



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

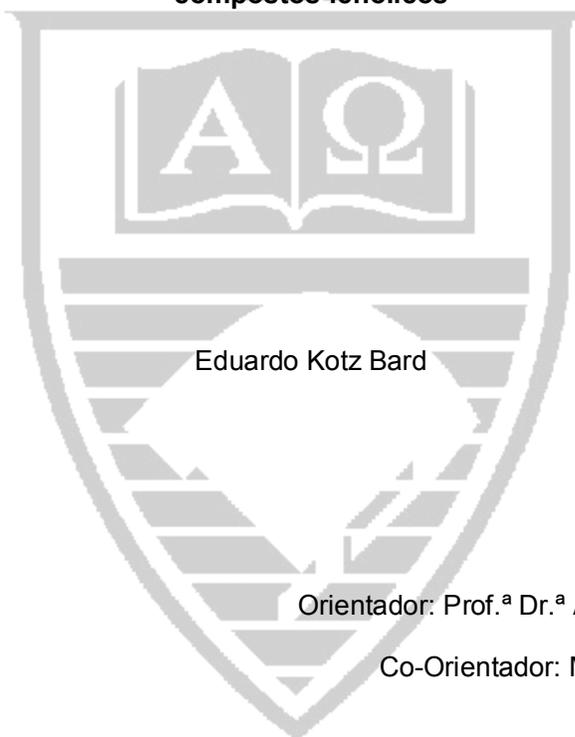
ESCOLA DE ENGENHARIA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA

TRABALHO DE CONCLUSÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA



**Estudo da secagem convectiva da casca de manga visando minimizar a perda de compostos fenólicos**



Eduardo Kotz Bard

Orientador: Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Aline Schilling Cassini

Co-Orientador: Me. Voltaire Sant'Anna

Porto Alegre

2011

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

**Estudo da secagem convectiva da casca de manga visando minimizar a perda de compostos fenólicos**

Eduardo Kotz Bard

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

Orientador: Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Aline Schilling Cassini

Co-Orientador: Me. Voltaire Sant'Anna

Porto Alegre, dezembro de 2011.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço aos meus pais pelo apoio e amor incondicional proporcionado ao longo desses anos.

A minha namorada Andréia, que me auxiliou na confecção desse trabalho e por todo seu amor e apoio.

Aos meus orientadores, a Prof.<sup>a</sup> Aline Schilling Cassini e o doutorando Voltaire Sant'Anna, por toda orientação e paciência para a realização do trabalho.

A Universidade Federal do Rio Grande do Sul por um ensino de qualidade.

E a todos que de uma forma e de outra me auxiliaram durante essa jornada.

## SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS.....	ii
LISTA DE FIGURAS.....	iv
LISTA DE TABELAS.....	v
RESUMO.....	vi
1 INTRODUÇÃO.....	1
2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	3
2.1 Manga.....	3
2.2 Casca de Manga.....	4
2.3 Secagem.....	6
2.3.1 Fatores que influenciam a secagem.....	8
2.3.2 Umidade.....	9
2.4 Equações da cinética de secagem.....	9
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	11
3.1 Material.....	11
3.2 O equipamento de secagem.....	11
3.3 Procedimentos experimentais.....	12
3.4 Análises realizadas.....	13
3.4.1 Análise de Umidade.....	13
3.4.2 Análise de Fenólicos.....	14
3.4.3 Análise de Reidratação.....	14
3.4.4 Ajuste dos dados experimentais.....	15
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	16
5 CONCLUSÃO.....	27
REFERÊNCIAS.....	28

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Secador de escala piloto.....	11
Figura 2: Curvas de secagem: dados experimentais e ajuste modelo de Lewis.....	16
Figura 3: Curvas de secagem: dados experimentais e ajuste modelo de Page.....	17
Figura 4: Curvas de secagem: dados experimentais e ajuste modelo de Page Modificado .....	18
Figura 5: Curvas de secagem: dados experimentais e ajuste modelo de Dois Termos Exponenciais .....	19
Figura 6: Curvas de secagem: dados experimentais e ajuste ao modelo de Midilli .....	20
Figura 7. Relação entre os valores experimentais e preditos de umidade.....	21
Figura 8: Cinética de secagem da casca de manga.....	23
Figura 9: Curvas da taxa de secagem em função do teor de umidade.....	23

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Produção de manga de 2005 á 2009 dez maiores países.....	3
Tabela 2: Produção brasileira de manga no ano de 2009. Fonte: IBGE.....	4
Tabela 3. Composição centesimal de casca de manga da variedade Tommy Atkins.....	5
Tabela 4: Equações de modelos cinéticos de secagem.....	10
Tabela 5: Parâmetros do modelo de Midilli da secagem de casca de manga. ....	20
Tabela 6: Análise do erro dos modelos.....	22
Tabela 7: Quantificação da umidade da casca de manga após a secagem.....	24
Tabela 8: Análise de fenólicos totais para as cascas de manga.....	25

## RESUMO

A casca de manga é um resíduo da indústria de alimentos, rica em compostos fenólicos e fibras, apresentando, assim, um grande potencial para ser utilizada como componente funcional. Além disso, o descarte da casca de manga pode gerar um grave problema ambiental, pelo fato da mesma possuir altos teores de nitrogênio, fósforo e umidade, tornando este resíduo altamente suscetível à ação de microrganismos, gerando, principalmente, gases do efeito estufa. A secagem convectiva da casca de manga é uma operação importante a ser realizada, tendo como principal intuito aumentar a vida útil deste resíduo para posterior utilização em aplicações industriais. O processo de secagem convectiva foi empregado para desidratar cascas de manga, utilizando temperaturas de secagem de 40, 60, 80 e 100 °C. Posteriormente foi feita a extração de polifenóis totais para avaliar o efeito de cada temperatura na degradação desses compostos. Neste estudo, as farinhas de casca de manga seca foram analisadas quanto à umidade, ao teor de fenólicos totais e à capacidade de reidratação, mostrando valores satisfatórios de umidade para as secagens a 60, 80 e 100 °C, com valores inferiores a 7% base úmida, teores de fenóis em torno de 2 GAEs por 100 g de sólidos secos e valores de reidratação em torno de 40%. Os resultados encontrados para 40 °C podem não ser conclusivos, pois a secagem necessitava de um período maior para estar completa, entretanto foi interrompida devido à precisão da balança utilizada. Devido à falta de dados na literatura quanto à modelagem da cinética de secagem para a casca de manga, as curvas de secagem foram avaliadas através de modelos encontrados na literatura, sendo eles os modelos de Lewis, Page, Page Modificado, Dois Termos Exponenciais e Midilli. Os modelos apresentaram coeficiente de determinação próximo à unidade, indicando que todos podem ser utilizados para a modelagem da cinética de secagem de casca de manga. Dentre os modelos analisados, o de Midilli foi o que apresentou a melhor capacidade para prever a cinética de secagem da casca de manga, pois possuiu os melhores valores para o coeficiente de determinação, chi-quadrado e erro médio quadrático.

# 1 INTRODUÇÃO

A secagem é uma etapa importante em praticamente todos os tratamentos de conservação de produtos alimentícios, sendo um processo complexo onde são aplicados os conceitos de fenômenos de transporte (transferência de calor e massa), sendo o calor transferido do meio externo para o produto e a massa, transferida no sentido oposto. Esses fenômenos de transporte podem estar acompanhados de reações, mudanças de fase e/ou encolhimento do produto.

A manga é uma fruta sazonal e aproximadamente 20% dela é processada para diferentes produtos alimentícios (Ajila *et al.*, 2007). Conforme Corzo *et al.* (2008), a manga verde é utilizada na culinária de vários países e a manga verde e seca é utilizada para dar mais sabor aos pratos. Aproximadamente 0,5% da produção mundial de manga é utilizada para a produção de derivados. Segundo a FAO (2009), o Brasil é o sétimo maior produtor de manga no mundo, com 3,4% da produção mundial, atrás de Índia, China, Tailândia, Indonésia, Paquistão e México. No Brasil, o maior estado produtor da fruta é a Bahia com 45% da produção, seguida dos estados de Pernambuco e São Paulo, com 16% da produção cada um; os demais estados da federação possuem 23% da produção.

Os resíduos gerados pelo processamento da manga são a casca e o caroço, representando de 35 a 60% em massa; valores que possuem diferença de acordo com o processamento e tipo da fruta (Larrauri *et al.*, 1996). A casca da manga vem sendo estudada, pois possui vários compostos com atividade benéfica para a saúde, tais como os polifenóis, os carotenoides e as fibras alimentares.

A motivação para realizar este trabalho é dada pelo fato da casca possuir altas concentrações de compostos bioativos na sua composição e ser tratada como resíduo. Isto gera um problema ambiental, pelo fato da casca possuir uma quantidade elevada de umidade, nitrogênio e fosforo, o que torna o resíduo suscetível à modificação por microrganismos, com a formação de chorume e geração de gases do efeito estufa.

Para reduzir o impacto gerado pelo descarte da casca de manga, o presente trabalho tem como objetivo utilizar-se deste resíduo, que possui diversos compostos de alto valor agregado, para gerar um novo produto de consumo, que, no caso, é a farinha de casca de manga obtida pela secagem das cascas.

Para a confecção e avaliação da farinha produzida através da secagem da casca de manga, a casca de manga *in natura* será seca em um secador convectivo de escala piloto nas temperaturas de 40, 60, 80 e 100 °C. Após a secagem, as cascas secas serão trituradas em liquidificador comum, gerando a farinha de casca de manga. Esta farinha será, então, analisada quanto à umidade, teor de compostos fenólicos totais e capacidade de reidratação.

Devido à falta de dados na literatura quanto à modelagem da cinética de secagem para a casca de manga, as curvas de secagem foram avaliadas através de modelos clássicos encontrados na literatura, dentre os quais pode-se citar os modelos de Lewis, Page e Page Modificado, os quais consideram que o processo de secagem

possui uma cinética de remoção de umidade exponencial; o ajuste a alguns modelos mais modernos, tais como o de Dois Termos Exponenciais e de Midilli, os quais descrevem o processo de secagem com duas cinéticas onde uma cinética representa o momento inicial da secagem e a outra representa o momento final foram também avaliados.

## 2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Manga

A manga é uma das mais importantes frutas tropicais e a Índia possui a maior produção do mundo deste fruto (Ajila *et al.*, 2007). Segundo a Embrapa (2009), as mangas variam muito de tamanho, cor e forma, quase todas apresentam polpa suculenta e sabor definido. O seu consumo é recomendado pelos nutricionistas por ser excelente fonte de vitamina A e C, apresentar quantidades razoáveis de vitaminas do complexo B, sais minerais como cálcio e fósforo e efeito expectorante. A fruta combate também à acidez estomacal; seu consumo acarreta em efeitos diuréticos e promove a regularidade intestinal (Embrapa, 2009).

A Tabela 1 apresenta os dados dos dez maiores produtores de manga no período de 2005 até 2009 de acordo com a Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação (FAO). Segundo a FAO (2009) o Brasil é o sétimo maior produtor de manga no mundo, atrás de Índia, China, Tailândia, Indonésia, Paquistão e México. O Brasil em 2009 foi responsável por 3,4% da produção mundial de manga.

Tabela 1: Produção de manga de 2005 á 2009 dos dez maiores países produtores.

<b>País</b>	<b>2005</b>	<b>2006</b>	<b>2007</b>	<b>2008</b>	<b>2009</b>
Índia	11829700	12537900	13501000	13649400	13557100
China	4249996	4091332	3715292	3976716	4140290
Tailândia	1800000	2230280	2302690	2374170	2469810
Indonésia	1412880	1622000	1818620	2013120	2150000
Paquistão	1673950	1753910	1719180	1753690	1728000
México	1679470	2045690	1911270	1855360	1509270
<b>Brasil</b>	<b>1002210</b>	<b>1217190</b>	<b>1272180</b>	<b>1154650</b>	<b>1197690</b>
Nigéria	731000	731500	734000	750000	831489
Bangladesh	622000	639910	766930	802750	828161
Filipinas	1003270	919030	1023910	884011	771441

Fonte: FAO (2009)

No Brasil, o maior estado produtor da fruta é a Bahia com 45% da produção, seguida dos estados de Pernambuco e São Paulo, com 16% da produção cada; os demais estados da federação possuem 23% da produção, segundo consulta realizada no dia 05/11/2010 pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) sobre a produção agrícola municipal do ano de 2009. Na Tabela 2 são mostrados os valores

correspondentes à produção de manga no Brasil no ano de 2009 segundo o IBGE – Produção Agrícola 2009.

Tabela 2: Produção brasileira de manga no ano de 2009.

Estados	Área Colhida (ha)	Produção (t)	Rendimento (t/ha)
Bahia	28.816	540.158	18,75
Pernambuco	10.489	196.908	18,77
São Paulo	11.070	186.739	16,87
Minas Gerais	8.343	98.917	11,86
Ceará	5.016	43.707	8,71
Demais Estados	11.444	131.265	11,47
<b>BRASIL</b>	<b>75.178</b>	<b>1.197.694</b>	<b>15,93</b>

Fonte: EMBRAPA (2010).

A manga é uma fruta sazonal e aproximadamente 20% dela é processada para diferentes produtos alimentícios (Ajila *et al.*, 2007). Conforme Corzo *et al.* (2008), a manga verde é utilizada na culinária de vários países e a manga verde e seca é utilizada para dar mais sabor aos pratos. Aproximadamente 0,5% da produção mundial de manga é utilizada para a produção de derivados. A quantidade de lixo orgânico produzido pelo processamento industrial é estimado em torno de 75.000 t (Dorta *et al.*, 2011).

## 2.2 Casca de Manga

A casca e o caroço de manga são rejeitos do processamento da fruta, representando de 35 a 60% em massa de manga, valores que possuem diferença de acordo com o processamento e tipo da fruta. A proporção da casca em relação ao fruto corresponde de 20 a 30% em massa (Larrauri *et al.*, 1996). Durante o processamento da manga, a casca é o maior subproduto. Como a casca não é comumente utilizada em âmbito comercial, ela é descartada como resíduo e se torna uma fonte de poluição (Ajila *et al.*, 2007).

Sendo os subprodutos do processamento da manga resíduos orgânicos, estes geram grande problema ambiental porque contém grande quantidade de nitrogênio, fósforo e água que tornam o resíduo suscetível à modificação pelos microrganismos, com a formação de chorume e emissão de gases (Dorta *et al.*, 2011). A emissão de gases, a partir da decomposição de resíduos orgânicos, contribui para a geração do efeito estufa, o que vem sendo amplamente discutido como um dos principais problemas do século XXI.

Apesar de comumente descartado, este resíduo apresenta consideráveis quantidades de compostos fenólicos totais, antocianinas, compostos com atividade antioxidante, clorofila e fibras alimentares (Ajila *et al.*, 2010, Dorta *et al.*, 2011). Com isto, este material apresenta grande potencial a ser utilizado como composto nutricional na indústria de alimentos e farmacêutica. Desenvolvimento de novos produtos alimentícios, como macarrão e biscoito (Ajila *et al.*, 2010, Arogba, 2001) já vem sendo reportado com interessantes resultados. Ajila, *et al.* (2010) observaram um aumento no teor de fibras e poder sequestrante de radicais livres em alimentos adicionados de farinha de casca de manga, com boa aceitação sensorial (Ajila *et al.*, 2010).

Marques e colaboradores (2010) verificaram que casca de manga da variedade Tommy Atkins apresentou 78,7% de umidade, 0,18% de lipídeos, 1,24% de proteínas, 0,19% de amido, 11,02% de fibra alimentar total e 13% de carboidrato (Tabela 3).

Tabela 3. Composição centesimal de casca de manga da variedade Tommy Atkins.

Componente	Concentração em g/100g
Umidade	78,7
Resíduo mineral fixo	0,99
Lipídeos	0,18
Proteína	1,24
Amido	0,19
Fibra total alimentar	11,02
Carboidrato total	13

Fonte: Marques *et al.*, 2010.

Conforme Ajila *et al.* (2007), a casca da manga vem sendo estudada pois possui vários compostos benéficos para a saúde, tais como: polifenóis, carotenoides e fibras alimentares. Segundo Angelo e Jorge (2007), os compostos fenólicos se originam do metabolismo secundário das plantas, são essenciais para o seu crescimento e reprodução e se formam em condições de estresse como, infecções, ferimentos, radiações UV, dentre outros.

Os compostos fenólicos são substâncias que possuem anel aromático com um ou mais substituintes hidroxílicos, incluindo seus grupos funcionais. Esses compostos se degradam com a ação da temperatura, a qual, quando, aumentada de forma aritmética gera uma degradação que se desenvolve de forma logarítmica (Angelo e Jorge, 2007).

A temperatura do ar de secagem e o tempo afetam a atividade e a estabilidade de compostos bioativos, assim como a degradação química e enzimática e perdas por volatilização e/ou decomposição térmica. O efeito da temperatura do ar de secagem no teor de polifenóis e na atividade antioxidante em bagaço de uva vermelha foi

estudado por Larrauri, Rupérez e Saura-Calixto (1997). Para as temperaturas de 100 e 140 °C, os autores observaram uma redução significativa tanto em taninos condensados, quanto em fenólicos totais extraídos, assim como a redução de 28 e 50% na atividade antioxidante dos resíduos orgânicos, respectivamente. A atividade de sequestrar radicais livres e o nível de compostos fenólicos em folhas de amoreiras secas a 60 °C ou abaixo, não foram diferentes das folhas liofilizadas, ao passo que ambos valores diminuiriam significativamente pela secagem convectiva a 70 °C (Dorta *et al.*, 2011).

Dorta *et al.* (2011) analisaram os efeitos do método de secagem na extração de compostos bioativos de casca de manga desidratada a partir da liofilização, secagem em forno a 70 °C com ar estático ou ar forçado e casca de manga *in natura*. A análise do teor de fenólicos totais da casca não seca obteve um extrato com 7,7 Ácidos Gálicos Equivalentes por 100 g de resíduo em base seca (GAEs), obtendo um resultado semelhante à casca liofilizada 9,2 GAEs, à casca seca com ar estático 8,5 GAEs e à casca seca com ar forçado 7,9 GAEs.

## 2.3 Secagem

O processo de remoção térmica de umidade para obter sólido seco é definido como secagem ou desidratação.

No início da utilização do processo de secagem de alimentos seu objetivo era somente a prevenção do alimento por longos períodos de tempo, mas existem outros benefícios na utilização da secagem de alimentos, pois, devido à remoção de água do produto, tem-se uma redução de massa e pode haver diminuição no volume, o que pode ser uma vantagem com relação aos outros métodos de conservação de alimentos.

Os principais objetivos do processo de secagem são: o aumento da vida de prateleira dos alimentos, a preparação destes para processos posteriores (transporte e manuseio ou determinada especificação do produto como a área superficial mínima, por exemplo) e dar condições higiênicas necessárias para um produto de boa qualidade.

O prolongamento da vida de prateleira dos produtos alimentícios é obtido pela redução da disponibilidade de água no interior dos mesmos. A redução desta disponibilidade inibe a atividade enzimática e o crescimento microbiano. Esta disponibilidade de água é medida pela atividade de água do alimento, também conhecida como pressão de vapor relativa (PVR). A atividade de água é definida como “a razão da pressão de vapor da água no alimento e a pressão de vapor saturada da água na mesma temperatura”

Os processos de secagem de alimentos dividem-se, em sua maioria, em duas etapas distintas: a etapa de taxa constante de secagem, no início do processo e por vezes inexistente, e a etapa de taxa decrescente de secagem. De acordo com

Barbosa-Cánovas e Vega-Mercado (1996), o processo de remoção de umidade no período de taxa decrescente é limitado pelo processo de difusão da água do interior do alimento para a superfície, isto explica a grande influência da temperatura do ar de secagem nas curvas de secagem dos alimentos. Do mesmo modo, fatores externos possuem pouca influência na taxa de secagem, o que pode explicar a leve influência da velocidade do ar de secagem, que ocorre principalmente durante a transferência de calor convectiva.

A secagem é uma etapa importante em praticamente todos os tratamentos de conservação de produtos alimentícios, sendo um processo complexo onde são aplicados os conceitos de fenômenos de transporte (transferência de calor, massa e quantidade de movimento). A transferência de calor e massa são os fenômenos de transporte predominantes no processo de secagem onde o calor é transferido do meio externo para o produto e a massa é transferida no sentido oposto. Esses fenômenos de transporte podem estar acompanhados de reações, mudanças de fase e/ou encolhimento do produto. O processo de transferência de calor pode ocorrer por convecção, radiação ou pela combinação de dois ou mais destes mecanismos. A transferência de calor é bastante influenciada por condições externas como temperatura, umidade, velocidade do ar de secagem, assim como a área superficial do produto e a pressão do sistema, já a transferência de massa depende da natureza do produto, como a porosidade, e estrutura celular, da temperatura e teor de umidade do sólido (Cassini, 2004).

A primeira grande evolução na desidratação de alimentos nos Estados Unidos ocorreu entre o final do século 19 e o início do século 20, com o desenvolvimento dos primeiros secadores artificiais que viriam substituir a secagem solar. Posteriormente, no período que precedeu a segunda grande guerra, pesquisaram-se e desenvolveram-se os secadores de tambor e o *spray dryer*, muito utilizados, até hoje, na produção de laticínios e ovos (Cassini, 2004).

Dentre os processos conhecidos para a conservação de alimentos por desidratação, tem-se: a liofilização, a secagem por exposição ao sol, a secagem em forno de micro-ondas e secagem convectiva natural ou forçada; sendo esta última o processo que reúne as melhores características para a secagem de alimentos, por ter tempo de operação relativamente baixo em relação aos outros processos, gasto de energia intermediário e, dependendo da velocidade e temperatura do ar de secagem, minimização de degradação de compostos bioativos no alimento seco (Cassini, 2004).

Os tipos de secagem mais empregados na indústria de alimentos são diferenciados pela forma de operação, sendo eles a liofilização, processo onde são preservadas ao máximo as características de coloração do alimento, a secagem por condução, empregada exclusivamente para camadas muito finas de alimentos, e a secagem por convecção, utilizada por conservar algumas características benéficas dos produtos dispendendo de menos utilização de energia no processo de secagem (Cassini, 2004).

A liofilização é um caso especial de secagem sob vácuo e temperatura abaixo da do ponto triplo da água. Neste processo, a água (previamente congelada) sublima direto para vapor d'água e, apesar do calor necessário para a sublimação ser bem

inferior ao necessário para a evaporação, a necessidade de vácuo eleva o custo do processo (Mujumdar, 1995).

Mesmo representando 10% do consumo de energia na indústria de alimentos, a seleção do equipamento de secagem a ser utilizado no processo é mais influenciado pela qualidade do produto final que pelo consumo de energia. Os fatores ambientais e de segurança também influenciam na escolha do equipamento de secagem.

Na indústria podem, em geral, ser encontrados mais de 200 tipos de secadores diferentes, entretanto aproximadamente 20 deles (e suas variações) são utilizados na indústria de alimentos. A forma física dos produtos alimentícios, as taxas de produção desejada e as restrições de qualidade do produto, explicam esta diversidade de secadores encontrados (Baker, 1997).

Os secadores que utilizam a condução como método de aquecimento podem ser considerados mais simples tanto em relação aos equipamentos necessários quanto aos conceitos envolvidos. Esses secadores, também conhecidos como secadores indiretos, são mais indicados para a secagem de produtos muito finos ou excessivamente úmidos (Cassini, 2004).

Os secadores por convecção promovem aquecimento mais eficiente e mais homogêneo do que os secadores por condução; entretanto, uma vez que a perda de entalpia no primeiro tipo é muito grande, sua eficiência térmica tende a ser menor do que no segundo (Cassini, 2004).

Sabe-se que a casca da manga possui diversos compostos bioativos e que é o maior subproduto da fruta, não sendo utilizado para fins comerciais, Dorta *et al.* (2011) afirma que a secagem da casca reduz a atividade enzimática podendo degradar os compostos fenólicos e reduzir a taxa de crescimento microbiano.

### **2.3.1 Fatores que influenciam a secagem**

Diversos fatores influenciam na secagem, como fatores externos e fatores da natureza do produto processado. Dentre os fatores externos, destacam-se a pressão do sistema, a temperatura, a velocidade e a umidade relativa do ar de secagem. Quanto aos fatores do produto, a área superficial, orientação dos constituintes, estrutura celular e o tipo e concentrações dos solutos.

Quanto maior a velocidade, maiores são os coeficientes de transferência de calor e transferência de massa. A umidade relativa do ar de secagem indica a quantidade de vapor d'água que o ar possui e sua capacidade máxima de remoção de umidade do produto. A temperatura influencia no processo de secagem diminuindo a sua umidade relativa e aumentando assim a força motriz para o processo de secagem (gradiente de umidade).

Dentre os fatores da natureza do produto, a área superficial é o fator que mais influi no processo de secagem, pois quanto maior a superfície de contato entre o ar de

secagem e o produto, mais calor é absorvido pelo produto e, por consequência, uma maior quantidade de umidade é retirada do mesmo. A estrutura celular é um dos principais fatores que influenciam na difusividade interna, quanto mais complexa a estrutura celular menor é o coeficiente de difusividade da umidade do interior da partícula até sua superfície. Os compostos solúveis presentes no interior do produto influenciam a secagem, pois reduzem a pressão de vapor da água no interior do mesmo, diminuindo a força motriz da transferência de massa.

### 2.3.2 Umidade

Em um produto alimentício a umidade é a quantidade de moléculas de água que se encontram na forma ligada ou não ligada às diversas partes do produto. O teor de umidade que é passível de remoção em certas condições de operação é denominado teor de água livre o qual é constituído da porção de água ligada ou não ligada. A água não ligada apresenta comportamento semelhante ao da água pura e representa um excesso de água no teor de umidade de equilíbrio. A água ligada é aquela que possui baixa pressão de vapor e baixa mobilidade e uma temperatura de fusão bem inferior ao da água pura (Barbosa-Cánovas e Vega-Mercado, 1996).

Uma maneira de quantificar a umidade presente nas amostras é através do cálculo da umidade em base seca (b.s.) e em base úmida (b.u.). O teor de umidade em base seca é calculado pela equação (1):

$$X = \frac{m_t - m_{ss}}{m_{ss}} \quad (1)$$

onde  $m_t$  é a massa total da amostra (kg),  $m_{ss}$  é a massa de sólido seco da amostra (kg) e  $X$  é o teor de umidade em base seca (kg água.kg ss<sup>-1</sup>).

## 2.4 Equações da cinética de secagem

Muitas equações descrevem o comportamento do processo de secagem através de sua cinética. As equações da cinética de secagem que estão presentes na literatura são não lineares, o que leva a necessidade de iterações numéricas para estimação de parâmetros. Celma, *et al.* (2009) realizaram um estudo das equações da cinética de secagem utilizando dos principais modelos para estas equações na secagem por infravermelho de bagaço de uva. A Tabela 4, apresenta alguns dos principais modelos cinéticos de secagem:

Tabela 4: Equações de modelos cinéticos de secagem

Nome do modelo (n°)	Equação	Referência
Lewis (2)	$XR = \exp(-kt)$	Bruce (1985)
Page (3)	$XR = \exp(-kt^n)$	Page (1949)
Page Modificado (4)	$XR = \exp(-(kt)^n)$	White <i>et al.</i> (1981)
Dois Termos Exponenciais (5)	$XR = a \exp(-kt) + (1 - a) \exp(-kat)$	Sharaf-Elden <i>et al.</i> (1980)
Midilli (6)	$XR = a \exp(-kt^n) + bt$	Midilli <i>et al.</i> (2002)

Fonte: Celma, *et al* (2009).

O estudo de Celma e colaboradores (2009) analisou o coeficiente de determinação ( $r^2$ ), erro médio quadrado (RMSE), o somatório dos resíduos e qui-quadrado ( $\chi^2$ ) para definir estatisticamente qual modelo melhor representava a secagem por eles realizadas. Os resultados encontrados pelos autores indicaram o modelo de Midilli como o que apresentou melhor desempenho para os experimentos de secagem, o qual descreve a taxa de secagem como exponencial no período inicial da secagem e linear no período final de secagem. Os modelos clássicos que descrevem a taxa de secagem como sendo exclusivamente exponencial tiveram um desempenho aceitável com  $r^2$  superior a 0,96.

Os parâmetros de avaliação do desempenho dos modelos cinéticos de secagem podem ser calculados pelas seguintes equações:

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (XR_{exp,i} - XR_{pre,i})^2}{N - p} \quad (7)$$

$$RMSE = \left[ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (XR_{pre,i} - XR_{exp,i})^2 \right]^{1/2} \quad (8)$$

$$resíduos = \sum_{i=1}^N (XR_{exp,i} - XR_{pre,i}) \quad (9)$$

onde N é o número de dados da amostra, p é o número de parâmetros da equação de ajuste,  $XR_{pre,i}$  é o valor predito para um determinado ponto i e  $XR_{exp,i}$  é o valor experimental.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 Material

O material utilizado nos experimentos de secagem foi a casca de manga, cujos frutos, mangas da variedade Tommy Atkins, eram pertencentes a um mesmo lote adquirido no segundo semestre de 2011 em mercado local (Porto Alegre/RS).

As mangas foram higienizadas, descascadas manualmente, armazenadas em um recipiente plástico e congeladas em local protegido da luz. Doze horas antes dos experimentos as cascas foram descongeladas em temperatura de refrigeração para serem utilizadas. As cascas de manga possuíam uma umidade inicial de 83,1% b.u.

#### 3.2 O equipamento de secagem

Para a realização dos experimentos foi utilizado um equipamento secador de escala piloto, mostrado na Figura 1.



Figura 1: Secador de escala piloto utilizado, onde (1) Ventilador Centrífuco, (2) Resistências, (3) Cabine de secagem, (4) Balança (0,1 g de precisão). Fonte: Möhler (2010).

O secador piloto da Figura 1, utilizado para os experimentos, é composto por: um ventilador centrífugo, que realiza a admissão do ar (vazão máxima:  $15 \text{ m}^3$  de  $\text{ar} \cdot \text{min}^{-1}$ , em condições ambientes), a qual é controlada por um inversor de frequência; um sistema composto por três resistores em paralelo (temperatura máxima  $180 \text{ }^\circ\text{C}$ ), responsável pelo aquecimento do ar de secagem, associados a um sistema de controle; a cabine de secagem que possui paredes móveis, providas de aberturas, as quais possibilitam a mudança do fluxo de secagem entre ascendente e descendente, em cujo interior há um cesto onde foram dispostas as amostras para o procedimento de secagem, o mesmo possui aberturas de  $3,5 \text{ mm}$  de diâmetro; uma balança semianalítica ( $0,1 \text{ g}$  de precisão), com a qual são registradas as massas da soma do cesto e amostra de produto.

O equipamento possui também os seguintes sensores e controladores:

- dois medidores de temperatura (termopares) na entrada do secador (um para escoamento ascendente e outro para escoamento descendente) do tipo Pt100, conectados a dois controladores-indicadores PID da marca West, modelo 6100;
- um medidor de temperatura e de umidade de saída do ar de secagem, marca Testo – Hygrotest 650, cuja faixa de operação é de  $-20 \text{ }^\circ\text{C}$  a  $180 \text{ }^\circ\text{C} \pm 0,4 \text{ }^\circ\text{C}$ , para a temperatura e  $0$  a  $100\% \pm 2\%$  para a umidade relativa, na saída do secador;
- um medidor de vazão de ar, marca Nykon Dwyler, cuja faixa de medição varia entre  $73,5$  e  $735 \text{ m}^3\text{h}^{-1} \pm 0,25\%$ .

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

### 3.3 Procedimentos experimentais

A determinação das curvas de secagem foi realizada através do controle da temperatura do ar de secagem, sendo registrada, para cada experimento, a variação da massa do conjunto constituído de massa de amostra e cesto. As temperaturas do ar de secagem avaliadas foram de  $40$ ,  $60$ ,  $80$  e  $100 \text{ }^\circ\text{C}$  e velocidade constante igual a  $8 \text{ m/s}$ .

Os experimentos decorreram da seguinte forma:

a) verificação da existência de zona de atrito entre a bandeja de secagem e o secador;

b) a bandeja de secagem foi retirada e o secador ligado, primeiramente o ventilador e, após, as resistências (uma inversão da ordem poderia gerar um superaquecimento e conseqüentemente poderia avariar o equipamento de secagem);

c) a bandeja teve seu fundo preenchido com uma fina camada de cascas de manga, cobrindo toda sua extensão de modo uniforme;

d) aguardava-se a temperatura chegar à temperatura definida para a secagem, desligava-se as resistências e, após, o ventilador, abria-se a cabine de secagem, colocava-se o cesto, fechava-se a cabine, registrava-se a massa do conjunto bandeja mais amostra, ligava-se o ventilador e, em seguida, as resistências e o cronômetro;

e) a cada dois minutos e meio era invertido o fluxo do ar de secagem e, após outros dois minutos e meio, as resistências eram desligadas e, em seguida, o ventilador, era invertido o fluxo, registrada a massa do conjunto e, então, era ligado novamente o ventilador e as resistências;

f) o procedimento acima descrito foi repetido até o momento em que a diferença de massas entre duas medidas subsequentes fosse inferior a 0,5 g nos 5 minutos de operação, o que indica uma taxa de transferência mássica inferior a  $0,1 \text{ g}\cdot\text{min}^{-1}$ , fator decisivo para o término do experimento, pois esta variação está no limite de precisão da balança utilizada;

g) ao término da secagem, o produto era removido da bandeja e posteriormente colocado em liquidificador comum, para a produção da farinha de casca de manga.

### 3.4 Análises realizadas

As amostras de casca de manga coletadas no início e no final de cada experimento foram submetidas às análises descritas a seguir.

#### 3.4.1 Análise de Umidade

A umidade das cascas secas foi realizada a partir da secagem de amostras, contendo 3 g de casca de manga seca ou *in natura*, em uma estufa na temperatura de  $105 \text{ }^\circ\text{C}$  por um período de cinco horas. A umidade das amostras foi medida de acordo com a equação (10).

$$U_{bu} = m_{H_2O} / m_t \quad (10)$$

Onde a  $U_{bu}$  é a umidade base úmida,  $m_{H_2O}$  é a massa de água da amostra e  $m_t$  é a massa total da amostra, mas  $m_{H_2O}$  é obtida através da equação (11).

$$m_{H_2O} = m_t - m_f \quad (11)$$

Onde  $m_f$  é a massa obtida após o período de incubação na estufa.

### 3.4.2 Análise de Fenólicos

Foi obtido um extrato contendo compostos fenólicos de amostras de casca de manga, *in natura* e dos demais experimentos a 40, 60, 80 e 100 °C, através da extração com acetona 50%. Para o procedimento de extração, pesou-se 1,0 g de amostra em um recipiente plástico próprio para a agitação e adicionou-se 15 ml da solução de acetona; após, o recipiente foi colocado em uma bandeja vibratória, sob agitação de 600 rpm, durante 1 h. Após este procedimento, o extrato foi filtrado e registrado seu volume, realizando-se, então, o procedimento de análise de fenólicos totais através do método de Folin-Ciocalteu descrito por Sigleton e Rossi (1965).

Em tubos falcon foram adicionados, 40 µL da amostra diluída (1:2 v/v), 3,2 mL de água destilada e 200 µL de reagente de Folin-Ciocalteu. A mistura foi agitada manualmente e deixada em ambiente escuro por 5 min e então foram adicionados 600 µL de uma solução de carbonato de sódio saturada (17%). A reação ocorreu à temperatura ambiente por 1,5 h, quando foi feita a leitura de absorbância a 765 nm em espectrofotômetro UV/VIS da marca Pró-Análise, modelo UV1600. Para quantificação foi empregada uma curva padrão com solução de ácido gálico nas seguintes concentrações: 50, 100, 150, 250 e 500 mg L<sup>-1</sup>. Foi calculado um coeficiente de determinação ( $r^2$ ), de  $r^2= 0.9982$  ao nível de significância de 5%. O teor de fenóis totais foi expresso em g de Ácido Gálico Equivalente (GAE) por 100 g de amostra seca.

### 3.4.3 Análise de Reidratação

O processo de análise de reidratação encontra-se descrito a seguir.

a) Pesou-se 1 g de amostra de casca de manga seca e adicionou-se 20 ml de água.

b) Deixou-se a amostra imersa em água por um período de 12 h.

c) Para cada amostra foram pesados previamente o filtro e o tubo de ensaio seco.

d) Após a filtração, pesava-se novamente o tubo e o filtro molhados.

e) A massa de água não absorvida foi calculada a partir da diferença de massa do tubo de ensaio com a água filtrada e o tubo de ensaio seco, somada a diferença de massa entre o filtro molhado e seco.

A avaliação dos alimentos do tipo farinhas foi realizada através da reidratação, onde quanto maior a quantidade de umidade adsorvida pela farinha, maior sua reidratação e, por consequência, menor a umidade presente nas amostras de casca de manga seca, o que determina o tempo de prateleira do alimento.

#### 3.4.4 Ajuste dos dados experimentais

Os dados experimentais para o processo de secagem de casca de manga foram adequados aos modelos de cinética de secagem encontrados na Tabela 4. Para isso, foi realizada uma regressão não-linear, usando o método de Quase-Newton, pelo *software* Statistica 7.0 (StatSoft Inc., Tulsa, OK).

Para a comparação dos ajustes obtidos por regressão não-linear, foram analisados parâmetros estatísticos e critérios físicos. Os parâmetros estatísticos incluíam o coeficiente de correlação ( $r^2$ ), qui-quadrado ( $\chi^2$ ) e o erro médio quadrático (RMSE). O modelo com menor  $\chi^2$ , RMSE e com maior valor de  $r^2$  é a melhor escolha do ponto de vista estatístico.

Os modelos cinéticos de secagem apresentam como parâmetros que representam a taxa de secagem e parâmetros de ajuste, os quais devem satisfazer as condições físicas do processo, onde, por exemplo, um valor negativo de um dos parâmetros de taxa de secagem indica a rejeição do chute inicial utilizado para o processo iterativo.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste trabalho, foram determinadas as curvas de secagem da casca de manga com o ar nas temperaturas de 40, 60, 80 e 100 °C e velocidade constante e igual 8 m/s para todos os experimentos. Os ensaios foram feitos em duplicata, bem como as análises de fenólicos totais e de reidratação nas amostras coletadas. Foram avaliados os modelos de curvas de secagem de Lewis, Page, Page modificado, Dois Termos Exponenciais e Midilli.

A seguir serão apresentadas as curvas de secagem experimentais obtidas, bem como o ajuste aos modelos estudados, onde o modelo é representado pela curva em vermelho e os dados experimentais pelos pontos em azul.

Para o modelo de Lewis foi encontrado como parâmetro da equação (2) da seção 2.4,  $k$  equivalente a 0,00455 para 40° C; 0,00744 para 60° C; 0,00990 para 80° C e 0,01300 para 100° C. Na Figura 2 são apresentadas as curvas de variação de umidade adimensional pelo tempo, bem como o ajuste ao modelo de Lewis, para as temperaturas de 40 (a), 60 (b), 80 (c) e 100 °C (d).

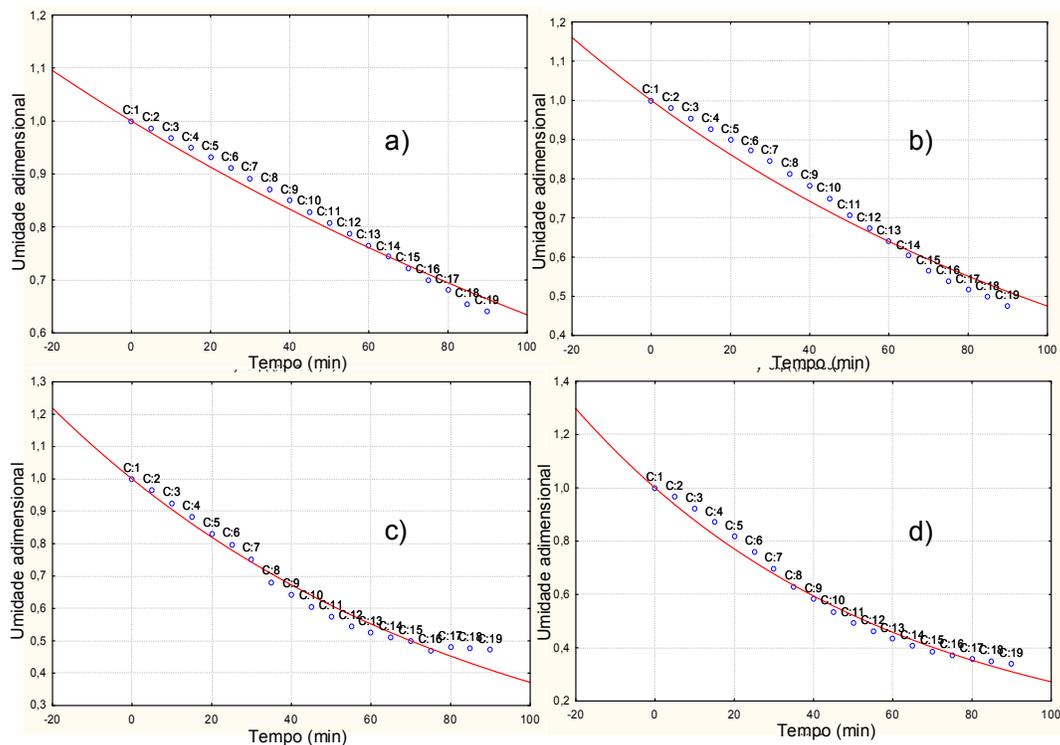


Figura 2: Curvas de secagem: dados experimentais e ajuste ao modelo de Lewis nas temperaturas de 40 (a), 60 (b), 80 (c) e 100 °C (d).

Como pode-se observar, este modelo, para todas as temperaturas testadas, não é um modelo ideal, pois não representa corretamente os dados experimentais obtidos, isto porque a predição não equivale aos dados experimentais.

Para o modelo de Page e Page modificado existe uma diferença importante na equação de modelagem de curva de secagem, a qual influencia significativamente na predição, como pode ser constatado nas Figuras a seguir. A Figura 3 apresenta a relação entre os dados experimentais e os preditos pelo modelo de Page para as temperaturas trabalhadas, a equação (3) para esta modelagem da secagem é descrita na seção 2.4.

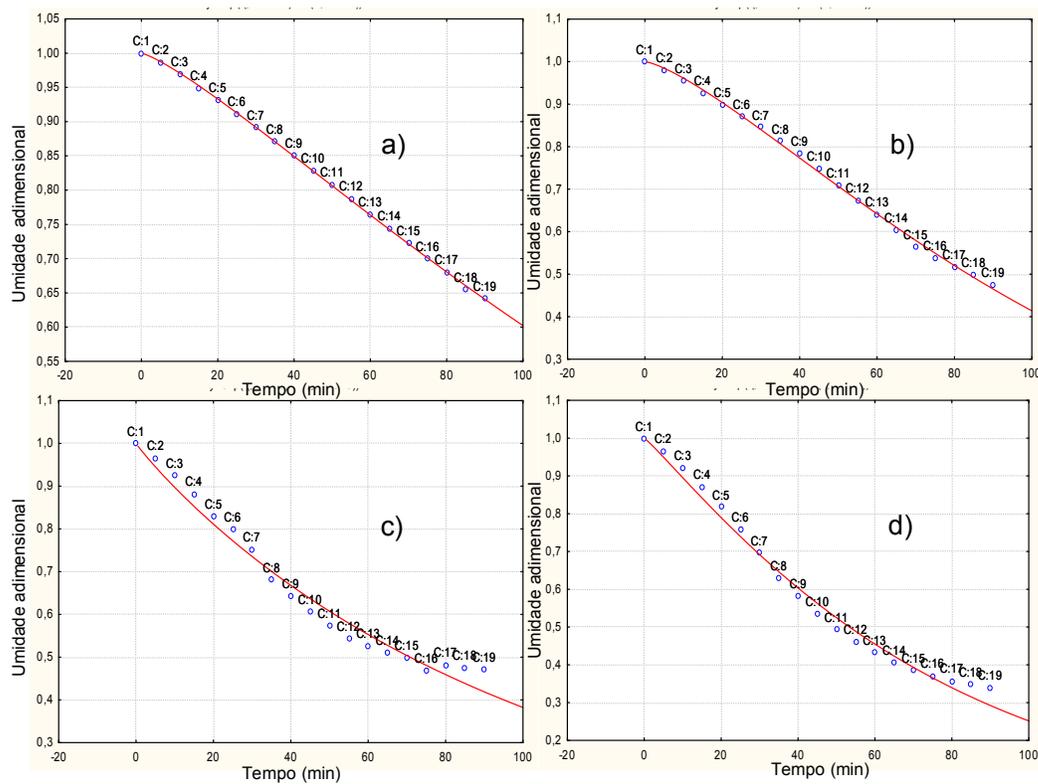


Figura 3: Curvas de secagem: dados experimentais e ajuste ao modelo de Page nas temperaturas de 40 (a), 60 (b), 80 (c) e 100 °C (d).

A representação do modelo de Page modificado é apresentada na Figura 4, este modelo é descrito através da equação (4) da seção 2.4.

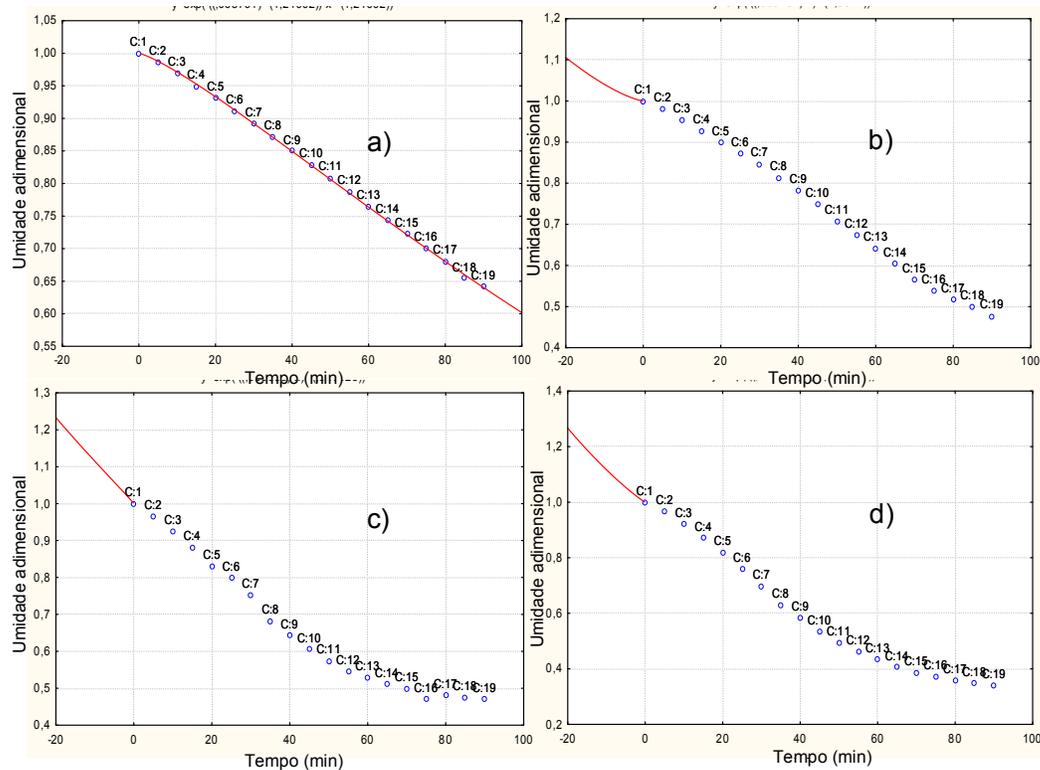


Figura 4: Curvas de secagem: dados experimentais e ajuste ao modelo de Page Modificado nas temperaturas de 40 (a), 60 (b), 80 (c) e 100 °C (d).

Através dos gráficos apresentados na Figura 4, observa-se que os modelos de Page e Page modificado não são modelos eficazes de representação, pois assim como o modelo de Lewis só consideram que a taxa de secagem reduz exponencialmente com o tempo.

O modelo de Dois Termos Exponenciais propõe que existem duas cinéticas para o processo de secagem onde estas são exponenciais. Conforme pode ser observado na Figura 5, o modelo de Dois Termos Exponenciais, conforme a equação (5) da seção 2.4, representa bem os dados experimentais quando há uma cinética de secagem lenta.

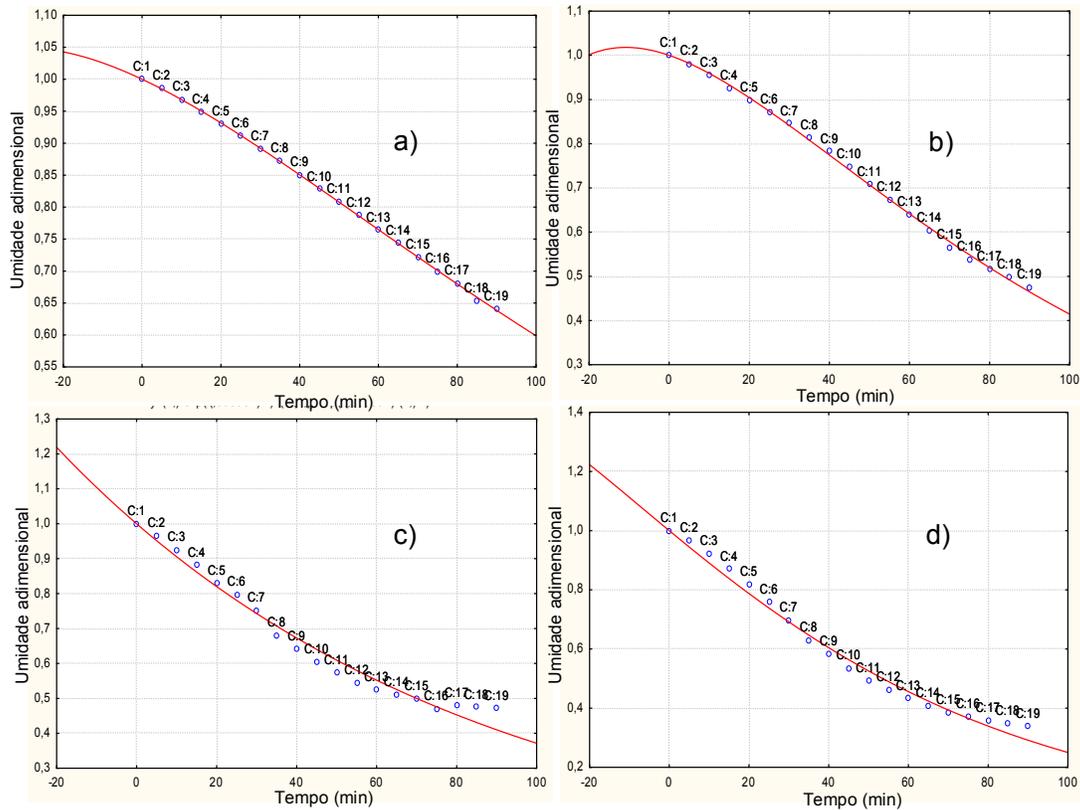


Figura 5: Curvas de secagem: dados experimentais e ajuste ao modelo de Dois Termos Exponenciais nas temperaturas de 40 (a), 60 (b), 80 (c) e 100 °C (d).

O modelo de Dois Termos Exponenciais possui uma discrepância quando modela um caso onde a dinâmica de secagem é mais rápida, isto é, a modelagem não consegue prever com precisão aceitável os dados referentes às curvas de secagem obtidas com altas temperaturas do ar de secagem.

Assim como o modelo de Dois Termos Exponenciais o modelo de Midilli propõe a existência de duas cinéticas durante o processo de secagem, podendo ser descrito o momento onde existe uma taxa de secagem exponencial referente a água não ligada (em excesso) ao alimento e posteriormente uma taxa de secagem linear onde o alimento tem a taxa de secagem controlada pela difusão interna da umidade no alimento. Na Figura 6 abaixo são apresentadas às curvas de secagem em comparação com o modelo de Midilli, apresentado pela equação (6) da seção 2.4., para as temperaturas trabalhadas.

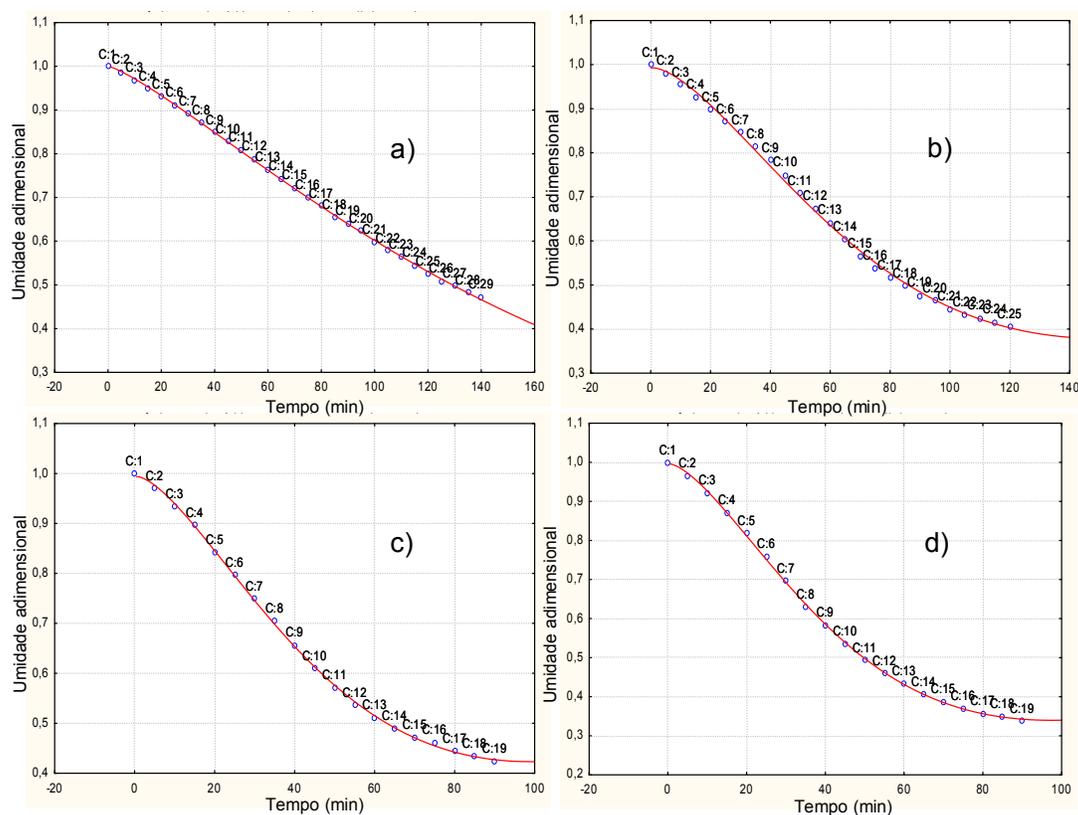


Figura 6: Curvas de secagem: dados experimentais e ajuste ao modelo de Midilli nas temperaturas de 40 (a), 60 (b), 80 (c) e 100 °C (d).

O modelo de Midilli é o que melhor consegue prever os diversos estágios da secagem de alimentos, tanto no momento em que há o predomínio da difusão interna quanto na difusão externa. Os parâmetros utilizados neste modelo são apresentados na Tabela 5.

Tabela 5: Parâmetros do modelo de Midilli da secagem de casca de manga.

Temperatura (°C)	$k$ ( $\text{min}^{-1}$ )	$b$ ( $\text{min}^{-1}$ )*	$n$ ( $\text{min}^{-b}$ )
40	0,001696±0,00008 <sup>a</sup>	0,000105 <sup>a</sup>	1,2454±0,0621
60	0,001754±0,00009 <sup>b</sup>	0,001908 <sup>b</sup>	1,4427±0,0411
80	0,003987±0,00020 <sup>c</sup>	0,002380 <sup>c</sup>	1,3474±0,1413
100	0,003825±0,00032 <sup>c</sup>	0,002753 <sup>d</sup>	1,4273±0,0992

\*desvio padrão menor que 0,00001

Conforme esperado pelo modelo, os valores dos parâmetros  $k$  e  $b$  aumentaram com o aumento da temperatura, indicando desidratação mais rápida de amostras em altas temperaturas, e o valor de  $k$  possui valores superiores quando comparado com  $b$ , pois o primeiro representa a cinética inicial (rápida) e o segundo apresenta a cinética final da secagem (lenta). Para o processo a 100 e 80 °C os valores do parâmetro  $k$  não diferiam significativamente ( $p>0,05$ ). Os valores estimados de  $n$  superiores a 1

indicam que as curvas de secagem têm uma concavidade para baixo (Corradini e Peleg, 1998). Este comportamento está relacionado à baixa taxa de secagem no início do processo, possivelmente devido ao aquecimento da amostra (Barbosa-Cánovas e Vega-Mercado, 1996).

A partir das análises acima, pode-se perceber que embora os modelos representem da melhor forma os principais aspectos da secagem, estes poderiam ser explicados por uma taxa exponencial de secagem, entretanto, existem modelos diversos a essa ideia, que julgam existir um comportamento distinto entre períodos de secagem onde, no primeiro estágio da secagem existe uma cinética e após outra, o modelo de Dois Termos Exponenciais tem na sua composição a indicação de que existem duas cinéticas de secagem exponenciais uma correspondendo ao início da secagem e a outra correspondendo a etapa final da secagem. O modelo de Midilli, por sua vez, diz que as taxas de secagem do início e do fim são distintas entre si, onde uma é exponencial e a outra é linear.

Como pode ser visto na Figura 7, valores preditos de umidade adimensional apresentaram grande correlação com dados experimentais. Para o modelo de Page os valores previstos apresentam um desvio considerável em baixos níveis de umidade adimensional, enquanto o modelo de Midilli apresentou uma correlação linear entre os valores de umidade adimensional experimentais e preditos. A diferença entre Page e a equação proposta por Midilli é a componente " $bt$ ", que possivelmente desempenha considerável correção de tendência das curvas, quando a umidade de processamento está perto de equilíbrio.

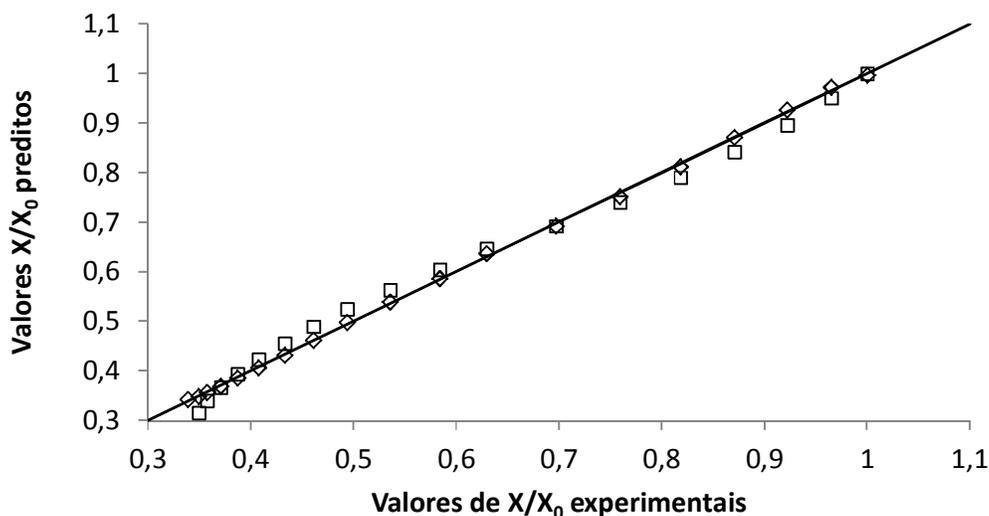


Figura 7. Relação entre os valores experimentais e preditos de umidade adimensional para os modelos de Page ( $\square$ ) e Midilli ( $\diamond$ ).

Para critério de comparação e avaliação dos modelos, foram analisados os valores de  $r^2$ ,  $\chi^2$  e RMSE, apresentado na Tabela 6.

Tabela 6: Análise do erro dos modelos em comparação com os dados experimentais.

Model	$r^2$	$\chi^2$	RSME
Lewis	[0.9798;0.9898]	[1.1E-4; 7.0E-4]	[2.1E-6;7.1E-4 ]
Page	[0.9781;0.9997]	[2.8E-6;6.7E-4]	[2.7E-6;2.7E-4 ]
Page Modificado	[0.9780;0.9997]	[3.0E-6;6.7E-4]	[2.8E-6;2.7E-4 ]
Dois Termos Exp.	[0.9823;0.9998]	[2.2E-6;4.5E-4]	[1.2E-5;9.7E-4 ]
Midilli	[0.9984;0.9997]	[4.6E-6;1.3E-4]	[4.0E-6;4.6E-5]

Como podemos observar na Tabela 6, todos os modelos apresentados podem ser empregados para a modelagem da cinética de secagem da casca de manga, por possuírem coeficiente de determinação próximo a unidade e valores inferiores a  $10^{-3}$  para os valores de  $\chi^2$  e RSME. Nesta avaliação o modelo que apresentou melhores resultados foi o de Midilli. Conforme o estudo realizado por Celma *et al.* (2009), onde foram analisados 13 modelos de secagem para a secagem de bagaço de uva, o modelo de Midilli apresentou os melhores resultados.

Na Figura 8 são apresentadas as curvas de secagem da casca de manga e na Figura 9 são apresentadas as taxas de secagem versus a umidade adimensional, ambas as Figuras apresentam curvas para as quatro temperaturas que foram realizados os experimentos, partindo de uma fina camada de cascas, cujas massas nos experimentos ficaram em torno de 100 g.

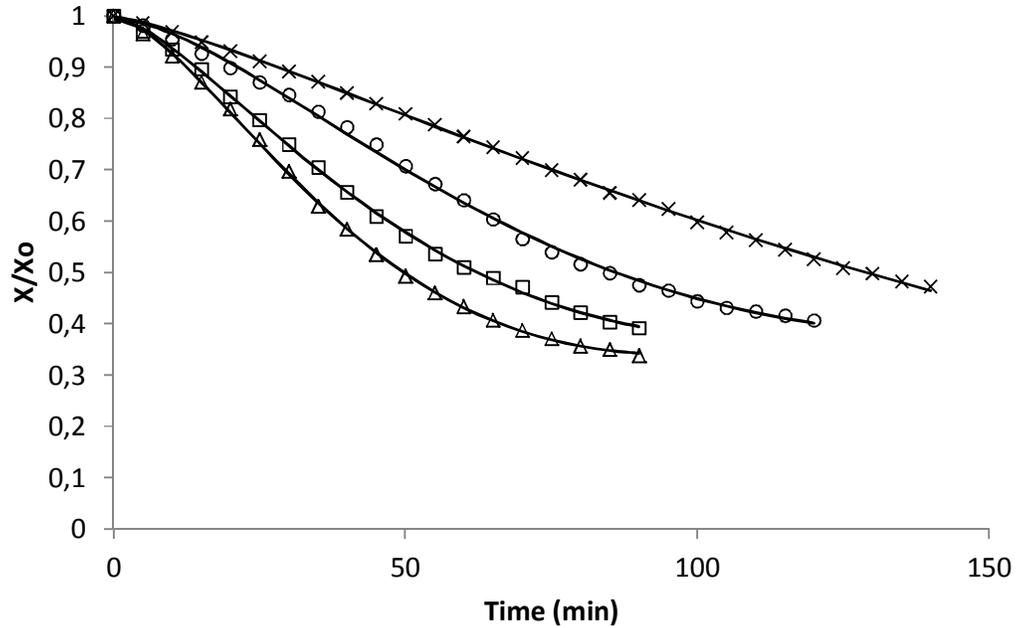


Figura 8: Cinética de secagem da casca de manga a 100 ( $\nabla$ ), 80 ( $\square$ ), 60 (o) e 40 °C (x). Os dados, ajustados ao modelo de Midilli, são uma média de valores entre dois experimentos independentes, com erro padrão sempre inferior a 9%.

Na Figura 9 é possível verificar as curvas da taxa de secagem versus o teor de umidade da casca de manga. As curvas mostram a existência do período constante na taxa de secagem. A presença deste período constante mostra que o alimento é capaz de fornecer uma quantidade constante de água na superfície por um período apreciável. É possível observar um leve aumento na taxa de secagem no período inicial, o que pode ser explicado pela transferência de calor através do sólido em função do aquecimento do alimento.

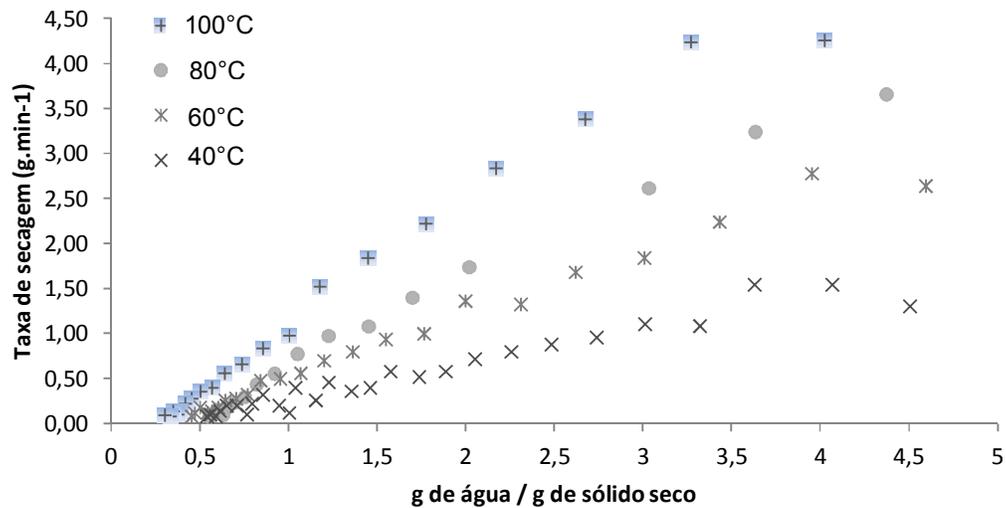


Figura 9: Curvas da taxa de secagem em função do teor de umidade.

Pode-se observar nas Figuras 8 e 9 que a influência da temperatura do ar de secagem é marcante para o processo: neste caso, a taxa de secagem se apresenta maior para a temperatura de 100 °C. As curvas da temperatura mais elevada atingem um menor nível de umidade para um tempo constante, ou uma mesma umidade em menor tempo, do que as curvas de temperatura mais baixa, demonstrando uma maior variação da umidade pelo tempo.

Para análise de umidade da casca de manga após o final da secagem, uma amostra foi coletada ao final de cada experimento e todas as amostras foram secadas em uma estufa. A quantificação da umidade restante nas amostras é de extrema importância. A Tabela 7 apresenta os resultados finais de umidade obtidos em cada experimento.

Tabela 7: Quantificação da umidade da casca de manga após a secagem

Experimento	Temperatura (°C)	Umidade b.u. (%)
In Natura	-	83,12 ± 0,71
Exp. 1	100	3,32 ± 0,46
Exp. 2	100	3,34 ± 0,60
Exp. 3	60	5,72 ± 0,42
Exp. 4	60	5,87 ± 1,39
Exp. 5	80	5,21 ± 0,36
Exp. 6	80	3,86 ± 0,16
Exp. 7	40	33,52 ± 2,24
Exp. 8	40	37,97 ± 2,53

É possível verificar na Tabela 7 que a umidade inicial da casca de manga é muito elevada, em torno de 80% da massa total da casca. Também é possível observar que, para as temperaturas de 100 e 80 °C, as amostras tiveram valores de umidade final semelhantes, abaixo dos 6%, o que demonstra um possível desperdício de energia ao realizar a secagem em temperatura mais elevada.

A análise de fenólicos totais pode ser tomada como fator decisivo para definir as condições ideais de operação, isso porque os compostos bioativos possuem ação antioxidante sendo indispensáveis na alimentação humana por capturarem os radicais livres.

O resultado da análise de fenóis totais para casca de manga submetida à secagem nas quatro temperaturas estudadas está apresentado na Tabela 8.

Tabela 8: Análise de fenólicos totais para as cascas de manga *in natura* e submetida à secagem nas quatro temperaturas estudadas.

Amostras	GAEs por 100 g de material seco
<i>In natura</i>	3,15±0,16 <sup>a</sup>
40 °C	1,76±0,04 <sup>d</sup>
60 °C	2,25±0,17 <sup>b</sup>
80 °C	2,37±0,02 <sup>b</sup>
100 °C	1,90±0,01 <sup>c</sup>

Através do teste de Tukey com um intervalo de 95% de significância (análise de média de duplicatas), os valores para o teor de fenólicos totais de todos os processos de secagem decresceram em relação às cascas *in natura*. O processo a 100 °C teve a maior degradação, valor que diferiu significativamente ( $p < 0,05$ ) das outras temperaturas. Como pode ser observado na Tabela 8, os valores obtidos para 60 e 80 °C são superiores aos encontrados a 100 °C, o que indica maior degradação dos compostos fenólicos totais pela ação da temperatura. Não houve diferença significativa quanto ao teor de compostos fenólicos para as amostras secas a 60 e 80 °C ( $p > 0,05$ ) e por isso é mais indicado o uso da temperatura de 80 °C, pois o processo de desidratação é mais rápido.

Os resultados errados de teor de fenólicos totais a 40 °C são devido ao tempo de secagem, o qual não foi suficiente para o estado estacionário de secagem e podem ter sido agravados devido à alta umidade do produto seco e, por consequência, baixo rendimento de extração. Estes testes foram realizados em quadruplicata com resultados semelhantes em todas as análises. Com isto mais estudos devem ser realizados a fim de avaliar a quantidade real de compostos fenólicos no produto seco a 40 °C, onde se espera obter valores superiores aos encontrados a 60 °C.

Os resultados encontrados da análise de fenólicos foram inferiores aos encontrados na pesquisa de Dorta *et al.* (2011), provavelmente devido a diferenças de condições de extração, variedade e condições de cultivo da fruta, entre outros fatores.

O resultado da análise de reidratação foi obtido através do cálculo de diferença de massas onde a reidratação é a razão entre o valor percentual de água adsorvida pelo alimento seco e a água inicial. Para as temperaturas analisadas, a reidratação do alimento seco a 80 e a 100 °C foram semelhantes, tendo como valores 41,85% e 41,12% respectivamente. O alimento seco a 60 °C, apesar de possuir umidade em torno de 6% b.u., apresentou uma reidratação com valor inferior aos encontrados em 80 e 100 °C, com um valor de 38,63%. E para o resíduo seco a 40% encontrou-se a menor reidratação conforme esperado, pois o alimento possuía uma umidade muito superior aos outros experimentos com reidratação igual a 34,01%.

Análise do efeito de processos sobre compostos bioativos é um passo importante para a utilização adequada de pó de casca de manga nas indústrias alimentícia e farmacêutica. Dorta *et al.* (2011) mostraram efeitos negativos da secagem por forno e ar forçado a 70 °C em compostos com atividades antioxidantes, embora nenhum efeito significativo sobre o conteúdo de fenólicos totais foi observada. Larrauri *et al.* (1997)

verificaram que a secagem de bagaço de uva a 60 °C não afetou o conteúdo de fenólicos totais e a atividade antioxidante do subproduto em comparação com amostras liofilizadas. Assim, os estudos sobre uma gama mais ampla de temperatura, como proposto no presente trabalho, e a influência da velocidade do ar sobre a degradação de compostos bioativos são essenciais para observações futuras.

## 5 CONCLUSÃO

O presente estudo analisou a modelagem das curvas de secagem da casca de manga, pela carência destes na literatura. Os resultados mostraram que a modelagem matemática deste produto se torna complexa pela presença dos estágios de aquecimento do sólido, taxa de secagem fixa e de predomínio da difusão interna. Os modelos estudados podem ser utilizados para descrever o comportamento da secagem de casca de manga, pois apresentam  $r^2$  próximo a unidade, entretanto o modelo de Midilli foi o que melhor representou os dados de secagem experimentais para as temperaturas estudadas.

Quanto à secagem propriamente dita, se obteve resultados desejáveis de umidade final do alimento seco nas temperaturas de 100, 80 e 60 °C (inferior a 7% b.u.), valor ideal de umidade para a produção de farinha a partir da casca de manga seca. Entretanto para a temperatura de secagem de 40 °C somente seria possível chegar à umidade final do alimento realizando a secagem por um período superior ao realizado. Constatou-se que a temperatura possui grande influência na cinética de secagem, conforme apresentado na literatura.

As cascas de manga são rejeito da indústria de processamento de manga, mas possuem quantidade expressiva de compostos bioativos, de alto valor agregado. Para quantificar os compostos fenólicos foram realizadas as análises de compostos fenólicos totais, que são responsáveis pela atividade antioxidante dos alimentos. Segundo essas análises, foram encontradas quantidades superiores de compostos fenólicos na casca *in natura* provavelmente pela degradação destes compostos pelo processo de secagem. O processo realizado a 80 °C parece ser a melhor opção para a secagem de casca de manga devido a sua rápida remoção de água do produto e mínima degradação de compostos fenólicos em comparação com as outras temperaturas de secagem.

Uma forma de avaliação dos alimentos do tipo farinhas é através da reidratação, onde quanto maior a quantidade de umidade adsorvida pela farinha, maior sua reidratação e, por consequência, menor a umidade presente nas amostras de casca de manga seca, o que determina o tempo de prateleira do alimento. Obteve-se reidratação com índices superiores a 40% para as cascas secas a temperatura de 80 e 100 °C, valores pouco inferiores na temperatura de 60 °C. Na temperatura de 40 °C foi obtida uma reidratação próxima dos 30%, o que era esperado, pois a amostra já possuía uma umidade superior a 30% b.u.

Como sugestão para trabalhos futuros, deve ser analisada a influência da velocidade do ar de secagem frente à degradação dos compostos bioativos.

## REFERÊNCIAS

- AJILA, C. M.; AALAMI, M.; LEELAVATHI, K.; PRASADA RAO, U. J. S. *Mango peel powder: A potential source of antioxidant and dietary fiber in macaroni preparations*. Innovative Food Science and Emerging Technologies, v.11, p.219–224, 2011.
- AJILA, C. M.; NAIDU, K. A.; BHAT, S. G.; PRASADA RAO, U. J. S. *Bioactive compounds and antioxidant potential of mango peel extract*. Food Chemistry, v.105, p. 982–988, 2007.
- ANGELO, P. M.; JORGE, N. *Compostos fenólicos em alimentos – Uma breve revisão*. Rev. Inst. Adolfo Lutz, v.66, n.1, p.232-240, 2007.
- AROGBA, S. S. *Effect of temperature on the moisture sorption isotherm of a biscuit containing processed mango (Mangifera indica) kernel flour*. Journal of Food Engineering, v.48, p.121 – 125, 2001.
- BAKER, C.G.J. *Industrial Drying of Foods*, Chapman&Hall, Blackie Academic and Professional, p.309, 1997.
- BARBOSA-CÁNOVAS, G. V.; VEGA-MERCADO, H. *Dehydration of Foods*. Chapman & Hall, New York, 1996.
- BRUCE, D. M. *Exposed-layer barley drying, three models fitted to new data up to 150 °C*. Journal of Agricultural Engineering Research, v.32, p.337–347, 1985.
- CASSINI, A. S. *Análise das Características de Secagem da Proteína Texturizada de Soja*. Dissertação de mestrado. 2004.
- CASSINI, A. S.; MARCZAK, L. D. F.; NOREÑA, C. P. Z. *Drying Characteristics of Textured Soy Protein: A Comparison between Three Different Products*. Drying Technology, v.25, p.2047–2054, 2007.
- CELMA, A. R.; LÓPEZ-RODRÍGUEZ, F.; BLÁZQUEZ, F. C. *Experimental modelling of infrared drying of industrial grape by-products*. Food and Bioproducts Processing, v.87, p.247–253, 2009.
- CORRADINI, M. G.; PELEG, M. *A model of non-isothermal degradation of nutrients, pigments and enzymes*. J. Agric.Food Chem, v.84, p.217-226, 2004.
- CORZO, O.; BRACHO, N.; ALVAREZ, C. *Water effective diffusion coefficient of mango slices at different maturity stages during air drying*. Journal of Food Engineering v.87, p.479–484, 2008.
- DORTA, E.; LOBO, M. G.; GONZÁLEZ, M. *Using drying treatments to stabilize mango peel and seed: Effect on antioxidant activity*. LWT - Food Science and Technology, doi:10.1016/j.lwt.2011.08.016, 2011.
- EMBRAPA, <http://www.embrapa.br/imprensa/noticias/2009/agosto/4a-semana/novas-tecnicas-para-o-cultivo-da-manga/>, acesso em 09/10/2011, 2009.

- EMBRAPA, [www.cnpmf.embrapa.br/planilhas/Manga\\_Brasil\\_2009.pdf](http://www.cnpmf.embrapa.br/planilhas/Manga_Brasil_2009.pdf), acesso em 11/12/2011, 2010.
- FAO, <http://faostat.fao.org/site/567/DesktopDefault.aspx?PageID=567#ancor>, acesso em 11/12/2011, 2009.
- LARRAURI, J. A.; RUPÉREZ, P.; BORROTO, B.; SAURA-CALIXTO, F. *Mango Peels As a New Tropical Fibre: Preparation e Characterization*. Lebensmittel-Wissenschaftund Technologie, v.29, n.8, p.729-733, 1996.
- MARQUES, A.; CHICAIBAN, G.; ARAUJO, M. T.; MAGALHÃES, L. R. T., SABAA-SRUR, A. U. O. *Composição centesimal e de minerais de casca e polpa (Mangifera indica L.) cv. Tommy Atkins*. Revista Brasileira de Fruticultura, v.32, n.4, p.1206-1210, 2010.
- MIDILLI, A.; KUCUK, H.; YAPAR, Z. *A new model for single-layer drying*. Drying Technology, v.20, n.7, p.1503–1513, 2002.
- MÖHLER, B. C. *Avaliação das Características de Secagem dos Grãos de Soja*. Trabalho de conclusão de curso, DEQUI/UFRGS, 2010.
- MUJUMDAR, A. S. *Handbook of Industrial Drying – 2<sup>a</sup> Ed.*, V. 1. Marcel Dekker, Inc. p.742, 1995.
- PAGE, G. E. *Factors influencing the maximum rates of air drying shelled corn in thin layers*. M.S. Thesis. Department of Mechanical Engineering, Purdue University, USA, 1949.
- SHARAF-ELDEEN, Y.I.; BLAISDELL, J.L.; HANDY, M.Y. *A model for ear corn drying*. Transactions of the ASAE, v.23, p.1261–1271, 1980.
- SINGLETON, V. L.; ROSSI, J. A. *Colorimetry of Total Phenolics with Phosphomolybdic-Phosphotungstic acid reagents*. Am J Enol Vitic, v.16, p.144-158, 1965.
- WHITE, G. M.; ROSS I. J.; PONELEIT, C. G. *Fully-exposed drying of popcorn*. Transactions of the ASAE, Saint Joseph, v.24, n.2, p.466-468, 1981.