



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE
ALIMENTOS**

DAIANA CARDOSO DE OLIVEIRA

**EFEITO DA SECAGEM SOLAR E EM ESTUFA CONVECTIVA
SOBRE AS CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICAS E
REOLÓGICAS DO POLVILHO AZEDO**

**FLORIANÓPOLIS
2016**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE
ALIMENTOS**

Daiana Cardoso de Oliveira

**EFEITO DA SECAGEM SOLAR E EM ESTUFA CONVECTIVA
SOBRE AS CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICAS E
REOLÓGICAS DO POLVILHO AZEDO**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Alimentos, da Universidade Federal de Santa Catarina, como requisito final à obtenção do título de Doutora em Engenharia de Alimentos.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Edna Regina Amante
Coorientador: Prof^o. Dr. Marco Di Luccio

**FLORIANÓPOLIS
2016**

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária
da UFSC.

De Oliveira, Daiana Cardoso

Efeito da Secagem Solar e em Estufa Convectiva Sobre as Características Físico-Químicas e Reológicas do Polvilho Azedo / Daiana Cardoso de Oliveira ; orientadora, Edna Regina Amante ; coorientador, Marco Di Luccio. - Florianópolis, SC, 2016.

336 p.

Tese (doutorado) - Universidade Federal Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Alimentos.

Inclui referências

1. Engenharia de Alimentos. 2. Polvilho azedo. 3. amido fermentado. 4. secagem. 5. isotermas de sorção. I. Amante, Edna Regina. II. Di Luccio, Marco. III. Balparda, Miguel Soriano. IV. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Química. V. Título.

**Efeito da Secagem Solar em Estufa Convectiva Sobre as
Características Físico-Químicas e Reológicas do Polvilho Azedo**

Por

Daiana Cardoso de Oliveira

Tese julgada para a obtenção do título de **Doutor em Engenharia de Alimentos**, área de Concentração de **Desenvolvimento de Processos da Indústria de Alimentos**, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Alimentos da Universidade Federal de Santa Catarina.

Prof.^a. Dr.^a. Edna Regina Amante
Orientadora

Prof. Dr. Bruno Augusto Mattar Carciofi
Coordenador

Banca Examinadora:

Prof.^a. Dr.^a. Edna Regina Amante

Prof.^a. Dr.^a. Ana Carolina Moura de
Sena Aquino

Prof. Dr. Ivo Mottim Demiate

Prof.^a. Dr.^a. Regina Vasconcellos
Antônio

Prof. Dr. José Miguel Mulher

Prof. Dr. Haiko Hense

Florianópolis, 13 de outubro de 2016.

Dedico este trabalho aos meus pais e meu amor Bruno,
por todo apoio, carinho, compreensão
e estímulo durante esta caminhada.

AGRADECIMENTOS

Agradeço:

Primeiramente a Deus por estar iluminando meu caminho, me protegendo e me dando forças para seguir em frente.

À Universidade Federal de Santa Catarina e ao Programa de Pós-Graduação de Engenharia de Alimentos pela oportunidade da realização deste trabalho. Também ao CAL e todos os funcionários que direta ou indiretamente contribuíram para realização deste trabalho.

À minha orientadora, Prof^a. Dr^a. Edna Regina Amante, pela confiança, paciência, carinho, dedicação, incentivo e orientação. Suas palavras de incentivo foram de grande valia nos momentos difíceis.

À colega de Laboratório Carol pela ajuda com as análises de ácidos orgânicos, pela amizade, incentivo, prestatividade e ajuda quando precisava de chaves ou de materiais para os experimentos de final de semana.

À colega de laboratório Milene, que também sempre muito prestativa me ajudava com as chaves dos laboratórios e materiais que precisava para o final de semana.

À professora Dr^a. Carmen Müller pelo auxílio com a parte experimental de secagem e pelo empréstimo da estufa convectiva.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Alimentos pelos ensinamentos.

Ao professor Marco Di Luccio pelas sugestões e pela ajuda com a cinética de secagem.

Ao Lenilton pelo auxílio e colaboração com as curvas de secagem.

À professora Elisa Helena Siegel Moecke pelo empréstimo do laboratório de Engenharia Ambiental da UNISUL para realização dos experimentos de isoterma.

À professora Ms. Márcia Michels, da UNISUL, por entender minhas ausências no início do doutorado, pela amizade, apoio e ajuda de sempre.

Ao Enilto Neubet da Epagri, pela ajuda com a origem do cultivar Moura e pelas informações das temperaturas médias das cidades onde os amidos de mandioca foram fermentados.

Aos meus pais Ignêz e Deoli e meus irmãos Sérgio e Daniel, pelo apoio, incentivo, preocupação e compreensão da minha ausência.

Ao meu noivo Bruno por todo o incentivo, estímulo, paciência e compreensão. Por ter abdicado, juntamente comigo, de diversos feriados e finais de semana para me ajudar com os experimentos no laboratório e por entender que por diversas vezes não pude lhe dar a devida atenção. Sem a sua ajuda e compreensão tudo teria sido muito mais difícil.

À empresa Starcolor Proteção e Decoração de Alumínio, representada por seus sócios proprietários Sr. Luiz Carlos Furtado Neves e Luiz Carlos Furtado Neves Júnior por oportunizarem a flexibilização dos horários de trabalho, assim como períodos de férias fora de época e dias de folga para que eu pudesse realizar a parte experimental e escrita deste trabalho, além das palavras de incentivo e apoio durante as conversas.

Aos professores da banca examinadora e a relatora, por aceitarem o convite e pelas sugestões.

Aos proprietários da polvilharia Felipe, da região de Azambuja (SC) e ao proprietário da polvilharia Ouro Branco, da região de Santa Rosa do Sul (SC), por terem gentilmente fornecido as amostras de amido de mandioca fermentado.

“A verdadeira viagem de descobrimento não consiste em procurar novas paisagens, mas em ter novos olhos”
(Marcel Proust)

RESUMO

O polvilho azedo é considerado um amido modificado por oxidação que é obtido através da fermentação do amido de mandioca, com posterior secagem ao sol. A secagem ao sol (por incidência de radiação ultravioleta) é a responsável pela principal característica deste produto, que é a sua propriedade de expansão ao forneamento, mesmo sem conter glúten e sem a necessidade de adição de fermentos. Apesar da exposição solar ser essencial para este produto, para que apresente a propriedade de expansão, este tipo de secagem torna o polvilho azedo um produto vulnerável à presença de sujidades, além de apresentar alguns inconvenientes como: perdas de produto final, longos períodos de secagem, dependência das condições climáticas e necessidade de mão-de-obra para o revolvimento do amido fermentado, entre outros. Diante disto, o presente trabalho teve como objetivo acompanhar a secagem ao sol e em estufa convectiva do polvilho azedo, avaliando o efeito da secagem sobre as características físico-químicas e reológicas. O amido de mandioca fermentado foi seco ao sol por 1, 2, 3, 4, 5, 6 e 7 horas com secagem continuada em estufa a 45, 55 e 65 °C. As curvas de secagem para o amido fermentado mostraram períodos de taxa constante e taxa decrescente, sendo que para algumas amostras a taxa constante não foi encontrada e em algumas foi evidenciado uma fase de adaptação. O modelo matemático que melhor se ajustou aos dados experimentais da cinética de secagem do amido de mandioca fermentado obtido na Região de Santa Rosa do Sul (SC) e Azambuja (SC) foi o modelo de Page, embora outros modelos tenham mostrado bons ajustes, a equação de Page foi escolhida por ser mais simples e ter menor número de parâmetros. Para o amido fermentado obtido da polvilharia de Santa Rosa do Sul (SC), dentre os tempos de exposição solar, sem realizar o revolvimento do amido durante a secagem, foi necessário no mínimo 5 h ao sol para que o amido fermentado apresentasse expansão satisfatória em relação ao seco totalmente ao sol. Desta forma, o amido pode ser deixado ao sol por 5 h e o restante da secagem continuada em estufa a 45 ou 55 °C, não sendo recomendada a sua secagem em temperaturas superiores a 55 °C, considerando a proximidade com a temperatura de gelatinização do amido fermentado. Para o amido de mandioca cultivar Moura fermentado, proveniente da região de Azambuja, o tempo mínimo necessário de exposição solar para obter um polvilho com propriedade tecnológica semelhante ao seco totalmente ao sol, sem revolvimento foi de 3 h, enquanto que com o revolvimento foi

necessário somente 1 h ao sol com secagem continuada em estufa a 55 °C. O amido fermentado seco ao sol e em estufa convectiva apresentou elevados valores de acidez, sendo o ácido lático e butírico os principais responsáveis pela acidez. Os maiores valores de viscosidade máxima, viscosidade mínima e viscosidade no resfriamento foram encontrados no polvilho seco totalmente ao sol pelo método tradicional, no entanto, a viscosidade não apresenta relação direta com a expansão, a principal propriedade do polvilho azedo. As isotermas de adsorção de umidade do amido de mandioca fermentado apresentaram forma sigmoide do tipo II. Os modelos de Oswin e GAB foram os que melhor se ajustaram aos dados experimentais de umidade de equilíbrio versus atividade de água.

Palavras-chave: Polvilho azedo; amido fermentado; secagem; expansão, isotermas de sorção.

ABSTRACT

The sour cassava starch is considered a starch modified by oxidation, which is obtained by fermentation of cassava starch, with subsequent drying in the sun. Sun drying (ultraviolet radiation) is responsible for the main feature of this product that is its expansion property in oven, even without the presence of gluten and the use of leavening. Although sun exposure is essential for this product to present the expansion property, this type of drying makes the sour cassava starch very vulnerable to dross and dirt particles, and presents some drawbacks as final product losses, long periods of drying, dependence on climatic conditions and the need for hand labor for tilling the fermented starch, among others. Thus, the present study aimed to study the drying of dry cassava starch in the sun and convective oven, evaluating the effect of drying protocol on the physico-chemical and rheological characteristics. The fermented cassava starch was dried in the sun for 1, 2, 3, 4, 5, 6 and 7 hours, followed by continuous oven drying at 45, 55 and 65 ° C. The drying curves for the fermented starch presented constant-rate and falling-rate periods, and for some samples the constant rate was found, while an adaptation phase of was evidenced. The mathematical model that best fit the experimental data from fermented cassava starch drying kinetics obtained in the region of Santa Rosa do Sul (SC) and Azambuja (SC) was the Page model. Although other models have shown good fit, Page equation was chosen, due to its simplicity and smaller number of parameters. For the fermented starch from Santa Rosa do Sul (SC) producing plant, it was necessary at least 5 hours in the sun for the fermented starch present satisfactory expansion when compared to the starch dried completely in the sun. Thus, the starch may be left in the sun for 5 h, followed by continuous oven drying at 45 or 55 ° C, while it is not recommended drying at temperatures above 55 ° C, considering the proximity to the starch gelatinization temperature. For sour cassava starch Moura from Azambuja region, the minimum required time in the sun to get a starch with characteristics similar to that dried only in the sun, without revolving, was 3 hours. With the revolving only 1 h of sun drying was necessary, followed by oven drying at 55 ° C. The fermented starch dried in the sun, and in convective oven showed high acidity values, due to the presence of lactic acid and butyric acid. The highest values for maximum viscosity, minimum viscosity and viscosity on cooling were found in the starch flour dried only in the sun by the traditional method. However, the viscosity does not have direct relation

with the expansion, the main property of sour cassava starch. The moisture adsorption isotherms of fermented cassava starch had the sigmoid shape of the type II. The models of Oswin and GAB were the best fit to the experimental equilibrium moisture data versus water activity.

Keywords: Sour cassava starch; fermented starch; drying; expansion; sorption isotherms.

LISTA DE FIGURAS

Capítulo 1

Figura 1	Fluxograma sintético de produção do amido de mandioca.....	42
Figura 2	Estrutura química da (A) amilose e da (B) amilopectina.....	45
Figura 3	Microscopia eletrônica de varredura do amido de mandioca fermentado (C) obtido em laboratório e seco em estufa, (D) seco ao sol e (E) polvilho azedo de referência.....	48
Figura 4	Cenário estimativo do mecanismo de modificação química do polvilho azedo.....	50
Figura 5	Exemplos de tanques de fermentação do amido de mandioca.....	51
Figura 6	Secagem do polvilho azedo: (A) sobre jirau, (B) em piso acimentado com proteção de plataforma móvel (barcaças).....	55
Figura 7	Efeito da atividade de água nas alterações microbianas, enzimáticas e químicas nos alimentos.....	64
Figura 8	Isotermas típicas de sorção de umidade em um alimento.....	66
Figura 9	Classificação IUPAC para as isotermas de adsorção gasosa.....	67
Figura 10	Curvas de secagem típicas em condições constantes de secagem. Ilustração das regiões de taxa constante e período de taxa decrescente de secagem. A) Umidade em função do tempo de secagem. B) Taxa de secagem em função da umidade.....	71

Capítulo 2

Figura 1	Precipitação e temperaturas médias máximas e mínimas da cidade de Santa Rosa do Sul (SC), nos últimos 30 anos.....	99
Figura 2	Secagem ao sol das amostras de amido de mandioca fermentado.....	101
Figura 3	Cinética de secagem do amido de mandioca	

	fermentado seco totalmente ao sol.....106
Figura 4	Cinética de secagem do amido de mandioca fermentado exposto ao sol por diferentes tempos com secagem continuada em estufa a temperatura de 45, 55 e 65 °C.....107
Figura 5	Separação dos dados experimentais da curva de secagem do polvilho azedo realizada totalmente ao sol em duas fases.....119
Figura 6	Comparação das taxas de secagem em função da umidade para os dados experimentais da secagem do polvilho azedo, função de suavização Savitzky-Golay e modelo de duas fases.....120
Figura 7	Ajuste do modelo de Page, Midilli e Aproximação da Difusão aos dados experimentais de 1 h de exposição solar seguido da secagem do polvilho azedo a 45 °C em estufa.....133
Figura 8	Resíduos obtidos para os modelos de Page, Midilli e Aproximação da Difusão no ajuste dos modelos aos dados experimentais de secagem do amido de mandioca fermentado.....134

Capítulo 3

Figura 1	Corpos de prova produzidos com polvilho azedo submetido a diferentes tempos de secagem solar e em estufa convectiva a 45, 55 e 65 °C, sendo Sol Curva o amido de mandioca fermentado seco totalmente ao sol sem revolvimento e Sol Revol o amido de mandioca fermentado seco totalmente ao sol com revolvimento.....155
Figura 2	Efeito da secagem solar e em estufa do polvilho azedo sobre a perda de massa dos biscoitos.....156
Figura 3	Efeito da secagem solar e em estufa do polvilho azedo sobre o índice de expansão dos biscoitos..157
Figura 4	Efeito da secagem solar e em estufa do polvilho azedo sobre o volume específico dos biscoitos....158
Figura 5	Efeito da secagem solar e em estufa do polvilho azedo sobre a densidade específica dos biscoitos.159
Figura 6	Influência da acidez nas propriedades do polvilho azedo seco ao sol de 0 a 7 h e em estufa a 45 °C.166
Figura 7	Influência da acidez nas propriedades do polvilho

	azedo seco ao sol de 0 a 7 h e em estufa a 55 °C. 167
Figura 8	Influência da acidez nas propriedades do polvilho azedo seco ao sol de 0 a 7 h e em estufa a 65 °C. 167
Figura 9	Efeito do tempo de secagem ao sol e em estufa a 45°C (A), 55 °C (B) e 65 °C (C), sobre a concentração de ácido láctico no amido fermentado de mandioca (polvilho azedo).....174
Figura 10	Efeito do tempo de secagem ao sol e em estufa a 45°C (A), 55 °C (B) e 65 °C (C), sobre a concentração de ácido propiônico no amido fermentado de mandioca (polvilho azedo).....175
Figura 11	Efeito do tempo de secagem ao sol e em estufa a 45°C (A), 55 °C (B) e 65 °C (C), sobre a concentração de ácido acético no amido fermentado de mandioca (polvilho azedo).....176
Figura 12	Efeito do tempo de secagem ao sol e em estufa a 45°C (A), 55 °C (B) e 65 °C (C), sobre a concentração de ácido butírico no amido fermentado de mandioca (polvilho azedo).....177
Figura 13	Amilogramas das amostras de polvilho azedo secas ao sol e em estufa convectiva a 45 (A), 55 (B) e 65°C (C).....182
Figura 14	Efeito do tempo de secagem do polvilho azedo seco ao sol e em estufa convectiva a 45 (A), 55 (B) e 65 °C (C) sobre a viscosidade máxima.....183
Figura 15	Isotermas de adsorção de umidade para o amido de mandioca exposto por 1 h ao sol e secagem continuada em estufa a 45, 55 e 65 °C com ajustes pelo modelo de GAB e Oswin.....196
Figura 16	Resíduos dos ajustes dos modelos de GAB e Oswin para o a amido de mandioca fermentado exposto por 1 h ao sol e secagem continuada em estufa a 45, 55 e 65 °C.....196

Capítulo 4

Figura 1	Tanque de fermentação do amido de mandioca do cultivar Moura da polvilharia de Azambuja (SC).211
Figura 2	Cinética de secagem do amido de mandioca fermentado exposto ao sol por diferentes tempos com secagem continuada em estufa convectiva a 55

	°C.....	217
Figura 3	Taxa de secagem do amido de mandioca fermentados expostos ao sol por diferentes tempos com secagem continuada em estufa convectiva a 55 °C.....	220
Figura 4	Rachaduras geradas durante a secagem na superfície do amido de mandioca fermentado.....	223
Figura 5	Divisão da curva de umidade pelo tempo em uma fase linear e outra polinomial para os diferentes tempos de exposição solar do amido fermentado de mandioca (polvilho azedo).....	225
Figura 6	Comparação das taxas de secagem em função da umidade para os dados experimentais, função de suavização Savitzky- Golay e modelo de duas fases para 7 h de exposição solar do amido fermentando de mandioca (polvilho azedo).....	229
Figura 7	Comparação das taxas de secagem em função da umidade para os dados experimentais, suavizados (Savitzky- Golay) e modelo de duas fases para 5 h de exposição solar do amido de mandioca fermentado (polvilho azedo).....	229
Figura 8	Ajuste do modelo de Page, Aproximação da Difusão e Logarítmico aos dados experimentais de 1 h de exposição solar do amido de mandioca fermentado (polvilho azedo).....	232
Figura 9	Resíduos dos modelos de Page, Aproximação da Difusão e Logarítmico do ajuste dos modelos aos dados experimentais de 1 h de exposição solar do amido de mandioca fermentado (polvilho azedo).	233

Capítulo 5

Figura 1	Corpos de prova produzidos com polvilho azedo submetido a diferentes tempos de secagem solar e em estufa convectiva a 55 °C.....	252
Figura 2	Efeito da secagem solar do polvilho azedo sobre as propriedades de expansão dos biscoitos.....	253
Figura 3	Ajuste do modelo linear aos dados experimentais de acidez titulável do polvilho azedo pelo tempo de exposição ao sol.....	259
Figura 4	Amilogramas das amostras de polvilho azedo secas	

ao sol e em estufa a 55 °C sem revolvimento (A) e
revolvendo (B).....267

LISTA DE TABELAS

Capítulo 1

Tabela 1	Etapas de extração do amido de mandioca e os sistemas utilizados nas respectivas etapas.....	43
Tabela 2	Características dos diferentes comprimentos de onda do UV.....	57
Tabela 3	Trabalhos de diferentes autores sobre modificação do método convencional de obtenção do polvilho azedo.....	60
Tabela 4	Modelos de ampla utilização na literatura para ajuste de isoterma de sorção.....	69
Tabela 5	Modelos matemáticos aplicados ao processo de secagem.....	75

Capítulo 2

Tabela 1	Modelos matemáticos aplicados às curvas secagem.....	103
Tabela 2	- Parâmetros dos ajustes da fase linear e decrescente para o modelo de duas fases para a secagem do amido fermentado de mandioca (polvilho azedo).....	115
Tabela 3	Valores aproximados de umidade crítica e tempo para atingi-las, para o amido de mandioca fermentado seco ao sol e em estufa convectiva, nas diferentes temperaturas de secagem.....	122
Tabela 4	Tempo de secagem em estufa convectiva a 45, 55 e 65 °C, para o amido fermentado de mandioca atingir umidade inferior a 14 %.....	123
Tabela 5	Valores obtidos dos coeficientes de regressão (R^2), qui-quadrado reduzido (χ^2) e raiz quadrada média do erro (RQME), para os modelos de Lewis (1), Page (2), Henderson e Pabis (3), Wang e Singh (4), Midilli (5), Aproximação da Difusão (6) e Logarítmico (7) ajustados aos dados experimentais de secagem do polvilho azedo a 45, 55 e 65 °C.....	124
Tabela 6	Parâmetros obtidos para os modelos de Lewis, Page, Henderson e Pabis e Wang e Singh em cada	

experimento de secagem do polvilho azedo, exposto por diferentes tempos ao sol com secagem continuada em estufa convectiva a 45, 55 e 65 °C.....129

Tabela 7	Valores estimados para os parâmetros dos modelos de Midilli, Aproximação da Difusão e Logarítmico em cada experimento de secagem do polvilho azedo, exposto por diferentes tempos ao sol com secagem continuada em estufa convectiva a 45, 55 e 65 °C.....132
----------	---

Capítulo 3

Tabela 1	Condições experimentais de secagem ao sol e em estufa convectiva do amido de mandioca fermentado.....147
Tabela 2	Umidades relativas das soluções saturadas de sais a 25 °C.....151
Tabela 3	Modelos matemáticos ajustados aos dados experimentais de isoterma de sorção do amido de mandioca fermentado obtido nas diferentes condições de secagem.....152
Tabela 4	Resultados de pH e acidez das amostras de polvilho azedo secas ao sol e em estufa convectiva a 45, 55 e 65 °C.....165
Tabela 5	Ácidos orgânicos em amostras de polvilho azedo secas ao sol e em estufa convectiva a 45, 55 e 65 °C.....170
Tabela 6	Propriedades viscoamilográficas do amido de mandioca fermentado (polvilho azedo) seco ao sol e seco em estufa convectiva a 45, 55 e 65°C, obtidas a partir de amilogramas construídos no RVA.....180
Tabela 7	Umidades de equilíbrio do amido de mandioca fermentado seco nas diferentes condições experimentais.....186
Tabela 8	Valores obtidos dos coeficientes de regressão (R^2), qui-quadrado reduzido (χ^2), raiz quadrada média do erro (RQME) e erro médio relativo (P) para o ajuste dos modelos de equilíbrio higroscópico do amido de mandioca fermentado expostos por

	diferentes tempos ao sol e seco em estufa em diferentes temperaturas.....	190
Tabela 9	Parâmetros dos modelos de equilíbrio higroscópico do amido de mandioca fermentado expostos por diferentes tempos ao sol e seco em estufa em diferentes temperaturas.....	192

Capítulo 4

Tabela 1	Modelos matemáticos aplicados as curvas secagem de amido de mandioca fermentado (polvilho azedo).....	214
Tabela 2	Umidade inicial do amido de mandioca fermentado após os diferentes tempos de exposição solar, e o tempo que cada amostra levou para atingir a umidade de 14 %.....	217
Tabela 3	Parâmetros dos ajustes da fase linear e decrescente para o modelo de duas fases para a secagem do amido fermentado de mandioca (polvilho azedo).....	228
Tabela 4	Valores obtidos dos coeficientes de regressão (R^2), qui-quadrado reduzido (χ^2) e raiz quadrada média do erro (RQME), para os modelos Lewis (1), Page (2), Henderson e Pabis (3), Wang e Singh (4), Midilli (5), Aproximação da Difusão (6) e Logarítmico (7) durante a secagem dos diversos tempos de exposição solar do amido de mandioca fermentado (polvilho azedo).....	231
Tabela 5	Valores estimados dos parâmetros para os modelos de Lewis, Page, Henderson e Pabis e Wang e Singh em cada experimento de secagem do amido fermentado de mandioca exposto por diferentes tempos ao sol.....	234
Tabela 6	Valores estimados dos parâmetros para os modelos de Midilli, Aproximação da Difusão e Logarítmico em cada experimento de secagem do amido de mandioca fermentado exposto por diferentes tempos ao sol.....	235

Capítulo 5

Tabela 1	pH e acidez titulável do amido de mandioca	
----------	--	--

	fermentado seco nas diferentes condições de secagem.....	257
Tabela 2	Ácidos orgânicos das amostras de polvilho azedo que apresentaram maior e menor volume específico de biscoito em diferentes condições de secagem.....	261
Tabela 3	Propriedades viscoamilográficas do amido de mandioca fermentado (polvilho azedo) seco ao sol e seco em estufa convectiva a 55 °C, obtidas a partir de amilogramas construídos no RVA.....	265

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANVISA	Agência Nacional de Vigilância Sanitária
A_w	Atividade de água
BAL	Bactérias ácido- láticas
BET	Brunauer, Emmett e Teller
b.s.	Base seca
CLAE	Cromatografia líquida de alta eficiência
CNNPA	Comissão Nacional de Normas e Padrões para Alimentos
CO ₂	Dióxido de carbono
DBO	Demanda Bioquímica de Oxigênio
DQM	Desvio quadrático médio
DSC	Calorimetria exploratória diferencial
f	Fugacidade
f_o	Fugacidade da água pura
H ₂	Hidrogênio gasoso
HCl	Ácido clorídrico
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
MAPA	Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento
min	Minuto (s)
mL	Mililitro (s)
nm	Nanômetro
OMS	Organização Mundial de Saúde
p	Pressão de vapor da solução

p_0	Pressão de vapor da água pura
pH	Potencial hidrogeniônico
PTFE	politetrafluoretileno
SC	Santa Catarina
t	Tonelada
R	Taxa de secagem
R^2	Coefficiente de determinação
RVA	<i>Rapid Visco Analyser</i>
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina
UR	Umidade relativa
UV	Ultravioleta
X	Umidade
χ^2	Qui-quadrado reduzido

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO.....	33
CAPÍTULO 1 - Revisão Bibliográfica.....	37
1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	39
1.1 Mandioca (<i>Manihot esculenta</i> Crantz).....	39
1.2 Amido de mandioca.....	40
1.2.1 Estrutura e características dos grânulos de amido.....	44
1.3 Amido de mandioca fermentado (polvilho azedo).....	46
1.3.1 Processo de produção do polvilho azedo.....	51
1.3.2 Processo de fermentação do amido de mandioca.....	52
1.3.3 Secagem do amido de mandioca fermentado.....	55
1.3.4 Propriedade de expansão do polvilho azedo.....	58
1.4 Água nos alimentos.....	62
1.5 Atividade de água.....	62
1.6 Isotermas de sorção.....	65
1.7 Secagem.....	69
REFERÊNCIAS.....	76
CAPÍTULO 2 – Secagem ao sol e em estufa convectiva do amido de mandioca fermentado.....	95
1 INTRODUÇÃO.....	97
2 MATERIAL E MÉTODOS.....	99
2.1 Material.....	99
2.2 Método.....	100
2.2.1 Exposição solar e secagem em estufa convectiva.....	100
2.2.2 Cinética e modelagem matemática da secagem.....	101
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	104
4 CONCLUSÃO.....	135
REFERÊNCIAS.....	135
CAPÍTULO 3 - Influência do tempo de exposição solar e da temperatura de secagem sobre as características do amido fermentado de mandioca.....	143
1 INTRODUÇÃO.....	145
2 MATERIAL E MÉTODOS.....	146
2.1 Material.....	146
2.2 Método.....	147
2.2.1 Secagem.....	147
2.2.2 Propriedade de expansão.....	148
2.2.3 Acidez titulável e pH.....	149
2.2.4 Determinação de ácidos orgânicos por CLAE.....	149
2.2.5 Propriedades da pasta.....	150

2.2.6	Isotermas de sorção.....	150
2.2.6.1	Modelagem matemática das isotermas de sorção.....	151
2.2.7	Análise estatística.....	153
3	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	153
3.1	Propriedade de expansão.....	154
3.2	pH e acidez titulável.....	163
3.3	Ácidos orgânicos.....	168
3.4	Propriedades de pasta.....	178
3.5	Isotermas de sorção.....	185
4	CONCLUSÃO.....	197
	REFERÊNCIAS.....	198
	CAPÍTULO 4 - Secagem do amido de mandioca do cultivar Moura fermentado.....	207
1	INTRODUÇÃO.....	209
2	MATERIAL E MÉTODOS.....	210
2.1	Material.....	210
2.2	Método.....	211
2.2.1	Exposição solar e secagem em estufa convectiva.....	211
2.2.2	Cinética e modelagem matemática da secagem.....	212
3	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	216
4	CONCLUSÃO.....	236
	REFERÊNCIAS.....	237
	CAPÍTULO 5 - Efeito do revolvimento durante a secagem ao sol do amido de mandioca do cultivar Moura fermentado.....	243
1	INTRODUÇÃO.....	245
2	MATERIAL E MÉTODOS.....	246
2.1	Material.....	246
2.2	Método.....	247
2.2.1	Exposição solar e secagem em estufa convectiva.....	247
2.2.2	Propriedades de expansão.....	248
2.2.3	Acidez titulável e pH.....	248
2.2.4	Determinação de ácidos orgânicos por CLAE.....	249
2.2.5	Propriedades da pasta.....	250
2.2.7	Análise estatística.....	250
3	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	250
3.1	Propriedade de expansão.....	250
3.2	pH e acidez titulável.....	256
3.3	Ácidos orgânicos.....	259
3.4	Propriedades de pasta.....	264
4	CONCLUSÃO.....	269
	REFERÊNCIAS.....	270

CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	277
APÊNDICE.....	281
APÊNDICE A - Curvas de taxa de secagem em função da umidade, para os dados experimentais, dados suavizados e obtidos pelo modelo de duas fases.....	283
APÊNDICE B - Ajuste do modelo de Page, Midilli e Aproximação da Difusão aos dados experimentais para a secagem do polvilho azedo.....	293
APÊNDICE C - Resíduos dos modelos de Page, Midilli e Aproximação da Difusão.....	303
APÊNDICE D - Tabela - Resultados das propriedades de expansão dos biscoitos produzidos com polvilho azedo seco ao sol e em estufa a 45, 55 e 65°C.....	313
APÊNDICE E - Isotermas de adsorção de umidade para o amido de mandioca fermentado exposto por diferentes tempos ao sol e secagem continuada em estufa a 45, 55 e 65 °C com ajustes pelo modelo de GAB e Oswin.....	315
APÊNDICE F - Resíduos dos ajustes dos modelos de GAB e Oswin para o amido de mandioca fermentado exposto por diferentes tempos ao sol e secagem continuada em estufa a 45, 55 e 65 °C.....	319
APÊNDICE G - Comparação das taxas de secagem em função da umidade para os dados experimentais, função de suavização Savitzky-Golay e modelo de duas fases para o amido fermentando de mandioca cultivar Moura (polvilho azedo) exposto por diferentes tempos ao sol.....	323
APÊNDICE H - Ajuste do modelo de Page, Aproximação da Difusão e Logarítmico aos dados experimentais de secagem do amido de mandioca fermentado (polvilho azedo) exposto por diferentes tempos ao sol com secagem continuada em estufa convectiva a 55 °C.....	327
APÊNDICE I - Resíduos dos modelos de Page, Aproximação da Difusão e Logarítmico.....	331
APÊNDICE J - Tabela - Resultados de expansão dos biscoitos obtidos do polvilho do cultivar de mandioca Moura seco a 55 °C, com e sem revolvimento quando exposto ao sol.....	335

INTRODUÇÃO

A mandioca é cultivada em todo o território nacional, tanto para o consumo animal, quanto para o consumo humano na sua forma *in natura* e para a produção de farinha e féculas, participando com 15 % da produção mundial. Assim como o Brasil, alguns países da América do Sul, tais como Argentina, Colômbia e Equador, produzem o amido fermentado de mandioca, popularmente conhecido como polvilho azedo (APLEVICZ; DEMIATE, 2007).

Este amido fermentado é obtido pela fermentação natural do amido de mandioca e secagem ao sol, apresentando características diferenciadas do polvilho doce (amido de mandioca) (MAEDA; CEREDA, 2001; APLEVICZ; DEMIATE, 2007). A fermentação e a secagem ao sol conferem ao polvilho azedo a sua característica mais importante, que é a expansão ao forneamento, sem necessidade de adição de fermento químico ou biológico, que tem sua principal aplicação na panificação.

Após a fermentação, o amido de mandioca fermentado é seco ao sol, geralmente sobre jiraus forrados com tecido de algodão ou lona plástica, com exposição direta ao sol, por aproximadamente oito horas ou até que atinja umidade de 13 a 14 % (MARDER et al., 1996; DINIZ, 2006; CEREDA, 2007). A necessidade de secagem ao sol faz do polvilho azedo um produto vulnerável às sujidades como poeira e material arenoso ou terroso, principalmente quando seco em locais sem pavimentação ou próximo a estradas.

Os maiores inconvenientes da secagem ao sol são o espaço requerido, além de grande mão-de-obra para revolver o amido. Com ação dos ventos fortes, também se tem perdas de produto, assim como maior contaminação. Há, ainda, a necessidade de grande desprendimento de tempo para completar a secagem, que pode variar com as condições climáticas (DEMIATE et al., 2000; DIAS et al., 2011).

Apesar de o polvilho azedo vir ganhando maior destaque entre os consumidores, por ser um produto isento de glúten, enfrenta grandes problemas com relação ao desenvolvimento do setor, sendo composto principalmente por pequenas e médias empresas de origem familiar que necessitam de incentivo e estudos para padronização e melhorias no processo.

Por esta razão, atualmente, o polvilho azedo vem perdendo espaço no mercado para amidos modificados por ácido e amido oxidado, que apesar de não apresentarem as mesmas características sensoriais do amido de mandioca fermentado, apresentam certa expansão. Neste contexto, o polvilho azedo é um produto fabricado de maneira artesanal (MAEDA; CEREDA, 2001), mesmo quando obtido em fecularias modernas, e para que possa ganhar lugar no mercado necessita de uniformização da qualidade, voltada principalmente para a expansão, e melhorias na higiene da produção.

Vários estudos têm sido realizados com o intuito de substituir a fermentação e secagem ao sol por modificação fotoquímica, buscando condições de obtenção de um amido modificado que apresente propriedades semelhantes às do polvilho azedo tradicional (DUFOUR et al., 1996; BERTOLINI; MESTRES; COLONNA, 2000; GARCIA; LEONEL, 2005; VATANASUCHART et al., 2005; DIAS et al., 2007; SANTOS; SARTORI; CABELLO, 2012), entretanto a utilização de modificação fotoquímica com luz UV ainda é uma realidade distante dos produtores nacionais e de outros países, pois necessitaria de investimentos do qual este setor não tem condições de fazer.

Visando apoiar às polvilharias, alguns autores têm desenvolvido trabalhos com o objetivo de reduzir o tempo de secagem ao sol (MESTRES; ROUAU, 1997; PLATA-OVIEDO, 1998; POLA JÚNIOR; 2013), como uma alternativa de incentivo aos pequenos e médios produtores, sem necessidade de grandes investimentos para o processo produtivo. Entretanto, não há estudos publicados sobre os fenômenos de transferência de massa e calor que ocorrem durante a secagem do amido de mandioca fermentado, não existindo publicações sobre curvas de secagem deste produto que subsidiariam o desenvolvimento tecnológico para este setor produtivo.

Diante do exposto, o presente trabalho teve como objetivo avaliar o efeito da secagem combinada pela exposição solar e a secagem convectiva sobre as características físico-químicas e reológicas do polvilho azedo. Os resultados positivos deste estudo podem representar uma oportunidade de melhoria para as pequenas agroindústrias familiares que caracterizam o setor.

Sendo assim, os objetivos específicos foram:

- Construir curvas de secagem do polvilho azedo em estufa a diferentes temperaturas, e exposto por diferentes tempos ao sol.
- Ajustar modelos matemáticos de secagem aos dados experimentais.

- Determinar as isotermas de adsorção do polvilho azedo, exposto ao sol e seco em estufa em diferentes temperaturas.
- Ajustar modelos matemáticos aos dados experimentais de adsorção de umidade.
- Avaliar o efeito do tempo de exposição solar sobre as características físico-químicas e reológicas do polvilho azedo.
- Comparar as características físico-químicas e reológicas das amostras obtidas em diferentes tempos de exposição solar ao método tradicional de secagem do polvilho azedo.
- Propor uma redução no tempo de exposição do polvilho azedo ao sol.

Desta forma, este trabalho foi estruturado em capítulos conforme organograma:

INTRODUÇÃO	<p>Trata dos principais assuntos abordados neste trabalho, sendo eles: estrutura e característica dos grânulos de amido, amido de mandioca fermentado (polvilho azedo), processo de produção do polvilho azedo (processo de fermentação do amido de mandioca, secagem do amido de mandioca fermentado e propriedade de expansão do polvilho azedo), água nos alimentos, isotermias de sorção e secagem.</p>
CAPÍTULO 1 – Revisão Bibliográfica	<p>Objetivo: analisar o comportamento da secagem convectiva do amido de mandioca fermentado exposto por diferentes tempos ao sol com secagem continuada em estufa convectiva em temperaturas distintas, além de selecionar um modelo que melhor represente o comportamento dos dados experimentais de secagem por meio de métodos estatísticos.</p>
CAPÍTULO 2 – Secagem ao sol e em estufa convectiva do amido de mandioca	<p>Objetivo: verificar a influência do tempo de exposição solar sobre as características físico-químicas e reológicas e, construir as isotermias de adsorção de umidade do amido de mandioca fermentado para diferentes condições experimentais de secagem.</p>
CAPÍTULO 3 – Influência do tempo de exposição solar e da temperatura de secagem sobre as características do amido de mandioca fermentado	<p>Objetivo: estudar a cinética de secagem convectiva a 55 °C, do amido de mandioca do cultivar Moura fermentado e exposto por diferentes tempos ao sol, selecionando um modelo que melhor se ajustasse aos dados experimentais de secagem.</p>
CAPÍTULO 4 – Secagem do amido de mandioca do cultivar Moura fermentado	<p>Objetivo: verificar a influência do revolvimento e do tempo de exposição solar sobre as características físico-químicas e reológicas do amido de mandioca do cultivar Moura fermentado.</p>
CAPÍTULO 5 – Efeito do revolvimento durante a secagem ao sol sobre as características do amido de mandioca fermentado	CONSIDERAÇÕES FINAIS

CAPÍTULO 1
REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

1.1 Mandioca (*Manihot esculenta* Crantz)

A mandioca (*Manihot esculenta* Crantz) é uma planta perene, arbustiva, pertencente à família das Euforbiáceas. A parte mais importante da planta é a raiz rica em amido, sendo utilizada na alimentação humana e animal ou como matéria prima para diversas indústrias. Originária do continente americano, provavelmente do Brasil, a mandioca já era cultivada pelos índios, por ocasião da descoberta do país (OLSEN; SCHAAL, 1999; FILHO; BAHIA, 2012).

No cenário mundial, o continente africano lidera como maior produtor de mandioca, seguido pela Ásia e América do Sul. No continente africano, o país que mais produz mandioca é a Nigéria, enquanto que na Ásia os maiores produtores são Indonésia e Tailândia. Na América do Sul, o maior representante da produção de mandioca é o Brasil, com 24 milhões de toneladas de raízes produzidas no ano de 2015 (FAO, 2015).

Na África, segundo a FAO (2010), a mandioca representa a principal fonte alimentícia para cerca de 60 % da população, predominando o cozimento doméstico. Outra forma de consumo é a farinha, embora em menor quantidade, devido ao fato de alguns países africanos não possuírem farinhas.

Já na Ásia, ao contrário da África, a produção de mandioca é destinada basicamente para as grandes indústrias de fécula e transformação em “pellets” (FAO, 2015).

No Brasil a cultura de mandioca é explorada em duas modalidades, os cultivos destinados à subsistência e ao consumo animal (pequenas lavouras) e as lavouras comerciais com grandes extensões, cujo consumo principal são as fecularias ou as farinhas. Existem ainda pequenas unidades, geralmente familiares, de goma ou de polvilho azedo, onde o processo de produção é artesanal, inclusive a secagem do produto final ainda é realizada em áreas próximas às residências (GROXKO, 2014).

O cultivo da mandioca está presente em todos os estados brasileiros, porém sua concentração foi maior na Região Nordeste na safra de 2013/2014, e na safra de 2014/2015 caiu para o segundo lugar participando com valores de 25,6 % da produção nacional, ficando a Região Norte em primeiro com 35,0 %. A Região Norte também se caracteriza como importante produtor e consumidor dos produtos de

mandioca. Já a Região Sul, além de importante produtora de raiz, conta com o maior número de indústrias, principalmente as de fécula (amido de mandioca), consideradas em sua maioria de médio e grande porte (FAO, 2010).

Na safra de 2014/2015, o Pará foi o maior estado produtor nacional de mandioca, sendo responsável por 5,426 milhões de toneladas de raiz, ou seja, 22,7 % da produção nacional. Na sequência, o Paraná com produção de 4 milhões toneladas, equivalente a 16 % da produção brasileira, seguido da Bahia com 2,096 milhões de toneladas, representando 8,7 % do total nacional (FAO, 2015).

Na Região Sul do Brasil, o estado do Paraná é o maior produtor, representando em média 70 % da produção agrícola na região. Já Santa Catarina contribuiu com 1,8 % da produção brasileira de mandioca na safra de 2014/2015, e apesar de ser considerado o estado pioneiro na produção de fécula (amido de mandioca), sua participação foi bastante reduzida, uma vez que a maioria das indústrias foi transferida para o estado do Paraná, na década de 80 (GROXKO, 2016).

A cultura da mandioca desempenha um importante papel sociocultural e econômico para o país. Apesar da importância, a mandioca enfrenta alguns obstáculos, como baixa produtividade, devido às práticas tradicionais de cultivo e em relação a sua conservação, pois quando armazenada em condições ambientais, possui uma vida útil muito restrita, devido à sua perecibilidade. O processo deteriorativo de caráter fisiológico inicia-se durante as primeiras 48 horas após a colheita, levando a perdas qualitativas e quantitativas (CEREDA; VILPOUX, 2003).

O plantio da mandioca normalmente é feito no início da estação chuvosa, quando a umidade e o calor tornam-se elementos essenciais para a brotação e o enraizamento (MATTOS; GOMES, 2000). Não tem época definida de maturação, após oito meses já pode ser colhida, observando o teor de amido, que varia com as estações do ano ou, então, em atendimento ao mercado e compromissos com a agroindústria. Esta margem de segurança na colheita ocorre em função da mandioca poder permanecer armazenada no solo, sendo colhida com um (8 a 12 meses) ou dois ciclos (13 a 24 meses) (FONSECA JÚNIOR et al., 2002).

1.2 Amido de mandioca

Segundo a Instrução Normativa nº 23/2005- Regulamento Técnico de Identidade e Qualidade dos Produtos Amiláceos Derivados

da Raiz de Mandioca- amido refere-se aos carboidratos, característicos da raiz de mandioca, encontrado em produtos amiláceos, e o seu teor é expresso em g de amido por 100 g de produto. Esta mesma Instrução define fécula como o produto amiláceo extraído das raízes de mandioca, não fermentada, obtida por decantação, centrifugação ou outros processos tecnológicos adequados (BRASIL, 2005). No Brasil, o amido de raízes e tubérculos, como a mandioca, pode também receber a denominação de fécula, e quando extraído da mandioca e seco ao sol, sem fermentação, é conhecido como polvilho doce (AQUINO, 2015).

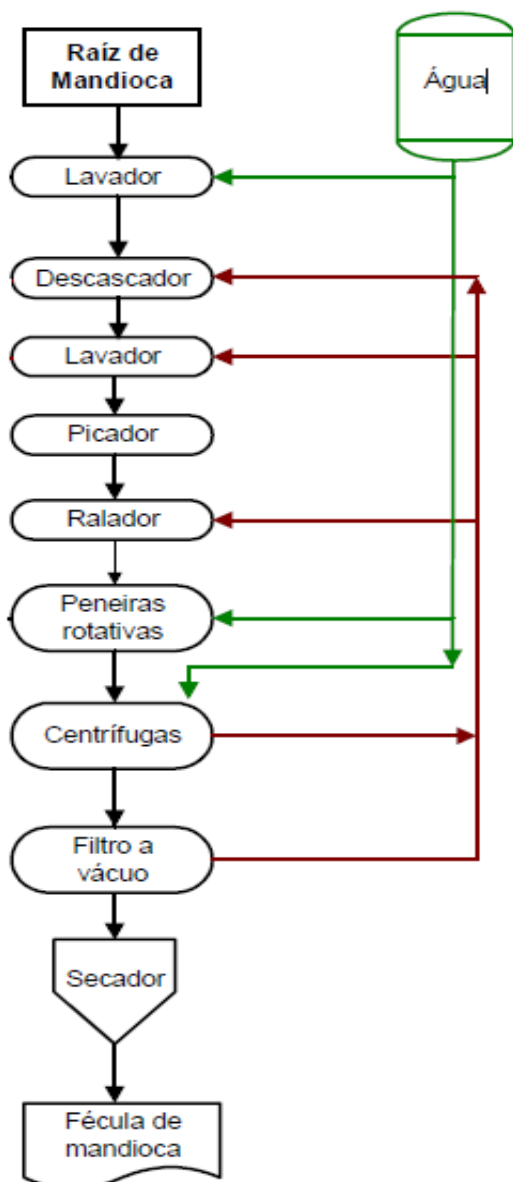
O amido é a substância de reserva das raízes de mandioca, com teores que variam entre 20 e 30 % da matéria úmida e cerca de 80 a 90 % na matéria seca (VILELLA; FERREIRA, 1987).

Segundo Lavina (1993), a matéria prima, mandioca, apresenta uma série de vantagens, se comparada a outras fontes de amido. Entre elas pode ser citada a eliminação da etapa de maceração (hidratação), muito comum nos cereais. A mandioca, devido a seu alto teor em umidade (70 %), evita a reposição de água bem como etapas de purificação de componentes proteicos e lipídicos, devido às baixas quantidades existentes destes na sua composição química.

O processo de produção do amido (Figura 1), qualquer que seja a técnica empregada, consiste na colheita ou recebimento das raízes, lavagem, descascamento, cominuição e/ ou ralação e prensagem da massa sob água corrente (PINTO, 2008).

O bagaço acumulado é eliminado e o amido é arrastado pela água e separado por decantação em tanques ou planos inclinados, ou por centrifugação. O amido de mandioca é seco em secadores de túnel ou *flash dryers* (VILELLA; FERREIRA, 1987), ou então, pode seguir para tanques de fermentação para a produção do polvilho azedo (amido fermentado).

Figura 1 - Fluxograma sintético de produção do amido de mandioca.



Fonte: Adaptado de Pinto (2008).

Em todo o Brasil, desenvolveram-se indústrias de extração de amido com vários níveis tecnológicos, desde estabelecimentos rurais, nos quais o processo é rústico, completamente manual, até os mais modernos e automatizados sistemas de centrífugas e hidrociclones. Portanto, varia quanto à qualidade, sendo que, para que o amido seja mais puro e de alto padrão, o processo deve ser o mais rápido possível, evitando ações enzimáticas de deterioração, que iniciam nas raízes e prolongam-se por todo o processo. A Tabela 1 ilustra as etapas de extração do amido de mandioca e os sistemas utilizados em cada etapa, de acordo com o tipo de indústria.

Tabela 1 - Etapas de extração do amido de mandioca e os sistemas utilizados nas respectivas etapas.

Etapas de extração	Sistemas utilizados
1. Lavagem e descascamento das raízes	a) Manual com escovas b) Lavador-descascador* c) Lavador-descascador*
2. Redução de tamanho (Ralação)	a) Raladores manuais b) Ralador-depurador c) Picador e desintegrador
3. Filtração do “leite de amido”	a) Peneiras de taquaras b) Escovadeiras e peneiras vibratórias c) Extratores- peneiras cônicas horizontais
4. Purificação do amido	a) Tanques de madeira b) Centrífuga e cancha de decantação c) Centrífuga e hidrociclone
5. Secagem	a) Ao sol, em terreiros e jiraus b) Secador de túnel c) Secador pneumático (<i>flash dryer</i>)
a) Processos rústicos	b) Pequenas e médias indústrias
	c) Grandes indústrias

*Repetido porque ambos os setores utilizam o mesmo sistema, operando na mesma escala.

Fonte: Vilela (1989).

A produção anual de amido nativo de mandioca no Brasil cresceu 17 % em 2015 e ultrapassou 750 mil toneladas, sendo o estado de Paraná o maior produtor com 68,8 % do total, seguido de Mato Grosso do Sul e São Paulo. Já Bahia e Santa Catarina representam 0,6 e 0,3 %, respectivamente, do total nacional (CENTRO DE ESTUDOS AVANÇADOS EM ECONOMIA APLICADA, 2016).

Como a produção brasileira de amido destina-se basicamente ao mercado interno com mais de 95 %, fica evidente a crescente demanda durante os últimos anos, uma vez que o volume produzido passou de 170 mil toneladas em 1990 (GROXKO, 2014) para 750 mil toneladas em 2015, enquanto que o consumo do amido no país foi de 739,53 mil toneladas, inferior ao total produzido neste mesmo ano (CENTRO DE ESTUDOS AVANÇADOS EM ECONOMIA APLICADA, 2016).

As vendas de amido de mandioca para os segmentos de massas, biscoito e panificação cresceram 17,9 % em 2015. Mesmo representando comercialização de 19,1 % da produção nacional, as vendas de amido ao segmento atacadista caíram 10,3 %. Para a indústria de papel e papelão, as vendas diminuíram 12,3 %, representando 16,5 %. As negociações entre fecularias cresceram 51,2 % entre 2014 e 2015 (correspondendo a 12,4 % das vendas totais), superando a quantidade vendida aos frigoríficos, de 12,3 %. Para o segmento de tapioca semi-pronta, as fecularias comercializaram 5,8 % do total produzido em 2015. Com poucas empresas atuando no mercado, o segmento varejista representou apenas 3,6 % das vendas totais no período. As indústrias química, têxtil e exportação representaram respectivamente 2,7, 1,9 e 0,3 % das vendas das fecularias (GROXKO, 2016).

1.2.1 Estrutura e características dos grânulos de amido

O amido é formado nos plastídeos das plantas superiores e sintetizado nas folhas, onde serve como carboidrato de reserva temporário, acumulando-se nos cloroplastos durante o dia e servindo como fonte principal para a síntese de sacarose citosólica durante a noite. Essa sacarose é então transportada para os órgãos de armazenamento das plantas, como sementes, frutas tubérculos e raízes (TESTER; KARKALAS, 2004; VANDEPUTTE; DELCOUR, 2004).

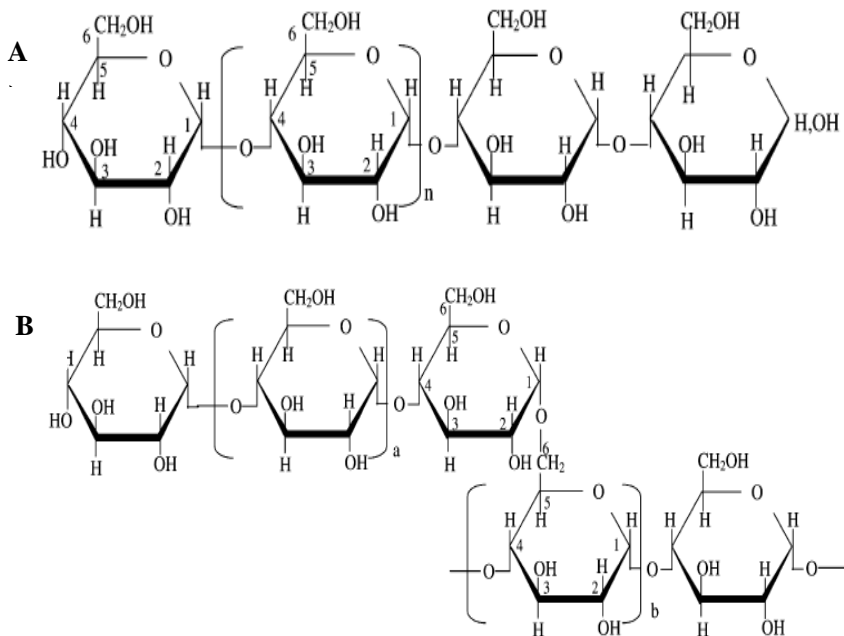
Embora a forma e o tamanho dos grânulos de amido nativo sejam distintos entre as espécies vegetais, os grânulos são organizados em zonas cristalinas alternadas por outras semicristalinas devido à alternância dos períodos de síntese ocorridos nos amiloplastos. A

cristalinidade dos amidos varia entre 15 a 45 % (GALLANT; BOUCHET; BALDWIN, 1997).

Por estar ligado ao desenvolvimento da planta, a estrutura do amido está também intimamente relacionada às condições agrônomicas do local em que se dá o cultivo. Alterações de clima, como tempo e chuva podem influenciar na formação do grânulo e na deposição do amido. Esses fatores, por sua vez, podem interferir sobre o tamanho e a formação do grânulo de amido (DAIUTO; CEREDA, 2004).

Estruturalmente, o amido é um homopolissacarídeo composto por cadeias de amilose e amilopectina (Figura 2). A amilose é formada por unidades de glicose unidas por ligações glicosídicas α -(1, 4), originando uma cadeia linear, podendo apresentar pequenas ramificações (RIBEIRO; SERAVALLI, 2004; LIU, 2005). Já a amilopectina é formada por unidades de glicose unidas em α -(1, 4) e com pontos de ramificações α -(1,6), formando uma estrutura ramificada (WALTER; SILVA; EMANUELLI, 2005).

Figura 2 - Estrutura química da (A) amilose e da (B) amilopectina.



Fonte: Denardin e Silva (2009).

Em amidos nativos, as moléculas de amilose, amilopectina e uma limitada quantidade de água estão organizadas em micelas, em uma estrutura microscópica estável e morfologicamente esclarecida, chamada grânulo. A fusão ou rompimento de tal estrutura é um pré-requisito para a utilização de seus polímeros (ZOBEL; STEPHEN, 1995).

Biliaderis (1992) afirma que as regiões cristalinas do amido mantêm a estrutura do grânulo, controlam o seu comportamento na presença de água e os tornam mais ou menos resistentes aos ataques químicos e enzimáticos. A região amorfa dos grânulos de amido é menos densa e, portanto, mais susceptível ao ataque enzimático e absorve mais água em temperaturas abaixo da temperatura de gelatinização. Não existe uma demarcação entre as regiões amorfas e cristalinas, o que existe são evidências de uma estrutura supramolecular onde as fases amorfas e cristalinas são interdependentes.

A amilopectina tem um papel principal na cristalinidade dos grânulos de amido. Altas temperaturas têm sido relatadas como resultados do alto grau de cristalinidade, que fornece estabilidade estrutural aos grânulos e maior resistência a gelatinização. Assim a presença de amilose abaixa o ponto de fusão das regiões cristalinas e a energia para iniciar a gelatinização, pois as longas cadeias de amilopectina requerem uma maior temperatura para dissociar completamente do que aquela requerida para cadeias mais curtas das duplas hélices (SINGH et al., 2003).

1.3 Amido de mandioca fermentado (polvilho azedo)

O polvilho azedo é um derivado do amido de mandioca, encontrado em praticamente todos os países da América do Sul. Em francês é denominado *amidon aigre*, em inglês de *sour cassava starch* e em espanhol de *almidon agrio*. É ainda um produto artesanal, mesmo quando produzido em fecularias modernas, apresentando grande heterogeneidade na qualidade (DINIZ, 2006).

O polvilho azedo é um produto típico brasileiro, muito utilizado na culinária, na indústria de alimentos e como matéria prima na fabricação de biscoitos de polvilho e pão de queijo, o qual apresenta capacidade de expansão ao forneamento sem a adição de farinha de trigo ou fermento (BALAGOPALAN, 2002; CEREDA, 2002; APLEVICZ, 2006).

O polvilho azedo é um amido modificado com temperatura de gelatinização inferior ao amido nativo de mandioca, o que explica a

possibilidade de gelatinização do amido pelo processo de escaldamento (CEREDA et al., 2000).

As principais características que diferenciam o polvilho azedo do amido de mandioca nativo, também denominado polvilho doce (seco ao sol, não fermentado) são: acidez, grau de expansão, viscosidade, claridade de pasta, sinerese e poder redutor (APLEVICZ; DEMIATE, 2007). Para Ascheri e Vilela (1995) e Ladeira e Pena (2011) as modificações ocorridas durante a fermentação são a diminuição do pH, a formação de ácidos orgânicos, o aumento da acidez titulável, o ataque de enzimas amilolíticas, o aumento do poder de inchamento e de solubilidade e a diminuição da viscosidade do amido.

Além disto, o processo fermentativo altera o grânulo de amido, conferindo ao polvilho azedo características peculiares. Além do sabor, e do aroma, as modificações ocorridas alteram sua reologia (NAKAMURA, et al., 1976; CÁRDENAS; BUCKLE, 1980; CEREDA, 1983a, 1985; ASCHERI; VILELA, 1995; PLATA-OVIEDO; CAMARGO, 1995; CARVALHO et al., 1996).

O polvilho azedo é obtido da fermentação natural do amido nativo de mandioca em tanques por 60 a 90 dias, seguido de secagem com exposição ao sol. É um processo demorado, pois necessita de tempo para o processo natural da fermentação (lática, butírica, propiônica e outras) ocorrer e de dias ensolarados para sua secagem. A secagem ao sol é responsável por uma série de transtornos que vão desde elevada contaminação com poeira até a falta de padrão entre os diferentes lotes produzidos (CEREDA; VILPOUX, 2003; MARCON, 2004).

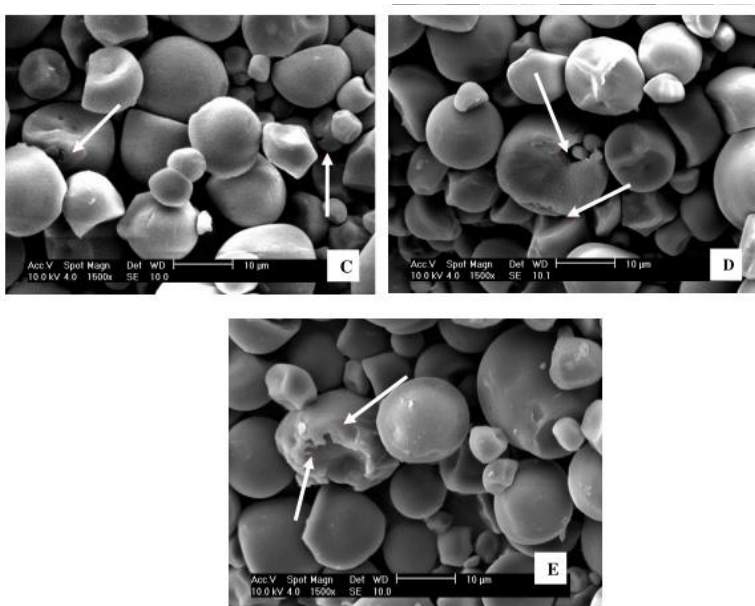
O polvilho azedo é considerado um amido modificado por oxidação adquirindo propriedades distintas do amido que lhe deu origem (LADEIRA; PENA, 2011). As principais modificações que ocorrem no amido oxidado são a oxidação dos grupos redutores a grupos carboxílicos (ABDEL-HAFIZ, 1995). A oxidação ocorre principalmente na lamela amorfa dos anéis semicristalinos dos grânulos de amido. Essa região consiste basicamente de amilose cercada por amilopectina. Diante disso, a amilose é mais susceptível à oxidação devido a essa cadeia ser mais acessível, em regiões amorfas dos grânulos (KUAKPETOON; WANG, 2001; WANG; WANG, 2003).

As condições em que se desenvolve a fermentação natural do amido de mandioca são muito especiais: o substrato é constituído exclusivamente por amido granular, como uma fonte de carbono para os micro-organismos; ocorre em meio semi-sólido devido à decantação do

amido no tanque e, conseqüentemente, condições anaeróbicas no meio, que se estabelecem nos primeiros cinco dias (DINIZ, 2006).

Cárdenas e Buckle (1980) afirmam que o polvilho azedo é um produto fermentado modificado pelo ataque de ácidos e enzimas. O ataque ácido é evidenciado pela grande produção de ácidos orgânicos durante a fermentação, e o ataque enzimático, por pequenas corrosões em alguns grânulos de amido fermentado. Esse ataque enzimático foi verificado no trabalho de Marcon (2009) por microscopia eletrônica de varredura (MEV), sendo as corrosões nos grânulos indicadas por setas na Figura 3.

Figura 3 - Microscopia eletrônica de varredura do amido de mandioca fermentado (C) obtido em laboratório e seco em estufa, (D) seco ao sol e (E) polvilho azedo de referência.



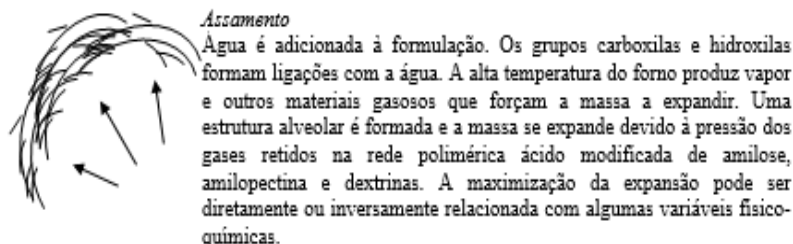
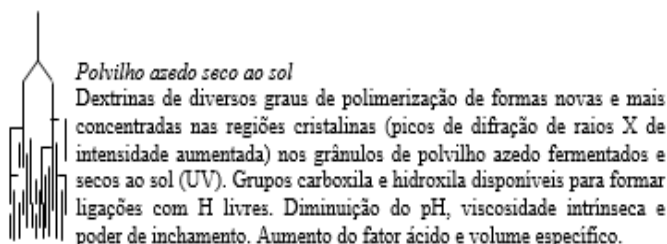
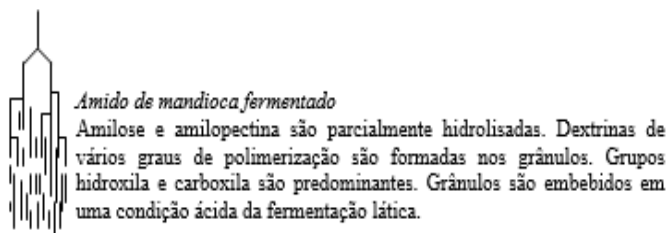
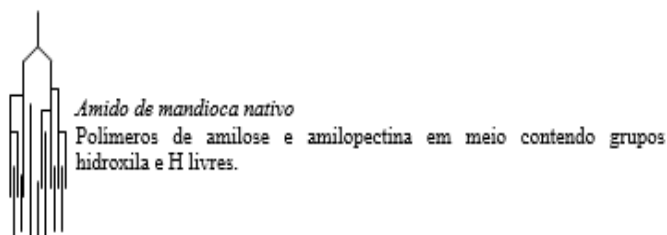
Fonte: Marcon (2009).

A legislação, por meio de Normas Técnicas Especiais Relativas a Alimentos e Bebidas, Resolução CNNPA n° 12 de 1978 (BRASIL, 1978), classificou o polvilho em doce e azedo, tendo por base apenas a acidez titulável que, deveria ser no máximo 1,0 mL de NaOH mol.L⁻¹/100 g para o amido e de 5,0 mL para polvilho azedo. Entretanto, esta

Resolução foi revogada e substituída pela Resolução RDC n° 263 de 2005 (BRASIL, 2005) que apresenta parâmetros somente para o amido de mandioca (fécula).

A principal propriedade do polvilho azedo é a expansão, atribuída às características dos grânulos do polvilho azedo, cujo mecanismo foi demonstrado por Marcon et al. (2009), conforme Figura 4.

Figura 4 - Cenário estimativo do mecanismo de modificação química do polvilho azedo.



$$\text{Max E} = f(\text{pH, VI, PI, FA, VE})$$

onde, pH: potencial hidrogeniônico ; VI: viscosidade intrínseca ; PI: poder de inchamento ; FA: fator ácido ; VE: volume específico.

Fonte: Adaptado de Marcon et al. (2009)

1.3.1 Processo de produção do polvilho azedo

As raízes de mandioca empregadas para a produção do polvilho azedo, assim como para o amido de mandioca, devem ser frescas e processadas em, no máximo, 24 horas após a colheita, contribuindo para a qualidade do produto. Alguns produtores utilizam o amido extraído durante a safra da mandioca e armazenado como matéria-prima para fermentação do amido na entressafra (CEREDA, 1987; CARVALHO et al., 1996).

Em resumo, o processo produtivo do polvilho azedo consiste no recebimento das raízes, lavagem e descascamento, fracionamento e/ou ralação e extração, quando o “leite de amido” é separado do bagaço por peneiras cônicas rotativas ou peneiras planas vibratórias, sob corrente de água (MARCON et al., 2007).

Após a etapa de purificação, o amido é transferido para os planos de decantação (chicanas) ou diretamente para os tanques de fermentação (Figura 5). O amido deve permanecer nos tanques de fermentação sob uma camada de água em torno de 20 cm, por um período que varia, de acordo com as condições climáticas, de 20 dias podendo chegar a 90 dias. O processo é considerado terminado, empiricamente com o aparecimento de espuma na superfície e bolhas persistentes que se formam no interior da massa e desprendimento de forte odor característico (MARCON et al., 2007; AQUINO, 2015).

Figura 5 - Exemplos de tanques de fermentação do amido de mandioca.



Fonte: Acervo da autora.

Na produção do polvilho azedo é marcante o empirismo empregado no julgamento do tempo adequado de fermentação. Vários estudos vêm sendo realizados, no sentido de reduzir o tempo de fermentação (MARCON, 2004). O tempo de fermentação pode ser mais longo no início da safra, podendo ser superior a 60 dias. Em algumas indústrias o tempo de fermentação é condicionado ao rodízio dos tanques, estipulando um limite de 20 a 45 dias. Outras indústrias fazem avaliação do pH do meio e outras realizam testes de produção de biscoito de polvilho (expansão) (DINIZ, 2006).

Quanto à secagem do polvilho azedo, ela é tradicionalmente realizada sob a ação do sol e do vento, colocando a massa geralmente sobre jiraus de bambu. O período de secagem varia de acordo com as condições climáticas (DEMIATE et al., 2000).

1.3.2 Processo de fermentação do amido de mandioca

Há muito tempo a fermentação tem sido utilizada para melhorar o valor nutricional de alimentos ricos em carboidratos e de baixo teor proteico, melhorar a palatabilidade e as características de aroma (BALAGOPALAN et al., 1988).

Vários produtos da mandioca são obtidos por meio da fermentação natural, e entre eles se destacam o gari, fufu, carimã, farinha d'água, mandioca puba e o kiuunde (produto da Tanzânia) (MARCON et al., 2007).

O início da fermentação do polvilho azedo é marcado pela rápida queda na concentração de oxigênio dissolvido, que é consumido por bactérias amilolíticas aeróbias, transformando-o em CO₂, além de ácidos orgânicos como acético, butírico, láctico, propiônico e outros (DINIZ, 2006), principalmente o ácido láctico (DIAS et al., 2007). A produção do ácido láctico está associada aos micro-organismos amilolíticos e às bactérias ácido-láticas (BAL) (LACERDA et al., 2005; MARCON et al., 2007).

A fermentação natural do amido se desenvolve na presença de micro-organismos que degradam parcialmente o amido granular, por meio de enzimas, produzindo açúcares simples, que constituem o substrato. Ocorre a formação do grupo de micro-organismos produtores de ácidos orgânicos (láctico, acético, propiônico, butírico e outros) e de bolores e leveduras que produzem substâncias que conferem aroma e sabor característicos ao produto (CEREDA; LIMA, 1981; NUNES, 1994).

Alguns produtores, com o propósito de acelerar o processo fermentativo, utilizam um inóculo de polvilho da safra anterior e/ou deixam os tanques e fermentação “sujos” de uma safra para outra (SILVEIRA et al., 2000 apud MARCON et al., 2007).

Marcon et al. (2006) desenvolveram um método de fermentação, no qual é adicionada maior quantidade de água nos tanques e xarope de glicose melhorando o processo fermentativo. A adição de xarope de glicose na concentração de 0,5 % ao meio de fermentação, contribuiu para duplicar a velocidade de fermentação, passando de 40 dias (sem adição de glicose) para 20 dias (com 0,5 % de glicose).

Aquino et al. (2013) padronizaram o tempo de fermentação do polvilho azedo pela determinação da acidez e do pH da água de fermentação, e do volume específico do biscoito de polvilho, tanto para o método de fermentação tradicional quanto para o método de fermentação modificado, proposto por Marcon et al. (2006).

A fermentação natural é realizada por uma microbiota mista, que produz um aumento na acidez titulável durante o processo. A acidez total, expressa como ácido láctico, alcança valores de 0,4 a 0,53 g/100 g. O ácido láctico constitui 60 % da acidez total. Cardenas e Buckle (1980) encontraram de 66 a 82 % de ácido láctico do total do ácido produzido, o que confirma o importante papel das bactérias ácido-láticas no processo. Os demais ácidos eram ácido acético e ácido butírico.

Lactobacillus plantarum e outras bactérias ácido-láticas (BAL) têm sido reportadas como os micro-organismos predominantemente associados com a fermentação espontânea do amido da mandioca (AMPE et al., 2001). Estes micro-organismos são conhecidos por serem responsáveis pela produção de ácidos orgânicos e compostos aromáticos (LACERDA et al., 2005).

Chookietwattana (2014) obteve a concentração de 10,34 g.L⁻¹ de ácido láctico a partir de uma bactéria ácido láctica amilolítica, com sacarificação e fermentação simultânea do amido de mandioca. As condições ótimas para o *L. plantarum*, para a obtenção de ácido láctico a partir de amido de mandioca foram: pH inicial de 6,0, concentração de 6 % (m/v) de amido, e uréia como fonte de nitrogênio.

Silveira (2001) estudou a diversidade de micro-organismos presentes no processo de fermentação do amido de mandioca. Neste estudo, foi observado que o gênero *Lactobacillus* caracterizou o processo fermentativo e mostrou-se dominante com 435 isolados (49,87

%), seguidos pelos gêneros, *Streptococcus* (22,1 %), *Enterococcus* (9,6 %), *Leuconostoc* (4,3 %), *Pediococcus* (2,3 %) e *Lactococcus* (0,9 %).

Segundo Cereda et al. (1995) a microbiota responsável pela fermentação do amido, subdivide-se em três fases. A primeira fase é marcada por uma microbiota pouco exigente, dos gêneros *Escherichia*, *Alcaligenes*, *Micrococcus* e *Pseudomonas*, e rápida queda de concentração de oxigênio dissolvido. Também foi detectado *Bacillus* capaz de produzir enzima amilolítica, iniciando o ataque ao amido granular e fornecendo carbono às bactérias da segunda fase (MARCON et al., 2007).

Na segunda fase, o consumo de oxigênio propicia o desenvolvimento de micro-organismos microaerófilos, facultativos ou anaeróbios estritos, mais exigentes, produtores de ácido e gás, e responsáveis pelas fermentações lácticas, acéticas, butíricas e propiônicas, entre outras. A predominância de determinado ácido orgânico depende de vários fatores, entre eles a temperatura. Nas regiões frias, a fermentação é mais lenta e predomina a microbiota láctica; nas regiões quentes, a fermentação é mais rápida e predomina a microbiota butírica (SILVEIRA et al., 2003; LACERDA et al., 2005).

Segundo Cereda e Gaj-Levra (1987), a temperatura de 30 °C favorece a fermentação butírica com predomínio do *Clostridium butyricum*, mas em temperaturas de 12 a 20 °C a fermentação láctica é favorecida, com predomínio da microbiota láctica, principalmente *Lactobacillus*, bactérias esporulantes Gram positivas e leveduras.

Na terceira fase, aparece a microbiota contaminante, entre os quais diversas espécies de leveduras que seriam responsáveis pela formação dos compostos aromáticos (SILVEIRA et al., 2000).

Leveduras também têm sido identificadas como micro-organismos predominantes na fermentação da mandioca (OYEWOLE; ODUNFA, 1990). Segundo Oyewole (2001), leveduras parecem ter um importante papel na sobrevivência e atividade de bactérias ácido lácticas durante a fermentação do amido de mandioca. Por sua atividade amilolítica, estão envolvidas na quebra do amido da mandioca em açúcares simples, que são convertidos pelas bactérias ácido lácticas em ácidos orgânicos. Somente bactérias ácido lácticas (BAL) e leveduras parecem sobreviver à acidez encontrada nos estágios finais da fermentação submersa (OYEWOLE; ODUNFA, 1990).

Estudos sugerem que a propriedade de expansão do polvilho azedo também se deve às BAL, que produzem exopolissacarídeos formando uma estrutura viscoelástica, a qual permite a retenção de gases

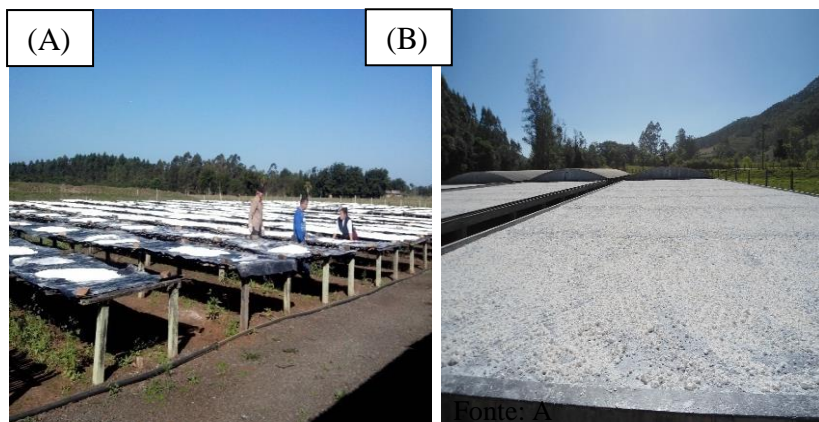
e a conseqüente expansão da massa durante o assamento (MAEDA; CEREDA, 2001).

1.3.3 Secagem do amido de mandioca fermentado

Após o processo fermentativo, o amido fermentado com aproximadamente 50 % de umidade segue para secagem ao sol, etapa indispensável para que adquira a propriedade de expansão. A secagem ocorre sobre jiraus de bambu trançado ou arames, sobre os quais são estendidos panos, plásticos ou lonas. Também pode ser seco sob sistemas de barcaças, onde o amido fermentado é acomodado no chão, sob a proteção de uma plataforma móvel que é deslocada para expor o polvilho quando há condições próprias para a secagem (POLA JÚNIOR, 2013).

Através de visitas técnicas, realizadas nas polvilharias da Região Sul de Santa Catarina foi possível verificar as condições de secagem do polvilho azedo seco ao sol nesta região, como ilustra a Figura 6.

Figura 6 - Secagem do polvilho azedo: (A) sobre jiraus, (B) em piso cimentado com proteção de plataforma móvel (barcaças).



Acervo do autor.

Um outro inconveniente com relação a secagem ao sol é o tempo necessário para que ela ocorra, já que depende de condições

climáticas, podendo variar de 7 a 16 horas, o que corresponde a um ou dois dias de secagem (DINIZ, 2006).

O método utilizado, normalmente nas polvilharias, para determinar o final da secagem é empírico, consistindo em pressionar o polvilho nas mãos até que não haja mais a formação de aglomerados (POLA JÚNIOR, 2013).

Plata Oviedo (1998) sugeriu que a reação de oxidação promovida pela ação de luz ultravioleta do sol, sobre o amido fermentado de mandioca, durante a secagem, seria um dos fenômenos responsáveis pelo desenvolvimento da propriedade de expansão, e esta tinha seu valor máximo a partir de quatro horas de exposição solar. Resultados semelhantes foram obtidos por Pola Júnior (2013), no qual o melhor resultado de expansão foi encontrado na fermentação tradicional com 4 horas de exposição à luz solar, e posterior secagem em estufa de circulação de ar a 45 °C, superando inclusive a expansão da amostra seca totalmente ao sol.

Cereda e Nunes (1989), Maeda e Cereda (2001) avaliaram a expansão ao forno de amido fermentado de mandioca colombiana após submeter as amostras aos seguintes experimentos: polvilho azedo seco à sombra, seco em estufa e seco ao sol. A habilidade de expansão ao forno ou expansibilidade do polvilho azedo seco ao sol foi duas vezes maior do que nas outras condições de secagem.

Com o intuito de substituir a secagem do polvilho azedo ao sol, devido aos inconvenientes que esta técnica de secagem traz à qualidade do produto, alguns autores têm realizado experimentos com secagem artificial utilizando irradiação UV (UVA, UVB ou UVC) (NUNES; 1994; PLATA-OVIEDO; CAMARGO, 1998; NUNES, 1999; GARCIA; LEONEL, 2005; MACHADO et al., 2012; SANTOS; SARTORI; CABELLO, 2012).

A radiação ultravioleta (UV) é a parte do espectro eletromagnético referente aos comprimentos de onda entre 100 e 400 nm. De acordo com a intensidade à qual a radiação UV é absorvida pelo oxigênio e ozônio costuma-se dividir a região UV em três intervalos (DINIZ, 2006), conforme ilustrado na Tabela 2.

Tabela 2 - Características dos diferentes comprimentos de onda do UV.

Nome	Intervalo Espectral (nm)	Características
UVC	100 – 280	Completamente absorvido pelo O ₂ e O ₃ estratosférico e, portanto, não atinge a superfície terrestre. É utilizado na esterilização de água e materiais cirúrgicos.
UVB	280 - 320	Fortemente absorvido pelo O ₃ estratosférico.
UVA	320 - 400	Sofre pouca absorção pelo O ₃ estratosférico.

Fonte: adaptado de INPE (2005) apud Diniz (2006).

Em estudos realizados por Vatanasuchart et al. (2005), apud Dias (2001) os amidos de mandioca modificados por oxidação a 1 % de ácido láctico durante 15 minutos e expostos à radiação de UVB ou de UVC durante 7, 9 e 11 h apresentaram propriedade de expansão. Segundo os autores, as moléculas de amilose e amilopectina nas regiões amorfas são despolimerizadas parcialmente pela hidrólise do ácido láctico e pela irradiação UV para moléculas de tamanho reduzido de amido, que são responsáveis pela expansão do biscoito.

Machado et al. (2012) avaliaram o comportamento do amido de mandioca seco ao sol e seco em estufa a 60 °C em radiação ultravioleta, em diferentes comprimentos de onda UVB (280- 315 nm) e UVC (100 a 280 nm). Com esta avaliação, os autores verificaram que a secagem em radiação UVB pode ser uma técnica promissora para substituição da secagem solar, com maior controle e higiene dos produtos.

Considerando a adição de ácido láctico e a radiação UV, Nunes (1999) e Plata Oviedo (1998), relataram que a combinação entre estes dois fatores no amido de mandioca, substitui a fermentação e a secagem solar, sendo essenciais para que o amido fermentado apresente propriedades de expansão. Entretanto, nenhum dos autores avaliou as propriedades sensoriais deste amido.

Dias et al. (2011) realizaram a oxidação do amido de mandioca com peróxido de hidrogênio e secagem em estufa, verificando que a expansão do amido de mandioca fermentado pode ser obtida pela secagem ao sol ou oxidação com peróxido de hidrogênio. A secagem ao sol aumentou o conteúdo de carboxilas e carbonilas, aumentou a dureza do gel, promoveu a expansão do amido de mandioca fermentado e

diminuiu a dureza do biscoito. As propriedades do amido de mandioca oxidado com peróxido de hidrogênio foram influenciadas pela concentração de oxidante, o pH e a temperatura. O maior valor de expansão foi obtido com uma concentração de peróxido de hidrogênio de 1,5 g 100 g⁻¹, pH 5,0 e 32,5 °C.

1.3.4 Propriedade de expansão do polvilho azedo

O desenvolvimento do processo de produção do polvilho azedo é importante devido às peculiares características e aplicações deste produto. Sua propriedade de expansão ao assamento dispensa a utilização de agentes que desenvolvem o crescimento da massa, além da possibilidade de utilização como substituto da farinha de trigo em diversos produtos de panificação, importante para pessoas com intolerância permanente ao glúten, conhecidas como celíacas (ALVARADO et al., 2013).

A capacidade de expansão representa a propriedade mais importante do polvilho azedo, e tem sua análise voltada à aplicação na panificação. Esta propriedade é avaliada pela elaboração de biscoitos e medição de expansão da massa que pode ser feita pela relação entre o diâmetro posterior e anterior ao assamento (índice de expansão) ou pela determinação do volume específico do biscoito por deslocamento das sementes de painço (CEREDA, 1983a; MARCON; AVANCINI; AMANTE, 2007).

Com base no volume específico, Nunes e Cereda (1994) propuseram uma classificação para o polvilho azedo, sendo considerado como:

- Pequena expansão: $\leq 5,0 \text{ mL g}^{-1}$
- Média expansão: de 5,0 a 10 mL g⁻¹
- Grande expansão: $\geq 10,0 \text{ mL g}^{-1}$.

Maeda e Cereda (2001) também propuseram um método prático para determinar a propriedade de expansão. Este método consiste em misturar 50 g de polvilho com 40 mL de água fervente, e moldar biscoitos de aproximadamente 10 g cada, realizando o assamento ao forno a 200 °C por 25 minutos. Com base nos resultados obtidos neste trabalho, propuseram também a seguinte classificação:

- Tipo A: polvilho com qualidade extra, com índice de expansão ao forno superior a 16 mL g⁻¹;

- Tipo B: polvilhos de média qualidade e que apresentam índices de expansão entre 12 mL g⁻¹ e 16 mL g⁻¹;
- Tipo C: polvilho de qualidade inferior, com índice de expansão ao forno inferior a 12,0 mL g⁻¹.

Alguns autores relacionaram o tempo de fermentação com o índice de expansão, encontrando períodos adequados para determinar o final da fermentação (PEREIRA, 1994; ASCHERI; VILELA, 1995; DUFOUR et al. 1995; AQUINO et al., 2013). Outros autores também encontraram uma relação entre a expansão do amido fermentado com o teor de amilose, sendo influenciado negativamente por ela (MESTRES et al., 2000; SHIRAI et al., 2007; ALVARADO et al., 2013).

Nunes (1994) observou que o ácido lático é um dos compostos químicos adicionados ao amido de mandioca pelo processo fermentativo na produção de polvilho azedo. A adição desse ácido ao amido de mandioca seguida de exposição à radiação ultravioleta foi responsabilizada pela promoção da propriedade de expansão.

A fermentação natural do amido de mandioca envolve essencialmente a microbiota láctica, e o ácido lático desempenha um papel importante nas características de expansão do polvilho azedo (DUFOUR, et al. 1996; MESTRES; ROUAU, 1997). Entretanto, somente a acidificação do amido não é suficiente para aumentar a expansão durante o assamento (PLATA-OVIEDO; CAMARGO, 1998).

Reações fotoquímicas envolvendo o amido (DUFOUR, et al., 1996) e a presença de grupos carboxilatos (DEMIATE et al., 2000), no amido de mandioca, foram utilizados para propor explicações para a propriedade de expansão do polvilho azedo. Diante disto, muitos métodos de secagem do polvilho azedo têm sido propostos em substituição ao método tradicional de secagem ao sol, buscando características e propriedades de expansão semelhantes ao polvilho seco ao sol (NUNES; 1994; PLATA-OVIEDO; CAMARGO, 1998; NUNES, 1999; DEMIATE; CEREDA, 2000; GARCIA; LEONEL, 2005; FRANCO et al., 2010; MACHADO et al., 2012; SANTOS; SARTORI; CABELLO, 2012), conforme ilustrado na Tabela 3.

Tabela 3 - Trabalhos de diferentes autores sobre modificação do método convencional de obtenção do polvilho azedo.

Modificação realizada	Resultados mais relevantes sobre expansão	Autor (ano)
Modificação utilizando luz UV		
Amidos de batata-doce, mandioca e taioba foram modificados fotoquimicamente pela adição de ácido láctico e exposição por 30 min em ultravioleta (UVC-254 nm).	O amido de mandioca teve um aumento na expansão, com o aumento da concentração de ácido láctico, enquanto que os amidos de batata-doce e taioba não alcançaram expansão satisfatória, comparativamente com o amido de mandioca. O ácido láctico não tem influência sobre a expansão do amido de biri.	Garcia e Leonel (2005)
Modificação do amido de mandioca com ácido láctico e luz UV e secagem final com <i>flash drier</i> piloto.	Os resultados de propriedade de expansão foram satisfatórios ($8,08 \text{ g cm}^3 \text{ g}^{-1}$), comparativamente com amidos fermentados comerciais ($12,10 \text{ g cm}^3 \text{ g}^{-1}$)	Franco et al. (2010)
Modificação do amido de mandioca por processo de oxidação com ácido láctico e exposição à radiação UV.	O aumento da concentração de ácido láctico não resultou em aumento no volume específico das amostras. O ácido láctico e a exposição UV provocaram alterações nas características do amido de mandioca nativo, mas não há relação entre os grupos carboxila com a expansão, contrário aos estudos de Shirai et al. (2007) que atribuíram o aparecimento do grupo carboxila ao aumento da propriedade de expansão.	Santos; Sartori e Cabello (2012)
Modificação com secagem solar/ estufa		

Tratamento do amido de mandioca com ácidos minerais (HCl) e ácidos orgânicos (acético, propiônico e lático) e secagem ao sol ou estufa.	Amidos modificados com HCl, secagem ao sol e em estufa, e ácidos orgânicos com secagem em estufa proporcionaram valor de volume específico pequeno. Já a modificação com ácidos orgânicos e secagem ao sol proporcionou aumento da expansão dos biscoitos, sendo o modificado com ácido lático o que apresentou maior expansão.	Plata-Oviedo e Camargo (1998)
Modificação do amido de mandioca por oxidação com permanganato de potássio e acidificação com ácido lático e cítrico.	Tanto as amostras oxidadas quimicamente quanto as oxidadas fotoquimicamente (ácido e secagem ao sol) apresentaram propriedades de expansão, ao contrário das amostras de amido natural e acidificadas com ácido lático e secagem em estufa.	Demiate e Cereda (2000)
Reidratação		
Secagem do polvilho azedo a 40 °C por 8 h, umidificação 50 % e secagem ao sol novamente.	O processo de secagem a 40 °C e secagem ao sol por mais 8 h com adição de água a cada 3 h resultou em expansão maior do que a secagem direta ao sol por 8 h.	Brabet al. (1996)

Fonte: organizado pelo autor.

Marcon (2009) sugeriu como mecanismo para expansão do polvilho azedo, a formação de dextrinas de diferentes graus de polimerização devido a hidrólise da amilose e da amilopectina na fermentação do amido. Durante o assamento, onde é adicionado água na formulação do biscoito, a alta temperatura do forno propicia a formação de uma estrutura alveolar que é expandida devido à pressão dos gases retidos na rede polimérica.

1.4 Água nos alimentos

O teor de água é de grande importância na produção de alimentos, pois tem influência direta no controle da taxa de deterioração por micro-organismos, reações enzimáticas e químicas que ocorrem durante o armazenamento (BOBBIO; BOBBIO, 2001; FELLOWS, 2006; BARBOSA-CÁNOVAS et al., 2007).

O teor total de umidade de um alimento pode ser determinado pelo método gravimétrico, geralmente utilizando estufas, entretanto a umidade não fornece indicações de como a água está distribuída, nem permite saber se toda a água está ligada do mesmo modo no alimento (BARBOSA-CÁNOVAS; VEGA-MERCADO; 2000).

A água ligada às moléculas constituintes do produto não pode ser desassociada ou utilizada em qualquer tipo de reação química, isto porque a água que está fortemente ligada aos substratos apresenta menor mobilidade, pressão de vapor mais baixa e reduzido ponto de congelamento quando comparado a água livre (BARBOSA-CÁNOVAS; VEGA-MERCADO; 2000). Pelo fato de estar fortemente ligada ao substrato, a água ligada tem menor capacidade de favorecer atividades de degradação, ao contrário da água que se encontra na forma livre (REID; FENNEMA, 2010).

Nos alimentos a fração de água que fica disponível (água livre) para reações físicas (como a evaporação), química e microbiana, acaba tornando-se a principal responsável pela deterioração de produtos, principalmente os não processados.

1.5 Atividade de água

A atividade de água é uma das propriedades mais importantes para o processamento, conservação e armazenamento de alimentos. Ela quantifica o grau de ligação da água contida no produto e, conseqüentemente, sua disponibilidade para agir como solvente e participar das transformações químicas, bioquímicas e microbiológicas (LABUZA, 1995; BOBBIO; BOBBIO, 2001; FIGURA; TEIXEIRA, 2007).

A água livre nos alimentos é a que está disponível para crescimento de micro-organismos, germinação de esporos e para a participação em reações químicas. O grau de disponibilidade de água em um alimento pode ser expresso como atividade de água (A_w) e define-se como a relação entre a fugacidade da água no alimento em uma dada

temperatura (f) e a fugacidade da água pura nesta mesma temperatura (f_o) (Equação 1) (GUILBERT; MORIN, 1986).

$$A_w = \frac{f}{f_o} \quad (\text{Equação 1})$$

Para baixas pressões e temperaturas a forma apresentada na Equação 2 é a mais comum (COULTATE, 1996).

$$A_w = \frac{P}{P_o} \quad (\text{Equação 2})$$

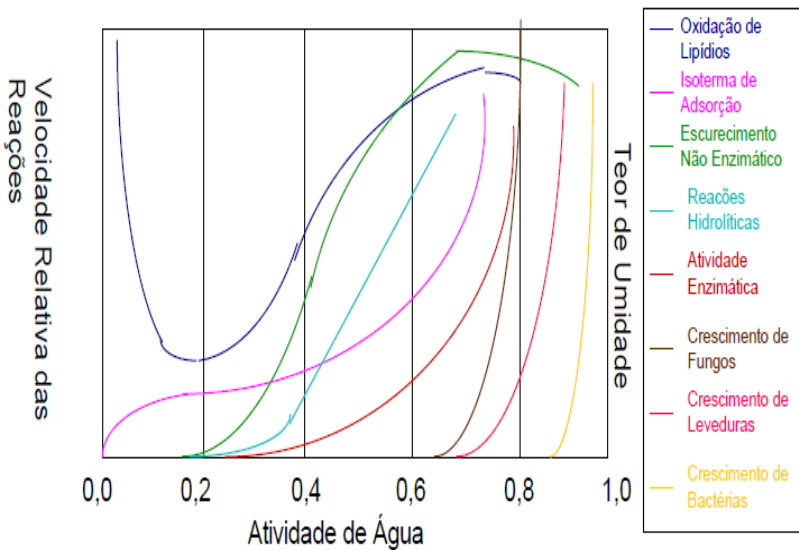
Em que P é a pressão de vapor da água no alimento, e P_o é a pressão de vapor da água pura.

No equilíbrio, existe uma relação entre A_w de um alimento e a umidade relativa no equilíbrio (UR) do ar (expressa como percentagem) no ambiente fechado em que esse se encontra e, portanto, é sempre 100 vezes maior do que o valor de A_w (Equação 3) (FELLOWS, 2006).

$$A_w = \frac{\%UR}{100} \quad (\text{Equação 3})$$

A atividade de água afeta os atributos e as características dos alimentos e é utilizada no controle dos fatores estabilizantes, como as reações enzimáticas e não enzimáticas, a oxidação lipídica, incluindo reações de deterioração da qualidade e crescimento microbiano, demonstrado na Figura 7 (DITCHFIELD, 2000).

Figura 7 - Efeito da atividade de água nas alterações microbianas, enzimáticas e químicas nos alimentos.



Fonte: Ditchfield (2000).

O valor máximo da atividade de água é 1 na água pura. Alimentos com valores de atividade de água altos (acima de 0,90) têm grande chance de sofrer contaminação microbiana, uma vez que as soluções diluídas dos alimentos servem de substrato para o crescimento de micro-organismos (ADAMBOUNOU et al., 1983). Para valores menores de A_w , entre 0,40 e 0,80, as reações químicas e enzimáticas ficam favorecidas, pois ocorre aumento da concentração dos reagentes. A partir de A_w 0,60 tem-se pequeno ou nenhum crescimento microbiano. Quando a atividade de água alcança valores inferiores a 0,30 atinge-se a zona de adsorção primária na qual não há dissolução dos componentes do alimento pela água, o que reduz a velocidade das reações, com exceção da oxidação lipídica, pois esta pode ocorrer tanto em baixa A_w quanto em elevadas (VAN DEN BERG; BRUIN, 1981). Em termos gerais diminuindo-se a A_w , conserva-se melhor o alimento (BARBOSA-CÁNOVAS; VEJA-MERCADO, 2000; BOBBIO; BOBBIO, 2001).

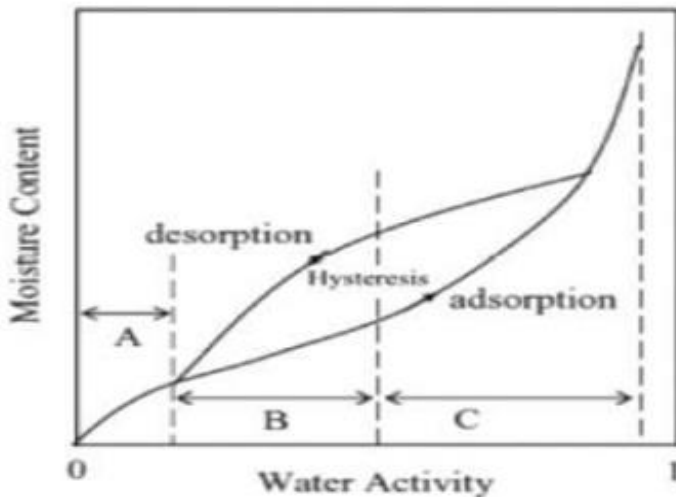
1.6 Isotermas de sorção

O conhecimento das isotermas de alimentos é útil para o processo de secagem, a seleção de um equipamento adequado para secagem, o material da embalagem e a previsão de estabilidade durante a vida útil de armazenamento e transporte do produto (KAYMAK-ERTEKIN; GEDIK, 2004; JAMALI et al., 2006; SAMAPUNDO et al., 2007; TUNC; DUMAN, 2007).

O estudo da atividade de água pode ser feito pelas isotermas de sorção. As isotermas de sorção são curvas que descrevem a relação entre o conteúdo de umidade de equilíbrio dos alimentos e a atividade de água (A_w) para temperatura e pressão constantes (BARBOSA-CÁNOVAS; VEGA-MERCADO, 2000). Embora a maior parte dos alimentos apresente curvas de isoterma de sorção sigmoidais, o comportamento de sorção de água depende da composição química dos alimentos (lipídeos, amidos, açúcares, proteínas, etc.) (PARK; BIN; BROD, 2001).

Uma isoterma de sorção pode ser obtida em duas direções: adsorção e dessorção. A primeira é feita quando um material mais seco é colocado em atmosferas de umidade relativa conhecidas e medindo o aumento de massa devido ao ganho de água. Na segunda, o material inicialmente úmido é colocado sobre as mesmas condições ambientais utilizadas na adsorção, sendo medida a perda de massa, devido à saída de água (Figura 8) (LABUZA, 1968).

Figura 8 - Isotermas típicas de sorção de umidade em um alimento.



Fonte: Adaptado de Barbosa-Cánovas, Schmidt e Fontana (2008).

Na região (A) (Figura 8) a água está fortemente ligada e não disponível para reações. Nesta região, há essencialmente uma monocamada de adsorção de vapor de água e não existe distinção entre as isotermas de adsorção e dessorção. Na região (B) a água está mais fracamente ligada devido ao seu confinamento em capilares menores. A água na região (C) está mais livre e disponível para as reações com o solvente (JANGAM et al., 2010).

A isoterma de dessorção possui valores de umidade de equilíbrio superiores aos da isoterma de adsorção a dada atividade de água. A defasagem entre essas duas curvas é denominada histerese e pode ocorrer devido a diversos fatores, tais como condensação capilar, mudanças na estrutura física do material, impurezas na superfície e mudança de fase (RAHMAN, 1995).

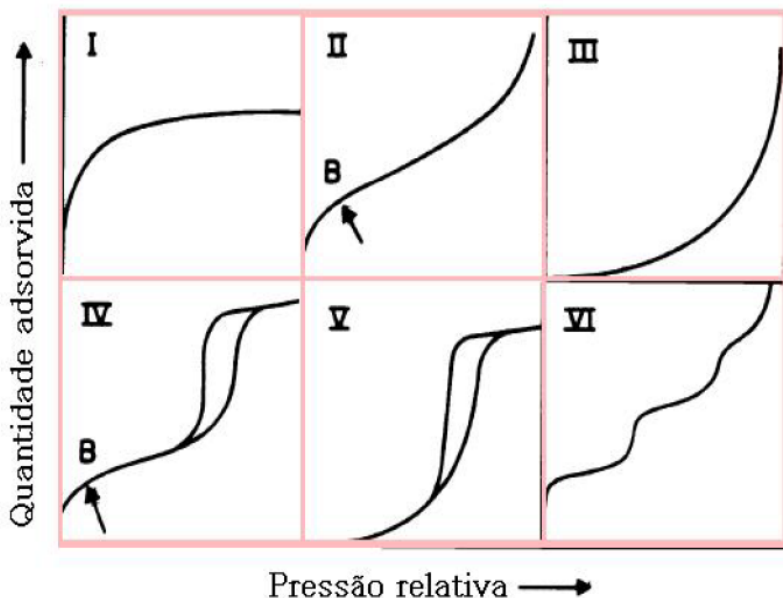
Segundo Brunauer et al. (1938), há cinco tipos de isotermas de sorção, segundo as curvas obtidas. Esta classificação foi o cerne da classificação moderna da IUPAC, até que Sing et al. (1985) adicionou à classificação uma última isoterma (Figura 9).

Materiais como farinha de trigo, amidos, amidos modificados, etc. apresentam isoterma de sorção do tipo II, cuja forma é sigmoideal. A forma dessas curvas indica o tipo de forças existente na ligação de água

com a superfície do material higroscópico e permite avaliar a estrutura superficial do material (BRUNAUER et al., 1938).

De acordo com Brunauer et al. (1938), as isotermas do tipo I, IV e V não são de interesse para a área de alimentos.

Figura 9 - Classificação IUPAC para as isotermas de adsorção gasosa.



Fonte: Sing et al. (1985).

As diferentes geometrias das isotermas dependem também do tipo de porosidade do material ou da sua ausência, conforme descrito por Sing et al. (1985):

- Isotermas do Tipo I, côncava ao eixo P/P_0 , são típicas de sólidos microporosos que possuem áreas superficiais externas relativamente baixas, onde a adsorção se produz a pressões relativamente baixas e são muito similares aos casos de quimiosorção. O patamar se desloca até a pressão de saturação, correspondente ao impedimento de adsorção em multicamadas no caso da adsorção em sólidos microporosos, porque os poros são tão estreitos que apenas suportam uma camada molecular simples.
- Isotermas do Tipo II apresenta o formato normalmente obtido para adsorventes não porosos ou macroporosos. Ele descreve a adsorção

integral de monocamada-multicamada. Inicialmente, apresenta uma fase linear seguida de uma côncava até o ponto B. Este ponto corresponde, em geral, ao preenchimento da primeira camada adsorvida, a monocamada.

- A isoterma reversível do Tipo III é convexa ao eixo P/P_0 e não apresenta o ponto B. Isotermas desse tipo não são comuns, mas existe em alguns sistemas (nitrogênio em polietileno, por exemplo). Para baixas pressões, as interações gás-sólido são fracas, estando favorecida uma adsorção cooperativa de moléculas. Esta adsorção é menos energética do que a do Tipo II e é característica de sólidos porosos ou macroporosos. Enquanto que as isotermas do Tipo II exibem um ponto de inflexão correspondente à completa formação da monocamada e o começo da multicamada, as isotermas do tipo III não o apresentam devido às fracas interações entre adsorvente e adsorvato.

- As características retratadas na isoterma do Tipo IV são a presença do laço de histerese, o qual está associado à condensação capilar presente em mesoporos, e o patamar prolonga-se até valores de pressão mais elevados, o que mostra que o número de camadas adsorvíveis é limitado. Por isso, seus poros são do tipo meso ou macroporos. Isotermas do Tipo III e IV são típicas da adsorção de vapores, tais como vapores de água em materiais hidrofóbicos, ou quando a interação adsorvato-adsorvente é baixa. A diferença entre a isoterma III e IV, é que na última o caminho final não é assintótico.

- A isoterma do Tipo V é bastante incomum, sendo caracterizada por interações fracas sólido-gás, tal como a isoterma do Tipo III. As isotermas do Tipo IV e V são típicas de materiais mesoporosos, com preenchimento em multicamadas, os quais apresentam dessorção em uma pressão menor do que a respectiva adsorção.

- A isoterma do Tipo VI corresponde a um tipo de adsorção física em sólidos muito homogêneos de superfície não porosa. Os patamares encontram-se equidistantes, correspondendo à constituição de sucessivas camadas adsorvidas.

As setas da Figura 8 indicam o ponto B, no qual o gás adsorvido completou a monocamada e começa o processo da multicamada, considerada também como condensação do adsorvato (BRUNAUER; EMMETT; TELLER, 1938).

Existem vários modelos na literatura capazes de prever o comportamento de sorção de diversos produtos (Tabela 4). A equação de Oswin é utilizada para analisar isotermas de sorção de diversos alimentos. A equação de BET é amplamente usada para fornecer uma

estimativa da umidade na monocamada adsorvida na superfície do alimento. Entretanto, essa equação apresenta um ajuste satisfatório para atividade de água entre 0,05 e 0,45 (CHHINNAN; BEUCHAT, 1985). Já o modelo de GAB permite um melhor ajuste dos dados de sorção dos alimentos até atividade de água de 0,9 (VAN DER BERG, 1984).

Tabela 4 - Modelos de ampla utilização na literatura para ajuste de isoterma de sorção.

Nome do modelo	Modelo*
GAB (Guggenheim-Anderson-Bôer)	$X_e = \frac{X_m C_{GAB} a_w}{[(1 - K_{GAB} a_w)(1 - K_{GAB} a_w + C_{GAB} K_{GAB} a_w)]}$
BET	$X_e = \frac{X_m C a_w}{(1 - a_w)} \left[\frac{1 - (n + 1)(a_w)^n + n(a_w)^{n+1}}{1 - (1 - C)a_w - C(a_w)^{n+1}} \right]$
BET linear	$X_e = \frac{X_m C_{BET} a_w}{(1 - a_w)[1 + (C - 1)a_w]}$
Oswin	$X_e = A \left(\frac{a_w}{1 - a_w} \right)^B$
Langmuir	$X_e = \frac{X_m C a_w}{1 + C a_w}$

* Sendo: A, B e C_{BET} , C_{GAB} , K_{GAB} , k, n= constantes das equações; X_e = umidade de equilíbrio expressa em base seca (g água/g massa seca); X_m = umidade na monocamada molecular (g água/g massa seca); constante universal dos gases (J/mol.K); T= temperatura (K).

Fonte: Adaptado de Kurozawa, El- Aourar e Murr (2005).

1.7 Secagem

A secagem pode ser definida como a eliminação da água do material através da evaporação. Existem dois tipos de secagem para alimentos: a natural, feita pelo sol ou vento; e a artificial, a qual necessita de fornecimento de energia artificial (PARK; YADO; BROD, 2001).

A utilização da radiação solar como fonte de energia é a forma que requer menor custo de operação. Por sua vez, em alguns casos, torna-se um processo não muito interessante do ponto de vista industrial, devido às variações climáticas e, conseqüentemente, longo tempo necessário para atingir o ponto desejado de umidade no alimento. Este tempo pode ser determinado a partir das curvas de secagem dos diversos produtos, que varia em função do tipo de processo, do equipamento utilizado e das condições de secagem (VILELA; ARTUR, 2008).

A secagem tem como objetivo principal a eliminação de umidade de um produto, sendo uma operação unitária bastante utilizada nos processos industriais. Embora seja grande o interesse em sua compreensão, ela ainda é uma das operações menos entendidas em função da complexidade dos fenômenos envolvidos na transferência simultânea de calor, massa e quantidade de movimento no sólido durante o processo (KINGSLEY et al., 2007).

De maneira geral, a secagem é uma operação na qual calor é fornecido a um dado material que contém água, a fim de se vaporizar certo conteúdo de água deste material, obtendo-se um produto sólido seco. Portanto, trata-se de um processo com transporte simultâneo de calor e massa, acompanhado de mudança de fase (BARBANTI; MASTROCOLA; PIZZARANI, 1995). A transferência de calor ocorre durante a evaporação da água removida da amostra, enquanto que a transferência de massa acontece durante a remoção da água da superfície desta amostra por meio, geralmente, de uma corrente de ar (DINCER; DOST, 1995).

A cinética de secagem é controlada pelas características da matriz do alimento e pelas variáveis de temperatura, velocidade e umidade relativa do ar (SINGH; HELDMAN, 2009).

Nos processos de secagem, os dados experimentais podem ser monitorados pela variação da massa da amostra em função do tempo. Conhecendo-se a umidade inicial em base úmida (W_o , %) pode-se encontrar a massa de sólidos secos (M_{ss}) através da Equação 4.

$$M_{ss} = \frac{M_o(100-W_o)}{100} \quad (\text{Equação 4})$$

Logo, a umidade do produto (base seca) é definida pela razão entre a massa de água e a massa de sólidos secos, conforme Equação 5 (GEANKOPLIS, 2003).

$$X_t = \frac{M_s - M_{ss}}{M_{ss}} \quad (\text{Equação 5})$$

Sendo, X_t o teor de umidade do produto em base seca (b.s.), M_s a massa de sólido úmido (sólidos e umidade) e M_{ss} a massa de sólidos secos.

A taxa de secagem é encontrada pela derivação da curva de umidade em função do tempo, conforme Equação 6.

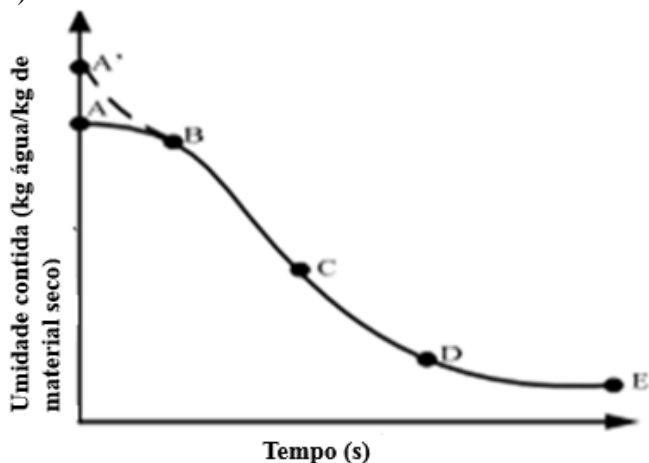
$$R = -\frac{M_{ss}}{A} \frac{dX}{dt} \quad (\text{Equação 6})$$

Onde, R é o fluxo de água ($\text{kg m}^{-2} \text{min}^{-1}$), M_{ss} é a massa de sólido seco e A a área da superfície exposta ao ar de secagem (m^2)

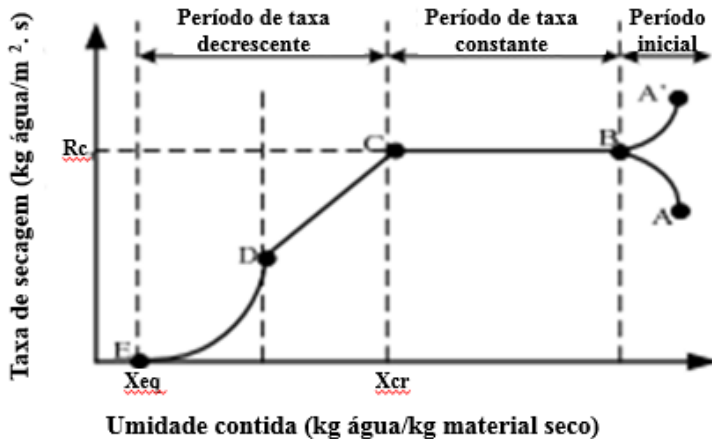
O conteúdo de umidade de um alimento, durante um processo de secagem, apresenta o comportamento mostrado pelas curvas da Figura 10.

Figura 10 - Curvas de secagem típicas em condições constantes de secagem. Ilustração das regiões de taxa constante e período de taxa decrescente de secagem. A) Umidade em função do tempo de secagem. B) Taxa de secagem em função da umidade.

A)



B)



Fonte: Geankoplis (2003).

Na Figura 10, o segmento AB corresponde ao período em que alimento se adapta às condições de secagem, e a sua temperatura atinge um valor constante, sendo igual a temperatura do bulbo úmido do ar, enquanto a água livre estiver sendo evaporada. Essa igualdade se mantém durante o período BC (GEANKOPLIS, 2003). Durante o período BC, a superfície exposta do alimento está saturada, existindo um filme contínuo de água sobre o sólido, que age como se não existisse sólido, ou seja, a água do alimento não tem nenhuma resistência para “sair” dele. A água removida neste período é principalmente a água superficial se o sólido não for poroso (cereais, vegetais e outros). Se o sólido for poroso (sal, açúcar, ácido cítrico e outros), o período BC é muito mais longo, pois a água superficial vai sendo substituída pela do interior do sólido, que não encontra dificuldade de escoamento em razão dos poros do alimento. Portanto, o período de secagem com taxa constante (segmento BC) é mais pronunciado em materiais com umidade elevada (SINGH; HELDMAN, 2009).

O ponto C corresponde ao fim de período de secagem constante, e a umidade neste ponto é conhecida como umidade crítica (X_c). A partir deste ponto há uma resistência interna e o movimento de líquido do interior para a superfície do sólido é insuficiente para compensar o líquido que está sendo evaporado, iniciando-se o primeiro período decrescente (trecho CD). No segmento CD cada vez menos líquido está na superfície do sólido para evaporar, e essa se torna cada

vez mais seca, podendo haver rachaduras na superfície do alimento. Do ponto D em diante, tem-se o segundo período de velocidade decrescente, em que a umidade do alimento diminui até alcançar a umidade de equilíbrio para as condições de temperatura e umidade relativa do ar (BARBOSA- CANOVÁS; VEJA-MERCADO, 2000; SINGH; HELDMAN, 2009).

A umidade de equilíbrio é atingida quando o alimento é deixado por tempo suficientemente longo em determinada condição de temperatura e umidade relativa do ar que o envolve. Nessa condição a pressão parcial de vapor da água na superfície do produto é igual a pressão parcial de vapor de água contida no ar (LABUZA, 1968).

Com base no comportamento durante a secagem, é possível dividir os materiais em duas classes principais. A primeira é constituída por sólidos granulares ou cristalinos que retêm a umidade nos interstícios entre as partículas, ou em poros superficiais, rasos e abertos. Nestes materiais, o movimento da umidade é relativamente livre e ocorre em consequência da interação das forças gravitacionais e das forças de tensão superficial (ou capilares) (FOUST et al., 1982).

A segunda classe principal dos materiais é constituída por sólidos orgânicos. Exemplos destes tipos de matérias são ovos, detergentes, colas, extrato de café solúvel, cereais, amido, sangue extrato de soja. Estes materiais retêm a umidade como parte integral da estrutura do sólido, ou então retêm-na no interior de fibras e ou de poros delgados internos. Nestas substâncias, o movimento da umidade é lento e provavelmente ocorre pela difusão do líquido através da estrutura do sólido. As curvas de secagem das substâncias mostram períodos de taxa constante muito curtos, que terminam em valores muito elevados do teor crítico de umidade. Pelo mesmo motivo o primeiro período de taxa decrescente é muito reduzido, e a maior parte do processo de secagem é controlada pela difusão do líquido; isto é, a velocidade de secagem é controlada pela velocidade de difusão do líquido através do sólido (FOUST et al., 1982).

A maior parte da secagem ocorre no segundo período de taxa decrescente. Os teores de umidade no equilíbrio são, em geral, elevados, o que indica ser significativa a quantidade de água que é retida intimamente na estrutura do sólido, ou em poros tão delgados que a sua pressão de vapor é significativamente reduzida (FOUST et al., 1982).

De acordo com Afonso Júnior e Corrêa (1999) o estudo de sistemas de secagem, seu dimensionamento, otimização e a determinação da viabilidade de sua aplicação comercial, podem ser

feitos por simulação matemática. Para a simulação, cujo princípio se fundamenta na secagem de sucessivas camadas do produto, utiliza-se um modelo matemático que representa satisfatoriamente a perda do teor de água do produto durante o período de secagem (MARTINAZZO et al., 2007; FERREIRA, PENA, 2010; RESENDE et al., 2010).

Existem três tipos de modelos de secagem usados para descrever a cinética de secagem de produtos: teórico, semi-teórico e empírico. O modelo teórico considera apenas a resistência interna à transferência de calor e água entre o produto e o ar quente. Estes modelos descrevem a taxa decrescente de secagem, geralmente, considerando como mecanismo principal a difusão baseada na segunda Lei de Fick (Equação 7), que expressa que o fluxo de massa por unidade de área é proporcional ao gradiente de concentração da água (PARK et al., 2002; ROMERO PEÑA; KIECKBUSCH, 2003).

$$\frac{\delta X}{\delta t} = \nabla(D_{ef} \nabla X) \quad (\text{Equação 7})$$

Na qual:

$\frac{\delta X}{\delta t}$ = fluxo de massa de água em função do tempo;

D_{ef} = difusividade efetiva;

X = concentração de água.

Os modelos semi-teóricos e os empíricos consideram somente a resistência externa a temperatura e umidade relativa do ar de secagem (MIDILLI et al., 2002; PANCHARIYA et al., 2002).

Os modelos semi-teóricos se baseiam, de modo geral, na Lei de Newton para resfriamento aplicada à transferência de massa. Quando se aplica esta Lei, presume-se que as condições sejam isotérmicas e que a resistência à transferência de umidade se restrinja apenas à superfície do produto (BROOKER et al., 1992)

A Tabela 5 ilustra alguns dos modelos matemáticos aplicados ao processo de secagem.

Tabela 5 - Modelos matemáticos aplicados ao processo de secagem.

Nome do Modelo	Equação	Referência
Lewis	$RU = \exp(-K.t)$	Lewis (1921)
Page	$RU = \exp(-k.t^n)$	Page (1949)
Henderson e Pabis	$RU = a.\exp(-k.t)$	Henderson e Pabis (1961)
Wang e Singh	$RU = 1 + at + bt^2$	Wang e Singh (1978)
Midilli	$RU = a.\exp(-k.t^n) + b.t$	Midilli et al. (2002)
Aproximação da difusão	$RU = a.\exp(-k.t) + (1-a).\exp(-k.b.t)$	Wang et al. (2007)
Logarítmico	$RU = a.\exp(-k.t) + c$	Togrul e Pehlivan (2002)

RU: adimensional de umidade; *k*: constante de secagem (min^{-1}); *t*: tempo (min); *a*, *b*, *c*: constantes experimentais(adimensionais); *n*: expoente.

Fonte: adaptado de Doymaz (2005).

A partir da solução geral da Segunda Lei de Fick, casos particulares que envolvem a dependência da constante de secagem com o tempo em determinadas condições iniciais, podem ser obtidos, tais como os modelos semi-empíricos de Lewis (1921), Page (1949) e Wang e Singh (1978) (LEWIS, 1921; PAGE, 1949; WANG; SINGH, 1978).

Geralmente, os modelos empíricos são derivações obtidas por simplificação das séries da Segunda Lei de Fick. O modelo de Henderson e Pabis, por exemplo é o primeiro termo de uma série de soluções desta Lei. Ele foi utilizado inicialmente para prever características da secagem de milho (HENDERSON; PABIS, 1961). O modelo de Lewis é um caso especial baseado no modelo de Henderson e Pabis, onde o coeficiente de intersecção é a unidade.

O modelo de Page é uma modificação do modelo de Lewis, para superar suas deficiências. Ele foi usado com sucesso para descrever características de secagem de variados produtos agropecuários (JANGAN et al., 2008; HASSAN-BEYGI et al., 2009).

Segundo Oliveira et al. (2006), em algumas situações a teoria difusional não é adequada para ajustar o comportamento dos dados experimentais quando há uma elevada interferência da resistência interna do material no processo de secagem. Assim, o modelo de Page (1949) (PAGE, 1949), pode ser aplicado para tais situações.

Wang e Singh (1978) criaram um modelo de segunda ordem que foi inicialmente aplicado no estudo da secagem de casca de arroz. Assim como os demais modelos empíricos de secagem este modelo apresenta uma relação direta entre o teor de água e o tempo de secagem, omitindo características fundamentais que acontecem durante o período de secagem, entretanto consegue se ajustar às curvas de secagem em determinadas condições experimentais. Este modelo é muito usado em estudos de secagem de produtos agrícolas e de alimentos (MARTINAZZO et al., 2007).

Outro modelo largamente utilizado para estudos de secagem em camada delgada é o modelo Logarítmico. Ele obteve sucesso em processos de secagem de pêssegos, cogumelos e tomate, entre outros (KINGSLY et al., 2007; XANTHOPOULOS; LAMBRINOS; MANOLOPOULOU, 2007; KHAZAEI, CHEGINI, BAKHSHIANI, 2008).

Midilli, Kucuk e Yapar (2002) apresentaram uma proposta de modelo após levarem em consideração outros modelos exponenciais existentes, que consideravam a umidade de equilíbrio. Esses autores obtiveram ótimos ajustes para cogumelo, pistache e pólen, e chegaram à conclusão de que este modelo era bastante conveniente para aplicações práticas.

O comportamento da secagem do polvilho azedo ainda não foi abordada na literatura, assim como não é conhecida a sua isoterma de adsorção. Diante disto, o presente trabalho poderá trazer uma contribuição relevante referente a este produto, que atualmente ainda é produzido em condições de produção e secagem artesanais, sem controle e padronização do processo.

REFERÊNCIAS

ABDEL-HAFIZ, S. A. Accelerated oxidation of maize starch using the sodium chlorite/thiourea system. **Polymer Degradation and Stability**, v. 47, n. 2, p. 275-281, 1995.

ADAMBOUNOU, T.L., CASTAIGNE, F., DILLON, J.C. Abaissement de l'activité de l'eau de légumestropicaux par déshydratation osmotique partielle. **Sciences des Aliments**, Paris: Lavoisier Abonnements, v.3, n. 4, p. 551-567, 1983.

ALVARADO, P. M.; GROSMIRE, L.; DUFOUR, D.; TORO, A.G. SÁNCHEZ, T.; CALLE, F.; SANTANDER, M. A. M; CEBALLOS, H.; DELARBRE, J. L.; TRAN, T. Combined effect of fermentation, sun-drying and genotype on breadmaking ability of sour cassava starch. **Carbohydrate Polymers**, v. 98, n. 1, p. 1137-1146, 2013.

AMPE, F.; SIRVENT, A.; ZAKHIA, N. Dynamics of the microbial community responsible for traditional sour cassava starch fermentation studied by denaturing gradient gel electrophoresis and quantitative rRNA hybridization. **International Journal of Food Microbiology**, v. 65, p. 45-54, 2001.

APLEVICZ, K. S. **Caracterização de produtos panificados à base de féculas de mandioca nativas e modificadas**. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Alimentos) - Universidade Estadual de Ponta Grossa, Ponta Grossa, 2006, 131 f.

APLEVICZ, K. S.; DEMIATE, I. M. Caracterização de amidos de mandioca nativos e modificados e utilização em produtos panificados. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, Campinas, v. 27, n. 3, p. 478-484, 2007.

AQUINO, A. C. M. S. **Caracterização das águas sobrenadantes da fermentação de amido de mandioca: ácidos orgânicos e suas relações com as propriedades do polvilho azedo**. 2015. 228 f. Tese (Doutorado em Ciência dos Alimentos). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2015.

AQUINO, A. C. M. S.; PEREIRA, J. M.; WATANABE, L. B; AMANTE, E. R. Standardisation of the sour cassava starch reduces the processing time by fermentation water monitoring. **International Journal Food Science and Technology**, n. 48, p. 1892 - 1898, 2013.

ASCHERI, D. P. R.; VILELA, E. R. Alterações do polvilho de mandioca pela fermentação, no fabrico de biscoitos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 30, n. 2, p. 269-279, 1995.

BALAGOPALAN, C. **Cassava utilization in food, feed and industry**. Chapter 15, p. 301-318. Cassava: Biology, Production and Utilization. CAB International, 2002.

BALAGOPALAN, C.; PADMAJA, G.; NANDA, S.K.; MOORTHY, S.D. **Cassava Foods**. In: Balagopalan C et al. (ed.) *Cassava in Food, Feed and Industry*. Boca Raton: Crc Press. p. 97-100, 103-106, 110-111, 1988.

BARBANTI, D.; MASTROCOLA, D.; PIZZARANI, S. Air drying of plums influence of some process parameters on the specific drying kinetics. **Sciences des Aliments**, Paris, v. 15, p. 19-29, 1995.

BARBOSA-CÁNOVAS, G. V.; VEGA-MERCADO, H. **Deshidratación de Alimentos**. Zaragoza: ACRIBIA S.A., 2000, 297 p.

BARBOSA-CÁNOVAS, G.V; FONTANA JR. A.; SCHMIDT, S. J.; LABUZA, T. P. **Water Activity in Foods: Fundamentals and Applications**. Blackwell Publishing, 2007. 440 p.

BARBOSA-CÁNOVAS, G. V.; SCHMIDT, S.; FONTANA, A. **Water Activity in Foods: Fundamentals and Applications**. Hoboken: Wiley-Blackwell, 2008.

BERTOLINI, A.C.; MESTRES, C.; COLONNA, P. Rheological properties of acidified and UV – irradiated starches. **Starch**, v. 52, n. 10, p. 340–344, 2000.

BILIADERIS, C. G. Structures and phase transitions of starch in food systems. **Food Technology**, v. 145, p. 98-109, 1992.

BOBBIO, P. A.; BOBBIO, F. O. **Química de Processamento de Alimentos**. 3 ed. São Paulo: Varela, 2001. 144p.

BRABET, C.; CHUZEL, G.; DUFOUR, D.; RAIMBAULT, M.; GIRAUD, J. Improving cassava sour starch quality in Colombia, In: DUFOUR, D.; O'BRIEN, G. M.; BEST, R. **Cassava flour and starch: progress in research and development**. Cali: CIRAD/CIAT, 1996. Cap. 27, p. 241-246.

BRASIL. Leis, decretos, etc. Decreto n° 12.486. 20 de outubro de 1978. **Normas Técnicas Especiais relativas a Alimentos e Bebidas**. D. O. do Estado de São Paulo. 21 de outubro, p. 3-25, 1978.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Instrução Normativa nº 23, de dezembro de 2005. Aprova o Regulamento técnico dos produtos amiláceos derivados da raiz de mandioca, definindo os seu POCs com os requisitos de identidade e qualidade, amostragem, modo de apresentação e a marcação ou rotulagem. **Diário Oficial da União**, 15 dez., 2005.

BRASIL. Ministério da Saúde. Resolução nº 263 de setembro de 2005 da Comissão Nacional de Normas e Padrões para Alimentos. Aprova o regulamento técnico para produtos de cereais, amidos, farinhas e farelos. **Diário Oficial da União**, Brasília, 2005.

BROOKER, D. B.; BAKER-ARKEMA, F. W.; HALL, C. W. **Drying and Storage of Grains and Oilseeds**. New York: AVI Book, 1992. 450p.

BRUNAUER, S.; EMMETT, P. H.; TELLER, E. Adsorption of gases in multimolecular layers. **Journal of the American Chemical Society**, Easton, v. 60, n. 2, p. 309-319, 1938.

CÁRDENAS, O. S.; BUCKLE, T. S.. Sour cassava starch production: a preliminary study. **Journal of Food Science**, v. 45, n. 6, p. 1509-1512, 1980.

CARVALHO, E. P.; CANHOS, V.P.; RIBEIRO, V. E.; CARVALHO, H. P. Polvilho azedo: aspectos físicos, químicos e microbiológicos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 31, n. 2, p. 129- 137, 1996.

CENTRO DE ESTUDOS AVANÇADOS EM ECONOMIA APLICADA- CEPEA. **MANDIOCA/CEPEA: Produção de fécula ultrapassa 750 mil t em 2015**. Piracicaba: ESALQ/USP, 2011. Disponível em: <http://cepea.esalq.usp.br/imprensa/> . Acesso em: 10 junho de 2016.

CEREDA, M. P. Avaliação da qualidade de duas amostras de fécula fermentada de mandioca (polvilho azedo). **Boletim da Sociedade Brasileira de Ciência e Tecnologia de Alimentos**, Campinas, v. 17, n. 3, p. 305-320, 1983.

CEREDA, M. P.; DEMIATE, I. M.; DUPUY, N.; HUVENNE, J P. Spectroscopy of modified cassava starches presenting expansion properties. **Ftír Zywosc Technol**, Cracóvia, v. 7, n. 2, p. 131-135, 2000.

CEREDA, M. P.; GIAJ-LEVRA, L. A. Constatação de bactérias não simbióticas fixadoras de nitrogênio em fermentação natural de fécula de mandioca. **Revista Brasileira de Mandioca**, Cruz das Almas, v. 6, n. 1, p. 29-33, jun. 1987.

CEREDA, M. P.; LIMA, U. A. Aspectos sobre a fermentação da fécula de mandioca. II: Controle das fermentações realizadas em laboratório. **Boletim da Sociedade Brasileira de Ciências e Tecnologia**, Campinas, v. 15, n. 1, p. 107 - 122, 1981.

CEREDA, M. P., NUNES, O. L. G. S. **Definição de parâmetros de fermentação e secagem para industrialização do polvilho azedo**. Botucatu: Departamento de Tecnologia dos Produtos Agropecuários, UNESP, 1989. 80 p. (Relatório Técnico, 1).

CEREDA, M. P.; NUNES, O. L. G.; VILPOUX, O. **Tecnologia da produção do polvilho azedo**. Botucatu. Centro de Raízes Tropicais (CERAT). Universidade Estadual Paulista, 1995.

CEREDA, M. P. Padronização para ensaios de qualidade da fécula de mandioca fermentada (polvilho azedo). I Formulação e preparo de biscoito. **Boletim da Sociedade Brasileira de Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v. 17, n. 3, p. 287-295, 1983.

CEREDA, M. P. Tecnologia e qualidade do polvilho azedo. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v. 13, n. 145, p. 63-68, 1987.

CEREDA, M. P.; VILPOUX, O. (Org.) **Tecnologia, uso e potencialidades de tuberosas amiláceas latinoamericanas**. In: Culturas de Tuberosas Amiláceas Latinoamericanas. São Paulo: Fundação Cargill, 2003. v.3, 711 p.

CEREDA, M. P. **Processamento de Mandioca**. Viçosa: CPT, 2007. 222 p.

CEREDA, M. P. **Propriedades Gerais do Amido**. São Paulo, Fundação Cargill, v. 1, 221 p., 2002.

CHHINNAN, M.S.; BEUCHAT, L.R. Sorption isotherms of whole cowpeas and flours. **Lebensmittel–Wissenschaft und Technologie**, v. 18, p. 83-88, 1985.

CHOOKIETWATTANA, K. Lactic Acid Production from Simultaneous Saccharification and Fermentation of Cassava Starch by *Lactobacillus Plantarum* MSUL 903. **APCBEE Procedia**, v. 8, n. 1, p. 156-160, 2014.

COULTATE, T. P. **Food - The Chemistry of its Components**. Series of the Royal Society of Chemistry Paperbacks, 3rd edition. London, Royal Society of Chemistry, 1996. p. 321-339.

DAIUTO, E. R.; CEREDA, M. P. Processos de produção de fécula de mandioca: comparação Tailândia e China. In CEREDA, M. P.; VILPOUX, O. **Tecnologia, usos e potencialidades de tuberosas amiláceas latino-americanas**, São Paulo: Fundação Cargill, p. 178 (Série: Culturas de Tuberosas Amiláceas Latino-americanas, v. 3), 2004.

DEMIATE, I. M.; CEREDA, M. P. Some physicochemical characteristics of modified cassava starches presenting baking property. **Energia na Agricultura**, Rio de Janeiro, v. 15, n. 3, p. 36-46, 2000.

DEMIATE, I. M.; DUPUY, N.; HUVENNE, J. P.; CEREDA, M. P.; WOSIACKI, G. Relationship between banking behavior of modified cassava starches and starch chemical structure determined by FTIR spectroscopy. **Carbohydrate Polymers**, v. 42, n. 2, p. 149-158, 2000.

DENARDIN, C. C.; SILVA, L.P. Estrutura dos grânulos de amido e sua relação com propriedades físico-químicas. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 39, n.3, p. 945- 954, Maio/Junho, 2009.

DIAS, A. R. G. **Efeito de oxidantes, de ácidos orgânicos e da fração solúvel em água na propriedade de expansão do amido de mandioca fermentado**. Tese (Doutorado em Tecnologia de Alimentos) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2001, 183 f.

DIAS, A. R. G.; ZAVAREZI, E. R.; HELBIG, E. ELIAS, M. C.; OLIVEIRA, M. Oxidação dos amidos de mandioca e de milho comum fermentados: desenvolvimento da propriedade de expansão. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v. 27, n. 1, p. 794–799, 2007.

DIAS, A. R. G.; ELIAS, M. C.; OLIVEIRA, M.; HELBIG, E.; MOURA, F. A; VARGAS, C. G.; CIACCO, C. F. Oxidation of fermented cassava starch using hydrogen peroxide. **Carbohydrate Polymers**, v. 86, n. 1, p. 185-191, 2011.

DINCER, I.; DOST, S. An analytical model for moisture diffusion in solid objects during drying. **Drying Technology**, New York, v. 13, p 425-435, 1995.

DINIZ, I. P. **Caracterização tecnológica do polvilho azedo produzido em diferentes regiões do estado de Minas Gerais**. Dissertação (Magister Scientiae em Ciência e Tecnologia de Alimentos) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2006, 101f.

DITCHFIELD, C. **Estudo dos métodos para a medida da atividade de água**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química). Universidade de São Paulo. SP. 2000.

DOYMAZ, I. Sun drying of figs: an experimental study. **Journal of Food Engineering**, v. 1, n. 71, p. 403–407, 2005.

DUFOUR, D.; BRABET, C.; ZAKHIA, N.; CHUZEL, G. Influence de la fermentation et du séchage solaire sur l'acquisition du pouvoir de la panification de l'amidon aigre de manioc= influence of fermentation and sun-drying on the breadmaking capacity of cassava sour starch. In: AGBOR, E.T.; BRAUMAN, A. GRIFFON, D.; TRÈCHE, S. **Transformation alimentaire du manioc=Cassava food processing**. Paris: ORSTOM, 1995, p. 399-416.

DUFOUR, D. LARSONNEUER, S.; ALARCON, F.; BARBET, C.; CHUZEL, G., Improving the bread-making potential of cassava sour starch. In: Dufour, D.; O'Brieu, G. M.; Best R., **Cassava Flour and Starch: Progress in Research and Development**, Cirad- Ciat, Nantes, p. 133-142, 1996.

FAO. Faostatdatabase gateway. 2010. Disponível em <<http://faostat.fao.org/site/567/DesktopDefault.aspx?PageID=567#ancor>>. Acesso em: 20 de abril de 2015.

FELLOWS P. J. **Tecnologia do Processamento de Alimentos: Princípios e Prática**. Tradução: Florencia Cladera Oliveira et al. – 2^o edição – Porto Alegre: Artmed, 2006.

FERREIRA, M. F. P.; PENA, R. S. Estudo da secagem da casca do maracujá amarelo. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, Campina Grande, v. 12, n. 1, p. 15-28, 2010.

FIGURA, L. O.; TEIXEIRA, A. A. **Food Physics: Physical Properties — Measurement and Applications**. Germany: Springer Berlin Heidelberg, 2007. p. 550.

FILHO, G. de A. F.; BAHIA, J. J.S. Mandioca. Disponível em :<<http://www.ceplac.gov.br/radar/mandioca.htm>> Acesso em 10 de jun. 2012.

FONSECA JÚNIOR, N. S.; GROXKO, M.; RODANTE, A.; TAKAHASHI, M.; PEQUENO, M. G.; VIDIGAL FILHO, P. S. **Cadeia produtiva da mandioca no Paraná: diagnóstico e demandas atuais**. Londrina: IAPAR, 2002.

FOUST, A. S.; WENZEL, L. A.; CLUMP, C. W.; MAUS, L.; MACEDO, H. **Princípios de Operações Unitárias**. Livros Técnicos e Científicos Editora S. A.- LTC: Rio de Janeiro, 1982, 401- 432 p.

FRANCO, C. M. L.; OGAWA, C.; RABACHINI, C.; ROCHA, T.; SOUZA, T.; CEREDA, M. P.; JANE, J., Effect of lactic acid and UV irradiation on the cassava and corn starches. **Brazilian Archives of Biology and Technology**, v. 53, n. 2, p. 443-454, 2010.

GALLANT, D. J.; BOUCHET, B.; BALDWIN, P. M. Microscopy of starch: evidence of a new level of granule organization, **Carbohydrate Polymers**, Barking, v. 32, p. 177-191, 1997.

GARCIA, A. C. D. B.; LEONEL, M. Efeito da concentração de ácido láctico sobre a propriedade de expansão em amidos modificados

fotoquimicamente. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 29, n. 3, p. 629- 634, maio/jun., 2005.

GEANKOPLIS, C. J. **Transport Process and Separation Process Principles**. 4^a edition, Prentice Hall. 1026 pag, 2003.

GROXKO, M. **Análise da Conjuntura Agropecuária - Mandioca Safra 2014/2015**. Secretaria da Agricultura e do Abastecimento: Departamento de Economia Rural. Disponível em: <http://www.agricultura.pr.gov.br/arquivos/File/deral/Prognosticos/mandioca_2014_15.pdf>. Acesso em 29 de abril de 2014.

GROXKO, M. **Análise da Conjuntura Agropecuária- Mandioca Safra 2015/2016**. Secretaria da Agricultura e do Abastecimento: Departamento de Economia Rural. Disponível em: <http://www.agricultura.pr.gov.br/arquivos/File/deral/Prognosticos/2016/mandioca_2015_16.pdf>. Acesso em 07 de julho de 2016.

GUILBERT, S.; MORIN, P. Définition et mesure de l'activité de l'eau: révie dès méthodes pratiques et critiques théoriques. **Lebensmittel-Wissenschaft und Technologie**, v. 19, p. 395- 400, 1986.

GUYOT, J. P.; MORLON- GUYOT, J. Effect of different cultivation conditions on *Lactobacillus manihotivorans* OND^T, an amyolytic lactobacillus isolated from sour starch cassava fermentation. **International Journal of Food Microbiology**, v. 67, p. 217-225, 2001.

HASSAN-BEYGI, S. R.; AGHBASHLO, M.; KIANMEHR, M. H.; MASSAH, J. Drying characteristics of walnut (*Juglans regia* L.) during convection drying. **International Agrophysics**, Lublin, v. 23, p. 129-135, 2009.

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

HENDERSON, S. M. Progress in developing the thin layer drying equation. **Transactions of the ASAE**, v. 17, p. 1167- 1168, 1974.

JAMALI, A.; KOUHILA, M.; AIT MOHAMED, L.; JAOUHARI, J.T.; IDLIMAM, A.; ABDENOURI, N. Sorption isotherms of *Chenopodium ambrosioides* leaves at three temperatures. **Journal of Food Engineering**, v.72, p.77-84, 2006.

JANGAM, S. V.; JOSHI, V. S.; MUNJUMDAR, A. S.; THORAT, B. N. Studies of dehydration of sapota (*Achraszapota*). **Drying Technology**, New York, v. 26. P. 369-377, 2008.

JANGAM, S. V.; MUJUMDAR, A. S. **Drying of Foods, Vegetables and Fruits** - Volume 1. Ed. IN: JANGAM, S. V.; LAW, C. L.; MUNJUNDAR, A. S. Singapura, 2010.

KAIMAK-ERTEKIN, F.; GEDIK, A. Sorption isotherms and isosteric heat of sorption for grapes apricots, apples and potatoes. **Lebensmittel - Wissenschaft und Technologie**, v.37, p. 429- 438, 2004.

KHAZAEI, J.; CHEGINI, G. R.; BAKHSHIANI, M. A novel alternative method for modeling the effects of air temperature and slice thickness on quality and drying kinetics of tomato slices: superposition technique. **Drying Technology**, New York, v. 26, p. 759-775, 2008.

KINGSLEY, R. P.; GOYAL, R. K.; MANIKANTAN, M. R.; ILYAS, S. M. Effects of pretreatments and drying air temperature on drying behaviour of peach slice. **International Journal of Food Science and Technology**, London, v. 42, n. 1, p. 65-69, 2007.

KUAKPETOON, D.; WANG, Y. J. Characterization of Different Starches Oxidized by Hypochlorite. **Starch/ Stärke**, v. 53, n. 5, p. 211-218, 2001.

KUROZAWA, L. E.; EL-AOUAR, A. A.; MURR, F. E. X. Obtenção de isoterma de dessecção de cogumelo in natura e desidratado osmoticamente. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v. 25, n. 4, p. 828-834, 2005.

LABUZA, T. P. Sorption phenomena in foods. **Food Technology**, v. 22, p. 263- 272, 1968.

LABUZA, T. P. The properties of water in relationship to water binding in food: a review. **Journal of Food Engineering**, Essex, v. 25, p. 151-166, 1995.

LACERDA, I. C. A.; MIRANDA, R. L.; BORELLI, B. M.; NUNES, A. C.; NARDI, M. D.; LACHANCE, M. A.; ROSA, C. A. Lactic acid bacteria and yeasts associated with spontaneous fermentations during the production of sour cassava starch in Brazil. **International Journal of Food Microbiology**, v.105, n. 2, abril, p. 213-219, 2005.

LADEIRA, T. M. S; PENA, R. S. Propriedades físico-químicas e tecnológicas dos polvilhos azedos de três cultivares de mandioca. **Alimentos e Nutrição Araraquara**. V. 22. N. 4p. 631- 640, out./dez., 2011.

LAVINA, M. L. **Estimativa da disponibilidade de bagaço de mandioca – resíduo da extração de fécula e polvilho na região Sul Catarinense**. Santa Catarina, 1993. (mimeog.)

LEWIS, L.W. The rate of drying of solid materials. **Industrial Engineering Chemistry**, v.13, n. 1, p. 427, 1921.

LIU, Q. Understanding starches and their role in foods. In: CUI, S. W. (ed). **Food Carbohydrates: Chemistry, Physical Properties and Applications**. Boca Raton : CRC Press, 2005. 309-305 p.

MACHADO, A.C.S.D.V.; DINIZ, I. P.; TEIXEIRA, M. A. V.; BIRCHAL, V. S. Estudo do efeito de secagem por radiação ultravioleta nas propriedades tecnológicas da fécula de mandioca fermentada. **E-xacta**, Belo Horizonte: editor UniBH, v. 5, n. 1, p. 7-14, 2012.

MAEDA, K. C.; CEREDA, M. P. Avaliação de duas metodologias de expansão ao forno do polvilho azedo. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, Campinas, v. 21, n. 2, p. 139-143, 2001.

MARCON, M.J.A. **Efeito do processo fermentativo pelo método tradicional e com adição de glicose, sobre a qualidade do polvilho azedo**. Dissertação (Mestrado em Ciência dos Alimentos) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004, 126 f.

MARCON, M. J. A.; AVANCINI, S. R. P.; AMANTE, E. R.
Propriedades Químicas e Tecnológicas do Amido de Mandioca e do Polvilho Azedo. Florianópolis: Ed. UFSC, 2007.

MARCON, M. J. A.; KURTZ, D. J.; RAGUZZONI, J. C.;
DELGADILLO, I.; MARASCHIN, M.; SOLDI, V.; REGINATTO, V.;
AMANTE, E. R. Expansion properties of sour cassava starch (*Polvilho Azedo*): variables related to its practical application in bakery.
Starch/Stärke, v. 61, n. 12, p. 716-726, 2009.

MARCON, M. J. A. **Proposta para o mecanismo de expansão do polvilho azedo com base nas características físico químicas.** 2009. 187 f. Tese (Doutorado em Ciência dos Alimentos). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2009.

MARCON, M. J. A.; VIERA, G. C. N.; DE SIMAS, K. N.; SANTOS, K.; VIEIRA, M. A.; AMBONI, R. D. M. C.; AMANTE, E. R. Effect of the improved fermentation on physicochemical properties and sensorial acceptability of sour cassava starch. **Brazilian Archives of Biology and Technology**, v. 50, n. 6, p. 1073-1081, 2007.

MARCON, M. J. A.; VIEIRA, M. A.; SANTOS, K.; DE SIMAS, K. N.; AMBONI, R. D. M. C.; AMANTE, E. R. The effect of fermentation on cassava starch microstructure. **Journal of Food Process Engineering**, v. 29, p. 362-372, 2006.

MARDER, R. C.; ARAUJO CRUZ, R.; MORENO, M.; CURRAN, A.; TRIM, D.S. Investigation sour starch production in Brazil. In: DUFOUR, D.; O'BRIEN, G. M.; BEST, R. **Cassava flour and starch: progress in research and development.** Cali: CIRAD/CIAT, 1996. Cap. 28, p. 247-258.

MARTINAZZO, A. P.; CORRÊA, P. C.; RESENDE, O.; MELO, E. C. Análise e descrição matemática da cinética de secagem de folhas de capim-limão. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 11, n. 3, p. 301-306, 2007.

MATTOS, P. L. P de.; GOMES, J de. C. **O cultivo da mandioca.** Cruz das Almas, BA: Embrapa Mandioca e Fruticultura, 2000.122 p.

MESTRES, C.; BOUNGOU, O.; AKISSOE, N.; ZAKHIA, N. Comparison of the expansion ability of fermented maize flour and cassava starch during baking. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v. 80, n. 6, p. 665–672, 2000.

MESTRES, C.; ROUAU, X., Influence of natural fermentation and drying conditions on the physicochemical characteristics of cassava starch. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v. 74, n. 1, p. 147-155, 1997.

MIDILLI, A.; KUCUK, H.; YAPAR, Z. A. New model for single-layer drying. **Drying Technology**, New York, v. 20, n. 7, p. 1503-1513, 2002.

NAKAMURA, I. M.; MORAES, I. O.; MARTUCCI, E. T. Considerações sobre tecnologia da fécula de mandioca fermentada: produção, propriedades físico-químicas e aplicações. **Científica**, v. 4, p. 196-202, 1976.

NUNES, O.L.G.S.; CEREDA M. P. **Metodologia para avaliação da qualidade de fécula fermentada de mandioca (polvilho azedo)**. In: Congresso Brasileiro de Mandioca, Salvador, 1994.

NUNES, O. L. G. S. **Efeito da radiação ultravioleta sobre as propriedades funcionais da fécula de mandioca tratada com ácido láctico**. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 88f, 1994.

NUNES, O. L. G. S. **Avaliação de parâmetros relacionados à expansão de fécula de mandioca ácido-modificada e irradiada com ultravioleta**. Tese (Doutorado em Agronomia - Energia na Agricultura) – Faculdade de Ciências Agrônomicas, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Botucatu, 87 f, 1999.

OLIVEIRA, R.A., OLIVEIRA, W.P. De, PARK, K. J. Determinação da difusividade efetiva de raiz de chicória. **Engenharia Agrícola Jaboticabal**, v.26, n.1, p.181-189, 2006.

OLSEN, K.M.; SCHAAL, B.A. Evidence on the origin of cassava: Phylogeography of *Manihot esculenta*. **Proceedings of the National Academy of Sciences (USA)**, v.96, p.5586-5591, 1999.

- OYEWOLE, O.B. Characteristics and significance of yeasts' involvement in cassava fermentation for 'fufu' production. **International Journal of Food Microbiology**, v.65, n.3, p.213-218, 2001.
- OYEWOLE, O.B.; ODUNFA, S.A. Characterization and distribution of lactic acid bacteria in cassava fermentation during fufu production. **Journal of Applied Bacteriology**, v. 68, n. 2, p.145-152, 1990.
- PANCHARIYA, P. C.; POPOVIC, D.; SHARMA, A. L. Thin-layer modeling of black tea drying process. **Journal of Food Engineering**, Davis, v.52, n.4, p.349-357, 2002.
- PAGE, G. E. **Factors influencing the maximum rates of air drying shelled corn in thin layers**. West Lafayette: Purdue University, 1949.
- PARK, K. J.; BIN, A.; BROD, F. P. R. Obtenção das isotermas de sorção e modelagem matemática para pêra Bartlett (*Pyrus* sp.) com e sem desidratação osmótica. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v. 21, n. 1, p. 73-77, 2001.
- PARK, K. J., VOHNIKOVA, Z., BROD, F.P.R. Evaluation of drying parameters and desorption isotherms of garden mint leaves (*Mentha crispa* L.). **Journal of Food Engineering**, v.51, n.3, p.193-199, 2002.
- PARK, K. J.; YADO, M. K. M.; BROD, F. P. R. Estudo de secagem de pêra Bartlett (*Pyrus* sp.) em fatias. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v. 21, n. 3, p. 288-292, 2001.
- PEREIRA, R.G.F.A. **Avaliação da qualidade do polvilho durante a fermentação em diferentes meios, com e sem adição de inóculos**. Dissertação (Mestrado em Ciência de Alimentos), Lavras: UFLA, 86 p., 1994.
- PINTO, P. H. M. **Tratamento de maniveira de feccularia em biodigestor anaeróbio para disposição em corpo receptor, rede pública ou uso em fertirrigação**. Dissertação (Mestrado em Agronomia). Faculdade de Ciências Agronômicas da Unesp- Campus de Botucatu. 2008, 101 f.

PLATA-OVIEDO, M.; CAMARGO, C. R. Determinação de propriedades físico-químicas e funcionais de duas féculas fermentadas de mandioca (polvilho azedo). **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v. 15, n.1, p. 59 – 65, 1995.

PLATA-OVIEDO, M. S. V; CAMARGO, C. R. Effect of acid treatments and drying processes on physic-chemical and functional properties of cassava starch. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v. 77, n. 1, p. 103-108, 1998.

PLATA-OVIEDO, M. S. V.; **Secagem do amido fermentado de mandioca: modificação química relacionada com a propriedade de expansão e características físico-químicas**. Tese (Doutorado em Tecnologia de Alimentos) - Faculdade de Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 114 p., 1998.

POLA JÚNIOR, A. C. **Análise do processo de produção do polvilho azedo**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Alimentos). Universidade Federal de Santa Catarina- UFSC, Florianópolis, 2013, 152f.

RAHMAN, M. S. **Food Properties Handbook**. Boca Raton: CRC Press, 1995. 86p.

REID, D. S.; FENNEMA, O. R. Água e Gelo. In: DAMODARAN, S.; PARKIN, K., BRANDELLI A., OWEN R., FENNEMA, O. (Ed.). **Química de Alimentos de Fennema**. 4. ed. Porto Alegre: ARTMED, 2010. p. 900.

RESENDE, O.; FERREIRA, L. U.; ALMEIDA, D. P. Modelagem matemática para descrição da cinética de secagem do feijão Adzuki (*Vigna angularis*). **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, Campina Grande, v. 12, n. 2, p. 171-178, 2010.

RIBEIRO, E. P.; SERAVALLI, E. A. G. **Química dos Alimentos**. São Paulo: EdgardBlücher, 2004.

ROMERO-PEÑA, L. M.; KIECKBUSCH, T. G. Influência de condições de secagem na qualidade de fatias de tomate. **Brazilian Journal of Food Technology**, Campinas, v. 6, n.1, p. 69-76, 2003

SAMAPUNDO, S.; DEVLIEGHERE, F.; MEULENAER, B. D.; TUKWASE, A.; LAMBONI, Y.; DEBEVERE, J.M. Sorption isotherms and isosteric heats of sorption of whole yellow dent corn. **Journal of Food Engineering**, v.79, p.168-175, 2007.

SANTOS, T. P. R.; SARTORI, M. M. P.; CABELLO C. Relação entre tempo de exposição e concentração de ácido láctico nas características de expansão do amido de mandioca modificado. **Revista Raízes e Amidos Tropicais**, v. 8, p. 27-35, 2012.

SHIRAI, M. A., FERREIRA, G. F., MATSUGAMA, L. S., FRANCO, C. M. L., DEMIATE, I. M.. Características físico-químicas e utilização em alimentos de amidos modificados por tratamento oxidativo. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, Campinas, v. 27, n. 2, p. 239-247, 2007.

SILVEIRA, I. A. **Isolamento, caracterização e diversidade de bactérias envolvidas na fermentação natural do polvilho azedo**. Tese (Doutorado em Ciência dos Alimentos). Universidade Federal de Lavras, Minas Gerais, 2001, 132 p.

SILVEIRA, I. A. P.; CARVALHO, E. P.; PÁDUA, I. P. M.; DIONÍZIO, F. L.; MARQUES, S. C. Isolamento e caracterização da microbiota ácido-láctica envolvida no processo fermentativo para produção de polvilho azedo. **Revista Científica do UNILAVRAS**, ano 2, n. 2, p. 7-15, jan/jun 2003.

SILVEIRA, I. A. P.; CARVALHO, E. P.; SCHWAN, R. I.; PILON, L. Aspectos gerais e microbiológicos da fermentação da fécula de mandioca para produção de polvilho azedo. **Higiene Alimentar**, v. 14, n. 68/69, p. 26-31, 2000.

SING, K.S.; EVERETT, D.H.; HAUL, R.A.W.; MOSCOU, L.; PIEROTTI, R.A.; ROUQUEIROL, J.; SIEMIENIEWSKA, T. Reporting physisorption data for gas/solid systems: with special reference to the determination of surface area and porosity. **Pure and Applied Chemistry**, v. 57, n. 4, p. 603-619, 1985.

SINGH, R. P.; HELDMAN, D. R. **Introduction to Food Engineering**. ed. 4. Elsevier, 2009.

SINGH, N.; SINGH, J.; KAUR, L.; SODHI, N. S.; GILL, B.S. Morphological, thermal and rheological properties of starches from different botanical sources. Review. **Food Chemistry**, v. 81, p. 219-231, 2003.

TESTER, R.F.; KARKALAS, J, QI, X. Starch – composition, fine structure and architecture. **Journal of Cereal Science**, v.39, p.151-165, 2004.

TOGRUL, I. T.; PEHLIVAN, D. Mathematical modeling of solar drying of apricots in thin layers. **Journal of Food Engineering**, Essex, v. 55, p. 209-216, 2002.

TUNC, S.; DUMAN, O. Thermodynamic properties and moisture adsorption isotherms of cotton seed protein isolate and different forms of cotton seed samples. **Journal of Food Engineering**, v. 81, p. 133-143, 2007.

VANDEPUTTE, G.E.; DELCOUR, J.A. From sucrose to starch granule to starch physical behavior: a focus on rice starch. **Carbohydrate Polymers**, v.58, p.245-266, 2004.

VAN DER BERG, C.; BRUIN, S. Water activity and its estimation in food systems: theoretical aspects. In: ROCKLAND, L. B.; STEWART, G. F. **Water Activity: Influences on Food Quality**. London, Academic Press Inc., 1981, p 1-61.

VAN DER BERG, C. Description of water activity of foods for engineering purposes by means of the GAB model of sorption. In: **Engineering and Food**. London: B. M. McKenna, Elsevier Applied Science, v. 1, p. 311-321, 1984.

VATANASUCHART, N; NAIVIKUL, O.; CHAROENREIN, S.; SRIROTH, K. Molecular properties of cassava starch modified with different UV irradiations to enhance baking expansion. **Carbohydrate Polymers**, v. 61, n. 1, pp. 80–87, 2005.

VILELA, C. A. A.; ARTUR, P. O. Secagem do açafrão (*Curcuma longa* L.) em diferentes cortes geométricos. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v. 28, n. 2. p. 387- 394, 2008.

VILELA, E. R. **A cultura de mandioca no Brasil e no mundo**, 2 ed. Lavras: DCA/ESAL, 1989. p. anexo 1-16.

VILELA, E. R.; FERREIRA, M.G., Tecnologia de produção e industrialização do amido de mandioca. **Informe Agropecuário**, v. 13, n. 145, p. 69-73, 1987.

XANTHOPOULOS, G.; LAMBRINOS, G. R.; MANOLOPOULOU, H. Evaluation of thin layer models for mushroom (*Agaricus bisporus*) drying. **Drying Technology**, New York, v. 25, p. 1470-1481, 2007.

WALTER, M; SILVA, L. P.; EMANUELLI T. Amido resistente: características físico químicas, propriedades fisiológicas e metodologias de quantificação. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.35, n.4, p.974-980, 2005.

WANG, C. Y.; SINGH, R. P. Use of variable equilibrium moisture content in modeling rice drying. **Transaction of ASAE**, St. Joseph, v.11, ASAE Paper n. 78-3001, 1978.

WANG, Z.; SUN, J.; LIAO, X.; CHEN, F.; ZHAO, G.; WU, J.; HU, X. Mathematical modelling on hot air drying of thin layer apple pomace. **Food Research International**, v. 40, p. 39-46, 2007.

WANG, Y.; WANG, L., Physicochemical properties of common and waxy corn starches oxidized by different levels of sodium hypochlorite, **Carbohydrate Polymers**, Oxford, v. 52, p. 207-217, 2003.

ZOBEL, H. F.; STEPHEN, A. M. Starch: Structure, Analysis, and Application. In: **Food Polysaccharides and their Applications**. (Ed.) STEPHEN, A. M. (Ed.) New York, p. 19-65, 1995.

CAPÍTULO 2

SECAGEM AO SOL E EM ESTUFA CONVECTIVA DO AMIDO DE MANDIOCA FERMENTADO

1 INTRODUÇÃO

O polvilho azedo é um derivado do amido de mandioca obtido por fermentação, sendo caracterizado como um amido modificado por oxidação. Pela sua propriedade de expansão característica é utilizado no preparo de produtos panificáveis onde não é necessário a adição de nenhum tipo de fermento. Os biscoitos produzidos com o polvilho azedo têm um volume específico muito elevado, uma estrutura alveolar e crocância que se assemelham a “snacks” extrusados (BERTOLINI et al., 2001; LEONEL; MARTINS; MISCHAN, 2010).

Após a fermentação, o amido de mandioca fermentado é seco tradicionalmente ao sol, seja por sistemas de barcaças ou sobre jiraus cobertos com lonas (MARDER et al., 1996). Os inconvenientes deste tipo de secagem vão desde tempo variável, pois depende diretamente das condições climáticas, necessidade de grandes áreas, até mão de obra e demais inconvenientes relativos à padronização e higiene do produto (WESTBY; CEREDA, 1994; CEREDA; VILPOUX, 2003; POLA-JÚNIOR, 2013; AQUINO; GERVIN; AMANTE, 2016). No entanto, a radiação ultravioleta é indispensável para que o polvilho azedo apresente propriedades de expansão. Embora alguns trabalhos confirmem a possibilidade de secagem com radiação UVC (VATANASUCHART et al., 2003; GARCIA; LEONEL, 2005; VATANASUCHART et al., 2005; BHAT; KARIM, 2009; FRANCO et al., 2010; MACHADO et al., 2012; SANTOS; SARTORI; CABELLO, 2012), a prática atual entre as polvilharias nacionais e de outros países produtores do polvilho azedo continua sendo a secagem solar.

A secagem é um dos métodos mais antigos de conservação de alimentos e tem sido muito utilizada para aumentar a vida útil dos produtos, mas em especial para o amido de mandioca fermentado a etapa de secagem ao sol é fundamental. Com o objetivo de auxiliar os produtores de polvilho azedo, um mercado composto principalmente por pequenas e médias empresas, alguns trabalhos têm sido realizados buscando diminuir o tempo de exposição do amido de mandioca fermentado ao sol (MESTRES; ROUAU, 1997; PLATA-OVIEDO, 1998; POLA JÚNIOR; 2013), como melhoramento para esta parte do processo produtivo, mas sem a necessidade de investimentos elevados. Entretanto, em nenhum dos trabalhos foi estudado o fenômeno da secagem deste produto.

Portanto, é importante o conhecimento das influências que a secagem exerce sobre o material processado (físicas e fenomenológicas), já que a estrutura física do material afeta sensivelmente a transferência de calor e massa.

Na secagem de um material em contato com gás, a uma dada umidade e determinada temperatura, normalmente há um comportamento que pode ser tomado como padrão. Pela elaboração de um gráfico de umidade em função do tempo, durante o processo de secagem, obtém-se para muitos materiais, uma curva de secagem que apresenta geralmente duas etapas principais: uma de taxa de secagem constante e outra, decrescente (GEANKOPLIS, 2003).

Vários são os fatores relevantes nos processos de secagem, dentre os quais estão as condições externas a que os produtos são expostos, onde a temperatura e fluxo do ar (velocidade) apresentam grande importância ao influenciarem os processos de migração e fluxo de água do produto para o meio de secagem, afetando a difusividade e a taxa de remoção de umidade. Condições internas dos produtos, como composição da matriz sólida e teor inicial de umidade, também são importantes, já que determinam as condições iniciais da secagem, o grau de resistência aos movimentos difusionais de umidade e fornecem indicativos das características desejadas ao produto final (VALENTE, 2007).

Os microgrânulos do amido de mandioca, após a etapa de fermentação, resultam perfurados (MARCON, 2009). Estas características microestruturais podem resultar em diferentes mecanismos de transferência de massa e calor. Pesquisas em engenharia de alimentos abrangendo produtos típicos do Brasil podem contribuir para o desenvolvimento nacional.

Diferentes métodos de ajustes e de suavização de curvas de secagem foram comparados por Kemp et al. (2001), com a finalidade de gerar curvas de taxa de secagem em função do tempo ou umidade. Essas curvas devem manter as informações essenciais e serem úteis no projeto do processo e do equipamento de secagem. Muitos métodos populares de processamento de dados, incluindo programas de suavização ou ajuste de equações podem gerar curvas de secagem com resultados equivocados (MORAES, 2013).

Diante do exposto, o presente trabalho tem como objetivo analisar o comportamento da secagem convectiva do amido de mandioca fermentado exposto por diferentes tempos ao sol com secagem continuada em estufa de circulação/renovação de ar em

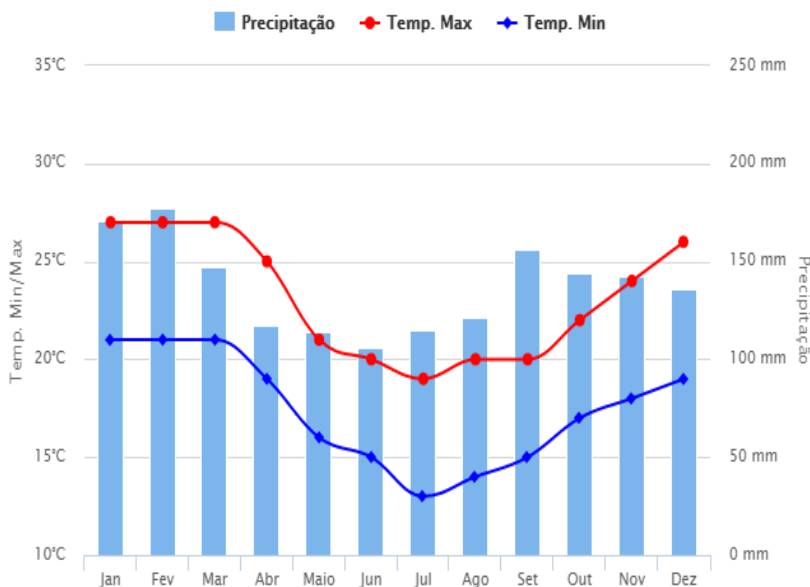
temperaturas distintas, além de selecionar um modelo que melhor represente o comportamento dos dados experimentais de secagem por meio de métodos estatísticos.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Material

A amostra de amido de mandioca fermentado foi fornecida pela fecularia Ouro Branco, localizada na região de Santa Rosa do Sul (SC) (latitude 29° 08' 10" S e longitude 49° 42' 00" W), de um tanque de fermentação com 11 meses, sendo um parâmetro variável nas polvilharias, ocorrendo a partir de 60 a 90 dias. A coleta da amostra de 40 kg de amido de mandioca fermentado foi realizada no mês de junho de 2014, sendo que o amido permaneceu no tanque da polvilharia entre os meses de julho de 2013 a junho de 2014. A temperatura média mínima e máxima desta cidade varia de 13 a 27 °C, conforme ilustrado na Figura 1.

Figura 1 - Precipitação e temperaturas médias mensais máximas e mínimas da cidade de Santa Rosa do Sul (SC), nos últimos 30 anos.



Fonte: Climatempo/ Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) (2016).

A amostra foi coletada e transportada em sacos plásticos. Ao chegar ao laboratório, foi ressuspensa em água mineral, isenta de cloro, em tanques de polipropileno de 38 L de capacidade (35,1 x 29,3 x 53,0). Uma lâmina de água de 20 cm foi deixada sobre o amido fermentado.

Para a retirada de porções da amostra para os experimentos de secagem, a água sobrenadante era retirada e retornada ao tanque após a remoção da amostra.

2.2 Método

2.2.1 Exposição solar e secagem em estufa convectiva

Para as secagens convectivas foi utilizada uma estufa convectiva de circulação/renovação de ar (marca Tecnal, modelo TE-394/2), mantendo a renovação de ar constante.

Em cada experimento as amostras de amido fermentado foram espalhadas em formas circulares de alumínio (diâmetro = 29,5 cm e área = 0,068 m²) revestidas com papel celofane transparente. As amostras foram colocadas sobre o celofane de modo a preencher todo o fundo da forma em uma espessura de camada de amido de 0,5 cm. Foi preparado o número de formas suficiente para cumprir o planejamento de coleta em todas as etapas da secagem nas diferentes condições testadas.

As amostras foram colocadas à exposição solar (das 9 às 16 h) por 7 horas (Figura 2), sendo que a cada hora uma amostra foi retirada do sol, e o restante da secagem finalizada em estufa de circulação e renovação de ar, previamente regulada a 45, 55 ou 65 ± 1,0 °C, sendo que para cada temperatura foi necessário um dia ensolarado para realização do experimento. Nos dias em que ocorreram as secagens em estufa a 45, 55 e 65 °C a temperatura média ambiente estava em 27,37; 31,62 e 27,87 °C, e o índice de radiação ultravioleta em, 10, 11 e 11, respectivamente. Para efeito de comparação, foi realizada a curva de secagem de uma amostra seca totalmente ao sol (temperatura média de 29,15 °C e índice de radiação UV 11) . Uma outra amostra também foi seca totalmente ao sol, sem o acompanhamento da perda de massa, pelo método tradicional utilizado nas polvilharias, com revolvimento do amido fermentado, e o final da secagem determinado pelo mesmo método adotado pelos produtores de polvilho azedo, onde a massa é pressionada nas mãos até que não se perceba mais a formação de aglomerados.

As medições de umidade relativa (UR) no sol, dentro e fora da estufa, foram feitas pelo método do bulbo seco e bulbo úmido, a cada hora após o início das secagens. A velocidade do ar de saída da estufa foi medida com um anemômetro digital portátil (marca Mimica, modelo MDA 11), e foi em média $1,26 \pm 0,06 \text{ m.s}^{-1}$.

Figura 2 - Secagem ao sol das amostras de amido de mandioca fermentado.



Fonte: Acervo do autor.

A perda de massa, das amostras na estufa, foi acompanhada ao longo da secagem até as mesmas atingirem massa constante. As pesagens foram realizadas em balança semi-analítica (Marca Marte modelo AS 5500C, carga máxima de 5.000 g e carga mínima de 0,25 g) a cada 20 minutos.

2.2.2 Cinética e modelagem matemática da secagem

2.2.2.1 Suavização dos dados

Os dados experimentais do teor de umidade em função do tempo de secagem foram ajustados a partir da função de

suavização *sgolayfilt*, do programa Matlab (R2013a, MathWorksInc, MA, USA) (Savitzky-golay). A derivada do ajuste foi calculada a fim de obter a tendência das taxas de secagem do processo.

2.2.2.2 Modelagem matemática

Modelo para separação e avaliação dos dois períodos de secagem

O processo de secagem pode, geralmente, ser dividido em dois períodos: um período de secagem à taxa constante e outro à taxa decrescente. Neste caso uma equação de reta foi ajustada à primeira parte da curva de secagem do processo e uma função polinomial foi usada para representar os dados da curva de secagem relativos ao período de secagem à taxa decrescente. Para definição do final do período de secagem à taxa constante, e conseqüentemente a determinação da umidade crítica, foi utilizado como exigência o coeficiente de determinação da equação da reta.

Os parâmetros dessa primeira fase são o final do período de secagem à taxa constante, a taxa de secagem nesse período (a) e a umidade inicial (X_i), conforme Equação 1.

$$X = at + X_i \quad (\text{Equação 1})$$

O segundo período de secagem baseia-se no ajuste de uma função polinomial, Equação 2.

$$X = C_0 + C_1 t_n + C_2 t_n^2 + C_3 t_n^3 + C_4 t_n^4 \quad (\text{Equação 2})$$

A Equação 3 fornece a taxa de secagem relativa ao período de secagem à taxa decrescente (função polinomial derivada), em que d_1 , d_2 , d_3 e d_4 são parâmetros empíricos do modelo.

$$R = \frac{dx}{dt} = d_1 + 2d_2 t_n + 3d_3 t_n^2 + 4d_4 t_n^3 \quad (\text{Equação 3})$$

O modelo de duas fases foi utilizado para auxiliar na definição dos períodos à taxa constante e taxa decrescente, assim como na determinação da umidade crítica (X_c).

Modelos matemáticos de ampla utilização na literatura

Foram também utilizados outros sete modelos matemáticos empíricos de ampla utilização na literatura em experimentos com material alimentício, cujas equações constam na Tabela 1.

Tabela 1 - Modelos matemáticos aplicados às curvas secagem.

Modelo	Nome do Modelo	Equação	Referência
1	Lewis	$RU = \exp(-K.t)$	Lewis (1921)
2	Page	$RU = \exp(-k.t^n)$	Page (1949)
3	Henderson e Pabis	$RU = a.\exp(-k.t)$	Henderson, Pabis (1961)
4	Wang e Singh	$RU = 1 + at + bt^2$	Wang , Singh (1978)
5	Midilli	$RU = a.\exp(-k.t^n) + b.t$	Midilli et al. (2002)
6	Aproximação da difusão	$RU = a.\exp(-k.t) + (1-a).\exp(-k.b.t)$	Wang et al. (2007)
7	Logarítmico	$RU = a.\exp(-k.t) + c$	Togrul, Pehlivan (2002)

RU : adimensional de umidade; k : constante de secagem (min^{-1}); t : tempo (min); a, b, c, n : constantes experimentais(adimensionais).

Fonte: adaptado de Doymaz (2005).

O valor adimensional de umidade foi calculado pela Equação 4.

$$RU = \frac{U_t - U_{eq}}{U_0 - U_{eq}} \quad (\text{Equação 4})$$

Onde:

U_t = umidade absoluta, base seca, *b.s.*

U_{eq} = umidade de equilíbrio, *b.s.*

U_0 = umidade inicial, *b.s.*

O ajuste dos modelos matemáticos aos dados experimentais de secagem foi realizado pela análise de regressão não linear, pelo método Quasi-Newton, utilizando o programa computacional STATISTICA 8.0®.

Para avaliar a qualidade dos ajustes dos modelos matemáticos (Tabela 1) aos dados experimentais, foram utilizados como critérios de ajuste a análise do coeficiente de determinação (R^2), gerado pelo próprio software Statistica, raiz do quadrado médio do erro (RQME) e o qui-quadrado reduzido (χ^2), que levam em consideração as respostas observadas experimentalmente e os valores preditos pelo modelo, conforme Equações 5 e 6, respectivamente.

$$RQME = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (RU_{pred} - RU_{exp})^2 \right]^{1/2} \quad (\text{Equação 5})$$

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (RU_{exp} - RU_{pred})^2}{N-V} \quad (\text{Equação 6})$$

Onde:

χ^2 = qui-quadrado reduzido;

RQME = raiz do quadrado médio do erro;

RU_{exp} = adimensional de umidade observado experimentalmente;

RU_{pred} = adimensional de umidade predito pelo modelo;

N = número de pontos experimentais;

V = número de coeficientes e constantes.

Para ser considerado de bom ajuste, o modelo deve alcançar valores de coeficiente de regressão linear (R^2) mais elevados e próximos possíveis da unidade (1,0) e, concomitantemente, os valores de R X^2 mais baixos e próximos de zero.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O tempo de secagem ao sol representa um importante gargalo tecnológico na produção do polvilho azedo. Por isso, trabalhos sobre a secagem do polvilho azedo, ao sol apenas, ou associada à secagem mecânica, são muito importantes, construindo o conhecimento teórico necessário a ações futuras visando reduzir o tempo de secagem ao sol, sem comprometer as características do produto.

As curvas de secagem são apresentadas em umidade em base seca (b.s.) e taxa de secagem em função do tempo, para o amido fermentado seco totalmente ao sol (Figura 3) e para os expostos ao sol por 1, 2, 3, 4, 5, 6 e 7 horas, e o restante da secagem concluída em estufa de circulação/renovação de ar a 45, 55 e 65 °C (Figura 4). As curvas de taxa de secagem ilustradas nas Figuras 3 e 4 foram obtidas pela derivada da suavização dos dados experimentais de perda de massa em função do tempo, com a função *sgolayfilt* (filtro Savtsky- Golay), cujo objetivo foi de minimizar os ruídos dos dados experimentais. Os resultados dos ajustes dos outros modelos testados serão mostrados posteriormente.

É possível observar (Figura 4) que a temperatura influenciou na secagem do amido fermentado, ocorrendo um decréscimo do teor de água mais pronunciado em função do aumento da temperatura do ar de secagem.

Durante o processo de secagem o ar sofre um aquecimento com umidade absoluta constante, permitindo a redução da umidade relativa do ar de secagem, e quanto maior a temperatura do ar de secagem menor a umidade relativa. Quando o ar aquecido atravessa a camada do alimento úmido ele sofre um processo de resfriamento e de umidificação à entalpia constante. Nesse processo existe transferência de calor para o alimento e transferência de massa de vapor d'água para o ar (FERREIRA, 2004). Desta forma, temperaturas maiores podem aumentar a velocidade de migração de água do interior para a superfície do produto (REIS et al., 2013), o que pode explicar o fato de que em temperaturas maiores o tempo de secagem para atingir a umidade de equilíbrio foi menor.

Comportamento semelhante foi observado por Taiwo et al. (2010) que estudaram a cinética de secagem do produto fermentado de mandioca conhecido como “gari”, em secador rotativo e verificaram que o teor de umidade decresce conforme a temperatura do ar aumenta, e isto foi atribuído a rápida liberação de umidade dos poros do material. Kotovicz (2011), com os dados experimentais da secagem do “yacon”, também verificaram que o aumento da temperatura favoreceu o decréscimo da umidade, atingindo a umidade de equilíbrio mais rapidamente. Vilhalva et al. (2012) observaram que a temperatura e o fluxo do ar influenciaram na cinética de secagem da casca de mandioca proveniente de resíduos de indústria de amido, pois com o aumento das duas variáveis o tempo de secagem foi reduzido. Aviara et al. (2014) trabalhando com a secagem do amido de mandioca nativo em secador de bandejas observaram que o teor de umidade de equilíbrio e o tempo de secagem diminuíram com o aumento da temperatura.

Considerando que o final da secagem em estufa ocorreu quando o amido atingiu umidade de $0,03 \text{ g H}_2\text{O} \cdot \text{g}_{\text{ss}}^{-1}$, o tempo de exposição ao sol também tem influência sobre a secagem já que houve uma redução do tempo de secagem do amido fermentado de mandioca em estufa, com o aumento do tempo de exposição solar.

A exposição solar também promove a secagem porque o sol funciona como fonte de calor, que juntamente com a ação do vento promove a secagem dos alimentos, entretanto o processo é lento e a umidade de equilíbrio é maior, como pode ser observado na Figura 3 quando comparada à curva de secagem totalmente ao sol com as secagens ao sol seguidas de secagem em estufa convectiva.

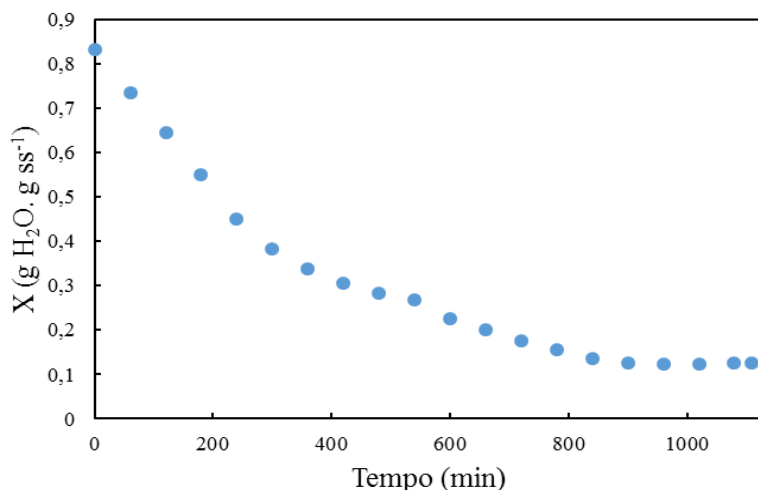
O tempo de secagem ao sol, quando seco totalmente ao sol, para o amido fermentado atingir umidade de equilíbrio, com valor de 0,126

(g H₂O. g_{ss}⁻¹), foi de 900 minutos, enquanto que para atingir a mesma umidade em uma hora de exposição solar, e secagem em estufa convectiva a 45, 55 e 65 °C, o tempo, somente em estufa, já foi reduzido para 300, 240 e 180 minutos, respectivamente. As maiores reduções no tempo de secagem ocorreram na temperatura de 65 °C.

Os maiores valores de taxa de secagem foram encontrados sempre para as amostras expostas ao sol com secagem continuada em estufa a 65 °C, sendo que entre 60 e 100 minutos as taxas de todas as temperaturas se aproximam, com exceção da amostra seca totalmente em estufa, na qual a aproximação das taxas ocorre próximo dos 200 minutos. No decorrer da secagem de todas as amostras secas a 65 °C as taxas de remoção de água vão diminuindo, e a velocidade de secagem parece ser controlada pela difusão da água do interior do material para a superfície da amostra. Isto pode estar relacionado a uma ligação mais forte da água com o amido fermentado de mandioca na temperatura de 65 °C em relação às temperaturas de 45 e 55 °C, já que a temperatura de 65°C está muito próxima da temperatura de gelatinização deste produto.

Quando se compara a taxa de secagem do amido fermentado de mandioca seco totalmente ao sol, com a taxa do exposto ao sol com secagem continuada em estufa, é encontrada menor taxa de secagem naquele que foi seco totalmente ao sol, o que comprova que ao sol a secagem ocorre mais lentamente.

Figura 3 - Cinética de secagem do amido de mandioca fermentado seco totalmente ao sol.



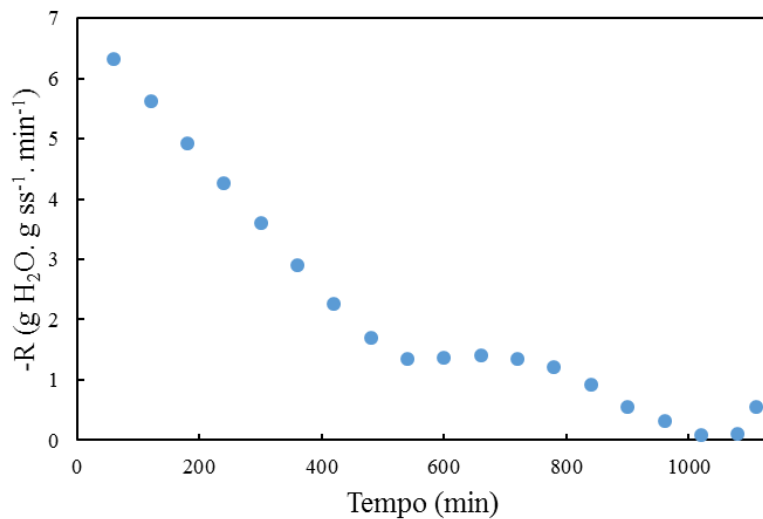
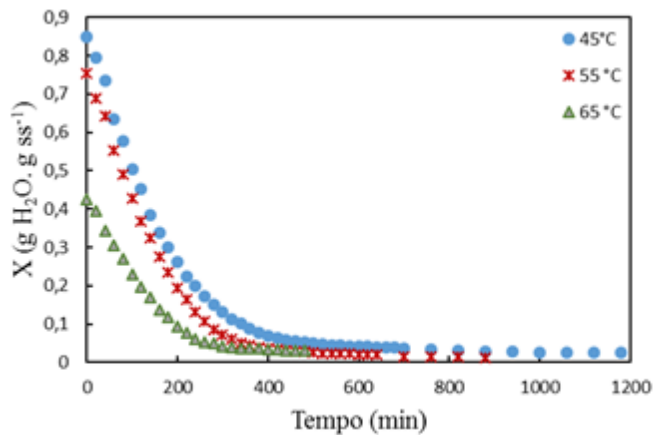
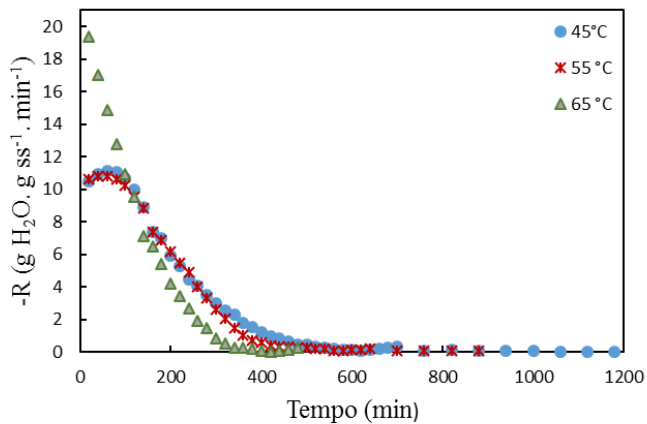


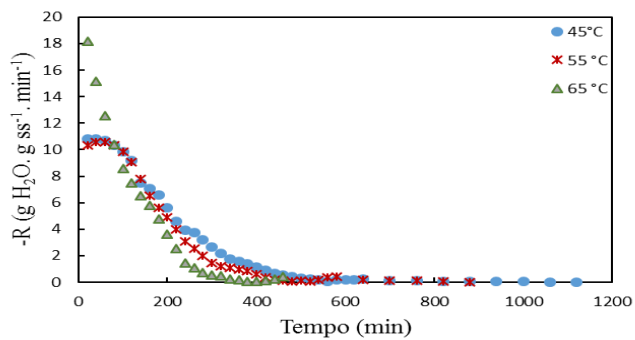
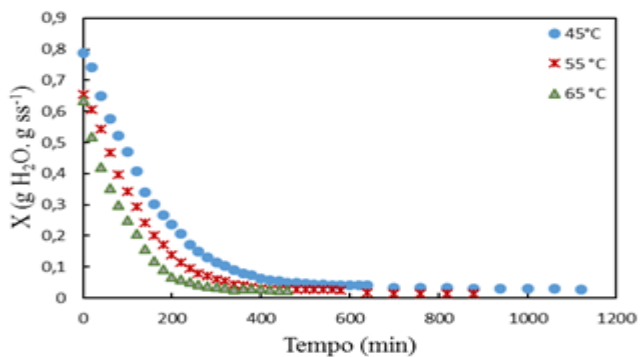
Figura 4 - Cinética de secagem do amido de mandioca fermentado exposto ao sol por diferentes tempos com secagem continuada em estufa a temperatura de 45, 55 e 65 °C.

1 h ao sol

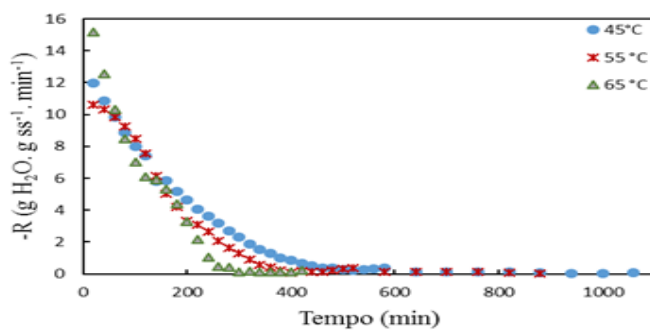
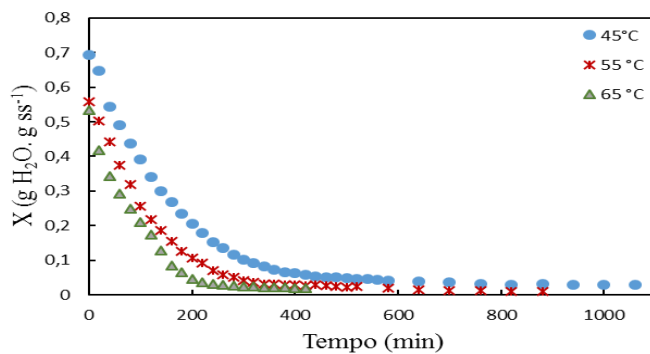




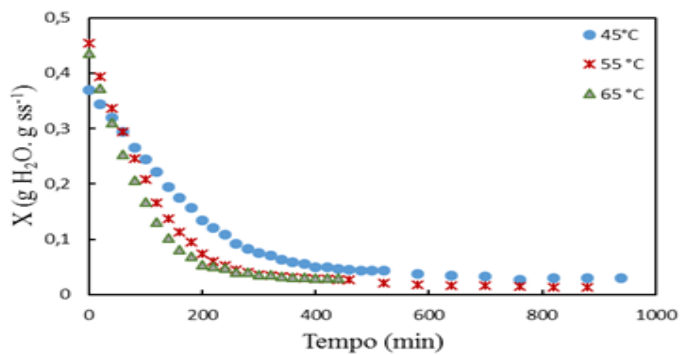
2 h ao sol

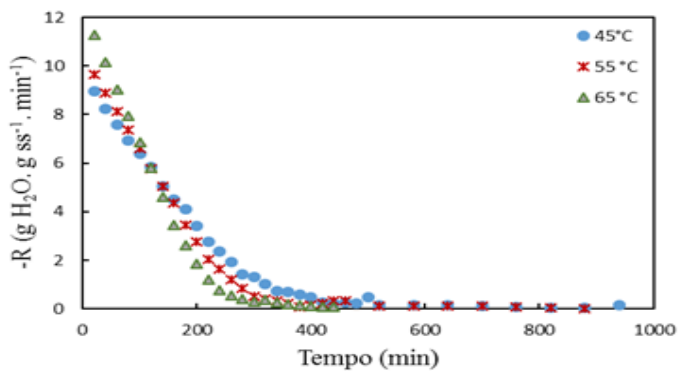


3 h ao sol

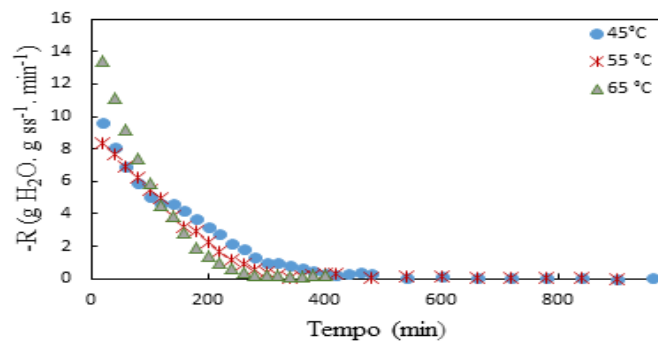
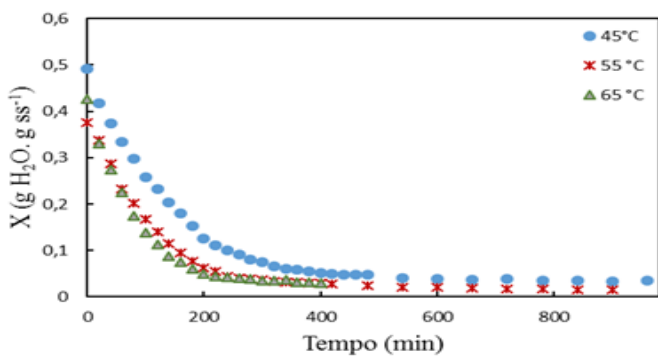


4 h ao sol

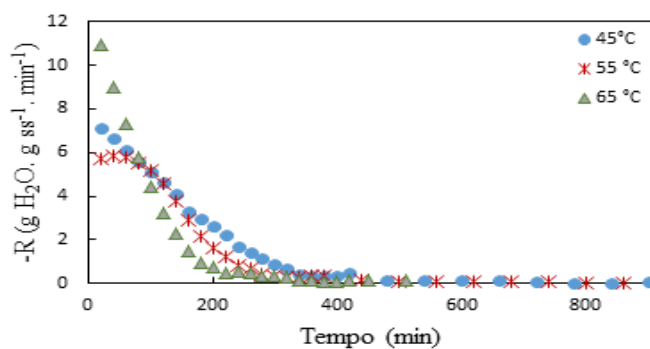
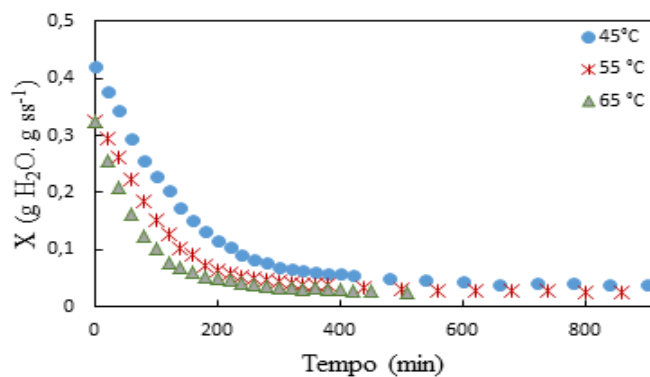




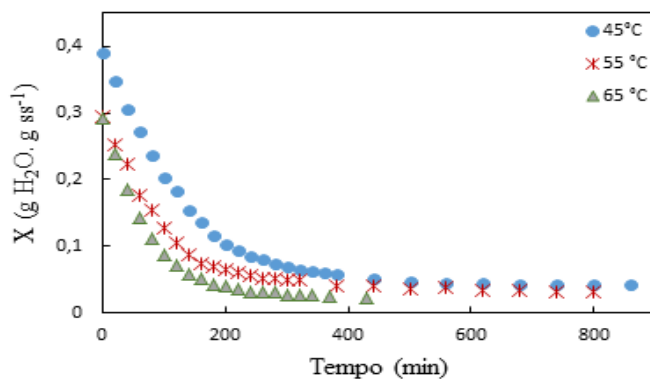
5 h ao sol

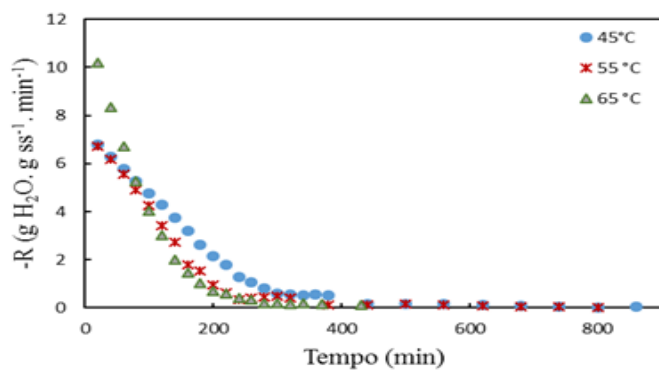


6 h ao sol

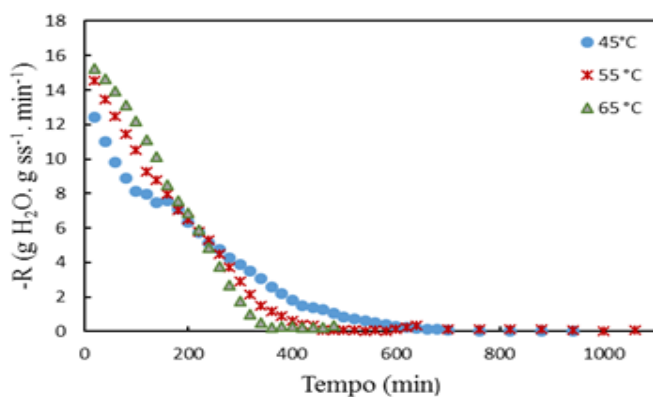
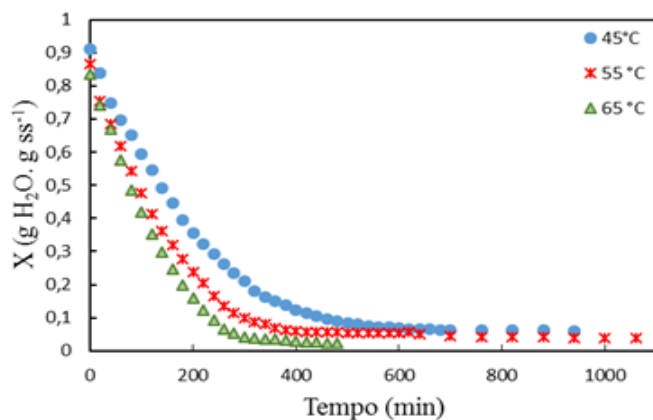


7 h ao sol





Estufa



Observando a tendência das curvas de taxa de secagem suavizadas em função do tempo (Figura 4), é possível verificar que os amidos fermentados de mandioca secos em estufa convectiva a 45 °C e expostos ao sol por 1 e 2 h, e a 55 °C e expostos ao sol por 1, 2 e 6 h ao sol apresentaram dois períodos distintos de secagem. Primeiramente, um período à taxa constante, em que predomina a evaporação da água livre na superfície do material, e é controlado pelas condições do ar de secagem, seguido de um período à taxa decrescente, que indica que a migração interna da umidade para a superfície não conseguiu suprir a taxa de evaporação na superfície. No período de taxa decrescente o processo de transferência de massa não é mais controlado pelas condições do ar de secagem, mas sim pela difusão da água através do alimento (McCABE; SMITH; HARRIOT, 1980; PERRY; CHILTON, 1980; FOUST et al., 1982).

Os demais amidos fermentados e secos em estufa a 45, 55 °C e todos que foram secos a 65 °C e totalmente ao sol não apresentaram um período de taxa constante definido, o que indica que a secagem destas amostras ocorreu em período de taxa decrescente. Isto ocorre porque durante a etapa de taxa constante a superfície do amido fermentado está saturada de água, formando um filme contínuo de água sobre o sólido, e desta forma a água não tem resistência para sair do amido fermentado. Sendo assim, na temperatura mais elevada, 65 °C, a água da superfície foi rapidamente evaporada e as resistências a transferência de água encontram-se essencialmente no interior do alimento, passando logo em seguida para a etapa de secagem decrescente, dificultando a visualização do período de taxa constante. Da mesma forma, quando as amostras ficam por mais tempo expostas ao sol, há menor quantidade de água na superfície para evaporar, e as resistências a transferências de massa encontram-se no interior do produto.

A interpretação das curvas de taxa de secagem suavizadas deve ser cautelosa, já que elas podem levar a erros quanto à visualização dos fenômenos de transferência de massa e calor que controlam o processo de secagem, pois por estas curvas não é possível visualizar os períodos de taxa constante que podem existir para algumas amostras (MORAES, 2013). Por este motivo, além da interpretação das curvas de taxa de secagem suavizadas, os dados experimentais também foram avaliados levando em consideração a separação da curva em duas fases, uma a taxa constante em que uma reta foi ajustada aos dados que representam a fase inicial da secagem, sendo a fase de taxa constante assumida somente com R^2 maior ou igual a 0,99. Para a segunda fase que é a

decrecente, foi ajustada uma função polinomial, como ilustra a Figura 5 para o amido fermentado de mandioca, que como exemplo foi pego o seco totalmente ao sol. Os parâmetros dos modelos linear e polinomial são apresentados nas Tabelas 2.

Tabela 2 - Parâmetros dos ajustes da fase linear e decrescente para o modelo de duas fases para a secagem do amido fermentado de mandioca (polvilho azedo).

FASE LINEAR			45 °C		
Amostra	a	b	a	b	R²
1 h ao sol	-0,0035	0,8568	-0,0035	0,8568	0,9942
2 h ao sol	-0,0033	0,7906	-0,0033	0,7906	0,9904
3 h ao sol	-0,0033	0,6965	-0,0033	0,6965	0,9903
4 h ao sol	-0,0028	0,5826	-0,0028	0,5826	0,9984
5 h ao sol	-0,0024	0,4766	-0,0024	0,4766	0,9908
6 h ao sol	-0,0021	0,4213	-0,0021	0,4213	0,9952
7 h ao sol	-0,0019	0,3870	-0,0019	0,3870	0,9980
Estufa	-0,0028	0,8895	-0,0028	0,8895	0,9900
FASE LINEAR			55 °C		
Amostra	a	b	a	b	R²
1 h ao sol	-0,0033	0,7567	-0,0033	0,7567	0,9949
2 h ao sol	-0,0033	0,6646	-0,0033	0,6646	0,9933
3 h ao sol	-0,0030	0,5600	-0,0030	0,5600	0,9992
4 h ao sol	-0,0027	0,4500	-0,0027	0,4500	0,9945
5 h ao sol	-0,0024	0,3801	-0,0024	0,3801	0,9926
6 h ao sol	-0,0017	0,3270	-0,0017	0,3270	0,9972
7 h ao sol	-0,0019	0,2939	-0,0019	0,2939	0,9932
Estufa	-0,0038	0,8454	-0,0038	0,8454	0,9922
FASE LINEAR			65 °C		
Amostra	a	b	a	b	R²
1 h ao sol	-0,0052	0,7456	-0,0052	0,7456	0,9909

2 h ao sol	-0,0047	0,6245	0,9853
3 h ao sol	-0,0047	0,5268	0,9824
4 h ao sol	-0,0031	0,4356	1,000
5 h ao sol	-0,0030	0,4084	0,9766
6 h ao sol	-0,0029	0,3212	0,9907
7 h ao sol	-0,0027	0,2933	0,9999
Estufa	-0,0043	0,8343	0,9984

Totalmente ao sol

FASE LINEAR		a		b		R²	
Amostra		-0,0016		0,8315		0,9997	
Sol		45°C					

FASE DECRESCENTE

Amostra	C₀	C₁	C₂	C₃	C₄	R²
1 h ao sol	0,8401	-0,0044	9×10^{-6}	-8×10^{-9}	2×10^{-12}	0,9985
2 h ao sol	0,7914	-0,0043	9×10^{-6}	-8×10^{-9}	3×10^{-12}	0,9981
3 h ao sol	0,6945	-0,0038	8×10^{-6}	-8×10^{-9}	3×10^{-12}	0,9993
4 h ao sol	0,6003	-0,0036	8×10^{-6}	-9×10^{-9}	3×10^{-12}	0,9985
5 h ao sol	0,4872	-0,0029	7×10^{-6}	-7×10^{-9}	3×10^{-12}	0,9975
6 h ao sol	0,4269	-0,0026	7×10^{-6}	-8×10^{-9}	3×10^{-12}	0,9982
7 h ao sol	0,3858	-0,0024	7×10^{-6}	-8×10^{-9}	3×10^{-12}	0,9963
Estufa	0,9758	-0,0045	8×10^{-6}	-7×10^{-9}	2×10^{-12}	0,9996

Amostra	d₁	d₂	d₃	d₄
1 h ao sol	-0,0044	$1,8 \times 10^{-5}$	$-2,4 \times 10^{-8}$	8×10^{-12}
2 h ao sol	-0,0043	$1,8 \times 10^{-5}$	$-2,4 \times 10^{-8}$	$1,2 \times 10^{-11}$
3 h ao sol	-0,0038	$1,6 \times 10^{-5}$	$-2,4 \times 10^{-8}$	$1,2 \times 10^{-11}$
4 h ao sol	-0,0036	$1,6 \times 10^{-5}$	$-2,7 \times 10^{-8}$	$1,2 \times 10^{-11}$

FASE DECRESCENTE							
55°C							
Amostra	C ₀	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	R ²	
1 h ao sol	0,8870	-0,0058	1 x 10 ⁻⁵	-2 x 10 ⁻⁸	6 x 10 ⁻¹²	0,9988	1,2 x 10 ⁻¹¹
2 h ao sol	0,7153	-0,0049	1 x 10 ⁻⁵	-1 x 10 ⁻⁸	6 x 10 ⁻¹²	0,9989	1,2 x 10 ⁻¹¹
3 h ao sol	0,5443	-0,0038	1 x 10 ⁻⁵	-1 x 10 ⁻⁸	5 x 10 ⁻¹²	0,9984	1,2 x 10 ⁻¹¹
4 h ao sol	0,4585	-0,0034	1 x 10 ⁻⁵	-1 x 10 ⁻⁸	5 x 10 ⁻¹²	0,9950	8 x 10 ⁻¹²
5 h ao sol	0,3693	-0,0027	8 x 10 ⁻⁶	-1 x 10 ⁻⁸	4 x 10 ⁻¹²	0,9926	
6 h ao sol	0,3047	-0,0021	6 x 10 ⁻⁶	-8 x 10 ⁻⁹	3 x 10 ⁻¹²	0,9886	
7 h ao sol	0,2653	-0,0019	6 x 10 ⁻⁶	-8 x 10 ⁻⁹	4 x 10 ⁻¹²	0,9847	
Estufa	0,9142	-0,0055	1 x 10 ⁻⁵	-1 x 10 ⁻⁸	4 x 10 ⁻¹²	0,9970	
Amostra	d ₁	d ₂	d ₃	d ₄			
1 h ao sol	-0,0058	2 x 10 ⁻³	-6 x 10 ⁻⁸	2,4 x 10 ⁻¹¹			
2 h ao sol	-0,0049	2 x 10 ⁻⁵	-3 x 10 ⁻⁸	2,4 x 10 ⁻¹¹			
3 h ao sol	-0,0038	2 x 10 ⁻⁵	-3 x 10 ⁻⁸	2 x 10 ⁻¹¹			
4 h ao sol	-0,0034	2 x 10 ⁻⁵	-3 x 10 ⁻⁸	2 x 10 ⁻¹¹			
5 h ao sol	-0,0027	1,6 x 10 ⁻⁵	-3 x 10 ⁻⁸	1,6 x 10 ⁻¹¹			
6 h ao sol	-0,0021	1,2 x 10 ⁻⁵	-2,4 x 10 ⁻⁸	1,2 x 10 ⁻¹¹			
7 h ao sol	-0,0019	1,2 x 10 ⁻⁵	-2,4 x 10 ⁻⁸	1,6 x 10 ⁻¹¹			
Estufa	-0,0055	2 x 10 ⁻⁵	-3 x 10 ⁻⁸	1,6 x 10 ⁻¹¹			
FASE DECRESCENTE							
65°C							
Amostra	C ₀	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	R ²	

1 h ao sol	0,7028	-0,0053	1×10^{-5}	-1×10^{-8}	0	0,9992
2 h ao sol	0,6236	-0,0051	1×10^{-5}	-1×10^{-8}	0	0,9972
3 h ao sol	0,5271	-0,0044	1×10^{-5}	-1×10^{-8}	0	0,9940
4 h ao sol	0,4333	-0,0037	1×10^{-5}	-1×10^{-8}	0	0,9969
5 h ao sol	0,3563	-0,0031	1×10^{-5}	-1×10^{-8}	0	0,9967
6 h ao sol	0,3003	-0,0031	1×10^{-5}	-3×10^{-8}	2×10^{-11}	0,9941
7 h ao sol	0,2376	-0,0020	7×10^{-6}	-7×10^{-9}	0	0,9909
Estufa	0,8293	-0,0046	4×10^{-6}	2×10^{-8}	-2×10^{-11}	0,9992
Amostra	d₁	d₂	d₃	d₄		d₄
1 h ao sol	-0,0053	2×10^{-5}	-3×10^{-8}	0		0
2 h ao sol	-0,0051	2×10^{-5}	-3×10^{-8}	0		0
3 h ao sol	-0,0044	2×10^{-5}	-3×10^{-8}	0		0
4 h ao sol	-0,0037	2×10^{-5}	-3×10^{-8}	0		0
5 h ao sol	-0,0031	2×10^{-5}	-3×10^{-8}	0		0
6 h ao sol	-0,0031	2×10^{-5}	-9×10^{-8}	8×10^{-11}		8×10^{-11}
7 h ao sol	-0,0020	$1,4 \times 10^{-5}$	$-2,1 \times 10^{-8}$	0		0
Estufa	-0,0046	8×10^{-6}	6×10^{-8}	-8×10^{-11}		-8×10^{-11}
FASE DECRESCENTE						
Totalmente ao sol						
Amostra	C₀	C₁	C₂	C₃	C₄	R²
Sol	0,6513	-0,001	5×10^{-7}	0	0	0,9934
Amostra	d₁	d₂	d₃	d₄		d₄
Sol	-0,001	1×10^{-6}	0	0		0

Derivando as equações apresentadas no ajuste de cada fase, foi possível obter a curva de secagem de taxa em função da umidade calculada em comparação com a suavização do filtro Savitzky- Golay e os dados experimentais, que como exemplo será ilustrada também a curva para secagem realizada totalmente ao sol (Figura 6). Para o restante das amostras, a comparação das taxas de secagem em função da umidade para os dados experimentais da secagem do polvilho azedo, função de suavização Savitzky- Golay e modelo de duas fases, foi colocada no Apêndice A.

Figura 5 - Separação dos dados experimentais da curva de secagem do polvilho azedo realizada totalmente ao sol em duas fases.

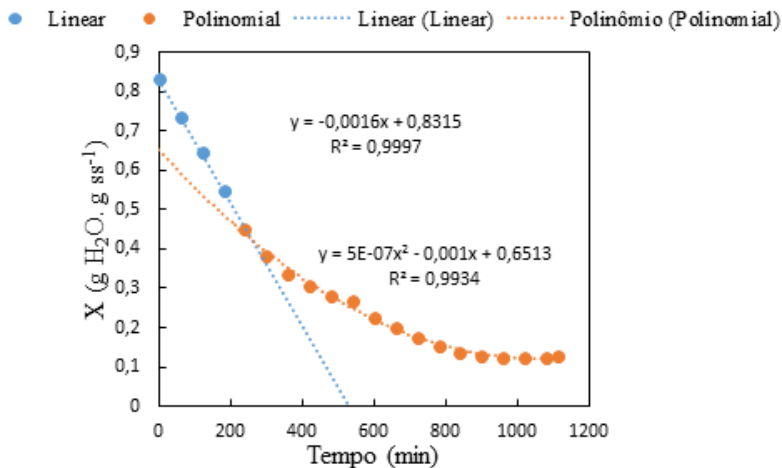
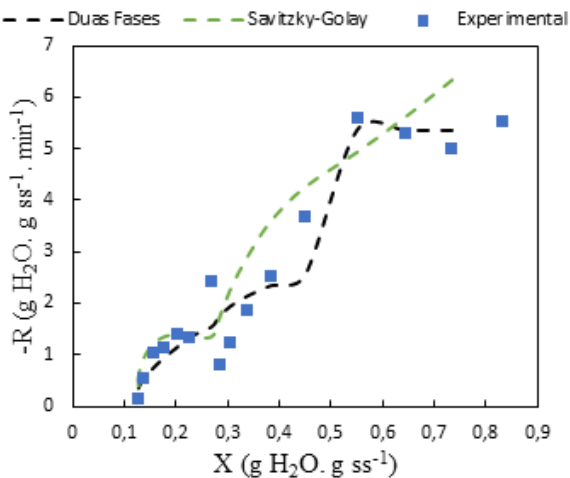


Figura 6 - Comparação das taxas de secagem em função da umidade para os dados experimentais da secagem do polvilho azedo, função de suavização Savitzky- Golay e modelo de duas fases.



Com base nos dados de taxa em função da umidade (Figura 6), utilizando o ajuste do modelo que separa a curva em duas fases, é possível observar que a amostra seca totalmente ao sol apresenta dois períodos de secagem, um a taxa constante e outro a taxa decrescente, contrário ao que foi dito anteriormente quando somente a análise dos dados de taxa suavizados foi realizada. O mesmo comportamento, onde através da utilização do modelo de duas fases e dos dados experimentais, foi verificada a existência de uma taxa constante, ocorreu para todo o amido fermentado exposto ao sol por 1, 2, 3, 4 e 5 h e seco em estufa a 45 °C e secagem totalmente em estufa, seco a 55 °C e exposto ao sol por 1, 2, 3, 6 h e totalmente em estufa, e seco totalmente em estufa a 65 °C, conforme Apêndice A.

Desta forma, verificou-se que apesar de a suavização dos dados ser útil na minimização dos ruídos dos dados experimentais, uma avaliação mais criteriosa utilizando um outro modelo, como o de duas fases deve ser avaliado conjuntamente para que os resultados de interpretação dos fenômenos de secagem não tenham interpretações equivocadas.

De um modo geral, as amostras secas nas temperaturas de secagem de 45 e 55 °C, com maior tempo de exposição solar, não apresentaram um período de secagem à taxa constante. Isto ocorreu

provavelmente porque quanto mais tempo o amido fica exposto ao sol, menor quantidade de água há na superfície do material para evaporar, sendo a maior parte da umidade encontrada no interior do produto e a taxa de reposição de água do interior para a superfície não é suficiente para suprir a taxa de evaporação da área superficial. Para as amostras secas a 65 °C, e exposta por diferentes tempos ao sol, nenhuma delas apresentou período de secagem à taxa constante, nos diferentes tempos de exposição solar.

Estudando a secagem do amido de mandioca nativo em secador pneumático- *flash dryer* Geraldí (2006) observou que as curvas de taxa de secagem para o amido apresentaram um período de acomodação do material ao processo, e também um período de taxa constante e um período de taxa decrescente.

O amido de mandioca fermentado exposto ao sol e seco em estufa convectiva a 65°C não apresentaram taxa de secagem constante nos diferentes tempos ao sol. Segundo estudos realizados por Marcon et al. (2009) utilizando análise térmica (DSC), os amidos fermentados secos em estufa e ao sol iniciaram o processo de gelatinização a temperatura de 64,06 e 63,65 °C, respectivamente, ou seja, em temperaturas inferiores a 65 °C. Sendo assim, este pode ter sido o motivo das amostras secas nesta temperatura não terem apresentado o período de secagem constante, já que o início do processo de gelatinização pode ter aumentando o número de ligações entre a água e o amido fermentando de mandioca, e desta forma, a resistência a transferência de massa encontra-se no interior do produto, fazendo com que a taxa de evaporação da superfície do ar ambiente seja superior a taxa de reposição de umidade do interior à superfície do material. Desta forma, a temperatura de 65 °C não seria recomendada para a secagem deste tipo de produto, já que esta está próxima da temperatura de gelatinização do amido.

Ausência de períodos de secagem à taxa constante, apresentando apenas períodos de secagem à taxa decrescente também foram relatados por Guiné et al. (2007) na secagem solar de diferentes variedades de pêras; por Simal et al. (2005) na secagem de kiwi em temperatura de 30 a 90 °C e por Famurewa e Emuekele (2015) na secagem de chips de mandioca usando secador de leito fluidizado.

A Tabela 3 ilustra os valores de umidade crítica e os tempos para atingi-las em estufa convectiva. Estes valores foram obtidos a partir das curvas de taxa de secagem em função da umidade do amido de mandioca fermentado, levando-se em consideração o modelo de duas

fases. A fase constante foi assumida enquanto R^2 apresentou-se maior ou igual a 0,99, e a umidade crítica definida como o final da taxa de secagem constante e início da fase decrescente.

Tabela 3 - Valores aproximados de umidade crítica e tempo para atingi-las, para o amido de mandioca fermentado seco ao sol e em estufa convectiva, nas diferentes temperaturas de secagem.

Amostras	45 (°C)		55 (°C)		65 (°C)	
	X_c^*	Tempo (min)	X_c^*	Tempo (min)	X_c^*	Tempo (min)
1 h ao sol	0,45	120	0,43	100	-	-
2 h ao sol	0,47	100	0,39	80	-	-
3 h ao sol	0,43	80	0,32	80	-	-
4 h ao sol	0,41	60	-	-	-	-
5 h ao sol	0,30	80	-	-	-	-
6 h ao sol	-	-	0,18	80	-	-
7 h ao sol	-	-	-	-	-	-
Estufa	0,44	160	0,47	100	0,42	80
Sol	0,55	180				

* X_c = Umidade crítica ($\text{g H}_2\text{O} \cdot \text{g}_{\text{ss}}^{-1}$)

Os valores de umidade crítica tiveram redução nos tempos de exposição solar a partir de 3 h ao sol quando secos em estufa a 45 °C, com tempo para atingir a X_c em torno de 60 e 80 minutos. Uma redução a partir de 1 h de exposição solar, na temperatura de 55 °C também pode ser verificada para X_c , levando 80 min. para atingi-las a partir de 2 h ao sol.

Através das curvas de secagem foi possível determinar o tempo necessário para que o amido de mandioca fermentado atingisse umidade de 14 %, umidade na qual o polvilho azedo é comercializado. A Tabela 4 ilustra o tempo necessário de secagem em estufa convectiva, para que o amido fermentado atinja umidade próxima de 14 %, em cada uma das condições experimentais. O tempo total de secagem é a soma do tempo de exposição ao sol com o tempo de estufa apresentado para cada uma das amostras.

Tabela 4 - Tempo de secagem em estufa convectiva a 45, 55 e 65 °C, para o amido fermentado de mandioca atingir umidade inferior a 14 %.

Amostras	Tempo de secagem em estufa (h)			Tempo total de secagem (sol + estufa) (h)		
	45 (°C)	55 (°C)	65(°C)	45 (°C)	55 (°C)	65 (°C)
1 h ao sol	4,7	4,0	2,7	5,7	5,0	3,7
2 h ao sol	4,3	3,3	2,3	6,3	5,3	4,3
3 h ao sol	4,0	2,7	2,2	7,0	5,7	5,2
4 h ao sol	3,3	2,3	1,8	7,3	6,3	5,8
5 h ao sol	3,0	2,0	1,7	8,0	7,0	6,7
6 h ao sol	2,7	1,7	1,2	8,7	7,7	7,2
7 h ao sol	2,3	1,3	1,0	9,3	8,3	8,0
Estufa	6,0	4,3	3,3	6,0	4,3	3,3
Sol*	13,0					

*Secagem realizada totalmente ao sol.

Quando comparado o tempo de secagem ao sol com o tempo de secagem em estufa convectiva, é possível verificar que a estufa reduz o tempo total de secagem (sol mais estufa). Enquanto que para atingir umidade de 14 %, a secagem totalmente ao sol necessitou de 13,0 h, a secagem ao sol combinada com estufa foi realizada em tempos consideravelmente menores.

Na Tabela 5 são ilustrados os valores de coeficientes de regressão (R^2), qui-quadrado reduzido (χ^2) e raiz quadrada média do erro (RQME), obtidos nos ajustes dos modelos de Lewis (1), Page (2), Henderson e Pabis (3), Wang e Singh (4), Midilli (5), Aproximação da Difusão (6) e Logarítmico (7) aos dados experimentais de secagem do amido de mandioca fermentado.

Tabela 5 - Valores obtidos dos coeficientes de regressão (R^2), qui-quadrado reduzido (χ^2) e raiz quadrada média do erro (RQME), para os modelos de Lewis (1), Page (2), Henderson e Pabis (3), Wang e Singh (4), Midilli (5), Aproximação da Difusão (6) e Logarítmico (7) ajustados aos dados experimentais de secagem do polvilho azedo a 45, 55 e 65 °C.

Amostra	Modelo	Temperatura de secagem 45 °C			Temperatura de secagem 55 °C			Temperatura de secagem 65 °C		
		R^2	χ^2	RQME	R^2	χ^2	RQME	R^2	χ^2	RQME
1h	1	99,12	0,0007	0,0258	98,54	0,0012	0,0347	99,19	0,0007	0,0260
	2	99,93	0,0001	0,0072	99,91	0,0001	0,0087	99,90	0,0001	0,0092
	3	99,53	0,0004	0,0188	99,06	0,0008	0,0279	99,43	0,0005	0,0218
	4	80,44	0,0155	0,1218	90,05	0,0087	0,0905	95,75	0,0039	0,0596
	5	99,93	$3,83 \times 10^{-5}$	0,0059	99,93	0,0001	0,0076	99,91	0,0001	0,0086
	6	99,96	$3,57 \times 10^{-5}$	0,0058	99,91	0,0001	0,0085	99,89	0,0001	0,0095
	7	99,57	0,0003	0,0180	99,21	0,0007	0,0256	99,68	0,0003	0,0164
2 h	1	99,20	0,0006	0,0249	98,84	0,0010	0,0305	99,44	0,0005	0,0209
	2	99,94	0,0001	0,0070	99,90	0,0001	0,0088	99,69	0,0003	0,0155
	3	99,54	0,0004	0,0187	99,34	0,0006	0,0231	99,48	0,0004	0,0203
	4	81,59	0,0149	0,1190	85,38	0,0125	0,1085	94,47	0,0047	0,0659
	5	99,95	$4,61 \times 10^{-5}$	0,0064	99,94	0,0001	0,0068	99,73	0,0003	0,0144
	6	99,94	$4,98 \times 10^{-5}$	0,0068	99,95	$4,64 \times 10^{-5}$	0,0065	99,74	0,0002	0,0142
	7	99,60	0,0003	0,0175	99,39	0,0005	0,0222	99,65	0,0003	0,0165
3h	1	99,57	0,0003	0,0180	99,30	0,0006	0,0231	98,89	0,0009	0,0300
	2	99,91	0,0001	0,0081	99,82	0,0001	0,0116	99,17	0,0007	0,0260
	3	99,74	0,0002	0,0141	99,56	0,0004	0,0182	98,91	0,0010	0,0298
	4	82,19	0,0142	0,1161	80,42	0,0159	0,1223	95,89	0,0037	0,0578
	5	99,92	0,0001	0,0080	99,99	0,0001	0,0089	99,31	0,0007	0,0236
	6	99,91	0,0001	0,0082	99,89	0,0001	0,0092	99,26	0,0007	0,0246
	7	99,77	0,0002	0,0131	99,56	0,0004	0,0182	99,26	0,0007	0,0245

	1	99,50	0,0004	0,0196	99,46	0,0004	0,0201	99,15	0,0007	0,0268
	2	99,94	0,0001	0,0069	99,81	0,0002	0,0119	99,96	$3,79 \times 10^{-5}$	0,0059
	3	99,66	0,0003	0,0162	99,59	0,0003	0,0175	99,38	0,0006	0,0228
	4	82,43	0,0144	0,1165	75,42	0,0196	0,1353	95,15	0,0045	0,0639
4h	5	99,94	$4,94 \times 10^{-5}$	0,0066	99,86	0,0001	0,0102	99,96	$3,95 \times 10^{-5}$	0,0057
	6	99,95	$4,16 \times 10^{-5}$	0,0062	99,84	0,0001	0,0110	99,97	$3,30 \times 10^{-5}$	0,0054
	7	99,71	0,0002	0,0149	99,59	0,0003	0,0175	99,56	0,0004	0,0192
	1	99,71	0,0002	0,0151	99,35	0,0005	0,0223	99,73	0,0002	0,0145
	2	99,81	0,0002	0,0120	99,72	0,0002	0,0147	99,84	0,0001	0,0110
	3	99,71	0,0002	0,0149	99,55	0,0004	0,0185	99,74	0,0002	0,0142
	4	86,18	0,0111	0,1020	73,72	0,0215	0,1416	92,83	0,0062	0,0746
5h	5	99,84	0,0001	0,0110	99,80	0,0002	0,0122	99,86	0,0001	0,0105
	6	99,84	0,0001	0,0108	99,80	0,0002	0,0124	99,88	0,0001	0,0098
	7	99,74	0,0002	0,0139	99,56	0,0004	0,0183	99,81	0,0002	0,0122
	1	99,53	0,0004	0,0194	98,88	0,0010	0,0304	99,77	0,0002	0,0126
	2	99,92	0,0001	0,0079	99,64	0,0003	0,0171	99,77	0,0002	0,0126
	3	99,70	0,0003	0,0156	99,27	0,0007	0,0246	99,77	0,0002	0,0125
	4	84,41	0,0135	0,1123	78,55	0,0191	0,1331	79,81	0,0152	0,1179
6h	5	99,92	0,0001	0,0076	99,74	0,0002	0,0146	99,84	0,0001	0,0104
	6	99,94	0,0001	0,0071	99,80	0,0002	0,0129	99,78	0,0002	0,0122
	7	99,72	0,0002	0,0150	99,27	0,0007	0,0246	99,84	0,0001	0,0106
	1	99,64	0,0003	0,0170	99,53	0,0004	0,0190	99,80	0,0002	0,0127
	2	99,92	0,0001	0,0079	99,59	0,0003	0,0177	99,91	0,0001	0,0085
	3	99,76	0,0002	0,0139	99,57	0,0004	0,0181	99,85	0,0001	0,0109
7h	4	83,89	0,0141	0,1143	71,05	0,0240	0,1486	87,87	0,0106	0,0977
	5	99,93	0,0001	0,0074	99,65	0,0003	0,0163	99,95	0,0001	0,0065
	6	99,94	0,0001	0,0068	99,65	0,0003	0,0164	99,96	$3,55 \times 10^{-5}$	0,0055

7	99,77	0,0002	0,0136	99,61	0,0003	0,0172	99,85	0,0001	0,0109
1	98,97	0,0009	0,0291	99,17	0,0006	0,0246	99,97	0,0020	0,0438
2	99,81	0,0002	0,0125	99,77	0,0002	0,0128	99,81	0,0002	0,0135
3	99,19	0,0007	0,0257	99,32	0,0005	0,0222	98,49	0,0015	0,0377
4	94,92	0,0044	0,0645	77,55	0,0171	0,1275	99,22	0,0008	0,0271
5	99,80	0,0002	0,0129	99,82	0,0001	0,0113	99,87	0,0002	0,0113
6	99,84	0,0001	0,0114	99,23	0,0006	0,0236	99,76	0,0003	0,0149
7	99,59	0,0004	0,0184	99,38	0,0005	0,0212	99,28	0,0008	0,0261
	R²	χ^2	RQME						
1	98,84	0,0011	0,0326						
2	99,49	0,0005	0,0216						
3	99,00	0,0010	0,0294						
4	98,45	0,0016	0,0377						
5	99,76	0,0004	0,0173						
6	99,49	0,0006	0,0217						
7	99,64	0,0004	0,0182						

Os valores de R^2 variaram de 71,054 a 99,966 %, sendo que os modelos de Page, Midilli e Aproximação da Difusão foram os mais elevados, enquanto que os menores valores foram obtidos com o ajuste do modelo de Wang e Singh. Somente o coeficiente de regressão não é suficiente como critério para seleção de modelos não-lineares (MADAMBA et al., 1996). Por esta razão foram também considerados os valores de qui-quadrado reduzido (χ^2) e raiz do quadrado médio do erro (RQME).

Para os valores de χ^2 e RQME todos os modelos apresentaram números pequenos, com exceção novamente do modelo de Wang e Singh. De um modo geral, pode-se afirmar que todos os modelos que consideram que os dados experimentais seguem a forma exponencial apresentaram bom ajuste aos dados experimentais. O único que não apresentou um bom ajuste foi o modelo de Wang e Singh, que considera que os dados experimentais seguem a forma polinomial de segundo grau. Entretanto, os maiores valores de R^2 , e menores valores de χ^2 e RQME foram encontrados, para as diversas condições de secagem aplicadas, sempre nos modelos de Page, Midilli e Aproximação da Difusão.

Diversos trabalhos têm estudado o ajuste de diferentes tipos de modelos em processo de secagem, sendo que em muitos deles o modelo de Page foi o que obteve melhor ajuste, tais como White et al. (1981) para a secagem de soja, Mwithigae Olwal (2005) para a secagem de couve em secador convectivo; Kingsly e Singh (2007) em secagem de romã a 50, 55 e 60 °C; Aghbashlo et al. (2009), em secagem de fatias de batata em secador convectivo de ciclone e Castiglioni et al. (2013) na modelagem matemática do processo de secagem da massa fibrosa de mandioca.

Assim como o modelo de Page, Midilli e Aproximação da Difusão também têm mostrado bom ajuste em diversos trabalhos, sendo um deles o de Akpinar e Bicer (2007) na cinética de secagem de cereja, verificando que os modelos de Midilli e Aproximação da Difusão apresentaram ajustes superiores a 0,99. Cihan et al. (2007) apontaram Midilli como modelo que apresentou melhor ajuste para os dados de secagem de arroz em casca e também Rafiee et al. (2009) para a secagem de soja.

A Tabela 6 ilustra os valores estimados dos parâmetros dos modelos de Lewis, Page, Henderson e Pabis e Wang e Singh e a Tabela 7 os parâmetros dos modelos de Midilli, Aproximação da Difusão e

Logarítmico, que foram ajustados aos dados de secagem do polvilho azedo.

Tabela 6 – Parâmetros obtidos para os modelos de Lewis, Page, Henderson e Pabis e Wang e Singh em cada experimento de secagem do polvilho azedo, exposto por diferentes tempos ao sol com secagem continuada em estufa convectiva a 45, 55 e 65 °C.

Modelo	Amostra	Temperatura de secagem 45 °C		Temperatura de secagem 55 °C		Temperatura de secagem 65 °C	
		K		K		K	
		N	N	N	N	N	N
Lewis	1h	0,0062	0,0068	0,0062	0,0068	0,0062	0,0103
	2h	0,0065	0,0075	0,0065	0,0075	0,0065	0,0110
	3h	0,0067	0,0081	0,0067	0,0081	0,0067	0,0115
	4h	0,0071	0,0089	0,0071	0,0089	0,0071	0,0114
	5h	0,0076	0,0089	0,0076	0,0089	0,0076	0,0131
	6h	0,0076	0,0088	0,0076	0,0088	0,0076	0,0133
	7h	0,0080	0,0102	0,0080	0,0102	0,0080	0,0137
	Estufa	0,0056	0,0072	0,0056	0,0072	0,0056	0,0084
	Sol	0,0033		0,0033		0,0033	
Page	Amostra	Temperatura de secagem 45 °C		Temperatura de secagem 55 °C		Temperatura de secagem 65 °C	
		K		K		K	
		N	N	N	N	N	N
	1h	0,0020	1,2109	0,0016	1,2862	0,0040	1,1960
	2h	0,0023	1,1975	0,0021	1,2554	0,0065	1,1105
	3h	0,0035	1,1266	0,0035	1,1706	0,0066	1,1150
	4h	0,0033	1,1487	0,0045	1,1388	0,0040	1,2206
	5h	0,0053	1,0692	0,0044	1,1443	0,0093	1,0755
	6h	0,0038	1,1381	0,0030	1,2191	0,0129	1,0066

7h	0,0045	1,1163	0,0078	1,0564	0,0098	1,0763
Estufa	0,0019	1,1986	0,0028	1,1829	0,0017	1,3207
Sol	0,0013	1,1559				

	Temperatura de secagem 45 °C			Temperatura de secagem 55 °C			Temperatura de secagem 65 °C		
	K	A	K	A	K	A	K	A	
1h	0,0066	1,0731	0,0073	1,0810	0,0108	1,0526			
2h	0,0069	1,0664	0,0081	1,0790	0,0112	1,0191			
3h	0,0070	1,0439	0,0085	1,0563	0,0116	1,0113			
4h	0,0074	1,0428	0,0092	1,0391	0,0119	1,0513			
5h	0,0076	1,0102	0,0094	1,0495	0,0132	1,0105			
6h	0,0079	1,0424	0,0094	1,0674	0,0134	1,0071			
7h	0,0082	1,0359	0,0104	1,0225	0,0141	1,0237			
Estufa	0,0058	1,0508	0,0075	1,0431	0,0089	1,0763			
Sol	0,0034	1,0462							

Henderson e Pabis

	Temperatura de secagem 45 °C			Temperatura de secagem 55 °C			Temperatura de secagem 65 °C		
	A	B x 10 ⁻⁶	A	B x 10 ⁻⁶	A	B	A	B	
1h	-0,0031	2,05	-0,0038	3,32	-0,0062	9,14 x 10 ⁻⁶			
2h	-0,0032	2,28	-0,0039	3,46	-0,0066	1,01 x 10 ⁻⁵			
3h	-0,0034	2,51	-0,0040	3,59	-0,0070	1,16 x 10 ⁻⁵			
4h	-0,0036	2,84	-0,0042	3,78	-0,0068	1,10 x 10 ⁻⁵			

Wang e Singh	5h	-0,0041	3,72	-0,0042	3,72	-0,0076	$1,35 \times 10^{-5}$
	6h	-0,0040	3,48	-0,0043	4,02	-0,0066	$9,94 \times 10^{-6}$
	7h	-0,0042	3,83	-0,0047	4,74	-0,0075	$1,30 \times 10^{-5}$
	Estufa	-0,0034	2,64	-0,0034	2,57	-0,0056	$7,66 \times 10^{-6}$
	Sol	-0,0022	1,24				

* k : constante de secagem (min^{-1}); a , b , n : constantes experimentais (adimensionais).

Tabela 7 - Valores estimados para os parâmetros dos modelos de Midilli, Aproximação da Difusão e Logarítmico em cada experimento de secagem do polvilho azedo, exposto por diferentes tempos ao sol com secagem continuada em estufa convectiva a 45, 55 e 65 °C.

Modelo	Temperatura de secagem 45 °C			Temperatura de secagem 55 °C			Temperatura de secagem 65 °C																						
	A	B	n	A	B	n	A	B	n																				
Midilli	1h	0,0021	1,0103	6,91x10 ⁻⁶	0,0014	0,9935	1,3088	8,92 x10 ⁻⁶	0,0043	1,0016	1,1780	-1,48x10 ⁻⁵																	
	2h	0,0024	1,0060	4,95x10 ⁻⁶	0,0021	1,0084	1,2597	1,39x10 ⁻⁵	0,0061	0,9830	1,1193	-1,73x10 ⁻⁵																	
	3h	0,0035	1,0035	1,1238	1,89x10 ⁻⁶	0,0033	1,0081	1,1827	1,92x10 ⁻⁵	0,0059	0,9704	1,1271	-4,02x10 ⁻⁵																
	4h	0,0031	0,9939	1,1614	2,97x10 ⁻⁶	0,0040	0,9961	1,1659	1,64x10 ⁻⁵	0,0038	0,9942	1,2336	3,13x10 ⁻⁶																
	5h	0,0043	0,9768	1,1082	3,02x10 ⁻⁶	0,0044	0,9923	1,1485	2,00x10 ⁻⁵	0,0088	0,9880	1,0845	-8,57x10 ⁻⁶																
	6h	0,0037	0,9999	1,1454	6,16x10 ⁻⁶	0,0031	1,0151	1,2175	2,24x10 ⁻⁵	0,0117	1,0038	1,0339	3,07x10 ⁻⁵																
	7h	0,0043	1,0011	1,1244	8,50x10 ⁻⁶	0,0076	1,0086	1,0643	1,96x10 ⁻⁵	0,0092	1,0060	1,0930	2,85x10 ⁻⁵																
Estufa	0,0028	1,0005	1,1208	-2,34x10 ⁻⁵	0,0021	0,9752	1,2343	7,05x10 ⁻⁶	0,0016	0,9849	1,3218	-2,89x10 ⁻⁵																	
Sol	0,0019	1,0074	1,0811	-3,44x10 ⁻³																									
Temperatura de secagem 45 °C										Temperatura de secagem 55 °C										Temperatura de secagem 65 °C									
Aprox. da Difusão	1h	0,0223	-0,3610	0,3497	0,0125	-37,3381	0,9801	0,0170	-60,3223	0,9901	0,9901	0,9901																	
	2h	0,0169	-0,5961	0,5072	0,0271	-0,4349	0,3615	0,0164	-20,9330	0,9793	0,9793	0,9793																	
	3h	0,0132	-0,7897	0,6576	0,0404	-0,2107	0,2361	0,0169	-176,4264	0,9974	0,9974	0,9974																	
	4h	0,0157	-0,6598	0,5908	0,0270	-0,2949	0,3941	0,0194	-78,1227	0,9917	0,9917	0,9917																	
	5h	0,0111	-3,5246	0,9111	0,0659	-0,1436	0,0659	0,0184	-53,9530	0,9931	0,9931	0,9931																	
	6h	0,0247	-0,2628	0,3670	0,0464	-0,2640	0,2323	0,1141	-0,0248	0,1194	0,1194	0,1194																	
	7h	0,0290	-0,1903	0,3155	0,0706	-0,0748	0,1541	0,3205	-0,0752	0,0460	0,0460	0,0460																	
Estufa	0,0092	-62,2425	0,9904	0,2786	0,0189	0,0262	0,0153	-110,5578	0,9930	0,9930	0,9930																		
Sol	0,0054	-9,4576	0,9453																										
Temperatura de secagem 45 °C										Temperatura de secagem 55 °C										Temperatura de secagem 65 °C									
Logarítmico	1h	0,0065	1,0768	-0,0089	0,0069	1,0903	-0,0196	0,0100	1,0663	-0,0267	-0,0267	-0,0267																	
	2h	0,0067	1,0714	-0,0111	0,0078	1,0841	-0,0111	0,0105	1,0302	-0,0219	-0,0219	-0,0219																	
	3h	0,0068	1,0480	-0,0095	0,0085	1,0570	-0,0015	0,0104	1,0299	-0,0338	-0,0338	-0,0338																	
	4h	0,0072	1,0482	-0,0111	0,0092	1,0394	-0,0008	0,0111	1,0633	-0,0225	-0,0225	-0,0225																	
	5h	0,0074	1,0152	-0,0101	0,0095	1,0477	0,0007	0,0127	1,0174	-0,0132	-0,0132	-0,0132																	
	6h	0,0077	1,0468	-0,0084	0,0094	1,0673	0,0001	0,0139	1,0026	0,0103	0,0103	0,0103																	
	7h	0,0081	1,0386	-0,0050	0,0107	1,0176	0,0094	0,0141	1,0234	0,0006	0,0006	0,0006																	
Estufa	0,0052	1,0693	-0,0379	0,0072	1,0480	-0,0106	0,0075	1,1136	-0,0636	-0,0636	-0,0636																		
Sol	0,0029	1,0831	-0,0624																										

*k: constante de secagem (min⁻¹); a, b, c, n: constantes experimentais (adimensionais).

Com base na Tabela 6 e 7 não se observa nenhuma relação da constante de secagem (K), que representa o efeito das condições externas de secagem, para o modelo de Page, Midilli e Aproximação da Difusão, com a temperatura, a não ser que foram maiores para temperatura de 65 °C e menores para a secagem realizada totalmente ao sol, para os modelos de Page e Midilli. Outros autores têm observado uma relação entre os valores de K e a temperatura, sendo eles Madamba, Driscoli e Buckle (1996), Babalis e Belessiotis (2004) e Prates (2010).

Para representar o ajuste do modelo de Page, Midilli e Aproximação da Difusão aos dados experimentais foi escolhido o amido fermentado de mandioca exposto por 1 h ao sol com secagem continuada em estufa a 45 °C, como ilustra a Figura 7, e os resíduos de cada modelo (Figura 8). Para o restante das amostras o ajuste dos modelos e os respectivos resíduos são mostrados no Apêndice B e C, respectivamente.

Figura 7- Ajuste do modelo de Page, Midilli e Aproximação da Difusão aos dados experimentais de 1 h de exposição solar seguido da secagem do polvilho azedo a 45 °C em estufa.

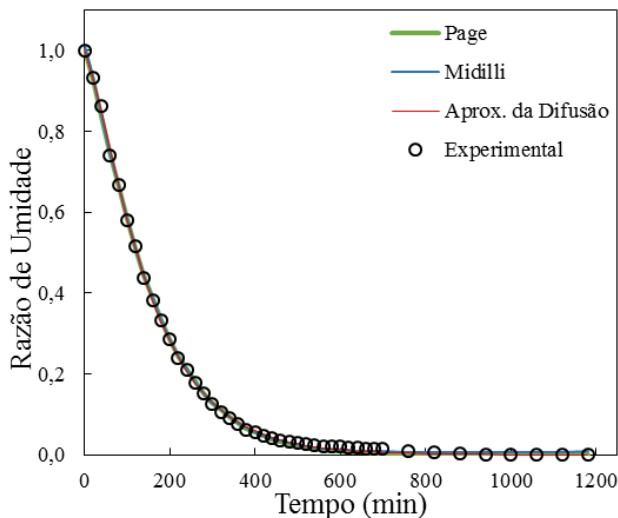
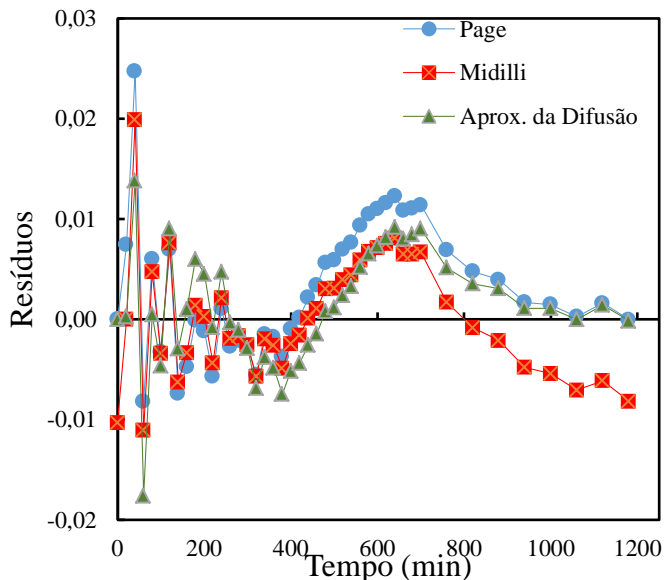


Figura 8 - Resíduos obtidos para os modelos de Page, Midilli e Aproximação da Difusão no ajuste dos modelos aos dados experimentais de secagem do amido de mandioca fermentado.



Com base na Figura 7 é possível verificar que os modelos de Page, Midilli e Aproximação da Difusão se ajustam bem aos dados experimentais.

Os maiores resíduos (Figura 8) foram encontrados durante o período inicial da secagem. Entre 100 e 500 minutos os valores preditos pelos modelos se aproximam mais dos valores experimentais, mas a partir de 500 minutos eles se afastam novamente e voltam a se aproximar a partir de 620 minutos. Após 800 minutos o modelo de Midilli se afasta mais dos pontos experimentais, enquanto que os modelos de Page e Aproximação da Difusão ficam mais próximos, mostrando melhor ajuste em relação a Midilli.

Considerando que os modelos de Midilli e da Aproximação da Difusão são modelos que possuem equações mais complexas e maior número de parâmetros, um melhor ajuste destes modelos em relação aos outros que foram avaliados era esperado. Entretanto, o modelo de Page tem uma equação com menor número de parâmetros do que os modelos de Midilli e Aproximação da Difusão, mostrando que este modelo pode

ser eficiente para representar o processo de secagem do amido de mandioca fermentado.

4 CONCLUSÃO

As curvas de secagem do amido de mandioca fermentado exposto ao sol e com secagem continuada em estufa convectiva mostraram uma redução considerável no tempo total de secagem deste produto com relação ao método tradicional de secagem feito totalmente ao sol, podendo assim ser reduzido o tempo de exposição ao sol, com uma secagem mais rápida, o que poderá trazer contribuições para o processo produtivo deste setor.

As curvas de secagem do amido de mandioca fermentado exposto ao sol de 1 a 5 h com secagem continuada em estufa a 45 °C e seco totalmente em estufa apresentaram períodos de secagem à taxa constante seguidos de períodos à taxa decrescente. O mesmo comportamento ocorreu com exposição solar por 1 a 3 h, 6 h para temperatura da estufa em 55 °C e secagem totalmente em estufa, assim como para a amostra com secagem totalmente ao sol. O restante das amostras apresentou somente período de taxa decrescente.

Para a secagem a 65 °C a taxa constante não foi encontrada para todos os tempos de exposição solar, o que pode estar ligado ao início do processo de gelatinização do polvilho azedo que ocorre em temperatura próxima a 65 °C. Por este motivo não é recomendada a utilização desta temperatura para a secagem deste material.

Dentre os modelos de secagem estudados o de Midilli, Aproximação da Difusão e Page apresentaram bom ajuste aos dados experimentais, entretanto, como Page possui menor número de parâmetros este poderá ser escolhido para representar o fenômeno da secagem do amido de mandioca fermentado nas condições propostas neste trabalho.

REFERÊNCIAS

AGHBASHLO, M.; KIANMEHR, M. H.; ARABHOSSEINI, A. Modeling of thin-layer drying of potato slices in length of continuous band dryer. **Energy Conversion and Management**, v. 50, n. 1, p.1348-1355, 2009.

AKPINAR, E. K.; BICER, Y. Modelling of thin layer drying kinetics of sour cherry in a solar dryer and under open sun. **Journal of Scientific & Industrial Research**, v. 66, n. 9, p. 764-771, 2007.

AQUINO, A. C. M. S.; GERVIN, V. M.; AMANTE, E. R. Avaliação do processo produtivo de polvilho azedo em indústrias de Santa Catarina. **Brazilian Journal of Food Technology**, v. 19, e2015055, 2016.

AVIARA, N. A.; ONUOHA, L. N.; FALOLA, O. E.; IGBEKA, J. C. Energy and exergy analyses of native cassava starch drying in a tray dryer. **Energy**, v.73, n. 1, p. 809-817, 2014.

BABALIS, S. J.; BELESSIOTIS, V. G. Influence of the drying conditions on the drying constants and moisture diffusivity during the thin-layer drying of figs. **Journal of Food Engineering**, v.65, n. 3, p. 449-458, 2004.

BERTOLINI, A.C.; MESTRES, C.; RAFFI, J.; BULÉON, A.; LERNER, D.; COLONNA, P. Photodegradation of cassava and corn starch. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v.49, p.675-682, 2001.

BHAT, R.; KARIM, A. A. Impact of radiation processing on starch. **Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety**, Chicago, v. 8, p. 44-58, 2009.

CASTIGLIONI, G. L.; SILVA, F. A.; CALIARI, M.; SOARES JÚNIOR; M. S. Modelagem matemática do processo de secagem da massa fibrosa de mandioca. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 17, n. 9, p. 987-994, 2013.

CEREDA, M. P.; VILPOUX, O. (Org.) **Tecnologia, uso e potencialidades de tuberosas amiláceas latinoamericanas**. In: Culturas de Tuberosas Amiláceas Latinoamericanas. São Paulo: Fundação Cargill, 2003. v.3, 711 p.

CIHAN, A.; KAHVECI, K.; HACIHAFIZOGLU, O. Modelling of intermittent drying of thin layer rough rice. **Journal of Food Engineering**, v.79, p.293-298, 2007.

CLIMATEMPO. **Climatologia**. Disponível em:
<<http://www.climatempo.com.br>>. Acesso em 12 de junho de 2016.

DIAS, A. R. G.; ZAVAREZI, E. R.; HELBIG, E. ELIAS, M. C.; OLIVEIRA, M.; Oxidação dos amidos de mandioca e de milho comum fermentados: desenvolvimento da propriedade de expansão. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v. 27, n. 1, p. 794–799, 2007.

DOYMAZ, I. Sun drying of figs: an experimental study. **Journal of Food Engineering**. v. 1, n. 71, p. 403–407, 2005.

FAMUREWA, J. A. V.; EMUEKELE, P. O. Modelling of drying pattern of cassava chips at different air velocity and temperature using fluidized bed dryer. **International Scholars Journals**, v. 5, n. 3, p. 461-471, 2015.

FERREIRA, A. G., **Estudo de Viabilidade Técnica da Utilização de uma Chaminé Solar como Secador de Alimentos**. 2004. 172 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Mecânica). Departamento de Engenharia Mecânica. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2004.

FOUST, A. S.; WENZEL, L. A.; CLUMP, C. W.; MAUS, L.; MACEDO, H. **Princípios de Operações Unitárias**. Livros Técnicos e Científicos Editora S. A.- LTC: Rio de Janeiro, 1982, 401- 432 p.

FRANCO, C. M. L.; OGAWA, C.; RABACHINI, C.; ROCHA, T.; SOUZA, T.; CEREDA, M. P.; JANE, J., Effect of lactic acid and UV irradiation on the cassava and corn starches. **Brazilian Archives of Biology and Technology**, v. 53, n. 2, p. 443-454, 2010.

GARCIA, A. C. D. B.; LEONEL, M. Efeito da concentração de ácido láctico sobre a propriedade de expansão em amidos modificados fotoquimicamente. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 29, n. 3, p. 629- 634, maio/jun., 2005.

GEANKOPLIS, C. J., **Transport Processes and Unit Operations**. 3^a ed., Prentice- Hall, 1993, 754- 794 p.

GERALDI, C. A. Q. **Estudo da secagem de fécula de mandioca em secador pneumático - flash dryer**. 2006. 161 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química). Universidade Estadual de Maringá-UNIOESTE, Maringá, 2006.

GUINÉ, R. P. F.; FERREIRA, D. M. S.; BARROCA, M. J.; GONÇALVE, F. M. Study of the drying kinetics of solar-dried pears. **Biosystems Engineering**, v. 98, p. 422-429, 2007.

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

KEMP, I. C.; FYHR, B. C.; LAURENT, S.; ROQUES, M. A.; GROENEWOLD, C. E.; TSOTSAS, E.; SERENO, A.A.; BONAZZI, C. B.; BIMBENET, J. J.; KIND, M., Methods for processing experimental drying kinetics data. **Srying Technology**, v. 19, n. 1, p. 15-34, 2001.

KINGSLY, A. R. P.; SINGH, D. B. Drying kinetics of pomegranate arils. **Journal of Food Engineering**, v. 79, p. 741-744, 2007.

KOTOVICZ, V. **Otimização da desidratação osmótica e secagem do yacon (*Polymniasonchifolia*)**. 2011. 90 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia de Alimentos). Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2011.

LEONEL, M.; MARTINS, J. C.; MISCHAN, M. M. Produção de snacks funcionais à base de farinha de soja e polvilho azedo, **Ciência Rural**, v. 40, n. 6, p. 1418- 1423, 2010.

LEWIS, L.W. The rate of drying of solid materials. **Industrial Engineering Chemistry**, v.13, n. 1, p. 427, 1921.

MACHADO, A.C.S.D.V.; DINIZ, I. P.; TEIXEIRA, M. A. V.; BIRCHAL, V. S. Estudo do efeito de secagem por radiação ultravioleta nas propriedades tecnológicas da fécula de mandioca fermentada. **E-xacta**, Belo Horizonte: editor UniBH, v. 5, n. 1, p. 7-14, 2012.

MADAMBA, P. S.; DRISCOLI, R. H.; BUCKLE, K. A. The Thin-layer drying characteristics of garlic slices. **Journal of Food Engineering**, v. 29, n. 1, p. 75-97, 1996.

MARCON, M. J. A. **Proposta para o mecanismo de expansão do polvilho azedo com base nas características físico químicas**. 2009. 187 f. Tese (Doutorado em Ciência dos Alimentos). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2009.

MARCON, M. J. A.; KURTZ, D. J.; RAGUZZONI, J. C., DELGADILLO, I.; MARASCHIN, M.; SOLDI, V.; REGINATTO, V.; AMANTE, E. R. Expansion Properties of Sour Cassava Starch (Polvilho Azedo): Variables Related to its Practical Application in Bakery. **Starch/Stärke**, v. 61, n. 1, p.716-726, 2009

MARDER, R. C.; ARAUJO CRUZ, R.; MORENO, M.; CURRAN, A.; TRIM, D.S. Investigation sour starch production in Brazil. In: DUFOUR, D.; O'BRIEN, G. M.; BEST, R. **Cassava flour and starch: progress in research and development**. Cali: CIRAD/CIAT, 1996. Cap. 28, p. 247-258.

McCABE, W. L.; SMITH, J. C.; HARRIOT, P. **Unit Operations**. 3^a ed. EditoraMacGraw-Hill, 1980.

MESTRES, C., BOUNGOU, O., AKISSOE, N.; ZAKHIA, N. Comparison of the expansion ability of fermented maize flour and cassava starch during baking. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v. 80, n. 6, p. 665–672, 2000.

MIDILLI, A.; KUCUK, H.; YAPAR, Z. A. New model for single-layer drying. **Drying Technology**, New York, v. 20, n. 7, p. 1503-1513, 2002.

MORAES, J. O. **Produção e caracterização de filmes de amido-glicerol-fibras de celulose elaborados por Tape-Casting**. 2013.176p. Tese (Doutorado em Engenharia de Alimentos) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2013.

MWITHIGA, G.; OLWAL, J. O. The drying kinetics of kale (*Brassica oleracea*) in a convective hot air dryer. **Journal of Food Engineering**, v.71, p.373-378, 2005.

PAGE, G. E. **Factors influencing the maximum rates of air drying shelled corn in thin layers**. West Lafayette: Purdue University, 1949.

PERRY, R. H.; CHILTON, C. H. **Manual de Engenharia Química**. 5^a ed. Editora Guanabara Dois A, 1980.

PLATA-OVIEDO, M. S. V.; **Secagem do amido fermentado de mandioca: modificação química relacionada com a propriedade de expansão e características físico-químicas**. Tese (Doutorado em Tecnologia de Alimentos) - Faculdade de Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 114 p., 1998.

POLA JÚNIOR, A. C. **Análise do processo de produção do polvilho azedo**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Alimentos). Universidade Federal de Santa Catarina- UFSC, Florianópolis, 2013, 152f.

PRATES, M. F. O. **Elaboração e caracterização de filmes biodegradáveis de amido de fruta-de-lobo e sorbitol e aplicação da cobertura em frutos de morango**. 2010. 92 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola), Universidade Estadual de Goiás, Goiás, 2010.

RAFFIE, SH; KEYHANI, A.; SHARIFI, M.; JAFARI, A.; MOBILI, H.; TABATABAEEFAR, A. Thin layer drying properties of soybean (*Viliamz Cultivar*). **Journal of Agricultural Science and Technology**, v. 11, n. 3, p. 301- 308, 2009.

REIS, R. C.; CÔRREA, P. C.; DEVILLA, I. A.; SANTOS, E. S.; ASCHERI, D. P. R.; SERVULO, A. C. O.; SOUZA, A. B. M. Drying of yam starch (*Discorea ssp.*) and glycerol filmogenic solutions at different temperatures. **Food Science and Technology**, v. 50, n. 2, p. 651-656, 2013.

SANTOS, T. P. R.; SARTORI, M. M. P.; CABELLO C. Relação entre tempo de exposição e concentração de ácido láctico nas características de expansão do amido de mandioca modificado. **Revista Raízes e Amidos Tropicais**, v. 8, p. 27-35, 2012.

SIMAL, S.; FEMENIA, A.; GARAU, M. C.; ROSSELL, C. Use of exponential, Page's and diffusional models to simulate the drying kinetics of kiwi fruit. **Journal of Food Engineering**, v. 66, p. 323-328, 2005.

TAIWO, A. F.; ABOWEI, M. F. N.; PUYATE, Y. T.; ACHINEWHU, S. C. Effects of Drying Parameters on the Drying Kinetics of Fermented Ground Cassava Using a Rotary Dryer, **International Journal of Food Engineering**, v. 6, n. 6, p.1- 17, 2010.

TOGRUL, I. T.; PEHLIVAN, D. Mathematical modeling of solar drying of apricots in thin layers. **Journal of Food Engineering**, Essex, v. 55, p. 209-216, 2002.

VALENTE, P. P. S. S. **Desidratação osmótica e secagem de abacaxi (*Ananás comosus* (L.) merril), variedade pérola**, 2007. 142 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Alimentos) - Faculdade de Engenharia de Alimentos. Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2007.

VATANASUCHART, N.; NAIVIKUL, O.; CHAROENREIN, S.; SRIROTH, K. Effects of different UV irradiations on properties of cassava starch and biscuit expansion. **The Kasetsart Journal: Natural Science, Thailand**, v. 37, n. 3, p. 334-344, 2003.

VATANASUCHART, N.; NAIVIKUL, O.; CHAROENREIN, S.; SRIROTH, K. Molecular properties of cassava starch modified with different UV irradiations to enhance baking expansion. **Carbohydrate Polymers**, v. 61, n. 1, pp. 80-87, 2005.

VILHALVA, D. A. A.; SOARES JÚNIOR, M. S.; CALIARI, M. SILVA, F. A. Secagem convencional de casca de mandioca proveniente de resíduos de indústria de amido. **Revista Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 42, n. 3, p. 331-339, 2012.

WANG, C. Y.; SINGH, R. P. Use of variable equilibrium moisture content in modeling rice drying. **Transaction of ASAE**, v. 11, ASAE Paper n.78-3001, 1978.

WANG, Z.; SUN, J.; LIAO, X.; CHEN, F.; ZHAO, G.; WU, J.; HU, X. Mathematical modeling on hot air drying of thin layer apple pomace. **Food Research International**, v. 40, p. 39-46, 2007.

WESTBY, A.; CEREDA, M. P. Production of fermented cassava starch (polvilho azedo) in Brazil. **Tropical Science**, Amsterdam, v. 34, n. 2, p. 203-210, 1994.

WHITE, G.M.; BRIDGES, T.C.; LOEWER, O. J.; ROSS, I.J. Thin layer drying model for soybeans. **Transaction of the ASAE**, St. Joseph, v. 24, n. 6, p. 1643- 1646, 1981.

CAPÍTULO 3

INFLUÊNCIA DO TEMPO DE EXPOSIÇÃO SOLAR E DA TEMPERATURA DE SECAGEM SOBRE AS CARACTERÍSTICAS DO AMIDO DE MANDIOCA FERMENTADO

1 INTRODUÇÃO

A mandioca é uma raiz com alto teor de amido, sendo que este apresenta características físico-químicas de grande interesse industrial. Em alguns países da América do Sul existe a produção de amido de mandioca fermentado e seco ao sol, conhecido por polvilho azedo. Este amido é capaz de gerar massas que expandem quando assadas sem a necessidade de adição de fermento ou de processo de extrusão (DEMIATE; CEREDA, 2000).

O polvilho azedo é considerado um amido modificado por oxidação e devido a esta modificação adquire a propriedade de expansão que outros amidos não possuem, a qual permite seu uso na fabricação de biscoitos de polvilho e pão de queijo (CEREDA, 2002).

Durante a fermentação deste produto ocorre a formação de ácidos orgânicos, principalmente láctico, acético, butírico e propiônico (CEREDA, 1973). No processo de secagem o amido de mandioca impregnado com ácido láctico, proveniente da fermentação, é exposto ao sol e a reação fotoquímica que envolve amido com ácido láctico e radiação ultravioleta do sol são os responsáveis pela modificação deste amido (DINIZ, 2006).

Mestres e Roau (1997) e Plata- Oviedo e Camargo (1998) observaram que mesmo com a modificação oxidativa do amido de mandioca com ácido láctico, seguido de diferentes tipos de secagem, somente na secagem ao sol foi observado um aumento significativo dos volumes específicos em testes com biscoitos, comparativamente com o amido seco em estufas. Estes estudos demonstram a importância da secagem ao sol sobre a principal característica tecnológica do polvilho azedo que é a expansão.

Conforme descrito por Vatanasuchart et al. (2005) as moléculas de amilose e amilopectina são despolimerizadas, parcialmente, pela hidrólise por ácido láctico e pela radiação UV para moléculas de tamanho reduzido, que são responsáveis pela expansão do biscoito.

Esse biscoito apresenta, no seu interior, uma matriz de amido gelatinizado, que é responsável pela sua expansão e textura. Análises microscópicas têm permitido comprovar que os grânulos se apresentam com diferentes graus de integridade segundo a sua posição no biscoito. Os grânulos da superfície apresentam-se íntegros e sem inchamento e é provável que, durante o forneamento, os grânulos da superfície sejam desidratados e aqueles do interior sejam gelatinizados, provocando a expansão do biscoito (CAMARGO et al., 1988).

Segundo Gabas (2002) e Iguedjatal (2008), a construção das isotermas de sorção é de suma importância, devido ao risco de alterações em que o alimento tende a passar se acondicionado em ambientes com determinada umidade relativa. Dentre diversas aplicações para o conhecimento das isotermas, as mais importantes são: estabilidade dos alimentos, vida útil, projeto de secadores, predição das condições finais de mistura de diversos ingredientes em alimentos formulados, projeto de embalagem, entre outros.

Sabendo que o gargalo no processo produtivo do polvilho azedo, assim como a causa de diversos inconvenientes sobre a padronização é a etapa de secagem, a proposta de redução do tempo de exposição solar do amido de mandioca fermentado com secagem continuada em estufa convectiva poderá trazer novas perspectivas para este ramo industrial, uma vez que são escassos trabalhos na literatura que apresentem estudos sobre o efeito do tempo de secagem solar nas características deste produto. Desta forma, o presente trabalho tem como objetivo verificar a influência do tempo de exposição solar sobre as características físico-químicas e reológicas e, construir as isotermas de adsorção de umidade do amido de mandioca fermentado para as diferentes condições experimentais de secagem.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Material

A amostra de amido de mandioca fermentado foi fornecida pela feccularia Ouro Branco, localizada na região de Santa Rosa do Sul (SC) (latitude 29° 08' 10" S e longitude 49° 42' 00" W), de um tanque de fermentação com 11 meses, tempo que representa uma prática usual nas polvilharias brasileiras, sendo um parâmetro variável, conforme constatado por Aquino, Gervin e Amante (2016). A coleta foi realizada no mês de junho de 2014, sendo que o amido permaneceu no tanque da polvilharia entre os meses de julho de 2013 a junho de 2014. A temperatura média mínima e máxima desta cidade varia de 13 a 27 °C (CLIMATEMPO/ INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA - INMET, 2016).

A amostra foi coletada e transportada em sacos de polietileno. Ao chegar ao laboratório, foi ressuspenso em água mineral, isenta de cloro, em tanques de polipropileno de 38 L de capacidade (35,1 x 29,3 x

53,0). Uma lâmina de água de 20 cm foi deixada sobre o amido fermentado.

Para a retirada de porções da amostra para os experimentos de secagem, a água sobrenadante era retirada e retornada ao tanque após a remoção da amostra.

2.2 Método

2.2.1 Secagem

Para as secagens convectivas foi utilizada uma estufa convectiva de circulação/renovação de ar (marca Tecnal, modelo TE-394/2), mantendo a renovação de ar constante.

Em cada experimento, as amostras de amido fermentado foram espalhadas em formas circulares de alumínio revestidas com papel celofane transparente. As amostras foram colocadas sobre o celofane de modo a preencher todo o fundo da forma em uma espessura de camada de amido de 0,5 cm. Foi preparado o número de formas suficiente para cumprir o planejamento de coleta em todas as etapas da secagem nas diferentes condições testadas, conforme Tabela 1.

Tabela 1- Condições experimentais de secagem ao sol e em estufa convectiva do amido de mandioca fermentado.

Tempo de exposição solar (h)	Temperatura da estufa (°C)	Temperatura da estufa (°C)	Temperatura da estufa (°C)
1			
2			
3			
4	45	55	65
5			
6			
7			
Totalmente ao sol sem revolvimento	-	Temperatura média ambiente de 29,15 °C	-
Totalmente ao sol com revolvimento	-	Temperatura média ambiente de 29,15 °C	-

Fonte: Elaborado pela autora.

As amostras foram colocadas à exposição solar (das 9 às 16 h) por 7 horas sem realizar revolvimento, sendo que a cada hora uma amostra foi retirada do sol, e o restante da secagem finalizada em estufa de circulação e renovação de ar, previamente regulada a 45, 55 ou $65 \pm 1,0$ °C, até atingir umidade de 14 %, umidade na qual o produto é comercializado. Para cada temperatura testada, foi necessário um dia ensolarado para realização do experimento que foi feito em duplicata. As secagens realizadas em estufa a 45, 55 e 65 °C ocorreram em 15/11/14; 07/12/14; 08/11/14, respectivamente. Para efeito de comparação, foi realizada em 08 e 09/11/14 a secagem de uma amostra totalmente ao sol também sem revolvimento e uma outra pelo método tradicional utilizado nas polvilharias, com revolvimento do amido fermentado, e o final da secagem determinado pelo mesmo método adotado pelos produtores de polvilho azedo, onde a massa é pressionada nas mãos até que não se perceba mais a formação de aglomerados.

2.2.2 Propriedades de expansão

Foram elaborados biscoitos segundo o método descrito por Nunes e Cereda (1994), no qual 50 g de polvilho foram misturados com 40 mL de água fervente. A massa obtida foi modelada na forma de biscoitos esféricos de aproximadamente 10 g cada. Os biscoitos foram levados ao forno termostatizado a 200 °C por 25 minutos. Após assados e resfriados, os biscoitos foram pesados e avaliados pelo método de deslocamento de sementes de painço em copo Béquer, sendo o volume das sementes deslocadas medidas em proveta. O volume específico foi calculado pela razão do volume das sementes deslocadas e a massa dos biscoitos após o forneamento (PIZZINATTO; CAMPAGNOLLI, 1993).

A perda de massa foi calculada com base na diferença de massa do biscoito antes e após o forneamento, e o resultado expresso em %.

O resultado da razão entre a massa dos biscoitos após o forneamento e o valor do deslocamento das sementes foi expresso em densidade específica (g mL^{-1}).

O índice de expansão foi avaliado pelo método proposto por Maeda e Cereda (2001) no qual o diâmetro médio dos biscoitos foi medido com paquímetro digital (marca Lee Tools, China) antes e após o forneamento.

2.2.3 Acidez titulável e pH

As determinações do pH e da acidez titulável foram realizadas conforme método proposto por Plata-Oviedo (1998). Foram pesadas 10 g de amostra (b. s.) e dispersas em 100 mL de água deionizada. A dispersão de amido foi agitada magneticamente por 10 min. Após este período, a agitação foi interrompida e imediatamente o pH medido em potenciômetro (Marca Quimis Modelo Q-400A) calibrado. A seguir, sob agitação magnética, seguiu-se com a titulação da dispersão de amido com NaOH 0,1 mol L⁻¹ até atingir valor de pH 8,3, utilizando-se fenolftaleína como indicador. A acidez foi expressa em mililitros de base por 100 g (b.s.) de amostra.

2.2.4 Determinação de ácidos orgânicos por CLAE

Para análise das amostras de polvilho azedo, estas foram preparadas de acordo com Demiate et al. (1999), sendo que 15 g de amostra foram suspensas em 30 mL de solução de ácido sulfúrico 0,005 mol.L⁻¹ por um período de 24 horas em temperatura ambiente com agitação ocasional. Essas suspensões foram centrifugadas a 956 x g por 10 minutos e a 3823 x g por 20 minutos e, em seguida, filtradas em membrana de politetrafluoretileno (PTFE) de 0,22 µm (Allcrom, São Paulo, Brasil) para posterior injeção no cromatógrafo líquido de alta eficiência.

Os ácidos láctico, acético, propiônico e butírico foram determinados conforme método descrito por Aquino et al. (2015). O sistema de cromatografia líquida consistiu em um módulo de separação, equipado com uma bomba quaternária e um desgaseificador (LC-20AT), um injetor automático (SIL-10A) com um loop de 20 µL, um detector de arranjo de diodos (SPD-M20A) com faixa de trabalho de comprimento de onda 190-230 nm, controlados por uma estação de trabalho (CBM-20A), com sistema de aquisição de dados LC Solutions software, todos fabricados pela Shimadzu Corporation (Kyoto, Japão). Para fase estacionária foi utilizada uma coluna C18, Hichrom (150 x 4,6 mm, 5µm - Berkshire, UK), sendo o fluxo isocrático de 0,6 mL min⁻¹ para as fases móveis.

As fases móveis utilizadas foram constituídas por solução de fosfato de potássio monobásico - KH₂PO₄ (Proquimios, Rio de Janeiro, Brasil) 0,02 mol L⁻¹ com pH 2,88 ± 0,02 ajustado com ácido fosfórico (Nuclear, São Paulo, Brasil) e 2 % de metanol para os ácidos láctico,

acético e propiônico (ZOTOU; LOUKOU; KARAVA, 2004), e por solução de KH_2PO_4 $0,02 \text{ mol L}^{-1}$ com pH $2,88 \pm 0,02$ (ajustado com ácido fosfórico) e 40 % de metanol para o ácido butírico.

A fase móvel com 2 % de metanol foi filtrada em membrana de acetato de celulose de $0,45 \mu\text{m}$ da Advantec MFS (Tóquio, Japão), e a com 40 % de metanol em membrana em politetrafluoretileno (PTFE) de $0,45 \mu\text{m}$ da Allcrom (São Paulo, Brasil), ambas foram desgaseificadas por 20 minutos em um banho ultrassom (Unique, Maxi Clean 1650A, Indaiatuba, São Paulo, Brasil).

Os ácidos foram identificados nas amostras com base nos seus tempos de retenção e pela comparação entre os espectros, na região do ultravioleta, dos compostos nas soluções padrões e dos picos detectados nas amostras. Para a quantificação foi selecionado o comprimento de onda de 220 nm.

2.2.5 Propriedades da pasta

As propriedades de pasta foram determinadas utilizando o analisador rápido de viscosidade RVA (*Rapid Visco Analyser 4000* – Perten Instruments), através do software *Thermocline for Windows*. Foram utilizadas 2,5 g de amostra dispersas em 25 g de água, com correção para 14 % de umidade, o que corresponde a 2,5 % m/v (base massa seca). A programação utilizada foi um tempo total de corrida de 13 minutos, iniciando com temperatura de $50 \text{ }^\circ\text{C}$ mantida por 1 minuto, aquecimento até $95 \text{ }^\circ\text{C}$ por 6 minutos, seguido de resfriamento até $50 \text{ }^\circ\text{C}$ por 6 minutos. A rotação iniciou em 960 rpm por 10 segundos e diminuiu para 160 rpm no decorrer da análise. Dos amilogramas obtidos foram avaliadas as seguintes características: temperatura inicial de pasta, viscosidade máxima, temperatura no pico de viscosidade máxima, viscosidade mínima, viscosidade final no ciclo de resfriamento e tendência à retrogradação.

2.2.6 Isotermas de sorção

As umidades de equilíbrio dos polvilhos azedos secos totalmente ao sol e dos expostos por diferentes tempos ao sol, e secos em estufa a 45, 55 e $65 \text{ }^\circ\text{C}$, foram determinadas pelo método gravimétrico estático, utilizando soluções salinas saturadas em água destilada, para uma determinada umidade relativa, de acordo com a

Tabela 2. A atividade de água de cada solução corresponde a umidade relativa dividida por 100.

Tabela 2 - Umidades relativas das soluções saturadas de sais a 25 °C.

Sal	Umidade relativa (%)
Cloreto de lítio	11
Cloreto de magnésio	33
Brometo de sódio	58
Cloreto de sódio	75
Cloreto de bário	90

As amostras foram pesadas em balança analítica (Marca Bioscale, modelo FA2204C), em triplicata, em cadinho de porcelana, previamente seco a 105 °C, em seguida, colocadas em potes herméticos com as respectivas soluções salinas, para cada valor de umidade relativa (Tabela 2). Os potes foram colocados em câmara incubadora tipo DBO, com temperatura controlada de 25 ± 1,0 °C. As amostras foram pesadas em intervalos regulares de tempo até o equilíbrio (massa constante). Alcançado o equilíbrio, as amostras foram levadas à estufa (Marca Marconi, modelo MA 035), a uma temperatura de 105 °C para a determinação da massa seca.

A partir dos dados experimentais, foram calculadas as umidades de equilíbrio (X_e) através da Equação 1.

$$X_e = \frac{m_i - m_s}{m_i} \times 100 \quad (\text{Equação 1})$$

Onde:

X_e = umidade no equilíbrio, % em base seca.

m_i = massa inicial da amostra.

m_s = massa seca da amostra (seca a 105 °C).

2.2.6.1 Modelagem matemática das isotermas de sorção

O ajuste dos modelos matemáticos (Tabela 3) aos dados experimentais foi realizado pela análise de regressão não linear, pelo método Quasi-Newton, utilizando o programa computacional STATISTICA 8.0®.

Tabela 3 - Modelos matemáticos ajustados aos dados experimentais de isoterma de sorção do amido de mandioca fermentado obtido nas diferentes condições de secagem.

Nome do modelo	Modelo*
GAB (Guggenheim-Anderson-Bôer)	$X_e = \frac{X_m C_{GAB} a_w}{[(1 - K_{GAB} a_w)(1 - K_{GAB} a_w + C_{GAB} K_{GAB} a_w)]}$
BET	$X_e = \frac{X_m C a_w}{(1 - a_w)} \left[\frac{1 - (n + 1)(a_w)^n + n(a_w)^{n+1}}{1 - (1 - C)a_w - C(a_w)^{n+1}} \right]$
BET linear	$X_e = \frac{X_m C_{BET} a_w}{(1 - a_w)[1 + (C - 1)a_w]}$
Oswin	$X_e = A \left(\frac{a_w}{1 - a_w} \right)^B$
Langmuir	$X_e = \frac{X_m C a_w}{1 + C a_w}$

*Sendo: A, B e C_{BET} , C_{GAB} , K_{GAB} , k, n, n' = constantes das equações; X_e = umidade de equilíbrio expressa em base seca ($g H_2O.g_{ss}^{-1}$); X_m = umidade na monocamada molecular ($g H_2O.g_{ss}^{-1}$).

Fonte: Kurozawa, El- Aourar e Murr (2005).

Para avaliar a qualidade dos ajustes dos modelos matemáticos (Tabela 2) aos dados experimentais, foram utilizados como critérios de ajuste a análise do coeficiente de regressão (R^2), gerado pelo próprio software Statistica, raiz do quadrado médio do erro (RQME) (Equação 2), qui-quadrado reduzido (χ^2) (Equação 3) e módulo do erro médio relativo (P (%)) (Equação 4), que levam em consideração as respostas observadas experimentalmente e os valores preditos pelo modelo.

$$RQME = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (X_{e_{pred}} - X_{e_{exp}})^2 \right]^{1/2} \quad (\text{Equação 2})$$

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (X_{e_{exp}} - X_{e_{pred}})^2}{N - V} \quad (\text{Equação 3})$$

$$P(\%) = \frac{100}{N} \sum_{i=1}^N \frac{|X_{e_{pre}} - X_{e_{exp}}|}{X_{e_{exp}}} \quad (\text{Equação 4})$$

Onde:

χ^2 = qui-quadrado reduzido.

RQME = raiz do quadrado médio do erro.

P (%) = módulo do erro médio relativo.

$X_{e_{exp}}$ = umidade de equilíbrio observado experimentalmente.

$X_{e_{pred}}$ = umidade de equilíbrio predito pelo modelo.

N = número de pontos experimentais.

V = número de coeficientes e constantes.

Para ser considerado de bom ajuste, o modelo deve alcançar valores de coeficiente de regressão linear (R^2) mais elevados e próximos possíveis da unidade (1,0) e, concomitantemente, os valores de RQME, χ^2 e P (%) menores possíveis.

2.2.7 Análise estatística

Todas as análises foram realizadas em triplicata e os dados expressos como média \pm desvio padrão (DP). Os dados foram submetidos à análise de variância (ANOVA), ao nível de 5 % de significância, seguido pelo teste de Tukey, para comparação das médias.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O processo de secagem ao sol do amido de mandioca fermentado é um fator limitante na produção, e embora os processos de secagem artificial sejam mais eficientes, não conferem a este produto a sua principal característica que é expansão ao forneamento. Alguns autores relatam que mais do que o calor, a radiação solar (UV) é a responsável por esta propriedade (CEREDA, 1987; DUFOUR et al., 1995), podendo também influenciar sobre outras características deste produto.

Diante disto, os experimentos de secagem do amido fermentado de mandioca foram realizados variando-se o tempo ao sol de uma a sete horas com secagem continuada em estufa convectiva a 45, 55 e 65 °C, para avaliar o efeito da secagem solar e em estufa, sobre as características físico-químicas e reológicas do polvilho azedo, bem como o estudo das suas isotermas de adsorção de umidade.

3.1 Propriedade de expansão

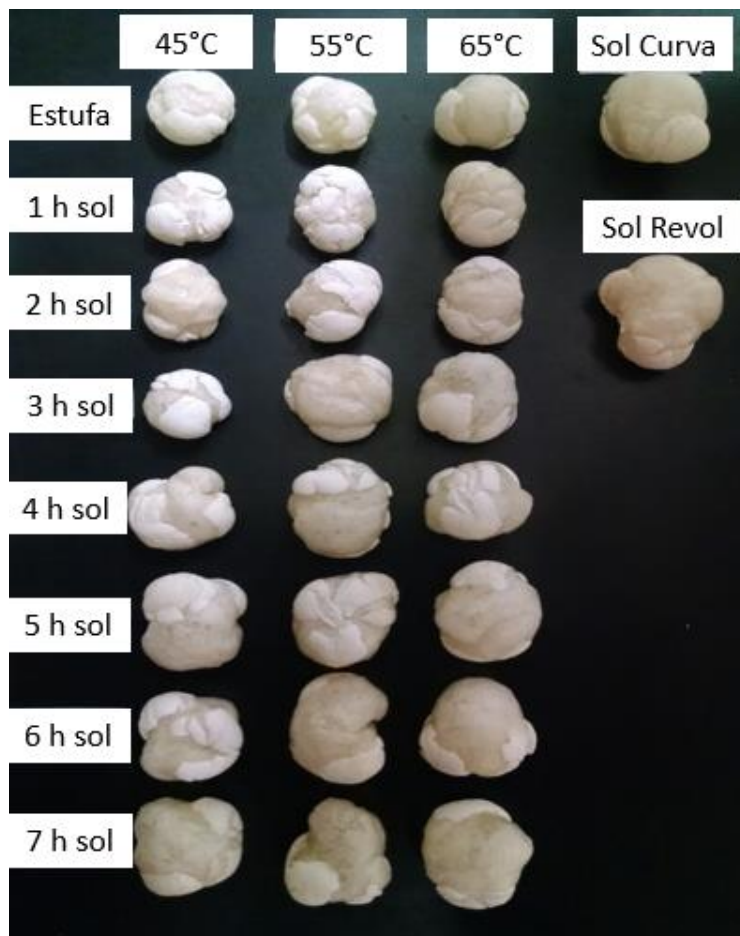
A expansão do polvilho azedo é definida como a capacidade de aumentar o volume da massa confeccionada quando submetida ao forno, sendo um parâmetro diretamente relacionado com a qualidade deste produto (CEREDA, 1983a).

Em diversos trabalhos realizados por Cereda e Nunes (1989, 1990 e 1991) ficou comprovado que a radiação solar é a principal responsável pela expansão do polvilho azedo. Plata-Oviedo (1991) e Plata-Oviedo e Camargo (1994) também concluíram que a secagem solar proporciona mudanças irreversíveis, possivelmente de natureza química que favorecem a propriedade de expansão ao polvilho.

A Figura 1 ilustra os resultados do efeito da secagem solar sobre as propriedades de expansão dos biscoitos produzidos com o amido fermentado e seco ao sol por diferentes tempos e secagem em estufa convectiva a 45, 55 e 65 °C, secagem totalmente ao sol sem revolvimento (Sol Curva) e secagem totalmente ao sol com revolvimento (Sol Revol). Os biscoitos foram avaliados quanto a perda de massa, índice de expansão, volume específico e densidade específica, cujos resultados estão ilustrados nas Figuras 2, 3, 4 e 5, respectivamente. Os resultados estatísticos de diferença entre as médias para os valores apresentados nesta Figuras encontram-se no Apêndice D.

Observa-se com estes resultados que a expansão sofre influência da exposição ao sol, quando comparado os tempos ao sol com a secagem totalmente em estufa. .

Figura 1 - Biscoitos produzidos com polvilho azedo submetido a diferentes tempos de secagem solar e em estufa convectiva a 45, 55 e 65 °C, sendo Sol Curva o amido de mandioca fermentado seco totalmente ao sol sem revolvimento e Sol Revol o amido de mandioca fermentado seco totalmente ao sol com revolvimento.



Fonte: acervo do autor.

Figura 2 – Efeito da secagem solar e em estufa do polvilho azedo sobre a perda de massa dos biscoitos.

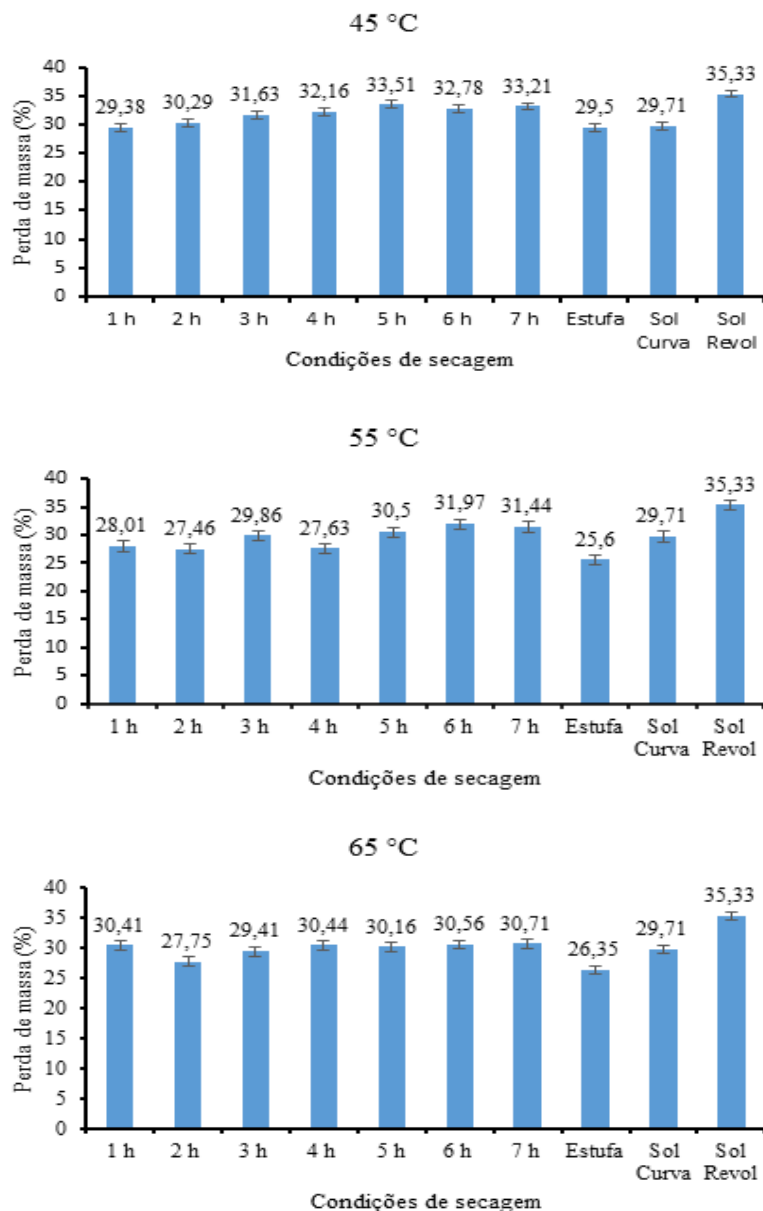


Figura 3 – Efeito da secagem solar e em estufa do polvilho azedo sobre o índice de expansão dos biscoitos.

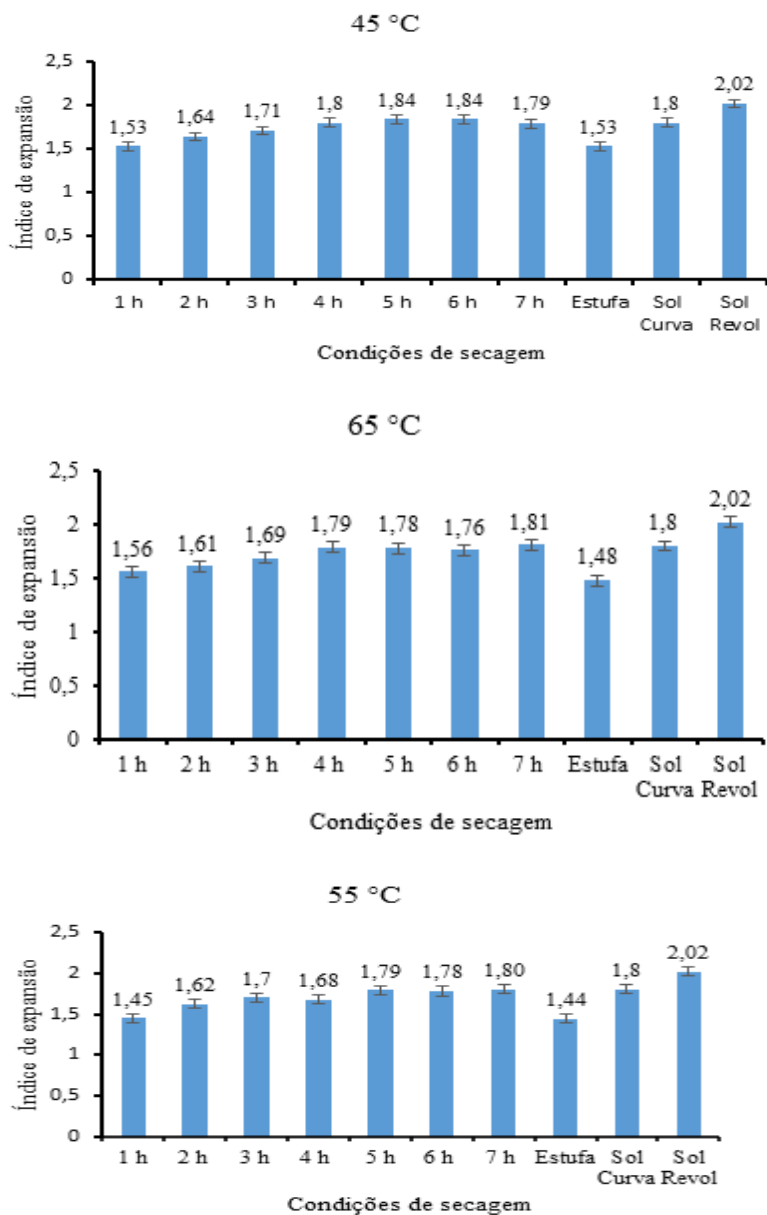


Figura 4 – Efeito da secagem solar e em estufa do polvilho azedo sobre o volume específico dos biscoitos.

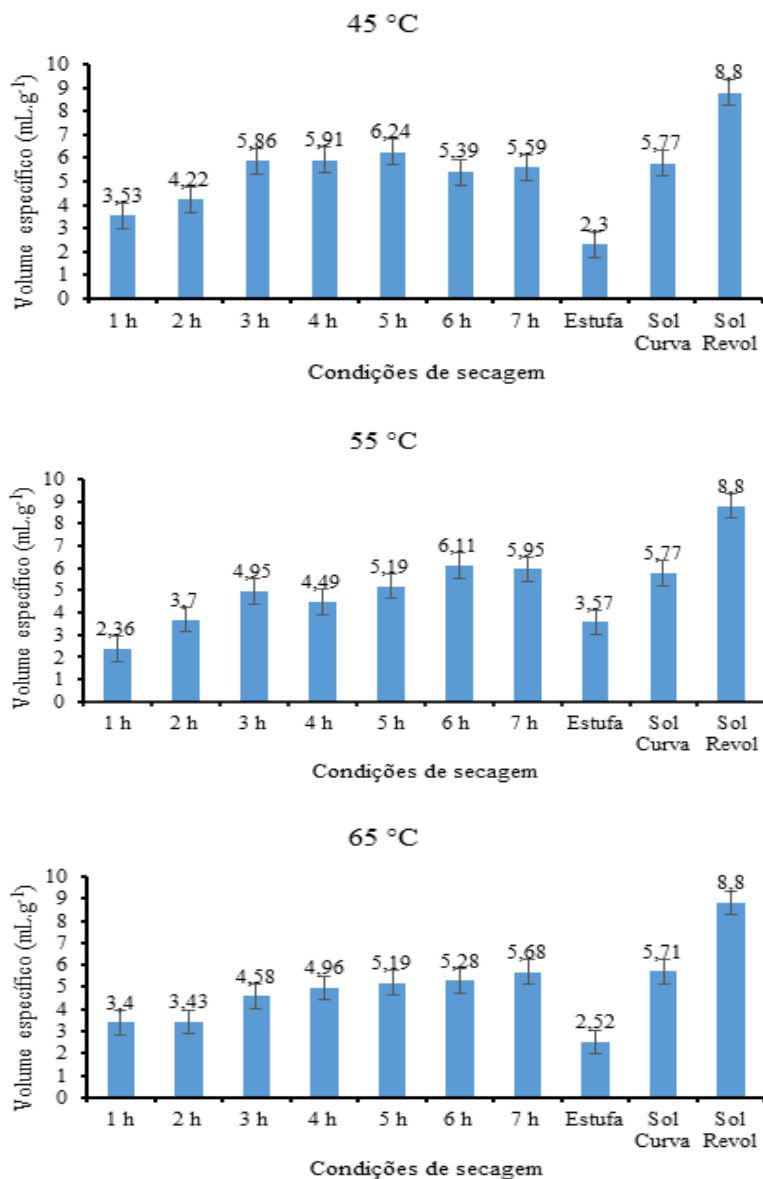
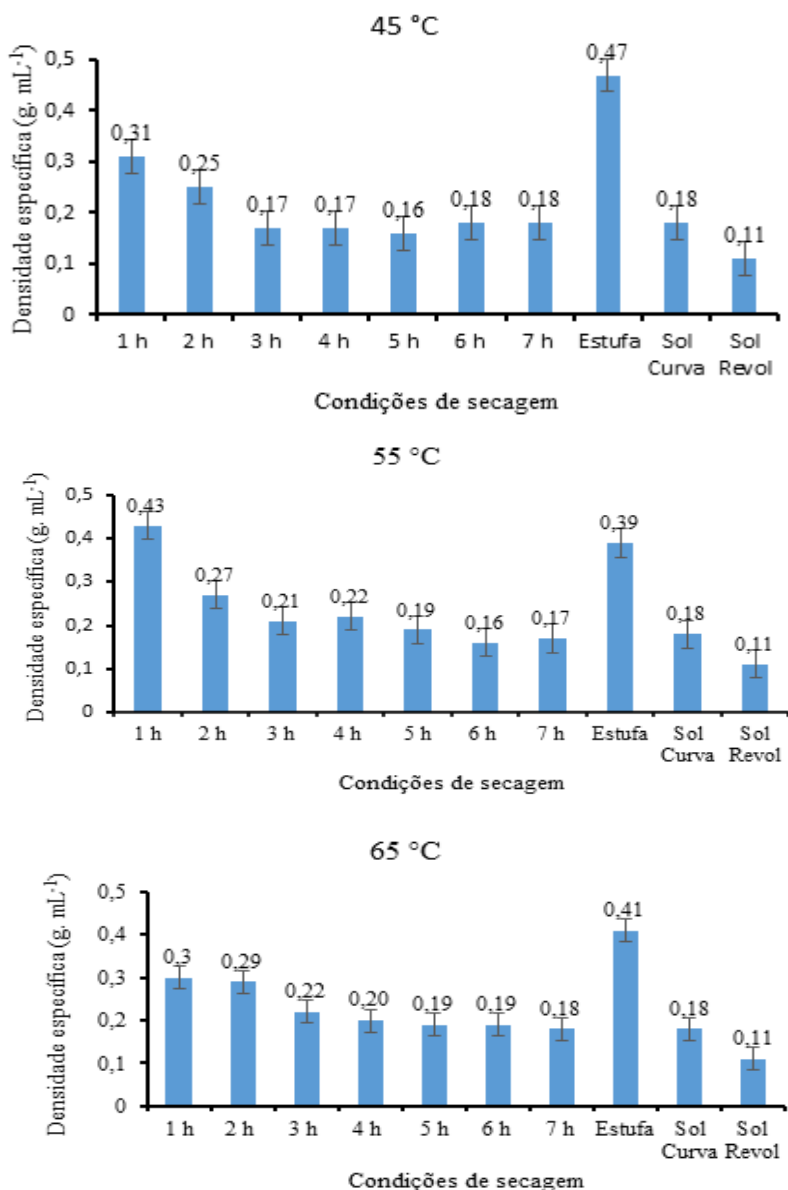


Figura 5 – Efeito da secagem solar e em estufa do polvilho azedo sobre a densidade específica dos biscoitos.



A secagem solar por tempos superiores a 2 h não refletiu em incrementos adicionais ao índice de expansão do amido fermentado de mandioca, comparativamente com a amostra seca totalmente ao sol (sem revolvimento), em todas as temperaturas, a partir de 2h ao sol, o amido fermentado não apresentou índice de expansão com diferença significativa do amido fermentado seco totalmente ao sol (sol curva). Entretanto, diferenças visuais sobre a expansão dos biscoitos podem ser observadas na Figura 1, onde a partir de 4 h ao sol, e estufa a 45 °C não se observa variações muito pronunciadas sobre a expansão. Já para o amido fermentado seco em estufa a 55 e 65 °C, as diferenças ficam menos pronunciadas a partir de 3 h ao sol.

Não foram encontradas diferenças significativas ($p \geq 0,05$) para o índice de expansão entre o amido fermentado seco ao sol por 5 e 6 h e estufa convectiva a 45 °C, de 5 a 7 h ao sol e estufa convectiva a 55 °C e por 7 h ao sol com temperatura da estufa a 65 °C, com o polvilho azedo seco tradicionalmente ao sol com revolvimento.

Plata-Oviedo (1998) e Pola-Júnior (2013), expondo amido fermentado de mandioca em diversos tempos ao sol e secagem em estufa a 45 °C sugeriram que a reação de oxidação promovida pela luz ultravioleta do sol sobre o amido fermentado seria um dos fenômenos responsáveis pela propriedade de expansão e tinha seu valor máximo a partir de quatro horas de exposição solar. Plata-Oviedo (1998) ainda afirmou que há a necessidade de exposição solar por no mínimo 2 h.

Para Ascheri e Vilela (1995) maiores valores de expansão são representados por biscoitos com menor densidade. Os resultados obtidos concordam com a afirmativa destes autores, já que a amostra que apresentou menor densidade ($0,11 \text{ g mL}^{-1}$), que foi a amostra seca totalmente ao sol com revolvimento, possui o maior índice de expansão (2,02). A maior expansão, encontrada para esta amostra, pode ser explicada pelo fato de o revolvimento aumentar a superfície de contato do amido fermentado com os raios ultravioleta do sol, entretanto, não foi encontrado diferença significativa entre a amostra seca ao sol sem e com o revolvimento, para os parâmetros índice de expansão e densidade específica, no entanto, foram observadas diferenças significativas entre elas para o volume específico.

O menor resultado de índice de expansão e o maior de densidade específica foi encontrado no amido fermentado seco totalmente em estufa. Este resultado comprova que a secagem solar tem efeito significativo sobre a expansão.

O volume específico do amido fermentado seco ao sol de 1 h até 5 h e em estufa a 45 °C apresentaram os maiores resultados para este parâmetro, comparativamente com as secas em estufa a 55 e 65 °C, chegando a apresentar diferença significativa ($p < 0,05$) para o período de 4 h ao sol. Este fato pode estar relacionado com a radiação ultravioleta do sol, no dia em que foi realizada a secagem ao sol em estufa a 45 °C, sendo muito alto (10), enquanto que nas outras condições de secagem o UV foi extremo (11).

Segundo Vatanasuchart (2005), uma exposição excessiva (15 h) de amido modificado com ácido láctico, com uma energia muito elevada de radiação UVC não forneceu ao amido uma estrutura suficiente para boa expansão, enquanto que com a utilização de lâmpadas UVB e UVA com baixa energia de radiação promoveu uma melhor expansão do amido durante o cozimento. Este trabalho mostrou que uma radiação UV em excesso, pode ser a responsável por um decréscimo na expansão do amido fermentado após o forneamento.

Plata-Oviedo (1998) avaliou as faixas de efeito da radiação solar, utilizando filtros “longpass” e observou que as radiações de comprimento de onda superiores a 443 nm não contribuíram para o desenvolvimento da expansão do amido fermentado, afirmando que o seguimento da luz UVA de radiação solar de 315 a 400 nm contribui para o desenvolvimento da propriedade de expansão.

Os valores de volume específico para o polvilho azedo seco totalmente em estufa foram de 2,30 mL g⁻¹, 2,57 mL g⁻¹ e 2,51 mL g⁻¹, para as temperaturas de 45, 55 e 65 °C, respectivamente, não havendo diferença significativa entre as médias. Estes resultados concordam com os obtidos por Marcon (2009), que avaliou a expansão do polvilho azedo fermentado em laboratório seco ao sol e seco em estufa, onde o seco ao sol (5,76 mL g⁻¹) apresentou expansão superior ao do seco em estufa (2,72 mL g⁻¹). Já para o polvilho azedo seco totalmente ao sol (sol curva) e para o seco totalmente ao sol com revolvimento (sol revol), os valores de volume específico foram 5,77 mL g⁻¹ e 8,80 mL g⁻¹, respectivamente, o que significa que a expansão do polvilho azedo seco ao sol (sol curva) foi duas vezes maior, e a do seco ao sol com revolvimento foi três vezes maior do que o seco totalmente em estufa, em todas as temperaturas avaliadas.

Mestres, Zakhia e Dufour (1997) avaliaram a expansão ao forno do amido de mandioca colombiano após submeter as amostras aos seguintes tratamentos: amido de mandioca seco à sombra, polvilho azedo seco em estufa e ao sol. A habilidade de expansão ao forno do

polvilho azedo seco ao sol foi duas vezes maior do que nas outras condições de secagem. Os resultados obtidos de volume específico foram 6,3 mL g⁻¹ para o polvilho doce, 7,0 mL g⁻¹ para o polvilho azedo seco em estufa e 14,9 mL g⁻¹ para o polvilho azedo seco ao sol. Apesar de a proporção de expansão, entre o polvilho seco ao sol e o seco em estufa, encontrado por estes autores, ter sido igual a encontrada neste trabalho (duas vezes maior) os resultados de expansão encontrados por eles estão acima dos obtidos neste estudo.

Dias et al. (2007) analisando amostras de polvilho azedo, obtidas em laboratório, ao longo de 50 dias de fermentação e secas ao sol, obtiveram volume específico entre 3,67 a 7,22 mL g⁻¹, confirmando a hipótese de que além da secagem ao sol, as condições de fermentação também têm influência sobre a expansão. Entretanto, os valores encontrados por Dias et al. (2007) estão mais próximos dos valores obtidos neste trabalho.

Nunes e Cereda (1994) classificaram polvilhos azedos de acordo com os índices de expansão como pequeno (< 5,0 mL g⁻¹), médio (5 a 10 mL g⁻¹) e grande (> 10 mL g⁻¹). A partir desta classificação verifica-se que o amido fermentado de mandioca seco ao sol e em estufa, nas diversas condições experimentais, apresentaram índices de expansão de pequeno a médio. Quando a temperatura de secagem foi de 45 °C as amostras secas totalmente em estufa (2,30 mL g⁻¹) e exposta por 1 h (3,53 mL g⁻¹) e 2 h (4,22 mL g⁻¹) ao sol, apresentaram pequenos índices de expansão, sendo encontrados valores médios a partir de 3 h ao sol. Já quando a secagem em estufa ocorreu a 55 e 65 °C, valores médios de índice de expansão foram encontrados a partir de 5 h de exposição solar.

Demiante et al. (2000) e Silva et al. (2006) afirmam que o método de avaliação da propriedade de expansão utilizando o painço para medir o volume de deslocamento não é muito sensível e tem baixa reprodutibilidade. Diante disto, Marcon (2009) sugeriu que esta propriedade fosse avaliada pelo percentual de perda de massa do corpo de prova após o assamento, o que daria à análise uma maior precisão e reprodutibilidade. Ainda segundo Marcon (2009) um polvilho azedo de bom desempenho apresenta uma perda de massa após o cozimento em torno de 40 a 45 %. A partir desta informação verifica-se que nenhum dos polvilhos secos ao sol por diferentes tempos e secos em estufa em diferentes temperaturas apresentou bom desempenho quanto à expansão, sendo o maior valor verificado para a amostra seca totalmente ao sol com revolvimento (35,33 %).

3.2 pH e acidez titulável

Os valores de pH e acidez titulável para o amido de mandioca fermentado e seco ao sol e em estufa são ilustrados na Tabela 4.

A redução do pH do amido de mandioca fermentado em relação ao amido de mandioca nativo é atribuída a geração de ácidos orgânicos durante a fermentação (DEMIATE et al., 1999).

Vários autores afirmam que o pH do polvilho azedo, por ser um produto fermentado, é baixo (ASCHERI; VILELA, 1995; PLATA OVIEDO; CAMARGO, 1995; CARVALHO et al., 1996; PEREIRA et al., 1999; SILVEIRA et al., 2000; MARCON, 2004; MARCON et al. 2006; 2007), o que foi comprovado pelos resultados obtidos neste trabalho com valores variando de 3,46 a 3,66.

O maior valor de pH foi encontrado para o polvilho seco totalmente ao sol com revolvimento. O revolvimento aumenta a área superficial de contato, o que pode ter proporcionado a este amido fermentado uma perda maior de ácidos orgânicos durante a secagem, causando a elevação do seu pH em relação aos outros polvilhos. Desta forma, o menor valor de acidez titulável também foi encontrado neste polvilho. Isto indica, que além da fermentação, o pH e acidez têm relação com o processo de secagem.

Ascheri e Vilela (1995) relacionaram a acidez titulável do polvilho azedo à formação de ácidos orgânicos durante a fermentação. Estes ácidos são formados pelo consumo de açúcares inicialmente presentes no meio fermentativo e pela degradação parcial do amido em carboidratos facilmente assimiláveis por micro-organismos amilolíticos (CEREDA; GIAJ-LEVRA, 1987). No caso do presente trabalho, observa-se que além da fermentação, a acidez pode ser influenciada também pelas diferentes condições de secagem.

Os valores de acidez variaram de 5,78 a 7,96 mL de NaOH 0,1 mol L⁻¹ 100 g⁻¹, entre o menor e o maior valor encontrado. Estes resultados concordam com os encontrados por Plata-Oviedo (1998), que foram de 5,30; 6,09; 6,80; 7,16 e 10,52 mL de NaOH 0,1 mol L⁻¹ 100 g⁻¹, para polvilho azedo comercial, fermentado industrial e seco ao sol por 8 h, fermentado industrial seco com luz UVA, fermentado industrial seco em estufa e fermentado industrial úmido, respectivamente. Os resultados estão próximos também dos encontrados por Diniz (2006), que avaliando amostras de polvilho azedo de diferentes regiões do Estado Minas Gerais encontrou acidez entre 1,97 e 7,43 mL de NaOH 0,1 mol L⁻¹ 100 g⁻¹, e também do obtido por Penido (2013), que para o

polvilho comercial encontrou acidez de 6,75 mL de NaOH 0,1 mol L⁻¹ 100 g⁻¹, com índice de expansão 1,06. Com valores de acidez semelhantes aos encontrados por Penido (2013), correspondente ao amido fermentado seco ao sol de 4 a 7 h e estufa a 65 °C, o presente trabalho encontrou resultados de índice de expansão superiores (de 1,76 a 1,81) ao de Penido.

Tabela 4 - Resultados de pH e acidez das amostras de polvilho azedo secas ao sol e em estufa convectiva a 45, 55 e 65 °C.

Amostras	45 °C			55 °C			65 °C		
	pH	Acidez (mL de NaOH 0,1 mol L ⁻¹ 100 g ⁻¹)	pH	pH	Acidez (mL de NaOH 0,1 mol L ⁻¹ 100 g ⁻¹)	pH	Acidez (mL de NaOH 0,1 mol L ⁻¹ 100 g ⁻¹)	pH	Acidez (mL de NaOH 0,1 mol L ⁻¹ 100 g ⁻¹)
1h ao Sol	3,48 ^{abA} ± 0,01	7,73 ^{IB} ± 0,08	3,52 ^{abB} ± 0,01	3,52 ^{abB} ± 0,01	7,82 ^{IB} ± 0,01	3,60 ^{bcC} ± 0,01	7,02 ^{caA} ± 0,06	3,60 ^{bcC} ± 0,01	7,19 ^{IA} ± 0,06
2h ao Sol	3,46 ^{aA} ± 0,03	7,96 ^{IC} ± 0,06	3,53 ^{abB} ± 0,01	3,53 ^{abB} ± 0,01	7,78 ^{IB} ± 0,04	3,63 ^{cdC} ± 0,01	6,91 ^{deA} ± 0,04	3,63 ^{cdC} ± 0,01	6,79 ^{caA} ± 0,08
3h ao Sol	3,50 ^{abcA} ± 0,02	7,65 ^{efB} ± 0,07	3,56 ^{bcdB} ± 0,02	3,56 ^{bcdB} ± 0,02	7,64 ^{eb} ± 0,02	3,62 ^{bcdC} ± 0,02	6,90 ^{deA} ± 0,07	3,62 ^{bcdC} ± 0,02	6,71 ^{bcA} ± 0,08
4h ao Sol	3,52 ^{bcA} ± 0,01	7,71 ^{IC} ± 0,01	3,57 ^{bcdB} ± 0,01	3,57 ^{bcdB} ± 0,01	7,57 ^{deb} ± 0,01	3,62 ^{bcdC} ± 0,01	6,73 ^{bcdA} ± 0,07	3,62 ^{bcdC} ± 0,01	7,13 ^{IA} ± 0,04
5h ao Sol	3,53 ^{bcA} ± 0,01	7,57 ^{efB} ± 0,07	3,59 ^{cdB} ± 0,01	3,59 ^{cdB} ± 0,01	7,45 ^{dB} ± 0,02	3,62 ^{bcdC} ± 0,01	6,56 ^p ± 0,04	3,62 ^{bcdC} ± 0,01	5,78 ^a ± 0,07
6h ao Sol	3,54 ^{ca} ± 0,01	7,36 ^{cdB} ± 0,07	3,61 ^{deB} ± 0,01	3,61 ^{deB} ± 0,01	7,22 ^{eb} ± 0,07	3,64 ^{deC} ± 0,01	6,73 ^{bcdA} ± 0,07	3,64 ^{deC} ± 0,01	6,73 ^{bcdA} ± 0,07
7h ao Sol	3,53 ^{bcA} ± 0,02	7,52 ^{deC} ± 0,07	3,57 ^{bcdA} ± 0,04	3,57 ^{bcdA} ± 0,04	7,26 ^{eb} ± 0,07	3,64 ^{deB} ± 0,01	6,56 ^p ± 0,04	3,64 ^{deB} ± 0,01	5,78 ^a ± 0,07
Estufa	3,52 ^{bcA} ± 0,01	7,34 ^{eb} ± 0,03	3,55 ^{abcAB} ± 0,03	3,55 ^{abcAB} ± 0,03	7,95 ^{IC} ± 0,01	3,59 ^{bb} ± 0,02	6,56 ^p ± 0,04	3,59 ^{bb} ± 0,02	5,78 ^a ± 0,07
Sol Curva	3,51 ^{bc} ± 0,02	6,56 ^p ± 0,04	3,51 ^a ± 0,02	3,51 ^a ± 0,02	6,56 ^p ± 0,04	3,51 ^a ± 0,02	6,56 ^p ± 0,04	3,51 ^a ± 0,02	6,56 ^p ± 0,04
Sol Revol	3,66 ^d ± 0,02	5,78 ^a ± 0,07	3,66 ^d ± 0,02	3,66 ^d ± 0,02	5,78 ^a ± 0,07	3,66 ^d ± 0,02	5,78 ^a ± 0,07	3,66 ^d ± 0,02	5,78 ^a ± 0,07

*Valores seguidos de letras minúsculas iguais na mesma coluna não se diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

** Valores seguidos de letras maiúsculas iguais na mesma linha não se diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Alguns autores relacionaram a acidez do polvilho azedo com a expansão (BERTOLINI et al., 2001; VATANASUCHART et al., 2005). Aquino (2015) avaliando a acidez e a expansão de polvilho azedo de várias polvilharias, de diferentes regiões de Santa Catarina, não encontrou correlação satisfatória entre estes dois parâmetros.

Correlação satisfatória entre a acidez e a expansão do polvilho azedo seco de 0 h (estufa) até 7 h de secagem ao sol também não foi encontrada neste trabalho, para a temperatura de 45 °C. Entretanto, melhores coeficientes de determinação (R^2) foram encontrados nas temperaturas de 55 e 65 °C, como mostram os resultados ilustrados nas Figuras 6, 7 e 8. Assim, a acidez não pode ser considerada um parâmetro confiável para a previsão da expansão do polvilho azedo quando seco em estufa a 45 °C.

Figura 6 - Influência da acidez nas propriedades do polvilho azedo seco ao sol de 0 a 7 h e em estufa a 45 °C.

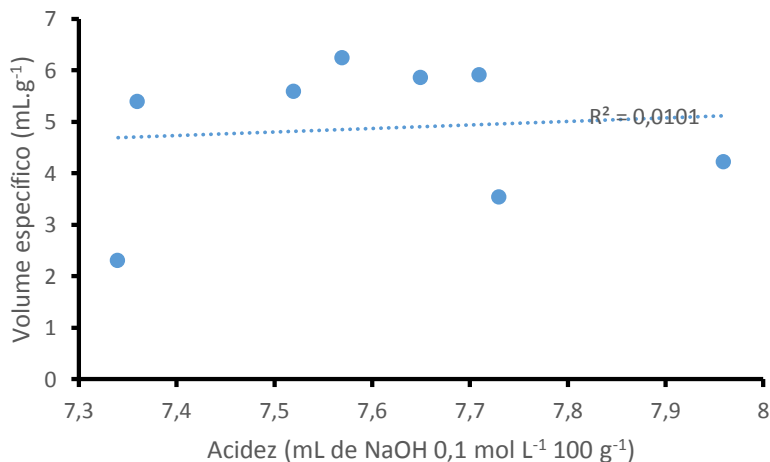


Figura 7 - Influência da acidez nas propriedades do polvilho azedo seco ao sol de 0 a 7 h e em estufa a 55 °C.

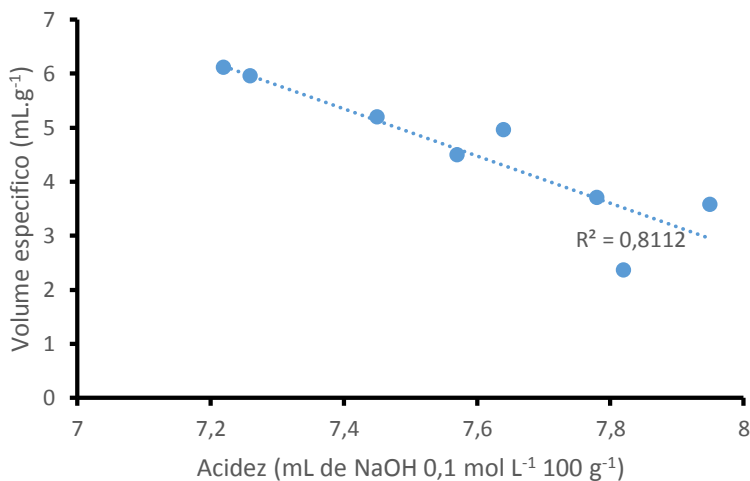
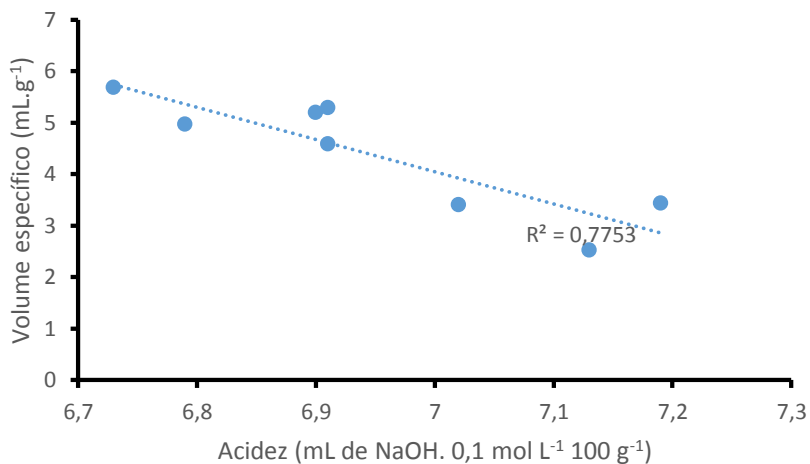


Figura 8 - Influência da acidez nas propriedades do polvilho azedo seco ao sol de 0 a 7 h e em estufa a 65 °C.



Avaliando o efeito da acidez sobre o tempo de secagem ao sol é possível verificar que há um decréscimo a partir 3 h ao sol, para as temperaturas de estufa em 45, 55 e 65 °C, não havendo uma relação

exata e diretamente proporcional entre a acidez e o tempo de secagem ao sol.

Entretanto, o polvilho azedo seco integralmente ao sol com revolvimento, que teve a maior expansão ($8,8 \text{ mL g}^{-1}$), apresentou a menor acidez ($5,78 \text{ mL de NaOH } 100 \text{ g}^{-1}$). Já o polvilho azedo seco totalmente em estufa, que teve a menor expansão em todas as temperaturas, não apresentou a maior acidez na temperatura de $45 \text{ }^\circ\text{C}$, mas apresentou a maior acidez para as temperaturas de 55 e $65 \text{ }^\circ\text{C}$.

3.3 Ácidos orgânicos

Conforme os resultados de ácidos orgânicos da Tabela 5, as amostras de polvilho azedo secas ao sol e em estufa apresentam maiores concentrações de ácido láctico e butírico em relação ao acético e propiônico.

Segundo Silveira et al. (2003) e Lacerda et al. (2005) quando a fermentação ocorre em temperaturas mais baixas ela é lenta com predomínio da microbiota láctica com uma maior frequência do *Lactobacillus plantarum*, enquanto que em temperaturas mais elevadas, a fermentação é mais rápida e predomina a microbiota butírica, sendo o *Clostridium butyricum* com maior relevância.

Como a região de Santa Rosa do Sul, local onde ocorreu a fermentação, é uma região de temperaturas baixas, principalmente durante o período de inverno, a fermentação deve ter ocorrido com predomínio da microbiota láctica, justificando os maiores teores de ácido láctico encontrados em relação ao ácido acético, propiônico e butírico. Entretanto, como o amido fermentado foi proveniente de um tanque de onze meses de fermentação, ele também passou pelo período de verão, com temperaturas mais elevadas, favorecendo também a microbiota butírica.

Plata-Oviedo (1991) e Cereda e Bonassi (1985) afirmam ser o ácido láctico, dentre os ácidos orgânicos formados na fermentação do amido de mandioca, o principal responsável pela expansão do polvilho azedo.

Mestres e Rouau (1997) e Aplevicz (2006) sugeriram que a modificação química do amido pode ser uma despolimerização oxidativa causada pelas ações conjuntas da fermentação e da secagem ao sol. Durante a secagem ao sol ocorre uma pequena despolimerização do amido e pequena redução de ácido láctico associado ao processo

fotoquímico, que estão relacionados com a propriedade de expansão deste produto.

A partir dos resultados apresentados na Tabela 5, verifica-se que o ácido láctico pode ser o ácido orgânico que está mais fortemente ligado ao amido fermentado, sendo o principal responsável pelo seu poder de expansão, uma vez que dentre todos os ácidos orgânicos analisados foi o único que permaneceu em maior quantidade na amostra seca totalmente ao sol com revolvimento, justamente a amostra que apresentou a maior expansão. Por outro lado, o ácido acético, propiônico e butírico tiveram suas quantidades reduzidas significativamente ($P \leq 0,05$) com o revolvimento.

Estas informações são confirmadas também no trabalho de Aquino (2015), que avaliando o teor dos ácidos orgânicos nas águas de fermentação e no polvilho azedo, observou que o ácido láctico está presente em maior quantidade no polvilho azedo e em menor quantidade nas águas de fermentação, enquanto que os ácidos acético, propiônico e butírico estão presentes em maior quantidade nas águas, do que no polvilho azedo.

Tabela 5 - Ácidos orgânicos em amostras de polvilho azedo secas ao sol e em estufa convectiva a 45, 55 e 65 °C.

Amostras	Ácido Láctico (mg kg ⁻¹)			Ácido Propiônico (mg kg ⁻¹)		
	45 °C	55 °C	65 °C	45 °C	55 °C	65 °C
1 h ao Sol	5947 ^{cC} ± 12,31	5702 ^{cB} ± 3,17	3777 ^{IA} ± 9,47	556 ^{EA} ± 6,40	659 ^{EB} ± 1,13	693 ^{EC} ± 1,95
2 h ao Sol	6526 ^{cC} ± 27,06	6086 ^{GB} ± 35,48	3898 ^{EA} ± 15,04	426 ^{IA} ± 8,52	678 ^{IB} ± 5,92	733 ^{IC} ± 3,90
3 h ao Sol	6085 ^{cC} ± 1,80	5273 ^{cB} ± 21,11	3745 ^{IA} ± 20,95	339 ^{EA} ± 3,07	615 ^{dB} ± 3,88	719 ^{dB} ± 4,15
4 h ao Sol	5831 ^{cC} ± 56,22	5500 ^{dB} ± 6,76	3639 ^{EA} ± 7,82	340 ^{EA} ± 9,97	559 ^{EB} ± 3,06	600 ^{cC} ± 1,63
5 h ao Sol	5641 ^{cC} ± 27,91	5134 ^{AB} ± 2,19	3665 ^{EA} ± 2,75	357 ^{IDA} ± 8,08	562 ^{cB} ± 3,26	682 ^{DC} ± 3,55
6 h ao Sol	5528 ^{bC} ± 15,25	5214 ^{BB} ± 20,22	3486 ^{BA} ± 3,10	367 ^{DA} ± 4,93	608 ^{DB} ± 1,19	686 ^{DEC} ± 1,35
7 h ao Sol	5560 ^{bC} ± 14,93	5196 ^{BB} ± 8,72	3434 ^{BA} ± 8,12	396 ^{EA} ± 15,55	612 ^{DB} ± 2,86	699 ^{IC} ± 2,80
Estufa	5964 ^{cC} ± 19,49	5837 ^{IB} ± 8,12	3875 ^{EA} ± 27,72	643 ^{BA} ± 15,77	708 ^{GB} ± 2,89	771 ^{IC} ± 2,67
Sol Curva	5197 ^a ± 3,28	5197 ^b ± 3,28	5197 ^I ± 3,28	310 ^b ± 1,66	310 ^b ± 1,66	310 ^b ± 1,66
Sol Revol	5849 ^d ± 3,70	5849 ^f ± 3,70	5849 ^g ± 3,70	98 ^a ± 2,27	98 ^a ± 2,27	98 ^a ± 2,27
Tanque	7592 ^h ± 11,87	7592 ⁱ ± 11,87	7592 ^j ± 11,87	1585 ⁱ ± 1,21	1585 ^h ± 1,21	1585 ^f ± 1,21
Amostras	Ácido Acético (mg kg ⁻¹)			Ácido Butírico (mg kg ⁻¹)		
	45 °C	55 °C	65 °C	45 °C	55 °C	65 °C
1 h ao Sol	805 ^{IDA} ± 21,71	771 ^{IA} ± 7,04	999 ^{BB} ± 5,73	1661 ^{EA} ± 14,83	1639 ^{IA} ± 9,04	1715 ^{IB} ± 2,60
2 h ao Sol	800 ^{ODB} ± 16,45	764 ^{GA} ± 5,93	980 ^{IC} ± 2,14	1675 ^{EB} ± 20,75	1517 ^{EA} ± 29,89	1672 ^{EB} ± 11,90
3 h ao Sol	771 ^{CB} ± 6,07	709 ^{EA} ± 1,02	926 ^{DC} ± 2,24	1533 ^{DB} ± 21,25	1480 ^{DEA} ± 28,17	1719 ^{IC} ± 8,55
4 h ao Sol	1016 ^{EC} ± 22,63	722 ^{IA} ± 3,59	920 ^{DB} ± 1,78	1533 ^{DB} ± 2,08	1362 ^{BA} ± 35,62	1514 ^{CB} ± 13,32
5 h ao Sol	846 ^{DB} ± 22,74	692 ^{DA} ± 3,46	917 ^{DC} ± 3,03	1455 ^{EA} ± 7,38	1417 ^{BEA} ± 23,94	1584 ^{DB} ± 24,53
6 h ao Sol	836 ^{DB} ± 25,88	655 ^{BA} ± 1,72	919 ^{DC} ± 2,31	1550 ^{DB} ± 11,91	1473 ^{CEA} ± 15,69	1613 ^{DC} ± 4,08
7 h ao Sol	960 ^{EB} ± 45,08	648 ^{BA} ± 1,16	909 ^{CB} ± 4,84	1446 ^{BEA} ± 2,23	1450 ^{EDA} ± 7,47	1580 ^{BA} ± 21,51
Estufa	747 ^{CB} ± 9,16	690 ^{DA} ± 4,20	957 ^{EC} ± 2,40	1742 ^{FB} ± 3,28	1934 ^{EC} ± 21,16	1672 ^{EA} ± 7,40
Sol Curva	674 ^c ± 2,25	674 ^c ± 2,25	674 ^b ± 2,25	1418 ^b ± 1,82	1418 ^{bc} ± 1,82	1418 ^b ± 1,82

Sol Revol	349 ^a ± 1,70	349 ^a ± 1,70	349 ^a ± 1,70	992 ^a ± 11,48	992 ^a ± 11,48	992 ^a ± 11,48
Tanque	1359 ^f ± 5,30	1359 ^h ± 5,30	1359 ^h ± 5,30	3047 ^e ± 7,86	3047 ^h ± 7,86	3047 ^e ± 7,86

*Valores seguidos de letras minúsculas iguais na mesma coluna não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

** Valores seguidos de letras maiúsculas iguais na mesma linha não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Quando o amido fermentado seco ao sol e em estufa é comparado com o amido do tanque de fermentação, que não passou por nenhum processo de secagem, fica evidenciado que qualquer um dos tipos de secagem utilizado, ao sol ou em estufa promove a remoção de quantidades significativas dos ácidos orgânicos do polvilho. Isto pode ser explicado pelo fato dos ácidos acético, propiônico e butírico serem ácidos orgânicos voláteis que evaporam a temperatura ambiente. Já o ácido láctico não é considerado volátil à temperatura ambiente, por isto permanece em maior quantidade no polvilho azedo após a secagem, em relação aos ácidos acético, propiônico e butírico.

Avaliando os amidos fermentados que ficaram expostos ao sol por diferentes tempos, o maior valor de ácido láctico foi encontrado com 2 h ao sol, para 45, 55 e 65 °C (6526; 6086 e 3898 mg kg⁻¹, respectivamente), sendo que na temperatura de 65 °C houve uma redução significativa na quantidade deste ácido, em relação as outras temperaturas de secagem. Isto pode ter ocorrido em função de o ácido láctico estar mais fortemente ligado ao amido, sendo necessário uma temperatura mais elevada para promover o desprendimento do mesmo. Já o ácido propiônico, teve seu valor mais elevado quando exposto por 1 h ao sol e temperatura da estufa a 45 °C (556 mg kg⁻¹), e 2 h ao sol e temperatura da estufa a 55 e 65 °C (678 e 733 mg kg⁻¹, respectivamente). Para o ácido acético os valores máximos encontrados foram quando, exposto por 4h ao sol e estufa a 45 °C (1016 mg kg⁻¹), e 1h ao sol para estufa a 55 e 65 °C (771 mg kg⁻¹), enquanto que para o ácido butírico foram 2 h ao sol e estufa a 45 °C (1675 mg kg⁻¹), 1h ao sol e estufa a 55 °C (1639 mg kg⁻¹) e 3 h ao sol e estufa a 65 °C (1719 mg kg⁻¹).

Os valores de ácidos láctico, acético e propiônico estão abaixo dos encontrados por Diniz (2006), estando acima somente os valores de ácido butírico. Diniz (2006), estudou polvilhos azedos de diferentes regiões de Minas Gerais, e encontrou uma média de 9320,0 mg. kg⁻¹ de ácido láctico, 2190,0 mg kg⁻¹ de ácido acético, 1730,0 mg kg⁻¹ de ácido propiônico e 1090,0 mg kg⁻¹ de ácido butírico. Entretanto, os resultados encontrados estão acima dos apresentados por Maeda (1999) e Demiate et al. (1999), que encontraram teores de ácido láctico variando de 4200,0 e 6100,0 mg kg⁻¹; acético entre 200 e 340 mg kg⁻¹; butírico entre 200 e 70 mg kg⁻¹ e propiônico próximos a 290 mg kg⁻¹ em polvilhos azedos, provenientes do Estado de Santa Catarina.

Com base na grande quantidade de ácido láctico apresentada pelos polvilhos azedos, obtidos em diferentes condições de secagem, é

possível afirmar que os elevados valores de acidez destas amostras são devido a este ácido, sendo que os amidos fermentados secos em estufa a 65 °C que apresentaram menor acidez, também apresentaram menor teor de ácido láctico, em relação aos secos ao sol e em estufa a 45 e 55 °C.

O efeito da secagem solar e em estufa convectiva a 45, 55 e 65 °C, sobre os ácidos orgânicos pode ser observado nas Figuras 9, 10, 11 e 12. Com base nestes resultados é possível verificar que não há uma relação linear ou direta entre o tempo de exposição ao sol com os teores de ácidos orgânicos, mas observa-se que há uma redução significativa entre o tempo de exposição de 1 h e o de 7 h ao sol.

Para o ácido láctico é observado que há uma tendência maior ao decréscimo a partir de 2 h de secagem solar. Já para o ácido propiônico quando seco ao sol e estufa a 45 °C, tem uma tendência a redução que se mantém mais constante a partir 3 h ao sol, enquanto que a 55 °C o decréscimo de concentração deste ácido é mais pronunciado entre 2 e 4 h, e para estufa a 65 °C entre 3 e 4 h. Para o ácido acético, a secagem totalmente em estufa teve redução significativa na concentração deste ácido nas temperaturas de 55 e 65 °C, comparativamente com o amido fermentado que permaneceu ao sol por 1 h. Ainda, para o ácido acético observa-se uma tendência ao decréscimo na sua concentração a partir da primeira hora de secagem ao sol, quando seco em estufa a 55 e 65 °C, enquanto que em 45 °C não é possível observar nenhuma tendência na concentração deste ácido. Por último, o ácido butírico apresenta um decréscimo maior na sua concentração a partir da segunda hora ao sol e estufa a 45 °C, e da terceira hora ao sol e estufa a 65 °C, enquanto a 55 °C, observa-se uma redução da concentração do ácido butírico até 4 h ao sol.

Como as secagens foram realizadas em datas diferentes, os diferentes valores de ácidos orgânicos obtidos para cada temperatura da estufa podem ter sido influenciados, além da temperatura de secagem, pela amostra que foi coletada em dias distintos para a realização do experimento nas temperaturas de 45, 55 e 65 °C.

Figura 9 - Efeito do tempo de secagem ao sol e em estufa a 45°C (A), 55 °C (B) e 65 °C (C), sobre a concentração de ácido láctico no amido fermentado de mandioca (polvilho azedo).

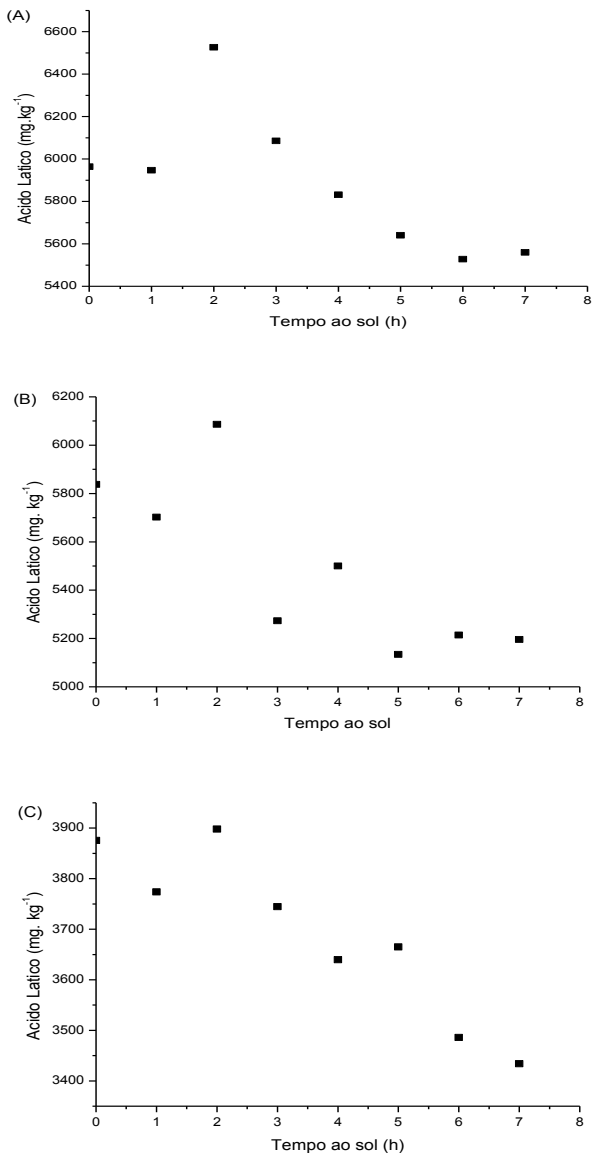


Figura 10 - Efeito do tempo de secagem ao sol e em estufa a 45°C (A), 55 °C (B) e 65 °C (C), sobre a concentração de ácido propiônico no amido fermentado de mandioca (polvilho azedo).

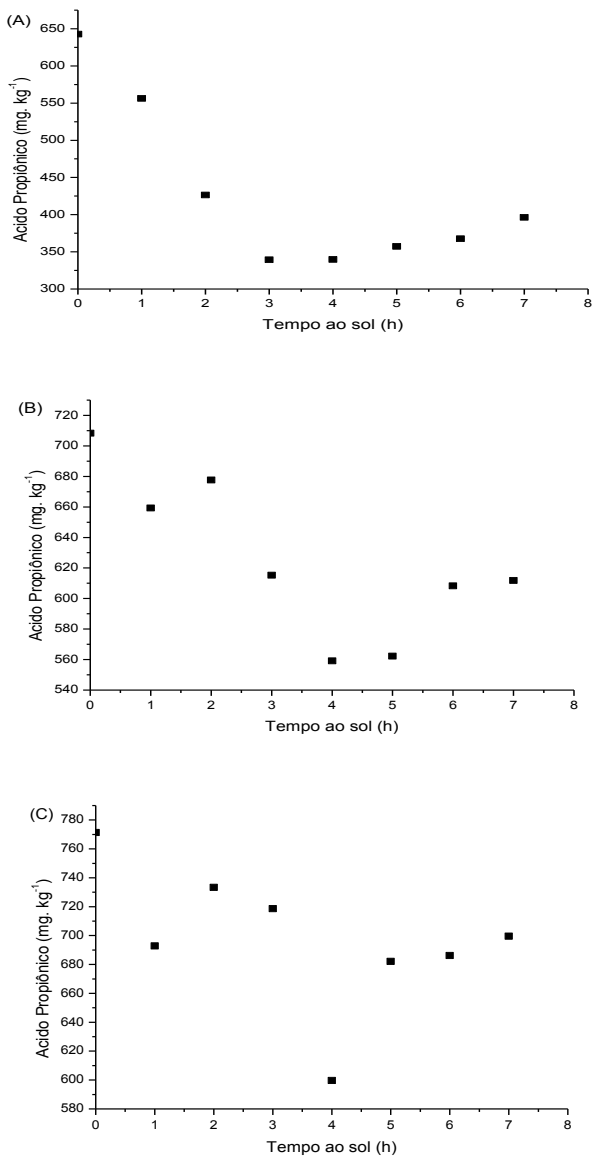


Figura 11 - Efeito do tempo de secagem ao sol e em estufa a 45°C (A), 55 °C (B) e 65 °C (C), sobre a concentração de ácido acético no amido fermentado de mandioca (polvilho azedo).

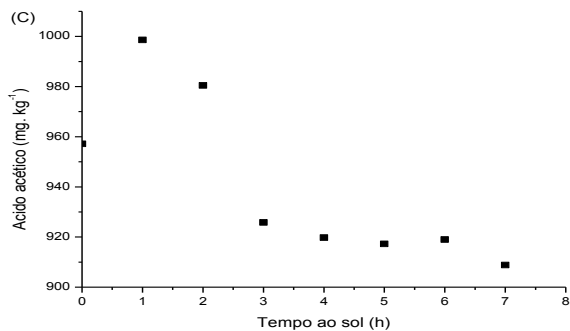
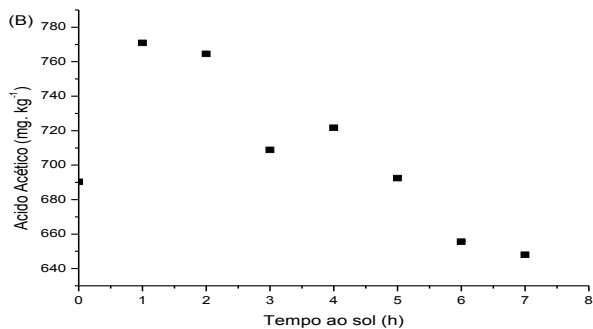
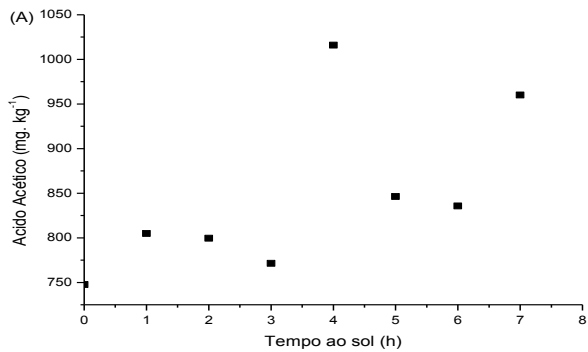
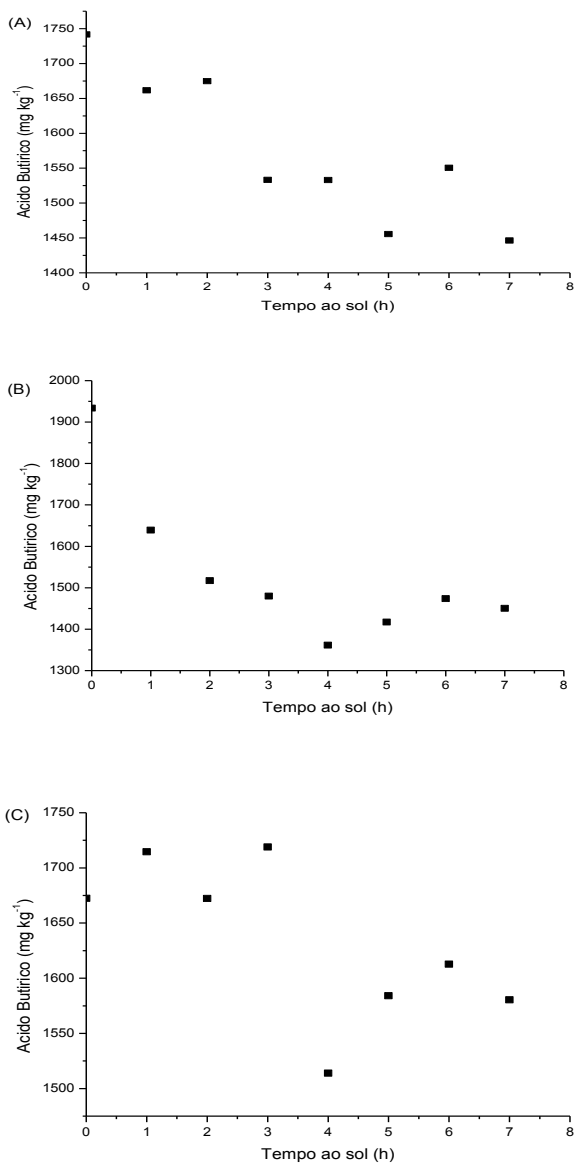


Figura 12 - Efeito do tempo de secagem ao sol e em estufa a 45°C (A), 55 °C (B) e 65 °C (C), sobre a concentração de ácido butírico no amido fermentado de mandioca (polvilho azedo).



3.4 Propriedades de pasta

O conhecimento das propriedades de pasta é importante para avaliar a qualidade do polvilho azedo, uma vez que a fluidez pode interferir nos equipamentos a serem utilizados e dimensionados em uma linha de produção, até a formulação dos produtos (DINIZ, 2006).

Através dos viscoamilogramas apresentados nas Figura 13 e dos resultados das propriedades viscoamilográficas (Tabela 6) é possível verificar que o tempo de secagem ao sol alterou o comportamento reológico do polvilho azedo com acréscimo dos valores de viscosidade máxima com o tempo de secagem ao sol, existindo diferenças significativas ($p < 0,05$) entre as médias. Não foram encontradas diferenças significativas entre as temperaturas inicial de pasta e temperatura do pico de viscosidade máxima.

O tipo de secagem, em estufa ou ao sol, apresentou grande influência sobre as propriedades de pasta do amido. A secagem ao sol confere ao amido as propriedades de pasta do polvilho azedo (BRABET; DUFOUR, 1993; PLATA-OVIEDO; CAMARGO, 1994), enquanto que o polvilho com secagem em estufa apresenta, valores de viscosidade máxima inferiores ao seco ao sol.

A temperatura de secagem em estufa também alterou o comportamento reológico do polvilho azedo, existindo diferenças significativas entre as médias, mas não havendo uma relação direta entre a temperatura de secagem da estufa com as propriedades viscoamilográficas.

O amido fermentado seco totalmente ao sol com revolvimento (método de secagem industrial) apresentou curva viscoamilográfica com valor de viscosidade máxima, viscosidade mínima e viscosidade no resfriamento superiores às do polvilho obtido pelos outros métodos de secagem, enquanto que as amostras secas totalmente em estufa apresentaram os menores valores de viscosidade máxima e de viscosidade mínima.

Comparando os resultados de viscosidade com a expansão não foi possível encontrar uma relação entre a viscosidade e a propriedade de expansão do amido fermentado seco ao sol e em estufa, embora a amostra que foi seca totalmente ao sol com revolvimento, que apresentou maior expansão, também apresentou maior pico de viscosidade máxima. Resultado semelhante foi encontrado por Marcon et al. (2007), que estudando a relação da expansão com a viscosidade,

não encontraram uma relação direta entre estes dois parâmetros, para amostras de polvilho azedo de diferentes polvilharias.

Os maiores valores de viscosidade máxima, para o amido fermentado seco ao sol entre 1 e 7 h ao sol e estufa a 45, 55 e 65 °C, foram encontrados em 6 h ao sol, nas temperaturas de 45 e 65 °C, e 7 h ao sol para 55 °C, com respectivamente 1977; 2068 e 2072 cP, não se sobrepondo sobre o maior valor encontrado que foi do polvilho seco totalmente ao sol com revolvimento e viscosidade máxima de 2602 cP. Estas amostras de polvilho azedo que apresentaram os maiores valores viscosidade máxima também apresentaram os maiores valores de expansão, e os menores valores de acidez.

Os valores das propriedades viscoamilográficas, encontrados para o amido fermentado seco ao sol e estufa, concordam com os encontrados por Franco et al. (2010), que avaliando o efeito do ácido láctico e irradiação UV no amido de mandioca com pH 4,0, encontraram valores de temperatura de pasta variando de 64,2 e 68,0 °C; viscosidade máxima de 163 e 167 RVU (1956 e 2004 cP); viscosidade final de 35 e 39 RVU (420 e 468 cP) e setback de 12 e 15 RVU (144 cP e 180 cP). Os resultados encontrados também ficaram próximos dos obtidos por Diniz (2006), que encontrou viscosidade máxima de 87,78 a 142,78 RVU (1053 e 1713 cP), temperatura inicial de pasta de 69,38 a 74,47 °C e setback de 2,82 a 24,50 RVU (34 e 294 cP), em polvilhos azedos de diferentes regiões de Minas Gerais.

A retrogradação é basicamente um processo de cristalização das moléculas de amilose e das porções lineares da amilopectina, que ocorre pela forte tendência de formação de ligações de hidrogênio entre moléculas adjacentes. A associação destas moléculas propicia o desenvolvimento de uma rede tridimensional mantida coesa pelas áreas cristalinas (HOOVER, 2001).

O amido de mandioca fermentado submetido aos diversos processos de secagem não apresentou uma relação entre o tempo de secagem ao sol com a tendência à retrogradação (*setback*), sendo seu maior valor (186 cP), encontrado para a amostra seca por 1 h ao sol e estufa a 55 °C, e seu menor valor (123 cP) com 5 h ao sol e estufa a 65 °C.

Tabela 6 – Propriedades viscoamilográficas do amido de mandioca fermentado (polvilho azedo) seco ao sol e seco em estufa convectiva a 45, 55 e 65 °C, obtidas a partir de amilogramas construídos no RVA.

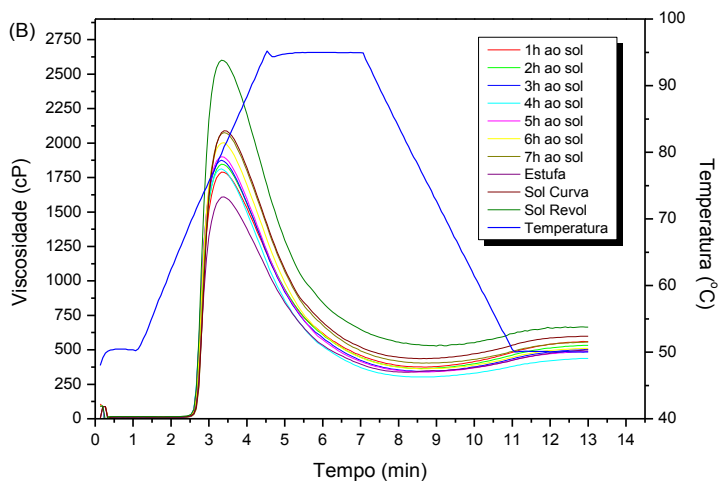
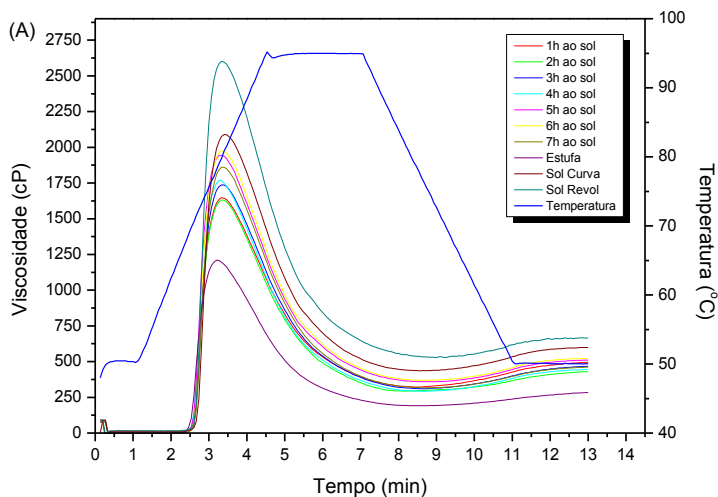
Amostras	Temperatura Inicial de Pasta (°C)			Viscosidade Máxima (cP)		
	45 °C	55 °C	65 °C	45 °C	55 °C	65 °C
1 h ao Sol	68 ^{abA} ± 0,06	69 ^{abA} ± 0,55	69 ^{abA} ± 0,43	1647 ^{ba} ± 0,58	1790 ^{bc} ± 4,16	1770 ^{bb} ± 5,29
2 h ao Sol	69 ^{abA} ± 0,50	69 ^{abA} ± 0,10	69 ^{abA} ± 0,10	1635 ^{ba} ± 5,86	1848 ^{db} ± 7,77	1878 ^{dc} ± 5,13
3 h ao Sol	69 ^{abbB} ± 0,03	69 ^{abbB} ± 0,03	69 ^{abA} ± 0,03	1739 ^{ca} ± 10,26	1875 ^{cc} ± 2,08	1831 ^{cb} ± 3,61
4 h ao Sol	69 ^{abA} ± 0,55	69 ^{abA} ± 0,06	69 ^{abA} ± 0,08	1769 ^{da} ± 6,56	1807 ^{cb} ± 9,24	1910 ^{cc} ± 8,50
5 h ao Sol	69 ^{abA} ± 0,54	69 ^{abA} ± 0,16	69 ^{abA} ± 0,09	1945 ^{fc} ± 2,65	1902 ^{fb} ± 2,65	1976 ^{da} ± 4,50
6 h ao Sol	69 ^{abA} ± 0,46	69 ^{abA} ± 0,08	69 ^{abA} ± 0,51	1977 ^{ga} ± 2,00	2001 ^{gb} ± 5,69	2068 ^{gc} ± 1,00
7 h ao Sol	69 ^{abA} ± 1,05	70 ^{abA} ± 0,53	69 ^{abA} ± 0,80	1864 ^{ea} ± 20,66	2072 ^{hb} ± 4,93	2044 ^{fb} ± 3,51
Estufa	68 ^{abA} ± 0,49	69 ^{abA} ± 0,55	69 ^{abA} ± 0,45	1208 ^{aa} ± 1,15	1609 ^{ab} ± 5,51	1643 ^{ac} ± 9,07
Sol Curva	70 ^b ± 0,53	70 ^a ± 0,53	70 ^a ± 0,53	2089 ^f ± 5,51	2089 ^f ± 5,51	2089 ^f ± 5,51
Sol Revol	69 ^{ab} ± 0,46	69 ^a ± 0,46	69 ^a ± 0,46	2602 ⁱ ± 0,58	2602 ⁱ ± 0,58	2602 ⁱ ± 0,58
Amostras	Temperatura da Viscosidade Máxima (°C)			Viscosidade Mínima (cP)		
	45 °C	55 °C	65 °C	45 °C	55 °C	65 °C
1 h ao Sol	80 ^{abA} ± 0,62	80 ^{abA} ± 0,41	80 ^{abA} ± 0,39	324 ^{ea} ± 1,00	372 ^{cb} ± 5,86	366 ^{cb} ± 2,52
2 h ao Sol	80 ^{abA} ± 0,57	80 ^{abA} ± 0,46	79 ^{abA} ± 0,08	291 ^{ba} ± 8,74	361 ^{cb} ± 2,52	369 ^{cdb} ± 2,08
3 h ao Sol	80 ^{abA} ± 0,58	79 ^{abA} ± 0,06	79 ^{abA} ± 0,06	309 ^{cdA} ± 1,53	341 ^{cb} ± 5,03	335 ^{bb} ± 2,65
4 h ao Sol	79 ^{abA} ± 0,03	79 ^{abA} ± 0,03	80 ^{abA} ± 0,48	298 ^{bca} ± 7,21	298 ^{abA} ± 5,13	340 ^{bb} ± 1,15
5 h ao Sol	80 ^{abA} ± 0,64	80 ^{abA} ± 0,48	79 ^{abA} ± 0,49	360 ^{fc} ± 1,53	339 ^{bb} ± 1,53	308 ^{abA} ± 1,53
6 h ao Sol	80 ^{abA} ± 0,53	80 ^{abA} ± 0,40	79 ^{abA} ± 0,45	370 ^{fb} ± 1,53	362 ^{ca} ± 3,06	376 ^{db} ± 3,51
7 h ao Sol	79 ^{abA} ± 0,90	80 ^{abA} ± 0,45	79 ^{abA} ± 0,85	313 ^{deA} ± 2,89	398 ^{cc} ± 6,24	378 ^{db} ± 0,58
Estufa	79 ^{abA} ± 0,97	79 ^{abA} ± 0,88	79 ^{abA} ± 0,56	195 ^{da} ± 3,61	332 ^{bb} ± 10,39	342 ^{bb} ± 6,66
Sol Curva	80 ^a ± 0,03	80 ^a ± 0,03	80 ^a ± 0,03	338 ^g ± 3,79	338 ^g ± 3,79	338 ^g ± 3,79

Sol Revol	Viscosidade no final do ciclo de resfriamento (cP)			Setback (cP)		
	80 ^a ± 0,42 45 °C	80 ^a ± 0,42 55 °C	80 ^a ± 0,42 65 °C	525 ^h ± 3,00 45 °C	525 ^f ± 3,00 55 °C	525 ^f ± 3,00 65 °C
1 h ao Sol	495 ^{dA} ± 0,58	558 ^{cC} ± 2,31	539 ^{dB} ± 1,53	171 ^{IA} ± 1,53	186 ^{EB} ± 3,61	173 ^{IA} ± 1,00
2 h ao Sol	426 ^{bA} ± 4,93	530 ^{dB} ± 2,08	547 ^{IC} ± 0,58	135 ^{BA} ± 4,00	169 ^{IB} ± 1,00	178 ^{gC} ± 1,73
3 h ao Sol	465 ^{cA} ± 2,00	500 ^{bCC} ± 2,65	476 ^{BB} ± 2,08	155 ^{deC} ± 0,58	158 ^{cdEB} ± 1,15	141 ^{eA} ± 1,53
4 h ao Sol	447 ^{cB} ± 4,93	435 ^{BA} ± 2,08	493 ^{cC} ± 1,53	149 ^{cdB} ± 2,52	136 ^{eA} ± 3,06	153 ^{dB} ± 0,58
5 h ao Sol	513 ^{cC} ± 2,31	486 ^{BB} ± 1,15	432 ^{BA} ± 1,53	153 ^{cdC} ± 1,00	147 ^{BB} ± 1,00	123 ^{AA} ± 0,58
6 h ao Sol	525 ^{EB} ± 3,00	512 ^{cdA} ± 4,04	538 ^{dC} ± 2,65	154 ^{deB} ± 1,53	149 ^{bcA} ± 1,53	161 ^{ec} ± 1,53
7 h ao Sol	460 ^{cA} ± 3,06	550 ^{cC} ± 7,37	537 ^{dB} ± 0,58	146 ^{cA} ± 3,79	152 ^{bdA} ± 1,15	159 ^{EB} ± 0,58
Estufa	286 [±] 3,51	499 ^{bcB} ± 3,61	503,00 ^{EB} ± 4,00	91 ^{AA} ± 0,58	167 ^{elB} ± 8,19	160 ^{dB} ± 2,89
Sol Curva	598 [±] 2,08	598 [±] 2,08	598,33 [±] 2,08	159 [±] 3,06	159 ^{dcl} ± 3,06	159 [±] 3,06
Sol Revol	651 ^g ± 17,01	651 ^g ± 17,01	651,33 [±] 17,01	136 ^b ± 1,15	136 ^a ± 1,15	136 ^b ± 1,15

*Valores seguidos de letras minúsculas iguais na mesma coluna não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

**Valores seguidos de letras maiúsculas iguais na mesma linha não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Figura 13 - Amilogramas das amostras de polvilho azedo secas ao sol e em estufa convectiva a 45 (A), 55 (B) e 65°C (C).



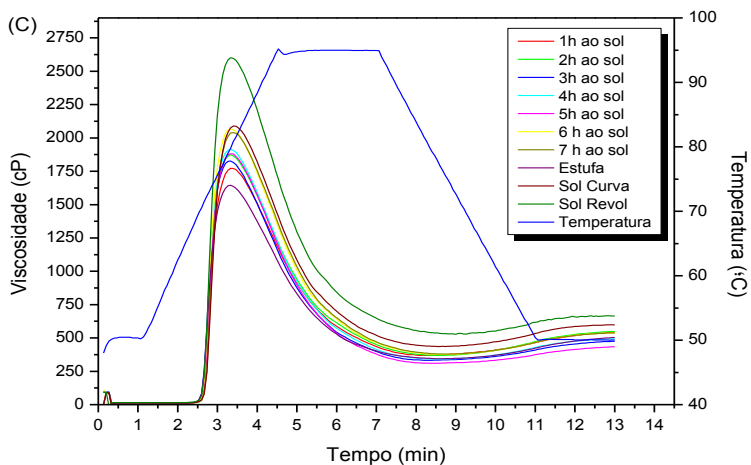
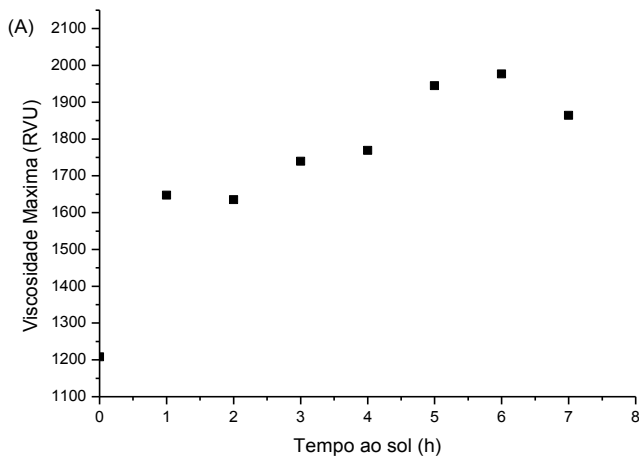
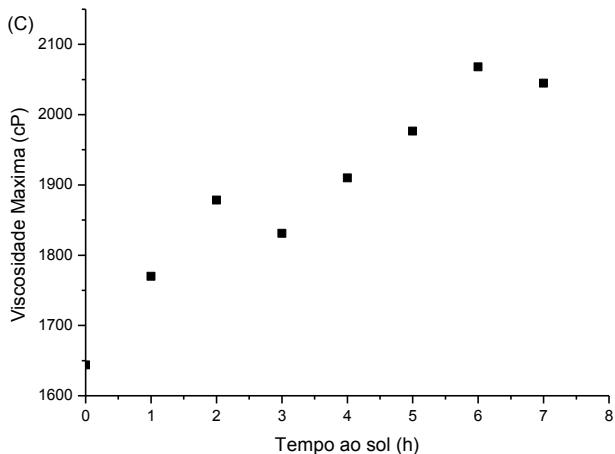
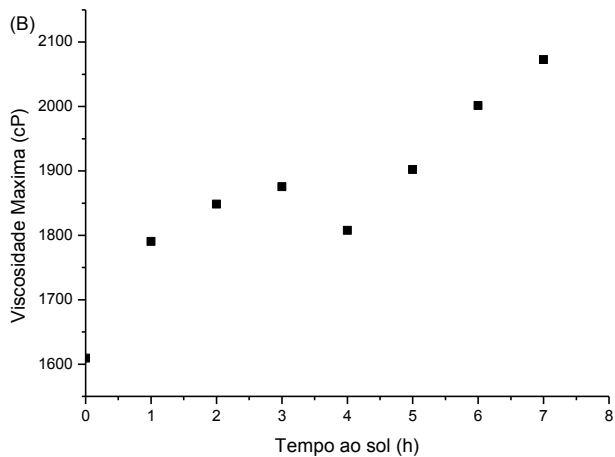


Figura 14 - Efeito do tempo de secagem do polvilho azedo seco ao sol e em estufa convectiva a 45 (A), 55 (B) e 65 °C (C) sobre a viscosidade máxima.





Quanto ao efeito do tempo de secagem ao sol e em estufa a 45, 55 e 65 °C sobre a viscosidade máxima, conforme Figura 14 observa-se um aumento significativo ao longo do tempo em exposição solar, atingindo o seu máximo em 6 h ao sol quando as temperaturas de secagem da estufa foram 45 e 65 °C, enquanto que para 55 °C a

viscosidade máxima continuou aumentando até as 7 h de secagem ao sol. Este aumento da viscosidade com o tempo de exposição solar pode estar ocorrendo devido as reações de despolimerização que ocorrem em maior proporção quanto maior o tempo de exposição ao sol.

3. 5 Isotermas de sorção

As isotermas de sorção de água são definidas como representações gráficas que descrevem, em uma umidade específica, a relação de equilíbrio de uma quantidade de água sorvida por componente dos alimentos, e a pressão de vapor ou umidade relativa, a uma dada temperatura (DUCKWORTH, 1975).

Os dados de umidade de equilíbrio do amido de mandioca fermentado que foi seco ao sol, em estufa e exposto por diversos tempos ao sol com secagem continuada em estufa nas diferentes temperaturas são ilustrados na Tabela 7.

Tabela 7 – Umidades de equilíbrio do amido de mandioca fermentado seco nas diferentes condições experimentais.

Amostra	X_e das amostras secas a 45°C ($\text{g H}_2\text{O} \cdot \text{g}_{\text{ss}}^{-1}$)			
	A_w			
	0,11	0,33	0,58	0,75
1h ao sol	0,046± 0,009	0,080±0,003	0,122±0,002	0,162±0,006
2 h ao sol	0,050± 0,007	0,072± 0,010	0,122±0,006	0,160± 0,004
3 h ao sol	0,037± 0,012	0,074± 0,012	0,100±0,012	0,143± 0,007
4 h ao sol	0,035±0,010	0,076± 0,008	0,097±0,009	0,130± 0,007
5 h ao sol	0,017± 0,005	0,066± 0,008	0,073±0,003	0,131± 0,010
6 h ao sol	0,026± 0,015	0,070± 0,020	0,096±0,011	0,137± 0,004
7 h ao sol	0,024± 0,011	0,095± 0,007	0,104±0,009	0,141± 0,006
Estufa	0,024± 0,001	0,084± 0,003	0,113±0,002	0,154± 0,003
	X_e das amostras secas a 55°C ($\text{g H}_2\text{O} \cdot \text{g}_{\text{ss}}^{-1}$)			
Amostra	A_w			
	0,11	0,33	0,58	0,75
1h ao sol	0,027± 0,007	0,060± 0,004	0,099±0,010	0,137± 0,014
2 h ao sol	0,028± 0,012	0,082± 0,001	0,102±0,004	0,151± 0,006
3 h ao sol	0,023± 0,004	0,062± 0,007	0,100±0,006	0,131± 0,011
4 h ao sol	0,016± 0,009	0,062± 0,007	0,094±0,001	0,136± 0,001
5 h ao sol	0,049± 0,003	0,090± 0,002	0,134±0,004	0,175± 0,003
6 h ao sol	0,058± 0,001	0,097± 0,007	0,131±0,007	0,174± 0,002
7 h ao sol	0,034± 0,006	0,084± 0,008	0,124±0,009	0,192± 0,028
Estufa	0,036± 0,003	0,093± 0,006	0,124±0,007	0,157± 0,003
	A_w			
	0,9	0,75	0,58	0,9
	0,249±0,004	0,240± 0,004	0,190± 0,010	0,181± 0,012
	0,216± 0,004	0,180± 0,014	0,216± 0,009	0,222± 0,005
	0,227± 0,006	0,202± 0,010	0,211± 0,005	0,200± 0,008
	0,197± 0,002	0,226± 0,017	0,244± 0,001	0,227± 0,006

X_c das amostras secas a 65 °C (g H₂O · g⁻¹ g_{ss})					
Amostra	A_w				
	0,11	0,33	0,58	0,75	0,9
1h ao sol	0,039± 0,003	0,082± 0,004	0,113±0,004	0,132± 0,003	0,186± 0,003
2 h ao sol	0,041± 0,007	0,078± 0,002	0,103±0,005	0,151± 0,001	0,188± 0,014
3 h ao sol	0,015± 0,003	0,051± 0,004	0,094±0,009	0,133± 0,010	0,201± 0,011
4 h ao sol	0,019± 0,005	0,062± 0,009	0,097±0,013	0,130± 0,004	0,188± 0,012
5 h ao sol	0,028± 0,007	0,070± 0,003	0,107±0,012	0,135± 0,009	0,219± 0,009
6 h ao sol	0,030± 0,001	0,065± 0,008	0,104±0,010	0,141± 0,009	0,219± 0,009
7 h ao sol	0,032± 0,001	0,080± 0,011	0,111±0,004	0,143± 0,007	0,187± 0,001
Estufa	0,029± 0,005	0,063± 0,012	0,102±0,014	0,132± 0,008	0,199± 0,006
X_c das amostras secas totalmente ao sol (g H₂O · g⁻¹ g_{ss})					
Amostra	A_w				
	0,11	0,33	0,58	0,75	0,9
Sol revol.	0,030± 0,003	0,064± 0,008	0,098±0,003	0,125± 0,016	0,200± 0,027
Sol sem revolver	0,003± 0,015	0,067± 0,009	0,098±0,011	0,126± 0,011	0,175± 0,005

Como esperado a umidade de equilíbrio aumenta com o aumento da atividade de água para todas as amostras em estudo. Os modelos de GAB (1), BET (2), BET linear (3), Oswin (4) e Langmuir (5) foram ajustados aos dados experimentais de isoterma de adsorção do amido de mandioca fermentado que foram secos nas diferentes condições experimentais, cujos valores de coeficientes de regressão (R^2), qui-quadrado reduzido (χ^2), raiz quadrada média do erro (RQME) e erro médio relativo (P (%)) do ajuste são mostrados na Tabela 8. Os valores dos parâmetros obtidos para cada modelo estão ilustrados na Tabela 9.

De acordo com a Tabela 8, os maiores valores de R^2 foram obtidos com o ajuste dos modelos de GAB e Oswin, mas em maioria para o modelo de GAB, o que o classifica como um modelo de bom ajuste aos dados experimentais. Entretanto, somente o valor do R^2 não é um parâmetro confiável para a escolha do modelo de melhor ajuste, por esta razão os modelos foram também avaliados por outros parâmetros estatísticos.

Quanto menor os valores de χ^2 , RQME e P (%), melhor o ajuste dos modelos aos dados experimentais, e estes também foram obtidos para os modelos de GAB e Oswin, sendo em maioria menor para o modelo de GAB, o que representa o melhor ajuste deste modelo perante os demais.

Pelo fato da Equação de GAB apresentar três parâmetros a serem estimados (X_m , C e K) e ser uma equação polinomial de grau maior que 2, dependendo do valor numérico de K estimado, este modelo apresenta maior possibilidade de ajuste dos dados experimentais (PARK; NOGUEIRA, 1992), comparativamente com outros modelos. Já o modelo de Oswin baseia-se na expansão matemática para curvas de formato sigmoidal e apresenta somente dois parâmetros.

O modelo de GAB também mostrou ajuste satisfatório aos dados experimentais das isotermas de sorção de batata nas temperaturas de 30, 45 e 60 °C (MCMINN; MAGEE, 2003) e amido de rizomas de lírio-do-brejo (ASCHERI et al., 2009).

Já o modelo de Oswin mostrou ajuste satisfatório para as isotermas de sorção de yacon (KOTOVICZ, 2011) e para suco de acerola microencapsulado (FIGUEIREDO, 1998). Santos et al. (2004) também verificaram que os ajustes dos dados de umidade de equilíbrio versus atividade de água foram bem ajustados pela equação de Oswin e melhor ainda pela equação de GAB, podendo ser utilizadas para

representar as isotermas de adsorção de umidade de farinhas de mandioca temperadas.

Os valores de C e K da equação de GAB são constantes de adsorção relacionadas com as interações energéticas entre as moléculas da monocamada e as subsequentes, num dado sítio de sorção (PARK et al., 2008).

Tabela 8 - Valores obtidos dos coeficientes de regressão (R^2), qui-quadrado reduzido (X^2), raiz quadrada média do erro (RQME) e erro médio relativo (P) para o ajuste dos modelos de equilíbrio higroscópico do amido de mandioca fermentado expostos por diferentes tempos ao sol e seco em estufa em diferentes temperaturas.

Amostras	Modelo	45 °C					55 °C					65 °C					
		R^2	X^2	RQME	P(%)	R^2	X^2	RQME	P(%)	R^2	X^2	RQME	P(%)	R^2	X^2	RQME	P(%)
1 h	1	99,89	$1,42 \times 10^{-5}$	0,0024	1,81	99,98	$1,82 \times 10^{-6}$	0,0009	0,98	98,66	0,0001	0,0057	5,68				
	2	92,79	0,0009	0,0189	20,60	97,08	0,0003	0,0104	16,79	94,21	0,0004	0,0118	11,65				
	3	97,48	0,0002	0,0112	9,47	96,04	0,0002	0,0121	11,84	98,52	0,0001	0,0060	4,37				
	4	99,98	$1,34 \times 10^{-6}$	0,0009	0,86	99,20	$4,93 \times 10^{-5}$	0,0054	9,17	98,22	0,0001	0,0066	8,83				
	5	91,69	0,0007	0,0203	16,70	94,74	0,0003	0,0140	12,73	93,35	0,0003	0,0127	13,95				
2 h	1	99,65	$4,01 \times 10^{-5}$	0,0040	3,66	98,75	0,0001	0,0070	8,99	94,84	0,0003	0,0118	15,11				
	2	92,75	0,0008	0,0182	18,71	94,89	0,0005	0,0141	16,48	95,22	0,0003	0,0114	13,08				
	3	95,74	0,0003	0,0139	13,18	95,69	0,0003	0,0129	12,43	91,72	0,0004	0,0150	11,26				
	4	99,63	$2,83 \times 10^{-5}$	0,0041	4,11	97,78	0,0001	0,0093	15,22	97,68	0,0001	0,0079	7,20				
	5	91,82	0,0006	0,0193	18,36	94,47	0,0004	0,0146	13,35	94,86	0,0002	0,0118	14,75				
3 h	1	99,68	$2,26 \times 10^{-5}$	0,0030	2,96	99,68	$2,86 \times 10^{-5}$	0,0034	5,32	99,91	$8,92 \times 10^{-6}$	0,0019	4,43				
	2	95,23	0,0003	0,0116	15,09	96,63	0,0003	0,0111	16,05	98,73	0,0001	0,0073	12,73				
	3	94,45	0,0003	0,0125	9,09	97,08	0,0002	0,0103	13,67	95,01	0,0003	0,0144	27,51				
	4	98,72	0,0001	0,0060	6,99	98,98	0,0001	0,0060	11,82	98,29	0,0001	0,0085	22,89				
	5	95,23	0,0002	0,0116	15,39	94,59	0,0140	0,0140	9,91	93,42	0,0005	0,0166	21,28				
4 h	1	99,32	$4,14 \times 10^{-5}$	0,0041	4,99	99,53	$4,46 \times 10^{-5}$	0,0042	10,37	99,61	$3,24 \times 10^{-5}$	0,0036	7,66				
	2	93,82	0,0004	0,0123	15,66	97,78	0,0002	0,0092	12,34	97,72	0,0002	0,0087	11,65				
	3	96,96	0,0001	0,0086	6,20	95,16	0,0003	0,0136	25,33	95,88	0,0002	0,0117	19,71				
	4	98,91	$4,44 \times 10^{-5}$	0,0052	7,55	97,80	0,0001	0,0092	24,76	97,90	0,0001	0,0083	19,96				
	5	93,64	0,0003	0,0125	16,89	95,00	0,0003	0,0138	15,24	96,33	0,0002	0,0110	8,22				
5 h	1	98,15	0,0002	0,0093	17,23	96,40	0,0003	0,0118	12,56	99,14	0,0001	0,0060	7,70				
	2	93,09	0,0008	0,0179	27,87	96,80	0,0003	0,0111	10,87	94,08	0,0006	0,0157	19,53				
	3	96,89	0,0002	0,0120	18,69	93,85	0,0004	0,0154	9,62	98,70	0,0001	0,0074	8,77				
	4	97,98	0,0002	0,0097	19,12	98,32	0,0001	0,0080	7,58	99,24	0,0001	0,0056	9,55				
	5	84,92	0,0012	0,0265	23,15	96,40	0,0002	0,0118	12,58	92,06	0,0006	0,0182	12,32				
1	99,51	$3,47 \times 10^{-5}$	0,0037	5,29	99,89	$1,17 \times 10^{-5}$	0,0022	1,75	99,90	$1,11 \times 10^{-5}$	0,0021	2,38					

Tabela 9 - Parâmetros dos modelos de equilíbrio higroscópico do amido de mandioca fermentado expostos por diferentes tempos ao sol e seco em estufa em diferentes temperaturas.

Modelo	Amostras	45 °C			55 °C			65 °C		
		X _m	C	K	X _m	C	K	X _m	C	K
GABI	1h	0,0659	18,4394	0,8218	0,0627	6,9891	0,7852	0,0728	14,4207	0,6867
	2h	0,0643	21,2958	0,8180	0,0705	8,8763	0,7578	2,5015	3,8863	0,0216
	3h	0,0667	12,5073	0,7371	0,0620	6,8606	0,7837	0,0719	3,1768	0,7623
	4h	0,0628	14,4436	0,7353	0,0700	4,4236	0,7527	0,0695	5,2160	0,7341
	5h	0,0458	8,6924	0,8826	1,8003	35,9602	0,0042	0,0590	10,1147	0,8191
	6h	0,0730	6,9764	0,6971	0,0768	26,9973	0,7661	0,0596	9,3445	0,8191
	7h	0,0673	10,8906	0,7727	0,1373	4,1068	0,5651	1,3821	49,2724	0,0033
	Estufa	0,0865	6,4150	0,6894	0,0798	10,9960	0,7329	0,0605	8,9263	0,7858
	Sol revol.	0,0530	12,8031	0,8215						
	Sol s/ revol	0,1081	2,9721	0,5778						
BET		X _m	C	N	X _m	C	N	X _m	C	N
	1h	0,08438	0,0019	1,3990	0,10603	0,0010	1,5986	0,32222	0,0011	0,6476
	2h	0,01318	0,0119	1,3802	0,12157	0,0014	1,2227	0,23147	0,0011	0,8178
	3h	0,07338	0,0028	0,9769	0,10626	0,0010	1,5556	0,02799	0,0027	2,0263
	4h	0,01068	0,0205	0,8990	0,01143	0,0086	1,6872	0,07004	0,0017	1,4324
	5h	0,03549	0,0015	2,6285	0,28495	0,0012	0,7913	0,01358	0,0009	1,5721
	6h	0,14141	0,0012	1,0928	0,01946	0,0167	0,8304	0,09902	0,0011	1,6959
7h	0,22242	0,0009	1,0872	0,02099	0,010696	1,073720	0,21132	0,0013	0,8055	
	Estufa	0,16283	0,0012	1,0848	0,02455	0,0010	0,9478	0,11804	0,0010	1,4267
	Sol revol.	0,12435	0,0009	1,4992						

Sol s/ revol.	63,3123		0,0021		1,2749	
	X_m	C	X_m	C	X_m	C
1h	0,0179	1,3711	0,0157	1,2921	0,0127	1,3674
2h	0,0173	1,3654	0,0155	1,3426	0,0133	1,3634
3h	0,0137	1,3392	0,0154	1,2890	0,0164	1,2551
4h	0,0130	1,3284	0,0155	1,2797	0,0145	1,2880
5h	0,0181	1,2322	0,0149	1,4412	0,0166	1,3072
6h	0,0134	1,3171	0,0162	1,4401	0,0169	1,3022
7h	0,0155	1,3490	0,0154	1,4220	0,0130	1,3672
Estufa	0,0149	1,3656	0,01556	1,3987	0,0151	1,2990
Sol revol.	0,0153	1,2866				
Sol	0,0133	1,2912				
s/revol.						
	A	B	A	B	A	B
1h	0,1060	0,3895	0,0834	0,4114	0,0955	0,3088
2h	0,1043	0,3811	0,0941	0,3772	0,0962	0,3203
3h	0,0915	0,3427	0,0819	0,4124	0,0754	0,4573
4h	0,0878	0,3342	0,0794	0,4249	0,0797	0,4012
5h	0,0728	0,4973	0,1157	0,3180	0,0879	0,4165
6h	0,0849	0,3586	0,1196	0,3269	0,0876	0,4213
7h	0,0949	0,3753	0,1109	0,3459	0,0949	0,3250
Estufa	0,0973	0,3635	0,1067	0,3491	0,0842	0,3964
Sol revol.	0,0819	0,4058				
Sol	0,0766	0,3944				

BET
linear

Oswin

s/revol.	X_m	C	X_m	C	X_m	C
1h	0,53634	0,0005	0,45201	0,0004	0,7040	0,3572
2h	0,44653	0,0005	0,35699	0,0006	0,02485	0,0873
3h	0,17267	0,0012	0,49730	0,0004	0,55055	0,0004
4h	0,07248	0,0266	0,52771	0,0004	0,40717	0,0005
5h	0,69071	0,0003	1,9324	0,1397	0,45994	0,0005
6h	0,21001	0,0009	0,01087	0,0238	0,53383	0,0004
7h	0,29491	0,0007	0,25544	0,0010	1,4585	0,1551
Estufa	0,07496	0,0029	0,16447	0,0014	0,42193	0,0005
Sol revol.	0,07957	0,0024				
Sol	0,031994	0,0006				

s/revol.

Sendo: A, B e C_{BET} , C_{GAB} , K_{GAB} , k, n, n' = constantes das equações; X_e = unidade de equilíbrio expressa em base seca ($g H_2O \cdot g_{ss}^{-1}$); X_m = unidade na monocamada molecular ($g H_2O \cdot g_{ss}^{-1}$).

Com relação aos valores do parâmetro C do modelo de GAB, que representa a energia livre parcial molar, não mostrou tendência definida com o aumento do tempo de exposição solar e com o aumento da temperatura utilizada na secagem do amido de mandioca fermentado. O parâmetro K desta mesma equação também não apresentou tendência definida com o aumento do tempo de exposição solar e com o aumento da temperatura utilizada na secagem da amostra.

Resio et al. (1999) encontraram valores de K de 0,81 e 0,76 para o modelo de GAB nas temperaturas de 25 e 35 °C, respectivamente, para o ajuste do modelo à isoterma de amido de amaranto. Esses resultados concordam com os encontrados neste trabalho, onde os valores de K ficaram em sua maioria próximos de 0,7 e 0,8, com algumas exceções, sendo elas as amostras de 5 e 7 h ao sol e temperatura de secagem de 55 °C (0,0042 e 0,5651, respectivamente), 2 e 7 h ao sol e temperatura de secagem 65 °C (0,0216 e 0,0033, respectivamente), e secagem totalmente ao sol sem revolvimento (0,5778).

O parâmetro X_m pode estar relacionado com o início de uma série de reações químicas de deterioração dos alimentos, correspondendo a umidade na monocamada do material adsorvente (FERREIRA; PENA, 2003). Assim como C e K este parâmetro não teve correlação entre as diferentes amostras analisadas.

Quanto aos valores dos parâmetros A e B da equação de Oswin também não houve relação entre as diversas amostras estudadas.

A Figura 15 ilustra a isoterma de adsorção de umidade do amido de mandioca fermentado exposto por 1 h ao sol com secagem continuada em estufa a 45, 55 e 65 °C com ajustes pela equação de GAB e Oswin, e a Figura 16 os respectivos resíduos. As isotermas de adsorção de umidade do restante das amostras foram colocadas no Apêndice E, assim como os gráficos de resíduos (Apêndice F).

As isotermas mostraram curvas de forma sigmóides do tipo II, conforme classificação da IUPAC. Segundo Brunauer et al. (1938) este tipo de isoterma é encontrada para alimentos como farinha de trigo, amidos, amidos modificados, entre outros, e indica o tipo de forças existente na ligação de água com a superfície do material higroscópico, permitindo avaliar a estrutura superficial do material

Esta curva do tipo II, descreve a adsorção integral de monocamada-multicamada. Inicialmente, apresenta uma fase linear seguida de uma côncava. O final da fase linear e o início da côncava corresponde, em geral, ao preenchimento da primeira camada adsorvida,

a monocamada (BRUNAUER et al., 1938). A água da monocamada tem como principal característica ser estável, não congelar, e não ser removida durante a secagem do produto, correspondendo a água que está fortemente ligada ou indisponível para reações químicas ou de degradação (JANGUAM et al., 2010).

Figura 15 – Isotermas de adsorção de umidade para o amido de mandioca fermentado exposto por 1 h ao sol e secagem continuada em estufa a 45, 55 e 65 °C com ajustes pelo modelo de GAB e Oswin.

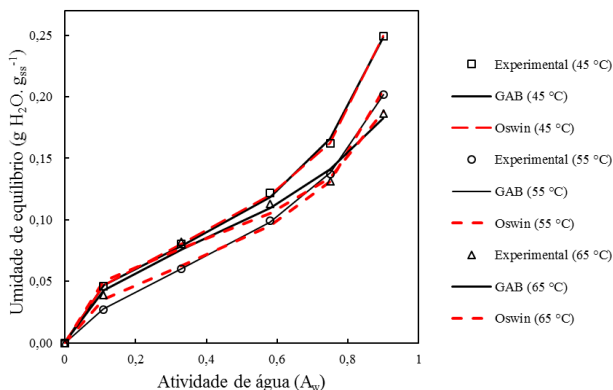
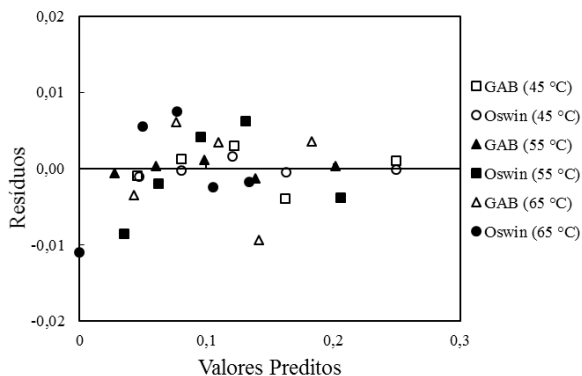


Figura 16 – Resíduos dos ajustes dos modelos de GAB e Oswin para o amido de mandioca fermentado exposto por 1 h ao sol e secagem continuada em estufa a 45, 55 e 65 °C.



Com base na Figura 16 os valores de resíduos foram pequenos, variando de -0,011 a 0,007, indicando o bom ajuste das equações de

GAB e Oswin aos dados experimentais de umidade de equilíbrio versus atividade de água.

4 CONCLUSÃO

A principal característica do polvilho azedo é a sua propriedade de expansão, sendo que quando o amido fermentado foi seco somente em estufa não apresentou bom desempenho quanto à expansão do biscoito, demonstrando a importância da secagem solar sobre esta propriedade.

Quanto à expansão do polvilho azedo, quando avaliada pelo índice de expansão, nos diferentes tempos de exposição solar, é possível concluir que não há diferenças significativas entre o polvilho azedo seco tradicionalmente ao sol com revolvimento, com o amido fermentado seco ao sol por 5 e 6 h e estufa convectiva a 45 °C, de 5 a 7 h ao sol e estufa convectiva a 55 °C e por 7 h ao sol com temperatura da estufa a 65 °C. Desta forma, o tempo de exposição solar deste produto poderia ser reduzido, sem prejuízos à sua expansão, podendo ser seco por menos tempo ao sol e secagem continuada em estufa, ao invés de secagem integralmente ao sol. Mesmo com o revolvimento o amido de mandioca fermentado necessitou de 12 horas de exposição solar para completar a secagem conforme ponto final determinado pelas polvilharias, sendo que com a secagem continuada em estufa o tempo total da secagem foi reduzido, conforme mostrado no capítulo 2.

Embora com 5 h de exposição solar se tenha a produção de biscoitos com propriedades de expansão semelhantes ao do amido seco totalmente ao sol, para este tempo de exposição ainda seria necessário desprender um custo energético adicional para realização do restante da secagem em secador e ainda haveriam contaminações e perdas de produto. Entretanto, em épocas de dias prolongados de chuva, onde amido foi exposto para a secagem ao sol, mas ela não foi findada em função dos períodos de chuva, o produtor poderia terminar a secagem em secador, sem perder o produto.

O amido fermentado (polvilho azedo) seco ao sol por diferentes tempos, e em estufa, apresentaram elevados valores de acidez, sendo o principal responsável por ela, o ácido láctico, que está presente em maior concentração do que os ácidos acético, propiônico e butírico.

Os maiores valores de viscosidade máxima, viscosidade mínima e viscosidade no resfriamento, foram encontrados no polvilho seco totalmente ao sol com o revolvimento, enquanto que o seco totalmente

em estufa, independente da temperatura, apresentou os menores valores de viscosidade máxima e viscosidade mínima.

As isotermas de adsorção de umidade do amido de mandioca fermentado apresentaram forma sigmoide do tipo II, sendo que os modelos de Oswin e GAB foram os que mostraram melhor ajuste das curvas de isotermas de umidade de equilíbrio versus atividade de água.

REFERÊNCIAS

AQUINO, A. C. M. S.; AZEVEDO, M. S.; RIBEIRO, D. H. B.; COSTA, A. C. O.; AMANTE, E.R. Validation of HPLC and CE methods for determination of organic acids in sour cassava starch wastewater. **Food Chemistry**, v. 172, p. 725-730, 2015.

AQUINO, A. C. M. S. **Caracterização das águas sobrenadantes da fermentação de amido de mandioca: ácidos orgânicos e suas relações com as propriedades do polvilho azedo**. 2015. 228 f. Tese (Doutorado em Ciência dos Alimentos). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2015.

AQUINO, A. C. M. S.; GERVIN, V. M.; AMANTE, E. R. Avaliação do processo produtivo de polvilho azedo em indústrias de Santa Catarina. **Brazilian Journal of Food Technology**, v. 19, 2016.

APLEVICZ, K. S. **Caracterização de produtos panificados à base de féculas de mandioca nativas e modificadas**. 2006, 131 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Alimentos)- Universidade Estadual de Ponta Grossa, Ponta Grossa, 2006.

ASCHERI, D. P. R.; MOURA, W. S.; ASCHERI, J. L. R. FREITAS JÚNIOR, E. A. Propriedades termodinâmicas de adsorção de água do amido de rizomas de lírio-do-brejo (*Hedychium coronarium*). **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v. 29, n. 2, p. 459- 462, 2009.

ASCHERI, D. P. R.; VILELA, E. R. Alterações do polvilho de mandioca pela fermentação, no fabrico de biscoitos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 30, n. 2, p. 269-279, 1995.

BERTOLINI, A.C.; MESTRES, C.; RAFFI, J.; BULÉON, A.; LERNER, D.; COLONNA, P. Photodegradation of Cassava and Corn

Starch. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v.49, p.675-682, 2001.

BRABET, C.; DUFOUR, D. El almidón agrio de yucca: producción y estudio de las propiedades fisicoquímicas. In: SIMPOSIO EM CARBOHIDRATOS, 1993. Quito. **Memória**. Quito: Escuela Politécnica Nacional, 1993, p. 197-212.

BRUNAUER, S.; EMMETT, P. H.; TELLER, E. Adsorption of gases in multimolecular layers. **Journal of the American Chemical Society**, v. 60, n. 2, p. 309-319, 1938.

CAMARGO, C.; COLONNA, P.; BULGON, A.; RICHARD-MOLAR, D. Functional Properties of Sour Cassava (*Manihot utilissima*). Starch: polvilho azedo. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v. 45, n. 3, p. 273-289, 1988.

CARVALHO, E. P.; CANHOS, V.P.; RIBEIRO, V. E.; CARVALHO, H. P. Polvilho azedo: aspectos físicos, químicos e microbiológicos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 31, n. 2, p. 129- 137, 1996.

CEREDA, M. P. **Alguns aspectos sobre a fermentação da fécula de mandioca**. 1973, 89 f. Tese (Doutorado em Ciências)- Faculdade de Ciências Médicas e Biológicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 1973.

CEREDA, M. P.; BONASSI, I. A. Avaliação da qualidade da fécula fermentada comercial de mandioca (polvilho azedo). Ácidos orgânicos e absorção de água. **Revista Brasileira de Mandioca**, v. 3, n. 2, p. 21 – 30, 1985.

CEREDA, M. P.; GIAJ-LEVRA, L. A. Constatação de bactérias não simbióticas fixadoras de nitrogênio em fermentação natural de fécula de mandioca. **Revista Brasileira de Mandioca**, Cruz das Almas, v. 6, n. 1, p. 29-33, jun. 1987.

CEREDA, M. P.; NUNES, O. L. G. S. **Definição de parâmetros de fermentação e secagem para industrialização do polvilho azedo**. Botucatu: Departamento de Tecnologia dos Produtos Agropecuários, UNESP, 1989. 80 p. (Relatório Técnico, 1).

CEREDA, M. P.; NUNES, O. L. G. S. **Definição de parâmetros de fermentação e secagem para industrialização do polvilho azedo.** Botucatu: Departamento de Tecnologia dos Produtos Agropecuários, UNESP, 1990. 41 p. (Relatório Técnico, 2).

CEREDA, M. P.; NUNES, O. L. G. S. **Parâmetros de fermentação da fécula de mandioca e sua influência sobre a qualidade. Efeito dos gases (gás carbônico e hidrogênio) e ácidos orgânicos (lático, acético e butírico).** Botucatu: Departamento de Tecnologia dos Produtos Agropecuários, UNESP, 1991. 101 p.

CEREDA, M. P. Padronização para ensaios de qualidade da fécula de mandioca fermentada (polvilho azedo). I Formulação e preparo de biscoito. **Boletim da Sociedade Brasileira de Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v. 17, n. 3, p. 287-295, 1983a.

CEREDA, M. P. Propriedades Gerais do Amido. In: Culturas de tuberosas amiláceas latino americanas. São Paulo: Fundação Cargill, 2002, v. 1, 203 p.

CEREDA, M. P. Tecnologia e qualidade do polvilho azedo. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v.13, n.145, p.63-68. 1987.

CLIMATEMPO. **Climatologia**. Disponível em: <<http://www.climatempo.com.br>>. Acesso em 12 de junho de 2016.

DEMIATE I.M.; BARANA A.C; CEREDA M.P., WOSIACKI. G. Organic acid profile of commercial sour cassava starch. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, 19, 131-135, 1999.

DEMIATE, I. M.; CEREDA, M. P. Some physico-chemical characteristics of modified cassava starches presenting baking property. **Energia na Agricultura**, v. 15, n. 3, p. 36-46, 2000.

DEMIATE, I. M.; DUPUY, N.; HUVENNE, J. P.; CEREDA, M. P.; WOSIACKI, G. Relationship between banking behavior of modified cassava starches and starch chemical structure determined by FTIR spectroscopy. **Carbohydrate Polymers**, v. 42, n. 2, p. 149-158, 2000.

DIAS, A. R. G.; ZAVAREZI, E. R.; HELBIG, E. ELIAS, M. C.; OLIVEIRA, M.; Oxidação dos amidos de mandioca e de milho comum fermentados: desenvolvimento da propriedade de expansão. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v. 27, n. 1, p. 794–799, 2007.

DINIZ, I. P. **Caracterização tecnológica do polvilho azedo produzido em diferentes regiões do estado de Minas Gerais**. 2006, 101 f. Dissertação (Magister Scientiae em Ciência e Tecnologia de Alimentos)- Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2006.

DUCKWORTH, R. B. **Water Relations of Foods**. London: Academic Press, 1975. 716 p.

DUFOUR, D.; BRABET, C.; ZAKHIA, N.; CHUZEL, G. Influence de la fermentation et du séchage solaire sur l'acquisition du pouvoir de la panification de l'amidon aigre de manioc= influence of fermentation and sun-drying on the breadmaking capacity of cassava sour starch. In: AGBOR, E.T.; BRAUMAN, A. GRIFFON, D.; TRÈCHE, S. **Transformation alimentaire du manioc=Cassava food processing**. Paris: ORSTOM, 1995, p. 399-416.

FRANCO, C. M. L.; OGAWA, C.; RABACHINI, C.; ROCHA, T.; SOUZA, T.; CEREDA, M. P.; JANE, J., Effect of lactic acid and UV irradiation on the cassava and corn starches. **Brazilian Archives of Biology and Technology**, v. 53, n. 2, p. 443-454, 2010.

FERREIRA, C.D.; PENA, R.S. Comportamento higroscópico da farinha de pupunha (*Bactris gasipaes*). **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v.23, n.2, p.251-255, 2003.

FIGUEIREDO, R. M. F. Caracterização físico-química do suco e pó de acerola (*Malpighia puniceifolia*, L.). Campinas, 1998. 104 p. Tese (Doutorado em Tecnologia de Alimentos), Faculdade de Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual de Campinas, 1998.

GABAS, A. L. **Influência das condições de secagem de ameixa (*Prunus domestica*) na qualidade do produto final**. 2002, 155 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Alimentos) Universidade Estadual de Campinas- UNICAMP, Campinas, 2002.

HOOVER, R. Composition, molecular structure, and physicochemical properties of tuber and root starches: a review. **Carbohydrate Polymers**, v. 45, n. 3, p. 253-267, 2001.

IGHEDJAL, T.; LOUKA, N., ALLAF, K. Sorption isotherms of potato slices dried and texturized by controlled sudden decompression. **Journal of Food Engineering**, v. 85, n. 1, p 180-190, 2008.

JANGAM, S. V.; MUJUMDAR, A. S. **Drying of Foods, Vegetables and Fruits**- Volume 1.Ed. IN: JANGAM, S.V.; LAW, C. L.; MUNJUNDAR, A. S. Singapura, 2010.

KOTOVICZ, V. **Otimização da desidratação osmótica e secagem do yacon (*Polymnia sonchifolia*)**. 2011, 90 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia de Alimentos). Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2011.

KUROZAWA, L. E.; EL-AOUAR, A. A.; MURR, F. E. X. Obtenção de isotermas de desorção de cogumelo in natura e desidratado osmoticamente, **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v. 25, n. 4, p. 828-834, 2005.

LACERDA, I. C. A.; MIRANDA, R. L.; BORELLI, B. M.; NUNES, A. C.; NARDI, M. D.; LACHANCE, M. A.; ROSA, C. A. Lactic acid bacteria and yeasts associated with spontaneous fermentations during the production of sour cassava starch in Brazil. **International Journal of Food Microbiology**, v. 1, n. 105, abril, p. 213-219, 2005.

MAEDA, K. C. **Proposta de classificação para o polvilho azedo**. 1999. 95p. Dissertação (Mestrado em Ciência de Alimentos)- Escola Superior de Agricultura Luiz Queiroz, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1999.

MAEDA, K. C.; CEREDA, M. P. Avaliação de duas metodologias de expansão ao forno do polvilho azedo. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, Campinas, v. 21, n. 2, p. 139-143, 2001.

MARCON, M.J.A. **Efeito do processo fermentativo pelo método tradicional e com adição de glicose, sobre a qualidade do polvilho**

azedo. Dissertação (Mestrado em Ciência dos Alimentos)- Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004, 126 f.

MARCON, M. J. A. **Proposta para o mecanismo de expansão do polvilho azedo com base nas características físico químicas**. Tese (Doutorado em Ciência dos Alimentos). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2009, 187 f.

MARCON, M. J. A.; VIERA, G. C. N.; DE SIMAS, K. N.; SANTOS, K.; VIEIRA, M. A.; AMBONI, R. D. M. C.; AMANTE, E. R. Effect of the Improved Fermentation on Physicochemical Properties and Sensorial Acceptability of Sour Cassava Starch. **Brazilian Archives of Biology and Technology**, v. 50, n. 6, p. 1073-1081, 2007.

MARCON, M. J. A.; VIEIRA, M. A.; SANTOS, K.; DE SIMAS, K. N.; AMBONI, R. D. M. C.; AMANTE, E. R. The effect of fermentation on cassava starch microstructure. **Journal of Food Process Engineering**, v. 29, p. 362-372, 2006.

MCMINN, W. A. M; MAGEE, T. R. A. Thermodynamic properties of moisture sorption of potato. **Journal of Food Engineering**, v. 60, n. 1, p.157- 165, 2003

MESTRES, C.; ROUAU, X., Influence of natural fermentation and drying conditions on the physicochemical characteristics of cassava starch. **Journal of the Science of Food and Agriculture.**, v. 74, n. 1, p.147-155, 1997.

MESTRES, C.; ZAKHIA, N.; DUFOUR, D. Functional and physico – chemical properties of sour cassava starch. Starch structure and functionality/ Cambridge, **UK:Royal Society of Chemistry**, p. 42-50, 1997.

MORAIS, S. J. M. **Cinética de secagem de grãos de feijão caupi**. 2010. 90 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Estadual de Goiás, Goiás, 2010.

NUNES, O.L.G.S.; CEREDA M. P. **Metodologia para avaliação da qualidade de fécula fermentada de mandioca (polvilho azedo)**. In: Congresso Brasileiro de Mandioca, Salvador, 1994.

PARK, K. J.; NOGUEIRA, R.I. Modelos de ajustes de isotermas de sorção de alimentos. In: **Engenharia Rural**, Piracicaba: ESALQ/USP, 1992, v. 3, n. 1, p. 81-86.

PARK, K. J. B.; PARK, K. J.; CORNEJO, F. E. P.; FABRO, I. M. D. Considerações termodinâmicas das isotermas. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, v.10, n.1, p. 83-94, 2008.

PENIDO, F. C. L. **Isolamento e identificação molecular da microbiota predominante na fermentação natural de mandioca: seleção de culturas iniciadoras para produção de polvilho azedo em escala piloto**. 2013. 102 f. Dissertação (Mestrado em Ciência de Alimentos). Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2013.

PEREIRA, J.; CIACCO, C.F.; VILELA, E.R.; TEXEIRA, L.S. Féculas fermentadas na fabricação de biscoitos: estudo de fontes alternativas. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v.19, n.2, p.287-293. 1999.

PIZZINATTO, A.; CAMPAGNOLLI, D. M.F. Avaliação tecnológica de produtos derivados da farinha de trigo (pão, macarrão, biscoitos). Centro de Tecnologia de Farinhas e Panificação, Instituto de Tecnologia de alimentos (ITAL), Campinas: **Boletim ITAL**, 1993, 54 p.

PLATA-OVIEDO, M.; CAMARGO, C. R. Determinação de propriedades físico-químicas e funcionais de duas féculas fermentadas de mandioca (polvilho azedo). **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v. 15, n.1, p. 59 – 65, 1995.

PLATA-OVIEDO, M. S. V; CAMARGO, C. R. Effect of acid treatments and drying processes on physic-chemical and functional properties of cassava starch. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v. 77, n. 1, p. 103-108, 1998.

PLATA-OVIEDO, M.; CAMARGO, C. R. Sun-dried sour cassava starch: expansion property. In: International Meeting on Cassava and Starch, 1994, Cali. **Abstracts**. Cali: CIAT, 1994, p. 112.

PLATA-OVIEDO, M. S. V.; **Efeito do tratamento ácido nas propriedades físico-químicas e funcionais do amido de mandioca.**

1991. 135 p. Tese (Mestre em Tecnologia de Alimentos) - Faculdade de Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1991.

PLATA-OVIEDO, M. S. V.; CAMARGO, C. R. Effect of acid treatments and drying processes on physic-chemical and functional properties of cassava starch. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v. 77, n. 1, p. 103-108, 1998.

PLATA-OVIEDO, M. S. V. **Secagem do amido fermentado de mandioca: modificação química relacionada com a propriedade de expansão e características físico-químicas**. Tese (Doutorado em Tecnologia de Alimentos) - Faculdade de Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 114 p., 1998.

POLA JÚNIOR, A. C. **Análise do processo de produção do polvilho azedo**. 2013, 152 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Alimentos). Universidade Federal de Santa Catarina- UFSC, Florianópolis, 2013.

RESIO, A.C.; AGUERE, R.J.; SUÁREZ, C. Analysis of the sorptional characteristics of amaranth starch, **Journal of Food Engineering**, v.42, n.1, p.51-57, 1999.

SANTOS, F. S. A.; FIGUEIRÊDO, R. M. F.; QUEIROZ, A. J. M. Isotermas de adsorção de umidade de farinhas de mandioca temperadas. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, v. 6, n. 2, p. 149-155, 2004.

SILVA, G.O.; TAKIZAWA F. F.; PEDROSO R. A.; FRANCO C. M. L.; LEONEL M.; SARMENTO, S. B.S.; DEMIATE I. M. Características físico químicas de amidos modificados de grau alimentício comercializados no Brasil. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v. 26, n.1, p.188-197, 2006.

SILVEIRA, I. A. P.; CARVALHO, E. P.; PÁDUA, I. P. M.; DIONÍZIO, F. L.; MARQUES, S. C. Isolamento e Caracterização da Microbiota Ácido-Lática Envolvida no Processo Fermentativo para Produção de Polvilho Azedo. **Revista Científica do UNILAVRAS**, ano 2, n. 2, p. 7-15, 2003.

SILVEIRA, I. A. P.; CARVALHO, E. P.; SCHWAN, R. I.; PILON, L. Aspectos gerais e microbiológicos da fermentação da fécula de mandioca para produção de polvilho azedo. **Higiene Alimentar**, v. 14, n. 68/69, p. 26-31, 2000.

VATANASUCHART, N.; NAIVIKUL, O.; CHAROENREIN, S.; SRIROTH, K. Molecular properties of cassava starch modified with different UV irradiations to enhance baking expansion. **Carbohydrate Polymers**, v. 61, n. 1, pp. 80–87, 2005.

ZOTOU, A.; LOUKOU, Z.; KARAVA, O. Method development for the determination of seven organic acids in wines by reversed-phase high performance liquid chromatography. **Chromatographia**, v. 60, n. 1/2, p. 39-44, 2004.

CAPÍTULO 4

SECAGEM DO AMIDO DE MANDIOCA DO CULTIVAR MOURA FERMENTADO

1 INTRODUÇÃO

A etapa de secagem é decisiva sobre a principal propriedade do polvilho azedo (amido de mandioca fermentado), a propriedade de expansão ao forneamento, a qual justifica a ampla utilização na culinária brasileira, na indústria de panificação para produção de broas, pão de queijo e biscoitos (CEREDA, 1973).

A fermentação deste produto ainda é considerada empírica e a secagem ocorre naturalmente ao sol, sem controle e dependente das condições climáticas, gerando um produto desuniforme, com riscos de contaminação e muitas vezes com características tecnológicas indefinidas (WESTBY; CEREDA, 1994; CEREDA; NUNES; VILPOUX, 1995).

Plata-Olviedo (1991) sugeriu que a reação de oxidação promovida pela ação de luz ultravioleta do sol sobre o amido fermentado de mandioca durante a secagem seria um dos fenômenos responsáveis pelo desenvolvimento da propriedade de expansão. Quando o amido é fermentado e seco em estufa apresenta baixa expansão, comprovando a necessidade da exposição solar para este produto (DUFOUR et al., 1996).

O processo de secagem consiste na remoção de grande parte da água contida no produto a determinado nível, originando condições desfavoráveis à continuidade de suas atividades metabólicas e ao desenvolvimento de micro-organismos (MARTINAZZO et al., 2007b).

Para Christensen e Kaufmann (1974), a conservação pela secagem se baseia no fato de que tanto os micro-organismos quanto as enzimas e todo o mecanismo metabólico necessitam de certa quantidade de água para suas atividades. Com a redução da água disponível, conseqüentemente serão reduzidas a atividade de água e a velocidade das reações químicas no produto, bem como o desenvolvimento de micro-organismos, o que para o amido fermentado faz com que o processo fermentativo seja cessado.

Diversas pesquisas têm sido desenvolvidas com o intuito de estudar a cinética de secagem de diferentes produtos: trigo parboilizado (MOHAPATRA; RAO, 2005), arroz em casca (SHEI; CHEN, 1999; BASUNIA; ABE, 2001; CHEN; WU, 2001; CIHAN et al., 2007), pera (LAHSASNI et al. 2004), resíduos da indústria de amido (VILHALVA et al., 2012), batata (RUHANIAN; MOVAGHARNEJAD, 2016), amido de mandioca nativo (GERALDI, 2006; AVIARA et al., 2014), massa fibrosa de mandioca (CASTIGLIONI et al., 2013), chips de mandioca

(FAMUREWA; EMUEKELE, 2015). Entretanto, não há na literatura informações sobre a secagem do amido de mandioca fermentado.

Desta forma, e com base nos resultados obtidos no capítulo 2, o presente trabalho teve como objetivo estudar a cinética da secagem convectiva a 55 °C do amido de mandioca do cultivar Moura fermentado e exposto por diferentes tempos ao sol, selecionando um modelo que melhor se ajustasse aos dados experimentais de secagem.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Material

A amostra de amido de mandioca fermentado do cultivar Moura foi fornecida pela polvilharia Felipe, localizada na região de Azambuja - Pedras Grandes (SC) (latitude 28° 26' 09" S longitude 49° 11' 06" W).

O cultivar de mandioca Moura, segundo informações da Epagri, veio oficialmente para Santa Catarina trazido do Rio Grande do Sul (Estação Experimental da Fepagro de Taquari) em 1991, quando foi formado o banco de germoplasma da então Empasc, hoje Epagri. Nos anos seguintes os pesquisadores iniciaram trabalhos com pesquisa participativa, quando esse cultivar pode ter chegado às mãos dos agricultores (NEUBERT, 2013).

O amido foi fermentado em um tanque de polietileno coberto com capacidade de 1 m³, conforme Figura 1. O amido desta cultivar foi colocado para fermentar em 11 de junho de 2015 e a coleta realizada em 29 de outubro de 2015. Juntamente com o amido fermentado foi coletada a água sobrenadante da fermentação, para utilizá-la na ressuspensão. Uma lâmina de 20 cm desta água foi deixada sobre o amido, nos tanques de polipropileno de 38 L de capacidade (35,1 x 29,3 x 53,0), em laboratório, até que o experimento de secagem fosse realizado, o que ocorreu em 14 de novembro de 2015.

O amido de mandioca do cultivar Moura utilizado para fermentação foi extraído na própria polvilharia e ainda úmido levado para o tanque de fermentação, o qual foi adicionado inóculo para favorecer a fermentação. A temperatura mínima e máxima na região de Pedras Grandes, nos meses em que se deu a fermentação do amido, com base na média de dados de 30 anos, foi de 13 e 23 °C (CLIMATEMPO, 2016).

Figura 1- Tanque de fermentação do amido de mandioca do cultivar Moura da polvilharia de Azambuja (SC).



Fonte: Acervo do autor.

2.2 Método

2.2.1 Exposição solar e secagem em estufa convectiva

Para as secagens convectivas foi utilizada uma estufa convectiva de circulação/renovação de ar (marca Tecnal, modelo TE-394/2), mantendo a renovação de ar constante.

Em cada experimento as amostras de amido fermentado foram espalhadas em formas retangulares de alumínio (10 cm x 15 cm; área = 0,015 m²) revestidas com papel celofane. As amostras foram colocadas sobre o celofane de modo a preencher todo o fundo da forma em uma espessura de camada de amido de 0,5 cm. Foi preparado o número de formas suficiente para cumprir o planejamento de coleta em todas as etapas da secagem nas diferentes condições testadas.

As amostras foram colocadas à exposição solar (das 9 às 16 h) por 7 horas, sendo que a cada hora uma amostra foi retirada do sol, e o restante da secagem finalizada em estufa de circulação e renovação de ar, previamente regulada a $55 \pm 1,0$ °C. A temperatura de secagem da

estufa foi escolhida com base nos estudos realizados nos capítulos anteriores, que mostraram que a taxa de secagem é maior à temperatura de 55 °C, e esta temperatura não reflete em prejuízos as suas principais características, comparado com do amido a temperatura de 45 °C. Já temperaturas superiores a 60 °C não são recomendadas para a secagem do amido de mandioca fermentado, pois está muito próxima da temperatura de gelatinização deste produto.

As medições de umidade relativa (UR) foram determinadas pelo método do bulbo seco e bulbo úmido, a cada hora após o início das secagens. A velocidade do ar de saída da estufa foi medida com um anemômetro digital portátil (marca Mimica, modelo MDA 11), e foi em média $1,26 \pm 0,06 \text{ m.s}^{-1}$.

A perda de massa, das amostras na estufa, foi acompanhada ao longo da secagem até atingirem massa constante. As pesagens foram realizadas em balança semi-analítica (Marca Marte modelo AS 5500C, carga máxima de 5.000 g e carga mínima de 0,25 g) a cada 10 minutos.

2.2.2 Cinética e modelagem matemática da secagem

2.2.2.1 Suavização dos dados

Os dados experimentais do teor de umidade em função do tempo de secagem foram ajustados a partir da função de suavização *sgolayfilt*, do programa Matlab (R2013a, MathWorksInc, MA, USA) (Savitzky-golay). A derivada do ajuste foi calculada a fim de obter a tendência das taxas de secagem do processo.

2.2.2.2 Modelagem matemática

Modelo para separação e avaliação dos dois períodos de secagem

A interpretação dos fenômenos que controlam o processo de secagem, utilizando somente as curvas de secagem suavizadas, podem conduzir a resultados e interpretações equivocadas, conforme mostrado no Capítulo 2. Diante disto, o modelo de duas fases foi utilizado para auxiliar na definição dos períodos à taxa constante e taxa decrescente juntamente com os dados suavizados .

Uma equação de reta foi ajustada à primeira parte da curva de secagem do processo e uma função polinomial foi usada para representar os dados da curva de secagem relativos ao período de

secagem à taxa decrescente. Para definição do final do período de secagem à taxa constante foi utilizado como exigência o coeficiente de correlação da equação da reta.

Os parâmetros dessa primeira fase são o final do período de secagem à taxa constante (t), a taxa de secagem nesse período (a) e umidade inicial (X_i), conforme Equação 1.

$$X = at + X_i \quad (\text{Equação 1})$$

O segundo período de secagem baseia-se no ajuste de uma função polinomial, Equação 2.

$$X = C_0 + C_1 t_n + C_2 t_n^2 + C_3 t_n^3 + C_4 t_n^4 \quad (\text{Equação 2})$$

A Equação 3 fornece a taxa de secagem relativa ao período de secagem à taxa decrescente (função polinomial derivada), em que d_1 , d_2 , d_3 e d_4 são parâmetros empíricos do modelo.

$$R = \frac{dx}{dt} = d_1 + 2d_2 t_n + 3d_3 t_n^2 + 4d_4 t_n^3 \quad (\text{Equação 3})$$

Modelos matemáticos de ampla utilização na literatura

Foram também utilizados outros sete modelos matemáticos empíricos de ampla utilização na literatura em experimentos com material alimentício, cujas equações constam na Tabela 1.

Tabela 1 - Modelos matemáticos aplicados as curvas secagem de amido de mandioca fermentado (polvilho azedo).

Modelo	Nome do Modelo	Equação	Referência
1	Lewis	$RU = \exp(-K.t)$	Lewis (1921)
2	Page	$RU = \exp(-k.t^n)$	Page (1949)
3	Henderson e Pabis	$RU = a.\exp(-k.t)$	Henderson, Pabis (1961)
4	Wang e Singh	$RU = 1 + at + bt^2$	Wang , Singh (1978)
5	Midilli	$RU = a.\exp(-k.t^n) + b.t$	Midilli et al. (2002)
6	Aproximação da difusão	$RU = a.\exp(-k.t) + (1-a).\exp(-k.b.t)$	Wang et al. (2007)
7	Logarítmico	$RU = a.\exp(-k.t) + c$	Togrul, Pehlivan (2002)

RU: adimensional de umidade; *k*: constante de secagem (min^{-1}); *t*: tempo (min); *a*, *b*, *c*, *n*: constantes experimentais(adimensionais).

Fonte: adaptado de Doymaz (2005).

O valor adimensional de umidade foi calculado pela Equação 4.

$$RU = \frac{U_t - U_{eq}}{U_0 - U_{eq}}$$

Onde:

U_t = umidade absoluta, base seca, *b.s.*

U_{eq} = umidade de equilíbrio, *b.s.*

U_0 = umidade inicial, *b.s.*

O ajuste dos modelos matemáticos aos dados experimentais de secagem foi realizado pela análise de regressão não linear, pelo método Quasi-Newton, utilizando o programa computacional STATISTICA 8.0®.

Para avaliar a qualidade dos ajustes dos modelos matemáticos (Tabela 1) aos dados experimentais, foram utilizados como critérios de ajuste a análise do coeficiente de determinação (R^2), gerado pelo próprio software Statistica, raiz do quadrado médio do erro (RQME) e o qui-quadrado reduzido (χ^2), que levam em consideração as respostas observadas experimentalmente e os valores preditos pelo modelo, conforme Equações 5 e 6, respectivamente.

$$RQME = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (RU_{pred} - RU_{exp})^2 \right]^{1/2} \quad (\text{Equação 5})$$

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (RU_{exp} - RU_{pred})^2}{N - V} \quad (\text{Equação 6})$$

Onde:

χ^2 = qui-quadrado reduzido;

RQME = raiz do quadrado médio do erro;

RU_{exp} = adimensional de umidade observado experimentalmente;

RU_{pred} = adimensional de umidade predito pelo modelo;

N = número de pontos experimentais;

V = número de coeficientes e constantes.

Para ser considerado de bom ajuste, o modelo deve alcançar valores de coeficiente de regressão linear (R^2) mais elevados e próximos possíveis da unidade (1,0) e, concomitantemente, os valores de RQME e χ^2 mais baixos e próximos de zero.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Com a realização da secagem convectiva a 55 °C, do amido de mandioca do cultivar Moura fermentado, foi possível obter as curvas de cinética experimentais dos diferentes tempos de exposição solar.

Na Figura 2 são apresentados os resultados experimentais de evolução da perda de umidade pelo tempo. Como esperado estas curvas demonstram que quanto maior o tempo de exposição solar menor a umidade inicial. Sendo o sol uma fonte de calor, ele também proporciona a remoção de umidade do material, o que causa a redução da umidade do amido fermentado a cada hora que permanece no sol, cujos resultados de umidade inicial após os diferentes tempos de exposição solar e antes de ser levado para secagem em estufa são apresentados na Tabela 2.

Considerando que o final da secagem ocorreu quando o amido atingiu umidade de 0,03 g H₂O. g_{ss}⁻¹, não houve uma relação linear entre o tempo de secagem com a umidade inicial.

O mesmo comportamento foi observado por Geraldi (2006) durante a secagem de amido de mandioca em secador *flash-dryer*, onde a umidade inicial variou de 0,6 a 0,83 (b.s.) e o tempo de secagem não foi influenciado pela umidade inicial, somente pela temperatura do ar de secagem.

Na Tabela 2 também constam os tempos necessários para que cada amostra atingisse a umidade de 14 %. O valor de 14 % não corresponde a umidade final da secagem, mas esta é a umidade na qual o amido normalmente é comercializado, sendo que Aquino, Gervin e Amante (2016) encontraram amidos sendo comercializados com umidade de 11,12 a 15,06 %.

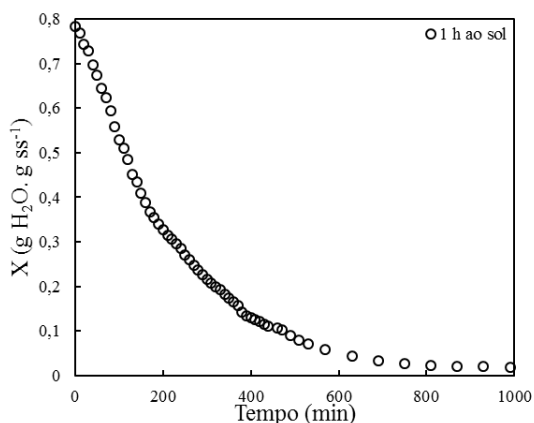
Tabela 2 - Umidade inicial do amido de mandioca fermentado após os diferentes tempos de exposição solar, e o tempo que cada amostra levou para atingir a umidade de 14 %.

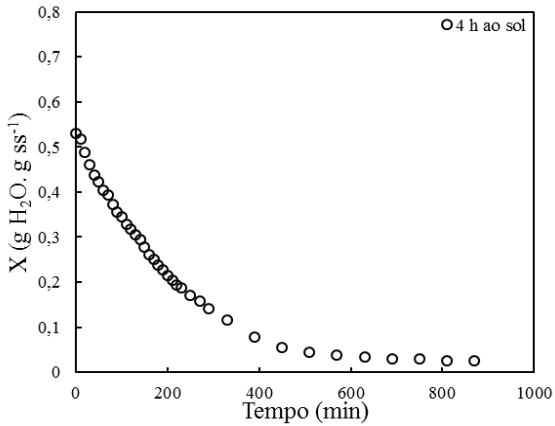
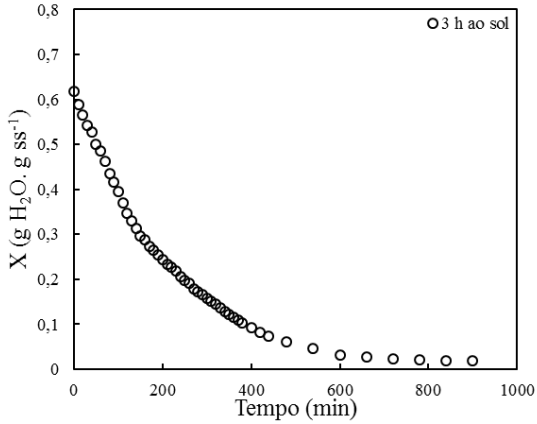
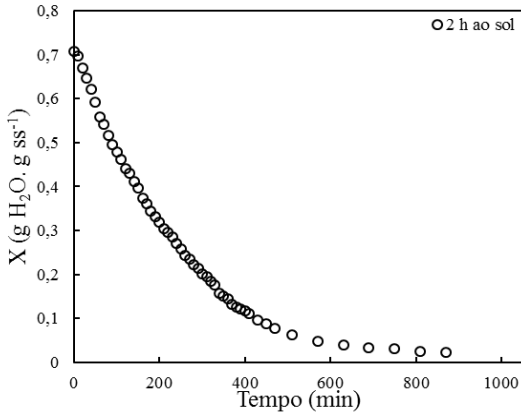
Amostra	Umidade inicial (g H ₂ O. g _{ss} ⁻¹ .)	Tempo (h) para umidade de 14 % (em estufa)	Tempo (h) para umidade de 14 % (sol + estufa)
1 h ao sol	0,784	6,17	7,17
2 h ao sol	0,707	5,66	7,66
3 h ao sol	0,617	5,00	8
4 h ao sol	0,529	4,5	8,5
5 h ao sol	0,496	4,33	9,33
6 h ao sol	0,456	3,83	9,83
7 h ao sol	0,383	2,83	9,83

Os tempos necessários de secagem em estufa, para que cada amido fermentado atingisse a umidade de 14 % variaram de 2,83 a 6,17 h, para 7 h e 1 h ao sol, respectivamente. Se for considerado o tempo de exposição ao sol juntamente com a estufa, para a amostra de 7 h, tem-se um tempo total de 9,83 h, o que reduz significativamente o tempo da secagem utilizado pelas indústrias deste produto, onde é feita totalmente ao sol e pode chegar até 16 h (DINIZ, 2006).

Os dados experimentais de perda de massa foram suavizados com a função *sgolayfilt*, e derivados para obtenção das curvas de taxa de secagem (Figura 3).

Figura 2 - Cinética de secagem do amido de mandioca fermentado exposto ao sol por diferentes tempos com secagem continuada em estufa convectiva a 55 °C.





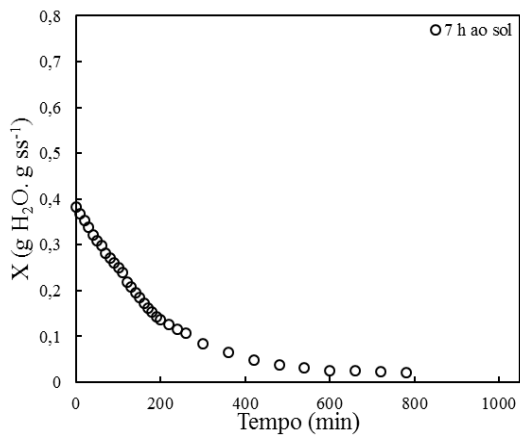
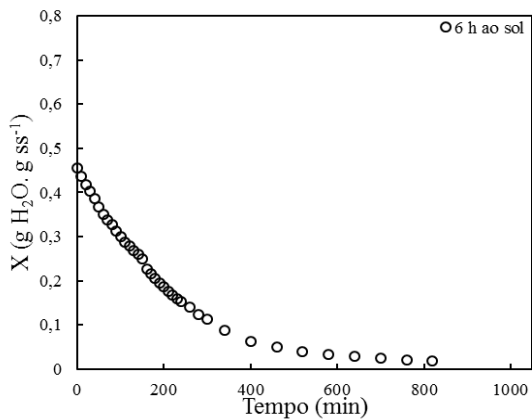
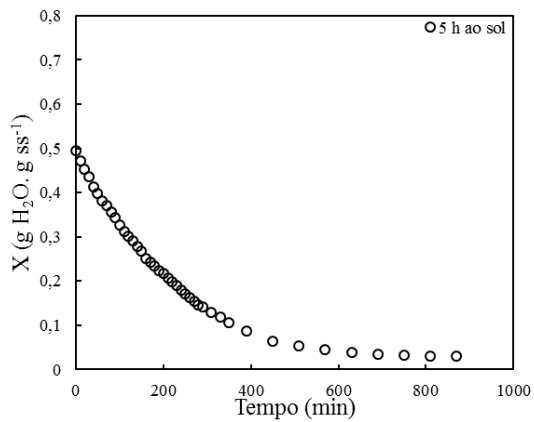
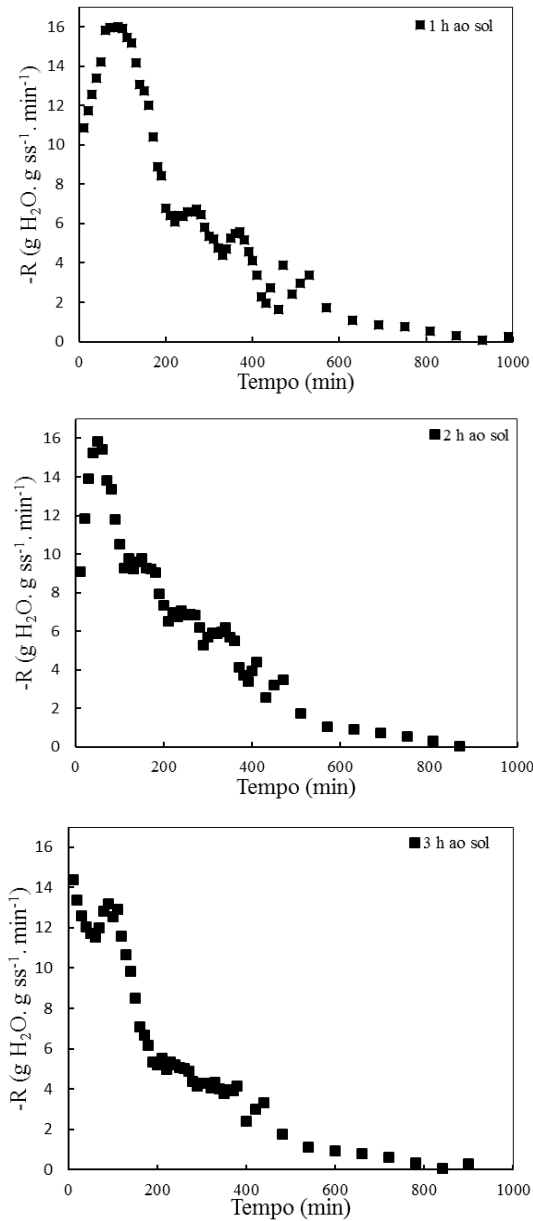
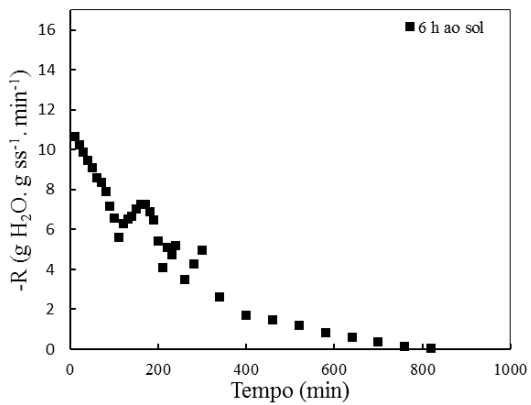
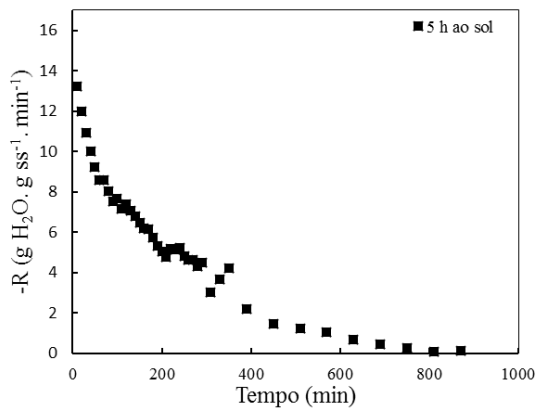
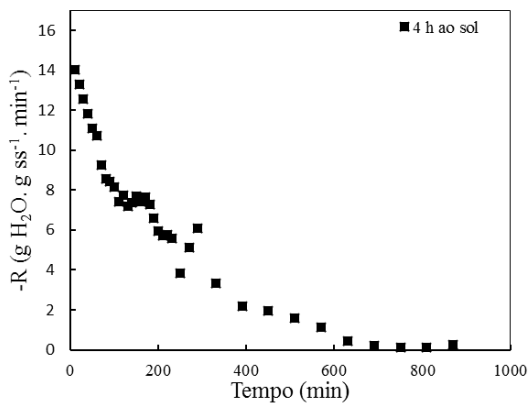
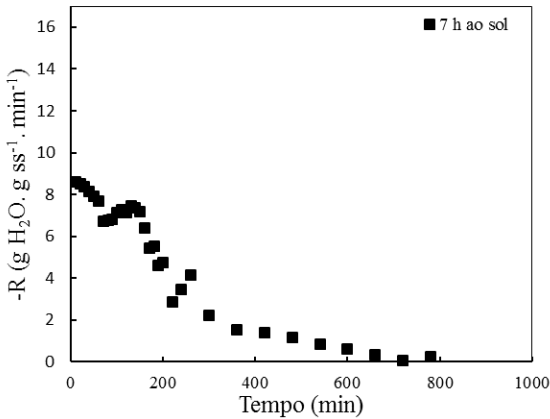


Figura 3 - Taxa de secagem do amido de mandioca fermentado expostos ao sol por diferentes tempos com secagem continuada em estufa convectiva a 55 °C.







Para a amostra que ficou exposta por 1 h ao sol, observa-se três períodos de secagem, uma fase de adaptação do material com a temperatura do ar de secagem, em que ocorre uma elevação gradual da temperatura do alimento e da pressão de vapor da água sem a perda de umidade. Um segundo período, à taxa constante entre 60 e 100 minutos de secagem, em que a transferência de massa e calor são equivalentes, sendo evaporada somente a água superficial (água livre) do alimento, seguido de um período à taxa decrescente, onde ocorre uma redução da migração de umidade do interior para a superfície e a transferência de massa fica reduzida. O período de taxa decrescente desta amostra apresentou um comportamento incomum, pois entre 220 e 280 minutos um segundo período de taxa constante aparece novamente com posterior período de taxa decrescente.

Um comportamento anômalo após o início do período de taxa decrescente foi encontrado em todas as curvas de secagem dos diferentes tempos de exposição solar, seja com elevação e decréscimo de taxa ou com mais de um período de taxa constante. Isto pode ter ocorrido devido à formação de gradientes de umidade que ocorrem enquanto a superfície do material está seca e a parte central está úmida, gerando tensões internas que causam irregularidades na superfície, como rachaduras (Figura 4) que poderiam estar causando distribuição de calor não uniforme no alimento.

Figura 4 - Rachaduras geradas durante a secagem na superfície do amido de mandioca fermentado.



Um período de taxa de adaptação seguido de taxa constante, entre 80 e 150 minutos, com posterior taxa decrescente também foi encontrado para a amostra exposta por 7 h ao sol. Já o amido fermentado que ficou por 2 e 3 h ao sol, apresentou uma fase de adaptação seguido de um período decrescente, enquanto que para o amido exposto por 4, 5 e 6 h ao sol a secagem ocorreu somente à taxa decrescente.

A única amostra que apresentou um período de taxa constante em maior extensão foi a de 1 h, já que permaneceu por menos tempo ao sol e conseqüentemente possuía maior quantidade de umidade, principalmente na superfície para que pudesse evaporar livremente, mas de um modo geral, para todas as amostras, pode-se dizer que o período de taxa decrescente foi o maior responsável pelo processo de secagem. Neste período o movimento de água do interior para a superfície do alimento pode ocorrer por diferentes mecanismos, sendo eles a difusão do líquido por gradientes de concentração, gradientes de vapor por diferença de pressão parcial de vapor e o movimento do líquido por forças capilares (KERR, 2007).

Moraes et al. (2015) verificaram três períodos de secagem para filmes de amido, sendo uma fase de adaptação, seguido de período de secagem à taxa constante e decrescente. Hassini et al. (2007)

encontraram dois períodos de secagem, um a taxa constante e outro à taxa decrescente estudando cinética de secagem convectiva de batata. Já Yadollahinia e Jahangiri (2009) não encontraram o período de taxa constante, somente a fase de adaptação e período de taxa decrescente também para secagem de batatas. Babalis e Belessiotis (2004) estudando a cinética de secagem de figos verificaram somente o período de taxa decrescente.

A taxa de secagem foi reduzindo com o tempo de exposição solar, sendo maior para a amostra de 1 h ao sol e menor para a amostra de 7 h ao sol. Isto ocorre porque o sol que funciona como fonte de calor, que juntamente com o vento, remove a umidade do material e desta forma quanto mais tempo ele fica ao sol menor quantidade de água deverá ser removida na estufa, o pode causar a redução da taxa de secagem, já que esta água restante será mais difícil de ser removida por estar no interior do alimento e não na superfície.

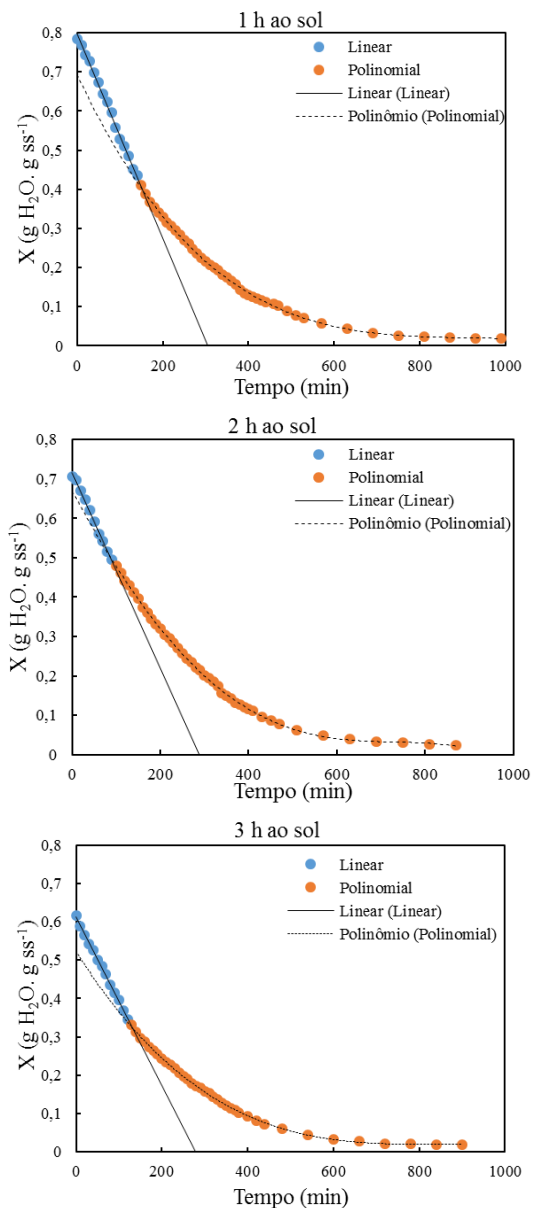
A utilização do modelo de duas fases, que considera a existência de uma fase linear e outra decrescente pode ser útil para verificação do período constante que nem sempre é visualizado nas curvas de taxa suavizadas. A Figura 5 ilustra a divisão da curva em uma fase linear e uma outra decrescente, onde nesta última foi ajustado um modelo polinomial.

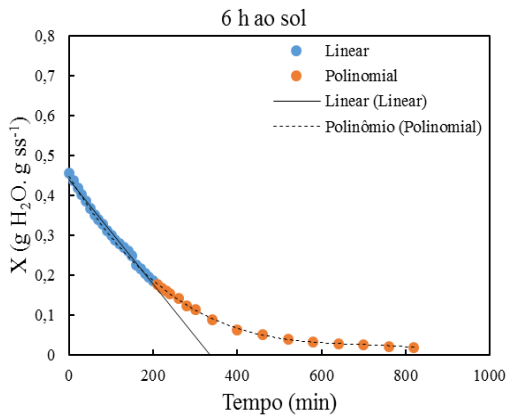
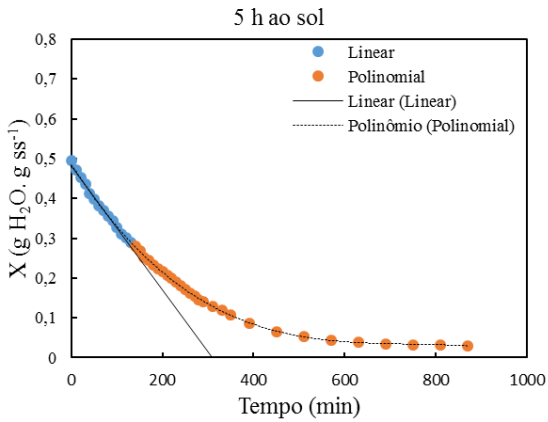
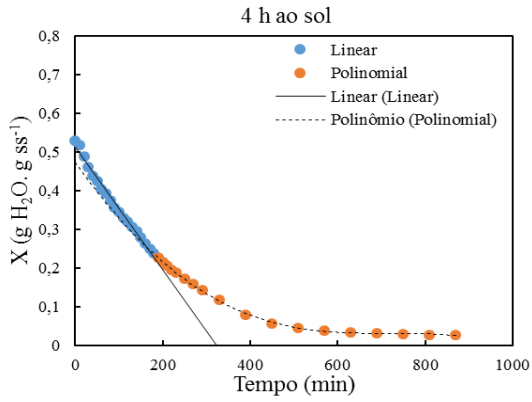
O critério para definição da fase linear, e conseqüentemente da fase constante, foi baseado no coeficiente de correlação R^2 . Os parâmetros dos modelos linear e polinomial são apresentados na Tabela 3.

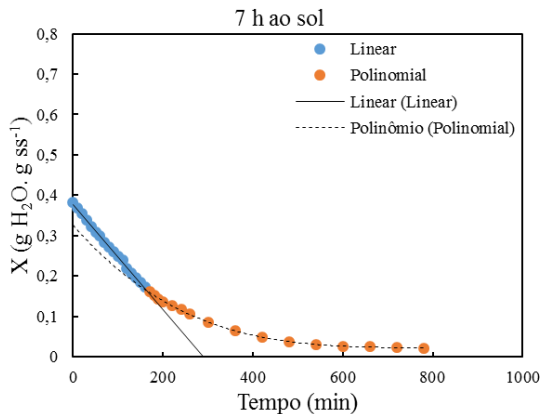
Apesar de na Figura 3 o período de taxa de secagem constante ter se apresentado somente para as amostras de 1 e 7 h ao sol, a separação da curva de umidade *vs.* o tempo, em duas fases mostra um período de secagem linear para todos os tempos de exposição solar, não ocorrendo uma relação da extensão deste período com o tempo de exposição solar ou com a umidade inicial de secagem. A Figura 6 exhibe a comparação entre as curvas de taxa de secagem dos dados experimentais, suavizada e para o modelo de duas fases, que para representação será mostrada somente para a amostra de 7 h ao sol e o restante das curvas são apresentadas no Apêndice G.

Moraes (2013) e Souza (2015) também relataram que as representações de curvas de taxa de secagem suavizadas não mostraram o período constante que muitas vezes está presente e é melhor verificado somente com a utilização do modelo de duas fases.

Figura 5 - Divisão da curva de umidade pelo tempo em uma fase linear e outra polinomial para os diferentes tempos de exposição solar do amido fermentado de mandioca (polvilho azedo).







A separação da curva de secagem em dois períodos considerando uma fase linear (taxa constante) com base no valor de R^2 acima de 0,99 permite assumir a existência do período de taxa constante durante a secagem. Entretanto, quando os dados de taxa obtidos com este modelo são avaliados juntamente com os dados suavizados e o experimental, pode-se perceber que nem sempre há um período de taxa constante, e a secagem pode ocorrer somente à taxa decrescente, mesmo quando o valor de R^2 da fase linear for acima de 0,99, conforme verificado para a amostra que ficou exposta por 5 h ao sol (Figura 7). Por este motivo a utilização da curva de taxa suavizada, e o modelo de duas fases devem ser utilizados com cuidado para a interpretação dos fenômenos que envolvem a secagem.

Tabela 3 - Parâmetros dos ajustes da fase linear e decrescente para o modelo de duas fases para a secagem do amido fermentado de mandioca (polvilho azedo).

FASE LINEAR						
Amostra	a	b	R²			
1 h ao sol	-0,0026	0,7978	0,9968			
2 h ao sol	-0,0025	0,7166	0,9951			
3 h ao sol	-0,0022	0,6127	0,9987			
4 h ao sol	-0,0016	0,5114	0,9860			
5 h ao sol	-0,0016	0,4830	0,9906			
6 h ao sol	-0,0013	0,4394	0,9921			
7 h ao sol	-0,0013	0,3777	0,9980			
FASE DECRESCENTE						
Amostra	C₀	C₁	C₂	C₃	C₄	R²
1 h ao sol	0,6929	-0,0023	3×10^{-6}	-2×10^{-9}	2×10^{-13}	0,9991
2 h ao sol	0,6704	-0,0021	1×10^{-6}	1×10^{-9}	-1×10^{-12}	0,9995
3 h ao sol	0,5228	-0,0018	2×10^{-6}	-8×10^{-10}	0	0,9994
4 h ao sol	0,4738	-0,0016	2×10^{-6}	2×10^{-10}	-6×10^{-13}	0,9991
5 h ao sol	0,4845	-0,0018	2×10^{-6}	-1×10^{-9}	4×10^{-14}	0,9996
6 h ao sol	0,4468	-0,0018	2×10^{-6}	-1×10^{-9}	0	0,9993
7 h ao sol	0,3258	-0,0013	2×10^{-6}	-1×10^{-9}	1×10^{-13}	0,9993
Amostra	d₁	d₂	d₃	d₄		
1 h ao sol	-0,0023	6×10^{-3}	-6×10^{-9}	8×10^{-13}		
2 h ao sol	-0,0021	2×10^{-3}	3×10^{-9}	-4×10^{-12}		
3 h ao sol	-0,0018	4×10^{-6}	$-2,4 \times 10^9$	0		
4 h ao sol	-0,0016	4×10^{-6}	6×10^{-10}	$-2,4 \times 10^{-12}$		
5 h ao sol	-0,0018	4×10^{-6}	4×10^{-6}	-3×10^{-9}	$1,6 \times 10^{-13}$	
6 h ao sol	-0,0018	4×10^{-6}	4×10^{-6}	-3×10^{-9}	0	
7 h ao sol	-0,0013	4×10^{-6}	-3×10^{-9}	-3×10^{-9}	4×10^{-13}	

Figura 6 - Comparação das taxas de secagem em função da umidade para os dados experimentais, função de suavização Savitzky- Golay e modelo de duas fases para 7 h de exposição solar do amido fermentando de mandioca (polvilho azedo).

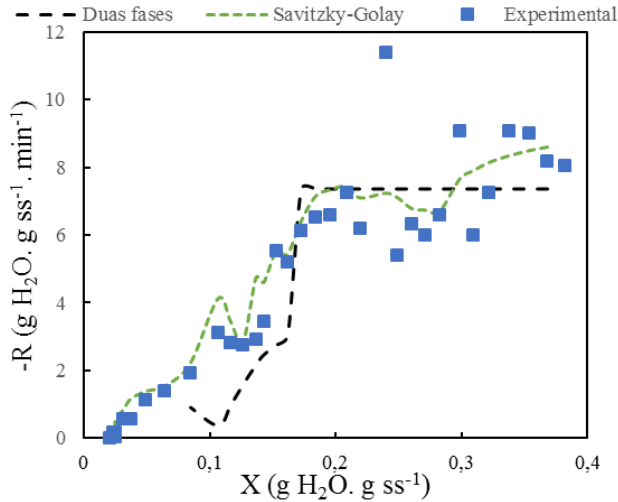
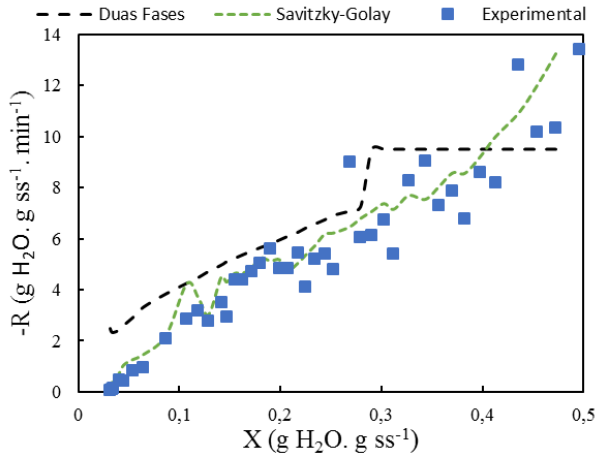


Figura 7 - Comparação das taxas de secagem em função da umidade para os dados experimentais, suavizados (Savitzky- Golay) e modelo de duas fases para 5 h de exposição solar do amido de mandioca fermentado (polvilho azedo).



Na Tabela 4 estão representados os valores dos parâmetros estatísticos obtidos para os outros sete modelos que foram ajustados aos dados experimentais de secagem, sendo eles: Lewis (1), Page (2), Henderson e Pabis (3), Wang e Singh (4), Midilli (5), Aproximação da Difusão (6) e Logarítmico (7).

Com base nos valores de coeficiente de regressão R^2 observa-se que os modelos de Lewis, Page, Henderson e Pabis, Aproximação da Difusão e Logarítmico apresentaram valores superiores a 99 %. O modelo de Midilli também apresentou R^2 maior que 99 %, com exceção da amostra exposta por 4 h ao sol, onde o valor foi de 97,12 %. Segundo Mandamba et al. (1996) valores de R^2 superiores a 98 % indicam uma representação satisfatória do fenômeno de secagem, entretanto a utilização do coeficiente de regressão como único critério de avaliação para a seleção de modelos não lineares não constitui um bom parâmetro para representação do fenômeno. Por este motivo foi realizada a análise utilizando também os valores de qui-quadrado reduzido (χ^2) e raiz quadrada média do erro (RQME).

Os maiores valores de χ^2 foram encontrados para o modelo de Wang e Singh, variando de 0,0009 a 0,0030 para este modelo. Dentre os modelos que apresentaram maior R^2 o de Lewis e Henderson e Pabis tiveram os maiores valores de RQME, o que desqualifica estes modelos como de bom ajuste com relação aos demais.

Para que um modelo seja considerado de bom ajuste precisa apresentar além de R^2 elevado, menores valores de χ^2 e RQME. Desta forma, os modelos de Page, Aproximação da Difusão e Logarítmico apresentam bons ajustes em relação aos demais modelos analisados, sendo o modelo de Wang e Singh o que obteve o ajuste qualificado como inferior. Observa-se que de um modo geral os modelos que têm uma função exponencial apresentam bom ajustes, por isto, o modelo de Wang e Singh, com função polinomial de segunda ordem não apresentou ajuste satisfatório.

Bala e Woods (1984 e 1992) também afirmaram que o modelo de Page foi o que melhor se ajustou aos dados experimentais de secagem de malte, assim como El-Aouar (2007) que utilizou o modelo de Page na estimação da difusividade efetiva na secagem de frutas afirmando que Page representou satisfatoriamente as cinéticas de secagem, e Feltre (2015) para a secagem de amido de milho.

Tabela 4 - Valores obtidos dos coeficientes de regressão (R^2), qui-quadrado reduzido (χ^2) e raiz quadrada média do erro (RQME), para os modelos Lewis (1), Page (2), Henderson e Pabis (3), Wang e Singh (4), Midilli (5), Aproximação da Difusão (6) e Logarítmico (7) durante a secagem dos diversos tempos de exposição solar do amido de mandioca fermentado (polvilho azedo).

Amostra	Modelo	R^2	χ^2	RQME	R^2	χ^2	RQME	R^2	χ^2	RQME		
1 h	1	99,33	0,0006	0,0237	99,53	0,0004	0,0208	99,29	0,0007	0,0261		
	2	99,83	0,0001	0,0119	99,81	0,0002	0,0132	99,90	0,0001	0,0096		
	3	99,72	0,0002	0,0152	99,61	0,0004	0,0188	99,56	0,0004	0,0205		
	4	96,90	0,0027	0,0510	4h	97,56	0,0024	0,0474	7h	97,70	0,0024	0,0470
	5	99,86	0,0001	0,0107		97,12	0,0030	0,0515		99,91	0,0001	0,0095
	6	99,89	0,0001	0,0097		99,86	0,0001	0,0115		99,91	0,0001	0,0091
	7	99,81	0,0002	0,0125		99,82	0,0002	0,0128		99,71	0,0003	0,0168
2 h	1	99,11	0,0008	0,0272	99,58	0,0004	0,0186					
	2	99,82	0,0002	0,0124	99,80	0,0002	0,0128					
	3	99,45	0,0005	0,0213	99,62	0,0003	0,0177					
	4	98,98	0,0009	0,0291	5h	97,79	0,0019	0,0430				
	5	99,87	0,0001	0,0106		99,90	0,0001	0,0089				
	6	99,84	0,0001	0,0117		99,86	0,0001	0,0107				
	7	99,79	0,0002	0,0134		99,86	0,0001	0,0110				
3 h	1	99,71	0,0002	0,0153	99,41	0,0005	0,0228					
	2	99,84	0,0001	0,0112	99,84	0,0002	0,0120					
	3	99,78	0,0002	0,0133	99,53	0,0004	0,0204					
	4	96,42	0,0030	0,0533	6h	98,37	0,0015	0,0381				
	5	99,87	0,0001	0,0101		99,98	0,0001	0,0097				
	6	99,83	0,0001	0,0117		99,89	0,0001	0,0100				
	7	99,87	0,0001	0,0103		99,76	0,0002	0,0145				

Para representar o ajuste do modelo de Page, Aproximação da Difusão e Logarítmico aos dados experimentais foi escolhido o amido fermentado de mandioca exposto por 1 h ao sol, como ilustra a Figura 8, e os resíduos de cada modelo (Figura 9). Para o restante das amostras o ajuste dos modelos e os respectivos resíduos serão apresentados no Apêndice H e I, respectivamente.

Figura 8 - Ajuste do modelo de Page, Aproximação da Difusão e Logarítmico aos dados experimentais de 1 h de exposição solar do amido de mandioca fermentado (polvilho azedo).

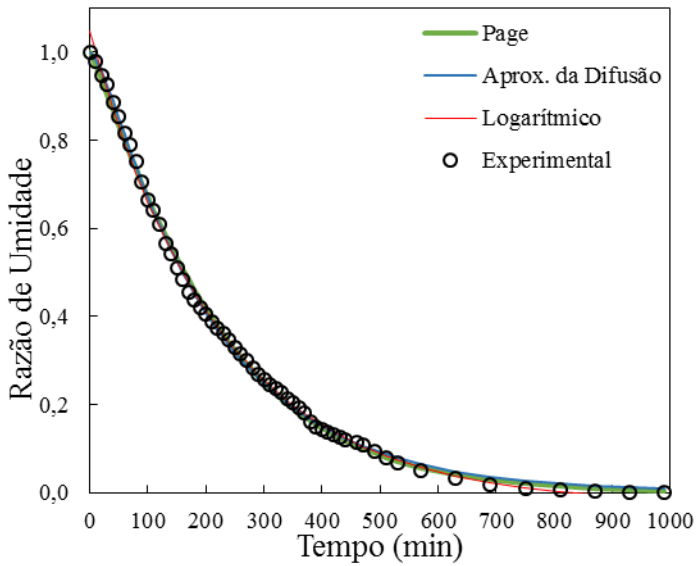
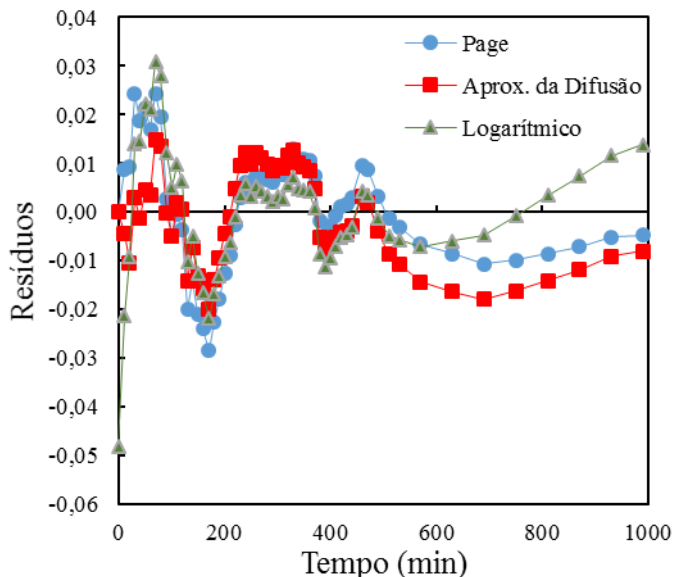


Figura 9 - Resíduos dos modelos de Page, Aproximação da Difusão e Logarítmico do ajuste dos modelos aos dados experimentais de 1 h de exposição solar do amido de mandioca fermentado (polvilho azedo).



Na Figura 9 verifica-se que os valores preditos pelos modelos se aproximam dos valores experimentais entre 220 e 490 minutos de secagem. Logo após este período voltam a se afastar, sendo que os valores do modelo de Aproximação da difusão são os que ficam mais distantes.

De acordo com Resende et al. (2010), a seleção e recomendação do melhor modelo se fundamentam na simplicidade e no número de parâmetros. Sendo assim, dentre os modelos analisados e que tiveram os melhores parâmetros estatísticos, o modelo de Page foi escolhido para representar o fenômeno de secagem, já que possui apenas dois coeficientes e equação mais simplificada perante os demais.

As Tabelas 5 e 6 ilustram os valores dos parâmetros preditos para cada modelo avaliado.

Tabela 5 - Valores estimados dos parâmetros para os modelos de Lewis, Page, Henderson e Pabis e Wang e Singh em cada experimento de secagem do amido fermentado de mandioca exposto por diferentes tempos ao sol.

Modelo	Amostra	Parâmetro		Modelo	Parâmetros	
		K			K	a
Lewis	1 h	0,0045		Henderson e Pabis	0,0048	1,0584
	2 h	0,0044			0,0047	1,0513
	3 h	0,0049			0,0050	1,0233
	4 h	0,0049			0,0050	1,0248
	5 h	0,0048			0,0049	1,0162
	6 h	0,0048			0,0050	1,0282
	7 h	0,0053			0,0056	1,0445
Page		Parâmetros		Modelo	Parâmetros	
		K	n		a	b x 10 ⁻⁶
	1 h	0,0022	1,1329	Wang e Singh	-0,0031	2,23
	2 h	0,0019	1,1586		-0,0032	2,49
	3 h	0,0034	1,0662		-0,0034	2,70
	4 h	0,0028	1,1050		-0,0035	2,90
	5 h	0,0030	1,0890		-0,0034	2,80
	6 h	0,0024	1,1300		-0,0035	3,00
7 h	0,0023	1,1655	-0,0039		3,51	

* k : constante de secagem (min^{-1}); a , b , n : constantes experimentais (adimensionais).

Tabela 6 - Valores estimados dos parâmetros para os modelos de Midilli, Aproximação da Difusão e Logarítmico em cada experimento de secagem do amido de mandioca fermentado exposto por diferentes tempos ao sol.

Modelo	Amostra	Parâmetros			
		K	a	n	b
Midilli	1 h	0,0030	1,0268	1,0746	$-1,18 \times 10^{-3}$
	2 h	0,0021	0,9997	1,1276	$-3,23 \times 10^{-5}$
	3 h	0,0040	1,0051	1,0355	$-2,31 \times 10^{-5}$
	4 h	-0,0011	0,8967	1,0523	-0,0038
	5 h	0,0026	0,9786	1,1046	$-2,72 \times 10^{-5}$
	6 h	0,0021	0,9809	1,1535	$-1,63 \times 10^{-5}$
	7 h	0,0022	0,9950	1,1720	$-3,33 \times 10^{-6}$
Aprox. da Difusão		Parâmetros			
		K	a	b	
	1 h	0,0442	-0,1059	0,1126	
	2 h	0,0075	-6,2302	0,9210	
	3 h	0,0284	-0,0616	0,1837	
	4 h	0,0077	-16,4107	0,9731	
	5 h	0,0073	-10,6100	0,9621	
6 h	0,0079	-11,9949	0,9599		
7 h	0,0133	-0,6028	0,5462		
Logarítmico		Parâmetros			
		K	a	c	
	1 h	0,0045	1,0749	-0,0268	
	2 h	0,0041	1,0948	-0,0628	
	3 h	0,0047	1,0412	-0,0276	
	4 h	0,0046	1,0548	-0,0417	
	5 h	0,0044	1,0497	-0,0464	
6 h	0,0045	1,0635	-0,0480		
7 h	0,0052	1,0697	-0,0350		

*k: constante de secagem (min^{-1}); a, b, c, n: constantes experimentais (adimensionais).

Embora Karathanos e Belessiotis (1999) tenham afirmado que o parâmetro K é um indicativo do comportamento da taxa de secagem, relacionado à transferência de umidade do material para o ar de secagem, este parâmetro não apresentou relação com os tempos de exposição solar do amido de mandioca do cultivar Moura fermentado. Para o modelo Logarítmico e de Page mantiveram-se próximos, variando de 0,0041 a 0,0052 e 0,0019 a 0,0034, respectivamente.

Apesar de empírico, o parâmetro n do modelo de Page tem sido relacionado com as condições de secagem como temperatura do ar, teor de umidade inicial e velocidade (AZZOUZ et al., 2002). Entretanto, neste trabalho não foi observada relação entre o parâmetro n e o teor de umidade inicial (diferentes tempos de exposição solar), sendo os valores deste parâmetro bastante homogêneos, variando de 1,0662 a 1,1655.

O polvilho azedo por ser um amido fermentado modificado por oxidação, possui uma matriz complexa que ainda não está totalmente elucidada. Ele possui condutividade térmica, e características diferentes de outras matrizes quanto as propriedades que podem influenciar no fenômeno de transferência de massa e calor durante a secagem deste produto, sendo que até o presente momento não há trabalhos desta natureza com o polvilho azedo.

4 CONCLUSÃO

A exposição solar com secagem continuada em estufa convectiva reduz o tempo total de secagem, podendo trazer contribuições a esta parte do processo produtivo do polvilho azedo, embora outros fatores de caracterização deste produto devam ser levados em consideração para a determinação do tempo correto que amido necessita de exposição solar.

As amostras expostas por 1, 2 e 3 h ao sol apresentaram um período de adaptação do material com a temperatura do ar de secagem, enquanto que somente as amostras expostas por 1 h e 7 h ao sol apresentaram período de taxa de secagem constante seguido de taxa decrescente. O restante das amostras apresentou somente período de taxa decrescente. De um modo geral é possível afirmar que a secagem ocorreu em período decrescente, onde a taxa de evaporação da umidade superficial é superior a taxa de umidade de migração do interior do alimento para a superfície.

Embora os modelos de Page, Aproximação da Difusão e Logarítmico tenham apresentado bom ajuste aos dados experimentais,

apenas o modelo de Page foi sugerido para representar o processo de secagem do amido de mandioca Moura fermentado, já que dentre os modelos testados, o modelo de Page é o que possui equação mais simples, com menor número de parâmetros.

REFERÊNCIAS

AKPINAR, E.K. Drying of parsley leaves in a solar dryer and under open sun: modeling, energy and exergy aspects. **Journal of Food Process Engineering**, v. 34, n. 1, p. 27-48, 2011.

AQUINO, A. C. M. S.; GERVIN, V. M.; AMANTE, E. R. Avaliação do processo produtivo de polvilho azedo em indústrias de Santa Catarina. **Brazilian Journal of Food Technology**, v. 19, n. 23, p 1-8, 2016.

AVIARA, N. A.; ONUOHA, L. N.; FALOLA, O. E.; IGBEKA, J. C. Energy and exergy analyses of native cassava starch drying in a tray dryer. **Energy**, v.73, n. 1, p. 809-817, 2014.

AZZOUZ, S.; GUZANI, A.; JOMAA, W, BELGHITH, A. Moisture diffusivity and drying Kinect equation of convective drying of grapes. **Journal of Food Engineering**, v. 55, n. 4, p. 323-330, 2002.

BABALIS, S. J.; BELESSIOTIS, V. G. Influence of the drying conditions on the drying constants and moisture diffusivity during the thin-layer drying of figs. **Journal of Food Engineering**, v. 65, n. 1, p. 449-448, 2004.

BALA, B. K.; WOODS, J. L. Simulation of deep bed malt drying. **Journal Agricultural Engineering Research**. v.30, p.235-244, 1984.

BALA, B. K.; WOODS, J. L. Thin layer drying models for malt. **Journal of Food Engineering**. v. 16, n. 1, p. 239-249, 1992

BASUNIA, M. A.; ABE, T. Moisture desorption isotherms of medium grain rough rice. **Journal of Stored Products Research**, v. 37, p. 205-219, 2001.

CASTIGLIONI, G. L.; SILVA, F. A.; CALIARI, M.; SOARES JÚNIOR; M. S. Modelagem matemática do processo de secagem da

massa fibrosa de mandioca. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 17, n. 9, p. 987-994, 2013.

CEREDA, M. P. **Alguns aspectos sobre a fermentação da fécula de mandioca**. 1973. 89 f. Tese (Doutorado em Ciências) - Faculdade de Ciências Médicas e Biológicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 1973.

CEREDA, M. P.; NUNES, O. L. G. da S.; VILPOUX, O. Tecnologia da produção de polvilho azedo. Relatório técnico-científico. Centro de Raízes Tropicais. Botucatu, São Paulo, 1995.

CHEN, C.; WU, P. C. Thin-layer drying model for rough rice with high moisture content. **Journal of Agriculture Engineering Research**, v. 80, p. 45-52, 2001.

CHRISTENSEN, C. M.; KAUFMANN, H. H. Microflora. In: CHRISTENSEN, C. M. **Storage of cereal grain and their products**. St. Paul, MN: American Association of Cereals Chemists, 1974. p. 158-192.

CIHAN, A.; KAHVECI, K.; HACIHAFIZOGLU, O. Modelling of intermittent drying of thin layer rough rice. **Journal of Food Engineering**, v.79, p.293-298, 2007.

DINIZ, I. P. **Caracterização tecnológica do polvilho azedo produzido em diferentes regiões do estado de Minas Gerais**. Dissertação (Magister Scientiae em Ciência e Tecnologia de Alimentos)- Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2006, 101f.

DUFOUR, D.; LARSONNEUER, S.; ALARCON, F.; BARBET, C.; CHUZEL, G. **Improving the bread-making potencial of cassava sour starch**. In: DUFOUR, D.; O'BRIEN, G. M.; BEST, R. Cassava flour and starch: progress in research and development. Cali: CIRAD/CIAT, 1996. p. 133-142.

FAMUREWA, J. A. V.; EMUEKELE, P. O. Modelling of drying pattern of cassava chips at different air velocity and temperature using fluidized bed dryer. **International Scholars Journals**, v. 5, n. 3, p. 461-471, 2015.

FELTRE, G. **Estudo das alterações na microestrutura de partículas de amido de milho em processos de granulação**. 2015. 139 f.

Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência de Materiais).

Universidade de São Paulo, Pirassununga, 2015.

GERALDI, C. A. Q. **Estudo da secagem de fécula de mandioca em secador pneumático - flash dryer**. 2006. 161 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química). Universidade Estadual de Maringá-UNIOESTE, Maringá, 2006.

HASSINI, L.; AZZOUZ, S.; PECZALSKI, R.; BELGHITH, A. Estimation of potato moisture diffusivity from convective drying kinetics with correction for shrinkage. **Journal of Food Engineering**, v. 79, n.1, p. 47-56, 2007.

KARATHANOS, V. T.; BELESSIOTIS, V. G., Application of a thin layer equation to fruits. **Journal of Agricultural Engineering Research**, v. 74, n. 4, p. 355-361, 1999.

KERR, W. L. Food Drying and Evaporation Processing Operations Handbook of Farm. **Dairy, and Food Machinery**, p. 303-340, 2007.

LAHSASNI, S.; KOUHILA, M.; MAHROUZ, M.; JAOUHARI, J. T. Drying kinetics of prickly pear fruit (*Opuntia ficus indica*). **Journal of Food Engineering**, v.61, p.173-9, 2004.

MADAMBA, P. S.; DRISCOLI, R. H.; BUCKLE, K. A. The Thin-layer drying characteristics of garlic slices. **Journal of Food Engineering**, v. 29, n. 1, p. 75-97, 1996.

MARTINAZZO, A. P.; CORRÊA, P. C.; RESENDE, O.; MELO, E. C. Análise e descrição matemática da cinética de secagem de folhas de capim-limão. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.11, p.301-306, 2007b.

MOHAPATRA, D.; RAO, P. S. A thin layer drying model of parboiled wheat. **Journal of Food Engineering**, v.66, p. 513-518, 2005.

MORAES, J. O. **Produção e caracterização de filmes de amido-glicerol-fibras de celulose elaborados por Tape-Casting**. 2013.176p. Tese (Doutorado em Engenharia de Alimentos) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2013.

MORAES, J. O.; SCHEIBE, A. S.; AUGUSTO, B.; CARCIOFI, M.; LAURINDO, J. B.
Conductive drying of starch-fiber films prepared by tape casting: Drying rates and film properties. **LTW-Food Science and Technology**, v. 64, n. 1, p.356- 366, 2015.

NEUBERT, E. O. Santa Catarina: o berço da industrialização da mandioca. **Revista Agropecuária Catarinense**, v. 26, n. 1, p. 14-16, 2013.

PLATA-OLVIDO, M. S. V. **Secagem do amido fermentado de mandioca: modificação química relacionada com a propriedade de expansão e características físico-químicas**. Campinas, 1998. 114 p. Tese (Doutor em Tecnologia de Alimentos) - Faculdade de Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual de Campinas.

RESENDE, O.; FERREIRA, L. U.; ALMEIDA, D. P. Modelagem matemática para descrição da cinética de secagem do feijão adzuki (*Vigna angularis*). **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, v. 12, n. 2, p. 171-178, 2010.

RUHANIAN, S.; MOVAGHARNEJAD, K. Mathematical modeling and experimental analyses of potato thin-layer drying in an infrared-convective dryer. **Engineering in Agriculture, Environment and Food**, v. 9, n. 1, p. 84-91, 2016.

SHEI, H. J.; CHEN, Y. L. Thin layer models for intermittent drying of rough rice. **Journal of Food Engineering**, v.76, p.577-581, 1999.

SOUZA, P. G. **Produção e caracterização de açaí (*Euterpe oleracea* Mart.) desidratado em pó por cast- tape drying**. 2015. 143 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Alimentos), Universidade Federal de Santa Catarina- UFSC, Florianópolis, 2015.

VILHALVA, D. A. A.; SOARES JÚNIOR, M. S.; CALIARI, M. SILVA, F. A. Secagem convencional de casca de mandioca proveniente de resíduos de indústria de amido. **Revista Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 42, n. 3, p. 331-339, 2012.

YADOLLAHINIA A.; JAHANGIRI M. Shrinkage of potato slice during drying. **Journal of Food Engineering**, v. 94, n. 1, p. 52-58, 2009.

WESTBY, A.; CEREDA, M. P. Production of fermented cassava starch (polvilho azedo) in Brazil. **Tropical Science**, v. 34, n. 2, p. 203-210; 1994

CAPÍTULO 5

EFEITO DO REVOLVIMENTO DURANTE A SECAGEM AO SOL SOBRE AS CARACTERÍSTICAS DO AMIDO DE MANDIOCA FERMENTADO

1 INTRODUÇÃO

A raiz de mandioca é uma das mais tradicionais culturas agrícolas brasileiras, sendo cultivada em praticamente todo o território nacional, e a partir da mandioca muito produtos podem ser produzidos, entre eles o polvilho azedo. O polvilho azedo é obtido da fermentação natural do amido de mandioca em tanques por vários dias, seguido de secagem com exposição ao sol (CEREDA; VILPOUX, 2003). Conforme comprovado em diversos estudos a etapa de secagem ao sol é a responsável pela principal propriedade tecnológica do polvilho azedo, que é a expansão ao forneamento sem a adição de fermento (CEREDA; NUNES, 1989; PLATA- OVIEDO, 1998; MAEDA; CEREDA, 2001).

Comparativamente ao amido nativo, o amido fermentado é mais solúvel quando intumescido em água e a pasta formada é menos viscosa. Cárdenas e Buckle (1980) afirmaram que certas características, como sabor, textura e expansão dos produtos panificados não são obtidos sem a fermentação. Demiate et al. (1997) relataram que as características do polvilho azedo que diferem do amido nativo são pH e acidez, a solubilidade a frio e a quente, e o volume específico ou grau de expansão quando utilizado na produção de biscoitos. Carvalho et al. (1996) afirmaram que o baixo valor de pH encontrado no polvilho azedo é resultado de uma atividade microbiana intensa durante a fermentação pelas bactérias ácido-láticas, próprias deste tipo de processo.

Para a obtenção das propriedades funcionais do polvilho azedo além da fermentação é necessário a exposição a luz ultravioleta (secagem solar ou com luz UV). Mestres e Rouau (1997) explicaram que durante a secagem ao sol ocorre a despolimerização da amilose e da amilopectina com pequena redução do teor de ácido lático associado ao tratamento fotoquímico, que estão relacionados com a propriedade de expansão do polvilho azedo.

Embora o consumo do polvilho azedo venha ganhando destaque no mercado por ser isento de glúten, este setor produtivo enfrenta a ameaça de ser substituído por amidos modificados por ácido, sem fermentação, que apesar de apresentarem expansão não possuem as características sensoriais e reológicas do tradicional polvilho azedo (AQUINO et al., 2016).

Não há estudos na literatura até o presente momento, sobre o efeito do revolvimento do amido fermentado de mandioca durante a secagem solar nas características do produto, assim como são escassos trabalhos sobre as características dos produtos fermentados de cultivares

específicos, como o Moura. Nas polvilharias o amido que é colocado para fermentar é uma mistura de diferentes cultivares, não havendo uma seleção de qual cultivar poderia fornecer um produto de melhor qualidade ou rendimento após fermentação, o que implica também em qualidade variável do produto final, dentro de uma mesma região, inclusive para o mesmo produtor (DINIZ, 2006).

Todos os parâmetros de produção do polvilho azedo são empíricos, tais como o tempo final da fermentação e do processo de secagem. Portanto, o processo não é rigorosamente controlado, resultando em ausência de padronização nos produtos obtidos. Neste setor ainda não é também estabelecida uma relação entre o tempo e condições de processamento com a qualidade do produto obtido (MCMINN; MAGEE, 1997).

Diante desta realidade este trabalho, no sentido de apoiar o setor produtivo de polvilho azedo, tem como objetivo verificar a influência do revolvimento e do tempo de exposição solar sobre as características físico-químicas e reológicas do amido de mandioca do cultivar Moura fermentado.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Material

A amostra de amido de mandioca fermentado do cultivar Moura foi fornecida pela polvilharia Felipe, localizada na região de Azambuja - Pedras Grandes (SC) (latitude 28° 26' 09" S longitude 49° 11' 06" W).

O amido foi colocado para fermentar em 11 de junho de 2015 em um tanque de polietileno coberto. A coleta foi realizada em 29 de outubro de 2015 juntamente a água sobrenadante da fermentação para utilização na ressuspensão. Uma lâmina de 20 cm desta água foi deixada sobre o amido, nos tanques de polipropileno de 38 L de capacidade (35,1 x 29,3 x 53,0), em laboratório, até que o experimento de secagem fosse realizado, o que ocorreu em 14 de novembro de 2015.

Usualmente nas polvilharias, o polvilho azedo é obtido pela mistura de diferentes cultivares de mandioca fermentados dentro de um mesmo tanque. Assim, para efeito de comparação com o amido de mandioca fermentado do cultivar Moura, e o que é feito nas polvilharias, uma outra amostra de um tanque de fermentação com amido de diferentes cultivares de mandioca, desta mesma polvilharia foi coletada. Estes amidos estavam fermentando desde 20 de julho de 2015 e a coleta

e a secagem realizada na mesma data que o amido da mandioca do cultivar Moura.

Os amidos de mandioca utilizados para fermentação foram extraídos na própria polvilharia e ainda úmidos levados para os tanques de fermentação. A temperatura mínima e máxima na região de Pedras Grandes, nos meses em que se deu a fermentação do amido, com base na média de dados de 30 anos, foi de 13 e 23 °C (CLIMATEMPO, 2016)

Para a retirada de porções da amostra para os experimentos de secagem, a água sobrenadante era removida e após a retirada da amostra, era devolvida ao tanque, perfazendo a camada sobrenadante para a fermentação.

2.2 Método

2.2.1 Exposição solar e secagem em estufa convectiva

Para as secagens convectivas foi utilizada uma estufa convectiva de circulação/renovação de ar (marca Tecnal, modelo TE-394/2), mantendo a renovação de ar constante.

Em cada experimento as amostras de amido fermentado foram espalhadas em formas de alumínio revestidas com papel celofane. As amostras foram colocadas sobre o celofane de modo a preencher todo o fundo da forma em uma espessura de camada de amido de 0,5 cm, e para uma segunda parte dos experimentos as mesmas amostras foram colocadas em outras formas também com papel celofane, em camadas de mesma espessura sendo revolvidas. Foi preparado o número de formas suficiente para cumprir o planejamento de coleta em todas as etapas da secagem nas diferentes condições testadas.

As avaliações foram realizadas em dias completamente limpos e ensolarados (temperatura média ambiente= 26, 33 °C, UV= 12) durante a primavera, mesmo período em que o maior volume do polvilho azedo é tradicionalmente seco pelos produtores, já que a safra da mandioca finda em julho e o produto é predominantemente seco entre o inverno e a primavera. As amostras foram colocadas à exposição solar (das 9 às 16 h) por 7 horas, sendo que a cada hora uma amostra compactada e uma amostra de amido revolvido eram retirados do sol, e o restante da secagem finalizada em estufa de circulação e renovação de ar, previamente regulada a $55 \pm 1,0$ °C. Para as amostras com revolvimento, a cada hora as que estavam ao sol eram revolvidas. Uma

outra amostra de amido do cultivar Moura (Sol Moura) e da mistura de cultivares de mandioca (Sol Mix) também foram secas totalmente ao sol pelo método tradicional utilizado nas polvilharias, com revolvimento e o final da secagem determinado pelo mesmo método adotado pelos produtores de polvilho azedo, onde a massa é pressionada nas mãos até que não se perceba mais a formação de aglomerados.

2.2.2 Propriedade de expansão

Foram elaborados biscoitos segundo o método descrito por Nunes e Cereda (1994), no qual 50 g de polvilho foram misturados com 40 mL de água fervente. A massa obtida foi modelada na forma de biscoitos redondos de aproximadamente 10 g cada. Os biscoitos foram levados ao forno termostatizado a 200 °C por 25 minutos. Após assados e resfriados, os biscoitos foram pesados e avaliados pelo método de deslocamento de sementes de painço em copo Becker, sendo o volume das sementes deslocadas medidas em proveta. O volume específico foi calculado pela razão do volume das sementes deslocadas e a massa dos biscoitos após o forneamento (PIZZINATTO; CAMPAGNOLLI, 1993).

A perda de massa foi calculada com base na diferença de massa do biscoito antes e após o forneamento, e o resultado expresso em %.

O resultado da razão entre a massa dos biscoitos após o forneamento e o valor do deslocamento das sementes foi expresso em densidade específica (g.mL^{-1}).

O índice de expansão foi avaliado pelo método proposto por Maeda e Cereda (2001) no qual o diâmetro médio dos biscoitos foi medido com paquímetro digital (marca Lee Tools, China) antes e após o forneamento.

2.2.3 Acidez titulável e pH

A determinação do pH e da acidez titulável foi realizada conforme método proposto por Plata-Oviedo (1998). Foram pesadas 10 g de amostra (b. s.) e dispersas em 100 mL de água deionizada. A dispersão de amido foi agitada magneticamente por 10 min. Após este período, a agitação foi interrompida e imediatamente o pH medido em potenciômetro (Marca Quimis Modelo Q-400A) calibrado. A seguir, sob agitação magnética, seguiu-se com a titulação da dispersão de amido com NaOH 1 mol L^{-1} até atingir valor de pH 8,2- 8,5, utilizando-se

fenolftaleína como indicador. A acidez foi expressa em mililitros de base por 100 g (b.s.) de amostra.

2.2.4 Determinação de ácidos orgânicos por CLAE

Para análise das amostras de polvilho azedo, estas foram preparadas de acordo com Demiate et al. (1999), sendo que 15 g de amostra foram suspensas em 30 mL de solução de ácido sulfúrico 0,005 mol.L⁻¹ por um período de 24 horas em temperatura ambiente com agitação ocasional. Essas suspensões foram centrifugadas a 956 x g por 10 minutos e a 3823 x g por 20 minutos e, em seguida, filtradas em membrana de politetrafluoretileno (PTFE) de 0,22 µm (Allcrom, São Paulo, Brasil) para posterior injeção no cromatógrafo líquido de alta eficiência.

Os ácidos láctico, acético, propiônico e butírico foram determinados conforme método descrito por Aquino et al. (2015). O sistema de cromatografia líquida consistiu em um módulo de separação, equipado com uma bomba quaternária e um degaseificador (LC-20AT), um injetor automático (SIL-10A) com um loop de 20 µL, um detector de arranjo de diodos (SPD-M20A) com faixa de trabalho de comprimento de onda 190- 230 nm, controlados por uma estação de trabalho (CBM-20A), com sistema de aquisição de dados LC Solutions software, todos fabricados pela Shimadzu Corporation (Quioto, Japão). Para fase estacionária foi utilizada uma coluna C18, Hichrom (150 x 4,6 mm, 5µm - Berkshire, UK), sendo o fluxo isocrático de 0,6 mL min⁻¹ para as fases móveis.

As fases móveis utilizadas foram constituídas por solução de fosfato de potássio monobásico - KH₂PO₄ (Proquimios, Rio de Janeiro, Brasil) 0,02 mol.L⁻¹ com pH 2,88 ± 0,02 ajustado com ácido fosfórico (Nuclear, São Paulo, Brasil) e 2 % de metanol para os ácidos láctico, acético e propiônico (ZOTOU; LOUKOU; KARAVA, 2004), e por solução de KH₂PO₄ 0,02 mol.L⁻¹ com pH 2,88 ± 0,02 (ajustado com ácido fosfórico) e 40 % de metanol para o ácido butírico.

A fase móvel com 2 % de metanol foi filtrada em membrana de acetato de celulose de 0,45 µm da Advantec MFS (Tóquio, Japão), e a com 40 % de metanol em membrana em politetrafluoretileno (PTFE) de 0,45µm da Allcrom (São Paulo, Brasil), ambas foram degaseificadas por 20 minutos em um banho ultrassom (Unique, Maxi Clean 1650A, Indaiatuba, São Paulo, Brasil).

Os ácidos foram identificados nas amostras com base nos seus tempos de retenção e pela comparação entre os espectros, na região do ultravioleta, dos compostos nas soluções padrões e dos picos detectados nas amostras. Para a quantificação foi selecionado o comprimento de onda de 220 nm.

2.2.5 Propriedades da pasta

As propriedades de pasta foram determinadas utilizando o analisador rápido de viscosidade (RVA-*Rapid Visco Analyser* 4000 - Perten Instruments), através do software *Thermocline for Windows*. Foram utilizadas 2,5 g de amostra suspensas em 25 g de água, com correção para 14 % de umidade, o que corresponde a 2,5 % m/v (base peso seco). A programação utilizada foi um tempo total de corrida de 13 minutos, iniciando com temperatura de 50 °C mantida por 1 minuto, aquecimento até 95 °C por 6 minutos, seguido de resfriamento até 50 °C por 6 minutos. A rotação iniciou em 960 rpm por 10 segundos e diminuiu para 160 rpm no decorrer da análise. Dos amilogramas obtidos foram avaliadas as seguintes características: temperatura inicial de pasta viscosidade máxima, temperatura no pico de viscosidade máxima, viscosidade mínima, viscosidade final no ciclo de resfriamento e tendência à retrogradação.

2.2.7 Análise estatística

Todas as análises foram conduzidas em triplicata e os dados expressos como média \pm desvio padrão (DP). Os dados foram submetidos à análise de variância (ANOVA), ao nível de 5 % de significância, seguido pelo teste de Tukey, para comparação das médias.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Propriedade de expansão

Os biscoitos produzidos com amido de mandioca Moura fermentado exposto por diferentes tempos ao sol com secagem continuada em estufa a 55 °C, seco totalmente ao sol e do amido de diferentes cultivares fermentado e seco totalmente ao sol (Sol Mix) são ilustrados na Figura 1. Os biscoitos foram avaliados quanto a perda de massa, índice de expansão, volume específico e densidade específica,

cujos resultados estão ilustrados na Figura 2. Os resultados estatísticos de diferença entre as médias para os valores apresentados para estes parâmetros encontram-se no Apêndice J.

Conforme os biscoitos obtidos (Figura 1) e os resultados de propriedades de expansão, observa-se que o revolvimento afeta a expansão, apresentado diferenças estatísticas significativas ao nível de 5 % de significância entre as amostras que foram revolvidas e as amostras que não foram revolvidas durante a exposição solar. O desempenho quanto à expansão dos amidos revolvidos foi melhor do que os que ficaram sem o revolvimento. Este resultado pode ser explicado pelo fato de o revolvimento aumentar a superfície de contato do amido com a radiação UV do sol, o que conseqüentemente pode aumentar o número de moléculas despolimerizadas, enquanto que nas amostras sem o revolvimento somente os grânulos de amidos da superfície tem maior chance de participarem das reações fotoquímicas com os ácidos orgânicos e a radiação UV do sol.

Segundo Vatanasuchart et al. (2005), a despolimerização parcial do amido fermentado e seco ao sol (polvilho azedo), durante a fermentação e secagem ao sol fornece pequenos fragmentos lineares o que facilita o desenvolvimento de uma estrutura de matriz amorfa de massa de amido, reduzindo a viscosidade da massa durante a expansão e auxiliando na expansão do biscoito.

Não ocorrem diferenças significativas ($p \geq 0,05$) em todos os parâmetros de propriedades de expansão avaliados entre o amido de mandioca do cultivar Moura e o a mistura de cultivares fermentado (Sol Mix).

Com base na imagem dos biscoitos e pelos resultados de índice de expansão, volume específico e densidade específica o pior desempenho quanto a expansão foi obtido para a amostra seca totalmente em estufa, o que comprova que a radiação UV é de fundamental importância para o polvilho azedo. Estes resultados concordam com Bertolini et al. (2001) e Diniz (2006) que reportaram que as radiações ultravioletas decorrentes da secagem solar têm importante função nas propriedades de expansão do polvilho azedo.

Figura 1 – Biscoitos produzidos com polvilho azedo submetido a diferentes tempos de secagem solar e em estufa convectiva a 55 °C.

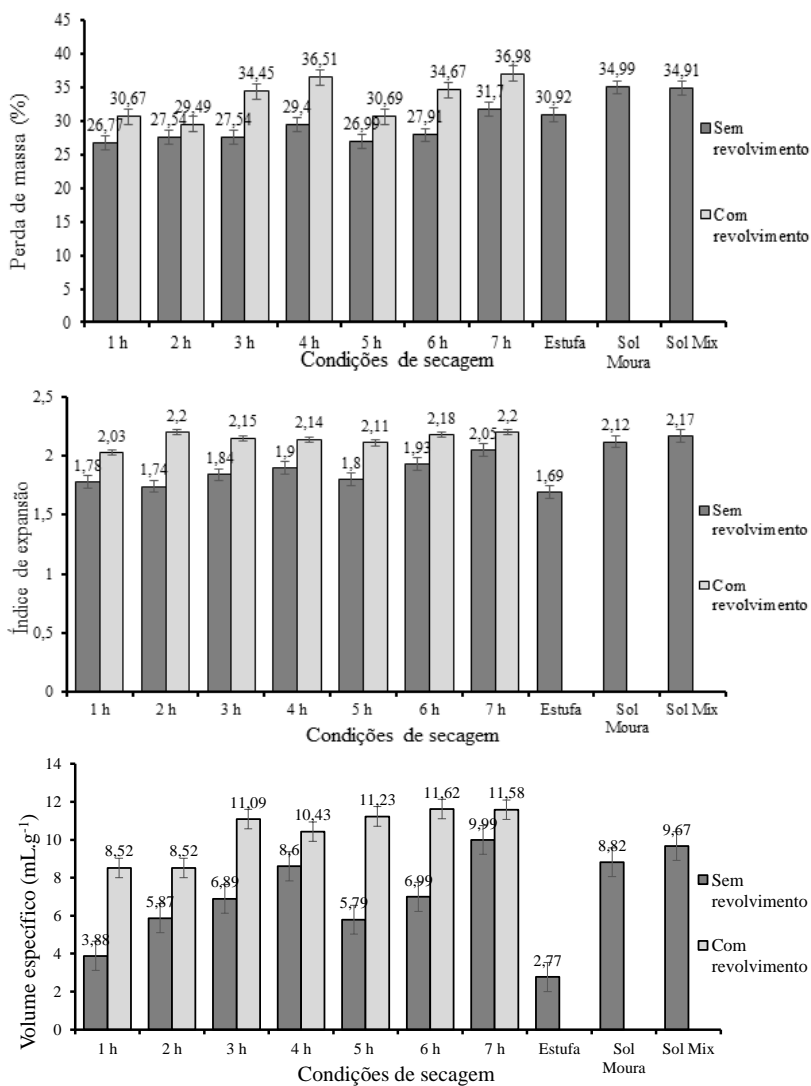


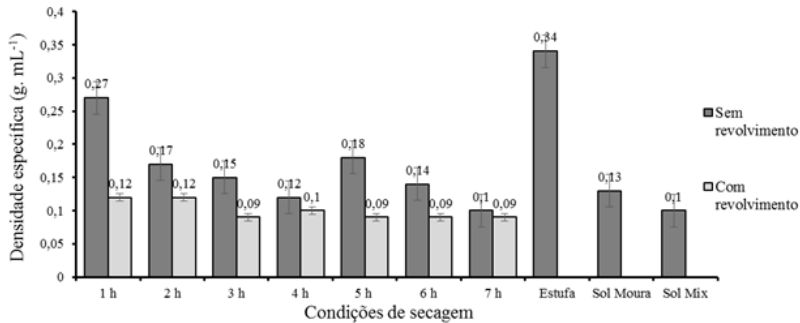
Sol Moura: amido de mandioca do cultivar moura fermentado. Secagem totalmente ao sol com revolvimento

Sol Mix: amido de uma mistura de diferentes cultivares de mandioca fermentado. Secagem totalmente ao sol com revolvimento

Fonte: Acervo do autor.

Figura 2 - Efeito da secagem solar do polvilho azedo sobre as propriedades de expansão dos biscoitos.





Os valores de perda de massa variaram de 26,77 a 31,99 % para os amidos que não foram revolvidos e de 29,49 a 36,98 % para os que tiveram revolvimento durante a secagem solar. Segundo classificação proposta por Marcon et al. (2011), como a perda de massa foi inferior a 40 %, a expansão dos biscoitos foi de baixa performance.

Para a perda de massa, a partir da primeira hora de exposição solar já não há mais diferenças significativas ($p \geq 0,05$) entre a amostra que foi seca totalmente ao sol e as que tiveram revolvimento, enquanto que para as que não foram revolvidas somente a exposição por 7 h ao sol não revelou diferença significativa com a seca totalmente ao sol pelo método tradicional.

A partir da primeira hora de exposição solar já não se observam mais diferenças significativas ($p \geq 0,05$) entre o amido revolvido e o seco tradicionalmente ao sol para o índice de expansão. Já para as amostras que não foram revolvidas, não ocorre mais diferença significativa somente a partir de 6 h ao sol.

O índice de expansão variou de 1,69 a 2,20 para o amido fermentado seco nas diferentes condições experimentais, valores estes que concordam com o obtido por Pereira et al. (1999) que encontraram índice de expansão de 1,99 para o polvilho azedo comercial.

Os resultados de volume específico foram maiores para as amostras com revolvimento comparativamente com as que não foram revolvidas. Diferença estatística foi encontrada somente para o amido seco totalmente em estufa comparativamente aos demais com revolvimento, o que demonstra o menor desempenho deste tipo de secagem em relação a solar. Embora numericamente valores maiores deste parâmetro tenham sido encontrados para as amostras secas por 3, 4 e 5 h ao sol comparativamente a seca pelo método tradicional, não há diferença significativa entre as médias ($p \leq 0,05$). Entretanto, observa-se

que as expostas por 6 e 7 h ao sol com revolvimento superam o valor de volume específico da amostra de amido de mandioca cultivar moura seca pelo método tradicional.

Estudando o efeito do tempo de exposição solar sobre o volume específico dos biscoitos, Plata-Oviedo (1998), realizando o revolvimento do amido fermentado durante a secagem, afirmou que havia necessidade de exposição solar por no mínimo 2 h, sendo que os valores máximos para este parâmetro foram encontrados a partir de 4 h ao sol. Pola-Júnior (2013) também revolvendo o amido durante a secagem verificou que 4 h de exposição solar seriam suficientes para obter um volume específico satisfatório em relação a amostra seca totalmente ao sol.

No presente trabalho verifica-se que, com o revolvimento do amido fermentado durante a secagem solar, já a partir da primeira hora ao sol produziu biscoitos que apresentam volume específico sem diferença significativa comparativamente aos biscoitos do polvilho seco totalmente ao sol (Sol Moura). Enquanto que sem a utilização do revolvimento valores sem diferença significativa de volume específico com os biscoitos do amido fermentado seco totalmente ao sol (Sol Moura) foram encontrados somente a partir de 3 h de exposição solar ($p \leq 0,05$).

Os volumes específicos dos biscoitos obtidos com o amido fermentado nas diferentes condições de secagem testadas variaram de 2,77 a 11, 62 mL g⁻¹. Machado et al. (2012) encontraram volume específico para o amido de mandioca fermentado seco ao sol de 4,77 mL g⁻¹. Valor próximo ao encontrado por estes autores foi obtido neste trabalho somente para a amostra seca por 1 h ao sol sem revolvimento.

Aquino et al. (2016) analisando o volume específico de biscoitos confeccionados com o amido fermentado proveniente de diversas indústrias de polvilho de Santa Catarina, com diferentes tempos de fermentação, encontraram valores variando de 6,45 a 10, 93 mL g⁻¹, valores que ficam mais próximos do obtido para a maioria dos biscoitos analisados neste estudo.

Maiores valores de expansão são apresentados por biscoitos com menor densidade (ASCHERI; VILELA, 1995), desta forma os maiores resultados de volume específicos encontrados para os amidos expostos por 3, 5, 6 e 7 h ao sol com revolvimento, apresentaram o menor valor de densidade específica (0,09 g mL⁻¹), enquanto que o menor volume específico que foi obtido para a amostra seca totalmente em estufa mostrou a maior densidade específica (0,34 g mL⁻¹)

Conforme classificação estabelecida por Nunes e Cereda (1994) para classificar a expansão do polvilho azedo, os que tiveram revolvimento e exposição solar de 3 a 7 h podem ser considerados de grande expansão ($> 10 \text{ mL g}^{-1}$), os de pequena expansão ($< 5 \text{ mL g}^{-1}$) foram os secos totalmente em estufa e exposto por 1 h ao sol sem revolvimento. Todos os demais apresentam média expansão (5 a 10 mL g^{-1}).

3.2 pH e acidez titulável

Os resultados de pH e acidez titulável no amido de mandioca fermentado e seco nas diferentes condições experimentais encontram-se na Tabela 1.

Baixos valores de pH e elevados valores de acidez titulável são característicos de amido de mandioca fermentado (ASCHERI; VILELA, 1995; PLATA OVIEDO; CAMARGO, 1998; SILVEIRA et al., 2000; MARCON et al. 2006; 2007).

Os valores obtidos de pH caracterizam este produto, variando de 3,70 a 4,17. Pereira et al. (2016) analisando a água de fermentação proveniente de diferentes polvilharias de Santa Catarina encontraram valores de acidez variando de 3,40 a 3,61, enquanto que Aquino et al. (2016) verificaram valores de pH entre 3,11 e 4,82 para o polvilho azedo de diferentes indústrias deste mesmo estado, valores estes que concordam com os encontrados neste trabalho.

Tabela 1 - pH e acidez titulável do amido de mandioca fermentado seco nas diferentes condições de secagem.

Amostras	Sem revolver		Revolvendo	
	pH	Acidez (mL de NaOH 0,1 mol L ⁻¹ 100 g ⁻¹)	pH	Acidez (mL de NaOH 0,1 mol L ⁻¹ 100 g ⁻¹)
1 h ao Sol	3,70 ^{aa} ±0,01	6,00 ^{ca} ±0,14	3,80 ^{bcB} ±0,02	6,72 ^{gB} ±0,06
2 h ao Sol	3,78 ^{da} ±0,01	6,82 ^{efB} ±0,36	3,82 ^{cdB} ±0,01	5,90 ^{fa} ±0,06
3 h ao Sol	3,75 ^{bcdA} ±0,01	6,41 ^{dB} ±0,36	3,81 ^{bcdB} ±0,01	5,78 ^{efA} ±0,07
4 h ao Sol	3,77 ^{cdA} ±0,01	5,78 ^{cb} ±0,02	3,81 ^{bcB} ±0,07	5,58 ^{deA} ±0,06
5 h ao Sol	3,78 ^{da} ±0,01	7,05 ^{fb} ±0,14	3,88 ^{dB} ±0,01	5,01 ^{ca} ±0,06
6 h ao Sol	3,84 ^{eb} ±0,01	6,68 ^{eb} ±0,10	3,77 ^{abcA} ±0,02	4,36 ^{ba} ±0,01
7 h ao Sol	3,72 ^{abA} ±0,01	6,69 ^{eb} ±0,09	3,79 ^{bcB} ±0,01	4,45 ^{ba} ±0,13
Estufa	3,71 ^a ±0,01	7,43 ^g ±0,12	3,71 ^a ±0,01	7,43 ^h ±0,12
Sol Moura	4,17 ⁱ ±0,02	3,58 ^a ±0,01	4,17 ^c ±0,02	3,58 ^a ±0,01
Sol Mix	3,75 ^{bc} ±0,03	5,50 ^b ±0,01	3,75 ^{ab} ±0,03	5,50 ^d ±0,01

Sol Moura: amido de mandioca do cultivar moura fermentado.

Sol Mix: amido de uma mistura de diferentes cultivares de mandioca fermentado.

*Valores seguidos de letras minúsculas iguais na mesma coluna não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

** Valores seguidos de letras maiúsculas iguais na mesma linha não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Para o amido de mandioca acidez titulável superior a 7,0 mL de NaOH 0,1 mol L⁻¹ 100 g⁻¹ caracteriza uma fermentação muito intensa, enquanto volumes inferiores a 3,0 mL de NaOH 0,1 mol L⁻¹ 100 g⁻¹ caracterizam a quase ausência de fermentação (característica de amido e mandioca nativo) (CEREDA; VILPOUX, 2002).

Embora Cereda e Vilpoux (2002) correlacionem os valores de acidez com a fermentação, observa-se com os resultados obtidos (Tabela 1) que elas podem variar também com o tempo de exposição solar e com a ação do revolvimento durante a secagem, uma vez que a partir da segunda hora de exposição solar os valores de acidez foram menores para os amidos revolvidos com diferenças significativas entre as médias ($p < 0,05$) para os que não foram revolvidos. Observa-se também que há uma redução significativa ao longo do tempo de exposição solar para os amidos revolvidos, sendo que o menor valor (3,58 mL NaOH 0,1 mol L⁻¹

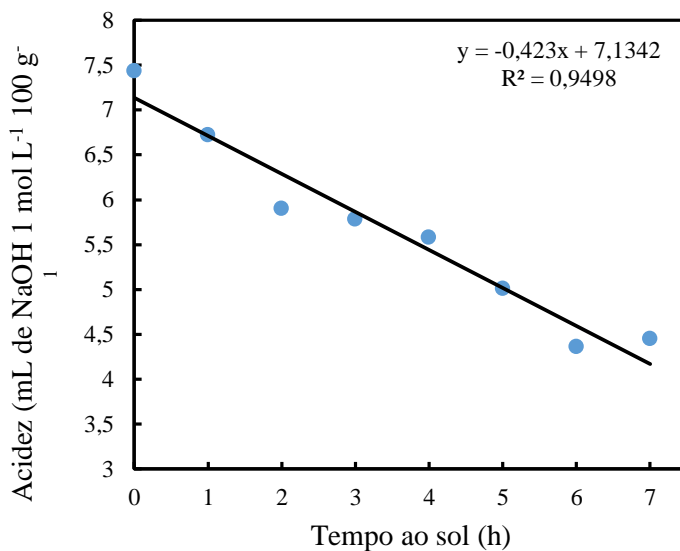
¹ 100 g⁻¹) foi encontrado no amido de mandioca cultivar moura fermentado seco totalmente ao sol pelo método tradicional e o maior valor (7,43 mL NaOH 0,1 mol L⁻¹ 100 g⁻¹) para o amido fermentado que foi seco integralmente em estufa. Já para os amidos que não foram revolvidos não há uma relação entre a acidez e o tempo de exposição solar.

Os valores de acidez titulável ficaram entre 5,78 a 7,05 mL NaOH 0,1 mol L⁻¹ 100 g⁻¹ para o amido sem o revolvimento e de 4,36 a 6,72 mL NaOH 0,1 mol L⁻¹ 100 g⁻¹ para o amido revolvido durante a secagem. Pereira et al. (2016) encontraram valores de acidez nas águas de fermentação de diferentes indústrias de polvilho de Santa Catarina entre 9,50 a 15,05 mL de NaOH 0,1 mol L⁻¹ 100 g⁻¹. A maior acidez da água de fermentação em relação ao polvilho azedo ocorre devido o processo de secagem solar, que além de evaporar a água do amido, promove a reação fotoquímica entre a luz UV e os ácidos orgânicos, o que reduz a acidez do produto em relação as águas onde o amido foi fermentado.

Ladeira e Pena (2011) encontraram acidez titulável dos polvilhos azedos entre 3,04 e 3,99 mL NaOH 0,1 mol L⁻¹ 100g⁻¹). Demiate e Kotovicz (2011) obtiveram valores de acidez para o polvilho azedo variando de 3,10 a 8,63 mL NaOH 0,1 mol L⁻¹ 100g⁻¹. Garcia et al. (2016) encontraram valores de acidez entre 2,16 e 6,74 mL NaOH 0,1 mol L⁻¹ 100g⁻¹ também para amido de mandioca fermentado. Desta forma, os valores obtidos para o presente trabalho concordam com os valores identificados por estes autores.

Para verificar o comportamento da acidez ao longo do tempo de secagem, para o amido revolvido, foi ajustado aos dados experimentais um modelo linear Figura 3.

Figura 3 - Ajuste do modelo linear aos dados experimentais de acidez titulável do polvilho azedo pelo tempo de exposição ao sol.



3.3 Ácidos orgânicos

Cereda et al. (1982) comprovaram que o aumento da acidez dos polvilhos através da fermentação é atribuído à formação de ácidos orgânicos, sendo eles principalmente ácido láctico, acético, propiônico e butírico (DEMIATE et al., 2000).

Diversos autores afirmam que a expansão do polvilho azedo se deve a reação que ocorre no amido com a radiação UV do sol e os ácidos orgânicos (CEREDA; BONASSI 1985; PLATA-OVIEDO; CAMARGO, 1994; 1998; MESTRES; ROUAU, 1997; APLEVICZ, 2006). Por este motivo, os ácidos orgânicos foram quantificados nas condições de secagem que apresentaram menor e maior propriedade de expansão, a fim de retratar a relação entre esta propriedade e os ácidos.

Os resultados da concentração de ácido láctico, acético, propiônico e butírico no polvilho azedo são ilustrados na Tabela 2. Observa-se que há uma maior quantidade de ácidos orgânicos no amido proveniente do tanque de fermentação do que nos que foram secos por diferentes condições de secagem, o que indica que independente do

tempo de exposição solar ou da ação de revolvimento ou não, uma certa quantidade de ácido orgânico é evaporada durante a secagem.

Os ácidos acético, propiônico e butírico são considerados ácidos orgânicos voláteis devido às suas baixas massas moleculares (C1-C4), o que explica o fato destes ácidos terem suas quantidades reduzidas à temperatura ambiente, enquanto que o ácido láctico por ter uma estrutura molecular com função álcool e ácido juntos o torna menos volátil em relação aos outros ácidos analisados. Por este motivo também, é que os ácidos acético e propiônico estão presentes em menor quantidade no polvilho azedo, devido a menor massa molecular destes ácidos em relação ao butírico e láctico.

De um modo geral, os valores de ácidos orgânicos sofreram um decréscimo com o tempo de exposição solar, tanto para as amostras revolvidas quanto para as não revolvidas, isto pode ser explicado pelo fato de que quanto mais tempo o amido fermentado permanece ao sol mais os ácidos orgânicos são volatilizados.

Tabela 2 - Ácidos orgânicos das amostras de polvilho azedo que apresentaram maior e menor volume específico de biscoito em diferentes condições de secagem.

Amostras	Ácido Lático (mg kg ⁻¹)		Ácido Propiónico (mg kg ⁻¹)	
	Sem Revolver	Com Revolver	Sem Revolver	Com Revolver
1 h ao Sol	2425 ^{cb} ± 14,96	2174 ^{ca} ± 4,60	1 h ao Sol 671 ^{ib} ± 0,73	581 ^{ia} ± 7,93
3 h ao Sol	-	2258 ^d ± 1,78	3 h ao Sol	432 ^d ± 1,99
4 h ao Sol	2311 ^b ± 4,16	-	4 h ao Sol 435 ^c ± 2,38	-
7 h ao Sol	1536 ^{aa} ± 14,43	2048 ^{bb} ± 26,08	7 h ao Sol 535 ^{eb} ± 2,11	267 ^{ca} ± 7,91
Estufa Sol	2729 ^e ± 2,08	2729 ^f ± 2,08	Estufa 517 ^d ± 1,11	517 ^e ± 1,11
Moura Sol Mix	1527 ^a ± 6,68	1527 ^a ± 6,68	Sol Moura	210 ^b ± 2,32
Tanque	2661 ^d ± 15,84	2661 ^d ± 15,84	Sol Mix	112 ^a ± 5,41
Amostras	3587 ^f ± 4,69	3587 ^f ± 4,69	Tanque	1155 ^e ± 8,69
	Ácido Acético (mg kg ⁻¹)			
	Com Revolver		Ácido Butírico (mg kg ⁻¹)	
	Sem Revolver	Com Revolver	Sem Revolver	Com Revolver
1 h ao Sol	1056 ^{ca} ± 1,95	1065 ^{cb} ± 1,04	1 h ao Sol 2310 ^{bb} ± 1,70	2144 ^{ca} ± 13,26
3 h ao Sol	-	1070 ^d ± 8,86	3 h ao Sol	1831 ^d ± 8,73
4 h ao Sol	1051 ^d ± 3,17	-	4 h ao Sol 2232 ^c ± 7,54	-
7 h ao Sol	904 ^{cb} ± 6,89	713 ^{ca} ± 3,15	7 h ao Sol 1897 ^{cb} ± 25,61	1623 ^{ca} ± 0,88
Estufa Sol	1092 ^e ± 7,47	1091 ^e ± 7,47	Estufa 2159 ^d ± 28,71	2159 ^e ± 28,71
	572 ^b ± 1,02	572 ^b ± 1,02	Sol Moura 933 ^a ± 20,44	933 ^a ± 20,44

Moura		Sol Mix		Tanque	
	541 ^a ± 6,02	541 ^a ± 6,02	1227 ^b ± 36,29	1227 ^b ± 36,29	1227 ^b ± 36,29
	2599 ^f ± 11,04	2599 ^f ± 11,04	4753 ^g ± 2,09	4753 ^f ± 2,09	4753 ^f ± 2,09

Sol Moura: amido de mandioca do cultivar moura fermentado.

Sol Mix: amido de uma mistura de diferentes cultivares de mandioca fermentado.

*Valores seguidos de letras minúsculas iguais na mesma coluna não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

**Valores seguidos de letras maiúsculas iguais na mesma linha não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Além da volatilização dos ácidos durante a secagem, outro fato pode também influenciar sobre a redução dos ácidos orgânicos, a reação oxidativa de despolimerização que ocorre entre estes ácidos e o amido, tendo a luz UV como catalisador da reação. Uma vez que estes ácidos são um dos reagentes, eles podem estar sendo consumidos durante a reação.

Alguns estudos relataram que dentre os ácidos orgânicos provenientes da fermentação do amido, o ácido láctico é o principal responsável pela propriedade de expansão do polvilho azedo (CEREDA; BONASSI, 1985; NUNES; CEREDA, 1994; NUNES, 1999; PLATA-OVIEDO, 1998). Por esta razão o maior teor de ácido láctico foi encontrado para a amostra seca totalmente em estufa, cujo valor de volume específico foi o menor dentre todas as amostras analisadas. Provavelmente, como na secagem em estufa não há a luz UV, a reação oxidativa não ocorre com a mesma intensidade que no sol, e desta forma, não ocorre um consumo de ácido láctico.

Os amidos que foram revolvidos durante a secagem e que tiveram os maiores resultados de volume específico apresentaram uma menor concentração de ácido propiônico, acético e butírico para praticamente todos os tempos de exposição solar em relação aos que não foram revolvidos. O revolvimento proporciona um maior contato entre os grânulos de amido e a radiação UV o que aumenta o número de moléculas oxidadas, consumindo estes ácidos durante a reação. Já para o ácido láctico não houve uma relação direta entre o revolvimento e o volume específico das amostras analisadas.

Como a amostra seca totalmente ao sol (Sol Mix) foi proveniente da fermentação de diferentes cultivares de mandioca e de um tanque com tempo de fermentação diferente do amido fermentado do cultivar Moura era esperado que valores distintos de ácidos orgânicos fossem encontrados para ela comparativamente a amostra seca totalmente ao sol Moura.

Com exceção da amostra analisada do tanque de fermentação e do Sol Mix, os valores de ácido láctico variaram de 1527 a 2729 mg kg⁻¹, propiônico de 210 a 670 mg kg⁻¹, acético de 572 a 1091 mg kg⁻¹ e butírico de 933 a 2310 mg kg⁻¹. Demiate et al. (1999), analisando amostras de polvilho azedo da região sul e sudeste do Brasil por CLAE, encontraram de 120 a 830 mg kg⁻¹ de ácido láctico, de 0 a 130 mg kg⁻¹ de ácido propiônico, de 0 a 680 mg kg⁻¹ de ácido acético e de 0 a 570 mg kg⁻¹ de ácido butírico. Os resultados encontrados por estes autores são inferiores aos encontrados para o amido de mandioca Moura fermentado

e seco nas diferentes condições de secagem, e também para o amido de diferentes cultivares de mandioca fermentado seco totalmente ao sol. Os resultados obtidos estão, em geral, acima também dos encontrados por Aquino et al. (2016) que fizeram a determinação dos ácidos orgânicos de diferentes polvilharias de Santa Catarina por eletroforese capilar e verificaram valores de ácido láctico entre 274,14 e 7385,7 mg kg⁻¹, ácido propiônico de 39,29 a 204, 81 mg kg⁻¹, ácido acético de 30,67 a 403,15 mg kg⁻¹ e ácido butírico de < 20,0 a 145,0 mg kg⁻¹.

3.4 Propriedades de pasta

A viscosidade constitui um parâmetro de qualidade de grande importância tecnológica que define a aceitação e aplicação do polvilho azedo na indústria (MACHADO, 2010). De acordo com Cereda (1987), a água que o grânulo pode absorver e reter é um fator de qualidade importante, pois está relacionado com o poder de expansão da massa do polvilho azedo ao forno. Durante o forneamento, os grânulos da superfície são desidratados e os do interior gelatinizados, provocando a expansão do biscoito (CAMARGO et al., 1988).

Sendo assim, foram analisadas as propriedades das pastas geradas pelo amido de mandioca seco nas diferentes condições estudadas através da temperatura inicial de pasta, viscosidade máxima, temperatura da viscosidade máxima, viscosidade mínima, viscosidade final do ciclo de resfriamento e tendência à retrogradação (*Setback*), conforme Tabela 3 e viscoamilogramas ilustrados na Figura 4.

Não houve diferença significativa ($p \geq 0,05$) para as temperaturas de pasta entre os amidos com e sem revolvimento até 5 h de exposição solar. Com 6 e 7 h ao sol a temperatura de pasta do amido revolvido foi maior do que do amido sem revolvimento. Não ocorreram diferenças significativas nas temperaturas de pasta para os diferentes tempos de exposição solar do amido sem revolvimento em todas as horas, e para o amido revolvido até 5 h ao sol.

Tabela 3 - Propriedades viscoamilográficas do amido de mandioca fermentado (polvilho azedo) seco ao sol e seco em estufa convectiva a 55 °C, obtidas a partir de amilogramas construídos no RVA.

Amostras	Temperatura Inicial de Pasta (°C)		Viscosidade Máxima (cP)	
	Sem revolver	Revolvendo	Sem revolver	Revolvendo
1 h ao Sol	68 ^{abA} ± 0,03	69 ^{abA} ± 0,61	3120 ^{dA} ± 15,10	3428 ^{cdetB} ± 19,68
2 h ao Sol	69 ^{abA} ± 0,03	69 ^{abA} ± 0,05	3214 ^{eA} ± 34,65	3473 ^{etB} ± 25,71
3 h ao Sol	69 ^{abA} ± 0,45	69 ^{abA} ± 0,49	3126 ^{dA} ± 4,64	3459 ^{detB} ± 32,37
4 h ao Sol	69 ^{abA} ± 0,57	69 ^{abca} ± 0,46	3099 ^{cdA} ± 14,25	3425 ^{cdetB} ± 11,36
5 h ao Sol	69 ^{abA} ± 0,40	70 ^{abca} ± 0,46	3035 ^{ca} ± 37,39	3368 ^{bcb} ± 23,98
6 h ao Sol	69 ^{abA} ± 0,64	71 ^{cdB} ± 0,55	2810 ^{aA} ± 19,19	3421 ^{cdetB} ± 13,50
7 h ao Sol	68 ^{abA} ± 0,93	70 ^{bcb} ± 0,08	3055 ^{cdA} ± 30,00	3396 ^{cdB} ± 24,00
Estufa	69 ^d ± 0,51	69 ^d ± 0,51	2918 ^b ± 35,56	2918 ^a ± 35,56
Sol Moura	69 ^d ± 0,53	69 ^{abc} ± 0,53	3495 ^b ± 24,92	3495 ^f ± 24,92
Sol Mix	72 ^b ± 0,49	72 ^d ± 0,49	3306 ^f ± 17,81	3306 ^b ± 17,81
Amostras	Temperatura da Viscosidade Máxima (°C)		Viscosidade Mínima (cP)	
	Sem revolver	Revolvendo	Sem revolver	Revolvendo
1 h ao Sol	81 ^{abA} ± 0,05	81 ^{abA} ± 0,52	1051 ^{TA} ± 10,02	1216 ^{eb} ± 18,54
2 h ao Sol	81 ^{abA} ± 0,55	81 ^{abA} ± 0,43	1070 ^{TA} ± 34,08	1248 ^{eb} ± 12,48
3 h ao Sol	81 ^{abA} ± 0,43	81 ^{abA} ± 0,49	992 ^{eb} ± 6,03	966 ^{da} ± 22,47
4 h ao Sol	81 ^{abA} ± 0,06	81 ^{abA} ± 0,48	958 ^{cdetB} ± 2,07	903 ^{ca} ± 7,69
5 h ao Sol	82 ^{abA} ± 0,51	83 ^{bcb} ± 0,03	916 ^{bcb} ± 15,01	831 ^{ba} ± 14,39
6 h ao Sol	82 ^{abA} ± 0,59	84 ^{eb} ± 0,83	893 ^{bb} ± 21,77	802 ^{ba} ± 10,08
7 h ao Sol	81 ^{abA} ± 0,46	83 ^{eb} ± 0,38	953 ^{cdetB} ± 6,97	766 ^{abA} ± 1,86

Estufa	Viscosidade no Final do Ciclo de Resfriamento (cP)			Setback (cP)
	Sem revolver	Revolvendo	Sem revolver	
Sol Moura	82 ^a ± 0,51	82 ^{ab} ± 0,51	963 ^{de} ± 16,06	963 ^d ± 16,06
Sol Mix	81 ^a ± 0,06	81 ^a ± 0,06	953 ^{bcd} ± 11,00	953 ^{cd} ± 11,00
	86 ^b ± 0,06	86 ^d ± 0,06	764 ^a ± 9,02	764 ^a ± 9,02
Viscosidade no Final do Ciclo de Resfriamento (cP)				
	Sem revolver	Revolvendo	Sem revolver	Revolvendo
1 h ao Sol	1449 ^{dA} ± 11,12	2022 ^{IB} ± 21,00	398 ^{cA} ± 2,04	805 ^{BB} ± 39,51
2 h ao Sol	1453 ^{dA} ± 36,87	1542 ^{IB} ± 15,48	383 ^{bcB} ± 4,45	294 ^{aA} ± 27,96
3 h ao Sol	1338 ^{bcB} ± 20,88	1275 ^{dA} ± 7,77	345 ^{abA} ± 25,74	309 ^{abA} ± 8,31
4 h ao Sol	1296 ^{bb} ± 6,93	1236 ^{cuA} ± 2,04	337 ^{abA} ± 7,77	332 ^{abcA} ± 7,26
5 h ao Sol	1234 ^{ab} ± 7,98	1183 ^{abA} ± 25,21	318 ^{aA} ± 12,68	352 ^{bcdA} ± 16,46
6 h ao Sol	1236 ^{aA} ± 27,74	1213 ^{bcA} ± 12,12	343 ^{abA} ± 26,02	410 ^{eB} ± 8,75
7 h ao Sol	1303 ^{bb} ± 15,53	1152 ^{aA} ± 10,50	350 ^{abA} ± 14,27	386 ^{cdeB} ± 10,18
Estufa	1361 ^c ± 18,81	1361 ^e ± 18,81	398 ^c ± 4,39	398 ^{de} ± 4,39
Sol Moura	1363 ^c ± 7,33	1363 ^e ± 7,33	428 ^c ± 4,94	428 ^e ± 4,94
Sol Mix	1347 ^c ± 17,81	1347 ^e ± 17,81	583 ^d ± 26,78	583 ^f ± 26,78

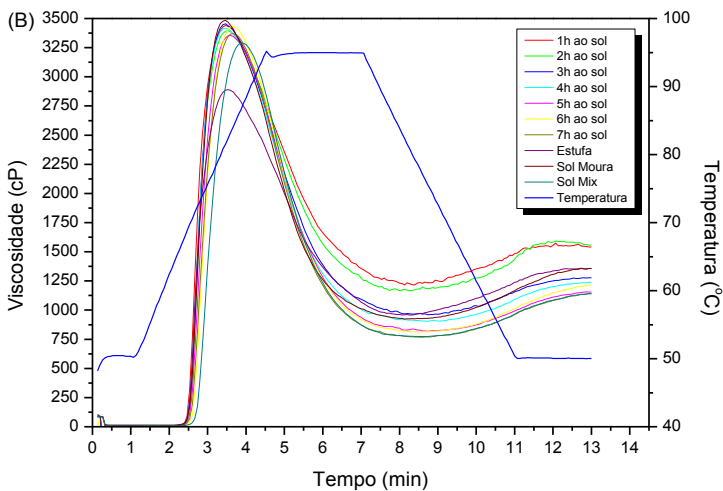
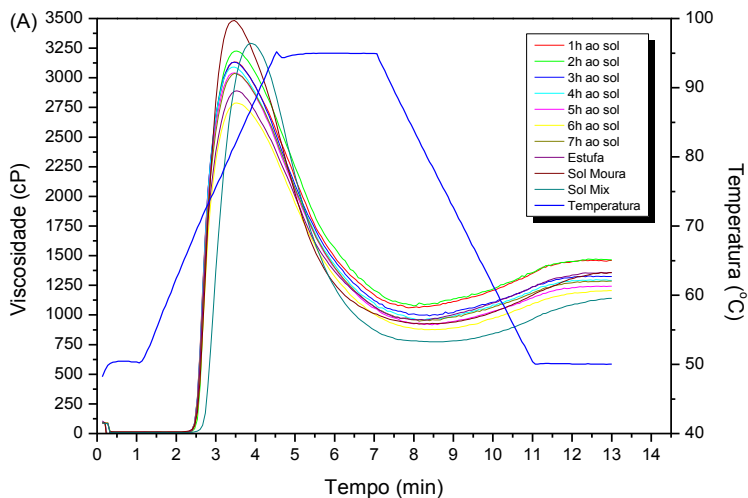
Sol Moura: amido de mandioca do cultivar moura fermentado.

Sol Mix: amido de uma mistura de diferentes cultivares de mandioca fermentado.

*Valores seguidos de letras minúsculas iguais na mesma coluna não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

** Valores seguidos de letras maiúsculas iguais na mesma linha não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Figura 4 – Amilogramas das amostras de polvilho azedo secas ao sol e em estufa a 55 °C sem revolvimento (A) e revolvendo (B).



As temperaturas de pasta para o amido de mandioca Moura fermentado variaram de 68,80 a 71,13 °C. Temperaturas de pasta inferiores as encontradas neste trabalho foram relatadas por Marcon et al. (2007) que avaliando os efeitos da fermentação nas propriedades físico-químicas e sensoriais do amido de mandioca fermentado obtiveram temperaturas iniciais de pasta de 60,0 a 63,3 °C.

As viscosidades máximas dos amidos que foram secos sem revolvimento foram menores do que as dos revolvidos, com diferença significativa ($p < 0,05$), indicando que pode haver uma relação entre a expansão do polvilho azedo com a viscosidade máxima, já que os amidos que foram revolvidos e apresentaram maior volume específico também apresentaram maior viscosidade, comparativamente aos não revolvidos, o que contradiz os trabalhos de Demiate et al. (2005) e Mestres e Rouau (1997) que relataram que maiores valores de expansão estão associados a baixos valores de pico de viscosidade.

Entretanto, os resultados de viscosidade máxima para os amidos revolvidos se mantiveram homogêneos entre os tempos de exposição solar de 1 a 7 h, não ocorrendo diferenças significativas entre as médias para a maior parte das condições de secagem. Para os amidos não revolvidos ocorreram diferenças significativas, mas não há uma relação direta do tempo de exposição solar com a viscosidade máxima, ou com a expansão.

A amostra que foi seca totalmente em estufa e que apresentou menor volume específico, também obteve o maior resultado para a acidez, maior concentração de ácido láctico e a segunda menor viscosidade (2918,00 cP).

Os valores de viscosidade máxima ficaram entre 3368,00 e 3473,64 cP para os amidos revolvidos e de 2810,00 a 3214,68 cP para os sem revolvimento, de 1 a 7 h ao sol, sendo o maior valor de viscosidade máxima o da amostra do cultivar Moura seca pelo método tradicional (3495,36 cP). Os valores obtidos estão próximos do mínimo encontrado por Onitilo et al. (2007) cujos valores de pico de viscosidade máxima variaram de 333,17 RVU (3998,04 cP) a 380,75 RVU (4569,00 cP) para amidos fermentados de diferentes cultivares de mandioca.

Os valores de propriedades viscoamilográficas obtidos com o amido de mandioca fermentado e seco nas diferentes condições de secagem ficaram próximos dos encontrados por Santos (2012) para amido de mandioca fermentado comercial, sendo temperatura de pasta de 61,95 °C, viscosidade máxima 3051,50 cP, viscosidade no final do ciclo de resfriamento 2188,00 cP, viscosidade mínima 1311, 50 cP e

setback 448,00 cP. Starling (2010) encontrou em dezenove experimentos variando volume de ácido láctico, massa de inóculo e tempo de fermentação, viscosidade máxima entre 224,00 e 507,00 RVU (2688- 6084 cP), viscosidade no final do ciclo de resfriamento 156, 33 a 341,58 RVU (1875,96 a 4098,96 cP) e viscosidade mínima 51,42 a 198,25 RVU (617,04 a 2379,00 cP).

O amido de mandioca fermentado seco em diferentes condições apresentou baixa tendência à retrogradação, expressa por *setback*, variando entre 294 e 805 cP. O polvilho azedo apresenta baixa tendência a retrogradação em comparação com amidos de mandioca nativos. Essa característica do amido modificado por oxidação está associada à presença de grupamentos carbonila e carboxila que dificultam a reassociação das cadeias de amido para a formação do gel novamente (ADEBOWALE; AFOLABI; LAWAL, 2002; LEONEL; GARCIA; REIS, 2004).

Os resultados de temperatura de pasta, viscosidade máxima, temperatura da viscosidade máxima, viscosidade mínima e *setback* diferentes entre o amido do cultivar Moura e da mistura de amidos de cultivares de mandioca colocados para fermentar (Sol Mix) devem-se às diferenças que ocorrem entre os grânulos dos cultivares de mandioca, conforme relatados nos trabalhos de Oliveira (2011) para cultivares de amidos de mandioca nativo e Ladeira e Pena (2011) para polvilho azedo de três diferentes cultivares de mandioca.

4 CONCLUSÃO

O revolvimento do amido de mandioca fermentado durante a secagem traz como vantagem um aumento significativo sobre as propriedades de expansão do polvilho azedo em relação ao método de secagem sem revolvimento, sendo que com o revolvimento um tempo de 1 h ao sol, com secagem continuada em estufa é suficiente para produzir biscoitos com valores de volumes específicos sem diferenças significativas ($p \geq 0,05$) ao que seca totalmente ao sol. Já quando o revolvimento não é realizado é necessário um tempo mínimo de 3 h ao sol para obter biscoitos com volume específico sem diferença significativa ($p \geq 0,05$) com o que é seco pelo método tradicional.

Os biscoitos obtidos com o amido fermentado exposto por diferentes tempos ao sol com revolvimento apresentaram de média a grande expansão, enquanto que os que não foram revolvidos ficaram classificados como de pequena a média expansão. Este resultado

representa a importância da ação de revolver o amido fermentado durante o processo de secagem, o que contribui para a principal característica deste produto que é a sua expansão ao forneamento.

Os elevados valores de acidez no amido fermentado de mandioca se devem aos ácidos orgânicos provenientes da fermentação, que foram encontrados em maior quantidade para o lático e butírico, do que acético e propiônico.

Tanto para as amostras revolvidas quanto para as que não tiveram revolvimento durante a exposição solar, as quantidades de ácido orgânico sofreram um decréscimo com o tempo ao sol, provavelmente pelo consumo deste durante a reação de despolimerização do amido de mandioca fermentado.

Não há uma relação direta entre o tempo de exposição solar com a viscosidade máxima do amido de mandioca cultivar Moura fermentado. Também não há relação entre a viscosidade e a expansão entre os diferentes tempos de exposição solar. Entretanto, para os amidos que foram revolvidos durante secagem, e que apresentaram maior volume específico comparativamente com os não revolvidos, tiveram maiores picos de viscosidade máxima em relação aos não revolvidos.

REFERÊNCIAS

ADEBOWALE, K. O.; AFOLABI, T. A.; LAWAL, O. S. Isolation, chemical modification and physicochemical characterization of Bambarra groundnut (*Voandzeia subterranean*) starch and flour. **Food Chemistry**, v. 78, n. 3, p. 305-311, 2002.

APLEVICZ, K. S. **Caracterização de produtos panificados à base de féculas de mandioca nativas e modificadas**. 2006, 131 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Alimentos)- Universidade Estadual de Ponta Grossa, Ponta Grossa, 2006.

AQUINO, A. C. M. S.; AZEVEDO, M. S.; RIBEIRO, D. H. B.; COSTA, A. C. O.; AMANTE, E.R. Validation of HPLC and CE methods for determination of organic acids in sour cassava starch wastewater. **Food Chemistry**, v. 172, p. 725-730, 2015.

AQUINO, A. C. M. S.; GERVIN, V. M.; AMANTE, E. R. Avaliação do processo produtivo de polvilho azedo em indústrias de Santa Catarina. **Brazilian Journal of Food Technology**, v. 19, 2016.

ASCHERI, D. P. R.; VILELA, E. R. Alterações do polvilho de mandioca pela fermentação, no fabrico de biscoitos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 30, n. 2, p. 269-279, 1995.

CAMARGO, C.; BULEON, A.; RICHARD-MOLARD, D. Functional properties of sour cassava (*Manihot utilissima*) starch: polvilho azedo. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v. 45, n. 3, p. 273-289, 1988.

BERTOLINI, A. C.; MESTRES, C.; RAFFI, J. BULÉON, A.; LERNER, D.; COLONNA, P. . Photodegradation of cassava and corn starches. **Journal Agricultural Food Chemistry**, v. 49, n. 2, p. 675-682a, 2001.

CÁRDENAS, O. S.; BUCKLE, T. S. Sour cassava starch production: a preliminary study. **Journal of Food Science**, v. 45, n. 6, p. 1509-1512, 1980.

CARVALHO, E. P.; CANHOS, V.P.; RIBEIRO, V. E.; CARVALHO, H. P. Polvilho azedo: aspectos físicos, químicos e microbiológicos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 31, n. 2, p. 129- 137, 1996.

CEREDA, M. P.; BONASSI, I. A. Avaliação da qualidade da fécula fermentada comercial de mandioca (polvilho azedo). Ácidos orgânicos e absorção de água. **Revista Brasileira de Mandioca**, v. 3, n. 2, p. 21 – 30, 1985.

CEREDA, M. P.; BONASSI, I. A.; LIMA, U. de.; WOSIACHI, G.; FIORETO, A. M. C. Ensaio de fermentação de fécula de Mandioca, utilizando substrato esterilizado, com brometo de metilo. **Simpósio Nacional de Fermentação**, Viçosa - MG, Maio de 1982.

CEREDA, M. P., NUNES, O. L. G. S. **Definição de parâmetros de fermentação e secagem para industrialização do polvilho azedo**. Botucatu: Departamento de Tecnologia dos Produtos Agropecuários, UNESP, 1989. 80 p. (Relatório Técnico, 1).

CEREDA, M.P. Tecnologia e qualidade do Polvilho azedo. **Informe Agropecuário. Belo Horizonte**, v. 13, n. 145, p. 63-68, 1987.

CEREDA, M.P.; VILPOUX, O.F. **Polvilho azedo, critérios de qualidade para uso em produtos alimentares**, Culturas de Tuberosas Amiláceas Latinoamericanas. São Paulo: Fundação Cargill, mar. 2002.

CEREDA, M. P.; VILPOUX, O. (Org.) **Tecnologia, uso e potencialidades de tuberosas amiláceas latinoamericanas**. In: Culturas de Tuberosas Amiláceas Latinoamericanas. São Paulo: Fundação Cargill, 2003. v.3, 711 p.

CLIMATEMPO. **Climatologia**. Disponível em:
<<http://www.climatepo.com.br>>. Acesso em 12 de junho de 2016.

DEMIATE I.M.; BARANA A.C; CEREDA M.P.; WOSIACKI. G. Organic acid profile of commercial sour cassava starch. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v. 19, p. 131-135, 1999.

DEMIATE, I. M.; DUPUY, N.; HUVENNE, J. P.; CEREDA, M. P.; WOSIACKI, G. Relationship between banking behavior of modified cassava starches and starch chemical structure determined by FTIR spectroscopy. **Carbohydrate Polymers**, v. 42, n. 2, p. 149-158, 2000.

DEMIATE, I. M.; KOTOVICZ, V. Cassava starch in the Brazilian food industry. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v. 31, n.2, p. 388-397, 2011.

DEMIATE, I. M.; SANGER, S. A.; VOGLER, Z.; CEREDA, M. P.; WOSIACKI, G. Características de qualidade de amostras de polvilho azedo produzido ou comercializado no Estado do Paraná. **Arquivos de Biologia e Tecnologia**, v. 40, n. 2, p. 321-330, jun. 1997.

DEMIATE, I. M.; WOSIACKI, G.; CEREDA, M. P.; MESTRES, C. Viscographic characteristics of oxidized cassava starches assessed by RVA. **Publicatio UEPG - Ciências Exatas e da Terra, Ciências Agrárias e Engenharias**, Ponta Grossa, v. 11, n. 1, p. 07-17, 2005.

DINIZ, I. P. **Caracterização tecnológica do polvilho azedo produzido em diferentes regiões do estado de Minas Gerais**. 2006, 101 f.

Dissertação (Magister Scientiae em Ciência e Tecnologia de Alimentos) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2006.

GARCIA, C. M.; FRANCO, C. M. L.; SOARES- JÚNIOR, M. S.; CALIARI, M. Structural characteristics and gelatinization properties of sour cassava starch. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, v. 123, n. 2, p. 919-926, 2016.

LADEIRA, T. M. S; PENA, R. S. Propriedades físico-químicas e tecnológicas dos polvilhos azedos de três cultivares de mandioca. **Alimentos e Nutrição Araraquara**, v. 22, n. 4, p. 631- 640, out./dez., 2011.

LEONEL, M.; GARCIA, A. C. B.; REIS, M. M. Caracterização físico-química e microscópica de amidos de batata-doce, biri, mandioca e taioba e propriedades de expansão após modificação fotoquímica. **Brazilian Journal of Food Technology**, Campinas, v. 7, n. 2, p. 129-137, 2004.

MACHADO, A.V.; PEREIRA, J. Efeito do escaldamento nas propriedades tecnológicas e reológicas da massa e do pão de queijo. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras - MG, v.34, p. 421-427, (2010).

MACHADO, A.C.S.D.V.; DINIZ, I. P.; TEIXEIRA, M. A. V.; BIRCHAL, V. S. Estudo do efeito de secagem por radiação ultravioleta nas propriedades tecnológicas da fécula de mandioca fermentada. **E-xacta**, Belo Horizonte: editor UniBH, v. 5, n. 1, p. 7-14, 2012.

MAEDA, K. C.; CEREDA, M. P. Avaliação de duas metodologias de expansão ao forno do polvilho azedo. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, Campinas, v. 21, n. 2, p. 139-143, 2001.

MARCON, M. J. A.; KURTZ, D. J.; MARASCHIN, M.; REGINATTO, V.; AMANTE, E. R. Rapid analysis for predicting the expansion of the polvilho azedo. **Revista do Instituto Adolfo Lutz**, São Paulo, v. 10, n. 2, p. 199-205, 2011.

MARCON, M. J. A.; VIERA, G. C. N.; DE SIMAS, K. N ; SANTOS, K.; VIEIRA, M. A.; AMBONI, R. D. M. C.; AMANTE, E. R. Effect of the Improved Fermentation on Physicochemical Properties and

Sensorial Acceptability of Sour Cassava Starch. **Brazilian Archives of Biology and Technology**, v. 50, n. 6, p. 1073-1081, 2007.

MARCON, M. J. A.; VIEIRA, M. A.; SANTOS, K.; DE SIMAS, K. N.; AMBONI, R. D. M. C.; AMANTE, E. R. The effect of fermentation on cassava starch microstructure. **Journal of Food Process Engineering**, v. 29, p. 362-372, 2006.

MCMINN, W.A.M.; MAGEE, T.R.A. Quality and physical structure of a dehydrated starch-based system. **Journal Drying Technology**, v.15, n1, p.49- 55, 1997.

MESTRES, C.; ROUAU, X., Influence of natural fermentation and drying conditions on the physicochemical characteristics of cassava starch. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v. 74, n. 1, p.147-155, 1997.

NUNES, O. L. G. S. **Avaliação de parâmetros relacionados à expansão de fécula de mandioca ácido-modificada e irradiada com ultravioleta**. 1999. 87 f. Tese (Doutorado em Agronomia - Energia na Agricultura) – Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Botucatu, 1999.

NUNES, O.L.G.S.; CEREDA M. P. **Metodologia para avaliação da qualidade de fécula fermentada de mandioca (polvilho azedo)**. In: Congresso Brasileiro de Mandioca, Salvador, 1994.

NUNES, O. L. G. S.; CEREDA, M. P. Effect of drying processes on the development of expansion in cassava starch hydrolyzed by lactic acid. In: **International Meeting on Cassava and Starch**, 1994, Cali. Abstracts... Cali: CIAT, 1994. p. 110.

OLIVEIRA, D. C. **Caracterização e potencial tecnológico de amidos de diferentes cultivares de mandioca (*Manihot esculenta* Crantz)**. 2011, 142 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Alimentos), Universidade Federal de Santa Catarina- UFSC, Florianópolis, 2011.

ONITILLO, M. O.; SANNI, L. O.; OYEWOLE, O. B.; MAZIYA-DIXON, B. Physicochemical and Functional Properties of Sour Starches

from Different Cassava Varieties. **International Journal of Food Properties**, v. 10, n. 3, p. 607-620, 2007.

PEREIRA, J. M.; AQUINO, A. C. M. S. OLIVEIRA, D. C.; ROCHA, G.; FRANCISCO, A.; BARRETO, P. L. M.; AMANTE, E. R. Characteristics of cassava starch fermentation wastewater based on structural degradation of starch granules. **Ciência Rural**, v. 46, n. 4, p. 732-738, 2016.

PEREIRA, J.; CIACCO, C. F.; VILELA, E. R.; TEIXEIRA, A. L. S. Féculas fermentadas na fabricação de biscoitos: estudo de fontes alternativas. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v. 19, n. 2, p. 287-293, 1999.

PIZZINATTO, A.; CAMPAGNOLLI, D. M.F. Avaliação tecnológica de produtos derivados da farinha de trigo (pão, macarrão, biscoitos). Centro de Tecnologia de Farinhas e Panificação, Instituto de Tecnologia de alimentos (ITAL), Campinas: **Boletim ITAL**, 1993, 54 p.

PLATA-OVIEDO, M. S. V; CAMARGO, C. R. Effect of acid treatments and drying processes on physic-chemical and functional properties of cassava starch. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v. 77, n. 1, p. 103-108, 1998.

PLATA-OVIEDO, M.; CAMARGO, C. R. Sun-dried sour cassava starch: expansion property. In: International Meeting on Cassava and Starch, 1994, Cali. **Abstracts**. Cali: CIAT, 1994, p. 112.

PLATA-OVIEDO, M. S. V.; **Secagem do amido fermentado de mandioca: modificação química relacionada com a propriedade de expansão e características físico-químicas**. Tese (Doutorado em Tecnologia de Alimentos) - Faculdade de Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 114 p., 1998.

POLA JÚNIOR, A. C. **Análise do processo de produção do polvilho azedo**. 2013, 152 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Alimentos). Universidade Federal de Santa Catarina- UFSC, Florianópolis, 2013.

SANTOS, T. P. R. **Produção de amido modificado de mandioca com propriedade de expansão**. 2012, 96 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia), Universidade Estadual Júlio de Mesquita Filho, Botucatu, 2012.

SILVEIRA, I. A. P.; CARVALHO, E. P.; SCHWAN, R. I.; PILON, L. Aspectos gerais e microbiológicos da fermentação da fécula de mandioca para produção de polvilho azedo. **Higiene Alimentar**, v. 14, n. 68/69, p. 26-31, 2000.

STARLING, C. A. **Otimização dos parâmetros de produção do amido de mandioca fermentado**. 2012, 148 f. Dissertação (Mestrado em Ciências e Tecnologia de Alimentos). Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2010.

VATANASUCHART, N.; NAIVIKUL, O.; CHAROENREIN, S.; SRIROTH, K. Molecular properties of cassava starch modified with different UV irradiations to enhance baking expansion. **Carbohydrate Polymers**, v. 61, n. 1, pp. 80–87, 2005.

ZOTOU, A.; LOUKOU, Z.; KARAVA, O. Method development for the determination of seven organic acids in wines by reversed-phase high performance liquid chromatography. **Chromatographia**, v. 60, n. 1/2, p. 39-44, 2004.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A taxa de secagem do amido de mandioca fermentado seco em estufa foi maior do que a taxa de secagem totalmente ao sol, o que reduz consideravelmente o tempo total de secagem para este produto. Enquanto que o amido de mandioca fermentado seco totalmente ao sol precisou de 13 h de secagem, para atingir umidade próxima da umidade de comercialização (próxima de 14%), a secagem combinada entre o sol e estufa necessitou de tempos inferiores variando entre 3,7 h (sol + estufa) a 9,83 h (sol + estufa).

Nas curvas de secagem foram observados períodos de taxa de adaptação, constante e decrescente, sendo que o período de adaptação e período constante não foi evidenciado para todas as condições de secagem. O período de taxa constante deve ser avaliado criteriosamente, uma vez que a utilização de curvas derivadas nem sempre deixam este período evidente, o que pode levar a erros durante a interpretação do fenômeno de secagem. Porém, o modelo de duas fases, que auxilia na visualização deste período e que assume uma fase linear e outra decrescente, pode também levar a equívocos na interpretação da existência do período constante em curvas que possuem somente o período de taxa decrescente. Dentre os modelos empíricos de Lewis, Page, Henderson e Pabis, Wang e Singh, Midilli, Aproximação da difusão e Logarítmico que foram ajustados aos dados experimentais de secagem o de Page foi o que apresentou melhor ajuste.

A secagem totalmente ao sol acarretou em maior tempo para obter o produto seco, com umidade final maior do que quando seco em estufa. Entretanto, para que este produto apresentasse propriedade de expansão sem diferença significativa com o polvilho seco pelo método utilizado nas polvilharias, foi necessário a exposição às radiações UV da luz solar por no mínimo 5 h, para o amido fermentado obtido da região de Santa Rosa do Sul (SC), sem a ação de revolvimento. Já para o amido de mandioca do cultivar Moura fermentado, da região de Pedras Grandes (SC), sem a realização do revolvimento, foi necessário um tempo mínimo de 3 h ao sol para obter biscoitos com propriedade de expansão sem diferença significativa em relação ao amido fermentado seco pelo método tradicional, enquanto que para o amido que foi revolvido somente 1 h de exposição solar já forneceu um polvilho que produziu biscoitos com propriedades de expansão sem diferença significativa com o biscoito do polvilho seco pelo método tradicional.

Desta forma, conclui-se que o tempo de exposição solar deste produto pode ser reduzido, com subsequente secagem em estufa, sem acarretar em prejuízos a sua principal propriedade tecnológica. A redução do tempo de exposição solar traz como vantagem maior rapidez ao processo, maior volume de produção, menor probabilidade de contaminação do produto acabado, dispensando dias inteiros de sol para secagem.

Levando-se em consideração de que as empresas deste setor produtivo são em grande maioria de pequeno e médio porte, não possuem condições financeiras de muitos investimentos. A secagem solar com secagem continuada em estufa apesar de trazer diversos benefícios pode ainda acarretar em um custo energético para estas empresas, uma vez que atualmente somente o sol é utilizado nesta etapa do processo. Desta forma, trabalho futuros visando sugerir uma fonte energética de menor custo para secagem em secador poderá trazer maiores benefícios ao setor, como estudo de secadores solares, secadores utilizando biomassa, entre outros.

O revolvimento auxilia na obtenção de maiores propriedades de expansão ao polvilho azedo, sendo esta ação necessária para obter um produto de melhor qualidade.

A avaliação dos ácidos orgânicos mostrou que o ácido lático e butírico são os que permanecem em maior concentração no amido fermentado após a secagem, enquanto que os ácidos acético e propiônico estão presentes em menor quantidade. Houve uma redução dos ácidos orgânicos com o aumento do tempo de exposição solar, o que pode estar ocorrendo devido o consumo destes ácidos pela reação oxidativa entre o amido e os ácidos orgânicos, que têm a radiação UV como catalisador, e é responsável pelas propriedades de expansão.

Não há uma relação direta entre a viscosidade e o tempo de exposição solar, assim como com a expansão do polvilho azedo, embora os amidos que foram revolvidos durante a secagem, e que apresentaram maior volume específico, mostraram maiores valores de viscosidade máxima, comparativamente aos que não foram revolvidos.

As curvas de isotermas de adsorção de umidade do amido de mandioca fermentado, de Santa Rosa do Sul (SC), e seco nas diferentes condições experimentais apresentaram forma sigmoide do tipo II. Os modelos de GAB e Oswin mostraram bom ajuste aos dados experimentais de umidade *versus* atividade de água.

O grânulo de amido é uma estrutura muito complexa, sendo que a diferença nas suas características entre cultivares pode influenciar no

processo tecnológico. Desta forma, o conhecimento de cultivares de mandioca que possam fornecer um polvilho azedo de melhor qualidade é de extrema importância para a padronização deste setor alimentício.

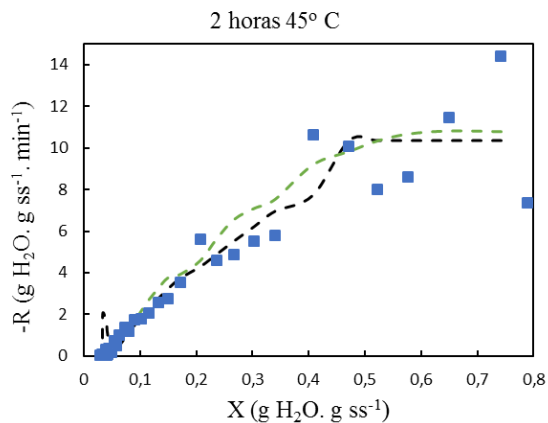
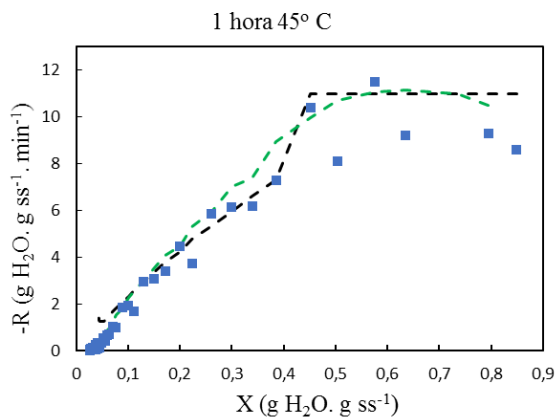
As avaliações da secagem do polvilho azedo foram realizadas entre o inverno e a primavera, mesma época em que o maior volume do produto é seco pelos produtores de polvilho azedo. Sabendo que a energia solar irradiada é de diferente intensidade entre os meses do ano, menor no inverno e maior no verão, avaliações correlacionando a energia incidente de radiação solar sobre o amido fermentado de mandioca, nos diferentes meses do ano, poderiam trazer ainda maiores contribuições à padronização deste setor produtivo.

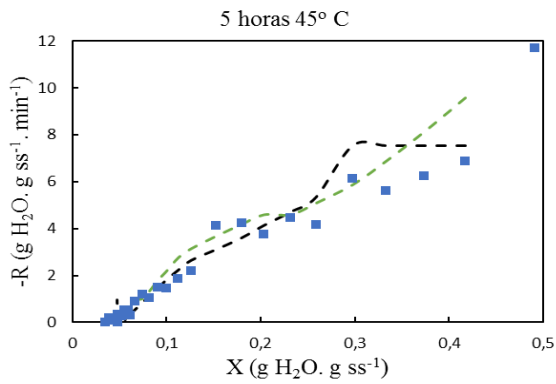
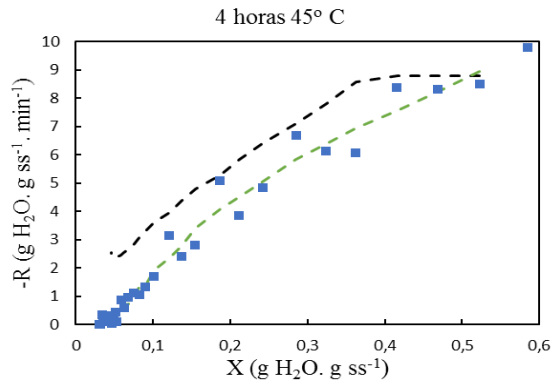
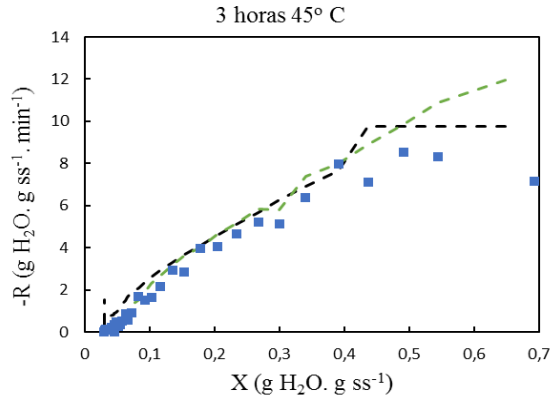
APÉNDICE

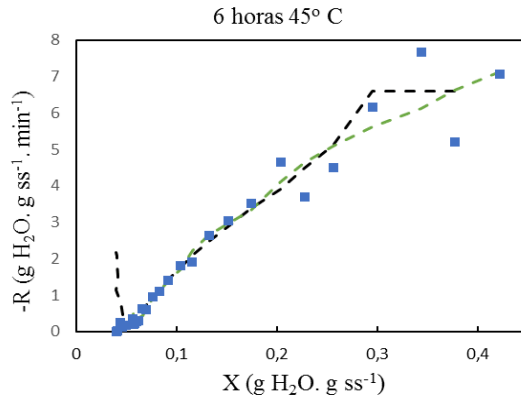
APÊNDICE A

Curvas de taxa de secagem em função da umidade, para os dados experimentais, dados suavizados e obtidos pelo modelo de duas fases.

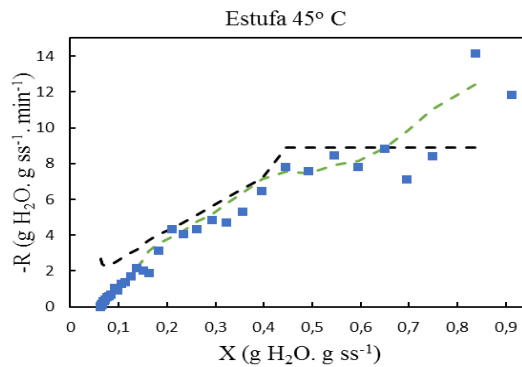
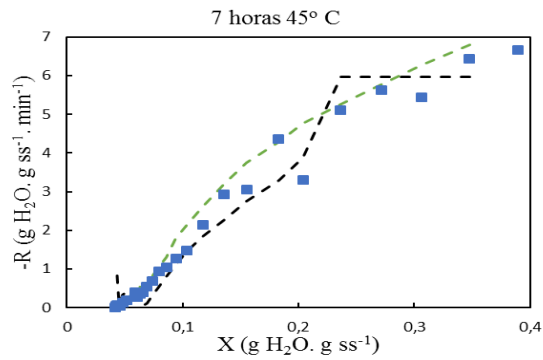
--- Duas Fases - - - Savitzky-Golay ■ Experimental

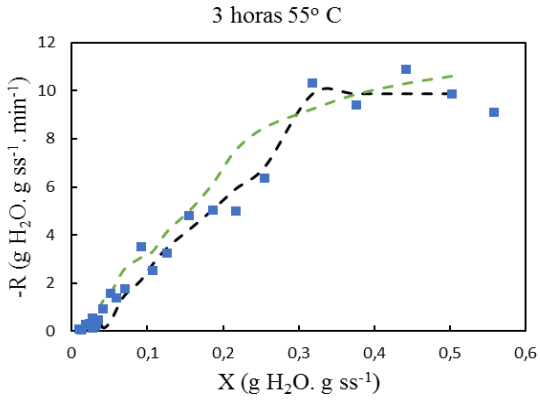
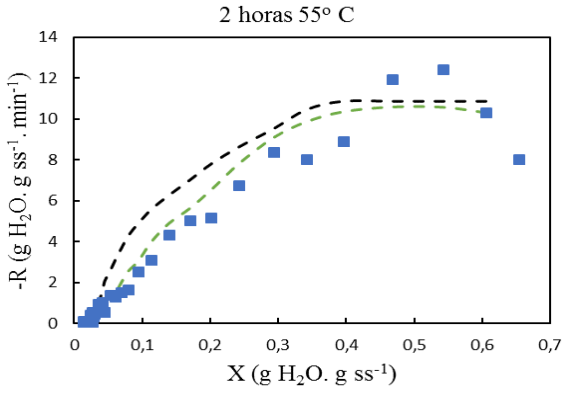




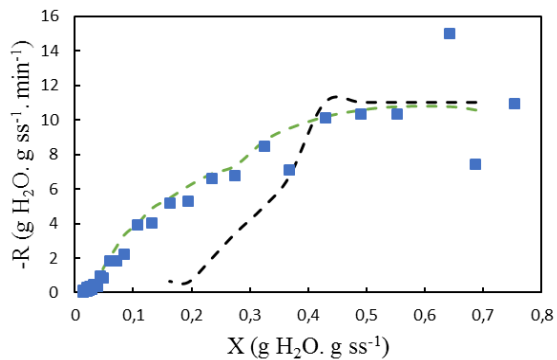


--- Duas Fases - - - Savitzky-Golay ■ Experimental

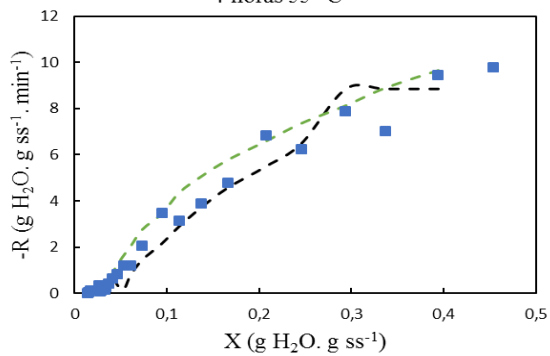




1 hora 55° C

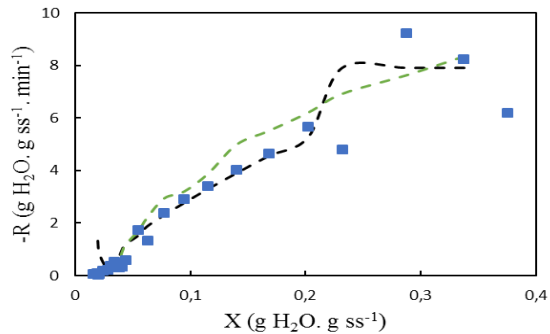


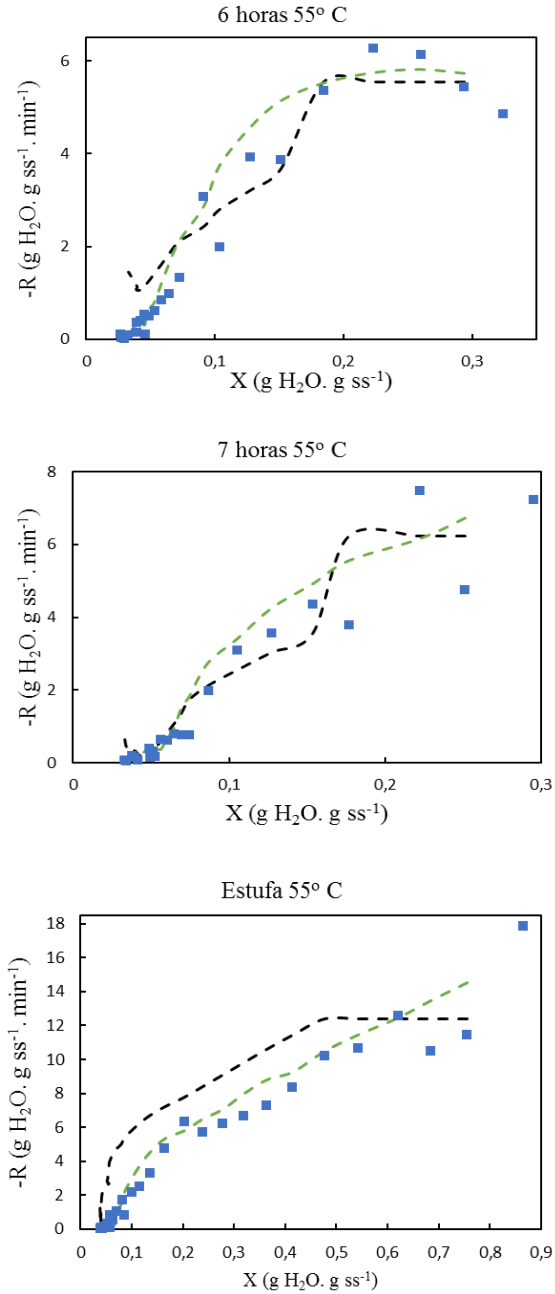
4 horas 55° C

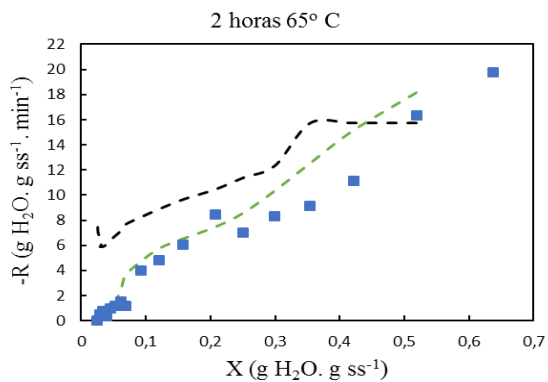
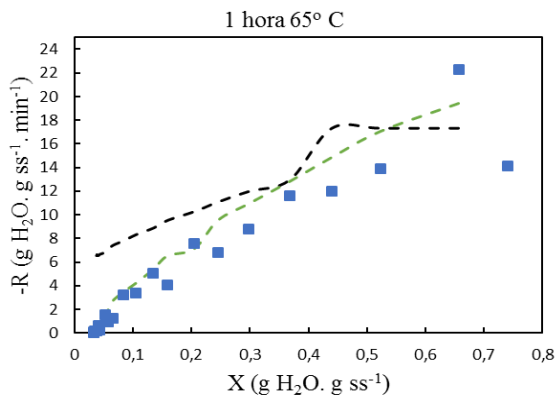


--- Duas Fases - - - Savitzky-Golay ■ Experimental

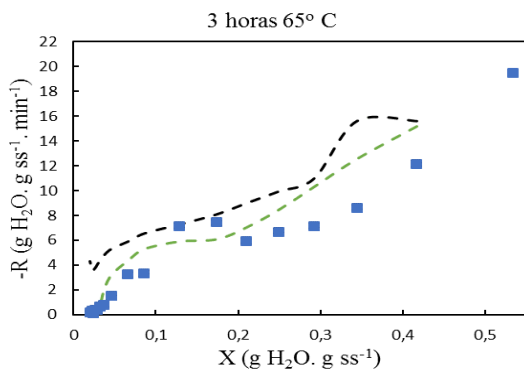
5 horas 55° C

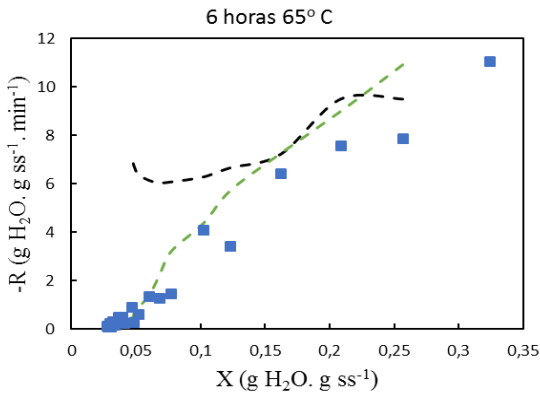
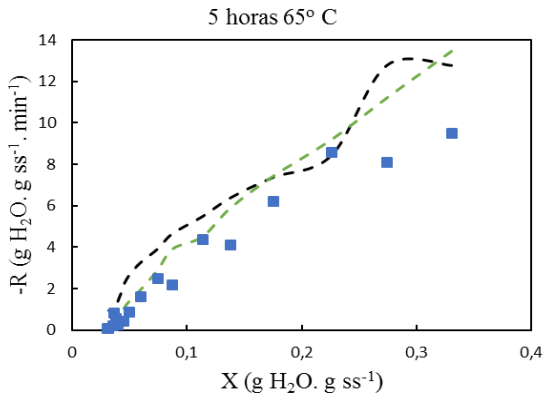
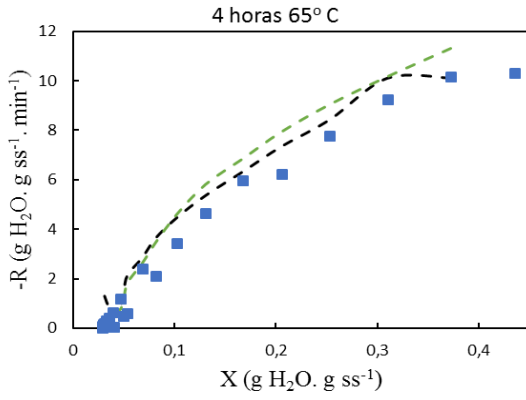


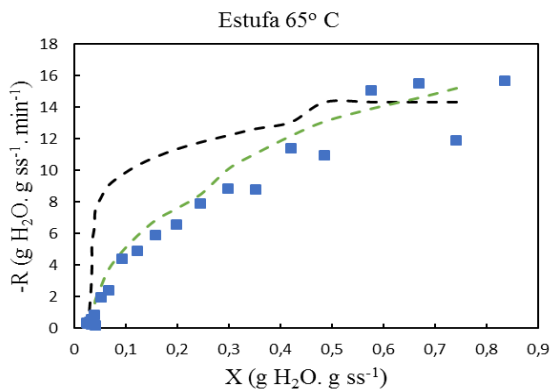
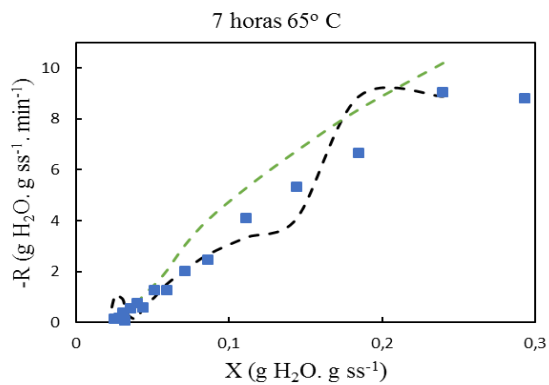




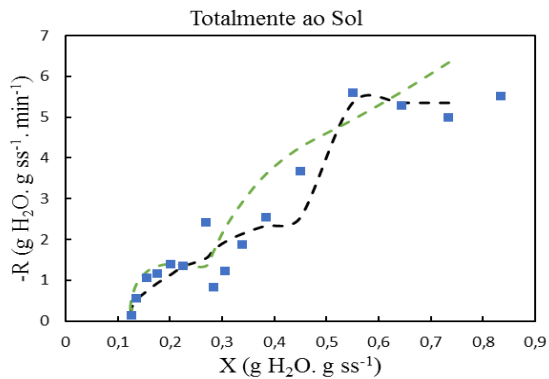
--- Duas Fases - - - Savitzky-Golay ■ Experimental







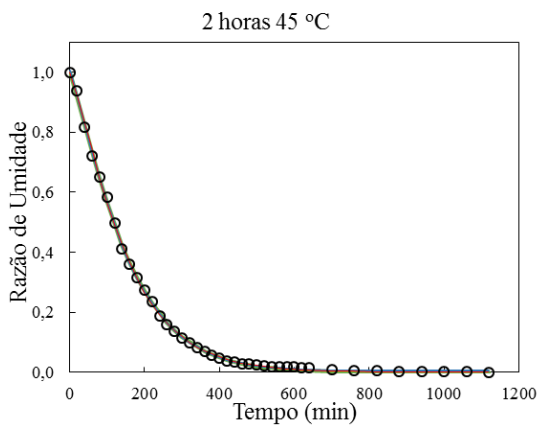
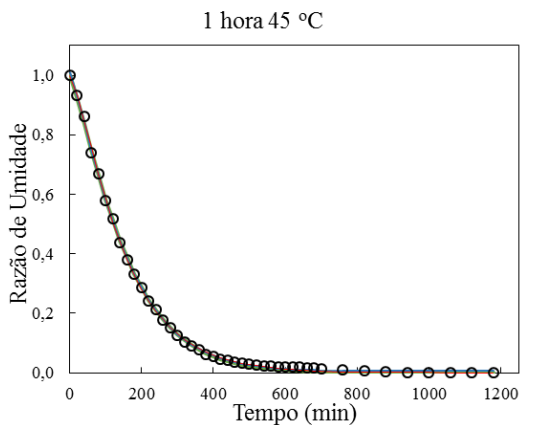
--- Duas Fases - - - Savitzky-Golay ■ Experimental



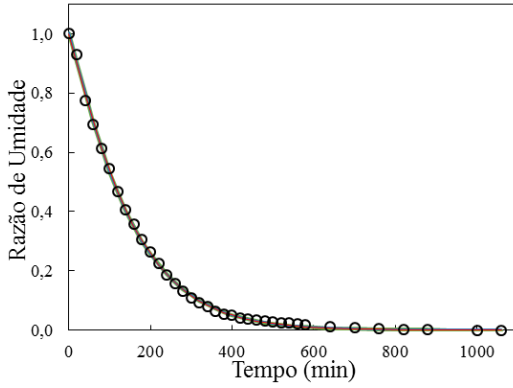
APÊNDICE B

Ajuste do modelo de Page, Midilli e Aproximação da Difusão aos dados experimentais para a secagem do polvilho azedo.

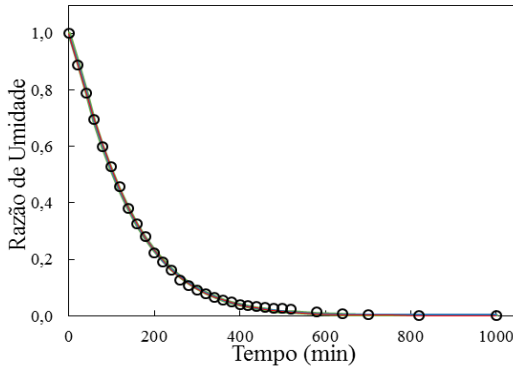
— Page — Midilli — Aprox. da Difusão ○ Experimental



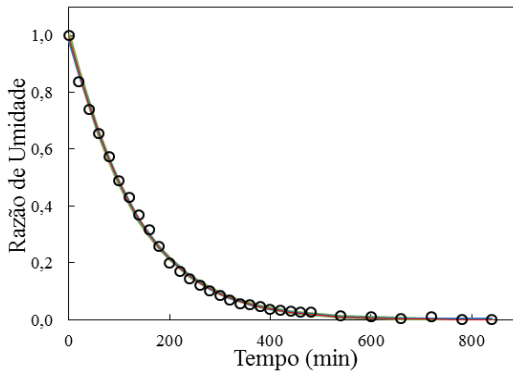
3 horas 45 °C



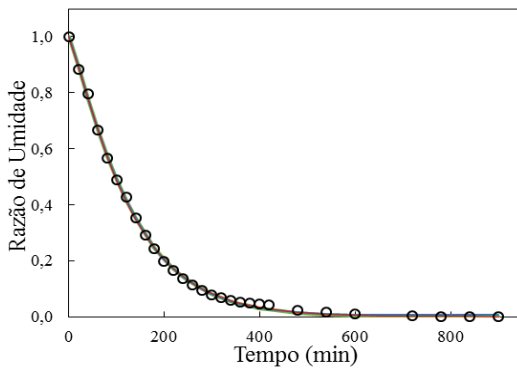
4 horas 45 °C



5 horas 45 °C

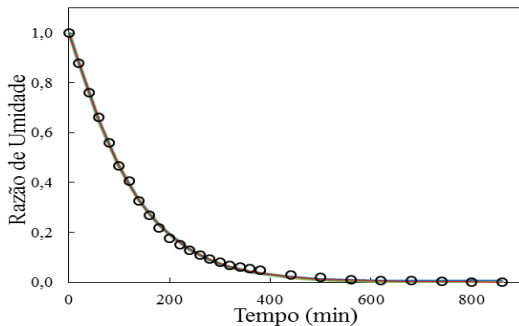


6 horas 45 °C

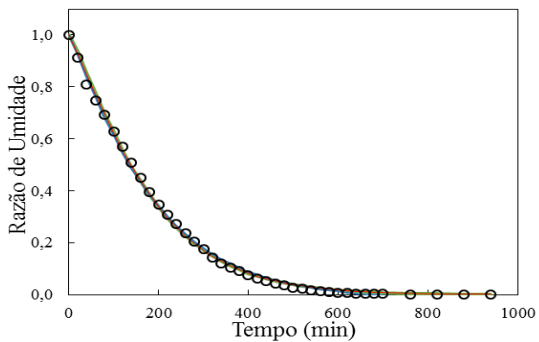


— Page — Midilli — Aprox. da Difusão ○ Experimental

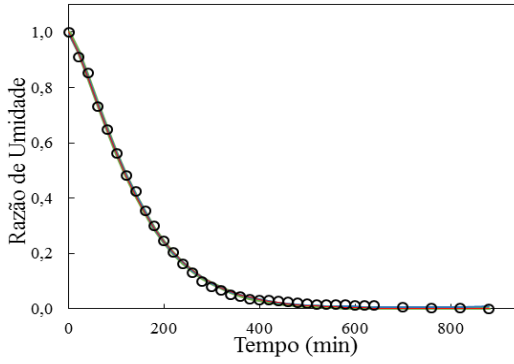
7 horas 45 °C



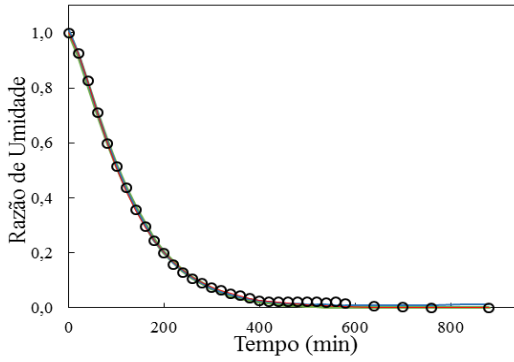
Estufa 45 °C



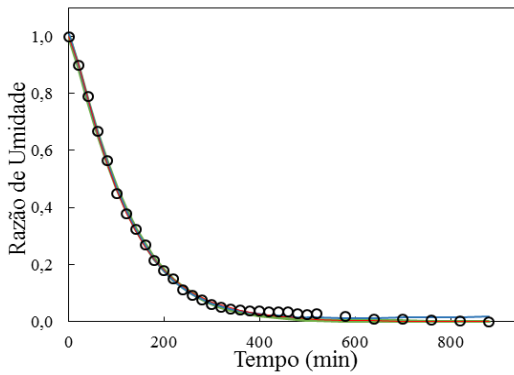
1 hora 55 °C



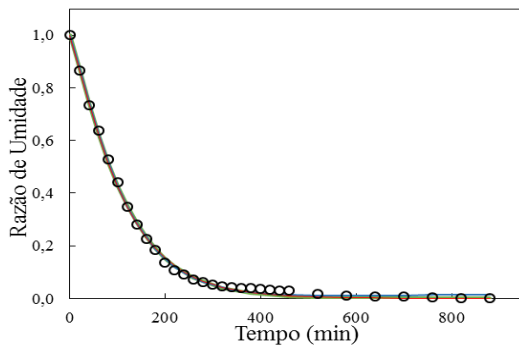
2 horas 55 °C



3 horas 55 °C

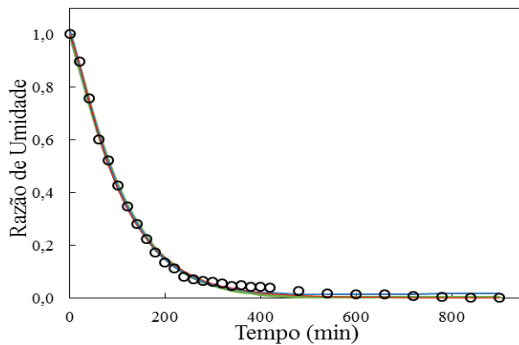


4 horas 55 °C

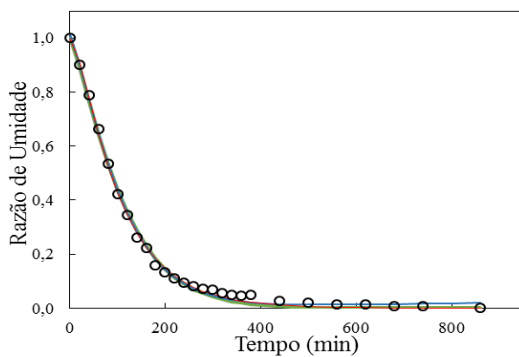


— Page — Midilli — Aprox. da Difusão ○ Experimental

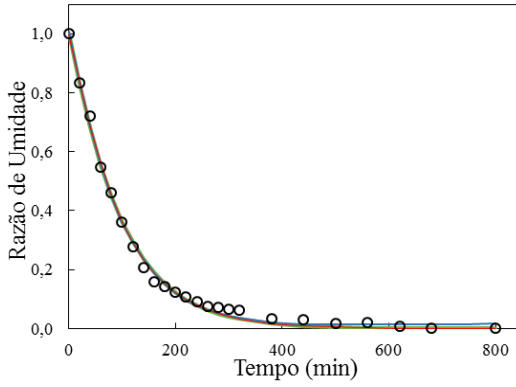
5 horas 55 °C



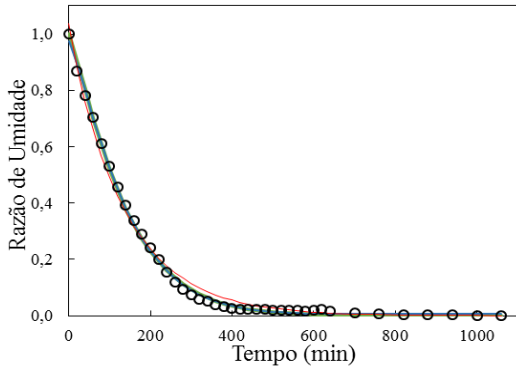
6 horas 55 °C



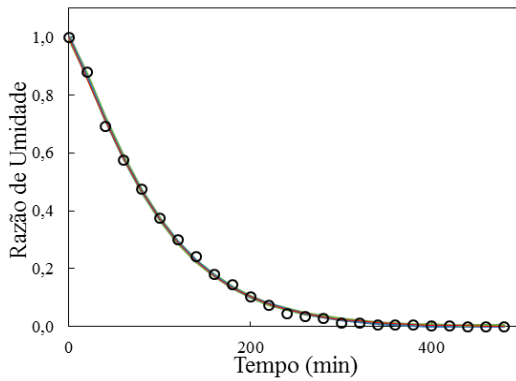
7 horas 55 °C



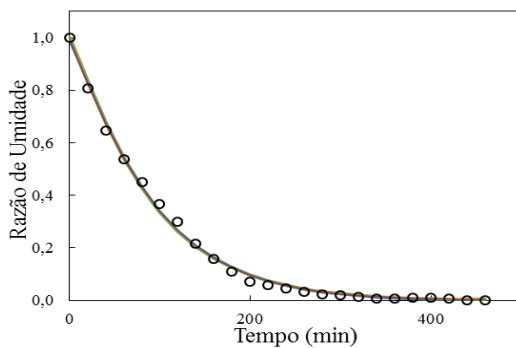
Estufa 55 °C



1 hora 65 °C

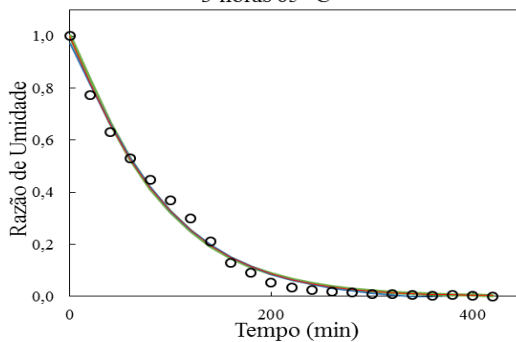


2 horas 65 °C

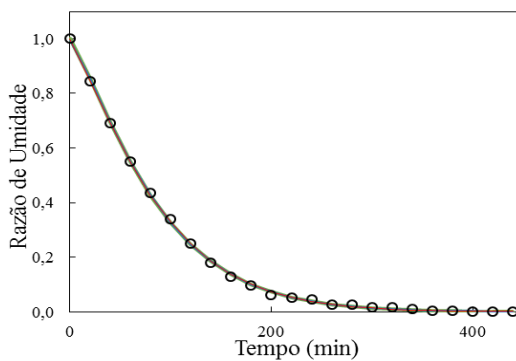


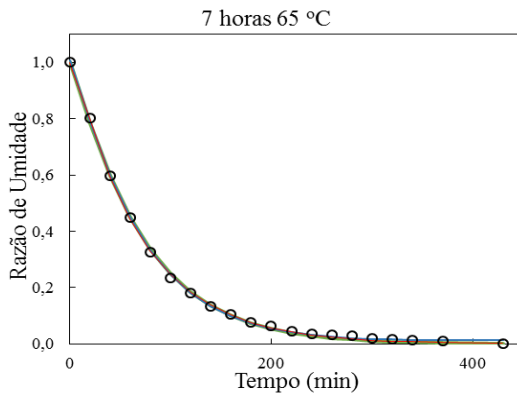
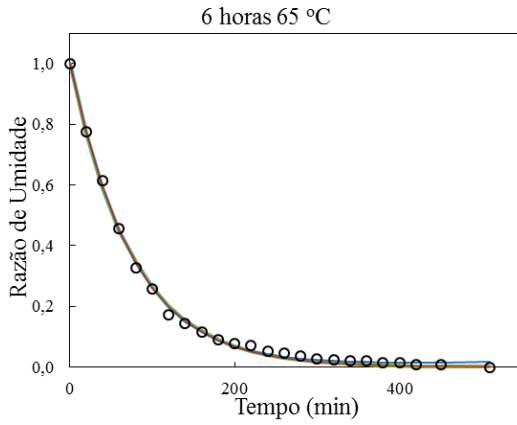
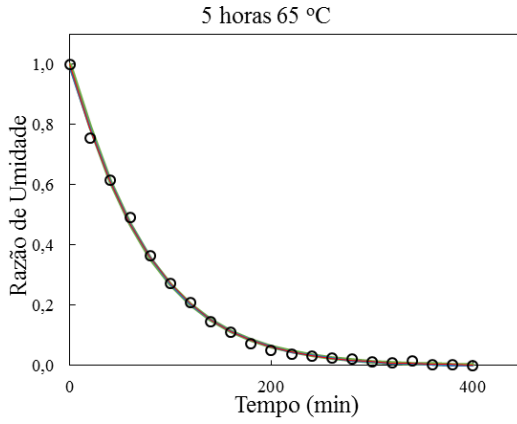
— Page — Midilli — Aprox. da Difusão ○ Experimental

3 horas 65 °C

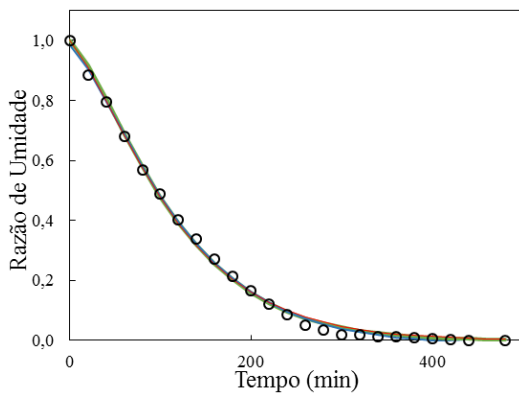


4 horas 65 °C



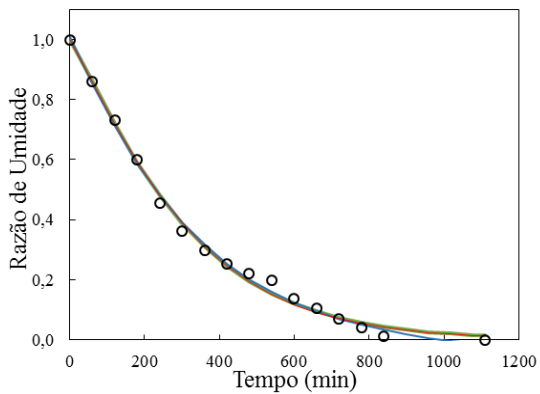


Estufa 65 °C



— Page — Midilli — Aprox. da Difusão ○ Experimental

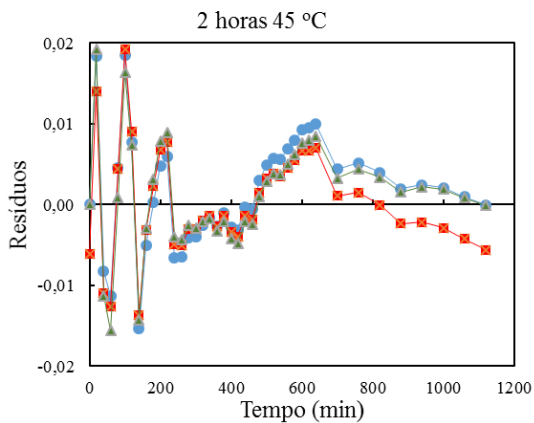
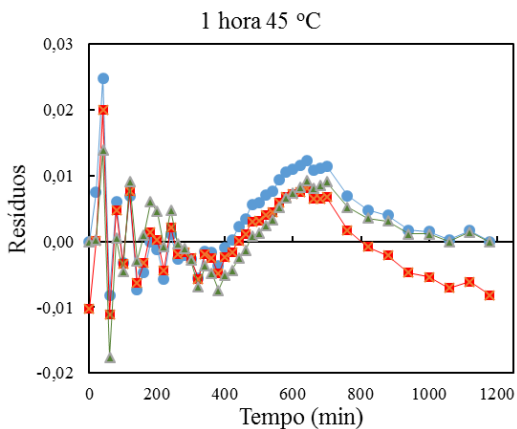
Totalmente ao Sol

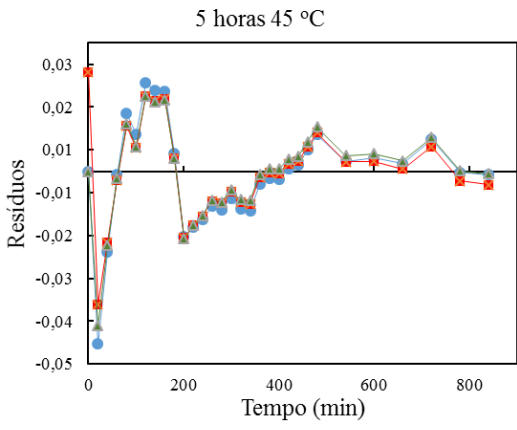
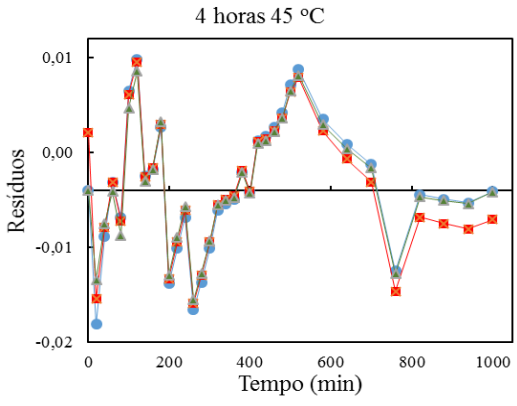
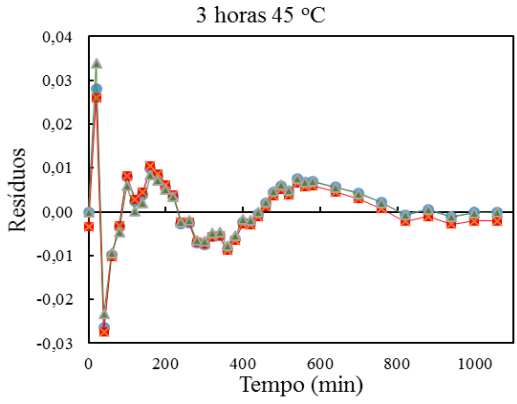


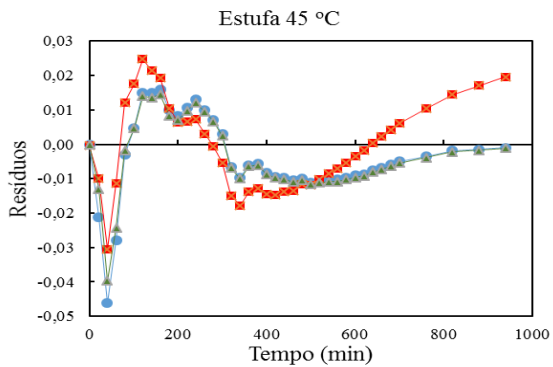
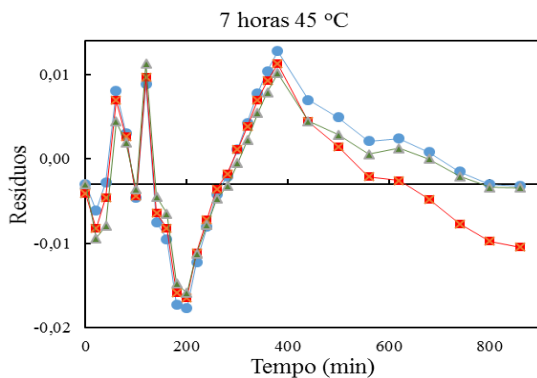
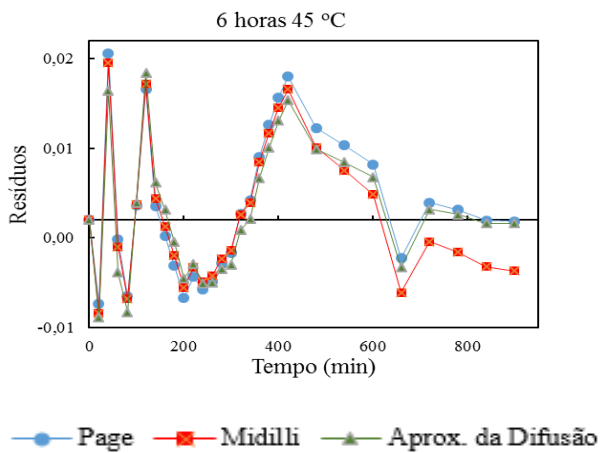
APÊNDICE C

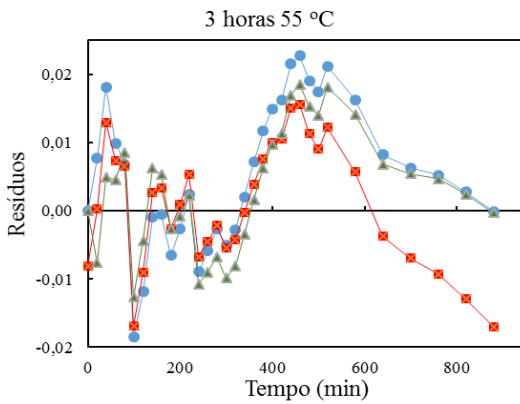
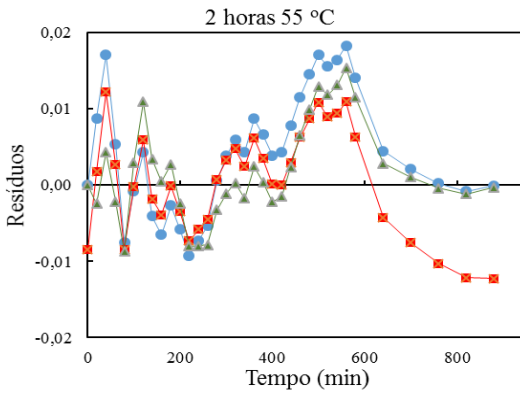
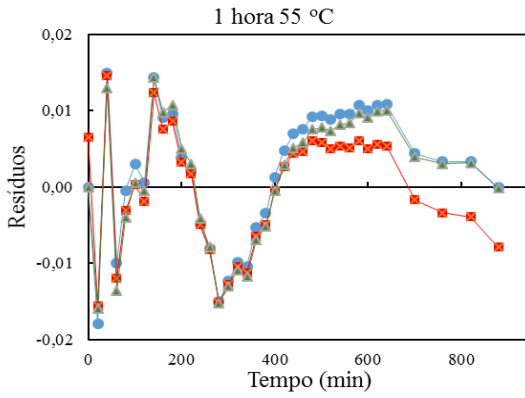
Resíduos dos modelos de Page, Midilli e Aproximação da Difusão.

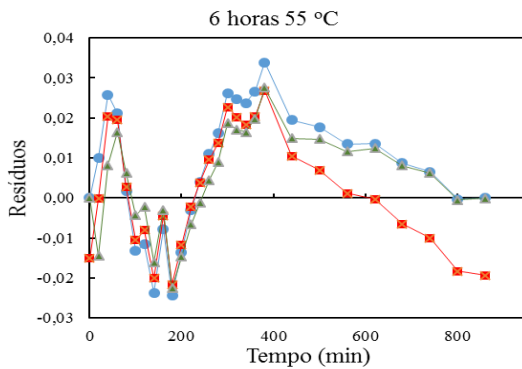
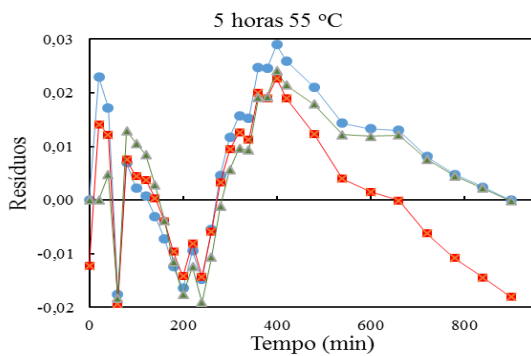
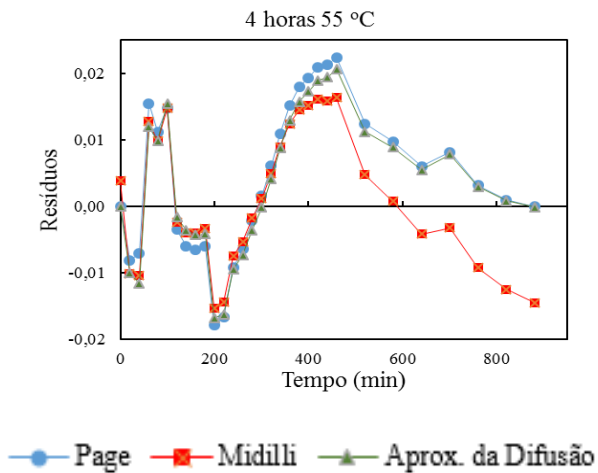
● Page ■ Midilli ▲ Aprox. da Difusão

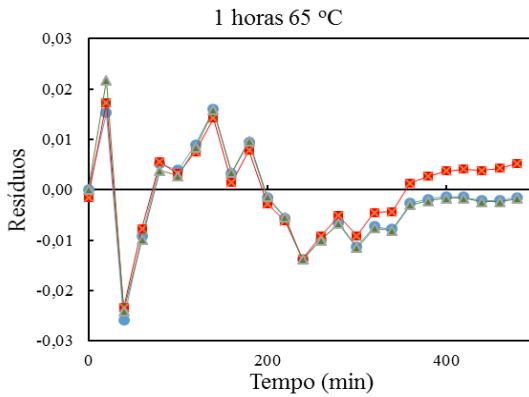
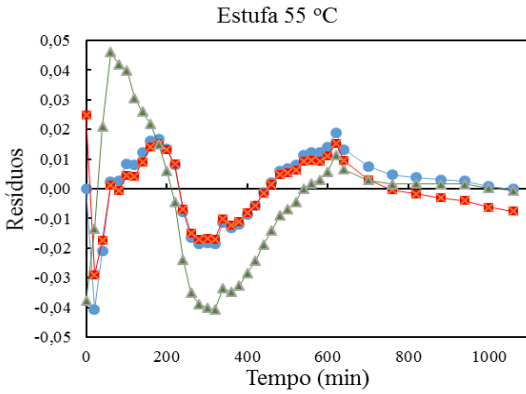
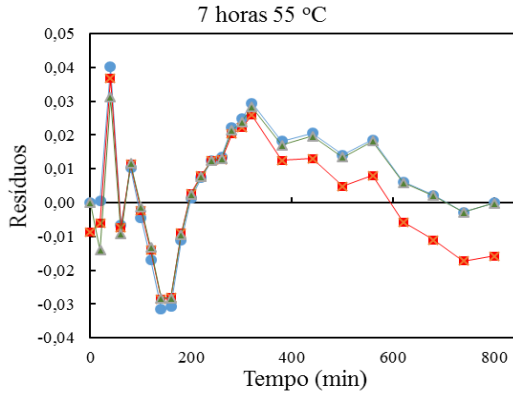


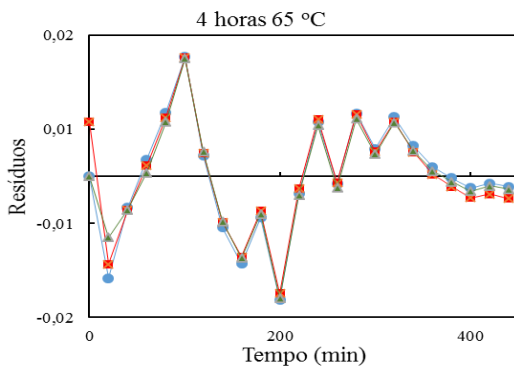
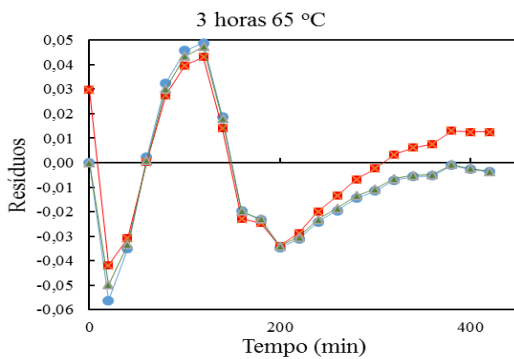
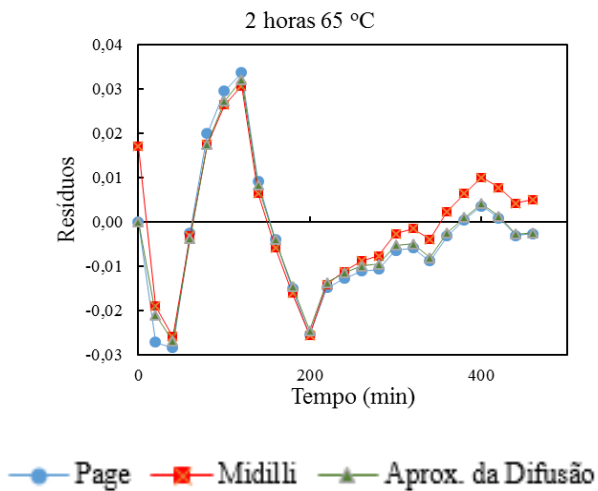


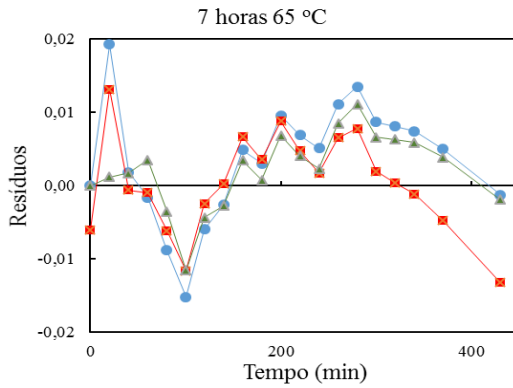
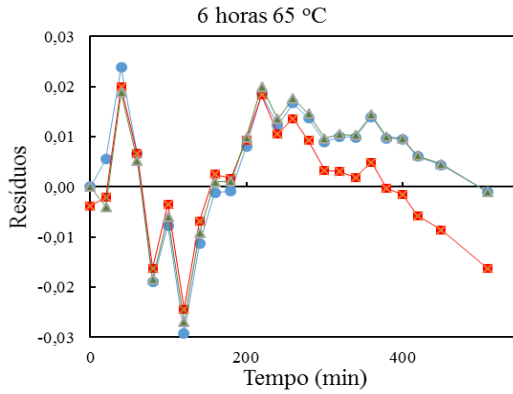
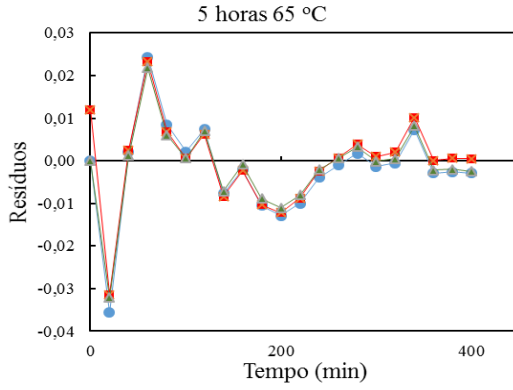


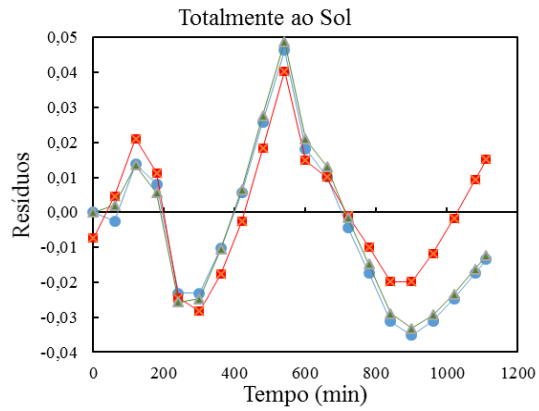
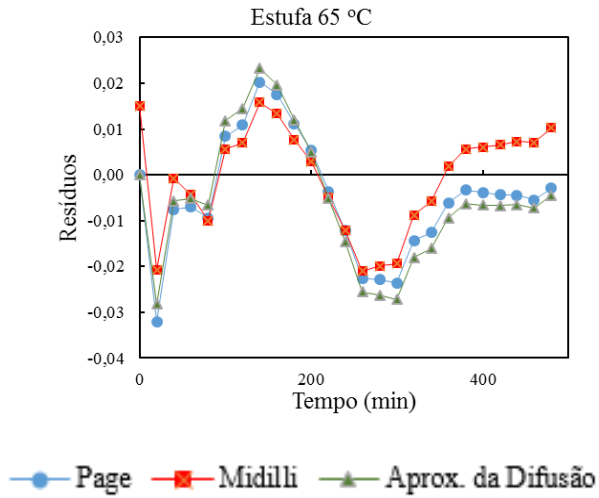












APÊNDICE D

Tabela - Resultados das propriedades de expansão dos biscoitos produzidos com polvilho azedo seco ao sol e em estufa a 45, 55 e 65°C.

Amostras	Perda de massa (%)			Índice de Expansão		
	45 °C	55 °C	65 °C	45 °C	55 °C	65 °C
1 h ao Sol	29,38 ^{abA} ± 1,32	28,01 ^{aA} ± 0,76	30,41 ^{abA} ± 1,68	1,53 ^{abA} ± 0,90	1,45 ^{aA} ± 0,20	1,56 ^{abA} ± 0,05
2 h ao Sol	30,29 ^{abA} ± 1,48	27,46 ^{aA} ± 0,66	27,75 ^{abA} ± 3,91	1,64 ^{abA} ± 0,03	1,62 ^{abA} ± 0,06	1,61 ^{abA} ± 0,03
3 h ao Sol	31,63 ^{abA} ± 0,70	29,86 ^{abA} ± 2,80	29,41 ^{abA} ± 6,21	1,71 ^{abA} ± 0,04	1,70 ^{abA} ± 0,14	1,69 ^{abA} ± 0,04
4 h ao Sol	32,16 ^{abA} ± 0,84	27,63 ^{abA} ± 3,43	30,44 ^{a,bA} ± 1,34	1,80 ^{bA} ± 0,09	1,68 ^{abA} ± 0,05	1,79 ^{cA} ± 0,03
5 h ao Sol	33,51 ^{abA} ± 1,72	30,50 ^{abA} ± 2,26	30,16 ^{abA} ± 1,34	1,84 ^{bA} ± 0,05	1,79 ^{bA} ± 0,04	1,78 ^{bA} ± 0,11
6 h ao Sol	32,78 ^{abA} ± 1,22	31,97 ^{abA} ± 0,26	30,56 ^{abA} ± 1,47	1,84 ^{bA} ± 0,07	1,78 ^{bA} ± 0,01	1,76 ^{bA} ± 0,12
7 h ao Sol	33,21 ^{abA} ± 0,53	31,44 ^{abA} ± 0,35	30,71 ^{abA} ± 2,23	1,79 ^{bA} ± 0,08	1,80 ^{bA} ± 0,05	1,81 ^{cA} ± 0,08
Estufa	29,50 ^{aA} ± 1,12	25,60 ^{aA} ± 2,81	26,35 ^{aA} ± 0,84	1,53 ^{aA} ± 0,07	1,44 ^{aA} ± 0,06	1,48 ^{aA} ± 0,04
Sol Curva	29,71 ^a ± 4,46	29,71 ^{ab} ± 4,46	29,71 ^{ab} ± 4,46	1,80 ^{bc} ± 0,12	1,80 ^{bc} ± 0,12	1,80 ^{cd} ± 0,12
Sol Revol	35,33 ^b ± 0,60	35,33 ^b ± 0,60	35,33 ^b ± 0,60	2,02 ^c ± 0,06	2,02 ^c ± 0,06	2,02 ^d ± 0,06
Amostras	Volume específico (mL.g ⁻¹)			Densidade específica (g.mL ⁻¹)		
	45 °C	55 °C	65 °C	45 °C	55 °C	65 °C
1 h ao Sol	3,53 ^{abA} ± 1,06	2,36 ^{aA} ± 0,18	3,40 ^{abA} ± 0,61	0,31 ^{cA} ± 0,08	0,43 ^{dA} ± 0,02	0,30 ^{bA} ± 0,06
2 h ao Sol	4,22 ^{abA} ± 1,23	3,70 ^{abA} ± 0,55	3,43 ^{abA} ± 0,41	0,25 ^{bA} ± 0,07	0,27 ^{cA} ± 0,05	0,29 ^{bA} ± 0,04
3 h ao Sol	5,86 ^{bA} ± 0,51	4,95 ^{bA} ± 1,33	4,58 ^{abA} ± 0,90	0,17 ^{abA} ± 0,02	0,21 ^{abA} ± 0,06	0,22 ^{abA} ± 0,05
4 h ao Sol	5,91 ^{bA} ± 0,58	4,49 ^{abA} ± 0,38	4,96 ^{abAB} ± 0,90	0,17 ^{abA} ± 0,02	0,22 ^{bA} ± 0,02	0,20 ^{abAB} ± 0,05
5 h ao Sol	6,24 ^{cdA} ± 0,56	5,19 ^{cA} ± 0,16	5,19 ^{bA} ± 0,66	0,16 ^{abA} ± 0,02	0,19 ^{abA} ± 0,05	0,19 ^{abA} ± 0,03
6 h ao Sol	5,39 ^{bA} ± 0,72	6,11 ^{cA} ± 0,90	5,28 ^{bA} ± 0,94	0,18 ^{abA} ± 0,02	0,16 ^{abA} ± 0,02	0,19 ^{abA} ± 0,03
7 h ao Sol	5,59 ^{bA} ± 0,60	5,95 ^{cA} ± 0,96	5,68 ^{bA} ± 1,11	0,18 ^{abA} ± 0,02	0,17 ^{abA} ± 0,03	0,18 ^{abA} ± 0,04
Estufa	2,30 ^{aA} ± 0,42	2,57 ^{abA} ± 0,22	2,51 ^{aA} ± 0,44	0,47 ^{dA} ± 0,01	0,39 ^{dA} ± 0,03	0,41 ^{cA} ± 0,08

Sol Curva	5,77 ^{bc} ± 1,74	5,77 ^c ± 1,74	5,77 ^b ± 1,74	0,18 ^{ab} ± 0,06	0,18 ^{ab} ± 0,06	0,18 ^{ab} ± 0,06
Sol Revol	8,80 ^d ± 0,92	8,80 ^d ± 0,92	8,80 ^c ± 0,92	0,11 ^a ± 0,02	0,11 ^a ± 0,02	0,11 ^a ± 0,02

* Média de 6 biscoitos ± Desvio Padrão

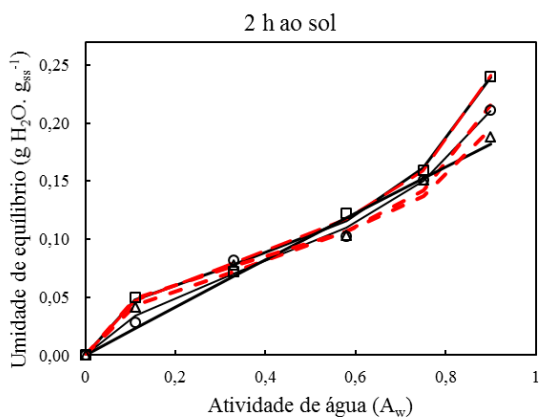
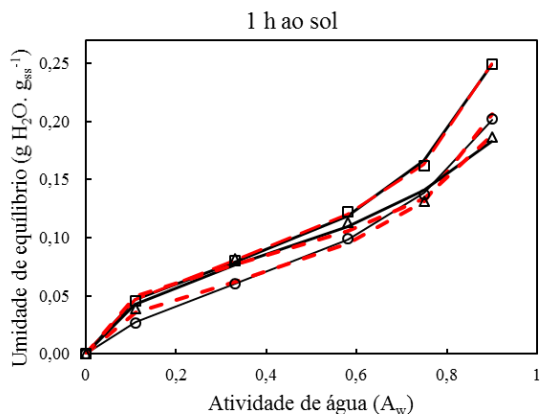
**Valores seguidos de letras minúsculas iguais na mesma coluna não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

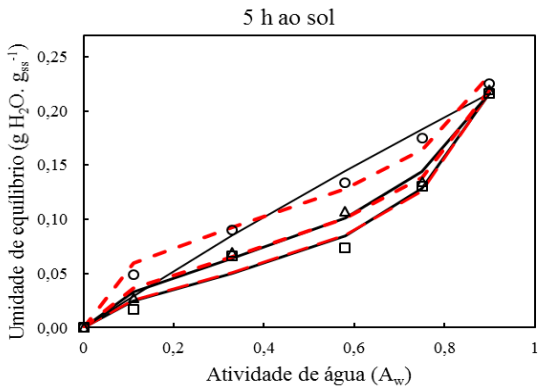
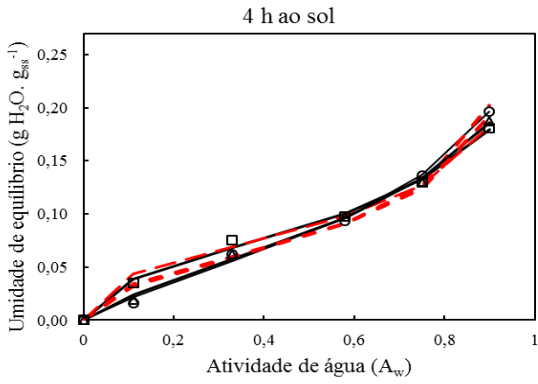
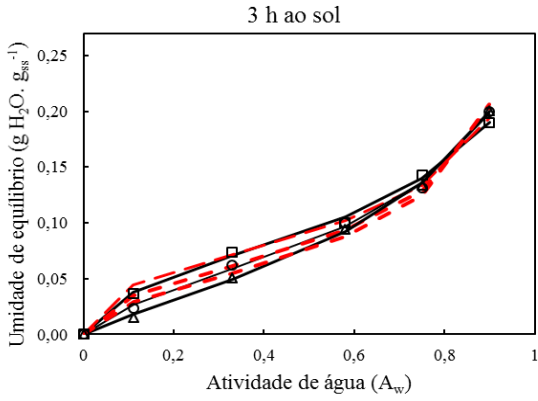
***Valores seguidos de letras maiúsculas iguais na mesma linha não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

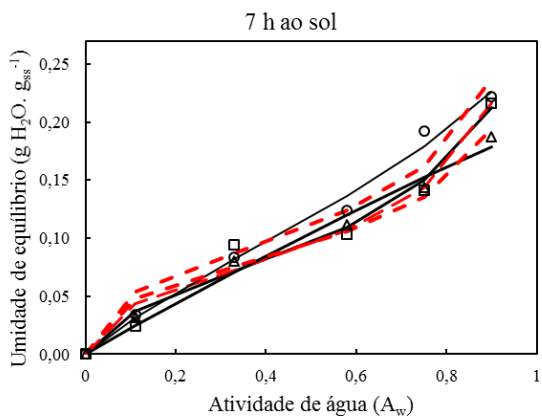
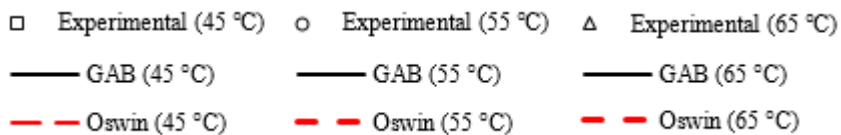
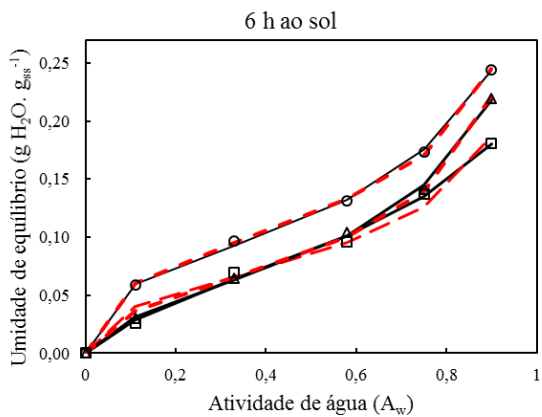
APÊNDICE E

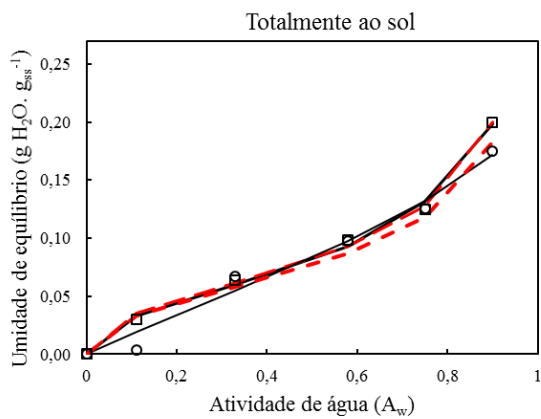
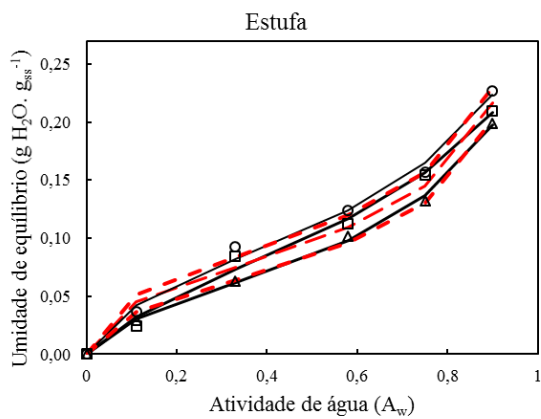
Isotermas de adsorção de umidade para o amido de mandioca fermentado exposto por diferentes tempos ao sol e secagem continuada em estufa a 45, 55 e 65 °C com ajustes pelo modelo de GAB e Oswin.

- Experimental (45 °C) ○ Experimental (55 °C) △ Experimental (65 °C)
 — GAB (45 °C) — GAB (55 °C) — GAB (65 °C)
 - - - Oswin (45 °C) - - - Oswin (55 °C) - - - Oswin (65 °C)





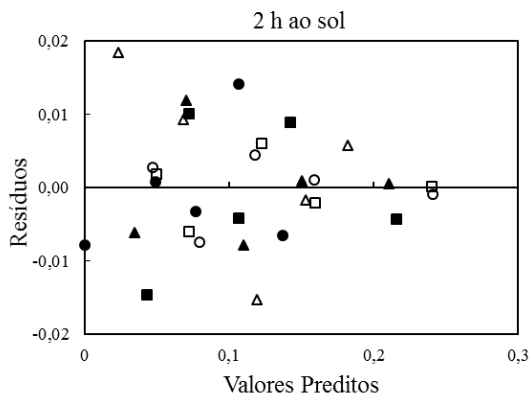
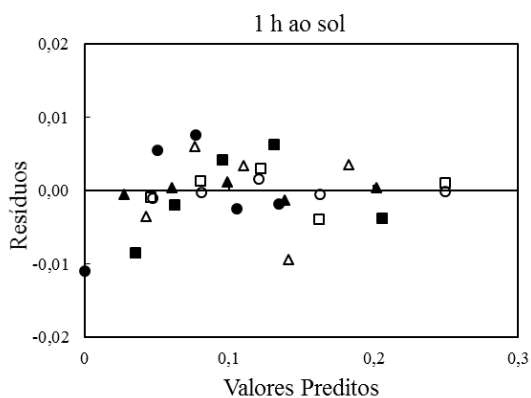


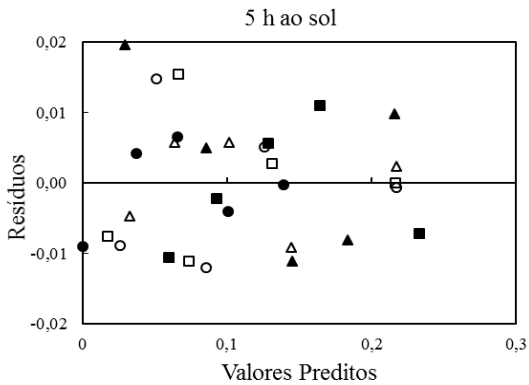
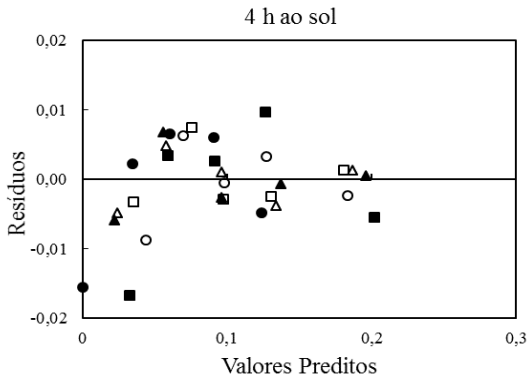
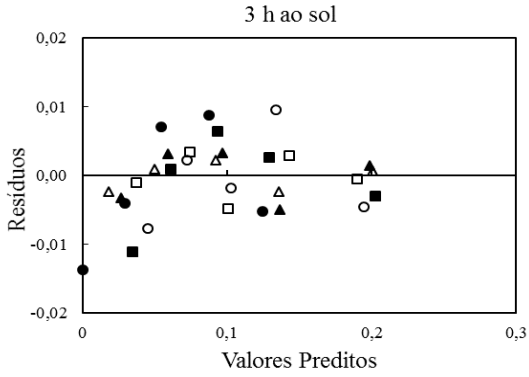


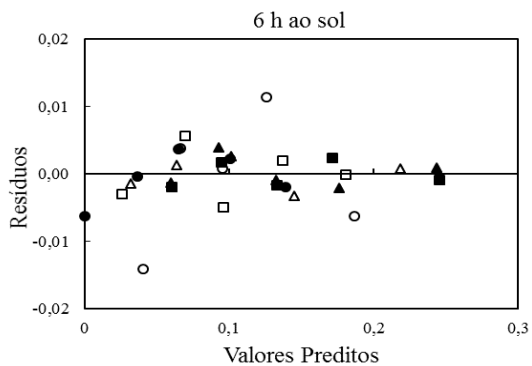
APÊNDICE F

Resíduos dos ajustes dos modelos de GAB e Oswin para o amido de mandioca fermentado exposto por diferentes tempos ao sol e secagem continuada em estufa a 45, 55 e 65 °C.

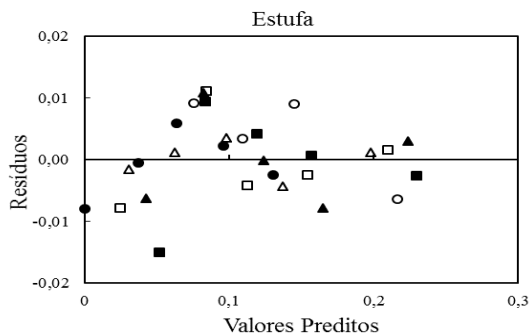
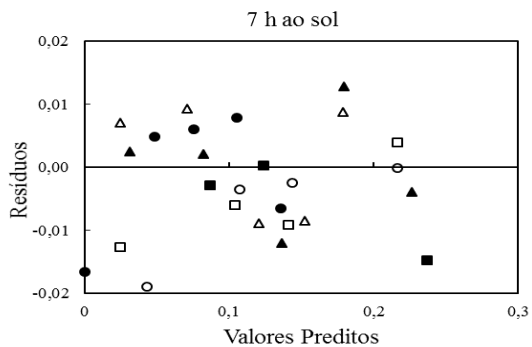
□ GAB (45 °C) ▲ GAB (55 °C) △ GAB (65 °C)
○ Oswin (45 °C) ■ Oswin (55 °C) ● Oswin (65 °C)

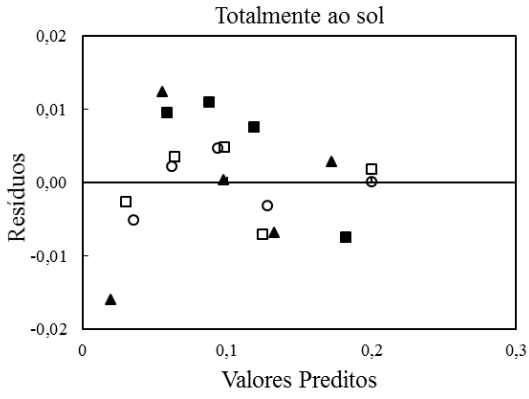






□ GAB (45 °C) ▲ GAB (55 °C) △ GAB (65 °C)
 ○ Oswin (45 °C) ■ Oswin (55 °C) ● Oswin (65 °C)

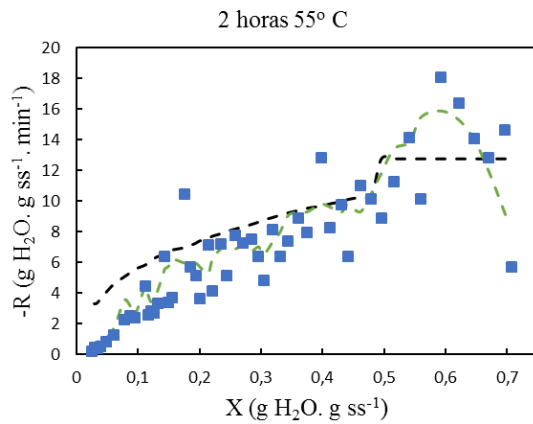
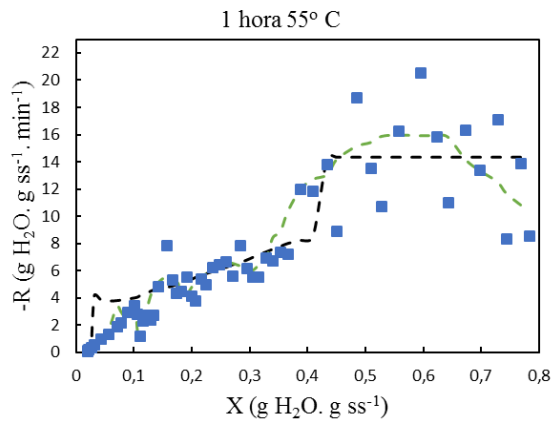


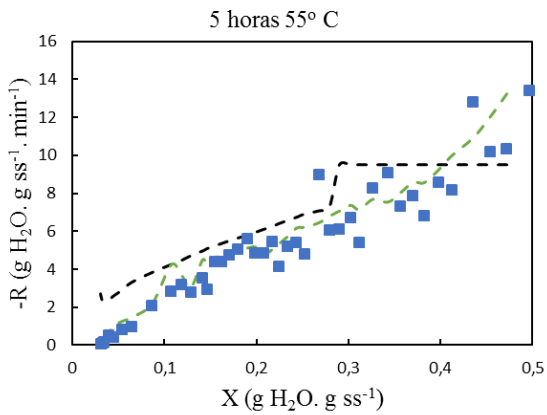
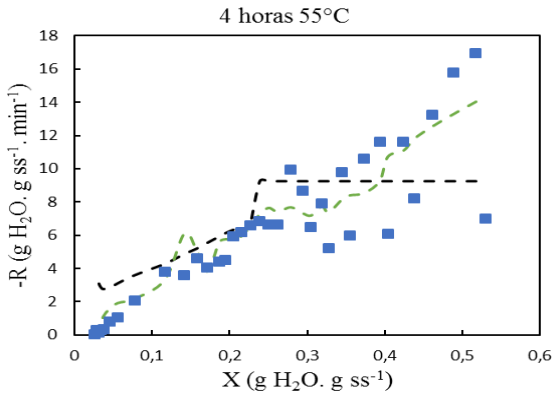
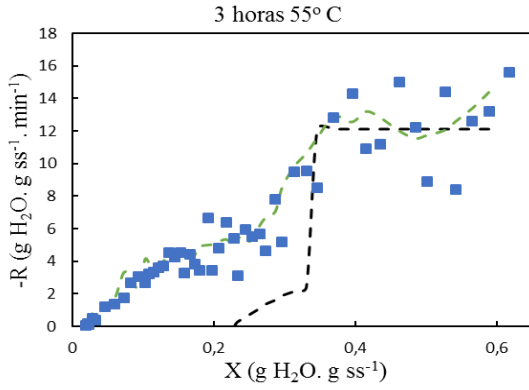


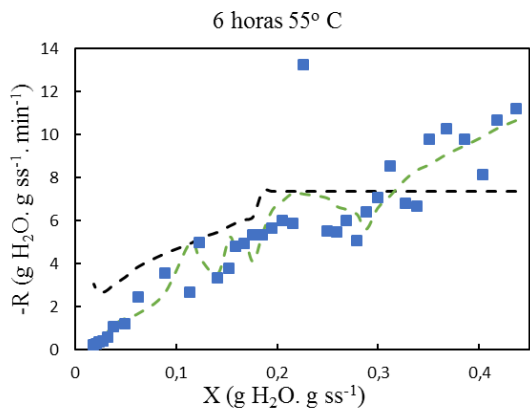
APÊNDICE G

Comparação das taxas de secagem em função da umidade para os dados experimentais, função de suavização Savitzky-Golay e modelo de duas fases para o amido fermentando de mandioca cultivar Moura (polvilho azedo) exposto por diferentes tempos ao sol.

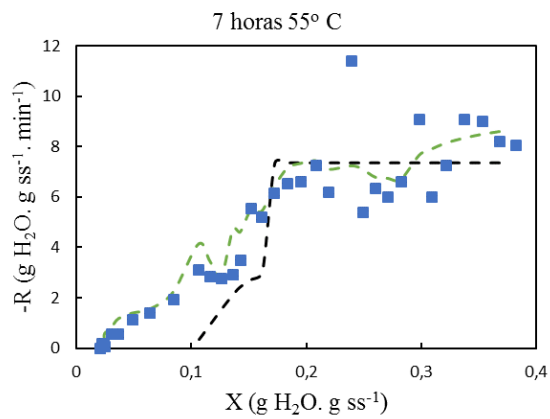
-- Duas Fases - - - Savitzky-Golay ■ Experimental







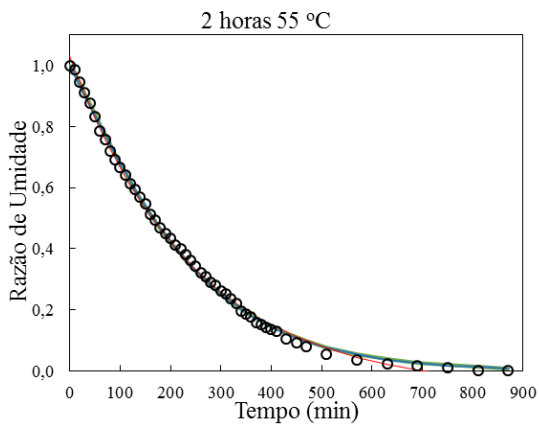
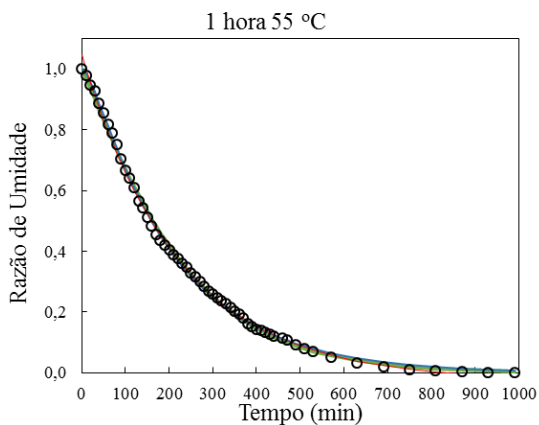
--- Duas Fases - - - Savitzky-Golay ■ Experimental

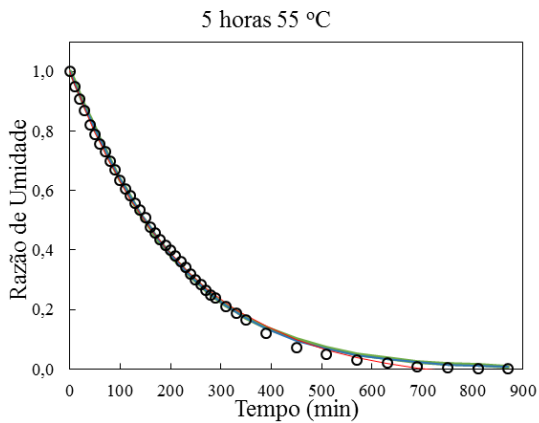
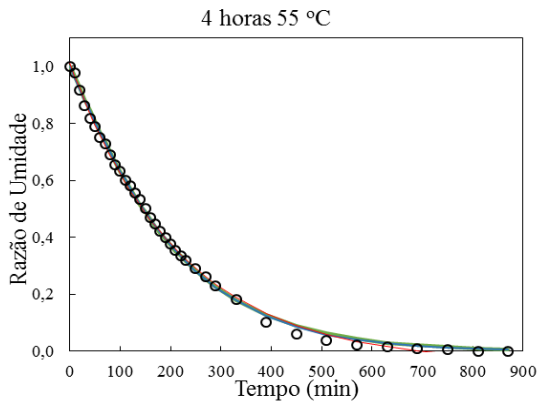
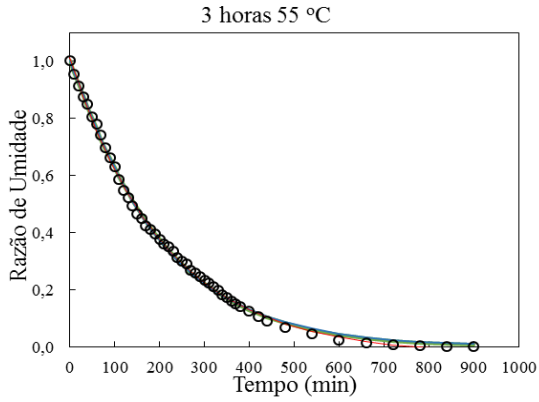


APÊNDICE H

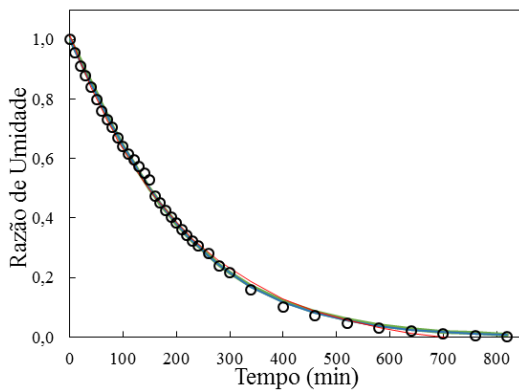
Ajuste do modelo de Page, Aproximação da Difusão e Logarítmico aos dados experimentais de secagem do amido de mandioca fermentado (polvilho azedo) exposto por diferentes tempos ao sol com secagem continuada em estufa convectiva a 55 °C.

— Page — Midilli — Aprox. da Difusão ○ Experimental



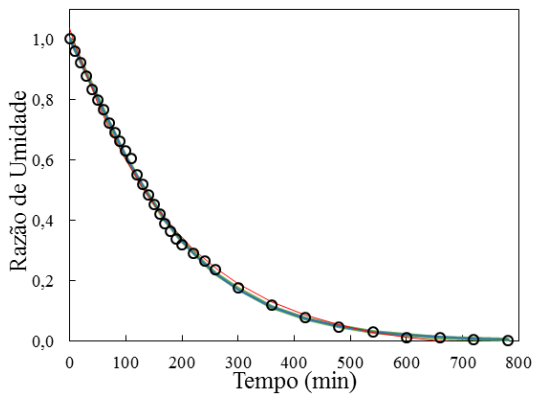


6 horas 55 °C



— Page — Midilli — Aprox. da Difusão ○ Experimental

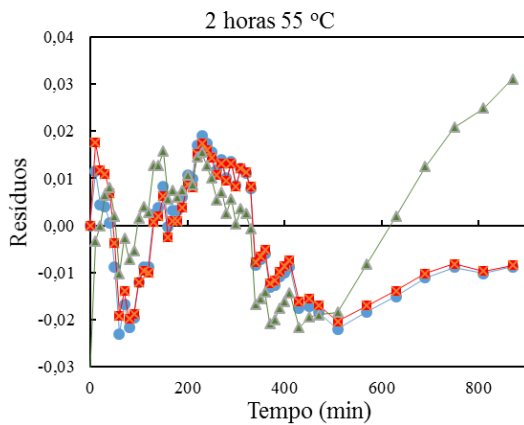
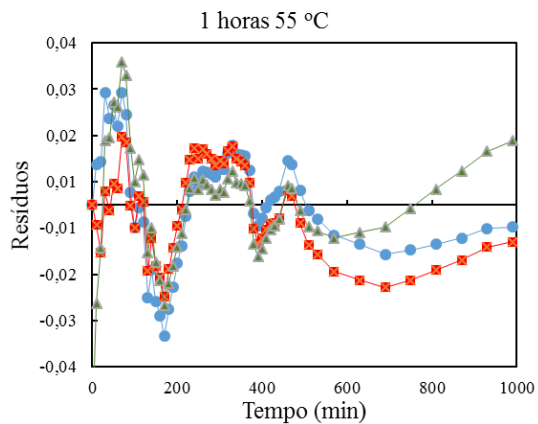
7 horas 55 °C

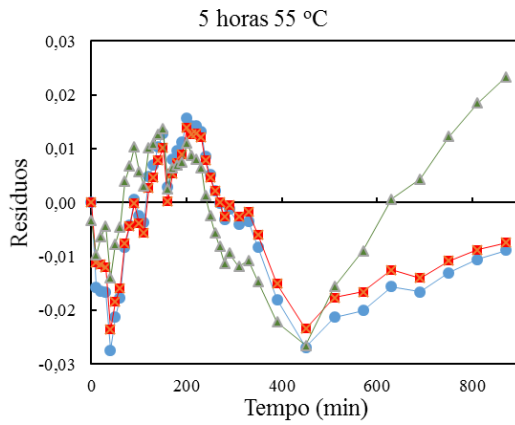
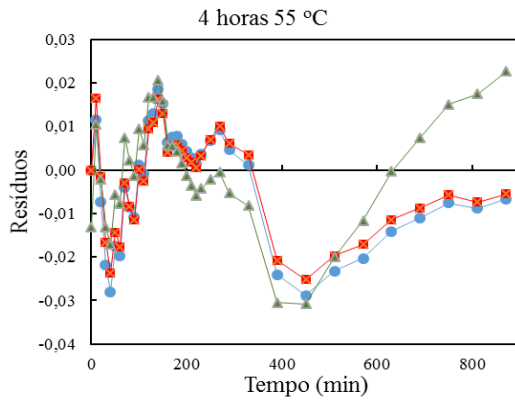
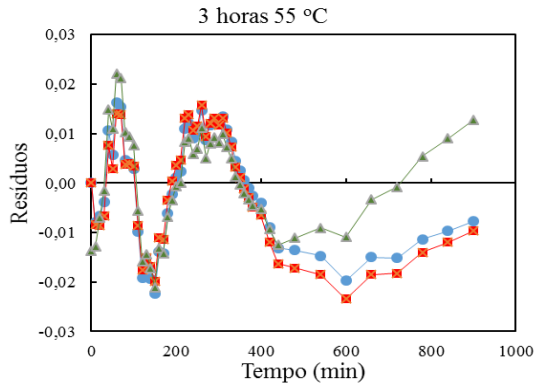


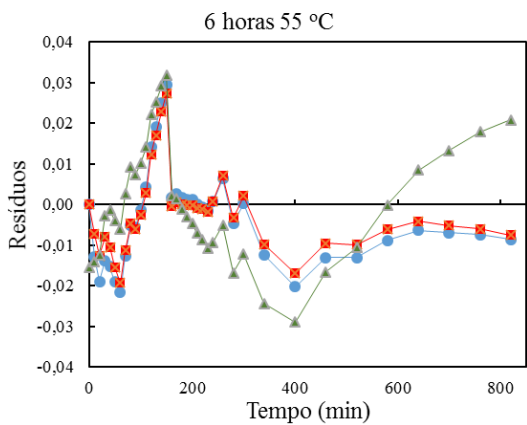
APÊNDICE I

Resíduos dos modelos de Page, Aproximação da Difusão e Logarítmico.

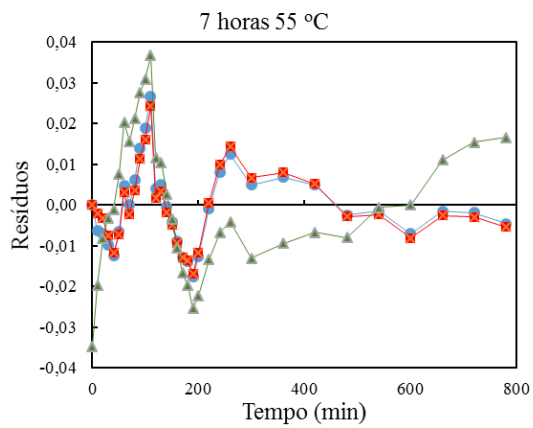
—●— Page —■— Midilli —▲— Aprox. da Difusão







● Page ■ Midilli ▲ Aprox. da Difusão



APÊNDICE J

Tabela - Resultados de expansão dos biscoitos obtidos do polvilho do cultivar de mandioca Moura seco a 55 °C, com e sem revolvimento quando exposto ao sol.

Amostras	Perda de massa (%)		Índice de Expansão	
	Sem Revolvimento	Com Revolvimento	Sem Revolvimento	Com Revolvimento
1 h ao Sol	26,77 ^{aA} ± 1,02	30,67 ^{abB} ± 2,36	1,78 ^{abA} ± 0,12	2,03 ^{bb} ± 0,04
2 h ao Sol	27,54 ^{aA} ± 1,51	29,49 ^{ab} ± 0,68	1,74 ^{abA} ± 0,10	2,20 ^{bb} ± 0,06
3 h ao Sol	27,54 ^{aA} ± 1,58	34,45 ^{abcB} ± 2,49	1,84 ^{abcA} ± 0,10	2,15 ^{bb} ± 0,06
4 h ao Sol	29,40 ^{abA} ± 0,85	36,51 ^{cb} ± 5,55	1,90 ^{bcA} ± 0,14	2,14 ^{bb} ± 0,11
5 h ao Sol	26,99 ^{aA} ± 1,74	30,69 ^{abB} ± 1,90	1,80 ^{abA} ± 0,11	2,11 ^{bb} ± 0,22
6 h ao Sol	27,91 ^{aA} ± 1,23	34,67 ^{abcB} ± 2,12	1,93 ^{bcdA} ± 0,07	2,18 ^{bb} ± 0,08
7 h ao Sol	31,70 ^{bcA} ± 1,71	36,98 ^{cb} ± 2,32	2,05 ^{cdeA} ± 0,14	2,20 ^{aA} ± 0,11
Estufa	30,92 ^{ab} ± 2,48	30,92 ^{ab} ± 2,48	1,69 ^a ± 0,13	1,69 ^a ± 0,13
Sol Moura	34,99 ^c ± 2,68	34,99 ^{bc} ± 2,68	2,12 ^{de} ± 0,18	2,12 ^b ± 0,18
Sol Mix	34,91 ^c ± 2,23	34,91 ^{bc} ± 2,23	2,17 ^e ± 0,08	2,17 ^b ± 0,08
Amostras	Volume específico (mL/g)		Densidade específica (g/mL)	
	Sem Revolvimento	Com Revolvimento	Sem Revolvimento	Com Revolvimento
1 h ao Sol	3,88 ^{abA} ± 0,66	8,52 ^{bb} ± 1,14	0,27 ^{cb} ± 0,05	0,12 ^{aA} ± 0,02
2 h ao Sol	5,87 ^{bcA} ± 0,47	8,52 ^{bb} ± 0,51	0,17 ^{abb} ± 0,01	0,12 ^{aA} ± 0,01
3 h ao Sol	6,89 ^{cdA} ± 0,65	11,09 ^{cdB} ± 1,06	0,15 ^{abb} ± 0,01	0,09 ^{aA} ± 0,01
4 h ao Sol	8,60 ^{deA} ± 0,72	10,43 ^{bcdB} ± 1,15	0,12 ^{abb} ± 0,01	0,10 ^{aA} ± 0,01

5 h ao Sol	5,79 ^{bcA} ± 1,28	11,23 ^{cdB} ± 0,71	0,18 ^{bB} ± 0,03	0,09 ^{aA} ± 0,01
6 h ao Sol	6,99 ^{cdA} ± 0,85	11,62 ^{dB} ± 1,31	0,14 ^{abB} ± 0,02	0,09 ^{aA} ± 0,01
7 h ao Sol	9,99 ^{eA} ± 1,51	11,58 ^{dB} ± 0,75	0,10 ^{aB} ± 0,01	0,09 ^{aA} ± 0,01
Estufa	2,77 ^a ± 0,77	2,77 ^a ± 0,77	0,34 ^d ± 0,09	0,34 ^b ± 0,09
Sol Moura	8,82 ^{de} ± 2,88	8,82 ^{bc} ± 2,88	0,13 ^{ab} ± 0,05	0,13 ^a ± 0,05
Sol Mix	9,67 ^e ± 0,82	9,67 ^{bcd} ± 0,82	0,10 ^a ± 0,01	0,10 ^a ± 0,01

*Média de 6 biscoitos ± desvio padrão.

**Valores seguidos de letras minúsculas iguais na mesma coluna não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5 % de probabilidade.

***Valores seguidos de letras maiúsculas iguais na mesma linha não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5 % de probabilidade.