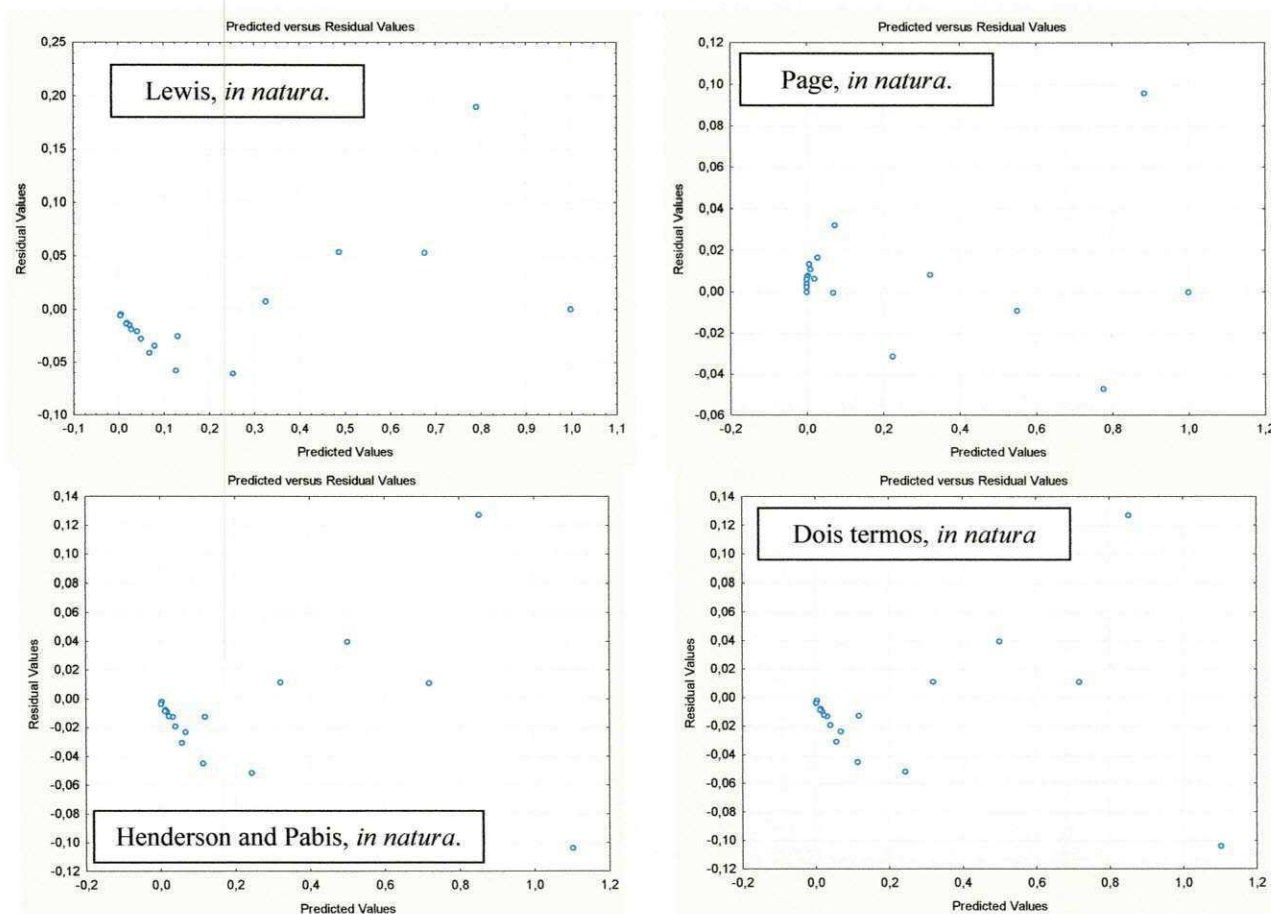


Figura 6.22: Distribuição de resíduos da cinética de secagem do bagaço do pseudofruto do caju *in natura* a 60°C, com aplicação do modelo de: Lewis, Page, Henderson and Pabis e Dois termos.

Em todos os modelos aplicados ao material *in natura*, apenas o modelo de Page, apresenta aleatoriedade na distribuição residual, que caracteriza uma variância constante dos

RESULTADOS E DISCUSSÃO

erros. Os demais modelos apresentam características tendenciosas, mesmo na região próxima ao equilíbrio onde os erros são menores não apresenta aleatoriedade prevalecendo características tendenciosas destes modelos.

Na Figura 6.23 pode se observar a distribuição aleatória dos resíduos para os modelos de Lewis, Page, Henderson and Pabis e Dois termos aplicado aos dados experimentais relativos à secagem do bagaço de pseudofruto enriquecido.

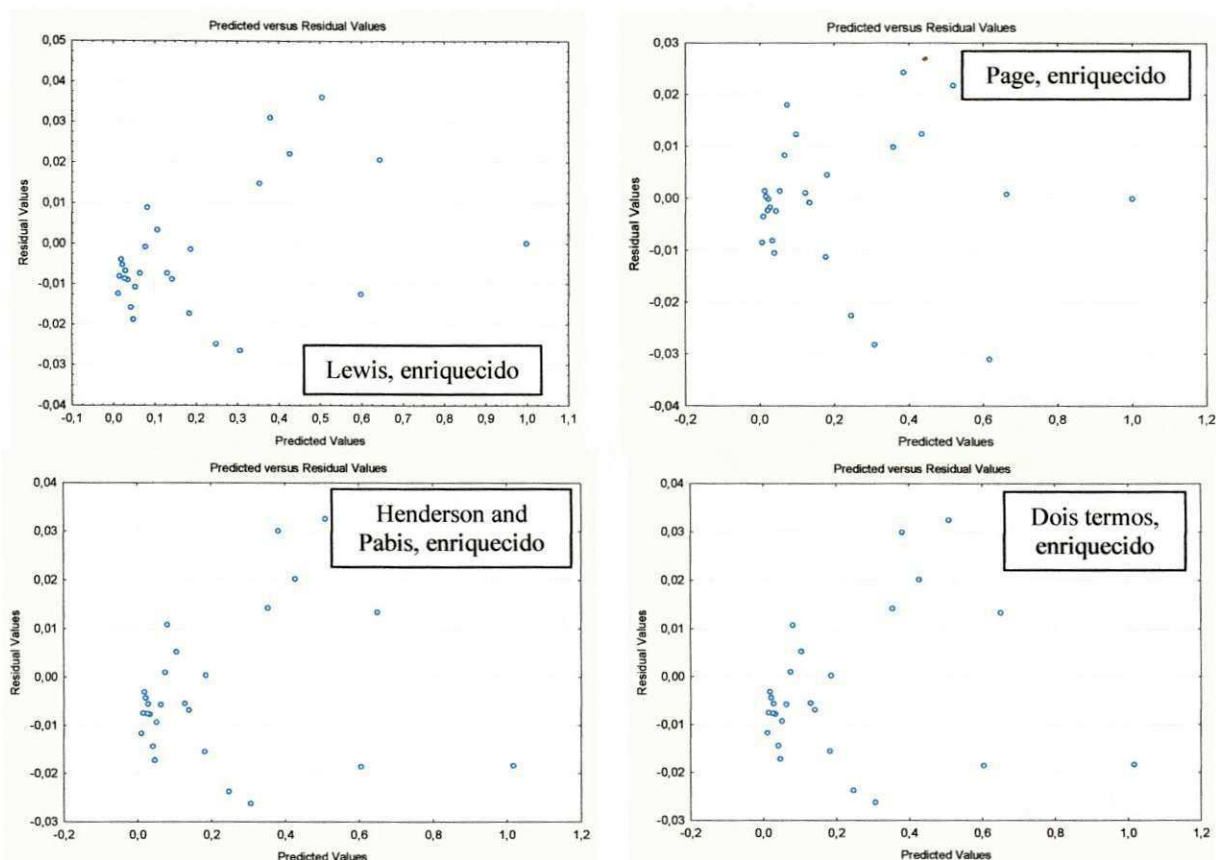


Figura 6.23: Distribuição de resíduos da cinética de secagem do bagaço do pseudofruto do caju enriquecido a 60°C, com aplicação do modelo de: Lewis, Page, Henderson and Pabis e Dois termos.

Em todos os modelos aplicados ao material enriquecido observa-se uma boa distribuição de resíduos, apresentando uma aleatoriedade caracterizando uma variância constante dos erros, estes são menores na região mais próxima ao equilíbrio. Mas o modelo de Page e o que melhor se ajusta aos dados experimentais apresentando melhor aleatoriedade que os demais modelos

CONSIDERAÇÕES FINAIS

"A descoberta consiste em ver o que todo mundo viu e pensar o que ninguém pensou."

(Jonathan Swift)

CONCLUSÕES

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo são apresentados um resumo dos principais resultados obtidos, as conclusões do trabalho e as perspectivas de continuidade da pesquisa.

7.1. RESUMO DOS PRINCIPAIS RESULTADOS OBTIDOS

7.1.1. Quanto à Caracterização

- O bagaço de caju apresenta teores nutricionais baixos que são melhorados com o processo de fermentação semi-sólida;
- No enriquecimento protéico observa-se um aumento de quase todos os parâmetros nutricionais.
- Os valores de proteína encontrados foram de 7,84 (%) e 20,71 (%) para os materiais *in natura* e enriquecido, respectivamente.
- O processo de enriquecimento proporcionou um aumento protéico de 2,68.

7.1.2. Quanto às Isotermas

- O material enriquecido tem menor afinidade com a água devido, provavelmente, ao aumento protéico, e a presença de grupos hidrofóbicos, nestas proteínas. A água presente no enriquecido apresenta maior atividade que no bagaço *in natura* indicando menores forças de interação superficial;
- Os dados de equilíbrio higroscópico obtidos experimentalmente apresentam comportamento típico de isoterma do tipo II.
- A equação de GAB foi a que melhor se ajustou aos dados das isotermas de dessecção do bagaço do pseudofruto do caju, *in natura* e enriquecido, com acima de R^2 de 0,9 e desvio percentual médio entre 1,78 – 2,69 e 2,82-3,60, respectivamente.

CONCLUSÕES

- O modelo de BET também se ajustou satisfatoriamente aos dados experimentais, podendo ser utilizados para o cálculo da umidade de equilíbrio higroscópico das amostras;

7.1.3. Quanto ao Estudo Termodinâmico

- Tanto para o bagaço de caju *in natura* quanto para o bagaço enriquecido, com a redução do teor de umidade, ocorre aumento na energia necessária para a remoção de água do produto;
- O modelo de calor isostérico integral de sorção se ajustou bem aos dados experimentais, de ambos os produtos, apresentando coeficiente de correlação acima dos 90%;
- Em média, o valor a superfície exposta da matriz sólida do material enriquecido ($5,43 \times 10^5 \text{ m}^2/\text{kg}$ de massa seca) é menor que os valores observados no bagaço *in natura* ($7,53 \times 10^5 \text{ m}^2/\text{kg}$ de massa seca).

7.1.4. Quanto à Cinética de Secagem

- A umidade inicial de secagem do bagaço do pseudofruto de caju *in natura* (4,66 b.s) é bem maior que a umidade inicial de secagem do bagaço enriquecido (1,66 b.s), ambos atingem umidade de equilíbrio (b.s) em aproximadamente 300 minutos;
- Abaixo da umidade crítica, a taxa de secagem do bagaço do pseudofruto do caju enriquecido ($1,90 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{min}$ em média) é maior que a taxa de secagem do bagaço do pseudofruto *in natura* ($1,68 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{min}$ em média);

CONCLUSÕES

- Difusividade aparente do bagaço do pseudofruto do caju, *in natura* e enriquecido, são respectivamente, $1,63 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{min}$ e $1,46 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{min}$, apresentando R^2 por volta de 0,98;
- O modelo de Page, foi o que melhor se ajustou aos dados experimentais de ambos os materiais e apresentou menores desvios percentuais médios;
- Todos os modelos empíricos aplicados à ambos os materiais ajustaram-se bem aos dados experimentais, com valores de R^2 acima de 0,9, e podem ser utilizados para predição da cinética de secagem.

7.2. CONCLUSÃO

O bagaço do caju *in natura* possui grande potencial para fermentação semi-sólida, apresentando boas quantidades de açúcares que são consumidas no processo fermentativo para crescimento de biomassa. Observa-se que ocorre aumento de quase todos os constituintes estudados na caracterização, quando caracterizado o material após o enriquecimento por via fermentativa.

No estudo das isotermas de sorção de umidade, observa-se que bagaço do pedúnculo do caju enriquecido tem menor afinidade com a água possivelmente devido a produção de algumas proteínas com grupos hidrofóbicos.

O estudo dos calores de sorção apresentam a maior necessidade de calor na região de monocamada e é confirmada com estudo de calor isostérico de sorção, onde a maior necessidade de calor em função da redução de umidade do material, sendo estes fatos observados em ambos os materiais utilizados neste estudo.

Comparando os materiais estudados observa-se que quanto maior a presença de proteínas na formulação do bagaço de caju, menor a necessidade de energia para se remover água do produto, através da capacidade hidrofóbica de algumas destas proteínas.

CONCLUSÕES

Para predição da cinética de secagem, o material enriquecido não apresenta região de taxa constante. Ainda neste estudo, o modelo de Page foi o que melhor se ajustou aos dados experimentais de ambos os materiais, apresentando menores desvios percentuais médios de 0,29 e 2,06% para *in natura* e enriquecido, respectivamente. Apresentando, ainda, melhores distribuições residuais e valores de R^2 acima de 0,9.

A região de monocamada observada no estudo de isotermas de sorção é confirmada com o estudo de calor de isostérico de sorção e cinética de secagem.

Apesar dos bons resultados encontrados com o estudo cinético, há a necessidade de aprofundamento deste estudo a outras temperaturas, para determinação de efeitos e otimização desta, além da necessidade de estudar a cinética destes materiais em secadores de leite fixo e fluidizado.

7.3. PERSPECTIVAS

Com o objetivo de dar continuidade ao trabalho realizado, seguem abaixo algumas sugestões e perspectivas.

- Utilização do bagaço do pseudofruto do caju enriquecido em rações destinadas a alimentação animal de caprinos e ovinos;
- Caracterizar as proteínas dos materiais, *in natura* e enriquecido, observando o efeito benéfico e maléfico da desnaturação de algumas proteínas existentes nestes meios;
- Produzir produtos alimentícios para humanos tais como: pão, bolo, bolachas, hambúrguer, barra de cereais, etc;
- Realizar estudos cinéticos de secagem em leite fixo e fluidizado, dos materiais *in natura* e enriquecido, a temperaturas distintas;
- Estudo de fermentação semi-sólida e secagem como operações combinadas em leite fluidizado.

REFERÊNCIAS

"Assim com não existem pessoas pequenas na vida, sem importância, também não existe trabalho insignificante."
(Elena Bonner)

REFERÊNCIAS

8. REFERÊNCIAS

ABNT NBR 10004. **Resíduos Sólidos – Classificação**. 2ª Edição. 71 p. 2004.

ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas. **Solo - Análise Granulométrica NBR-7181**, 1984.

ALBUQUERQUE, P. M.; KOCH, F.; GOULART, T. T.; ESPÓSITO, E.; NINOW, J. L. **Enriquecimento protéico do bagaço de maçã com proteína fungica através da fermentação em estado sólido**. In: Simpósio Nacional de Fermentação (CD ROM), Florianópolis, 2003.

ALMEIDA, K.V. **Caracterização físico-química da farinha de casca de frutos tropicais**. Monografia de conclusão de curso. Universidade Estadual da Paraíba – UEPB. 2009.

AL-MUHTASEB A.H.; MCMINN W.A.M.; MAGEE T.R.A. Water sorption isotherms of starch powders. Part 2: Thermodynamic characteristics. **Journal of Food Engineering**, v.62, p. 135–142, 2004.

ALONSO, L.F.T. **Algoritmos de seleção e dimensionamento de secadores**. 2001. 241 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola). Em Engenharia Agrícola. Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

AMORIM, B. C.; MOTA, M. M. A SIMÕES, V. S.; SILVA, F. L. H.; OLIVEIRA L. S. C. **Estudo do Enriquecimento Protéico do Bagaço da Fruta da Palma Forrageira (*Opuntia ficus-indica* Mill)**. VI Congresso Brasileiro de Engenharia Química em Iniciação Científica, 2005

AMORIM, B.C. **Estudo da Utilização de resíduos agroindustriais em processo bioquímico**. Relatório de Estágio Integrado – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, Paraíba, 2008.

ANDERSON, R. B. Modifications of the BET equation. **J. Am. Chem. Soc.**, Easton, PA: Mack Printing Company, n.68, 1946.

ARAGÃO, Renato Fonseca. **Secagem de Fatias de Caju (*Anacardium occidentale L.*) em Secador de Bandejas**. Tese de Doutorado em Engenharia de Processos – UFCG – 2008. Orientada por Odelsia Leonor Sanchez de Alsina e Josilene de Assis Cavalcante.

ARAÚJO, L. F.; MEDEIROS, A. N.; PERAZZO NETO, A.; CONRADO, L. S.; SILVA, F. L. H. **Estudo do enriquecimento protéico do mandacaru sem espinhos (*Cereus jamacaru* P.DC) utilizando leveduras por fermentação semi-sólida**. In: Simpósio Nacional das Fermentações (CD ROM), Florianópolis, 2003.

ARAÚJO, L. F.; MEDEIROS, A. N.; PERAZZO NETO, A.; OLIVEIRA, L. S. C.; SILVA, F.L. H. **Protein Enrichment of Cactus Pear (*Opuntia ficus-indica* Mill) Using *Saccharomyces cerevisiae* in Solid-State Fermentation**. Brazilian Archives of Biology and Technology, Curitiba, v. 48, p. 161-168, 2005.

ASAE/American Society of Agricultural Engineers. Moisture relationship of grains. St. Joseph, p.363, 1991.

REFERÊNCIAS

- BIANCHI, V. L. D., MORAES, I. O., CAPALBO, D. M. F. **Fermentação em meio semi-sólido**. In: *Biotecnologia Industrial: Engenharia Bioquímica*, v.2, p.247-276, 2001.
- BOBBIO, P.A. **Química do processamento de alimentos**. 2aEd. São Paulo: Varela, 1992. 223p.
- BRASIL. **Métodos Físico-Químicos para Análises de Alimentos**. Ministério da Saúde, Instituto Adolfo Lutz, 2005.
- BRASIL. **Trabalho no Campo. Texto 6: Do Caju Brasileiro se Aproveita até o cheiro**. Coleção de cadernos do EJA. SECAD - Secretaria de Educação Continuada, Alfabetização e Diversidade. Ministério da Educação. ISBN 978-85-296-0066-6. pág.: 17. 2007.
- BROD, F.P.R. **Avaliação de um secador vibro-fluidizado**. 2003. 335f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola). Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.
- BRUNAUER, S. ; EMMETT, P.H.; TELLER, F. Adsorption of gases in multi-molecular layers. **J. Am. Chem. Soc.**, Easton, v.2, n.60 p.309-319, 1938.
- BURROWS, S. Baker's yeast. In: ROSE, A.H.; HARRISON, J.S. (Eds.). **The Yeasts: Yeast technology**. London: Academic Press, 1970. v.3, p.349-419.
- CAMPOS, A. R. N.; SILVA, F. L. H.; GOMES, J. P.; OLIVEIRA, L. S. C.; OLIVEIRA, M. M. Isotermas de adsorção e calor isostérico da palma forrageira enriquecida proteicamente. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. v.13, n.6, p.734-740, 2009. Campina Grande, PB, UAEEA/UFCG - . Protocolo 107.08 - 23/05/2008 • Aprovado em 25/03/2009
- CAMPOS, A. R. N. **Enriquecimento protéico do bagaço do pedúnculo de caju (Anarcadium occidentale L.) por fermentação semi-sólida**. Campina Grande, Paraíba, 2003, 87p. (Dissertação) - Universidade Federal de Campina Grande.
- CAMPOS, A. R. N.; SANTANA, R. A. C.; DANTAS, J. P.; OLIVEIRA, L. S. C.; SILVA, F. L. H. **Enriquecimento Protéico do Bagaço do Pedúnculo de Caju por Cultivo Semi-Sólido**. *Revista de Biologia e Ciência da Terra*, Belo Horizonte, v. 5, n. 2, p. 72-82, 2005.
- CANOILAS, L.M. **Enriquecimento protéico de resíduos de farinha de mandioca pelo desenvolvimento de leveduras**. Piracicaba: ESALQ, 1991. 110p. Dissertação de Mestrado.
- CHINNAN, M. S.; BEAUCHAT, L.R. Sorption isotherms of whole cowpeas and flours. **Lebensmittel-Wissenschaft & Technologie**, London, n.18, p.83-88, 1985.
- CHUNG, D.S.; PFOST, H.B. Adsorption and desorption of water vapour by cereal grains and their products. **Transactions of the ASAE**. St Joseph, v.10, n.4, p.149-157, 1967.
- CORRÊA, P.C.; GONELI, A.L.D.; RESENDE, O.; RIBEIRO, D.M. **Obtenção e Modelagem das Isotermas de Dessorção e do Calor Isostérico de Dessorção para Grãos de Trigo**. *Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais*, Campina Grande, v.7, n.1, p.39-48, 2005. ISSN 1517-8595

REFERÊNCIAS

- CORREIA, R. T. P. **Estudo do cultivo semi-sólido de *Saccharomyces cerevisiae* e *Rhizopus oligosporus* em resíduo de abacaxi**. 2004. 163f. Tese (Doutorado em Tecnologia de Processos Bioquímicos) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal.
- CRANK, J. **The mathematics of diffusion**. 2ed., Clarendon Press, 1975, 414p.
- De BOER, J.H. **The dynamical character of adsorption**. Oxford: Clarendon Press, 1953.
- DE MATOS, A. T. **Apostila do Curso sobre Tratamento de Resíduos Agroindustriais - Tratamento de resíduos agroindustriais**. Departamento de Engenharia Agrícola e Ambiental/UFV. Universidade Federal de Viçosa. Fundação Estadual do Meio Ambiente Maio de 2005
- DURAL, N. H., HINE, A. L. A. A new theoretical isotherm equation for water vapor-food systems: multilayer adsorption on heterogeneous surfaces. **Journal of Food Engineering**. v. 20, n. 1, p. 75-96, 1993.
- EIROA, M.N.U. **Microbiologia de frutas e hortaliças desidratadas**. In: Instituto de Tecnologia de Alimentos – Manual Técnico, Campinas: ITAL, 1997, p. 6.1-6.26.
- FERREIRA, C.D.; PENA, R.S. Comportamento higroscópico da farinha de pupunha (*Bactris gasipaes*). **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, Campinas, v.23, n.2, p.251- 255, 2003.
- FIGUEIREDO, R. **Princípios de secagem de produtos biológicos**, João Pessoa. Editora Universitária- UFPB, 2004. 229p.
- GIBBONS, W.R.; WESTBY, C.A.; DOBBS, T.L. A continuous, farm-scale, solid-phase fermentation process for fuel ethanol and protein feed production from fodder beets. **Biotechnology and Bioengineering**, New York, v.26, p.1098-1107, 1984.
- GOUVEIA, J. P.; MOURA, R. S. F.; ALMEIDA, A. M. V.; SILVA, M. M. Avaliação da cinética de secagem de caju mediante um planejamento experimental. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola**. Campina Grande. v.6. n.3. p.471-474, 2002.
- GOUVEIA, J.P.G. **Avaliação da cinética de secagem de gengibre (*Zingiber officinale*, Roscoe) em um secador de leito fixo**. Campinas: UNICAMP, 1999. 159p. Tese Doutorado.
- GUGGENHEIM, E.A. **Applications of statistical mechanics**. Oxford: Clarendon Press, 1966. 86p.
- HALSEY, G. Physical adsorption on uniform surfaces. **Journal of Chemical Physics**, Woodbury: Amer. Inst. Physics, v.16, n.10, p.931-937, 1948.
- HEIDELBAUG, N. D. & KAREL, M. **Stability of low and intermediate moisture foods**. I: GOLDBLITH, S.A.; REY, L. ROTHMAYR, W.W.. **Freeze Drying and Advanced Food Technology**. New York: Academic Press, 1975, p. 643 – 674.
- HOLANDA, J.S.; OLIVEIRA, A.J.E.; FERREIRA, A. C. **Enriquecimento protéico de pedúnculos de caju com emprego de leveduras, para alimentação animal**. Pesquisa Agropecuária Brasileira., v.33, n.5, p.79, 1998.

REFERÊNCIAS

HOLANDA, J.S.; Oliveira, J.F.; MELO, J.B.; SILVA, J.C.; Souza, N.A.; SILVA, H.P.; AZEVEDO, J.C.T. **Manejo e Produção de Galinha Caipira**, Empresa de Pesquisa Agropecuária do Rio Grande do Norte, 2002.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Fonte: IBGE, Diretoria de Pesquisas, Departamento de Agropecuária, 2006. Disponível em <<http://www.sidra.ibge.gov.br/>>. Acesso: 09 de abril de 2009 às 15 horas e 12 minutos.

KAYMAK-ERTEKIN, F.; SULTANOGLU, M. Moisture sorption isotherm characteristics of peppers, **Journal of Food Engineering**, v.47, p.225-231, 2000.

KEEY, R.B. **Drying of loose and particulate materials**. New York: Hemisphere, 1991, 57 p.

KEEY, R.B. **Drying principles and practices**. 1ª Ed. Oxford: Pergamon Press, 1972. 358p.

KIRANOUDIS, C.T.; TSAMI, E.; MAROULIS, Z.B.; MARINOS-KOURIS, D. Drying kinetics of some fruits, **Drying Technology**, v.15, n.5, p.1399-1418, 1997.

LEITE, J.C.A.; SILVA, M.M.; GOUVEIA, J.P.G.; ALMEIDA, F.A.C.; PEDROZA, J.P. Calor Isostérico da Polpa de Banana Variedades Maçã e Nanica. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, Campina Grande, v.6, n.2, p.171-178, 2004. ISSN 1517-8595.

LOUSADA Junior, José Edilton; NEIVA, José Neuman Miranda; RODRIGUEZ, Norberto Mário; PIMENTEL, José Carlos Machado; LÔBO, Raimundo Nonato Braga. **Consumo e Digestibilidade de Subprodutos do Processamento de Frutas em Ovinos**. R. Bras. Zootec., v.34, n.2, p.659-669, 2005.

MAGGIONI, Daniele & MARQUES, Jair de Araújo. **Resíduos agroindustriais na alimentação de ruminantes: uma revisão**. PUBVET, **Publicações em Medicina Veterinária e Zootecnia**. Disponível em: <<http://www.pubvet.com.br/texto.php?id=66>>. V. 1, N. 6, Nov 2, ISSN 1982-1263, 2007.

MANILAL, V.B.; NARAYANAN, C.S.; BALAGOPALAN, C. Cassava starch effluent treatment with concomitant scp production. **World Journal of Microbiology and Biotechnology**, Oxford, v.7, p.185-190, 1991.

MARQUES, L. F.; DUARTE, M. E. M.; RANGEL, M. E.; CAVALCANTE MATA, M.; NUNES, L. S.; COSTA, T. L.; COSTA, P. B. S.; DUARTE, S. T. G. Secagem precedida de desidratação osmótica de pseudofruto De caju: comparação entre modelos matemáticos aplicados. ISSN 1517-8595. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, Campina Grande, v.9, n.2, p.161-170, 2007

MENEZES, T.J.B.; SALVA, J.G.; BALDINI, V.L.; PAPINI, R.S.; SALES, A.M. Protein enrichment of citrus wastes by solid substrate fermentation. **Process Biochemistry**, London, p.167-171, Oct. 1989.

MILLER, G.L. Use of dinitrosalicylic acid reagent for determination of reducing sugar. **Analytical Chemistry**, v.31, n.3, p.426-428, 1959.

MORAES, A.F. **Enriquecimento protéico de farelo de arroz por fermentação semi-sólida em biorreator de coluna com leito fixo**. Fundação Universidade do Rio Grande, 1999. Dissertação de Mestrado.

REFERÊNCIAS

- MORGADO, I. F., AQUINO, C. N. P., TERRA, D. C. T. **Aspectos econômicos da cultura do abacaxi: sazonalidade de preços no Estado do Rio de Janeiro**. Revista Brasileira de Fruticultura, v. 26, n. 1, 2004. Disponível em: <http://www.scielo.br>. Acesso em: 05/06/2007.
- MOURA, R. S. F.; GOUVEIA, J. P. G.; ALMEIDA, F. A. C.; SOUSA, A. G.; SILVA, M. M.; OLIVEIRA, A. M. A. V. **Modelagem matemática para isotermas em polpa de caju**. Revista de biologia e ciências da terra. ISSN 1519-5228. Volume 4 - número 2 - 2º Semestre 2004.
- NIGAM, P., SINGH, J. D. **Solid state substrate fermentation systems and their applications in biotechnology**. Journal of Basic Microbiology, v.34, n.3, p.405-423, 1994.
- NIGAM, P.; SINGH, J.D. **Basic Microbiol.** v.34, p.405-423, 1994.
- NP: Normas Portuguesas. **Inertes para Argamassas e Betões. Análise granulométrica NP-1379.** Edição 1, 1976. Disponível na internet. <http://portal.doc.ua.pt/Bibonline/normas/NP.pdf>. Arquivo capturado em 20 de janeiro de 2007.
- OETTERER, M.; REGITANO-D'ARCE, M. A. B.; SPOTO, M. H. F. **Fundamentos de Ciência e Tecnologia de Alimentos**. Editora Manole Ltda. Barueri –SP. 604p. 2006.
- OLIVEIRA, M. M. **Enriquecimento nutricional por bioconversão de resíduos agroindustriais para utilização na alimentação animal**. Campina Grande: Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Processos, Universidade Federal de Campina Grande, 2007, 185p. Tese (Doutorado).
- OLIVEIRA, M. M.; CAMPOS, A. R. N.; DANTAS, J. P.; GOMES, J. P.; SILVA, F. L.H. **Isotermas de desorção da casca do maracujá (*Passiflora edulis* Sims): determinação experimental e avaliação de modelos matemáticos**. ISSN 0103-8478. Ciência Rural, Santa Maria, v.36, n.5, p.1624-1629, set-out, 2006.
- OLIVEIRA, M. M.; CAMPOS, A. R. N.; DANTAS, J. P.; GOMES, J. P.; SILVA, F. L.H. **Isotermas de desorção da coroa do abacaxi**. Tecnol. & Ciên. Agropec., João Pessoa, v.3, n.1, p.47-52, fev. 2009.
- OLIVEIRA, M. M.; CAMPOS, A. R. N.; GOUVEIA, J. P. G.; SILVA, F. L. H. **Isotermas de sorção do resíduo agroindustrial de casca do abacaxi (*Ananas comosus* L. Mer)**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, Campina Grande, v. 9, n. 4, p. 565-569, 2005.
- PAIVA, F. F. A.; GARRUTTI, D. S.; SILVA NETO, R. M. APOSTILA/EMBRAPA. **Aproveitamento Industrial do Caju**. 84p. 2008.
- PANDEY, A., SOCCOL, C. R., LEON, J. R. **Solid-state fermentation - Biotechnology: Fundamentals and applications**. New Delhi: Asiatech Publishers Inc., 2001.
- PARK, K. J. ; NOGUEIRA, R. I. Modelos de ajuste de isotermas de sorção de alimentos. **Engenharia Rural**. Piracicaba: ESALQ/USP, v.3(1), p.81-86, 1992.
- PARK, K.J.; YADO, M.K.M.; BROD, F.P.R. Estudo da secagem de pêra bartlett (*Pyrus* sp.) em fatias. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**. v.21, n.3. p. 288-292, 2001.

REFERÊNCIAS

- PARK, K.J.B.; PARK, K.J.; CORNEJO, F.E.P.; FABBRO, I.M.D. **Review: Considerações Temodinâmicas das Isotermas**. Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais. ISSN 1517-8595. Campina Grande, v.10, n.1, p.83-94, 2008.
- PARK, S.; RAMIREZ, W.F. Dynamics of foreign protein secretion from *Saccharomyces cerevisiae*. **Biotechnology and Bioengineering**, New York, v.33, p.272-281, 1989.
- PELCZAR, M; REID, R.; CHAN, E.C.S. Microbiologia I. São Paulo: Mc Graw – Hill, v. 1. 1980.
- PELEG, M. Assessment of a semi-empirical four parameter general model for sigmoid Moisture sorption isotherms. **Journal of Food Processing Engineering**, v. 16, n. 1, p.21-37, 1993.
- PRADO, I.N. & MOREIRA, F.B. **Suplementação de Bovinos no Pasto e Alimentos Alternativos Usados na Bovinocultura**. Maringá – PR. EDUEM – UEM, 2002. 162p.
- RAGHAVARAO, K.M.S.; RANGANATHAN, T.V.; KARANTH, N.G. **Some engineering aspects of solid-state fermentation**. Biochemical Engineering Journal. v.13, p. 127-135, 2003.
- RAMOS, A. D.; BLEICHER, E.; FREIRE, F. C. O.; CARDOSO, J. E.; PARENTE, J. I. G.; BARROS, L. M.; CRISOSTOMO, L. A.; FROTA, P. C. E.; CORREA, M. P. F.; PESSOA, P. F. P.; MELO, Q. M. S.; OLIVEIRA, V. H. **A cultura do caju**. Brasília : EMBRAPA-SPI, 1996. 96 p.
- RANGANA, S., **Manual of analysis of fruit and vegetable products**. New Delhi: Tata McGraw- Hill, Publishing Company Limited, p. 94-95, 1979.
- RESENDE, O.; CORRÊA, P.C.; GONELI, A.L.D.; RIBEIRO, D.M. **Isotermas e Calor Isostérico de Sorção do Feijão**. Ciênc. Tecnol. Aliment., Campinas, 26(3): 626-631, jul.-set. 2006.
- ROBISON, T.; NIGAM, P. **Bioreactor design for protein enrichment of agricultural residues by solid state fermentation**. Biochemical Engineering Journal, v. 13, p. 197-203, 2003.
- RODRIGUES, E. **Secagem de abacaxi em secador de leito fixo**. Tese de Doutorado, sob a orientação de Jair Nogueira da Silva. UFV – Viçosa, 106p. 2006.
- RODRIGUES, M. E. A.; ALMEIDA, F. DE A. C.; GOUVEIA, J. P.; SILVA, M. M. Avaliação da temperatura e velocidade do ar na secagem de goiaba. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**. Campina Grande. v.4. n.2. p.141-147. 2002.
- ROMERO-PEÑA, L. M.; KIECKBUSCH, T. G. Influência de condições de Secagem na Qualidade de Fatias de Tomate. **Brazilian journal of food technology**. V.6. n.1. p.69-76. 2003.
- ROUSSOS, S., LONSANE, B. K., RAIMBAULT, M., VINIEGRA-GONZALEZ, G. **Advances in solid state fermentation**. Proceedings of the 2nd International Symposium on Solid State Fermentation, 1995.

REFERÊNCIAS

- SANTINI, A. P. **Estudo da secagem e da inativação de leveduras**. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. 135 f. 1996.
- SCHIMIDELL, W.; LIMA, U.A.; AQUARONE, E.; BORZANI, W. **Biotecnologia Industrial**. Engenharia Bioquímica. v.2. Editora Edgard Blücher LTDA. São Paulo, 2001.
- SGARBIERI, V. C. **Proteínas em Alimentos Protéicos – Propriedades, Degradação, Modificações**. p.517. São Paulo-SP: Livraria Varela, 1996.
- SILVA, J. D. **Análise de alimentos (métodos químicos e biológicos)**. São Paulo: Editora UFV, 1998, 166 p.
- SILVA, J. S. **Secagem e armazenamento de produtos agrícolas**. Viçosa-MG. Aprenda Fácil. 502 p. 2000.
- SILVA, M.M.; GOUVEIA, J.P.G.; ALMEIDA, F.A.C. Dessorção e calor isostérico em polpa de manga. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.6, n.1, p.123-127, 2002. Campina Grande, PB, DEAg/UFPB -
- SILVA, R. G.; GOMES, J. P.; ALEXANDRE, H. V.; ALVES, N. M. C.; MELO, K. S.; LIMA, E. E.; SILVA, A. S. **Estudo de modelos matemáticos aplicados em cinética de secagem de abacaxi em fatias**. II Jornada Nacional da Agroindústria. Bananeiras, 04 a 07 de dezembro de 2007.
- SILVA, V.A. **Secagem Osmo-Convectia da Acerola**. Tese de Doutorado em Engenharia de Processos – UFCG – 2004 a. pág.: 176. Orientada por Odelsia Leonor Sanchez de Alsina.
- SILVA, V.S. **Secagem de Leveduras – Estudo Comparativo do desempenho dos secadores em Leito de Jorro e Leito Fluidizado**. Tese de Doutorado em Engenharia de Processos – UFCG – 2004 b. pág.: 156. Orientada por Odelsia Leonor Sanchez de Alsina.
- SILVEIRA, A.M.; ALVES, S.M. **Tomates secos via processo combinado convecção-desidratação osmótica**. In: XIV Congresso Brasileiro de Engenharia Química. Natal: COBEQ, 2002, CD Rom.
- SOPADE, P.A.; AJISEGIRI, E.S. Moisture sorption study on Nigerian foods: maize and sorghum. **Journal of Food Engineering**, Lleida, v.17, n.1, p.33-56, 1994.
- SOUSA, S.; CAVALCANTI-MATA, M.E.R.M.; BRAGA, M.E.D.; MONTEIRO, A.F.F. Curvas de secagem dos frutos de umbu com pré-secagem osmótica. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, v.2, n.2, p.33-38, 2000.
- SPIESS, W. E. L.; WOLF, W. F. The results of the Cost 90 project on water activity. In: JOWITT, R. **Physical properties of foods**. London and New York: Applied Science Publishers, p.65-91, 1983.
- STRUMILLO, C.; KUNDRA, T. **Drying Principles, applications and design**. Gordon and Breach Science Publishers. 1986,448p.
- TAVARES, M.B.R. **Estudo da Produção da Enzima Celulase a Partir da Matéria Lignocelulósica do Bagaço do Caju por fermentação Semi-sólida, Utilizando o *Aspergillus niger***. Dissertação(Mestrado em Engenharia Química)-UFCG. Orientadora: Libia de Sousa Conrado Oliveira. Campinas Grande, 2009

REFERÊNCIAS

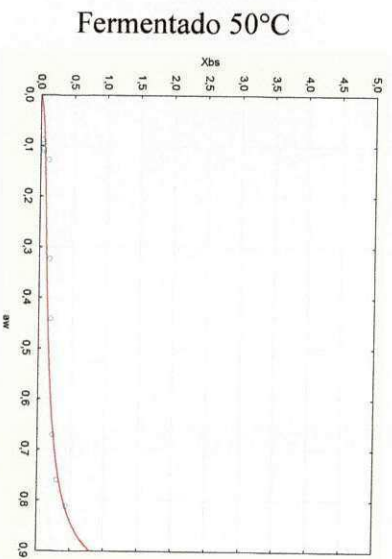
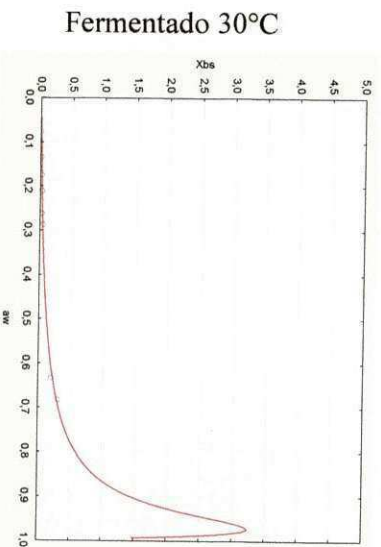
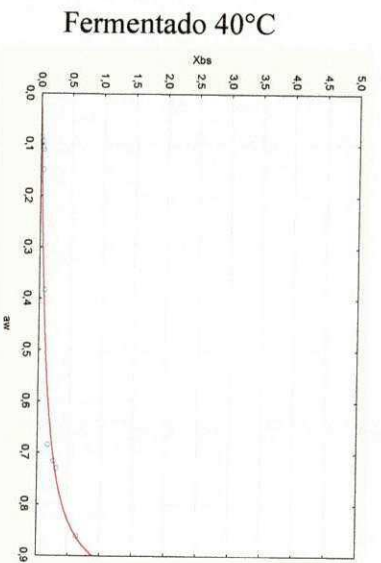
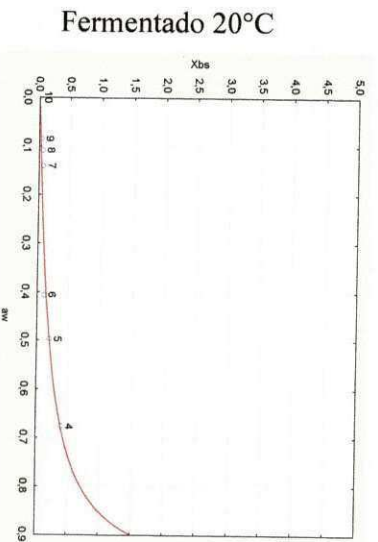
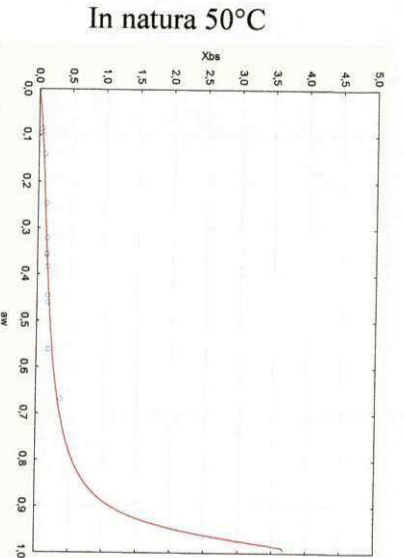
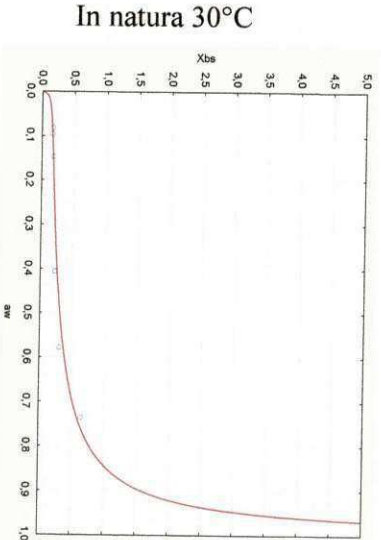
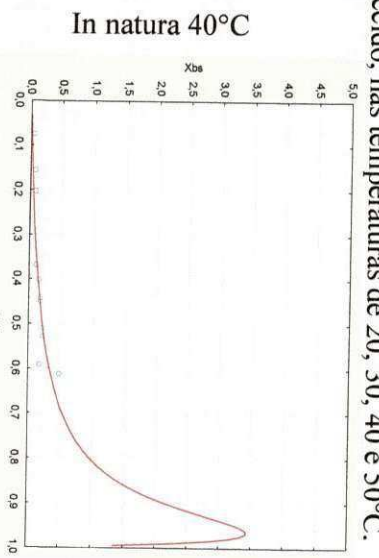
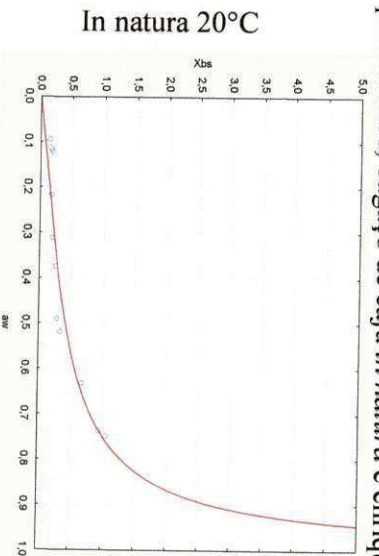
- TEDESCO, J.M.; GIANELLO, C.; BISSANI, C.A.; BOHNEN, H.; VOLKWEISS, S. J. Análises de Solo, Plantas e outros Materiais. Boletim Técnico nº5. Departamento de Solos, Faculdade de Agronomia. UFRS. Porto Alegre-RS. 1995.
- TEXEIRA NETO, R. O.; QUAST, D. G. **Isotermas de adsorção de umidade em alimentos**. Campinas: ITAL, v. 8, p. 141-197, 1993.
- TOLABA, M. P.; PELTZER, M.; ENRIQUEZ, N.; POLLIO, M.L. Grain sorption equilibria of quinoa grains. **Journal of Food Engineering**, v. 61, p. 365-371, 2004.
- TOYAMA, N. **Feasibility of sugar production from agricultura land urban cellulosic wastes with *Trichoderma viride cellulose***. Biotechnology Bioengineering, n. 6. p. 207-219, 1976.
- TRAVAGLINI, D. A.; AGUIRRE, J. M. SILVEIRA, E. T. Desidratação de Frutas e Hortaliças. In: Instituto de Tecnologia de Alimentos – Manual técnico, Campinas: ITAL, 1997.
- USAID/BRASIL. Livro: Inserção de Micro e Pequenas Empresas no Mercado Internacional - **Análise da Indústria de Castanha de Caju**. Volume 1. 2006
- VINIEGRA-GONZÁLEZ, G. Strategies for the selection of mold strains geared to produce enzymes on solid substrates. In: GALINDO, E.; RAMYREZ, O.T. (Eds.), *Advances in Bioprocess Engineering II*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht , 1998, p. 123–136.
- VITTALI , A. A. **Importância da atividade de água em alimentos**, In: SEMINÁRIO SOBRE ATIVIDADE DE ÁGUA EM ALIMENTOS, Campinas: v.1, ITAL, 1987.
- WANG, N.; BRENNAN, J.G. Moisture sorption isotherm characteristics of potato at four temperatures. **Journal of Food Engineering**, v.14, p.269-287, 1991.
- WELTI, J. CH.; VERGARA F. B. **Actividad de agua – Concepto y aplicación em alimentos com alto contenido de humedad**. Temas em Tecnologia de Alimentos, México, v. 1. p. 11-37. 1997.
- WORGAN, J.T. Protein production by microorganisms from carbohydrate substrates. In: JONES, J.G.W. (Ed.). **The biological efficiency of protein production**. Cambridge: Univ. Press, 1973. p.339-371.
- YANG, S.S. Protein enrichment of sweet potato residue with amylolytic yeasts by solid-state fermentation. **Biotechnology and Bioengineering**, New York, v.32, p.886-890, 1988.
- YOSHIDA, C.M.P. **Cinética de secagem do milho superdoce**. Campinas: UNICAMP, 1997. 149p. (Dissertação de Mestrado).
- ZHANG, X.; LIU, X.; GU, D.; ZHOU, W.; WANG, R.; MARINOS-KOURIS, D. Desorption isotherms of some vegetables. **Journal of Science and Food Agriculture**, v.70, p.303-306, 1996.

ANEXOS

"Sucesso parece ser em grande parte uma questão de continuar depois que outros desistiram."

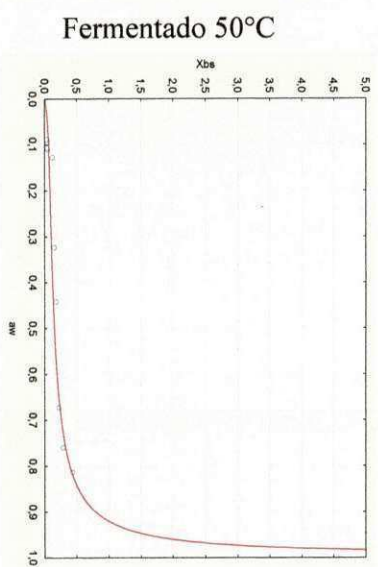
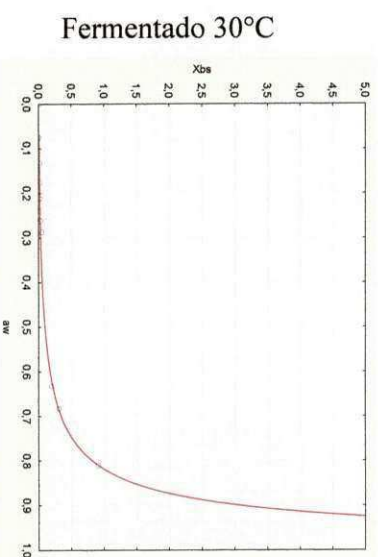
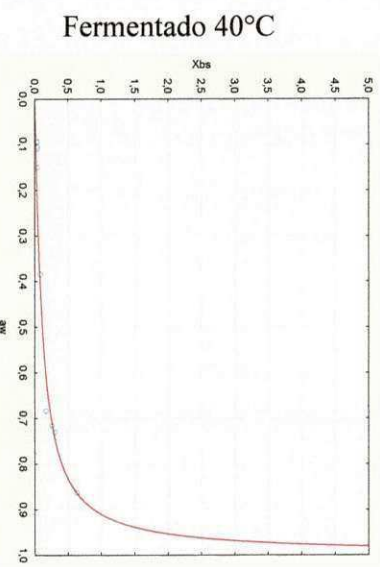
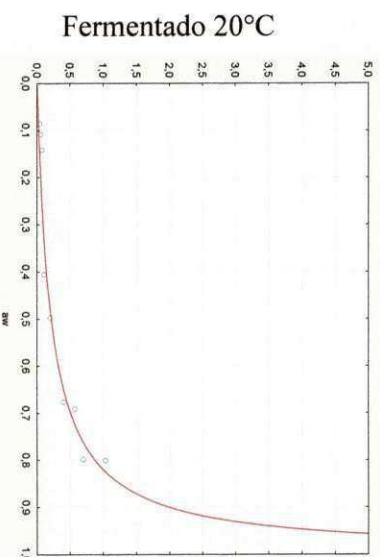
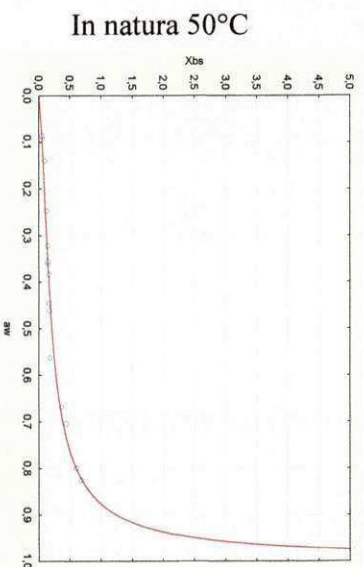
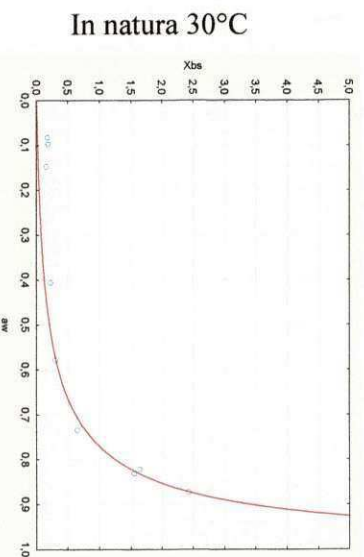
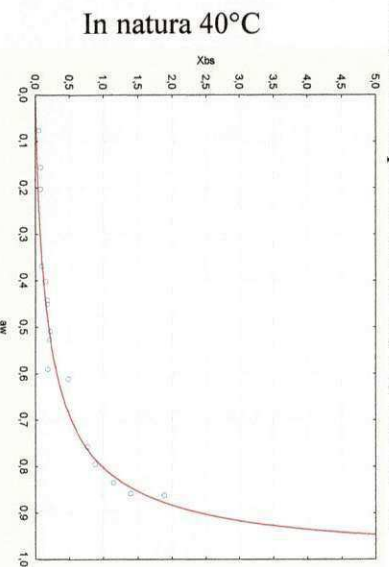
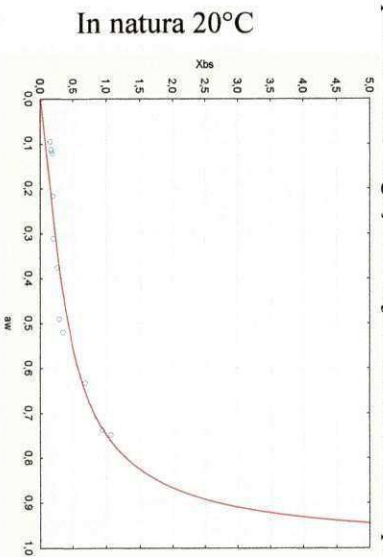
(William Feather)

ANEXO I: Isoterma de dessorção de umidade, na aplicação do modelo de BET tri-paramétrico, bagaço de caju *in natura* e enriquecido, nas temperaturas de 20, 30, 40 e 50°C.



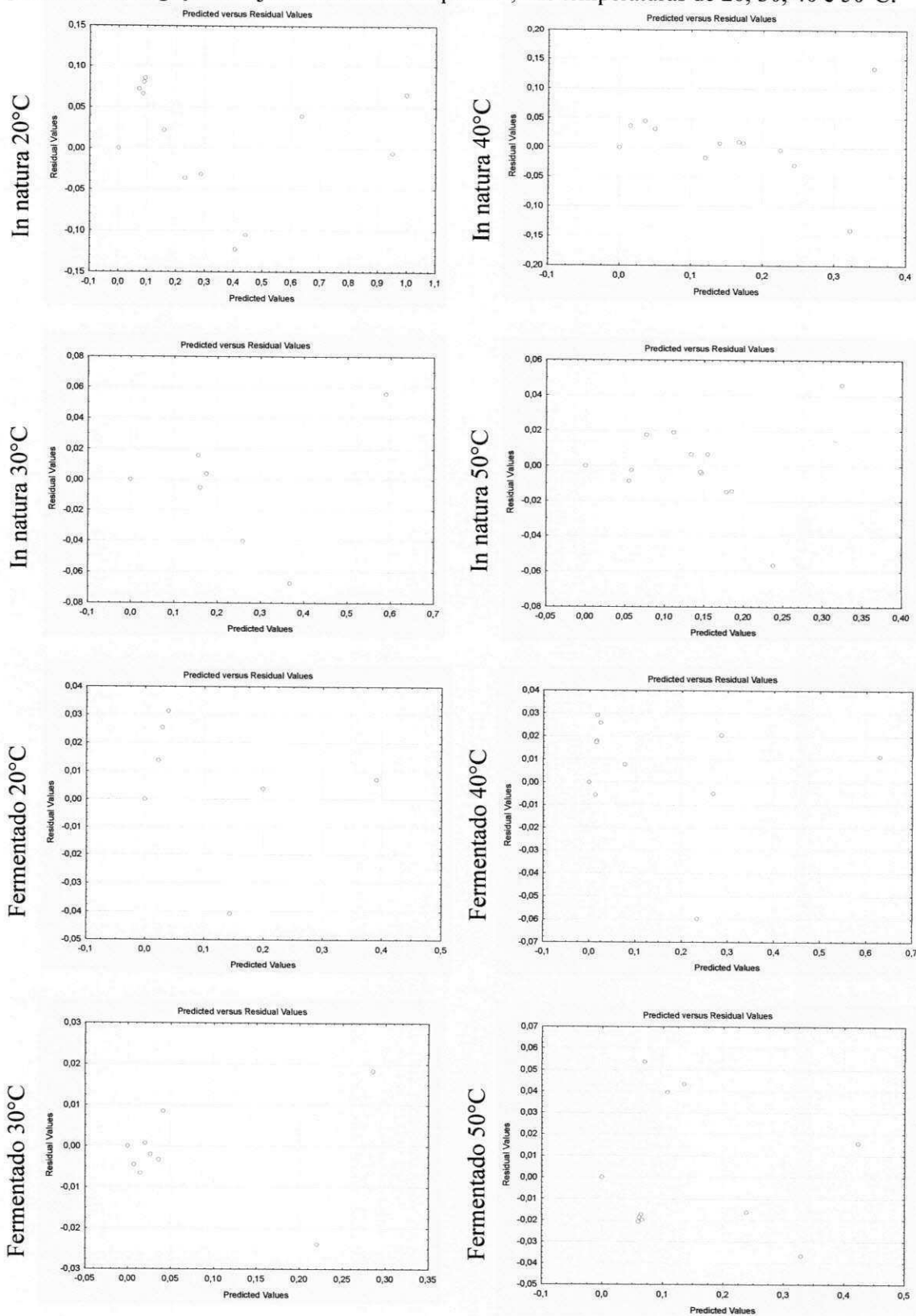
ANEXOS

ANEXO II: Isoterma de desorção de unidade, na aplicação do modelo de BET de dois parâmetros, bagaço de caju *in natura* e enriquecido, nas temperaturas de 20, 30, 40 e 50°C.



ANEXOS

ANEXO III: Distribuição valores preditos e residuais na aplicação do modelo de BET tri-paramétrico, bagaço de caju *in natura* e enriquecido, nas temperaturas de 20, 30, 40 e 50°C.



ANEXOS

ANEXO IV: Distribuição valores preditos e residuais na aplicação do modelo de BET de dois parâmetros, bagaço de caju *in natura* e enriquecido, nas temperaturas de 20, 30, 40 e 50°C.

