

BIANCA CRISTINE MARQUES

**MODELAGEM E VALIDAÇÃO EXPERIMENTAL DA SECAGEM
CONVECTIVA DE FATIAS DE YACÓN (*Smallanthus sonchifolius*)**

São Paulo

2023

BIANCA CRISTINE MARQUES

**MODELAGEM E VALIDAÇÃO EXPERIMENTAL DA SECAGEM
CONVECTIVA DE FATIAS DE YACÓN (*Smallanthus sonchifolius*)**

Versão revisada

Tese apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, para obtenção do título de Doutor em Ciências.

Área de Concentração: Engenharia Química

Orientadora: Carmen Cecilia Tadini

São Paulo


2023

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Este exemplar foi revisado e corrigido em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, 17 de agosto de 2023

Assinatura do autor: Bianca Cristine Marques

Assinatura do orientador:  **CARMEN CECILIA TADINI**
Data: 19/08/2023 11:37:19-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Documento assinado digitalmente

Catálogo-na-publicação

Marques, Bianca
MODELAGEM E VALIDAÇÃO EXPERIMENTAL DA SECAGEM
CONVECTIVA DE FATIAS DE YACÓN (*Smallanthus sonchifolius*) / B. Marques
-- versão corr. -- São Paulo, 2023.
164 p.

Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
Departamento de Engenharia Química.

1.Secagem 2.Cinética 3.Propriedades termofísicas 4.Encolhimento
5.Simulação I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento
de Engenharia Química II.t.



ATA DE DEFESA

Aluno: 3137 - 7130252 - 2 / Página 1 de 1

Ata de defesa de Tese do(a) Senhor(a) Bianca Cristine Marques no Programa: Engenharia Química, do(a) Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

Aos 10 dias do mês de julho de 2023, no(a) realizou-se a Defesa da Tese do(a) Senhor(a) Bianca Cristine Marques, apresentada para a obtenção do título de Doutora intitulada:

"Modelagem e validação experimental da secagem convectiva de fatias de yacón (*Smallanthus sonchifolius*)"

Após declarada aberta a sessão, o(a) Sr(a) Presidente passa a palavra ao candidato para exposição e a seguir aos examinadores para as devidas arguições que se desenvolvem nos termos regimentais. Em seguida, a Comissão Julgadora proclama o resultado:

Nome dos Participantes da Banca	Função	Sigla da CPG	Resultado
Carmen Cecilia Tadini	Presidente	EP - USP	<u>aprovada</u>
Gabriela Alves Macedo	Titular	unicamp - Externo	<u>aprovada</u>
Livia Chaguri e Carvalho	Titular	EEL - USP	<u>aprovada</u>
Caciano Pelayo Zapata Noreña	Titular	UFRGS - Externo	<u>aprovada</u>
Gustavo Nakamura Alves Vieira	Suplente	UNESP - Externo	<u>aprovada</u>

Resultado Final: aprovada por unanimidade

Parecer da Comissão Julgadora *

Eu, Elias Alves de Almeida _____, lavrei a presente ata, que assino juntamente com os(as) Senhores(as). São Paulo, aos 10 dias do mês de julho de 2023.

f/
Gabriela Alves Macedo

f/
Livia Chaguri e Carvalho

f/
Caciano Pelayo Zapata Noreña

Carmen Cecilia Tadini

f/
Gustavo Nakamura Alves Vieira

Presidente da Comissão Julgadora

* Obs: Se o candidato for reprovado por algum dos membros, o preenchimento do parecer é obrigatório.

A defesa foi homologada pela Comissão de Pós-Graduação em _____ e, portanto, o(a) aluno(a) _____ jus ao título de Doutora em Ciências obtido no Programa Engenharia Química.

Presidente da Comissão de Pós-Graduação

Agradecimentos

À Carmen, não apenas pela orientação deste trabalho, mas pelos muitos anos de paciência comigo: não há agradecimento que seja suficiente.

Ao Artemio e ao Denis, por me receberem por um ano na Agro ParisTech, e por toda a valiosa ajuda que não ficou limitada à simulação.

A Giana e Patrick e Joel, pela ajuda na parte experimental e pela expansão conceitual deste trabalho.

À Mariana, que me ensinou tudo sobre a secadora em escala piloto, e que torcia junto para que ela finalmente soltasse nossos dados.

Ao prof. Eduardo e à Stephany, que se dedicaram à análise de fibras como se fosse deles próprios.

Ao Jorge, pelas várias dicas sobre a parte de simulação e sobre o artigo que está em andamento. Um ponto de vista diferente ajuda muito.

Ao Ivan, à Vanessa, e ao pessoal técnico, sem os quais seria muito mais difícil a vida no laboratório.

Aos colegas, que sempre fizeram companhia, tornaram a vida mais leve, e que já são praticamente família.

À minha família, por todo o suporte emocional, pelas horas me ouvindo praticar apresentações, pelas caronas em cima da hora, e por todo o restante, que vou abreviar, ou este agradecimento daria outra tese.

Às instituições de fomento à pesquisa:

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001/Programa de Excelência Acadêmica (PROEX), e da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), processos nº 2018/21327-1 e 2019/21832-0. As opiniões, hipóteses e conclusões ou recomendações expressas neste material são de responsabilidade do(s) autor(es) e não necessariamente refletem a visão da FAPESP .

“The unconscious preoccupation with water here weighed on her mind. No, she corrected herself: it was preoccupation with moisture.”

Frank Herbert. *Dune* (1965)

RESUMO

As raízes de yacón (*Smallanthus sonchifolius*) são utilizadas como alternativas em dietas com restrição de açúcares. Devido à presença de frutanos como os fruto-oligossacarídeos (FOS) e a inulina, apresentam sabor doce, mas quando ingeridas resultam em baixo índice glicêmico. Existem evidências de que, dependendo das condições de secagem, os FOS e a inulina são hidrolisados a açúcares simples. A motivação deste trabalho foi estudar o processo de secagem de yacón, de forma a identificar a distribuição de temperatura e umidade no produto, fatores relevantes para a hidrólise dos frutanos. Para isto, três etapas principais foram realizadas: secagem em escala piloto, secagem em escala laboratorial, e simulação. Na literatura não foram encontrados trabalhos relativos a secagem convectiva de yacón com controle de umidade relativa (UR). Neste trabalho em escala piloto, esta lacuna foi suprida. Foram obtidos dados da cinética de secagem em quatro condições (50-60 °C; 20-30 % UR), com controle e registro em tempo real das condições do ar e da massa de amostra. O encolhimento sofrido pelo yacón é considerável e foi medido durante o processo: ao final da secagem, as fatias tinham em média um quinto da altura e dois terços do raio original. A cinética de secagem foi descrita ajustando-se diversos modelos: aplicando-se o modelo clássico de Lewis (1921), o valor do parâmetro de velocidade inicial, k_I , variou de (1,37-1,75) s⁻¹. Na etapa em escala laboratorial, também com controle das condições do ar de secagem e medição em tempo real da massa, imagens da amostra de yacón durante a secagem foram obtidas como projeções. A partir desta etapa, com medições macroscópicas e microscópicas (por microscopia de varredura ambiental), foi possível concluir que a formação de poros durante a secagem é negligenciável. Esta informação, juntamente com os dados de cinética e encolhimento obtidos na escala piloto, foi essencial para desenvolver a simulação. Foi possível estimar espacialmente a distribuição de temperatura, umidade, atividade de água e difusividade mássica ao longo da fatia de yacón durante a secagem, e a simulação previu bem a umidade média obtida experimentalmente. Observou-se que, apesar da rápida uniformização da temperatura, a umidade no centro da fatia de yacón permanece alta até o final da secagem, sendo necessária especial atenção às últimas horas de processamento. Finalmente, foram obtidos termogramas e isotermas de sorção do produto seco, e mediu-se o conteúdo de frutanos, que ficou entre (29,61-40,74) g frutanos/100 g, base seca, sendo que a condição que melhor preservou os frutanos foi a secagem a 60 °C e 30 % UR. Os termogramas e as isotermas foram utilizados para construir um diagrama de estado, que apresentou formato típico para produtos ricos em carboidratos.

Palavras-chave: Cinética. Propriedades termofísicas. Encolhimento. Simulação.

ABSTRACT

Yacón (*Smallanthus sonchifolius*) roots are used as alternatives in sugar-restrictive diets. Due to the presence of fructans, such as fructo-oligosaccharides (FOS) and inulin, they taste sweet, but when consumed, results in a low glycemic index. There is evidence that, depending on the drying conditions, the FOS and inulin are hydrolyzed and converted into simple sugars. The motivation of this work was to study the process of yacón drying, to identify the temperature and humidity distributions in the product, relevant factors for fructan hydrolysis. This objective was accomplished in three steps: pilot-scale drying, laboratory-scale drying, and simulation. In the literature, no works about yacón drying mentioning relative humidity (RH) control were found. In this pilot-scale work, this gap was filled. Data about the drying kinetics of yacón were obtained in four conditions: (50-60 °C; 20-30 % RH), with control and real-time registration of the drying air conditions and sample mass. Yacón slices underwent considerable shrinkage, that was measured during the process; at the end of the drying period, the slices had on average a fifth of the height and two thirds of the original radius. The drying kinetics was described using several models; applying the classic Lewis (1921) model, the initial drying rate parameter, k_L , ranges from (1,37-1,75) s^{-1} . On the laboratory-scale step, also with control of the drying air conditions and real-time sample mass recording, images of the yacón sample were obtained as projections. From this step, using macroscopic and microscopic (by environmental scanning electron microscopy) measurements, it was possible to conclude that the pore formation during drying is negligible. This information, along with drying kinetics and shrinkage data obtained during the pilot-scale step, was essential to develop the simulation. It was possible to estimate the temperature, moisture, water activity and water diffusivity spatial distributions along the drying period, and the simulation was able to satisfactorily predict the experimental average sample moisture content. It was observed that, despite the swift temperature uniformization, the moisture content in the center of the sample remains high until the end of the drying process, so it is necessary to closely monitor the final hours of the drying process. Finally, thermograms and sorption isotherms were obtained to describe the dried product, and the fructan content was measured; the latter ranged from (29.61-40.74)g fructans/ gram of dry matter. The best drying condition for fructan preservation was 60 °C and 30 % RH. The thermograms and vapor sorption isotherms were used to build a state diagram, which took a typical shape for carbohydrate-rich products.

Keywords: Kinetics. Thermophysical properties. Shrinkage. Simulation.

Lista de ilustrações

Figura 1.1. Estrutura da inulina e dos fruto-oligossacarídeos.....	18
Figura 1.2. Tipos de isotermas de sorção propostos por Brunauer <i>et al.</i> (1940)	23
Figura 2.1. Secadora convectiva LM ES 20.	29
Figura 2.2. Vista frontal e dimensões da câmara da secadora e de uma de suas bandejas.	30
Figura 2.3. Secadora vista em perspectiva.....	30
Figura 2.4. Arranjos usados para distribuição dos termopares nas bandejas.....	31
Figura 2.5. Arranjo experimental para a determinação do coeficiente convectivo.....	32
Figura 2.6. Bandeja com fatias de yacón preparadas para a secagem.....	33
Figura 2.7. Estereomicroscópio sobre a secadora, em posição de aquisição de imagens, para medição do encolhimento radial. Destaque para o termopar que mede a temperatura na câmara.....	34
Figura 2.8. (a) Temperaturas medidas com <i>set point</i> a 50 °C, em diversas posições da secadora; (b) e (c), esclarecimento das posições indicadas em (a).....	42
Figura 2.9. Temperaturas medidas com <i>set point</i> a 60 °C, em diversas posições da secadora; (b) e (c) esclarecimento das posições indicadas em (a).....	43
Figura 2.10. (a) Temperaturas medidas com <i>set point</i> a 50 °C, na posição 1 da câmara da secadora; (b) e (c), esclarecimento das posições indicadas em (a).....	44
Figura 2.11. Perfis de temperatura com o cilindro de alumínio de 35 mm, em comparação com uma fatia de yacón (a) corrida 1, (b) corrida 2, (c) corrida 3. Condições do ar: 60 °C, 20 % de UR e velocidade do ar de 4 m/s.....	45
Figura 2.12. Perfis de temperatura com o cilindro de alumínio de 20 mm, em comparação com uma fatia de yacón (a) corrida 1, (b) corrida 2, (c) corrida 3.....	46
Figura 2.13. Conteúdo de água normalizado, em função do tempo, para as quatro condições testadas em escala piloto: (a) 50 °C, UR 30 %; (b) 60 °C, UR 30 %; (c) 50 °C, UR 20 %; (d) 60 °C, UR 20 %.....	47
Figura 2.14. Dimensões das amostras em função da umidade, registradas nos experimentos em escala piloto; (b) e (d) são os mesmos pontos experimentais de (a) e (c).....	50
Figura 2.15. Área das amostras secas em escala piloto em função da umidade.....	51
Figura 2.16. Imagens de uma amostra durante o processo de secagem, a 60 °C e UR = 20 %.....	52
Figura 2.17. Imagens ampliadas de uma fatia de yacón, durante a secagem a 60 °C e UR = 20 %, após (a) 0 min, (b) 300 min e (c) 330 min, enfatizando uma irregularidade estrutural.....	53
Figura 2.18. Fatias secas de yacón.....	53
Figura 2.19. Estimativas sobre o comportamento de fatias de yacón durante a secagem: em (a), a superfície adimensional, conforme a Eq. (2.13), a taxa e o fluxo de secagem adimensionalizados conforme a Eq. (2.28), e dMR/dt conforme a Eq. (2.29); o quadro (b) é similar ao (a), mas em função do tempo, e em comparação com valores experimentais da taxa de secagem, com uma janela móvel de dez pontos; em (c), a umidade média e da superfície, conforme Eq. (2.34), em comparação com valores experimentais; e em (d), temperatura e atividade de água em função do tempo, conforme Eq. (2.40).....	54
Figura 3.1. Esquema da secadora em escala laboratorial.....	58

Fig. 3.2. Protocolo experimental da secagem das amostras retiradas do centro das raízes de yacón. a) Amostragem e direções adotadas; (b) dimensões da amostra.....	59
Figura 3.3. Preparo das amostras retiradas fora do centro da raiz de yacón (a) direção de corte da raiz; (b) marcação da direção radial ou longitudinal; (c) direções de amostragem; (d) gancho usado e (e) direções de observação da amostra em relação à amostragem e à câmera.....	60
Figura 3.4. (a) Cinética de secagem para uma das amostras secas a 60 °C e 20 % UR, comparando dados experimentais e o modelo de Van Meel. (b) Fluxo evaporativo.....	65
Figura 3.5. Fluxo evaporativo, para diferentes condições de secagem, de acordo com o Planejamento Experimental (Tabela 3.1), de amostras tiradas do centro da raiz.....	66
Figura 3.6. Superfície de resposta indicando o fluxo evaporativo inicial para todas as condições testadas, conforme Tabela 3.1.....	66
Figura 3.7. Imagens obtidas para as amostras secas a 67 °C e , UR 13 % (a) no início da secagem; (b) após 25 min; (c) após 90 min; (d) após 150 min e (e) após 300 min. As bordas são devidas à própria janela da secadora.....	68
Figura 3.8. Volume de água perdido vs. encolhimento observado nas repetições do ponto central (60 °C, 20 % UR).....	69
Figura 3.9. Encolhimento das amostras do ponto central (Tabela 3.1), secas a 60 °C e 20 % UR.....	69
Figura 3.10. Amostra retirada longitudinalmente próximo à casca da raiz de yacón, e seca; (a) vista frontal e (b) vista lateral; (c) amostra similar seca a 60 °C, 20% observada no sentido perpendicular; (d) amostra seca a 60 °C, 20% observada no sentido paralelo..	71
Figura 3.11. Encolhimento radial (β_r) das amostras secas em experimentos conduzidos em escala laboratorial- anisotrópica. LNC: longitudinal não centralizado. R: radial. PAR: sentido de observação paralela. PERP: sentido de observação perpendicular.....	71
Figura 3.12. Encolhimento longitudinal (β_L) das amostras secas em experimentos conduzidos em escala laboratorial- anisotrópica. LNC: longitudinal não centralizado. R: radial. PAR: sentido de observação paralela. PERP: sentido de observação perpendicular.....	72
Figura 3.13. Imagem microscópica de yacón (eixo central da raiz) em umidade relativa 95 %.....	73
Figura 3.14. Imagens microscópicas de yacón (eixo central da raiz). (a) em umidade relativa 95 %; (b) após 6 min em umidade relativa 55 %; (c) após 10 min; e (d) após 50 min. O retângulo indica a evolução da área (a).....	73
Figura 3.15. Vista microscópica de uma fatia de yacón cortada longitudinalmente próximo à casca (a); e (b) detalhe.....	74
Figura 3.16. Vista microscópica de uma fatia de yacón cortada radialmente próximo à casca (a); e (b) detalhe.....	74
Figura 3.17. Vista microscópica de uma fatia de yacón cortada radialmente próximo à casca (a) em condições de saturação; (b) após 6 min a 10 °C; (c) após 10 min a 20 °C; (d) após 60 min a 20 °C.....	75

Figura 4.1. Representação da fatia de yacón. A zona em cinza é a área considerada na simulação. A zona em azul representa uma das células da malha.....	83
Figura 4.2. Representação do algoritmo utilizado na simulação da secagem de uma fatia de yacón.....	86
Figura 4.3. Cinética obtida por simulação, em comparação às curvas obtidas experimentalmente em escala piloto (60 °C, 20 %)......	88
Figura 4.4. Evolução da atividade de água e do coeficiente de difusão efetivo da água em uma fatia de yacón seca a 60 °C, 20 % UR (Simulação- Caso A).....	88
Figura 4.5. Evolução da umidade e da temperatura em uma fatia de yacón seca a 60 °C, 20 % UR (Simulação- Caso A).....	89
Figura 4.6. Efeito da variação da difusividade da água no material seco (D_o), do material úmido (D_i) e da energia de ativação do material seco (E_o) e úmido (E_i), na difusividade efetiva da água, conforme o modelo de Maroulis <i>et al.</i> (2001), de -50 % a +50 % em relação aos valores discriminados na legenda, utilizados na simulação base.....	90
Figura 4.7. Efeito na umidade durante a simulação de secagem, ao variar a difusividade do material úmido em -50 % (caso B3).....	90
Figura 4.8. Efeito da variação do coeficiente de transferência de calor (h) de -50 % a +50 % em relação ao valor utilizado na simulação base (mostrado na legenda).....	91
Figura 4.9. Efeito na umidade durante a simulação de secagem, ao variar o coeficiente convectivo h em -50 % (Caso C1).....	92
Figura 4.10. Efeito da variação do número de células na simulação, em diversas conformações, de -50 % a +50 % em relação número de células utilizado na simulação base (mostrado na legenda).....	92
Figura 4.11 Efeito da variação do passo de tempo.....	94
Figura 5.1. Exemplo de disposição de um diagrama de estado. As zonas são numeradas da mais estável à menos estável.....	97
Figura 5.2. Procedimento para medição das propriedades térmicas.....	103
Figura 5.3. Densidade real e aparente.....	109
Figura 5.4. Fração de perda de volume (a) e porosidade aparente (b).....	110
Figura 5.5. Densidade real das fatias de yacón, em comparação ao modelo de Choi e Okos (1986).....	110
Figura 5.6. Dados experimentais da condutividade térmica (a) e do calor específico* (b), em comparação com os modelos de Rahman (1991) e Choi e Okos (1986).....	111
Figura 5.7. Difusividade térmica do yacón.....	112
Figura 5.8. Isotermas de sorção de fatias de yacón, obtidas no modo estático (DVS): (a) dessorção e (b) adsorção.....	112
Figura 5.9. Isotermas de sorção obtidas para fatias de yacón, no modo dinâmico (DDI): (a) dessorção e (b) adsorção.....	113
Figura 5.10. Isotermas de sorção obtidas utilizando as amostras da etapa piloto (no VSA1055) e da etapa laboratorial (no DVS INTRINSIC).	114
Figura 5.11. Termograma típico de amostras com baixo teor de água, com destaque para uma transição vítrea. Neste caso, $X_s = 0,94$ g/g b.s.....	115

Figura 5.12. Termograma típico de amostras com alto teor de água, com destaque para uma fusão. Neste caso, $X_s = 0,37$ g/g b.s.....	116
Figura 5.13. Termogramas de misturas de yacón seco e água em diversas proporções, mostrando (a) fusões de amostras com alto teor de água e (b) transição vítrea de amostras com baixo teor de água.....	117
Figura 5.14. Diagrama de estado de yacón	118
Figura 5.15. Comparação entre os conceitos de atividade de água e transição vítrea.....	119
Figura A1. Aferição da balança 1 da secadora, a temperatura ambiente (caso a).....	139
Figura A2. Aferição da balança 1 da secadora, a 50 °C (caso b).....	139
Figura A3. Aferição da balança 1 da secadora, contínua, a 60 °C (caso c).....	140
Figura B1. Condensação na janela de quartzo, dificultando a aquisição de imagens. Condições do ar na câmara: 60 °C, UR = 30%.....	141
Figura B2. (a) a (f): fase final do encolhimento, (g) ampliação de 40x da fatia fresca, (h) ampliação de 40x da borda da fatia em fase final de secagem. (i) ampliação de 40x do produto seco. Condições do ar na câmara: 50 °C, UR = 20 %.....	141
Figura B3. (a) a (i): Encolhimento ao longo da secagem, (j) ampliação de 40x da fatia fresca, (k) ampliação de 40x da fatia durante a secagem. (l) ampliação de 40x do produto seco. Condições do ar na câmara: 50 °C, UR = 30 %.....	142
Figura B4. (a) a (i): Demonstração do funcionamento da medição de diâmetro com o software LAS6. Exemplo usado: fatia seca a 50 °C e 30 % (a) no início e (b) após 423 min. A circunferência é delimitada manualmente pelo usuário.....	143
Figura B5. (a) a (i): Encolhimento ao longo da secagem a 60 °C, UR = 20%.....	143
Figura B6. (a) a (f): Encolhimento ao longo da secagem a :60 °C, UR = 30%; (g) a (h) ampliação de 40x; (i) borda da fatia com ampliação 40x.....	144
Figura D1. Micrografia de uma fatia de yacón cortada longitudinalmente, aumentada 500x.....	147
Figura D2. Vista microscópica de uma fatia de yacón cortada longitudinalmente (a) e (b) detalhe.....	148
Figura D3. Vista microscópica de uma fatia de yacón cortada radialmente (a) e (b) detalhe.....	148

Lista de tabelas

Tabela 1.1 Composição elementar média do yacón, por quilo de material fresco.....	14
Tabela 1.2. Concentração de minerais presentes no yacón.....	15
Tabela 2.1. Características dos cilindros de alumínio usados na determinação do coeficiente convectivo.....	31
Tabela 2.1. Alguns modelos clássicos usados para descrever cinéticas de secagem.....	36
Tabela 2.3. Propriedades do alumínio a 331 K.....	45
Tabela 2.4. Limites da rampa de aquecimento para determinação do coeficiente convectivo.....	46
Tabela 2.5. Parâmetros de ajuste de modelos selecionados aos dados experimentais do Capítulo 2 (Escala piloto), em comparação com outros dados da literatura. Os resultados deste trabalho são mostrados no formato média \pm desvio padrão da triplicata.....	49

Tabela 3.1. Planejamento experimental da secagem em escala laboratorial, com amostras do centro das raízes.....	59
Tabela 3.2. Condições do ar, teóricas vs. reais (escala laboratorial)	64
Tabela 3.3. Comparação dos parâmetros cinéticos obtidos do modelo da Equação 2.6, mediante os resultados das etapas de secagem de yacón em escala laboratorial e piloto...	67
Tabela 3.4. Encolhimento e conteúdo de água crítico (Tabela 3.1).....	70
Tabela 4.1. Difusividade efetiva da água em diferentes produtos na literatura recente, de acordo com as condições de secagem e método de cálculo.....	82
Tabela 4.2 Testes de sensibilidade. As células em negrito são variações em relação ao caso-base (A). Para mais detalhes, vide o Apêndice F.	87
Tabela 4.3. Raiz do erro quadrático médio dos testes de sensibilidade com variação na malha.	93
Tabela 5.1. Modelos empíricos sugeridos na literatura para as propriedades termofísicas do yacón.	101
Tabela 5.2. Teor de sólidos solúveis medidos nas raízes utilizadas na etapa piloto (Brasil) e na etapa laboratorial (França).....	107
Tabela 5.3. Conteúdo total de frutanos (FOS e inulina) do yacón seco sob diferentes condições.....	108
Tabela 5.4. Parâmetros do modelo de GAB, para as isotermas de adsorção (ads.) e dessorção (des.) de yacón.....	113
Tabela A1. Aferição da balança 1 da secadora, a temperatura ambiente (caso a).....	138
Tabela A2. Aferição da balança 1 da secadora, a 50 °C (caso b).....	139
Tabela F1. Relação completa dos testes de sensibilidade. Parâmetros em negrito representam as variações em relação ao caso base (A).....	163

Lista de abreviaturas

ads.	adsorção
b.s.	base seca
b.u.	base úmida
d.b.	bulbo seco
DDI	do inglês <i>dynamic dewpoint isotherm</i>
des.	dessorção
DVS	do inglês <i>dynamic vapor sorption</i>
FOS	fruto-oligossacarídeos
RMSE	raiz do erro quadrático médio (do inglês root mean square error)
SEQ	Soma dos erros quadráticos
UR	umidade relativa
w.b.	bulbo úmido

Lista de símbolos

a	atividade (-); parâmetro de Henderson-Pabis (-)
A	área (m^2)
b	parâmetro de ponderação nos modelos de encolhimento (-)
C	constante adimensional, ou concentração (kg m^{-3})
c	Parâmetro do modelo de Van Meel ($\text{kg s}^{-1}\text{m}^{-2}$)
c_p	calor específico ($\text{J kg}^{-1}\text{K}^{-1}$)
D	difusividade mássica (m^2s^{-1}); diâmetro (m)
E	Energia de ativação (kJ mol^{-1})
H	Entalpia (J kg^{-1}); altura em modelos de encolhimento (m)
h	coeficiente de transferência de calor ($\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$)
j	fluxo ($\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$)
k	parâmetro cinético (s^{-1}); condutividade térmica ($\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$)
K	constante em modelos de sorção (-);
k'	parâmetro de Gordon-Taylor (-)
k''	coeficiente de transferência de massa (m s^{-1})
L_v	calor latente de vaporização (J kg^{-1})
m	massa (kg)
M	Massa molar (g mol^{-1})
MR	umidade normalizada (do inglês <i>moisture ratio</i>)
P	pressão (Pa)
q	taxa de secagem (kg s^{-1})
\dot{q}	fluxo de água na secagem ($\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$)
Q	taxa de transferência de calor (J s^{-1})
\dot{Q}	fluxo de calor ($\text{J m}^{-2} \text{s}^{-1}$)
R	constante dos gases ideais ($0.0083143 \text{ kJ kg}^{-1} \text{ mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$)
t	tempo (s)

<i>T</i>	temperatura (°C)
<i>u</i>	Energia interna (J kg ⁻¹)
<i>v</i>	Velocidade (m s ⁻¹)
<i>V</i>	volume (m ³)
<i>X</i>	fração mássica (kg kg ⁻¹)
<i>y</i>	Constante (J kg ⁻¹ K ⁻¹)

Subscritos e sobrescritos

0	inicial
#	intrínseco
*	adimensional
∞	do ar circundante
<i>A</i>	adsorbato
<i>a</i>	aparente
<i>bs</i>	base seca
<i>bu</i>	base úmida
<i>calc</i>	calculado
<i>comb</i>	combinado
<i>db</i>	bulbo seco
<i>dm</i>	massa seca
<i>e</i>	equilíbrio
<i>f</i>	final
<i>g</i>	de transição vítrea
<i>i</i>	inicial
<i>iso</i>	isotrópico
<i>max</i>	máximo
<i>mono</i>	monocamada
<i>q</i>	calor
<i>real</i>	medido
<i>ref</i>	referência
<i>s</i>	sólidos
<i>sat</i>	saturação
<i>sis</i>	sistema
<i>surf</i>	superficial
<i>t</i>	tempo; total
<i>V</i>	volumétrico
<i>v</i>	vapor, vaporização
<i>vert</i>	vertical
<i>w</i>	água
<i>wb</i>	bulbo úmido

Letras gregas

α	difusividade térmica (m ² s ⁻¹)
ε	porosidade (-)
ρ	densidade (kg m ⁻³)
φ	parâmetro da Eq. 3.10 (-)

Sumário

1	INTRODUÇÃO	10
1.1	Objetivos	11
1.1.1	Estrutura da tese.....	12
1.2	Revisão da literatura	12
1.2.1	Estabilidade no armazenamento e sazonalidade.....	15
1.2.2	Efeitos do consumo e segurança.....	16
1.2.3	Prebióticos	17
1.2.4	Secagem.....	19
1.2.5	Atividade de água e umidade de equilíbrio	21
1.2.6	Encolhimento e porosidade.....	23
2	SECAGEM DE FATIAS DE YACÓN EM ESCALA PILOTO, CONSIDERANDO O ENCOLHIMENTO, E MODELAGEM MACROSCÓPICA DO PROCESSO	26
2.1	Introdução	26
2.1.1	Pré tratamentos e efeitos do processamento na quantidade de FOS.....	27
2.1.2	Coeficiente convectivo	28
2.1.3	Objetivos.....	28
2.2	Materiais e métodos	29
2.2.1	Secadora convectiva: descrição e avaliação	29
2.2.1.1	Determinação do coeficiente convectivo	31
2.2.2	Branqueamento e secagem de fatias de yacón.....	33
2.2.3	Medição das dimensões das fatias durante a secagem.....	34
2.2.4	Determinação de umidade	35
2.3	Modelagem	36
2.3.1	Descrição da cinética de secagem.....	36
2.3.2	Evolução das dimensões	37
2.3.3	Determinação do coeficiente convectivo.....	39
2.3.4	Balanço de massa.....	40
2.4	Resultados e discussão	42
2.4.1	Mapeamento da temperatura na secadora em escala piloto.....	42
2.4.2	Determinação do coeficiente convectivo da secadora em escala piloto	45
2.4.3	Cinéticas de secagem das fatias de yacón.....	47
2.4.4	Dimensões e morfologia	50
2.4.5	Balanço de massa, temperatura na superfície e atividade de água	53
2.5	Conclusões parciais	55

3 SECAGEM DE YACÓN CONSIDERANDO ENCOLHIMENTO EM MACRO E MICRO ESCALA	56
3.1 Introdução	56
3.1.1 Objetivos.....	56
3.2 Materiais e métodos	57
3.2.1 Obtenção de amostra.....	57
3.2.2 Determinação de umidade	57
3.2.3 Planejamento da secagem	57
3.2.4 Secagem e tratamento dos dados	61
3.2.5 Morfologia	61
3.3 Modelagem	61
3.3.1 Encolhimento	61
3.3.2 Descrição da cinética de secagem do yacón	62
3.4 Resultados e discussão	64
3.4.1 Condições do ar de secagem.....	64
3.4.2 Cinética de secagem	64
3.4.3 Encolhimento.....	67
3.4.4 Morfologia	72
3.5 Conclusões parciais	75
4 SIMULAÇÃO DA SECAGEM CONVECTIVA DE UMA FATIA DE YACÓN: EVOLUÇÃO DA UMIDADE, TEMPERATURA, DIFUSIVIDADE E ATIVIDADE DE ÁGUA	77
4.1 Introdução	77
4.1.1 Difusão da água	80
4.2 Métodos	83
4.1.1 Balanço de massa e energia	85
4.1.2 Algoritmo e testes de sensibilidade	86
4.3 Resultados e discussão	87
4.4 Conclusões parciais	94
5 PROPRIEDADES DO YACÓN, DIAGRAMAS DE ESTADO E EFEITO DA SECAGEM SOBRE O CONTEÚDO DE FIBRAS	95
5.1 Introdução	95
5.1.1 Sorção de vapor	95
5.1.2 Diagramas de estado	97
5.1.3 Propriedades termofísicas	98
5.1.3.1 Condutividade térmica	98

5.1.3.2 Difusividade térmica	99
5.1.3.3 Calor específico	99
5.1.3.4 Densidade	100
5.2 Materiais e métodos	101
5.2.1 Sólidos solúveis	101
5.2.2 Volume real e aparente	102
5.2.3 Calor específico, condutividade térmica e difusividade térmica	102
5.2.4 Sorção de vapor	103
5.2.5 Análise térmica	104
5.2.6 Conteúdo de frutanos	105
5.3 Modelagem	106
5.3.1 Isotermas de sorção.....	106
5.3.2 Modelagem usada no diagrama de estado	106
5.4 Resultados e discussão	107
5.4.1 Sólidos solúveis	107
5.4.2 Conteúdo de frutanos	107
5.4.3 Propriedades termofísicas	109
5.4.4 Isotermas de sorção.....	112
5.4.5 Análise térmica	115
5.4.6 Diagrama de estado.....	118
5.5 Conclusões parciais	120
6 CONCLUSÕES	121
6.1 Sugestões para trabalhos futuros	121
7 REFERÊNCIAS	123
APÊNDICE A- Condições das balanças da secadora	138
APÊNDICE B- Imagens obtidas com o microscópio Leica S6D	141
APÊNDICE C- Código usado na estimativa do coeficiente convectivo (Python)	145
APÊNDICE D. Imagens da microscopia eletrônica de varredura	147
APÊNDICE E -Código da simulação (Python)	149
APÊNDICE F- Testes de sensibilidade	163

1 INTRODUÇÃO

O yacón (*Smallanthus sonchifolius*), uma planta originária da cordilheira dos Andes, tem registros de cultivo desde 1500 a.C. na região costeira do Peru e da Argentina. Os japoneses e neozelandeses iniciaram o cultivo fora da América Latina, sendo que os próprios japoneses introduziram o yacón no Brasil na década de 90. A planta pode ser cultivada em diversas condições de solo e clima, desde que não seja exposta a geada antes de formar as raízes, e há relatos de cultivo em outras regiões, como Itália, França, Estados Unidos e Ucrânia (SEMINARIO; VALDERRAMA; MANRIQUE, 2003; SANTANA; CARDOSO, 2008; MISHCHENKO *et al*, 2020).

A planta é perene e pode atingir de 1,5 m a 3 m de altura, com 4 a 20 raízes que crescem a partir de um rizoma central, e que chegam a render 100 t/ha. Diversas espécies do gênero *Smallanthus* crescem vigorosamente em ambientes abertos, como beiras de rio, desmoronamentos e clareiras. É possível que os povos andinos, ao abrir espaço para outros cultivos, tenham propiciado acidentalmente o crescimento de yacón, percebido suas propriedades, e passado a cultivá-lo (HERMANN; HELLER, 1997).

Em vez de amido, o yacón reserva energia em suas raízes tuberosas (COLL-ARAÓZ *et al.*, 2014) na forma de frutanos, como fruto-oligossacarídeos (FOS) e inulina (SEMINARIO; VALDERRAMA; MANRIQUE, 2003). O baixo valor calórico tornou inicialmente o yacón pouco atraente para os povos andinos, que escolherem trabalhar mais intensamente com outros cultivos, como batata e oca. Porém, numa época em que glicose e sacarose são *commodities*, o yacón volta a ser interessante de um ponto de vista da qualidade nutricional (HERMANN; HELLER, 1997).

A presença de FOS e inulina e a baixa proporção de açúcares simples (RIBEIRO, 2008) tornam o yacón uma alternativa para dietas com restrição de açúcares. A inulina e os FOS são conhecidos por seus efeitos prebióticos. Ao passar pelo trato intestinal humano, esses compostos não fornecem calorias diretamente, mas são decompostos em moléculas que podem funcionar indiretamente como reguladores metabólicos (MUSSATTO; MANCILHA, 2007). Há evidências de que estes frutanos promovem o crescimento de populações de bactérias dos gêneros *Lactobacillus* e *Bifidobacterium*. Um aumento nessa população dificulta o crescimento de bactérias patogênicas (FLAMM *et al.*, 2001; ROBERFROID; GIBSON, 2010)

O yacón fresco não resiste a um longo período de armazenamento, devido à sua alta atividade de água, que favorece o desenvolvimento de micro-organismos (REIS *et al.*, 2012). É possível refrigerar o produto para prolongar a vida útil das raízes (ROBERFROID; GIBSON, 2010). A secagem é uma forma interessante de preparo para o armazenamento de yacón, por reduzir sua atividade de água sem grandes inconvenientes tecnológicos e dispensando refrigeração.

Além de serem altamente perecíveis, as raízes de yacón tendem a escurecer, especialmente após serem cortadas. Isso é devido principalmente à presença da enzima polifenoloxidase (RODRIGUES; ASQUIERI; ORSI, 2014). Para evitar o escurecimento, Scher, Rios e Noreña (2009) fizeram branqueamento a vapor de yacón, e Reis *et al.* (2012) imergiram fatias das raízes em soluções de ácido cítrico antes de secá-las.

Até o momento, não foram encontradas na literatura simulações de secagem convectiva de yacón, considerando encolhimento, com validação experimental de várias fatias dentro de uma secadora. Bernstein e Noreña (2014) mediram o encolhimento de pedaços cúbicos de yacón, e Scher, Rios e Noreña (2009) mediram o efeito da secagem sobre o conteúdo de FOS e inulina; mas os autores não prosseguiram para um passo de simulação. Curcio *et al.* (2016) desenvolveram um modelo conjugado para descrever a secagem de vegetais, e Perussello *et al.* (2014) simularam a secagem osmo-convectiva de fatias de yacón em Comsol, mas nenhum destes autores menciona a umidade relativa na secadora.

1.1 Objetivos

Este trabalho teve por objetivo estudar o processo de secagem convectiva de yacón, com ênfase nos parâmetros que não podem ser medidos diretamente sem perturbar o processo, e que são relevantes à hidrólise dos frutanos.

Para atingir este objetivo, raízes de yacón foram secas em escala piloto e laboratorial. Observaram-se as mudanças em suas propriedades termofísicas, dimensões e morfologia. Então foi criado um modelo para simular a secagem de yacón, levando-se em conta estas propriedades, capaz de ajustar a malha de acordo com a desidratação, e de descrever a umidade e a temperatura de acordo com a evolução da secagem.

1.1.1 Estrutura da tese

Este trabalho é composto por cinco capítulos:

- a) Capítulo 1: Introdução e revisão bibliográfica. São dados detalhes sobre o material a ser seco e seus componentes de interesse. Discutem-se conceitos sobre secagem e outros parâmetros relevantes em todos os demais capítulos, como encolhimento e atividade de água.
- b) Capítulo 2: Descreve a secagem de yacón em escala piloto, com ênfase na cinética de secagem e encolhimento. Observações macroscópicas são reunidas neste capítulo, como introdução para a modelagem da umidade e temperatura médias
- c) Capítulo 3: Secagem em escala laboratorial e análise do encolhimento em diversas porções da raiz de yacón. Observações em escala microscópica ajudam a explicar o encolhimento observado. A modelagem é realizada utilizando-se o modelo simplificado de Van Meel.
- d) Capítulo 4: Reúne os esforços de simulação, e discute a confiabilidade dos resultados frente a dados experimentais, focando na evolução da temperatura, umidade e atividade de água.
- e) Capítulo 5: As propriedades do yacón, incluindo-se propriedades termofísicas, sólidos solúveis, sorção de vapor e o conteúdo de fibras são reunidas neste capítulo.
- f) Capítulo 6: Conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

1.2 Revisão da literatura

Dados oficiais sobre o comércio mundial de yacón não são facilmente disponíveis nos principais bancos de dados, como a FAOSTAT (2020), possivelmente por ser um produto pouco conhecido em relação a outros cultivos. Neste caso, para encontrar informações sobre o mercado, foi necessário buscar relatórios locais. A exportação de yacón do Peru, o país de origem, em 2015, foi reportada como sendo de apenas 2558 kg (KOO, 2020). Uma agência de notícias brasileira afirma que, em 2013, o município de Piedade (SP), principal produtor de yacón no país, vendeu 1.400 toneladas da raiz, a maioria para a central de abastecimento de São Paulo (CEAGESP) (“Safrá da batata yacon foi boa e os produtores de SP estão satisfeitos”, 2013). Uma nota de imprensa de 2017 da associação de exportadores peruanos (ADEX, 2017) afirma que o Peru vendeu 1,53 milhões de dólares em yacón para os Estados Unidos naquele ano, volume correspondente a 80 % da exportação desta raiz; os outros principais destinos foram a Alemanha e o Reino Unido.

Mesmo com a escassez de dados oficiais, o yacón é atualmente cultivado em diversos países pelo mundo. Singh (2011) encontrou informações sobre o seu cultivo na América do Sul do Equador à Argentina, e na Itália, Nova Zelândia, Japão, Estados Unidos, Brasil, Irã, e França, entre outros locais; mas em nenhum país o autor encontrou dados de diversidade genética deste cultivo tão numerosos como no Peru. O país mantém um banco de germoplasma com 399 possíveis variedades conhecidas até 2003 (SEMINARIO; VALDERRAMA; MANRIQUE, 2003).

Ishiki (*apud* Hermann; Heller, 1997) chegaram à conclusão de que algumas variedades de yacón são octaploides, com 58 cromossomos, o que pode ser explicado por sua origem híbrida. Outras variedades seriam dodecaploides, com $2n = 87$. A planta é normalmente propagada por estaquia, sendo difícil a reprodução por sementes. A polinização artificial praticamente não produz sementes viáveis, sendo necessária a ação de polinizadores. Dependendo do clima e do solo, a planta de yacón pode nem sequer chegar a florescer. Ela é perene, atinge de 1,5 a 3 m de altura, e tem um sistema de raízes simpodiais (que crescem a partir da base, e não de um ápice), de onde crescem raízes comestíveis, que podem ser brancas, alaranjadas ou arroxeadas. Cada planta pode ter de 4 a 20 raízes, cada um dos quais pode atingir até 25 cm de comprimento e 10 cm de diâmetro (SINGH, 2011).

As raízes maduras de yacón têm feixes de xilema organizados de forma radial, ao longo da raiz (COLL-ARAOZ *et al.*, 2014). De acordo com Machado *et al.* (2004), as denominações “tubérculo” e “rizoma” são inadequadas, pois a organização vascular do yacón é de raiz, e estes termos são usados para estruturas de natureza caulinar. Os autores também destacam que, além do xilema, uma endoderme meristemática faz parte da organização radial.

Apesar do conhecimento sobre a existência de diversas variedades de yacón, raros são os relatos na literatura em que a variedade utilizada é de fato descrita. Por exemplo, em seu trabalho de secagem a vácuo, Reis *et al.* (2012) descrevem a época da compra das amostras, mas não o local. Shi *et al.* (2013), que secaram yacón usando uma secadora específica a bomba de calor, compraram as raízes na China, mas não especificam a época da compra. Lisboa *et al.* (2018) escreveram sobre a difusividade efetiva da água em yacón, o qual foi comprado em Pernambuco, Brasil, mas não informam em que época essa compra ocorreu. Nenhum desses autores descreve as características do yacón utilizado, como a cor e o diâmetro das raízes, o que torna difícil a comparação entre os resultados.

Diferente dos tubérculos, o yacón tem a maior parte de sua reserva de energia na forma de frutanos, principalmente fruto-oligossacarídeos (FOS) e inulina, em vez de amido. Por isso, é possível comer o yacón cru. A polpa é doce, firme e refrescante, sendo descrita como similar a uma pêra. Por essas características, os povos andinos o utilizam como uma fruta (SEMINARIO; VALDERRAMA; MANRIQUE, 2003).

Hermann, Freire e Pazos (1998) foram alguns dos raros autores a comparar diversas variedades de yacón, levando em conta o local da colheita, a composição e o teor de diferentes açúcares. Os autores encontraram teores de frutanos de (32-66) g/100 g de massa seca; sendo que tanto a variedade com maior teor e a com menor teor de frutanos foram cultivadas originalmente na província de Cajamarca, no Peru. Na Tabela 1.1 a composição elementar do yacón é apresentada, avaliada por estes autores como uma média de dez locais de seu cultivo, incluindo regiões da Argentina, Bolívia, do Equador e Peru.

Tabela 1.1. Composição elementar média do yacón, por quilo de material fresco.

Sólidos (g/kg)	115
Carboidratos totais (g/kg)	106
Frutanos (g/kg)	62
Glicose (g/kg)	3,4
Frutose (g/kg)	8,5
Sacarose (g/kg)	14,0
Proteínas (g/kg)	3,7
Fibras (g/kg)	3,6
Lipídios (g/kg)	0,24
Cálcio (mg/kg)	87
Fósforo (mg/kg)	240
Potássio (mg/kg)	2282

Fonte: Hermann, Freire e Pazos (1998)

É possível observar que a quantidade de glicose, frutose e sacarose por massa de yacón é significativamente menor do que a de frutanos, mas não é desprezível. Como a maior parte da composição do yacón é de água e carboidratos não digeríveis, seu valor energético é baixo e por isso o seu consumo é recomendado na dieta de pacientes diabéticos. O yacón possui ácido ascórbico e minerais, dos quais o mais abundante é o potássio; e foi confirmada a presença de compostos fenólicos, como o ácido cafeico, o ácido perúvico, a quercetina e o ácido clorogênico. Em comparação a outras raízes, a quantidade de compostos fenólicos no yacón é

elevada, chegando a 2000 mg/kg de material fresco (VALENTOVÁ; ULRICHOVÁ, 2003; SANTANA; CARDOSO, 2008). O yacón é fonte de antioxidantes, mesmo em forma de farinha (SOUSA *et al.*, 2015). O fato de ser fonte de antioxidantes mesmo quando seco levou a um estudo que considera o yacón como potencial fonte de compostos bioativos na alimentação de astronautas (MISHCHENKO *et al.*, 2020).

Ribeiro (2008) fez uma avaliação detalhada da quantidade de minerais presentes no yacón, mostrada na Tabela 1.2:

Tabela 1.2. Concentração de minerais presentes no yacón.

Mineral	Concentração na polpa (mg/100 g)	Concentração na casca (mg/100 g)
P	23,4±0,6	51,4±2,1
K	170,7±24,5	442,8±63,2
Ca	6,0±1,0	50,8±4,3
Mg	3,7±0,0	49,8±2,0
S	9,7±0,6	27,8±1,0
Cu	0,1±0,0	0,2±0,0
Mn	n.d.	0,1±0,0
Zn	0,1±0,0	0,3±0,0
Fe	0,3±0,0	9,6±0,0

Fonte: Ribeiro (2008)

1.2.1 Estabilidade no armazenamento e sazonalidade

Vilhena, Câmara e Kakihara (2000) mencionam que o yacón é plantado na primavera e leva entre 8 e 10 meses para ser colhido. A vida de prateleira do yacón fresco à temperatura ambiente é curta, cerca de uma semana, devido à sua alta atividade de água, que favorece o desenvolvimento de micro-organismos (REIS *et al.*, 2012). Além disso, os oligossacarídeos presentes são hidrolisados por frutanases. Esse processo é desacelerado se as raízes forem mantidas em ambiente refrigerado (ROBERFROID; GIBSON, 2010).

Além de serem altamente perecíveis, as raízes de yacón tendem a escurecer, especialmente após serem cortadas. Isso acontece devido à presença da enzima polifenoloxidase, que catalisa a hidroxilação dos monofenóis também presentes. Essa reação leva à formação e polimerização de quinonas, resultando em pigmentos escuros. Essa coloração é normalmente rejeitada pelos consumidores (RODRIGUES; ASQUIERI; ORSI, 2014).

1.2.2 Efeitos do consumo e segurança

Genta *et al.* (2005) estudaram os efeitos do consumo de farinha de yacón por ratos durante quatro meses. Tabletes de farinha de yacón, correspondentes a 340 mg FOS/kg peso ou 6800 mg FOS/kg peso, foram administrados antes das refeições, sendo que cada tratamento foi ministrado a dez ratos machos e dez fêmeas. Não foram observados sinais de toxicidade. Os níveis de glicose e colesterol no sangue dos indivíduos também não sofreram alterações em relação ao grupo de controle. Houve uma redução significativa dos níveis de triglicérides no período pós-prandial (dez minutos após a refeição) em comparação com o grupo de controle, tanto para os indivíduos que receberam a dose baixa de farinha, quanto para os que receberam a dose alta.

Em um estudo com 117 crianças brasileiras por 18 semanas, a farinha de yacón, quando ministrada em dose correspondente a 0,14 g FOS/kg de peso-dia, teve um efeito positivo sobre a quantidade de biomarcadores (TNF- α e interleucina) associados à resposta do sistema imunológico dos indivíduos. Os autores não perceberam diferenças nos níveis de ferro e zinco no sangue das crianças que receberam e as que não receberam farinha de yacón (VAZ-TOSTES *et al.*, 2014).

Serra-Barcellona *et al.* (2015) alimentaram ratos diabéticos por noventa dias com farinha de yacón, e acompanharam os indicadores de estresse oxidativo *in vivo*. Os ratos alimentados com farinha de yacón (equivalente a 340 mg de FOS/kg massa corporal) apresentaram menos atividade de peroxidase e catalase nos rins e no fígado, um indicativo de que o yacón atuou como antioxidante. Além disso, os ratos que receberam a farinha apresentaram níveis inferiores de colesterol e triglicérides no sangue, comparados aos que não receberam a farinha. Os ratos diabéticos tratados com yacón apresentaram atividade mais baixa de catalase no fígado e nos rins que os de um rato saudável.

Rocha *et al.* (2018), em um estudo com humanos adultos, sem diabetes, mostraram que o consumo agudo de yacón em forma de farinha não alterou o apetite e a glicemia dos indivíduos. Neste estudo, com quinze adultos, cada indivíduo consumiu 21 g de farinha de yacón por dia durante dois dias não consecutivos, em forma de *shake*. A sensação de fome descrita pelos indivíduos e o consumo de alimentos não foi diferente entre os grupos que ingeriram o *shake* preparado com e sem farinha de yacón. Portanto, a farinha de yacón não teve efeito como regulador de apetite, embora os autores afirmem que os efeitos a longo prazo não foram estudados.

Pereira *et al.* (2022) estudaram o efeito do consumo de farinha de yacón, em conjunto com probióticos à base de *Lactobacillus* e *Bifidobacterium*, adicionados à dieta de 48 ratos obesos. Os autores concluíram que, em comparação com o grupo controle ($n=6$), os ratos que receberam a combinação de prebióticos (fibra solúvel do yacón) e probióticos (bactérias vivas) tiveram redução média de 6,5 % na massa corporal. Os níveis de glicose e triglicérides no sangue também apresentaram redução, de, em média 23,1 % e 21,4 %, respectivamente.

Os resultados encontrados sugerem que a raiz de yacón não apresenta nível de toxicidade e teve um efeito benéfico sobre alguns aspectos da saúde dos grupos estudados.

Além disso, apesar de confirmada a inocuidade das raízes, o uso excessivo das folhas da planta pode apresentar riscos à saúde. Barbosa *et al.* (2011) alimentaram ratos diferentes, extratos de folhas de yacón: extrato aquoso, polar (extraído em metanol), e extrato de lavagem (extraído em lavagem de 10 s em acetona, a qual foi evaporada posteriormente). Todos os extratos causaram algum efeito nos rins dos ratos. O extrato polar causou uma reação inflamatória com células polimorfonucleares. O extrato aquoso alterou a morfologia dos glomérulos, sendo que alguns deixaram de cumprir sua função, sobrecarregando os demais. O extrato de lavagem causou degeneração da matriz mesangial (espaço extracelular). Em outro estudo, Serra *et al.* (2012) extraíram apenas as lactonas consideradas como os compostos ativos das folhas de yacón, e não encontraram toxicidade em ratos, em doses de até 0,32 mg/kg de peso.

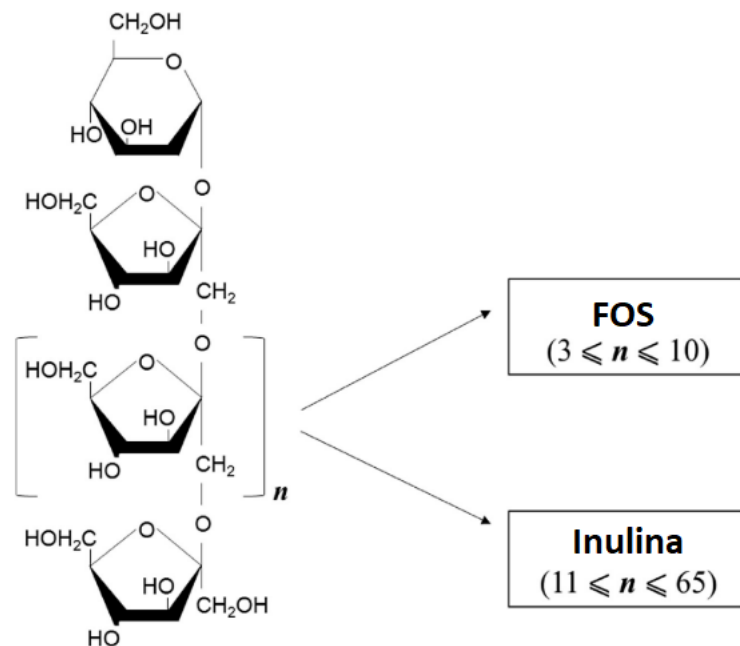
1.2.3 Prebióticos

Alimentos prebióticos são definidos como aqueles que funcionam como substrato para o desenvolvimento de bactérias benéficas da flora intestinal. Eles têm compostos que não são degradados ao passar pelo trato intestinal, chegando intactos ao cólon, onde são fermentados pelas bactérias ali presentes. Ao contrário dos probióticos, alimentos prebióticos não possuem bactérias vivas em sua composição. Alguns dos compostos considerados prebióticos são a inulina, os galacto-oligossacarídeos, os fruto-oligossacarídeos e os isomalto-oligossacarídeos (ROBERFROID; GIBSON, 1995; FRANCK; ALEXIOU, 2009).

Classificados como prebióticos, a inulina e fruto-oligossacarídeos são considerados sacarídeos de reserva das plantas, assim como o amido. Alguns autores os consideram oligossacarídeos, outros como polissacarídeos. Estão entre os sacarídeos não-estruturais mais abundantes na natureza, presentes apenas em menor quantidade que o amido. As ligações $\beta(2-1)$ presentes na inulina e nos fruto-oligossacarídeos fazem que o organismo humano não tenha

a capacidade de digerir essas moléculas, as quais são fermentadas por bactérias no intestino grosso (ENGLYST, 1989; FRANCK; ALEXIOU, 2009; RODICA; ADRIAN; JULEAN, 2010). Eles têm sabor doce e baixo valor calórico, podendo ser utilizados como adoçantes dietéticos, como substituição de gorduras em alguns preparos, ou como aditivos em pães sem glúten (CAMPBELL *et al.*, 1997; FRANCK; ALEXIOU, 2009; DRABÍŃSKA; ZIELIŃSKI; KRUPA-KOZAK, 2016). A estrutura desses compostos é mostrada na Figura 1.1:

Figura 1.1. Estrutura da inulina e dos fruto-oligossacarídeos.



Fonte: Adaptado de Drabínska, Zielínski e Krupa-Kozak (2016)

O ponto de fusão da inulina varia entre 140 °C e 190 °C, dependendo de sua origem e grau de polimerização (MENSINK *et al.*, 2015). A maioria dos oligossacarídeos mantêm sua estrutura intacta até os 170 °C, e a decomposição de fato começa aos 210 °C (FORGO *et al.*, 2013). Assim, durante a secagem do yacón, se ocorre perda de FOS e inulina, esta não deve ser devida diretamente à decomposição térmica.

De acordo com Schneemann (1999), inulina e FOS têm características diferentes de outras fibras alimentares já conhecidas: sua solubilidade em água é maior, aumentando sua disponibilidade para a fermentação por micro-organismos da flora intestinal em comparação a outras fibras. Por serem mais solúveis, esses compostos não causam grande impacto na sensação de saciedade, como outras fibras. Por isso, a autora fala de inulina, FOS e fibra alimentar separadamente, sem incluí-los em uma só categoria, embora reconheça que a não digestibilidade por enzimas do trato digestivo é uma característica em comum. Outros autores,

como Cherbut (2002) e Flamm *et al.* (2001) classificam a inulina e os FOS como fibra alimentar pelo efeito de aumento do volume de fezes dos indivíduos. Embora a classificação como fibras dietéticas seja controversa, a classificação como prebióticos é amplamente aceita.

Em uma revisão da literatura, Watzl, Girrbach e Roller (2005) reúnem evidências de que inulina e FOS servem como substrato para a multiplicação de bactérias produtoras de ácido láctico, como as do gênero *Bifidobacterium* e *Lactobacillus*, presentes na flora intestinal. Esse aumento leva à competição com outras bactérias, desfavorecendo o desenvolvimento de bactérias patogênicas (GIBSON *et al.*, 1995). Os autores também destacam que os carboidratos interagem de diferentes formas com receptores em células do sistema imunológico que têm receptores específicos, como fagócitos e linfócitos B e T. Alguns micro-organismos expressam carboidratos ou lipopolissacarídeos que ativam esses receptores; ao perceber compostos similares, o sistema imunológico é estimulado (ROSS; VĚTVICKA, 1993).

Há evidências de que os FOS ajudam a prevenir infecções gastrointestinais. Buddington; Donahoo e Buddington (2002) alimentaram ratos com uma dieta rica em inulina, e outros com uma dieta sem fruto-oligossacarídeos (controle), e administraram bactérias patogênicas a todos os ratos. Os autores constataram que 30 % dos ratos que receberam a dieta de controle desenvolveram infecção sistêmica e morreram. Dos ratos alimentados com inulina, nenhum morreu.

1.2.4 Secagem

O termo secagem é utilizado para descrever a remoção de uma substância volátil, usualmente água, de um sólido ou de uma suspensão. Esse processo envolve aquecimento, e representa normalmente um alto consumo de energia (LAND, 2012; MUJUMDAR, 2006; PARK *et al.*, 2007).

A secagem de alimentos é um processo que reduz sua atividade de água, tornando-os menos propensos ao desenvolvimento de bactérias e minimizando alterações físicas e químicas durante o armazenamento. Por isso, é um dos processos mais comuns para preservar alimentos. É desejável que o produto final mantenha o máximo possível das características do produto fresco, dentre elas o sabor, a cor, e as propriedades nutricionais. Porém, é comum durante a secagem convectiva que as dimensões, a textura e o aspecto da superfície dos alimentos sofram alterações (MAYOR; SERENO, 2004). Por essa razão, é necessário determinar as condições de secagem nas quais essas alterações sejam mínimas, ou que não sejam razões para que o consumidor rejeite o produto final.

O processo de secagem convectiva ocorre por meio do contato de uma corrente de ar insaturado com o material a ser seco. O ar a ser usado normalmente é quente, provendo o calor necessário para a evaporação do líquido, e ao mesmo tempo carregando a água evaporada (LAND, 2012). Esse processo acarreta em transferência simultânea de calor, massa e momento. A resistência interna à saída de água do sólido costuma ser determinante para a taxa de secagem, o que foi confirmado com uma análise de sensibilidade por Balzarini *et al.* (2018). Existem diversas teorias sobre os mecanismos de transferência de massa dentro do sólido, as quais envolvem difusão por gradiente de concentração, difusão capilar, transporte de vapor por diferença de pressão entre o sólido e o ambiente, transporte de líquido por gravidade, entre outros (GAVRILA; GHIAUS; GRUIA, 2008).

Para descrever as curvas de secagem, é comum normalizá-las construindo as chamadas curvas características, e dividi-las em “períodos”, de acordo com os fenômenos mais importantes ao longo do tempo. Para diferentes condições de secagem, as curvas obtidas para um sólido costumam ser geometricamente similares, sendo possível uma normalização para aproximá-las da curva “característica” (MUJUMDAR, 2006).

A taxa de secagem é descrita como:

$$q = \frac{dm_w}{dt} = \frac{dX_w}{dt} m_s \quad (1.1)$$

Em que q é a taxa de secagem (kg s^{-1}), m_w é a massa de água na mostra (kg), m_s é a massa de sólidos (kg), t é o tempo (s), X_w é a fração mássica de água em base seca ($\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$).

Seguindo esta definição, o fluxo de água na superfície (\dot{q}) é a taxa dividida pela área da amostra (m^2).

Observando-se a curva da taxa de secagem, podem ocorrer as seguintes fases (PARK *et al.*, 2007):

- a) No início da operação de secagem, o ar e o material a ser seco entram em contato. Se for ar quente, como costuma ocorrer, o produto ainda está mais frio que o ar de secagem, e começa a ser aquecido. Isso aumenta a pressão de vapor da água nele contida, o que aumenta a velocidade de secagem. Se o ar for mais frio, a velocidade baixa da mesma forma. Esse período costuma ser rápido, não sendo, em geral, significativo para o tempo total de secagem.

- b) Quando a temperatura do produto chega à temperatura de bulbo úmido do ar, inicia-se o período de secagem à taxa constante. A água do produto ainda está disponível, ou “livre”, na superfície, e sua pressão de vapor é igual à da água pura à temperatura do produto. Enquanto a água que migra do interior do produto por difusão compensa a água perdida para o ar de secagem, esse período se estende.
- c) Quando a água não está mais disponível na superfície, a difusão do interior do sólido, por ser mais lenta, limita a velocidade de evaporação. Portanto, a taxa de secagem decresce, e temperatura na superfície do sólido tende a ficar mais próxima à temperatura de bulbo seco do ar. Apesar disso, a pressão de vapor na superfície diminui. O conteúdo de água no início deste período é chamado conteúdo de água crítico (X_{cr}).

Nesta última fase, a migração de líquido na matriz sólida ocorre por difusão capilar, por difusão gasosa no caso de existirem poros, e pode ocorrer migração da água ligada. A remoção de água nesta etapa causa estresses estruturais, dependendo do material sendo seco, o que pode levar ao encolhimento. Com o tempo, esses estresses podem causar deformação e “case-hardening” (Perré *et al.*, 2023).

Nem sempre esses três períodos são observados durante a secagem. De fato, o período à taxa constante frequentemente não ocorre em materiais biológicos, como frutas, cuja estrutura torna a difusão uma etapa limitante.

É importante conhecer, no equacionamento para a modelagem da secagem convectiva, as propriedades do material a ser seco. Porém, como há uma infinidade de materiais possíveis, muitas destas não estão tabeladas na literatura (DAVILA, 2016). Propriedades térmicas, difusividade de água, volume real e aparente e umidade de equilíbrio são particulares a cada material e possíveis de serem medidas em laboratório.

1.2.5 Atividade de água e umidade de equilíbrio

O crescimento de micro-organismos foi relacionado à quantidade de água no ambiente no trabalho de Tomkins (1929), que estudou o crescimento de bolores em diferentes condições de umidade e temperatura. Scott (1953), seguindo esta ideia, foi um dos primeiros autores a relacionar a deterioração de alimentos à proliferação de micro-organismos nestes, e ligar esse fenômeno à atividade de água no alimento.

Atividade de água é uma propriedade relacionada ao potencial químico da água, ou seja, a quão disponível ela está. Alimentos são sistemas dinâmicos, que estão muito raramente em

equilíbrio. Assim, o estado termodinâmico da água nesse meio depende da composição do material, da presença de solutos, de sua estrutura física, de sua hidrofiliicidade (PRAUSNITZ; LICHTENTHALER; AZEVEDO, 1999; LEWICKI, 2009). A atividade de um componente i de uma mistura é função de sua temperatura, pressão e concentração, e está relacionada aos conceitos de potencial químico e fugacidade. Pode ser expressa como a relação entre a pressão de vapor da água em determinado sistema, e a pressão de vapor de água pura, à mesma temperatura:

$$a_w = \frac{P_{w,s}^v}{P_w^v} \quad (1.2)$$

Em que a_w é a atividade de água (adimensional), $P_{w,s}^v$ é a pressão de vapor de água no sistema (Pa), e P_w^v é a pressão de vapor da água pura (Pa). É possível associar essa definição à umidade relativa do ar ao redor da amostra. A temperatura tem forte influência sobre as pressões de vapor envolvidas; portanto, a atividade de água, quando medida, é específica para determinada temperatura.

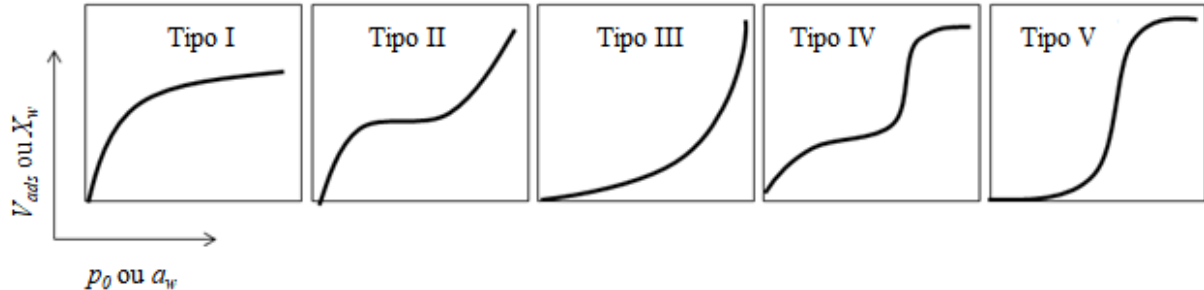
Pode-se definir a umidade de equilíbrio como a umidade em que o material se encontra após um tempo infinito exposto a um ambiente com pressão de vapor e temperatura determinadas. É resultado da interação entre o material e o ambiente, e pode ser predita por meio de uma isoterma de sorção de vapor. Assumindo um tempo infinito de secagem, a umidade relativa na câmara será igual à atividade de água do produto; utilizando uma isoterma de sorção, é possível relacionar a atividade de água à umidade de equilíbrio (LUDGER; FIGURA, 2007; DAVILA, 2016).

Ao determinar a umidade de equilíbrio, as isotermas de sorção são úteis por vários outros motivos. É possível prever a partir do comportamento da curva se o material é cristalino ou amorfo, se há histerese entre a secagem e a reidratação, e se em determinado conteúdo de água é seguro armazená-lo (AL-MUHTASEB; MCMINN; MAGEE, 2002).

A teoria da adsorção é conhecida desde o início do século XX, quando Langmuir (1918) publicou sua famosa teoria sobre a interação entre superfícies sólidas e meios gasosos. Brunauer, Emmett e Teller (1938) desenvolveram a ideia, acreditando que os gases se acomodavam em multicamadas sobre a superfície dos sólidos, comparando o fenômeno à condensação, e desenvolvendo equações para as “isotermas de adsorção”, como chamavam as curvas geradas. Mais tarde, Brunauer *et al.* (1940), ao checarem na literatura as diversas curvas de sorção de gases, propuseram cinco modelos para a descrição destas (Figura 1.2). Até o

presente momento, ao mencionar tipos de isotermas de sorção, os formatos mencionados remetem aos sugeridos pelos autores.

Figura 1.2. Tipos de isotermas de sorção propostos por Brunauer *et al.* (1940)



Fonte: Adaptado de Brunauer *et al.* (1940)

Em uma revisão da literatura, Al-Muhtaseb, McMinn e Magee (2002) afirmam que o tipo de isoterma mais comum para alimentos é o II. Para alimentos com alta concentração de sólidos solúveis, Rao, Rizvi e Datta (2005) afirmam, sem citar casos particulares, que o tipo III é o mais encontrado. Os autores também ressaltam que é comum a ocorrência de histerese: é comum que durante a dessorção o alimento retenha mais umidade que na adsorção, criando duas isotermas diferentes para os dois processos.

1.2.6 Encolhimento e porosidade

Mayor e Sereno (2004) compilaram da literatura uma série de modelos, empíricos e baseados em equações fundamentais, para descrever o encolhimento volumétrico durante a secagem, para diferentes geometrias. A maioria são modelos lineares empíricos, em que a relação V/V_0 vs. X/X_0 é uma reta e nenhum deles foi desenvolvido para yacón (KILPATRICK; LOWE; ARDSEL, 1955; LOZANO; ROTSTEIN; URBICAIN, 1980; KROKIDA; MAROULIS, 1997; MAYOR; SERENO, 2004).

Rahman (2009) define o encolhimento como uma mudança em volume de um material, devido a um processo por ele sofrido. O encolhimento aparente é definido por:

$$S_a = \frac{V_a}{V_{ai}} \quad (1.3)$$

Sendo: S_a o encolhimento aparente (-), V_a o volume aparente (cm³) e V_{ai} o volume aparente inicial (cm³). Pode fazer mais sentido descrever o encolhimento aparente como a fração de perda de volume, escrita como $1 - S_a$.

O autor define ainda a porosidade como o volume de vazios (ou ar), dividido pelo volume total de um material. Dependendo da finalidade, podem-se definir diferentes tipos de porosidade. A porosidade aparente é a razão entre o volume total de ar e o volume total de material, esteja ele em poros abertos ou fechados, e pode ser expressa como:

$$\varepsilon_a = 1 - \frac{\rho_a}{\rho_m} \quad (1.4)$$

Em que ε_a é a porosidade aparente (-), ρ_m é a densidade real do material (g cm^{-3}), e ρ_a é a densidade aparente do material (g cm^{-3}).

Frutas, raízes e outros tecidos vegetais podem geralmente ser considerados como meios porosos higroscópicos, contendo de 80 a 90 g de água a cada 100 g de vegetal, em base úmida (KHAN *et al.*, 2017). Essa água pode estar no meio intracelular, no meio intercelular (ou fracamente ligada), ou presa às paredes celulares (fortemente ligada) (KHAN *et al.*, 2016). Durante a secagem, a remoção da água do meio intercelular não tem grande influência sobre a estrutura do material a ser seco. Porém, quando a água contida nas células começa a deixá-las, o encolhimento é mais acentuado. Dependendo da composição do material, este pode colapsar (JOARDDER *et al.*, 2015; MAHIUDDIN *et al.*, 2018).

É comum, ao estudar processos de secagem, observar simultaneamente o encolhimento e a porosidade das amostras, pois estes conceitos estão interligados (MADAMBA; DRISCOLL; BUCKLE, 1994; SJÖHOLM; GEKAS, 1995; WANG; BRENNAN, 1995; MULET *et al.*, 2000). Se um material perde água, ele deve perder volume, a não ser que um poro se forme e a estrutura de suas paredes não colapse (KHAN *et al.*, 2018; MAHIUDDIN *et al.*, 2018).

Deve-se levar em conta que a perda de água ocorre primeiramente na superfície do material. Dependendo das condições de secagem, se a superfície encolher muito mais rapidamente que o interior, serão gerados estresses estruturais, o que pode levar à formação de rachaduras. Cabe avaliar se estas são ou não desejáveis. Além disso, ao perder água, as propriedades termofísicas do material se alteram, o que é comprovadamente relevante na transferência de calor e massa (APRAJEETA; GOPIRAJAH; ANANDHARAMAKRISHNAN, 2015).

Zabalaga, La Fuente e Tadini (2016) correlacionaram a difusividade térmica, o calor específico e a condutividade térmica de fatias de banana verde à sua porosidade e ao seu conteúdo de água. Sem apresentar cinéticas de secagem, neste trabalho, as autoras obtiveram isotermas de sorção, e apresentaram também a porosidade em função do conteúdo de água,

sugerindo um trabalho futuro em que fosse feita a simulação da secagem. Em sua tese de doutorado, Davila (2016) chega a apresentar esta simulação.

2 SECAGEM DE FATIAS DE YACÓN EM ESCALA PILOTO, CONSIDERANDO O ENCOLHIMENTO, E MODELAGEM MACROSCÓPICA DO PROCESSO*

Este capítulo descreve a secagem de yacón em escala piloto, com ênfase na cinética de secagem e em seu encolhimento. Observações macroscópicas sobre o processo foram realizadas com o objetivo de embasar a modelagem preliminar do encolhimento e das propriedades médias ao longo da secagem. Esta modelagem serve como base para a simulação descrita no Capítulo 4.

2.1 Introdução

Raízes de yacón, por terem alto conteúdo de água, e conseqüentemente apresentar alta atividade de água, favorecem o desenvolvimento de micro-organismos e reações enzimáticas, resultando em vida de prateleira curta (REIS *et al.*, 2012).

É prática comum nos Andes deixar as raízes recém-colhidas expostas ao sol, para desidratá-las. Essa operação, conhecida como *soleado*, além de desidratar o yacón, favorece a ação de enzimas que transformam fruto-oligossacarídeos em açúcares simples. Por isso, para dietas com redução de açúcar, o yacón deve ser utilizado, ou processado, o mais fresco possível (SEMINARIO; VALDERRAMA; MANRIQUE, 2003; SANTANA; CARDOSO, 2008).

Na literatura, são encontrados diferentes relatos sobre as melhores condições de armazenamento e secagem. Segundo Vilhena, Camara e Kakiyama (2000), o yacón deve ser armazenado por até 30 dias a 4 °C, e desidratado a uma temperatura máxima de 50 °C. Perussello *et al.* (2014) afirmam que em temperatura ambiente o yacón pode ser armazenado por até sete dias. Reis *et al.* (2012) utilizaram uma câmara de secagem a vácuo a (45, 55 e 65) °C, e não mencionaram o armazenamento. Scher, Rios e Noreña (2009) chegaram a realizar essa secagem até 70 °C.

Scher, Rios e Noreña (2009) realizaram a secagem de fatias de yacón de 4,5 mm de espessura a (50, 60 e 70) °C, com e sem branqueamento, como mencionado anteriormente. As condições de secagem estudadas não influenciaram significativamente a quantidade de inulina restante após o procedimento, o que indica que a degradação dos oligossacarídeos ocorreu aproximadamente na mesma proporção nas três condições. Os autores também relataram a

*Os resultados desta seção foram parcialmente publicados no artigo: MARQUES, B. Cristine; PLANA-FATTORI, A.; FLICK, D.; TADINI, C. Convective drying of yacón (*Smilax sp.*) slices: A simple physical model including shrinkage. *LWT*, v. 159, n. July 2021, p. 113151, 2022 <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2022.113151>

cinética de secagem, embora não tenham realizado modelagem matemática. Fatias branqueadas atingiram mais rapidamente o peso constante do que as das não pré-tratadas. A diferença entre o tempo para atingir massa constante na secagem a 50 °C e a 70 °C foi de 50 min.

Em 2012, Reis *et al.* secaram fatias de yacón de (2, 4 e 6) mm a (45, 55 e 65) °C, sob vácuo (pressão absoluta de 11,325 Pa). Além de relatar a cinética de secagem, os autores mediram a dimensão fractal das amostras, e mostraram que esta tem relação direta com a cor, a umidade e a capacidade de reidratação. Essa correlação deve-se ao fato de que quanto maior o encolhimento, maior a dimensão fractal. Assim, os autores preveem que seja possível estimar essas propriedades apenas medindo a dimensão fractal.

Salinas *et al.* (2018) secaram yacón e observaram a cor e o módulo de elasticidade após o procedimento. Em vez de usar fatias, os autores secaram purê de yacón, e concluíram que a temperatura ótima para a secagem, que alteraria ao mínimo a cor e a textura da pasta de yacón, seria 55 °C e 2 m/s. Os autores também sugerem que seria interessante aumentar a velocidade do ar para uma secagem a temperaturas mais altas.

Shi, Zheng e Zhao (2015) realizaram uma pré-secagem de yacón usando uma câmara de secagem convectiva, para depois utilizarem micro-ondas. Porém a cinética do processo não foi mostrada, sendo que o material obtido foi utilizado para construir um diagrama de estado, mostrando a interação dos sólidos do yacón com a água. Em 2013, Shi, Zheng e Zhao já haviam feito um estudo sobre a cinética de secagem de yacón, porém sem micro-ondas, em uma câmara que dispunha de bomba de calor. Os autores chegaram à conclusão de que, nessas condições, a velocidade do ar não exerceu influência significativa na cinética de secagem do material. É mencionada uma “pequena variação” de cor das amostras dependendo das condições de secagem, mas não são mostrados dados sobre esse parâmetro.

2.1.1 Pré tratamentos e efeitos do processamento na quantidade de FOS

As raízes de yacón recém fatiadas têm tendência a escurecer devido à ação da enzima polifenoloxidase (YAN *et al.*, 1999; LACHMAN; FERNÁNDEZ; ORSÁK, 2003), o que exige um pré-tratamento. Scher, Rios e Noreña (2009) secaram fatias de yacón sem pré tratamento e após branqueamento a vapor, e mediram o efeito desse procedimento sobre o perfil de açúcares das amostras. A quantidade de inulina diminuiu de 6,94 g/100 g, base seca, para 4,81 g/100 g após o branqueamento. A secagem reduziu a quantidade de inulina a até 4,06 g/100 g b.s. para as amostras pré-tratadas, e a até 5,81 g/100 g b.s. para as amostras sem pré-tratamento.

Reis *et al.* (2012) utilizaram um banho de ácido cítrico para a inibição enzimática, mas não estudaram o efeito desse pré-tratamento nas concentrações finais de fruto-oligossacarídeos. Shi, Zheng e Zhao (2013) utilizaram uma solução de sulfito de sódio para inibir a ação enzimática, e também não reportaram os efeitos sobre o perfil de carboidratos.

2.1.2 Coeficiente convectivo

Anteriormente, o processo de secagem foi descrito como o “contato de uma corrente de ar insaturado com o material a ser seco”. Neste processo, a convecção desempenha o papel de remover a umidade da superfície do material, e de aquecer esta superfície.

Define-se convecção como a transferência de energia entre uma superfície e um fluido que se movimenta sobre ela. Esta transferência se dá nas camadas de fluido próximas à superfície, que se movimentam mais lentamente que a corrente principal, e às quais se dá o nome de camada-limite. As moléculas de fluido em contato com a superfície entram em equilíbrio térmico com a mesma, e o calor é transferido entre camadas por condução. Conforme a distância da superfície aumenta, a velocidade do fluido também aumenta, e o calor pode ser transferido pela mistura de porções do fluido, no fenômeno de advecção. Além disso, deve-se considerar a transferência de massa da superfície para a corrente de fluido, nos casos em que ocorre evaporação. Neste caso, além da difusão mássica na camada-limite e da advecção que arrasta a água pela corrente de ar, há a transferência da energia necessária à evaporação. A convecção, efetivamente, é a combinação destes fenômenos. (INCROPERA, 2008).

O foco deste trabalho é o efeito médio da convecção, portanto o equacionamento pertinente à camada-limite não será mencionado. Para descrever a taxa média de transferência de calor por convecção na secagem, é necessário definir um coeficiente convectivo médio, que engloba todos os fenômenos envolvidos:

$$q = \bar{h} A (T - T_{ar}) \quad (2.1)$$

em que q é a taxa de transferência de calor (W), \bar{h} é o coeficiente convectivo ($\text{Wm}^{-2}\text{C}^{-1}$), A é a área da superfície sobre a qual passa a corrente de ar (m^2), T é a temperatura da superfície ($^{\circ}\text{C}$) e T_{ar} é a temperatura do ar de secagem ($^{\circ}\text{C}$).

2.1.3 Objetivos

Neste capítulo, as metas específicas foram: a) explorar o comportamento da secadora em escala piloto, as diferenças de temperatura entre diversas posições, e o seu coeficiente convectivo; e b) descrever a cinética de secagem de fatias de yacón, cortadas de forma a formar

chips quando secas, incluindo-se o encolhimento e a evolução de suas propriedades termofísicas.

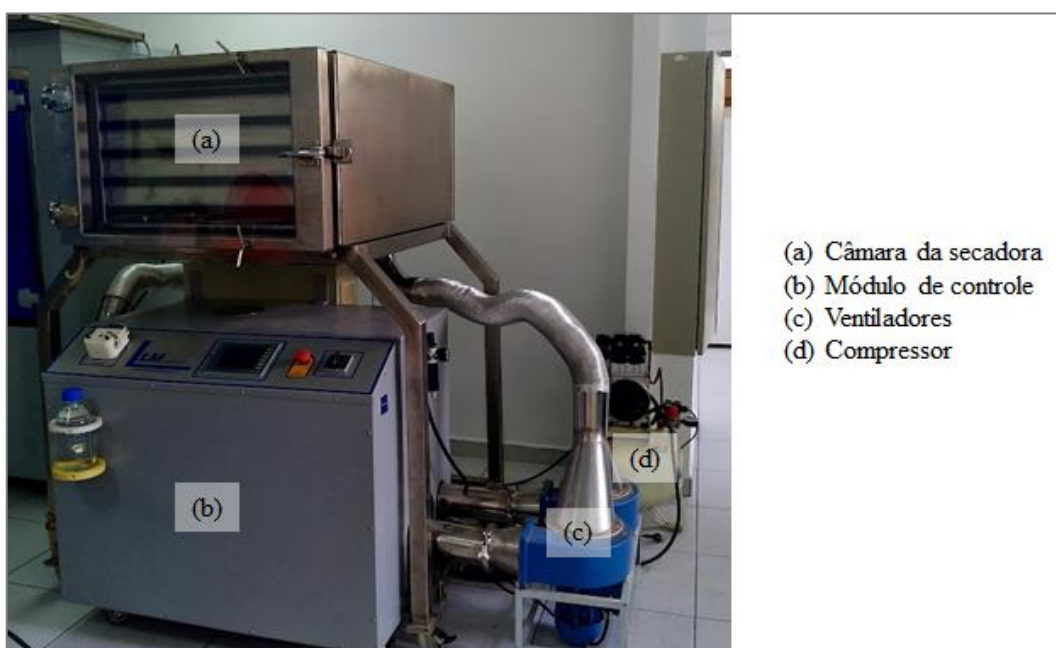
2.2 Materiais e métodos

Nesta seção, são descritos os passos para obtenção das cinéticas de secagem, medições de encolhimento e obtenção de propriedades térmicas, e a modelagem para descrição destes dados.

2.2.1 Secadora convectiva: descrição e avaliação

Para a secagem das fatias de yacón, foi utilizada a secadora convectiva LM-ES20 (Labmaq, Brasil), mostrada na Figura 2.1:

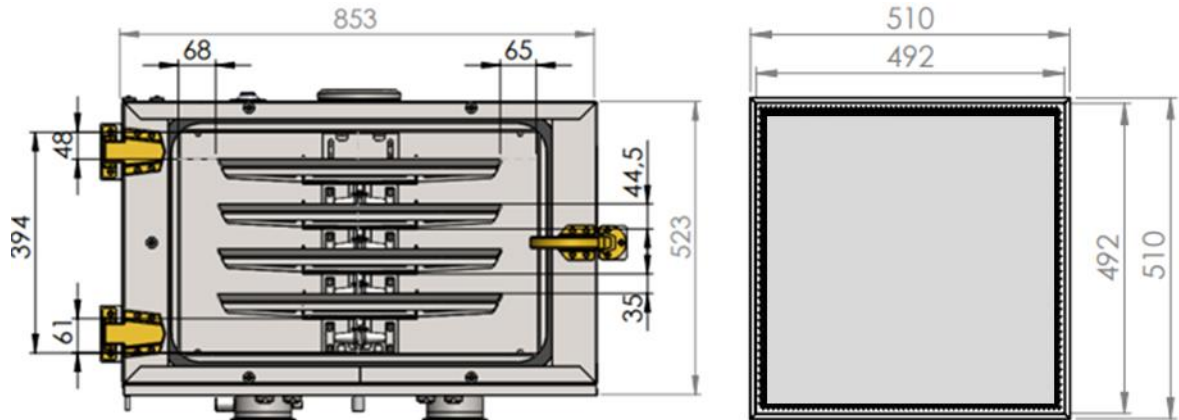
Figura 2.1. Secadora convectiva LM ES 20.



Fonte: Autor

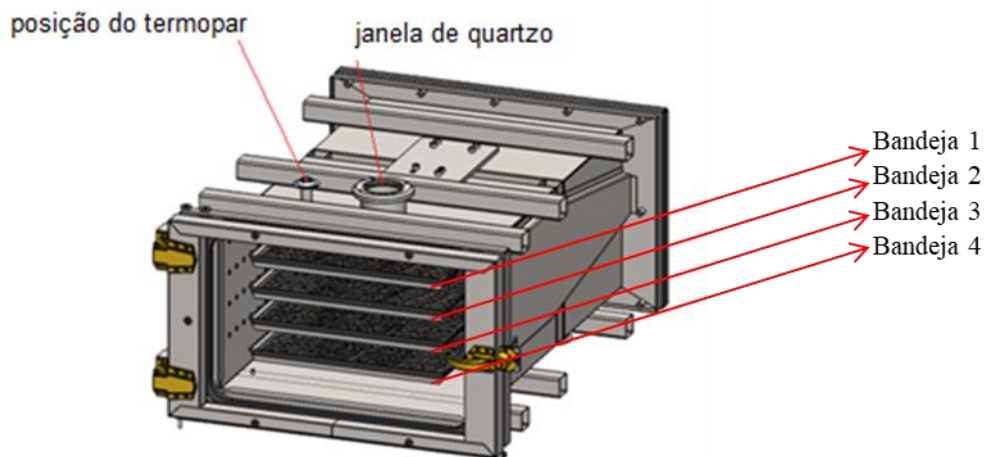
A secadora é construída em aço inox AISI304, e possui quatro balanças, sobre as quais são apoiadas quatro bandejas perfuradas. Para evitar perturbações na medição da massa das balanças, a área de cada balança é separada por uma chapa de aço sem perfurações. No topo da câmara principal da secadora, há uma janela de quartzo de 9,5 cm de diâmetro, sobre a qual é possível apoiar o estereomicroscópio SD6 (Leica, Alemanha). As Figuras 2.2 e 2.3 ilustram as dimensões e a disposição das bandejas na câmara.

Figura 2.2- Vista frontal e dimensões da câmara da secadora e de uma de suas bandejas.



Fonte: Labmaq do Brasil

Figura 2.3. Secadora vista em perspectiva.



Fonte: Labmaq do Brasil (Adaptado)

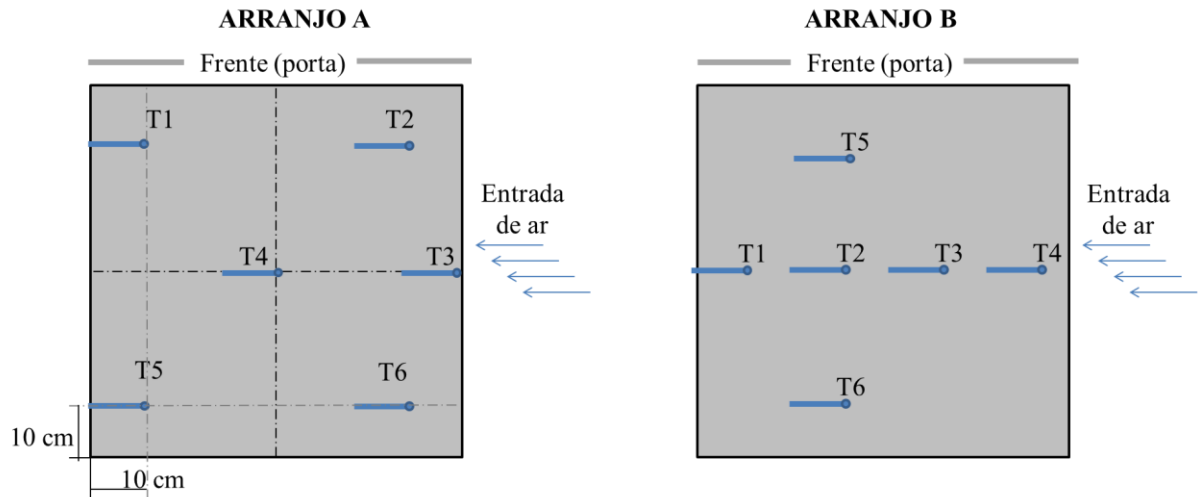
Para observar a distribuição de temperaturas no interior da secadora, seis termopares tipo T calibrados foram fixados em dois arranjos diferentes a uma das bandejas da secadora, e apoiados sobre pedaços de cortiça, conforme mostrado na Figura 2.4.

A aquisição de dados de temperatura foi realizada usando o programa Labview (National Instruments, EUA), em tempo real.

A bandeja com o **arranjo A** foi colocada na secadora, já estabilizada nas condições desejadas (50 °C ou 60 °C, 4 m/s, UR = 20 %), na posição da bandeja 1 (Vide Figura 2.3), e deixada por uma hora. Depois disso, a câmara da secadora foi rapidamente aberta, e a bandeja foi mudada da posição 1 para a posição 2. A câmara foi fechada e deixada por mais uma hora.

Repetiu-se o procedimento até a bandeja 4. A bandeja com o **arranjo B** foi deixada na posição da bandeja 1 por pelo menos três horas, na temperatura de 50 °C. Não foi possível fazer o experimento a 60 °C devido a um problema técnico com a aquisição de dados dos termopares.

Figura 2.4. Arranjos usados para distribuição dos termopares nas bandejas.



Fonte: Autor

Durante pré-testes, observou-se que, no final do processo de secagem, foi registrado um valor da massa abaixo do esperado pela balança. Os métodos empregados e resultados obtidos para a aferição das balanças, por não fazerem parte dos objetivos principais do projeto, estão disponíveis no **Apêndice A**.

2.2.1.1 Determinação do coeficiente convectivo

Como parte da avaliação da secadora, foi estimado o coeficiente convectivo. Para isto, foram usinados sob encomenda dois cilindros de alumínio, com formato similar ao das fatias de yacón a serem utilizadas posteriormente. Cada um contém um furo, de 1 mm de raio e 1 cm de profundidade, destinado a encaixar um termopar tipo T de junta exposta. As dimensões dos cilindros são mostradas na Tabela 2.1 a seguir:

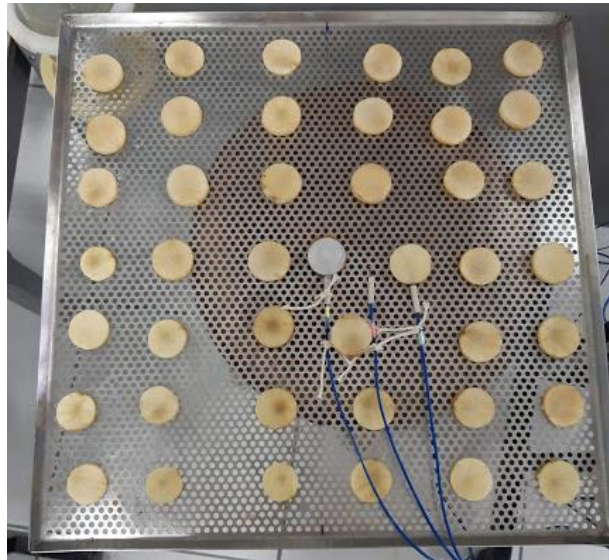
Tabela 2.1. Características dos cilindros de alumínio usados na determinação do coeficiente convectivo.

r (cm)	h (cm)	Volume do furo (m^3)	Volume (cm^3)	Massa (g)	Área (m^2)
1,75	0,70	$7,07 \times 10^{-8}$	6,66	17,99	$1,73 \times 10^{-3}$
1,00	0,30	$7,07 \times 10^{-8}$	0,87	2,35	$5,03 \times 10^{-4}$

Calibraram-se os termopares usando um banho termostatzado (modelo EcoGold, Lauda, Alemanha), checando-se com termômetros calibrados, a 40, 50, 60 e 70 °C. Mediram-se as temperaturas e ajustou-se uma reta para cada termopar, cujos coeficientes foram inseridos no sistema de aquisição (Labview, National Instruments, USA).

Para cada experimento, utilizaram-se três termopares: um para o cilindro de alumínio em uso, um para uma fatia de yacón, e um para o ar. O cilindro de alumínio foi colocado no centro geométrico de uma das bandejas removíveis da secadora. Sob o cilindro, posicionou-se um pedaço de cortiça, de cerca de 4 mm de espessura, e com o mesmo diâmetro do cilindro, para evitar transferência de calor por condução. O furo no cilindro foi preenchido com pasta térmica (MasterGel Maker, Cooler Master, Taiwan) para assegurar a transferência de calor para o termopar. Então, inseriu-se a ponta do termopar no furo, dentro da pasta térmica. A 5 cm do cilindro, na direção horizontal, um termopar foi deixado exposto ao ar; e a 10 cm do cilindro, na mesma direção horizontal, uma fatia de yacón foi posicionada e teve um termopar nela inserido. O restante da bandeja foi preenchido com fatias de yacón, preparadas como descrito na Seção seguinte. Para os testes com o cilindro de 35 mm, foram usadas fatias de yacón frescas; e para o teste com o cilindro de 20 mm, foi usado yacón seco em testes anteriores. A Figura 2.5 mostra o arranjo experimental.

Figura 2.5. Arranjo experimental para a determinação do coeficiente convectivo.



Fonte: Autor

Durante o preparo da bandeja, estabilizou-se a secadora a 60 °C, 20 % de UR e velocidade do ar de 4 m/s. Depois de estabilizadas as condições do ar de secagem, colocou-se a bandeja na secadora, sobre a balança mais alta. A porta foi fechada e registrou-se a

temperatura até que o sistema chegasse o mais próximo possível do equilíbrio térmico. Para cada cilindro, o procedimento foi realizado em triplicata.

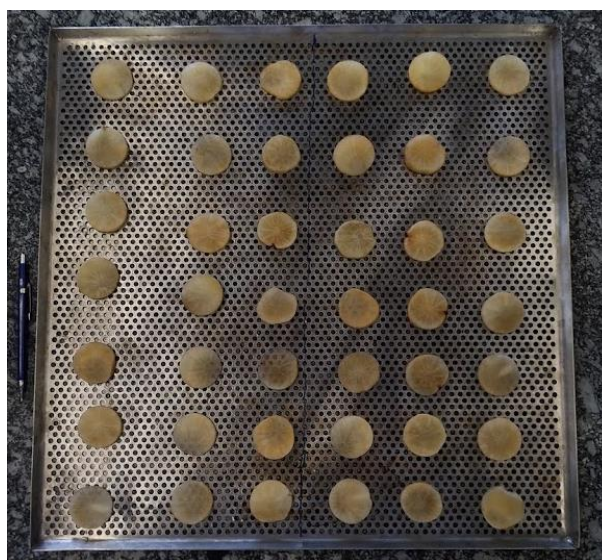
2.2.2 Branqueamento e secagem de fatias de yacón

Para inibir a ação da enzima polifenoloxidase após o corte, utilizou-se uma solução aquosa de ácido cítrico 2 g/kg (REIS *et al.*, 2012).

Raízes de yacón foram marcadas com um cortador de legumes serrilhado, e cortadas nos locais marcados usando uma faca, em fatias de 7 mm de espessura. Depois, retiraram-se das fatias pedaços cilíndricos de 4 cm de diâmetro, utilizando um cortador circular em aço inox. Para cada teste, foram cortadas cerca de 50 fatias, das quais 42 foram separadas para secagem, e o restante para outras análises.

Logo após o corte, todas as fatias (cerca de 370 g) foram imersas em meio litro da solução de ácido cítrico preparada anteriormente, por três minutos. Decorrido esse tempo, as fatias foram retiradas da solução e colocadas em uma das bandejas da secadora LM-ES20 (Labmaq, Brasil), arranjadas em sete fileiras na vertical e seis na horizontal, conforme a Figura 2.6. A bandeja em questão havia sido previamente tarada na balança da secadora.

Figura 2.6. Bandeja com fatias de yacón preparadas para a secagem.



Fonte: Autor

Depois de preparada com as fatias, a bandeja foi colocada na secadora, a qual estava previamente estabilizada nas condições desejadas por pelo menos meia hora, e mantida por pelo menos 330 min. A aquisição dos dados na secadora é automática e em tempo real.

As condições utilizadas foram:

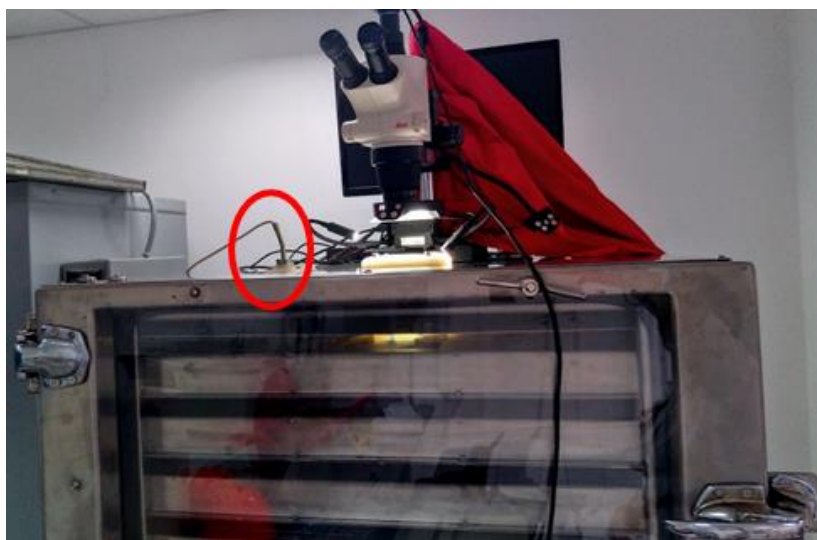
- a) Temperatura de bulbo seco de 50 °C, velocidade do ar na câmara 4 m/s, umidade relativa 20 %;
- b) Temperatura de bulbo seco de 50 °C, velocidade do ar na câmara 4 m/s, umidade relativa 30 %;
- c) Temperatura de bulbo seco de 60 °C, velocidade do ar na câmara 4 m/s, umidade relativa 20 %;
- d) Temperatura de bulbo seco de 60 °C, velocidade do ar na câmara 4 m/s, umidade relativa 30 %;

Cada condição foi conduzida em triplicata. Um teste extra foi realizado com um novo lote de yacón, comprado em um mercado local de São Paulo-SP em junho de 2022, para produção de amostras utilizadas no Capítulo 5.

2.2.3 Medição das dimensões das fatias durante a secagem

O encolhimento na direção radial de uma fatia de yacón, localizada diretamente sob a janela de quartzo da secadora, foi medido durante a secagem. A observação em tempo real e aquisição de imagens foi possível utilizando um estereomicroscópio SD6 (Leica, Alemanha), acoplado a uma câmera MC170HD (Leica, Alemanha), ligada a um computador com o programa LAS 6 (Leica Microsystems Applications, Suíça), conforme ilustrado na Figura 2.7. O programa é calibrado para reconhecer distâncias reais e permitiu a medição do diâmetro da fatia.

Figura 2.7. Estereomicroscópio sobre a secadora, em posição de aquisição de imagens, para medição do encolhimento radial. Destaque: termopar que mede a temperatura na câmara.



Fonte: Autor

Para medir a altura ao longo do tempo, três fatias de yacón foram selecionadas na bandeja superior da secadora e marcadas próximo à borda com um marcador permanente. Em intervalos de meia hora, as fatias foram removidas, medidas por meio de um micrômetro (modelo 103-137, Mitutoyo, Brasil), e depois devolvidas o mais rapidamente possível. As medidas sempre foram realizadas primeiro na borda da fatia, próximo à marcação, e depois no centro.

Devido à necessidade de reposicionar a fatia que ficava diretamente sob o microscópio, e de realizar medições frequentes de altura, o encolhimento foi medido em experimentos separados da cinética, devido às perturbações causadas pela abertura da porta e remoção das amostras.

As imagens obtidas estão disponíveis no **Apêndice B**.

2.2.4 Determinação de umidade

A umidade das amostras, antes e após a secagem, foi medida de acordo com a metodologia proposta por Zenebon, Pascuet e Tiglea (2008) (a qual foi baseada na norma AOAC 926.12 de 1996).

Para cada medida, deixou-se uma placa de Petri por pelo menos 12 h a 100 °C, em uma estufa modelo 119 (Fabbe, Brasil). Essas placas foram colocadas para esfriar em dessecador até o uso. Antes de cada cinética de secagem, foram separadas três a quatro fatias de yacón, preparadas da mesma forma que as demais utilizadas na cinética. As fatias foram embaladas em filme de PVC, e mantidas em geladeira por no máximo uma hora. Depois, foram picadas com uma faca em cubos de cerca de 1 cm de lado. As placas de Petri preparadas anteriormente foram pesadas em uma balança analítica Chyo JK-200 (YMC Co., Japão) e taradas. Depois colocaram-se nas placas de quatro a seis cubos de yacón, de modo a totalizar entre 2 g e 3 g, e anotou-se exatamente a massa. As placas com amostra foram colocadas em uma estufa a vácuo (< 100 mmHg) MA30 (Marconi, Brasil), a 70 °C, por pelo menos 12 h. Decorrido esse período, pesaram-se novamente as placas. A umidade foi calculada como:

$$X_{w,bs} = \frac{m_i - m_f}{m_f} \quad (2.2)$$

$$X_{w,bu} = \frac{m_i - m_f}{m_i} \quad (2.3)$$

Em que $X_{w,bs}$ é a umidade em base seca (g/g), $X_{w,bu}$ é a umidade em base úmida (g/g), m_i é a massa inicial da amostra (g), e m_f é a massa final da amostra (g), após a secagem.

2.3 Modelagem

2.3.1 Descrição da cinética de secagem

Há na literatura diversas expressões propostas para descrever a cinética de secagem de um sólido. A maioria delas tem em comum a normalização do conteúdo de água, chamada de MR, do inglês *moisture ratio*:

$$MR = \frac{X_w - X_{we}}{X_{w0} - X_{we}} \quad (2.4)$$

Em que MR é o conteúdo de água normalizado (-), X_w (g/g b.s.) é o conteúdo de água, X_{we} é o conteúdo de água no equilíbrio¹ (g/g b.s.), e X_{w0} é o conteúdo de água inicial (g/g b.s.).

A expressão clássica para descrever a cinética de secagem é a proposta por Lewis (1921):

$$MR = \exp(-kt) \quad (2.5)$$

Na qual t é o tempo (s) e k é um parâmetro relacionado à velocidade inicial de secagem (s^{-1}). Desta expressão derivam diversas adaptações, mostradas na Tabela 2.2; algumas foram utilizadas neste trabalho.

Tabela 2.2. Alguns modelos clássicos usados para descrever cinéticas de secagem.

Modelo	Equação	Referência
Page	$MR = \exp(-k_1 t^n)$	Page (1949)
Page modificado	$MR = \exp(-k_1 t)^n$	White (1979)
Henderson-Pabis	$MR = a \exp(-k_1 t)$	Henderson & Pabis (1961) <i>apud</i> Shi (2013)

Em que MR é o conteúdo de água normalizado (-); k_1 (s^{-1}) e n (-) são constantes do modelo; e t (s) é o tempo.

Nosso grupo de pesquisa (MARQUES *et al.*, 2022) propôs uma expressão que descreve melhor o conjunto de dados obtido neste trabalho:

$$MR = \exp\left(-k_1 t - (k_2 t)^2\right) \quad (2.6)$$

Em que k_1 e k_2 são os parâmetros cinéticos (s^{-1}).

Uma implicação interessante deste modelo pode ser observada derivando-se a eq. 2.6:

¹ Para mais informações sobre a obtenção da umidade de equilíbrio, vide as Seções 5.2.4 e 5.4.4.

$$\frac{dMR}{dt} = (-k_1 - 2k_2^2 t) \left[\exp\left(-k_1 t - (k_2 t)^2\right) \right] \quad (2.7)$$

Nesse caso, no início da secagem, $dMR/dt = -k_1$. Além disso, se um tempo adimensional é definido:

$$t^* = tk_1 \quad (2.8)$$

É possível expressar a perda de água por evaporação como:

$$\frac{dMR}{dt^* (A/A_0)} = (-MR) \left(1 + \frac{2tk_2^2}{k_1} \right) \frac{1}{(A/A_0)} \quad (2.9)$$

2.3.2 Evolução das dimensões

Para incluir o encolhimento na modelagem, foram testadas descrições simplificadas das dimensões das amostras. Cada uma dessas aproximações foi testada para verificar se era razoavelmente realista.

O volume das amostras foi calculado de acordo com o método de adição dos volumes:

$$V^* = \frac{1}{\rho} = \frac{1}{\rho_{dm}} + \frac{X_w}{\rho_w} \quad (2.10)$$

em que V^* é o volume específico total da amostra de yacón (cm^3/g), ρ é a densidade da amostra (g cm^{-3}), ρ_{dm} é a densidade da matéria seca da amostra (g cm^{-3}), ρ_w é a densidade da água (g cm^{-3}), e X_w é o conteúdo de água (g/g b.s.).

O conteúdo de água foi expresso de forma normalizada ($X_w^* = X_w/X_{w0}$). O volume normalizado pode ser computado a partir das dimensões medidas e do conteúdo de água:

$$\frac{V}{V_0} = \frac{1 + \left(\frac{\rho_{dm}}{\rho_w} \right) X_{w0} X_w^*}{1 + \left(\frac{\rho_{dm}}{\rho_w} \right) X_{w0}} \quad (2.11)$$

em que V_0 é o volume da amostra no início da secagem (cm^3). Ou, alternativamente:

$$\frac{V}{V_0} = H^* (D^*)^2 \quad (2.12)$$

$$A^* = \frac{A}{A_0} = D^* \left(\frac{D^* + 2H^* H_0 / D_0}{1 + 2H_0 / D_0} \right) \quad (2.13)$$

em em que V_0 é o volume da amostra no início da secagem (cm^3), H_0 é a altura inicial (cm); D_0 é o diâmetro inicial (cm); H^* é a altura normalizada ($=H/H_0$, adimensional); D^* é o diâmetro normalizado ($=D/D_0$, adimensional); e A^* é a área normalizada ($=A/A_0$, adimensional).

Para todos os modelos simplificados propostos, a área das amostras, contando a superior, inferior e lateral, pode ser expressa de acordo com a Equação 2.13.

Em uma primeira aproximação, chamada de modelo vertical, baseada em observações preliminares, é possível assumir que o encolhimento das amostras é desprezível na direção radial (diâmetro), se comparado com o da longitudinal (altura):

$$H_{vert}^* = \frac{V}{V_0}; D_{vert}^* = 1 \quad (2.14)$$

em que H_{vert}^* é a altura normalizada, de acordo com o modelo vertical (-) e D_{vert}^* é o diâmetro normalizado de acordo com o modelo vertical (-).

Um segundo modelo, chamado isotrópico, assume encolhimento proporcional ao volume para a altura e o diâmetro:

$$H_{iso}^* = D_{iso}^* = \left(\frac{V}{V_0} \right)^{1/3} \quad (2.15)$$

em que H_{iso}^* é a altura normalizada, de acordo com o modelo isotrópico (-) e D_{iso}^* é o diâmetro normalizado de acordo com o modelo isotrópico (-).

E o terceiro modelo, chamado superficial, considera que a perda de água acontece na forma de uma fronteira móvel, que encolheria a mesma distância na direção radial e na vertical:

$$H_{surf}^* = \frac{H_{surf}}{H_0}; D_{surf}^* = \frac{D_{surf}}{D_0} \quad (2.16)$$

$$H_0 - H_{surf} = D_0 - D_{surf} \quad (2.17)$$

em que H_{surf}^* é a altura normalizada, de acordo com o modelo superficial (-) e D_{surf}^* é o diâmetro normalizado de acordo com o modelo superficial (-).

Após rearranjo das Eq. 2.16 e 2.17, foi obtido um polinômio de terceiro grau para descrever a altura das amostras, cujas raízes podem ser obtidas usando métodos padrão (Abramowitz; Stegun, 1972):

$$\left(H_{surf} \right)^3 + 2(D_0 - H_0) \left(H_{surf} \right)^2 + (D_0 - H_0)^2 \left(H_{surf} \right) - D_0^2 H_0 \frac{V}{V_0} = 0 \quad (2.18)$$

Finalmente, é possível propor modelos combinados, ponderando-se os resultados das descrições acima. O primeiro e o segundo modelo foram combinados de forma a aumentar a importância do segundo de acordo com a progressão da secagem:

$$H_{comb}^* = (H_{iso}^*)^b (H_{vert}^*)^{1-b}; D_{comb}^* = (D_{iso}^*)^b \quad (2.19)$$

em que H_{comb}^* é a altura normalizada, de acordo com o modelo combinado (-) e D_{comb}^* é o diâmetro normalizado de acordo com o modelo combinado (-).

O parâmetro de ponderação é definido como:

$$b = \frac{1}{2}(1 - X_w^*) \quad (2.20)$$

em que b é o parâmetro de ponderação (-).

2.3.3 Determinação do coeficiente convectivo

Para o cálculo do coeficiente convectivo foi usado o método da capacitância global, descrito em Incropera *et al.* (2007):

$$\frac{T - T_\infty}{T_i - T_\infty} = \exp \left[- \left(\frac{hA}{mc_p} \right) t \right] \quad (2.21)$$

Em que T é a temperatura do objeto em determinado momento ($^{\circ}\text{C}$), T_∞ é a temperatura do ar ($^{\circ}\text{C}$), T_i é a temperatura inicial do objeto ($^{\circ}\text{C}$), h é o coeficiente convectivo ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$), A é a área do objeto (m^2), m a sua massa (g), c_p seu calor específico (J/gK), e t , o tempo decorrido (s).

Esse método só é válido se o número de Biot ($Bi = hD/k$) for menor do que 1, o que indica que a condução dentro do objeto é muito mais rápida, e representa menos resistência à transferência de calor, que a convecção na superfície; e que, portanto, o objeto tem temperatura aproximadamente uniforme, o que justifica colocar o termopar em um ponto apenas.

O modo clássico de uso da Equação 2.21 é o seguinte rearranjo, que permite que ela seja usada como um modelo para a temperatura em determinado momento:

$$T = T_\infty + \left[(T_i - T_\infty) \left(\exp \left[- \frac{hA}{mc_p} t \right] \right) \right] \quad (2.22)$$

Porém, devido às condições do experimento, T_∞ não pode ser considerada constante, o que torna esse rearranjo inconsistente para a análise de uma rampa de aquecimento. Para contornar este problema, a Eq. 2.21 na forma:

$$-hA(T - T_\infty) = mC_p \frac{dT}{dt} \quad (2.23)$$

foi diretamente integrada em função de T_{∞} , utilizando-se a função *odeint* em Python. O erro foi minimizado considerando-se as triplicatas em relação à temperatura simulada desta forma. O código utilizado está disponível no Apêndice C.

2.3.4 Balanço de massa

Pode-se definir o fluxo evaporativo na superfície da fatia de yacón como:

$$-\frac{dm_w}{dtA}, \text{ ou } \frac{-d(m_s X_w)}{dtA} \quad (2.24)$$

Considerando este fluxo como proveniente apenas da convecção (levando em conta a hipótese de que há um período a taxa constante), tem-se (Mc CABE, SMITH & HARRIOTT, 2014):

$$\frac{-d(m_s X_w)}{dtA} = \frac{h(T_{ar} - T_{sup})}{L_v} \quad (2.25)$$

$$\frac{-dX_w}{dt} = \frac{hA(T_{ar} - T_{sup})}{m_s L_v} \quad (2.26)$$

Derivando a definição de *MR* (Eq. 2.4) pelo tempo, tem-se:

$$\frac{-dMR}{dt} = \frac{d}{dt} \frac{X_w}{X_{w0} - X_{we}} \quad (2.27)$$

$$\frac{dMR(X_{w0} - X_{we})}{dt} = \frac{dX_w}{dt} \quad (2.28)$$

Combinando (2.26) e (2.28), pode-se expressar a derivada de (2.4) pelas temperaturas do ar ambiente e da superfície:

$$\frac{dMR}{dt} = \frac{hA(T_{ar} - T_{sup})}{m_s L_v (X_{w0} - X_{we})} \quad (2.29)$$

Como implicação da Equação 2.7, no início da secagem, $dMR / dt = -k_1$. Então:

$$-k_1 = \frac{-hA(T_{ar} - T_{sup})}{m_s L_v (X_{w0} - X_{we})} \quad (2.30)$$

Em $t = 0$, $T_{sup} = T_{bu}$:

$$h = \frac{k_1 m_s L_v (X_{w0} - X_{we})}{A_0 (T_{ar} - T_{bu})} \quad (2.31)$$

Para normalização, combinam-se as Equações 2.30 e 2.31:

$$\frac{(T_{ar} - T_{sup})}{(T_{ar} - T_{bu})} = \frac{(dMR / dt) A}{(dMR / dt)|_{t=0} A_0} \quad (2.32)$$

$$\frac{(dMR/dt)/A}{(dMR/dt)|_{t=0}/A_0} = \frac{A_0}{A} \frac{1}{(X_{w0} - X_{weq})} \frac{dX_w}{dt} = -\frac{A_0}{A} \frac{1}{\left(\frac{X_{w0}}{X_{w0}} - \frac{X_{weq}}{X_{w0}}\right)} \left(\frac{1}{X_{w0}}\right) \frac{dX_w}{dt} \frac{1}{k_1} \quad (2.33)$$

Considerando-se $X_w^* = X_w / X_{w0}$, $A^* = A / A_0$ e $t^* = -tk_1$:

$$\frac{(T_{ar} - T_{sup})}{(T_{ar} - T_{bu})} = \frac{1}{(1 - (X_{weq} / X_{w0}))} \frac{dX_w^*}{dt^*} \quad (2.34)$$

Pode-se expressar o balanço de massa por evaporação como:

$$-\frac{dm_w}{dt.A} = D(C_{w,sup} - C_{w,ar}) \quad (2.35)$$

Em que D é o coeficiente de transferência de massa (m/s), $C_{w,sup}$ é a concentração de água na superfície da fatia (kg m^{-3}), e $C_{w,ar}$ é a concentração de água no ar (kg m^{-3}).

Rearranjando (2.35):

$$X_w = \frac{m_w}{m_s}; \quad \frac{dX_w}{dt} = \frac{1}{m_s} \frac{dm_w}{dt}; \quad \frac{dm_w}{dt} = m_s \frac{dX_w}{dt} \quad (2.36)$$

$$\frac{dX_w}{dt} = \frac{DA}{m_s} (C_{w,sup} - C_{w,ar}) \quad (2.37)$$

Comparando (2.29) e (2.37):

$$\frac{dX_w}{dt} = \frac{hA}{m_s L_v} (T_{ar} - T_{sup}) \quad (2.38)$$

$$\frac{dX_{w0}}{dt} = \frac{hA_0}{m_s L_v} (T_{ar} - T_{bu}) \quad (2.39)$$

Na superfície, arranjando C_w no lugar das temperaturas:

$$\frac{C_{w,ar} - a_w C_{w,sat}(T_{sup})}{C_{w,ar} - 1.C_{w,sat}(T_{wb})} = \frac{(T_{ar} - T_{sup})}{(T_{ar} - T_{wb})} \quad (2.40)$$

C_w é obtida da lei dos gases ideais:

$$C_{w,sat}(T_{sup}) = \frac{P_{sat}^{sup} M_w}{RT_{sup}} \quad (2.41)$$

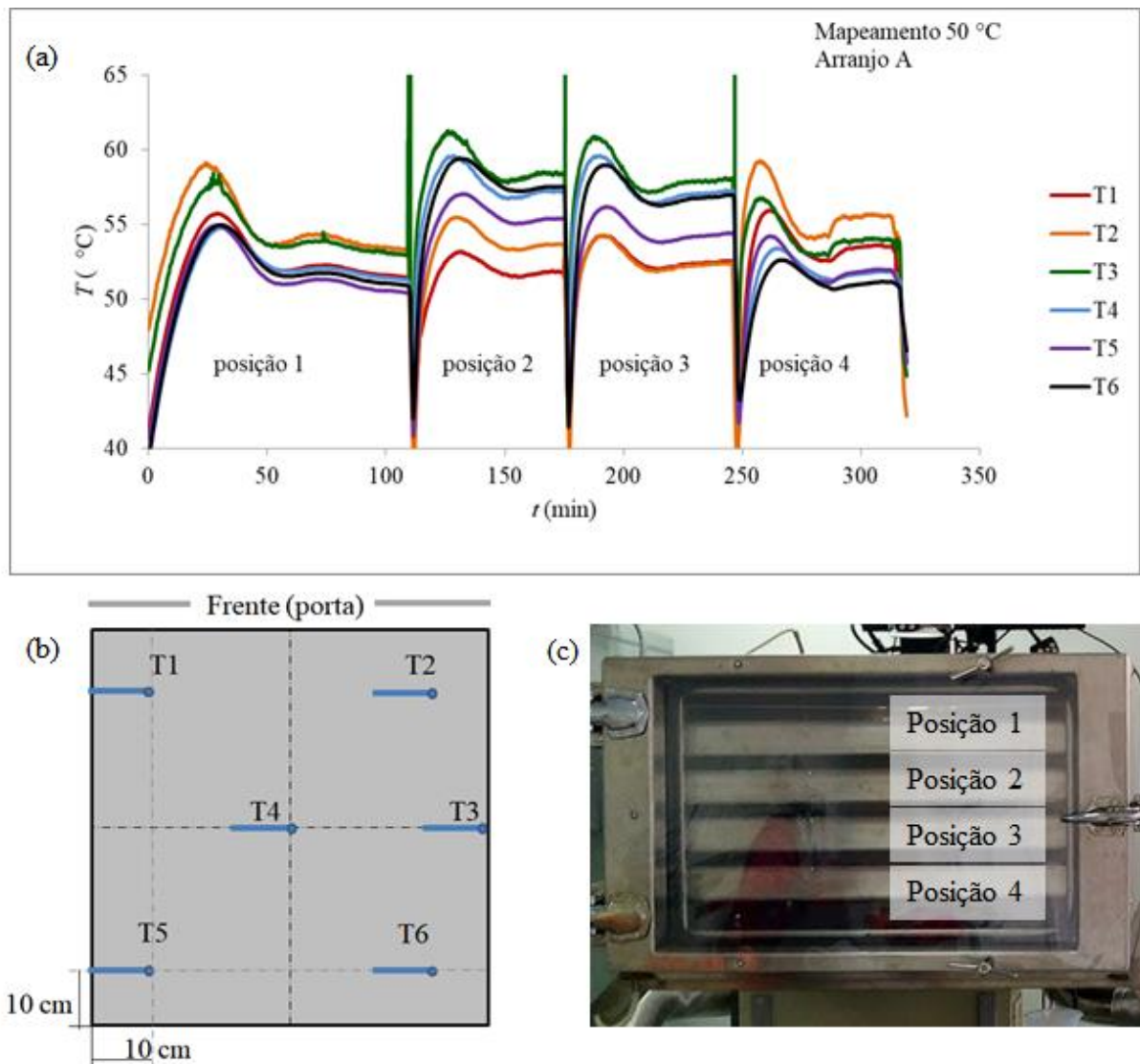
Em que P_{sat} é a pressão de vapor saturado à temperatura da superfície (Pa), R é a constante dos gases ideais ($8,314 \text{ J/K mol}$), e M_w é a massa molar da água (g/mol).

2.4 Resultados e discussão

2.4.1 Mapeamento da temperatura na secadora em escala piloto

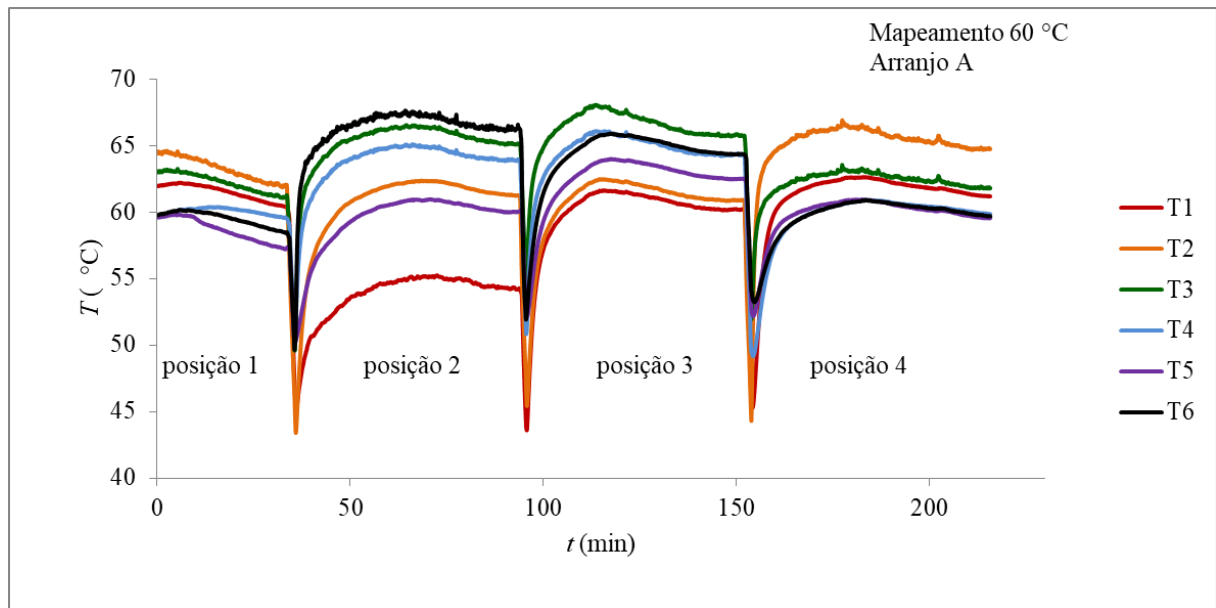
Nas Figuras 2.8 a 2.10 a seguir estão apresentados os perfis das temperaturas medidas com os termopares colocados em diferentes pontos da secadora.

Figura 2.8. (a) Temperaturas medidas com *set point* a 50 °C, em diversas posições da secadora; (b) e (c), esclarecimento das posições indicadas em (a).



Fonte: Autor

Figura 2.9. Temperaturas medidas com *set point* a 60 °C, em diversas posições da secadora; (b) e (c) esclarecimento das posições indicadas em (a).

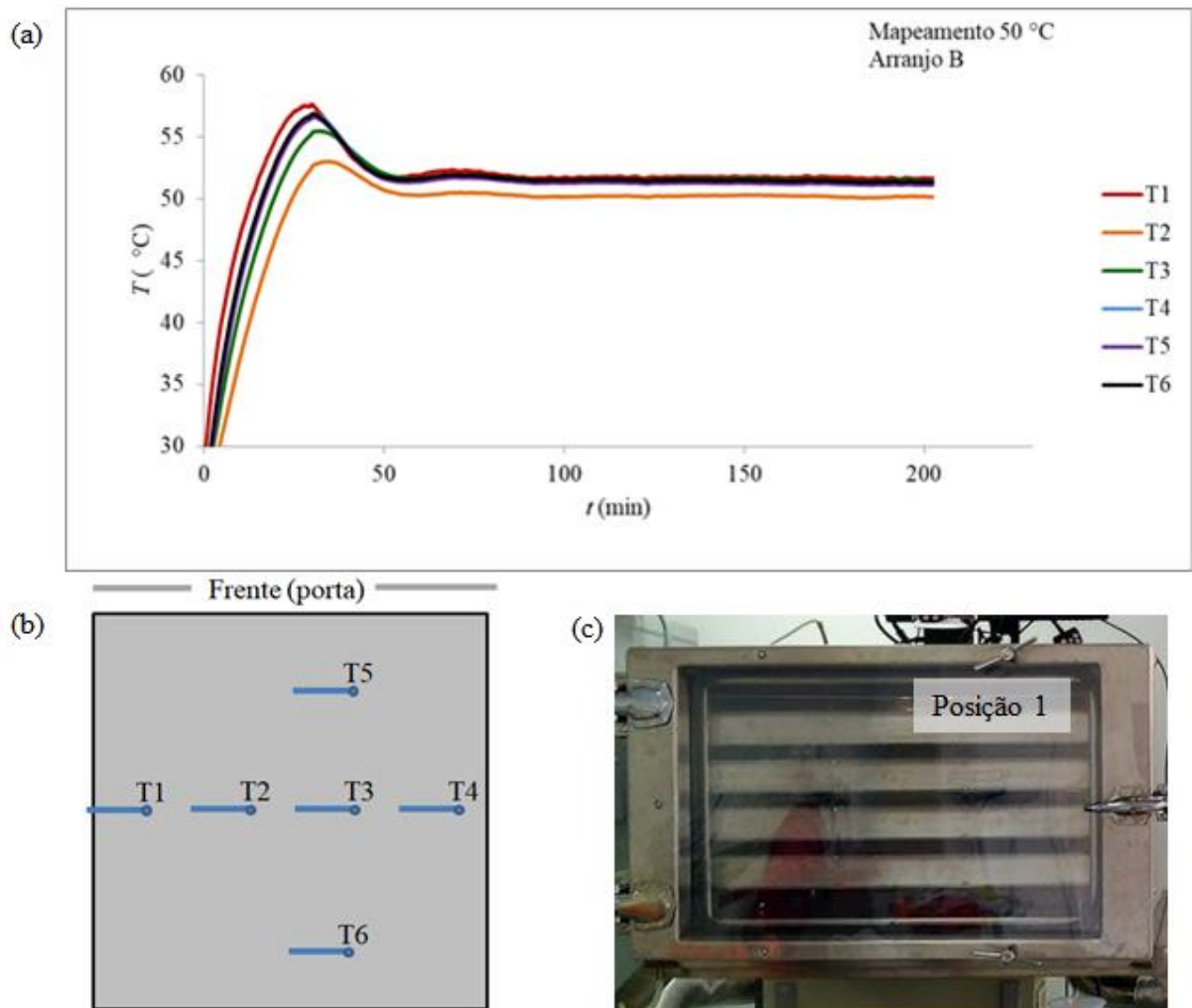


Fonte: Autor

Comparando-se as Figuras 2.8 e 2.9, observa-se que, para o *set point* de 50 °C, a temperatura aumentou bruscamente por alguns minutos antes do sistema estabilizar. Isso não ocorreu com o *set point* de 60 °C. Em todos os experimentos com termopares, nota-se que a temperatura em todos os casos fica acima do *set point*. Isso pode, em parte, ser devido à posição do ponto de coleta dos dados que alimentam o sistema de controle. Na Figura 2.7 está evidenciada a posição do termopar que informa a temperatura da câmara. O sistema de controle entende que a temperatura de toda a câmara é igual à daquele ponto, mas isso não corresponde à realidade.

Há grandes diferenças de temperatura entre diferentes pontos da secadora, como evidenciado pelas Figuras 2.8 a 2.10. Os maiores desvios em relação ao *set point* ocorreram nas posições 2 e 3, e o menor na posição 1, que foi a escolhida para a continuidade deste trabalho.

Figura 2.10. (a) Temperaturas medidas com *set point* a 50 °C, na posição 1 da câmara da secadora; (b) e (c), esclarecimento das posições indicadas em (a).



Fonte: Autor

No arranjo A (Fig. 2.8 e 2.9), nas posições 1 e 4, os termopares 1 e 2, próximos à porta da câmara apresentaram temperaturas mais altas que os demais. Nas posições 2 e 3, os termopares 3 e 6, próximos à entrada de ar da câmara, registraram temperaturas mais altas, enquanto os termopares 1 e 2 registraram temperaturas similares as das posições 1 e 2. Conclui-se então que a distribuição do ar quente nos orifícios de entrada não é uniforme, e que o ar quente entra com mais intensidade no meio da câmara do que no topo e no fundo. Próximo à porta da câmara, as placas de metal que dividem o espaço entre as bandejas não encostam na porta que fecha a câmara, deixando um espaço livre para circulação do ar. A pequena diferença de temperatura registrada pelos termopares 1 e 2 em todas as posições pode ser explicada pela proximidade a esse espaço, de forma que a temperatura medida pelo termopar 2, mesmo

próximo à entrada de ar, não foi influenciada pela entrada de ar quente quanto os termopares 3 e 6.

O arranjo B (Fig. 2.10) permite observar que, ao longo do tempo, as temperaturas na posição 1 se mantêm estáveis (± 1 °C), embora ligeiramente acima do *set point*. O termopar 2, situado no meio da bandeja, registrou temperaturas inferiores aos demais por todo o período.

2.4.2 Determinação do coeficiente convectivo da secadora em escala piloto

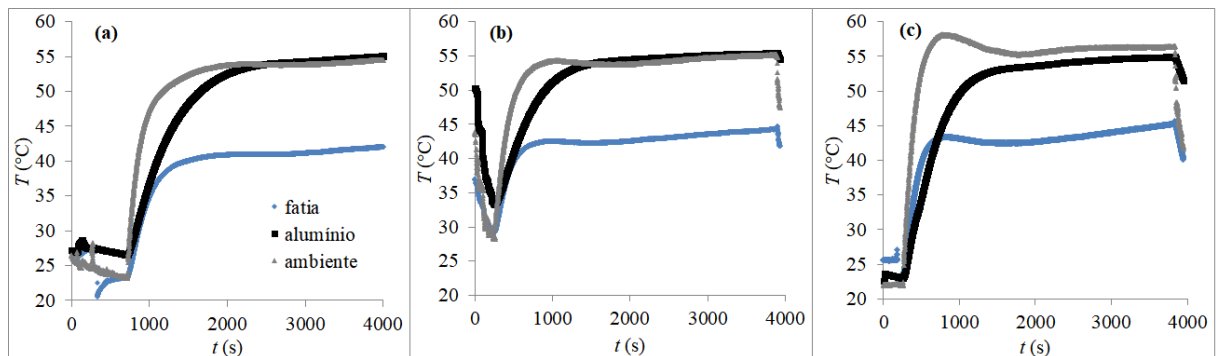
As propriedades termofísicas dos cilindros de alumínio utilizados foram estimadas a 331 K (PERRY; GREEN, 1997) e são mostradas na Tabela 2.3:

Tabela 2.3. Propriedades do alumínio a 331 K.

k (W m ⁻¹ K ⁻¹)	c_p (J/g K)	ρ (kg m ⁻³)
237,993	0,9176	2702

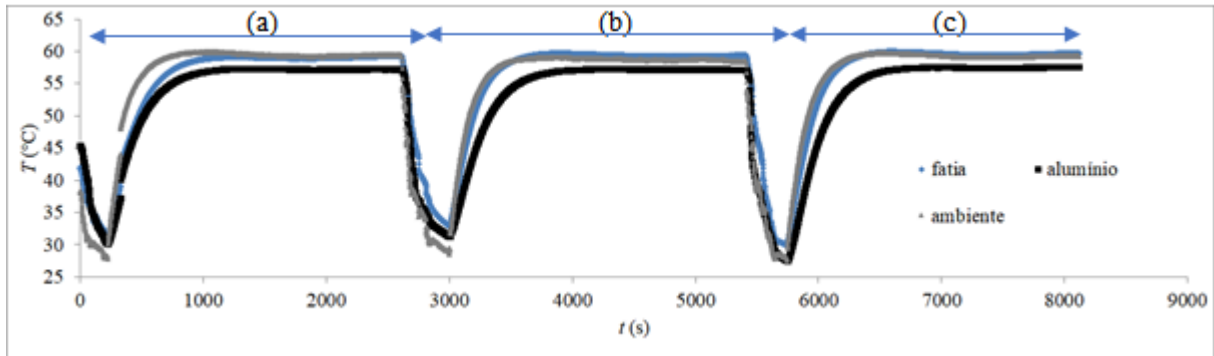
Nas Figuras 2.11 e 2.12 a seguir são mostrados os perfis de temperatura obtidos por meio dos termopares inseridos nos cilindros e nas fatias de yacón:

Figura 2.11. Perfis de temperatura com o cilindro de alumínio de 35 mm, em comparação com uma fatia de yacón (a) corrida 1, (b) corrida 2, (c) corrida 3. Condições do ar: 60 °C, 20 % de UR e velocidade do ar de 4 m/s.



Fonte: Autor

Figura 2.12. Perfis de temperatura com o cilindro de alumínio de 20 mm, em comparação com uma fatia de yacón (a) corrida 1, (b) corrida 2, (c) corrida 3.



Fonte: Autor

Dos perfis de temperatura, as condições iniciais e finais escolhidas como limites de integração da Eq. 2.23 para determinação do coeficiente convectivo são mostradas na Tabela 2.4:

Tabela 2.4. Limites da rampa de aquecimento para determinação do coeficiente convectivo.

	35mm			20mm		
	Corrida1	Corrida 2	Corrida3	Corrida1	Corrida 2	Corrida3
t_0 (s)	735,2	258,2	272,3	227,0	3005,9	5747,9
t (s)	1832,2	1197,2	1142,3	796,9	3570,9	6392,9
Δt (s)	1097,0	939,0	870,0	569,9	565,0	645,0
T_0 (°C)	27,2	33,3	23,4	30,1	32,3	29,3

Os resultados obtidos foram $h = 41 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$ para o cilindro de 35 mm e $53 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$ para o de 20 mm. Pode-se verificar a consistência destes resultados comparando-os com o método das correlações: levando em conta condições uniformes sobre uma placa sob fluxo laminar, os números de *Nusselt*, *Reynolds* e *Prandtl* médios são correlacionados na forma $Nu = \alpha Re^\beta Pr^\gamma$ (Incropera *et al.*, 2008). Foi escolhido o formato de correlação para fluxo laminar porque o número de Reynolds calculado foi de 10.000 para um cilindro de 40 mm, abaixo do valor crítico para fluxo externo.

No caso deste trabalho, é possível rearranjar a expressão $Nu = \alpha Re^\beta Pr^\gamma$ para indicar o coeficiente de transferência como função do diâmetro do cilindro, na forma $h = \delta D^{\beta-1}$, sendo $\beta-1 < 0$. De acordo com este raciocínio, o coeficiente de transferência de calor deve aumentar com a redução do diâmetro das fatias de yacón, o que é corroborado pelos resultados experimentais.

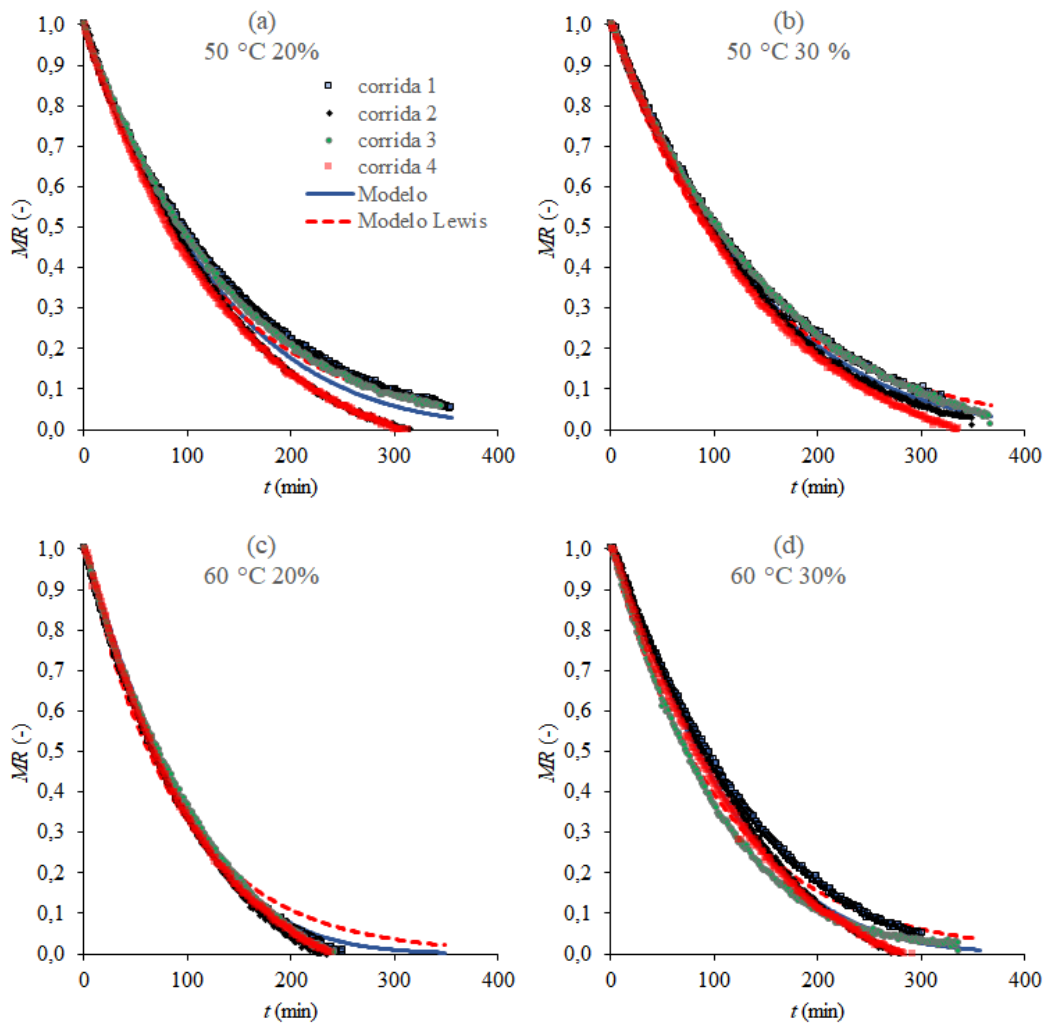
Utilizando essa expressão para extrapolar os resultados experimentais para um cilindro de 40 mm, obtém-se $h = 39 \text{ W m}^{-2}\text{K}^{-1}$.

Mesmo sendo uma fonte importante para comparação, as correlações em Incropera *et al.* (2008) não levam em conta o arranjo das fatias na bandeja, nem a irradiação de calor pela secadora, nem a presença de uma placa perfurada sob as fatias.

2.4.3 Cinéticas de secagem das fatias de yacón

Nas Figura 2.13 a seguir, são mostradas as curvas de secagem das amostras de yacón, nas quatro condições do ar de secagem.

Figura 2.13. Conteúdo de água normalizado, em função do tempo, para as quatro condições testadas em escala piloto: (a) 50 °C, UR 30 %; (b) 60 °C, UR 30 %; (c) 50 °C, UR 20 %; (d) 60 °C, UR 20 %



Fonte: Autor

Observa-se na Figura 2.13 que a condição que permitiu melhor reprodutibilidade dos dados foi a secagem a 60 °C e 20 % de UR. É possível que, ao tentar manter uma umidade relativa alta, o sistema de controle acabe por forçar a desestabilização das condições da câmara de secagem. Isso ocorre porque a água, mesmo que atomizada no ar que adentra a câmara, é inserida fria, baixando a temperatura do ar de secagem e tornando necessário elevar novamente a temperatura. Dessa forma, a condição mais drástica seria mais fácil de ser mantida, e, portanto, mais estável.

Vários modelos foram testados para descrever a cinética de secagem nas condições estudadas. A quarta corrida não foi considerada no tratamento de dados e sim como verificação e para determinar o teor de fibras das amostras. A Tabela 2.5 (na página seguinte) é um resumo dos resultados obtidos neste trabalho em comparação aos da literatura.

Nas condições consideradas, o modelo proposto na Equação 2.6 resultou em menor erro médio quadrático do que outros modelos de dois parâmetros disponíveis na literatura. É possível considerar que ele é uma boa opção para aplicações de engenharia.

À exceção do modelo de Page, a condição de secagem influencia fortemente o parâmetro k_1 de todos os modelos; o que é consistente com o significado físico deste parâmetro, que está relacionado à velocidade inicial de secagem. Seu valor diminui com a força motriz do processo ($T_{ar} - T_{wb}$). O parâmetro k_2 , por sua vez, tem relação com a temperatura nos modelos de Page modificado e de Henderson-Pabis.

Apesar de os resultados serem da mesma ordem de grandeza, é difícil comparar os dados deste trabalho com os disponíveis na literatura. As condições do ar de secagem, sua velocidade, o formato da amostra, o tipo da secadora e a escala são diferentes. Além disso, é importante ressaltar que os trabalhos citados na Tabela 2.8 não mencionam todos os dados da variedade de yacón usada, como sua origem e época de colheita e as características das raízes. Então é possível que cada trabalho tenha utilizado uma variedade diferente, com umidade e conteúdo de sólidos solúveis diferentes, e possivelmente com diferenças estruturais.

Tabela 2.5. Parâmetros de ajuste de modelos selecionados aos dados experimentais do Capítulo 2 (Escala piloto), em comparação com outros dados da literatura. Os resultados deste trabalho são mostrados no formato média \pm desvio padrão da triplicata.

Modelo		Este trabalho*				Reis <i>et al.</i> (2012)	Shi <i>et al.</i> (2013)	Lisboa <i>et al.</i> (2018)	
		$T_{ar} = 50\text{ °C}$, $UR=30\%$ ($T_{wb} = 32,6\text{ °C}$), 4 m/s	$T_{ar} = 60\text{ °C}$, $UR=30\%$ ($T_{wb} = 40,0\text{ °C}$), 4 m/s	$T_{ar} = 50\text{ °C}$, $UR=20\%$ ($T_{wb} = 28,7\text{ °C}$), 4 m/s	$T_{ar} = 60\text{ °C}$, $UR=20\%$ ($T_{wb} = 35,4\text{ °C}$), 4 m/s	$T_{ar}=55\text{ °C}$, 11,325 Pa**	$T_{ar}=45\text{ °C}$, 1,5 m/s	$T_{ar} = 50\text{ °C}$, 1,5 m/s	$T_{ar} = 60\text{ °C}$, 1,5 m/s
Eq.2.6	$k_1 [\times 10^{-4}\text{ s}^{-1}]$	$1,05 \pm 0,004^{aA}$	$1,30 \pm 0,09^{bB}$	$1,15 \pm 0,03^{aA}$	$1,42 \pm 0,04^{bB}$				
	$k_2 [\times 10^{-5}\text{ s}^{-1}]$	$5,94 \pm 0,1^{aA}$	$6,88 \pm 0,4^{bA}$	$5,40 \pm 0,9^{aA}$	$6,08 \pm 0,2^{bA}$				
	RMSE	$1,39 \times 10^{-2}$	$1,85 \times 10^{-2}$	$1,16 \times 10^{-2}$	$8,00 \times 10^{-3}$				
Lewis	$k_1 [\times 10^{-4}\text{ s}^{-1}]$	$1,37 \pm 0,02^{aA}$	$1,75 \pm 0,07^{bA}$	$1,42 \pm 0,05^{aA}$	$1,72 \pm 0,02^{bA}$		$1,18 \times 10^{-4}$		
	RMSE	$3,42 \times 10^{-2}$	$3,46 \times 10^{-2}$	$2,58 \times 10^{-2}$	$2,26 \times 10^{-2}$		$3,38 \times 10^{-2}$		
Page	$k_1 [\times 10^{-5}\text{ s}^{-1}]$	$2,52 \pm 0,7^{aA}$	$3,03 \pm 1^{aA}$	$3,83 \pm 1^{aA}$	$4,21 \pm 0,7^{aA}$	$3,83 \times 10^{-5}$	$9,11 \times 10^{-5}$	$3,03 \times 10^{-5}$	$4,69 \times 10^{-5}$
	$n [-]$	$1,19 \pm 0,03^{aA}$	$1,20 \pm 0,04^{aA}$	$1,15 \pm 0,04^{aA}$	$1,20 \pm 0,04^{aA}$	1,50	1,24	0,95	1,90
	RMSE	$1,16 \times 10^{-1}$	$1,05 \times 10^{-1}$	$1,09 \times 10^{-1}$	$9,65 \times 10^{-2}$	$R^2 = 0,995$	$1,45 \times 10^{-2}$	$R^2 = 0,999$	$R^2 = 0,999$
Page modificado	$k_1 [\times 10^{-4}\text{ s}^{-1}]$	$1,33 \pm 0,02^{aA}$	$1,60 \pm 0,2^{bA}$	$1,39 \pm 0,04^{aA}$	$1,64 \pm 0,07^{bA}$	$7,42 \times 10^{-5}$	13×10^{-4}		
	$n [-]$	$1,20 \pm 0,02^{aA}$	$1,20 \pm 0,04^{aA}$	$1,16 \pm 0,05^{aA}$	$1,16 \pm 0,02^{aA}$	1,50	1,24		
	RMSE	$1,91 \times 10^{-2}$	$1,95 \times 10^{-2}$	$1,56 \times 10^{-2}$	$1,12 \times 10^{-2}$	$R^2 = 0,995$	$1,47 \times 10^{-2}$		
Henderson- Pabis	$k_1 [\times 10^{-4}\text{ s}^{-1}]$	$1,44 \pm 0,04^{aA}$	$1,81 \pm 0,2^{bA}$	$1,49 \pm 0,09^{aA}$	$1,79 \pm 0,07^{bA}$	$8,33 \times 10^{-5}$	$1,24 \times 10^{-4}$	$2,31 \times 10^{-6}$	$2,81 \times 10^{-6}$
	$a [-]$	$1,06 \pm 0,01^{aA}$	$1,09 \pm 0,02^{aA}$	$1,05 \pm 0,03^{aA}$	$1,06 \pm 0,01^{aA}$	1,07	1,05	0,98	0,97
	RMSE	$2,95 \times 10^{-2}$	$2,90 \times 10^{-2}$	$2,31 \times 10^{-2}$	$1,91 \times 10^{-2}$	$R^2 = 0,967$	$3,00 \times 10^{-2}$	$R^2 = 0,999$	$R^2 = 0,999$

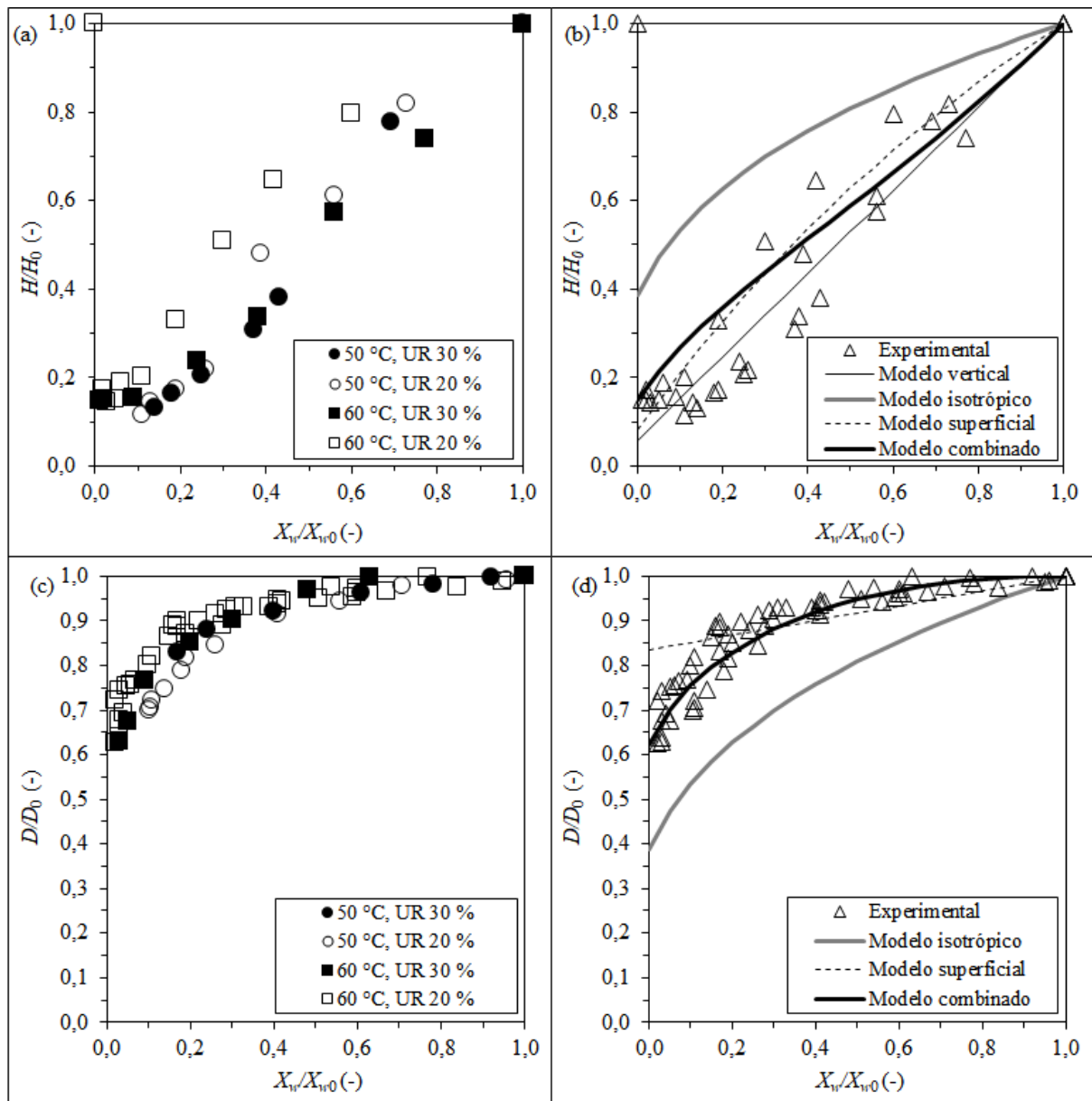
* Mesma letra minúscula na mesma linha indica que não há diferença estatisticamente significativa em relação à temperatura; e mesmas letras maiúsculas, em relação à umidade relativa ($p > 0,05$).

** Pressão absoluta.

2.4.4 Dimensões e morfologia

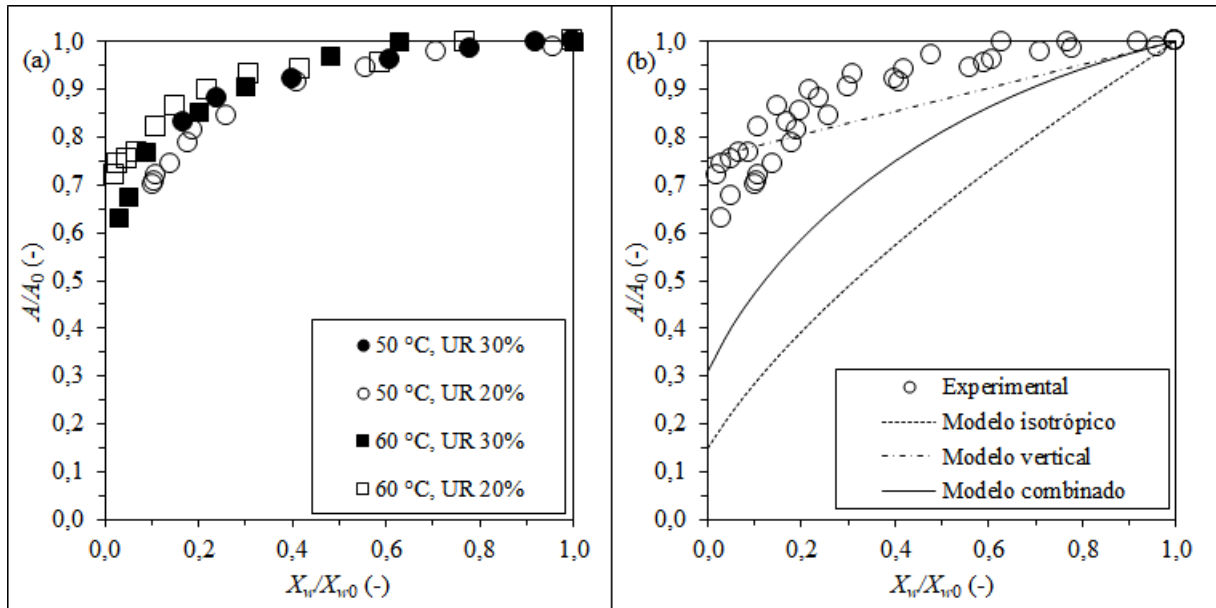
A Figura 2.14 a seguir mostra as alterações das dimensões das amostras ao longo da secagem, registradas nos experimentos em escala piloto.

Figura 2.14. Dimensões das amostras em função da umidade, registradas nos experimentos em escala piloto; (b) e (d) são os mesmos pontos experimentais de (a) e (c).



Fonte: Autor

Figura 2.15. Área das amostras secas em escala piloto em função da umidade.



Fonte: Autor

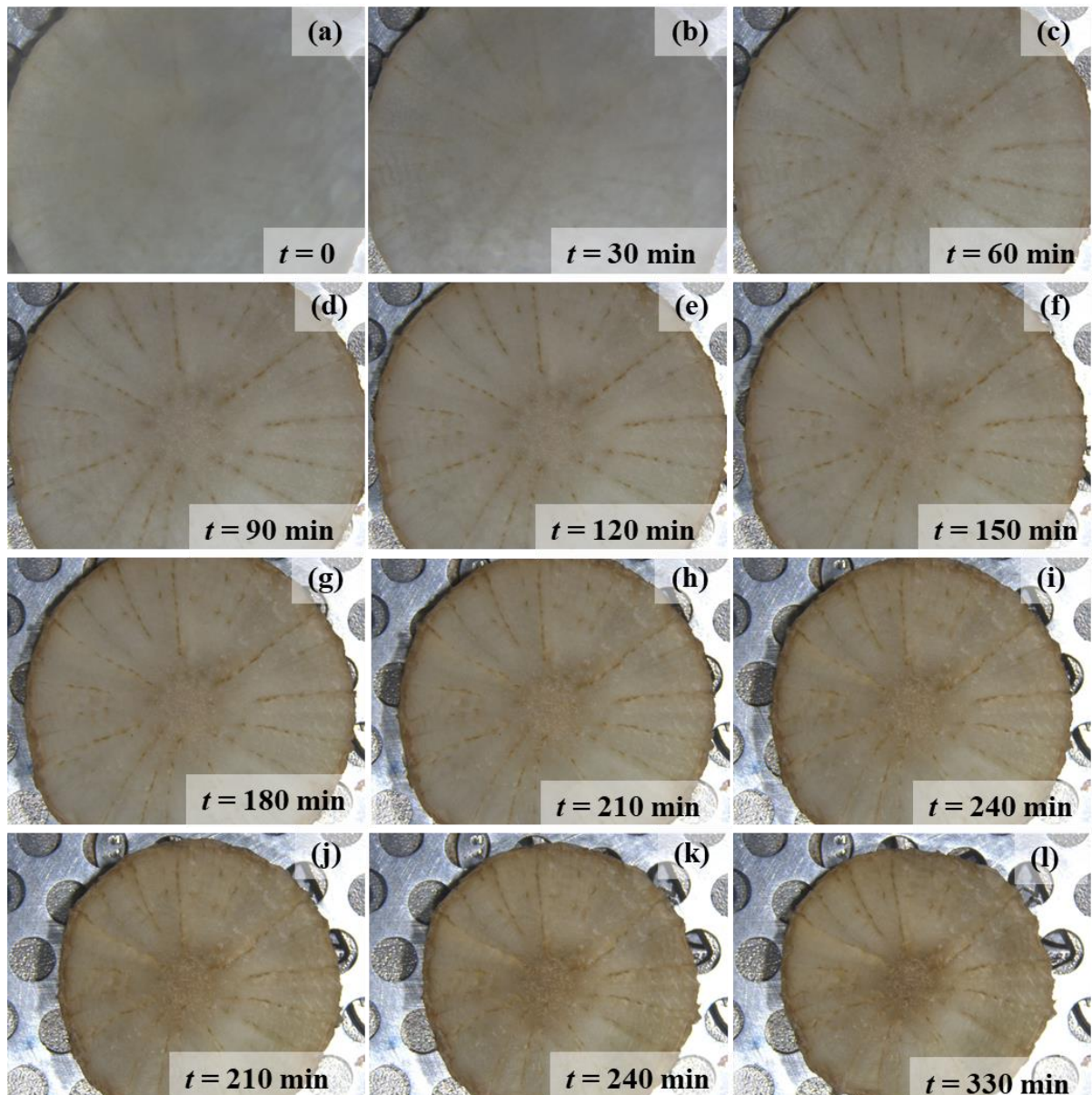
No início do processo de secagem, durante a primeira meia hora, houve casos em que a janela de quartzo no topo do equipamento apresentava água condensada, mesmo depois da estabilização da temperatura. Isso prejudicou a visibilidade, e tornou necessário assumir o diâmetro da amostra em $t = 0$ como sendo igual ao diâmetro do cortador (40 mm).

As fatias atingiram um quinto da altura inicial (Figura 2.14a), mas o raio atingiu a dois terços do raio inicial (Figura 2.14c). Isso é interessante no caso de um produto final em formato de *chips*, pois estes serão finos, mas com diâmetro relativamente preservado. A área das amostras (Figura 2.15) diminuiu com o tempo, o que é uma informação importante para a modelagem da troca de calor e massa por convecção. O comportamento é similar ao do encolhimento em raio: uma queda acentuada em cerca de $X_w/X_{w0} = 0,1$. A perda de água pode colapsar a estrutura dos vegetais (CASTRO; MAYORGA; MORENO, 2018). Observações em microscópio (Capítulo 3, nas Seções 3.2.5 e 3.4.4 adiante) auxiliaram na verificação desta hipótese.

Na Figura 2.16 a seguir, é possível visualizar o encolhimento do diâmetro de uma das amostras, fotografada durante a secagem a 60 °C e 20 % de UR. O formato continuou similar ao inicial mesmo nos estágios finais da secagem. Além disso, o branqueamento impediu que as amostras escurecessem excessivamente, exceto por finas listras radiais, visíveis a partir de 60 min de secagem.

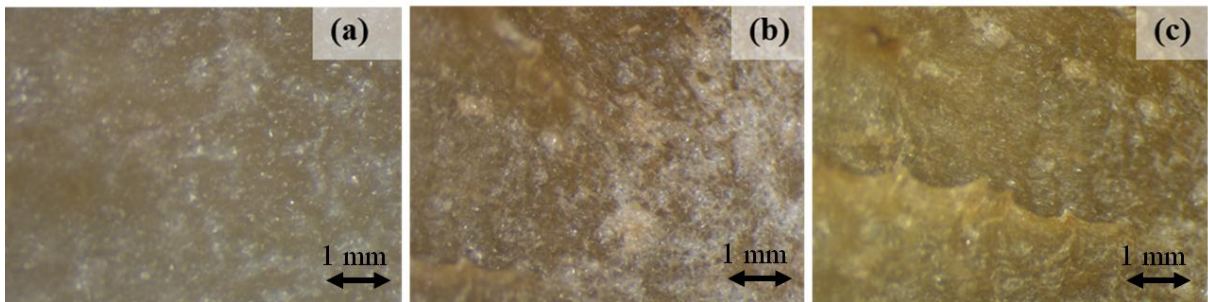
Uma ampliação (Fig. 2.17) mostra que a estrutura do yacón é inicialmente regular e relativamente lisa, e torna-se irregular conforme o processo de secagem avança. Na Figura 2.16b, observa-se que algumas regiões ficaram mais claras com o processamento. Isso pode ser um indicativo de que essas porções têm açúcares que migraram do interior da estrutura, ou que, ao secar, essas regiões endureceram. Em ambos os casos, a superfície endurecida torna a perda de umidade mais difícil e irregular (RATTI, 1994).

Figura 2.16. Imagens de uma amostra durante o processo de secagem, a 60 °C e UR = 20 %.



Fonte: Autor

Figura 2.17. Imagens ampliadas de uma fatia de yacón, durante a secagem a 60 °C e UR = 20 %, após (a) 0 min, (b) 300 min e (c) 330 min, enfatizando uma irregularidade estrutural.



Fonte: Autor

Observa-se na Figura 2.17c uma das irregularidades que surgiram de forma aleatória na superfície do yacón durante a secagem, e que tornaram difícil a medição de altura. Além disso, a medição da altura usando a mudança no foco da câmera (DAVILA, 2016) não foi possível, pois as bordas das fatias frequentemente se levantavam (Figura 2.18).

Para mais registros fotográficos do encolhimento, vide o Apêndice B.

Figura 2.18. Fatias secas de yacón.

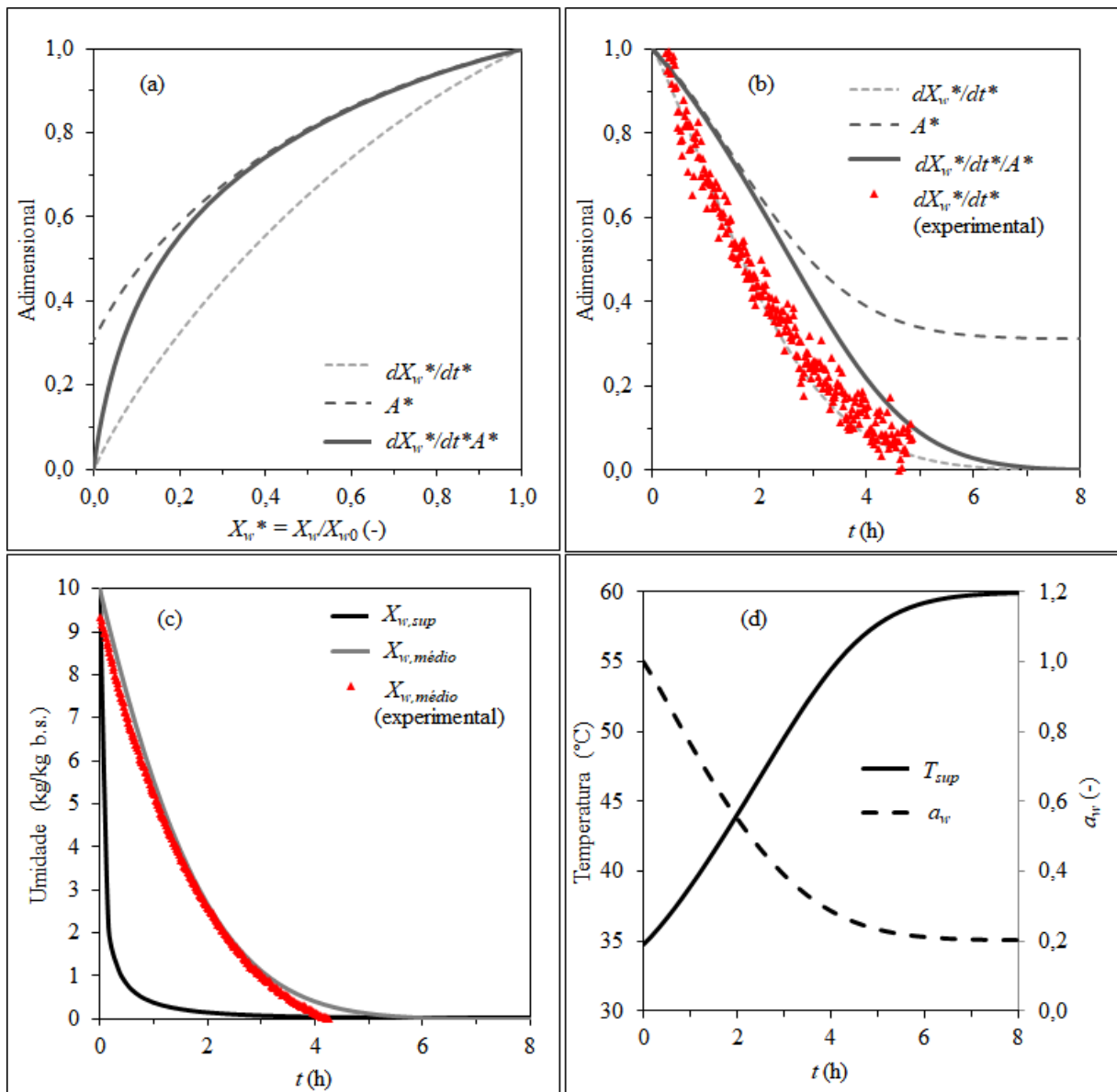


Fonte: Autor

2.4.5 Balanço de massa, temperatura na superfície e atividade de água

De acordo com o desenvolvimento da Seção 2.3.4, é possível estimar a temperatura, a umidade e a atividade de água na fatia de yacón sendo seca, na superfície e em média:

Figura 2.19. Estimativas sobre o comportamento de fatias de yacón durante a secagem: em (a), a superfície adimensional, conforme a Eq. (2.13), a taxa e o fluxo de secagem adimensionalizados conforme a Eq. (2.28), e dMR/dt conforme a Eq. (2.29); o quadro (b) é similar ao (a), mas em função do tempo, e em comparação com valores experimentais da taxa de secagem, com uma janela móvel de dez pontos; em (c), a umidade média e da superfície, conforme Eq. (2.34), em comparação com valores experimentais; e em (d), temperatura e atividade de água em função do tempo, conforme Eq. (2.40).



Fonte: Autor

Tendo-se as estimativas das variáveis na superfície e da taxa de secagem, é possível estimar os valores médios de temperatura e atividade de água na superfície da fatia de yacón durante a secagem. Como esperado, as estimativas para a superfície mostram que a umidade é retirada mais rapidamente do que a do interior da amostra. É notável a influência da área da amostra sobre o fluxo de secagem estimado (Fig. 2.19a).

Na Figura 2.19d, a temperatura estimada aumenta de forma praticamente instantânea até a temperatura de bulbo úmido (cerca de 45 °C) e continua aumentando. Para confirmar se isso ocorre experimentalmente, seria ideal utilizar uma técnica não-invasiva, como um termômetro infravermelho.

2.5 Conclusões parciais

Neste Capítulo foi explorada a secagem de yacón em escala piloto, desde os parâmetros da secadora até as características do produto final. Foi possível mapear a temperatura na secadora e estimar seu coeficiente convectivo, que será utilizado no Capítulo 4.

Foram desenvolvidos modelos simples capazes de descrever a cinética de secagem e o encolhimento, que também serão utilizados no Capítulo 4.

A coleta de dados nas horas finais de secagem sofreu interferência da vibração do próprio fluxo de ar da secadora. O Capítulo seguinte trata de experimentos realizados em escala laboratorial, conduzidos para contornar estes problemas, abrangendo mais condições de secagem.

3 SECAGEM DE YACÓN CONSIDERANDO ENCOLHIMENTO EM MACRO E MICRO ESCALA *

3.1 Introdução

O trabalho experimental em escala piloto, descrito no Capítulo 2, foi realizado no Brasil (Laboratório de Engenharia de Alimentos da Escola Politécnica da USP), e foi útil para o desenvolvimento da simulação. A fim de obter dados mais precisos, foram realizados experimentos em escala laboratorial, na unidade GéPro da Agro Paristech, sob a coordenação de Giana Almeida.

No caso da descrição destes experimentos, para comparação com resultados recentes do grupo de pesquisa (ALMEIDA *et al.*, 2017), foi empregado o modelo de Van Meel (1958). Neste modelo a predição da taxa de secagem é baseada na curva característica de secagem e não exige a resolução de modelos abrangentes de transferência de calor e massa.

A raiz de yacón apresenta uma organização radial (COLL ARAÓZ *et al.*, 2014), sendo que raízes adultas apresentam dutos revestidos de xilema organizados em feixes a partir do centro. Nas subespécies domesticadas de yacón, as raízes apresentam menos dutos de xilema do que as selvagens. Mesmo com menos dutos, é de se esperar que essas estruturas enrijecidas apresentem resistência ao encolhimento por perda de água. Essa influência da estrutura não foi, até o momento, mencionada na literatura relacionada à secagem. Nos experimentos descritos no Capítulo 2, as amostras foram retiradas do centro da raiz, região com distribuição uniforme de feixes de xilema.

3.1.1 Objetivos

O objetivo desse trabalho foi estudar diferentes regiões e direções de amostragem da raiz de yacón, especialmente em escala laboratorial e microscópica, de forma a explorar o efeito da morfologia das raízes sobre o seu encolhimento.

*MARQUES, Bianca; PERRÉ, Patrick; CASALINHO, Joel; TADINI, Carmen C.; PLANA-FATTORI, Artemio; ALMEIDA, Giana. Evidence of iso-volume deformation during convective drying of yacón: An extended van Meel model adapted to large volume reduction. **Journal of Food Engineering**, [S. l.], v. 341, n. August 2022, p. 111311, 2023. DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2022.111311. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2022.111311>.

3.2 Materiais e métodos

3.2.1 Obtenção de amostra

Intencionava-se inicialmente realizar os experimentos com a mesma variedade de yacón usada no Brasil, mas o adiamento do estágio no exterior (devido à pandemia de COVID-19 em 2020) tornou a exportação inviável. Então novas raízes, de outra variedade, foram compradas de um produtor local na França. Elas foram cultivadas na Bretanha e colhidas entre janeiro e fevereiro de 2021.

3.2.2 Determinação de umidade

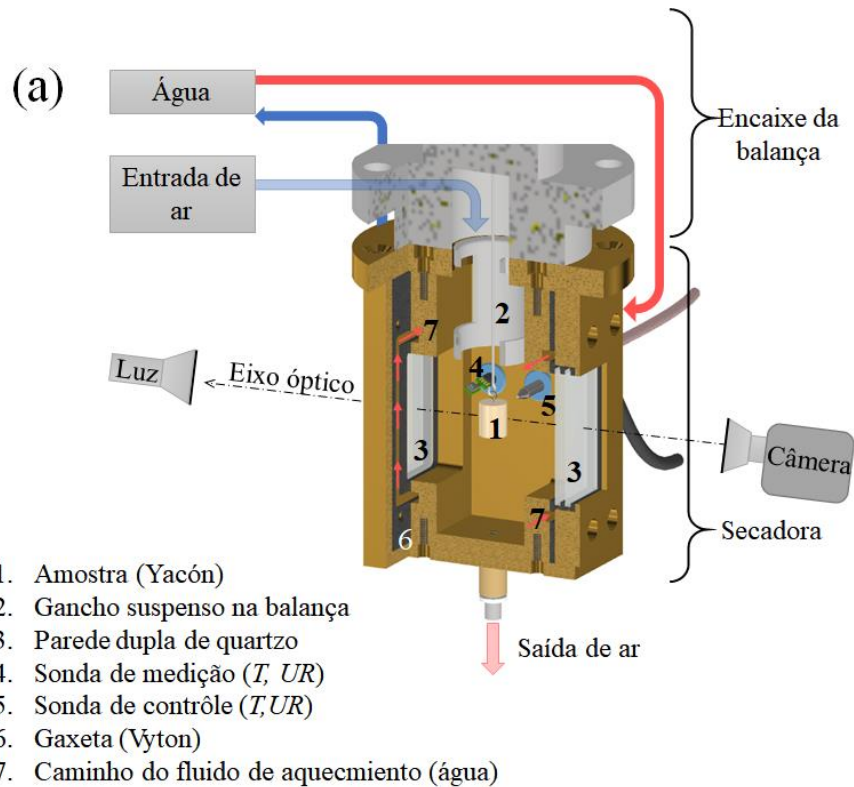
Foi determinada conforme descrito na Seção 2.2.4, também com base no método proposto por Zenebon, Pascuet e Tiglia (2008). Nesta etapa, em vez de placas de Petri, foram usados frascos de vidro de aproximadamente 2 mL, pois as amostras eram menores do que as utilizadas nos experimentos em escala piloto. Os frascos com amostras foram colocados em um forno de secagem à vácuo (modelo DP32, Yamato, Japão), a 70 °C e sob vácuo (<100 mmHg).

3.2.3 Planejamento da secagem

Os ensaios de secagem foram conduzidos em secadora acoplada em balança de suspensão magnética conforme descrita em Almeida *et al.* (2017), porém, a secadora foi reconstruída, com janelas de quartzo maiores para aumentar a área de observação, e um melhor posicionamento de termopares e termo-higrômetros. A secadora, feita de latão, tem dimensões internas de 35 mm (comprimento) x 35 mm (largura) x 100 mm (altura), com janelas transparentes de quartzo de 22 mm x 47 mm. O acoplamento à balança de suspensão magnética é feito por um orifício acima da secadora, como mostrado na Figura 3.1. A balança de suspensão magnética (Rubotherm), com uma resolução de 0.01 mg, é capaz de tarar durante o teste sem interrompê-lo, o que evita a perda de precisão com o tempo.

Para obter imagens da amostra durante a secagem, a janela de quartzo (Fig 3.1) possibilita fotografar projeções da amostra no interior da secadora sem perturbar o processo de secagem. O controle da temperatura é realizado por meio de um chiller (Ministat C3, Huber, Alemanha), e de dois termopares SHT, conectados a um conversor USB (EKH4, Sensirion, Suíça). O controlador de umidade (MHG32, ProUmid, Alemanha) regula a temperatura e umidade do ar dentro da secadora. O fluxo de ar foi mantido a 500 mL/min de nitrogênio (para imitar ar seco), umidificado conforme necessário pelo controlador de umidade.

Figura 3.1. Esquema da secadora em escala laboratorial.



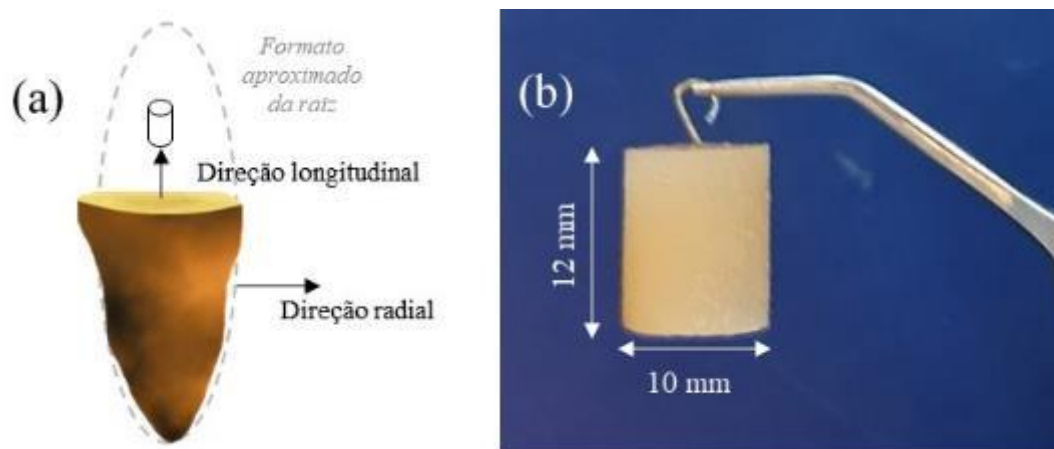
Fonte: Autor, em colaboração com Casalinho, J.

As janelas de quartzo permitiam a aquisição de imagens usando uma câmera (piA1600-35gc –Basler, Alemanha), com lentes telecêntricas (VICOTAR T151/0.44, Vision & Control GmbH, Alemanha), sendo que a amostra foi iluminada por trás usando um gerador de luz telecêntrica (62760, TECHSPEC Edmund Optics, Estados Unidos). Durante a secagem, a frequência de aquisição de imagens foi uma cada 2,5 min.

Os experimentos de secagem foram divididos em duas sequências: a primeira foi realizada para estudar o efeito da temperatura e da umidade relativa sobre a taxa de secagem, e a segunda, para estudar a deformação de amostras de yacón, pela análise de imagens obtidas de diferentes posições e direções na raiz.

Na primeira sequência de experimentos, as amostras foram cortadas do centro das raízes, sempre na direção longitudinal, e nas dimensões mostradas na Fig. 3.2.

Fig. 3.2. Protocolo experimental da secagem das amostras retiradas do centro das raízes de yacón. a) Amostragem e direções adotadas; (b) dimensões da amostra.



Fonte: Autor

O suporte de amostra escolhido foi um fio de molibdênio 99,95 %, de diâmetro 0,5 mm, o qual foi considerado liso o suficiente para que a amostra não aderisse, o que poderia interferir em seu encolhimento. A temperatura e a umidade relativa foram selecionadas para cada experimento utilizando um planejamento composto com repetição no ponto central (Tabela 3.1).

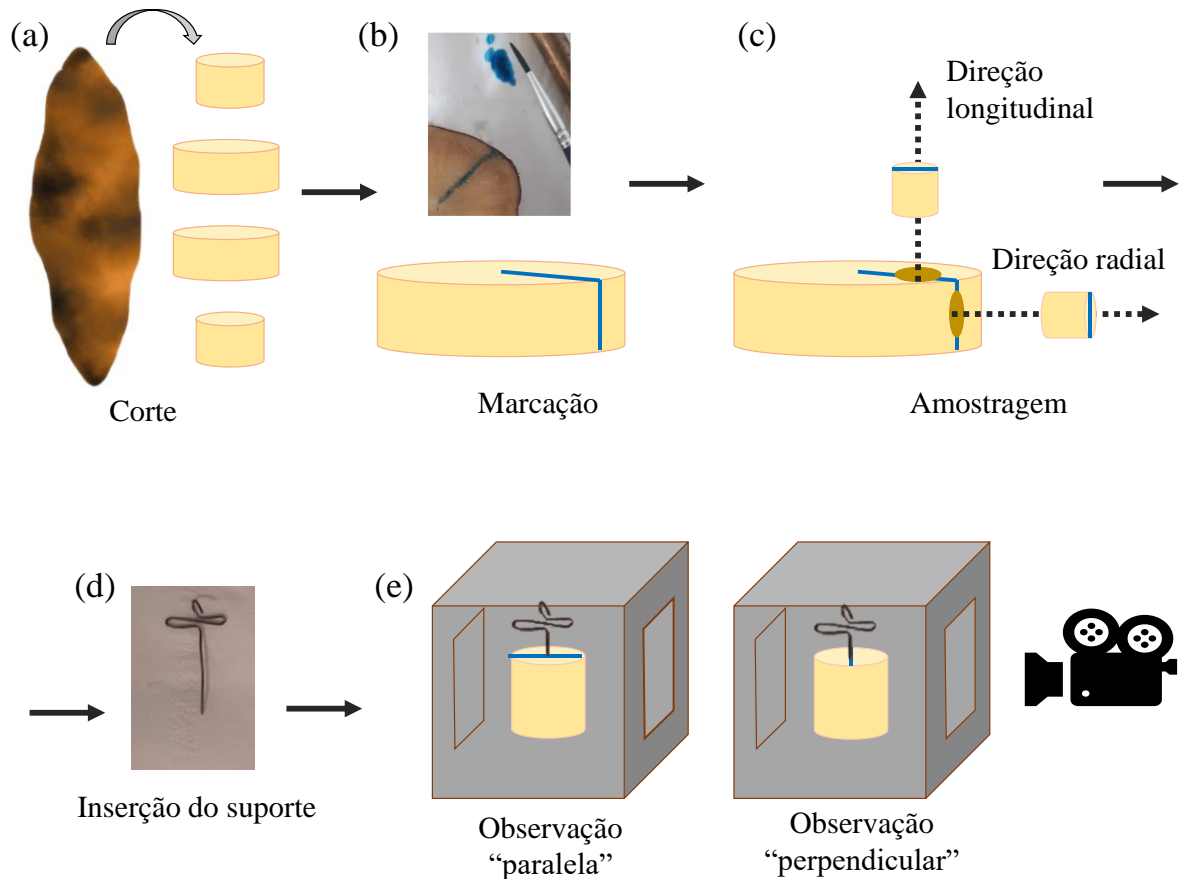
Tabela 3.1. Planejamento experimental da secagem em escala laboratorial, com amostras do centro das raízes

Teste	Variáveis		Variáveis codificadas	
	T (°C)	UR (%)	X_1	X_2
1	52,8	12,9	-1	-1
2	52,8	27,1	-1	1
3	67,1	12,9	1	-1
4	67,1	27,1	1	1
5 ao 9	60,0	20,0	0	0
10	70,0	20,0	1,414	0
11	50,0	20,0	-1,414	0
12	60,0	30,0	0	1,414
13	60,0	10,0	0	-1,414

Na segunda sequência, as amostras foram coletadas segundo orientações bem definidas, mas sempre longe do eixo central da raiz de yacón (Figura 3.3). Observações preliminares indicaram que as amostras coletadas fora do eixo central encolhiam de forma anisotrópica e perdiam o formato cilíndrico; observação não relatada na literatura sobre a secagem de yacón.

Portanto, o objetivo desses experimentos foi determinar as diferenças no encolhimento devidas à amostragem.

Figura 3.3. Preparo das amostras retiradas fora do centro da raiz de yacón (a) direção de corte da raiz; (b) marcação da direção radial ou longitudinal; (c) direções de amostragem; (d) gancho usado e (e) direções de observação da amostra em relação à amostragem e à câmera.



Fonte: Autor

Para a amostragem, a raiz de yacón foi seccionada em porções cilíndricas (Figura 3.3.a) e marcadas com corante alimentício azul, formando uma linha na direção radial e na direção longitudinal (Figura 3.3.b). Para controlar a direção de observação, o gancho de suporte da amostra foi curvado, de forma que era visível nas fotos projetadas se houve rotação durante a secagem (Figura 3.3.d). A amostra foi obtida de forma a preservar a marcação (Figura 3.3.c), e o gancho foi colocado de acordo com a direção de observação desejada. Ao pendurar o gancho de suporte, a direção de observação estava definida (3.3.e). O planejamento desta etapa foi:

- Amostras obtidas na direção longitudinal, fora do eixo central: 3 secagens em observação paralela (LNCPAR) e 3 secagens em observação perpendicular (LNCPERP).

- b) Amostras obtidas na direção radial: 3 secagens em observação paralela (RPAR) e 3 secagens em observação perpendicular (RPERP).

3.2.4 Secagem e tratamento dos dados

Após pré-estabilização da secadora nas condições de temperatura e umidade relativa desejadas, o conjunto amostra + fio de suporte foi suspenso na balança. A amostra foi seca entre 5 e 7 h, dependendo das condições experimentais, até o equilíbrio. Durante a secagem, a massa foi registrada a cada 30 s, e as fotos foram tiradas a cada 180 s.

As fotos obtidas durante a secagem foram convertidas para *bitmap* usando o programa Fiji (RUEDEN *et al.*, 2017; SCHINDELIN *et al.*, 2012), o mesmo empregado para determinar a distância por *pixel*. O encolhimento da amostra durante a secagem foi expresso pela variação das dimensões a cada momento em relação às originais. Empregando o programa MeshPore (PERRÉ, 2005); os registros da variação de massa e de encolhimento foram então tratados usando um programa escrito em linguagem R (RSTUDIO TEAM, 2020).

3.2.5 Morfologia

As raízes descritas na Seção 3.2.1 foram armazenadas a 4 °C até o uso. Para a obtenção de imagens, foi usado um microscópio de varredura ambiental FEI QUANTA 200, equipado com um filamento de tungstênio, voltagem de 13 kV, e aumento de 500x. Foi usado um porta-amostras colocado sobre elementos *Peltier* para o controle da temperatura. As fatias de yacón foram cortadas para observação nas direções radial e longitudinal, as mesmas descritas na Fig 3.3 anterior.

3.3 Modelagem

3.3.1 Encolhimento

O encolhimento analisado pelo MeshPore pode ser descrito como:

$$\beta_{L,t} = \frac{L_0 - L_t}{L_0}; \beta_{R,t} = \frac{D_0 - D_t}{D_0} \quad (3.1)$$

Em que $\beta_{L,t}$ e $\beta_{R,t}$ são, respectivamente, os coeficientes de encolhimento longitudinal [-] e radial [-]; L_0 e D_0 são a altura e o diâmetro iniciais das amostras [m], e L_t e D_t são a altura e o diâmetro das amostras em determinado momento [m]. A anisotropicidade fica definida como $\beta_{R,t} / \beta_{L,t}$.

O emprego das relações acima assume que as amostras permanecem no formato cilíndrico durante a secagem. Segundo essa hipótese, é possível então estimar a área de uma amostra como:

$$A_t = \pi \left(D_t L_t + \frac{D_t^2}{2} \right) \quad (3.2)$$

Em que A_t é a área da amostra em determinado momento t [m²]. Com essa informação, é possível estimar o fluxo de água durante a secagem como:

$$q = \frac{dX_w}{dt} \frac{m_d}{A_t} \quad (3.3)$$

Em que \dot{q} é o fluxo mássico (kg s⁻¹m⁻²), X_w é o conteúdo de água em base seca (-), t é o tempo[s], e m_d é a massa seca da amostra (kg).

3.3.2 Descrição da cinética de secagem do yacón

O modelo de Van Meel (1958) permite estimar o fluxo de secagem de uma amostra com base na curva característica de secagem, conhecendo-se:

- a) o fluxo evaporativo máximo;
- b) a área em função do tempo;
- c) o conteúdo crítico de água X_{cr} .

Uma limitação do modelo é que se assume que a amostra não muda de forma durante a secagem. No caso do yacón, observando-se o comportamento durante a secagem, é possível delinear um modelo de Van Meel estendido, com as seguintes hipóteses:

- a) A deformação é proporcional ao volume de água perdido durante a secagem.
- b) A amostra permanece cilíndrica durante a secagem.
- c) No início do processo, o conteúdo de água é alto (acima de 10 g/g massa seca).
- d) O conteúdo de água crítico é baixo comparado ao conteúdo inicial (observado no máximo 4,5 g água/g de matéria seca).

Assumir a deformação proporcional ao volume de água é essencial, pois permite que o encolhimento seja deduzido apenas da perda de água. Este fato, associado ao encolhimento mantendo-se a forma cilíndrica, permite estimar a área da amostra. As hipóteses (c) e (d) foram adotadas para validar o modelo.

A variação de volume é associada ao fluxo evaporativo na forma:

$$\frac{dV(t)}{dt} = \frac{1}{\rho_l} \frac{dm(t)}{dt} = -\dot{q}_v^0 A(t) F(X_w) \quad (3.4)$$

Em que ρ_l é a densidade da água (kg m^{-3}), e $-\dot{q}_v^0$ é o fluxo de vapor ($\text{kg s}^{-1}\text{m}^{-2}$).

$F(X)$ é uma função que descreve a curva característica de secagem, na forma:

$$\dot{q}(x) = \dot{q}_{max} \cdot F(X_w) \quad (3.5)$$

Assume-se que o fluxo evaporativo máximo é:

$$\dot{q}_{max} = \frac{h(T_{ar} - T_{bu})}{L_v} \quad (3.6)$$

com \dot{q}_{max} : fluxo mássico no período de taxa constante ($\text{kg s}^{-1}\text{m}^{-2}$); h é o coeficiente de transferência de calor ($\text{W m}^{-2}\text{K}^{-1}$), T_{ar} e T_{bu} são respectivamente as temperaturas de bulbo seco e úmido do ar de secagem ($^{\circ}\text{C}$), e L_v é o calor latente de vaporização da água na temperatura de bulbo úmido (J kg^{-1}).

Ao final do período a taxa constante, a seguinte função adaptada permite representar o fluxo evaporativo, como sugerido por May e Perré (2002):

$$\dot{q}(x) = c_1(X_w - X_{we}) + c_2(X_w - X_{we})^2 + c_3(X_w - X_{we})^3 \quad (3.7)$$

em que $q(x)$ é o fluxo evaporativo ($\text{kg s}^{-1}\text{m}^{-2}$), X_w é o conteúdo de água em função do tempo, X_{we} é o conteúdo de água de equilíbrio e c_1 ($\text{kg s}^{-1}\text{m}^{-2}$) é a inclinação da curva de secagem ao final da secagem. Considerando que ao final do período inicial de secagem o fluxo é \dot{q}_{max} e o conteúdo de água é X_{cr} , pode-se deduzir:

$$c_2 = \frac{3\dot{q}_{max} - 2c_1(X_c - X_{we})}{(X_c - X_{we})^2} \quad (3.8)$$

$$c_3 = \frac{c_1(X_c - X_{we}) - 2\dot{q}_{max}}{(X_c - X_{we})^3} \quad (3.9)$$

Com $F(X_w)$ na forma:

$$F(X_w) = \left(\frac{X_w - X_{we}}{X_c - X_{we}} \right) * \left[\varphi + (3 - 2\varphi) \left(\frac{X_w - X_{we}}{X_c - X_{we}} \right) + (\varphi - 2) \left(\frac{X_w - X_{we}}{X_c - X_{we}} \right)^2 \right] \quad (3.10)$$

Embora não reportado diretamente na literatura original, é possível deduzir φ como:

$$\varphi = c_1 \frac{(X_c - X_{we})}{\dot{q}_{max}} \quad (3.11)$$

3.4 Resultados e discussão

3.4.1 Condições do ar de secagem

Na Tabela 3.2 a seguir, são mostrados os valores reais de temperatura e umidade relativa atingidos durante os experimentos em escala laboratorial.

Tabela 3.2. Condições do ar, teóricas vs. reais (escala laboratorial)

<i>Teste</i>	T_{teor} (°C)	UR_{teor} (%)	T_{real} (°C)	UR_{real} (%)	$T_{wb,real}$ (°C)	$T_{real}-T_{wb,real}$ (°C)
1	52,8	12,9	53,67 ± 0,17	13,05 ± 1,27	27,26	26,41
2	52,8	27,1	53,38 ± 0,33	26,27 ± 0,86	33,47	19,91
3	67,1	12,9	67,59 ± 0,41	12,96 ± 0,66	35,00	32,59
4	67,1	27,1	67,30 ± 0,25	26,72 ± 0,36	43,78	23,52
5	60,0	20,0	59,97 ± 0,32	21,35 ± 0,58	35,62	24,34
6	60,0	20,0	60,17 ± 0,42	20,26 ± 0,69	35,03	25,14
7	60,0	20,0	60,50 ± 0,22	20,44 ± 0,56	35,62	24,88
8	60,0	20,0	60,29 ± 0,17	21,19 ± 0,68	35,54	24,76
9	60,0	20,0	60,31 ± 0,30	20,31 ± 0,57	35,19	25,13
10	70,0	20,0	69,93 ± 0,50	19,96 ± 0,43	41,67	28,24
11	50,0	20,0	51,45 ± 0,52	21,16 ± 0,91	29,76	21,69
12	60,0	30,0	60,31 ± 0,30	28,34 ± 0,73	39,49	20,82
13	60,0	10,0	59,81 ± 0,30	10,76 ± 1,07	28,99	30,82

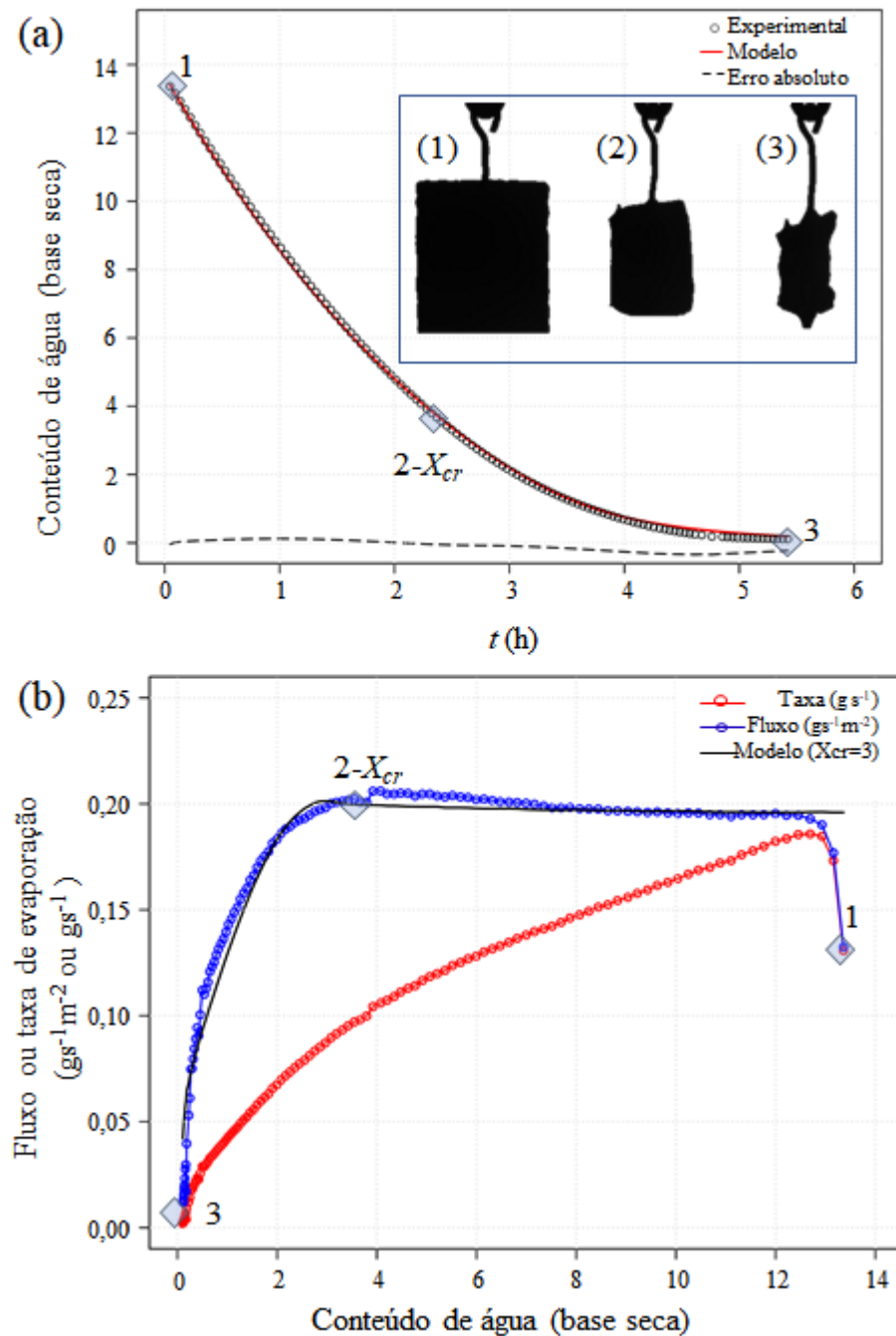
Para as temperaturas os desvios foram de até 1,01 % em relação à programada; e os desvios da umidade relativa, de até 9,98 %.

3.4.2 Cinética de secagem

Na etapa em escala laboratorial, a curva de secagem, naturalmente, foi dependente da condição selecionada. Uma dessas curvas, especificamente a do ponto central, está representada na Figura 3.4(a). Na Figura 3.4(b), observa-se que, sem a correção pela área, não há períodos distintos no processo de secagem; porém, feita a correção, se observa um período de taxa constante e outro de taxa decrescente.

Observa-se também na Figura 3.4(a) que o modelo de Van Meel previu satisfatoriamente a curva de secagem, especialmente levando-se em conta que é um modelo simples e preditivo.

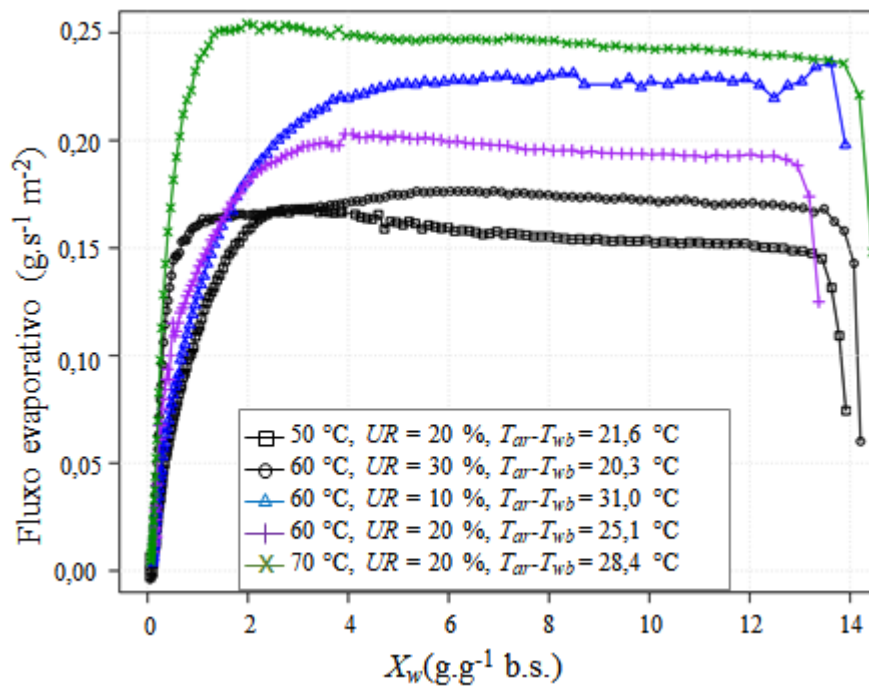
Figura 3.4. (a) Cinética de secagem para uma das amostras secas a 60 °C e 20 % UR, comparando dados experimentais e o modelo de Van Meel. (b) Taxa e fluxo de secagem.



Fonte: Autor

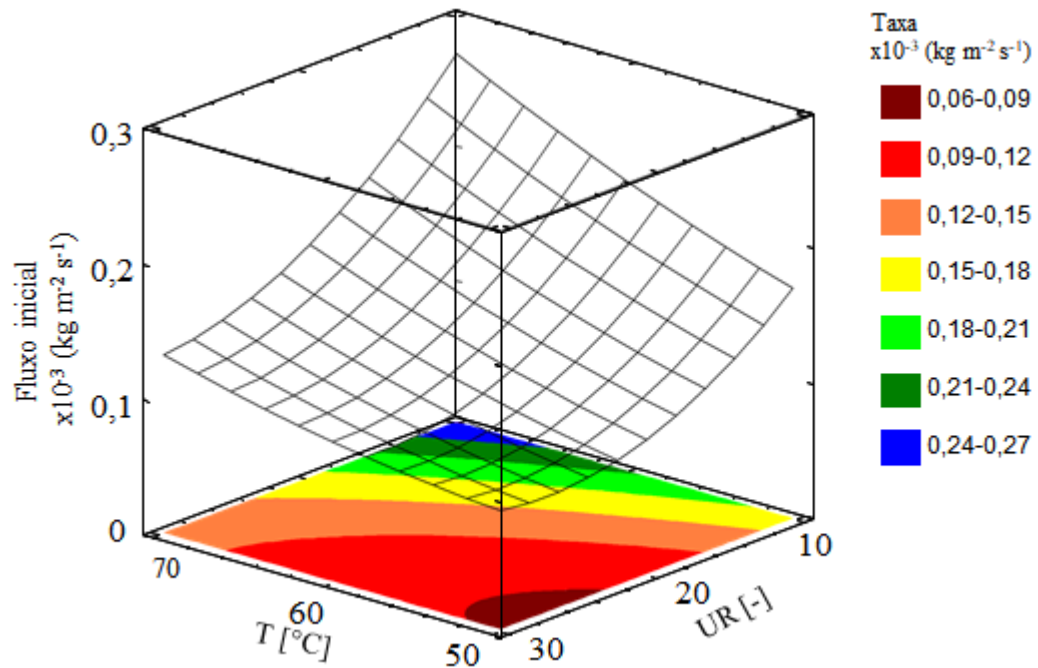
Nas Figuras 3.5 e 3.6 a seguir, os fluxos de secagem, durante e no início do processo, são mostrados para todas as condições descritas no Planejamento Experimental (Tabela 3.1). Como esperado, quanto maior foi a diferença entre a temperatura do ar e a temperatura de bulbo úmido, maior foi o fluxo inicial.

Figura 3.5. Fluxo evaporativo, para diferentes condições de secagem, de acordo com o Planejamento Experimental (Tabela 3.1), de amostras tiradas do centro da raiz.



Fonte: Autor

Figura 3.6. Superfície de resposta indicando o fluxo evaporativo inicial para todas as condições testadas, conforme Tabela 3.1.



Fonte: Autor

Para comparar com os resultados obtidos da secagem de fatias de yacón em escala piloto (Seção 2.4.3), na Tabela 3.3, os dados cinéticos de ambas as etapas são apresentados obtidos do modelo da Equação 2.6.

Tabela 3.3. Comparação dos parâmetros cinéticos obtidos do modelo da Equação 2.6^a, mediante os resultados das etapas de secagem de yacón em escala laboratorial e piloto.

T (°C)	UR (%)	$k_1 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$	$k_2 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$
Escala piloto			
50	30	$1,05 \pm 0,004$	$5,94 \pm 0,1$
60	30	$1,30 \pm 0,09$	$6,88 \pm 0,4$
50	20	$1,15 \pm 0,03$	$5,40 \pm 0,9$
60	20	$1,42 \pm 0,04$	$6,08 \pm 0,2$
Escala laboratorial ^b			
60	30	0,78	7,26
70	20	1,14	10,84
60	10	1,15	9,97
50	20	0,75	7,35
67	13	1,37	11,88
53	27	0,81	5,97
67	27	1,00	8,90
53	13	0,98	6,92
60	20	$1,03 \pm 0,06$	$8,01 \pm 0,86$

$$^a MR = \exp(-k_1 t - (k_2 t)^2)$$

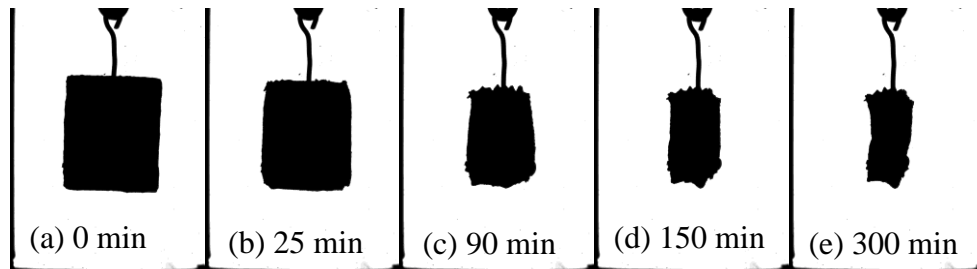
^b seguindo o planejamento fatorial estrela, apenas o ponto central (60 °C, 20 % UR) teve repetições

Observa-se que os parâmetros cinéticos são de ordem de grandeza similares. Por exemplo, no experimento a 60 °C e 20 % UR, em escala laboratorial, o parâmetro de velocidade inicial k_1 tem um valor similar ($1,03 \pm 0,06 \text{ s}^{-1}$) à condição correspondente da escala piloto ($1,42 \pm 0,04 \text{ s}^{-1}$). Mesmo as condições mais drásticas em escala laboratorial, como 70 °C e 20 % UR, não chegaram à velocidade inicial obtida na escala piloto. As diferenças de geometria e equipamento justificariam esta diferença: além de terem sido realizadas com amostras cilíndricas com diferentes proporções, nos experimentos em escala piloto, uma placa perfurada ficou em contato com a amostra, enquanto nos experimentos em escala laboratorial houve condução de calor apenas pelo fio metálico passando por ela.

3.4.3 Encolhimento

Nesta etapa, o método de captura de imagens gerou silhuetas, como as mostradas na Figura 3.7.

Figura 3.7. Imagens obtidas para as amostras secas a 67 °C e UR 13 % (a) no início da secagem; (b) após 25 min; (c) após 90 min; (d) após 150 min e (e) após 300 min. As bordas são devidas à própria janela da secadora.



Fonte: Autor

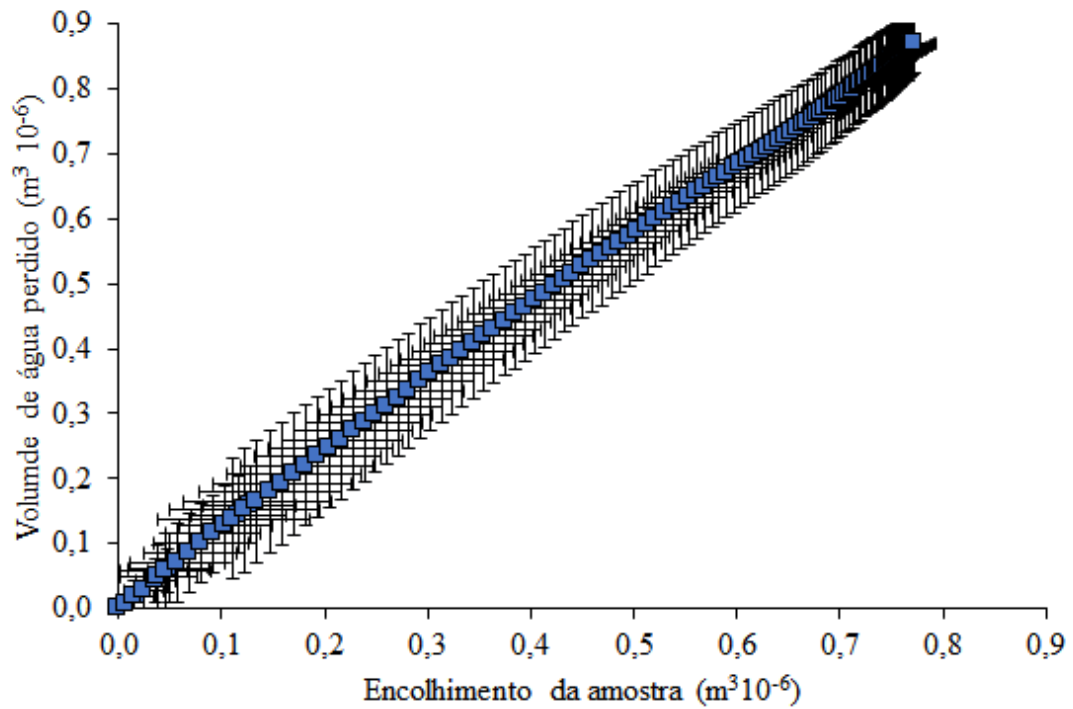
Calcular a área das amostras usando estas imagens implica em assumir que o formato cilíndrico se manteve ao longo de todo o processo, o que torna necessária cautela ao analisar resultados que envolvam a área das amostras no final das curvas de secagem.

Mesmo que o formato não se mantenha perfeitamente cilíndrico, o volume calculado com base nas imagens, ao longo do experimento, é consistente com a perda de água estimada pela cinética de secagem.

É interessante observar que a perda de volume é consistentemente próxima ao volume correspondente da água evaporada, conforme mostrado na Figura 3.8, para todas as condições de secagem. Na literatura, resultados similares foram obtidos para yacón (BERNSTEIN; NOREÑA, 2014), batatas (FRÍAS; CLEMENTE & MULET, 2010), maçãs (SCHULTZ *et al.* 2007) e pêras (GUINÉ, 2006). Almeida *et al.*, (2017), porém, observaram um desvio do comportamento linear, próximo ao final da curva de secagem, em amostras de batata; e um desvio ainda mais acentuado em amostras de maçã, com a perda de água mais acentuada que a do volume. Na batata, os autores atribuem a menor perda de volume ao efeito de *case hardening*; e, nas maçãs, à formação de poros. Em yacón, a similaridade entre o encolhimento e a perda de volume em água sugere que não houve formação significativa de poros.

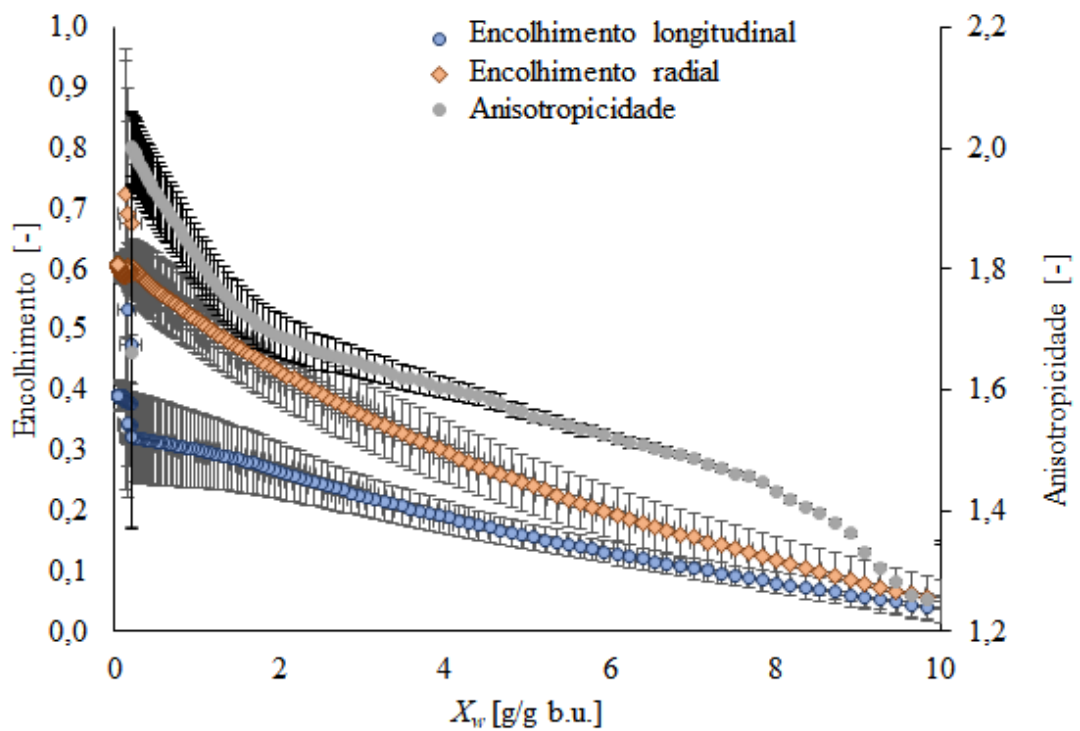
Ao contrário das amostras estudadas na escala piloto, as amostras da escala laboratorial tiveram o encolhimento longitudinal menos pronunciado do que o radial (Figura 3.9 e Tabela 3.4).

Figura 3.8. Volume de água perdido vs. encolhimento observado nas repetições do ponto central (60 °C, 20 % UR)



Fonte: Autor

Figura 3.9. Encolhimento das amostras do ponto central (Tabela 3.1), secas a 60 °C e 20 % UR.



Fonte: Autor

Tabela 3.4. Encolhimento e conteúdo de água crítico (Tabela 3.1).

T_{teor} (°C)	UR_{teor} (%)	$T_{bu,teor}$ (°C)	X_{cr} (g/g d.b.)	X_{w0} (g/g d.b.)	β_L^{**} (mm/mm)	β_r^{**} (mm/mm)	Encolhimento volumétrico** (mm ³ /mm ³)	R_{ani}^{**} (-)
52,8	12,9	26,9	3,0	9,70	0,07	0,32	0,56	4,57
52,8	27,1	33,4	4,5	13,28	0,22	0,38	0,70	1,73
67,1	12,9	35,0	4,3	12,48	0,17	0,38	0,66	2,24
67,1	27,1	43,5	2,1	10,85	0,11	0,36	0,61	3,27
60,0	20,0	34,9	3,3±0,7	11,95±1,48	0,21±0,07	0,35±0,05	0,70±0,07	1,67±0,40
70,0	20,0	41,6	1,6	14,56	0,25	0,42	0,73	1,68
50,0	20,0	28,4	2,1	13,97	0,20	0,43	0,73	2,15
60,0	30,0	39,7	4,3	14,20	0,23	0,41	0,72	1,78
60,0	10,0	29,0	4,2	14,11	0,20	0,38	0,67	1,90

*Os testes 5 a 9 são as repetições do ponto central

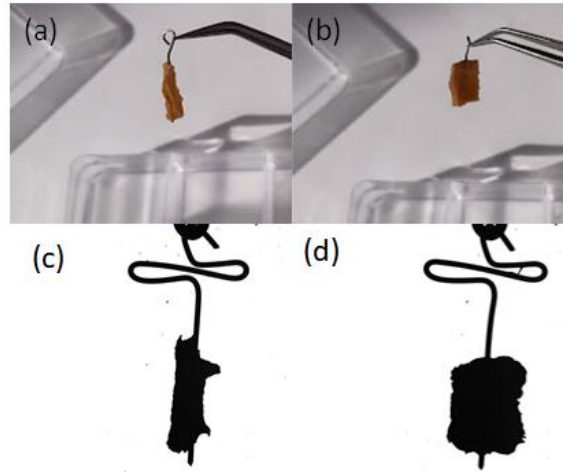
**Correspondentes ao momento em que $X_w = 3$ g/g (b.s.)

Uma das hipóteses é a de que o arame de suporte teria aderido à amostra, apesar do cuidado em utilizar um fio que dificultasse a adesão; isso teria dificultado o encolhimento ao longo de sua extensão.

Partindo dos dados das repetições no ponto central (60 °C, 20 % UR), as amostras de yacón sofreram uma perda de $90,5 \pm 0,1$ % ao final da secagem, próximo ao equilíbrio (ponto selecionado diferente da Tabela 3.3, para facilitar a comparação com a literatura). Outros autores (BERNSTEIN & NOREÑA, 2014) reportaram uma perda de 89 % no volume, em amostras secas a 50 °C por 5 h, e posteriormente secas a 75 °C por mais 5 h. A variedade de yacón usada não foi informada, e é possivelmente diferente da usada neste trabalho. Perdas de volume em amostras de batata foram reportadas entre 80 % (GEKAS & LAMBERG, 1991) e 85 % (YANG & SAKAI, 2001); em maçãs, 72 % (GOLESTANI; RAISI & AROUJALIAN, 2013); em bananas, 86 % (DA SILVA; HAMAWAND & SILVA, 2014); e, em marmelos, 85 % (TZEMPELIKOS, 2015). O alto conteúdo de água no yacón fresco e o colapso celular observado (Seção 3.4.4 a seguir) são fatores que influenciam seu considerável encolhimento. Batatas, por exemplo, têm maior conteúdo de sólidos, e maçãs formam poros durante a secagem, resultando em um menor encolhimento do que o observado em yacón.

Com relação as amostras retiradas perto da casca das raízes de yacón nos sentidos longitudinal e radial, foi observado que encolheram sempre de tal forma que perderam o formato cilíndrico, como mostradas na Figura 3.10.

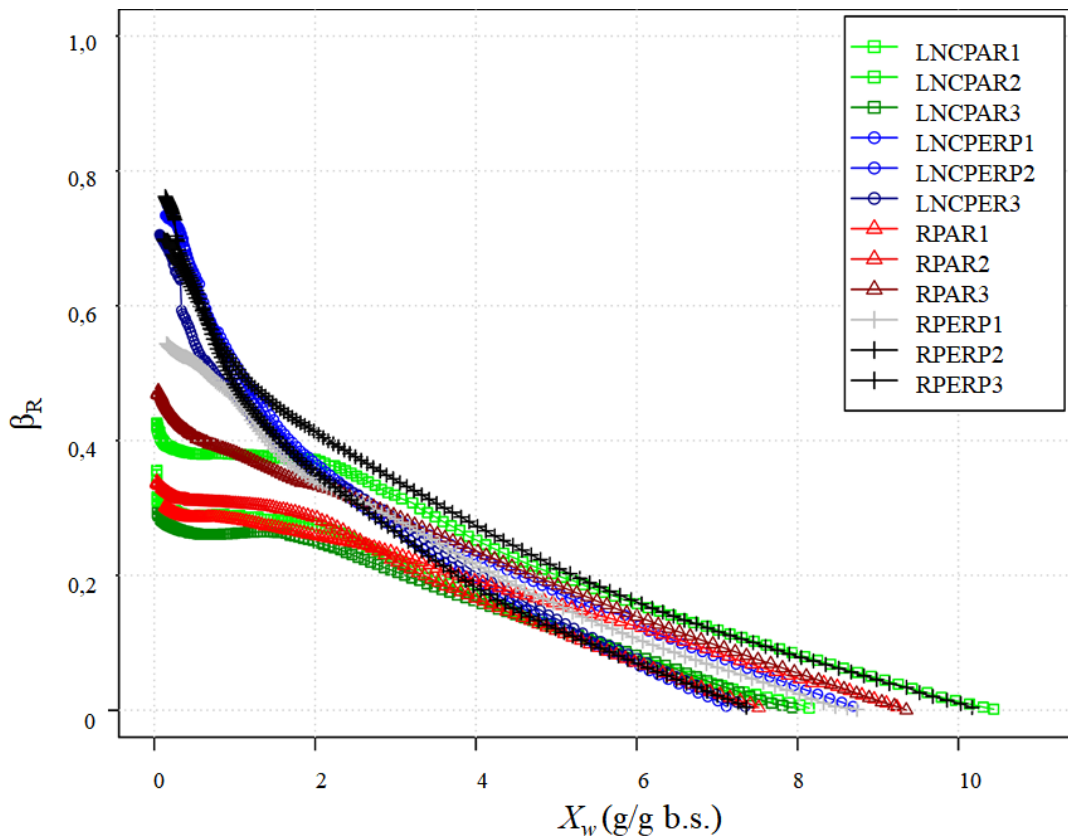
Figura 3.10. Amostra retirada longitudinalmente próximo à casca da raiz de yacón, e seca; (a) vista frontal e (b) vista lateral; (c) amostra similar seca a 60 °C, 20% observada no sentido perpendicular; (d) amostra seca a 60 °C, 20% observada no sentido paralelo



Fonte: Autor

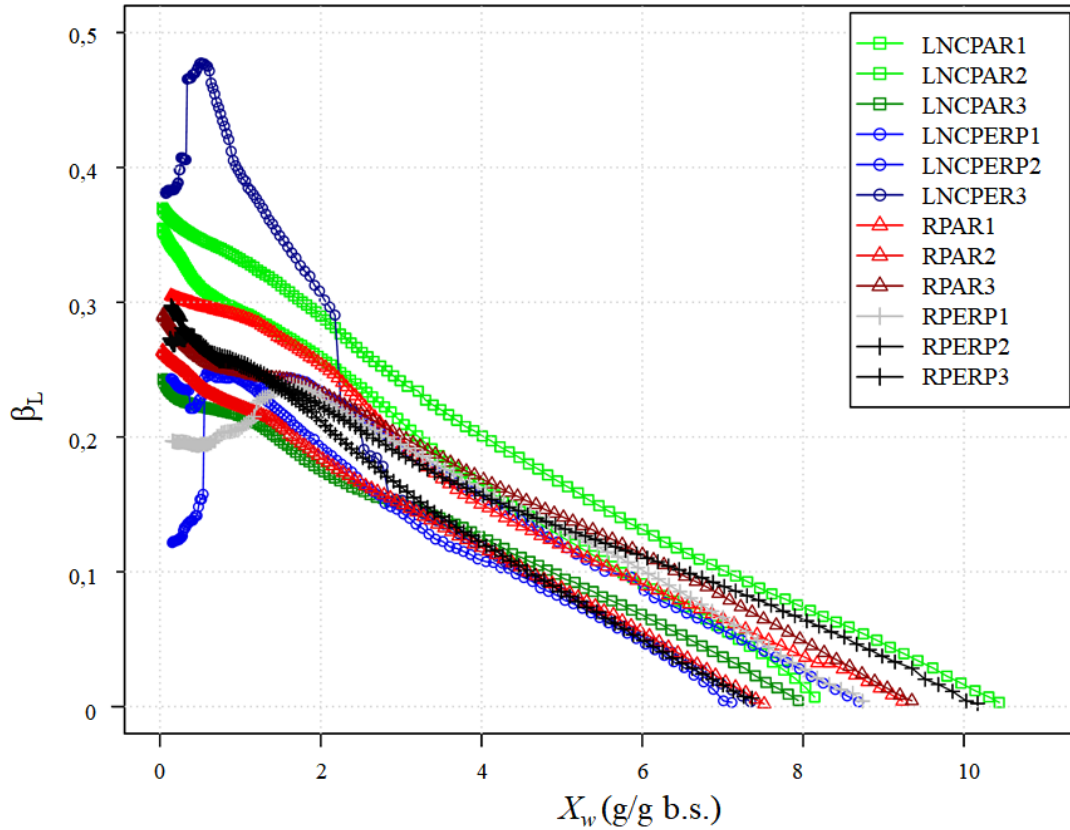
Este comportamento fica evidente observando as Figuras 3.11 e 3.12.

Figura 3.11. Encolhimento radial (β_R) das amostras secas em experimentos conduzidos em escala laboratorial- anisotrópica. LNC: longitudinal não centralizado. R: radial. PAR: sentido de observação paralela. PERP: sentido de observação perpendicular.



Fonte: Autor

Figura 3.12. Encolhimento longitudinal (β_L) das amostras secas em experimentos conduzidos em escala laboratorial- anisotrópica. LNC: longitudinal não centralizado. R: radial. PAR: sentido de observação paralela. PERP: sentido de observação perpendicular.



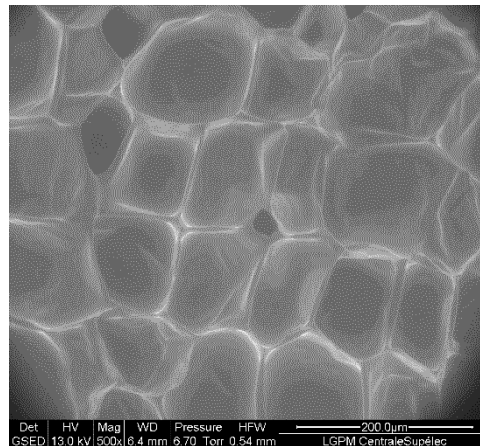
Fonte: Autor

Na direção paralela de observação, o encolhimento radial foi mais pronunciado do que o da perpendicular. O encolhimento longitudinal foi similar em todos os casos, com algumas amostras cortadas no sentido longitudinal apresentando comportamento errático próximo ao final do experimento. O formato das amostras, então, tendeu conforme o avanço da secagem a um cilindro ovalado, com o eixo perpendicular à marca das amostras encolhendo de forma mais pronunciada que o eixo paralelo. As amostras coletadas no eixo central não apresentaram esta tendência. Na seção 3.4.4 a seguir são exploradas as razões morfológicas para essa diferença de comportamento entre diferentes locais de amostragem e direções de observação.

3.4.4 Morfologia

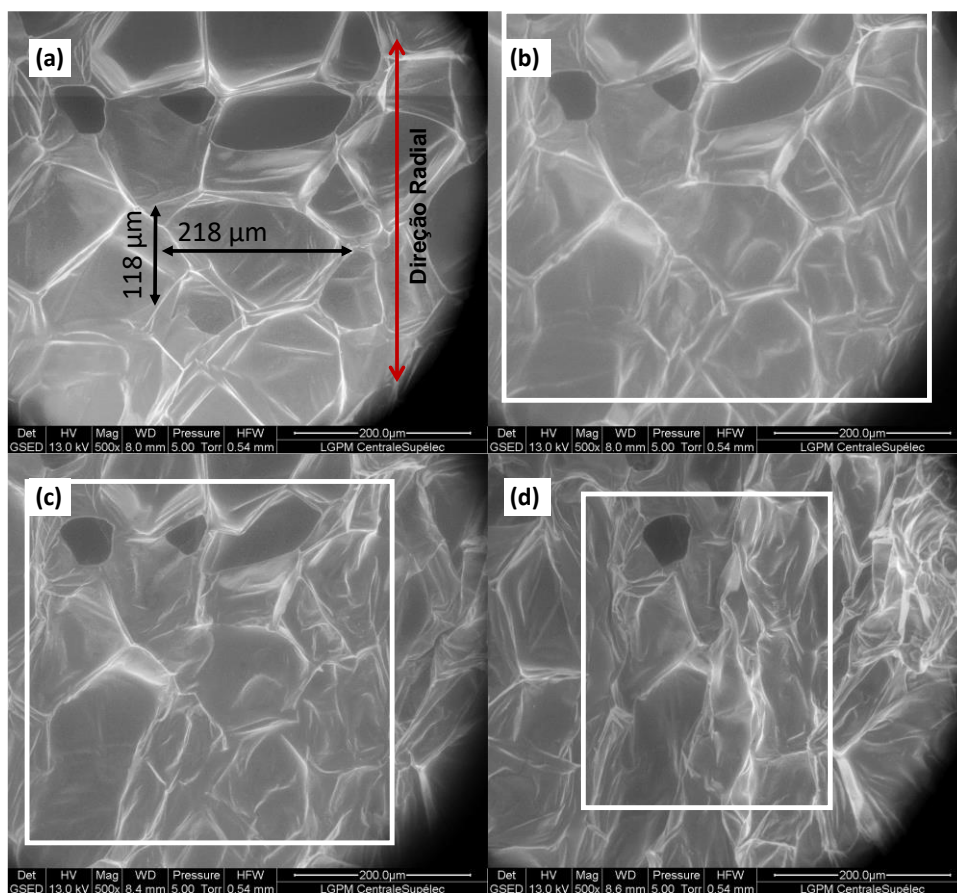
As Figuras 3.13 a 3.17 a seguir mostram algumas das imagens obtidas pela microscopia de varredura ambiental. Imagens complementares encontram-se no Apêndice D. No eixo central da raiz de yacón, as células observadas são uniformes, como as mostradas nas Figuras 3.13 e 3.14.

Figura 3.13. Imagem microscópica de yacón (eixo central da raiz) em umidade relativa 95 %.



Fonte: Autor; Colaboração com Almeida, G.

Figura 3.14. Imagens microscópicas de yacón (eixo central da raiz). (a) em umidade relativa 95 %; (b) após 6 min em umidade relativa 55 %; (c) após 10 min; e (d) após 50 min. O retângulo indica a evolução da área (a).

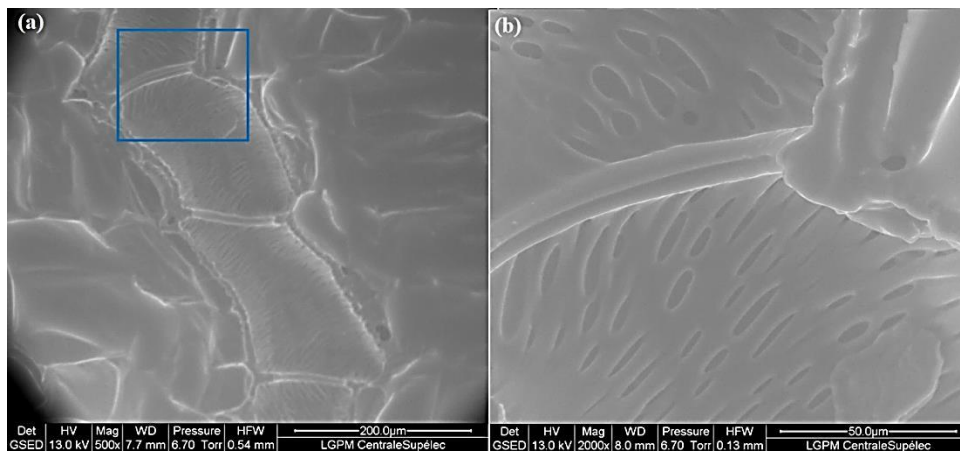


Fonte: Autor; Colaboração com Almeida, G.

Conforme a secagem avança (Figura 3.14 b-d), as células encolhem de modo uniforme, embora no modo não isotrópico, pois elas parecem colapsar perpendicularmente à direção radial. Não há a formação de vazios conforme se observa na Figura 3.14.

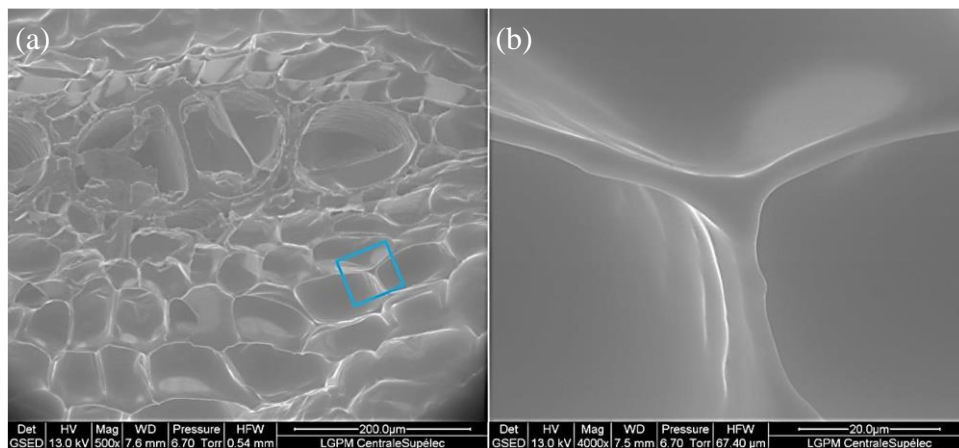
Fora do eixo central da raiz, observam-se canais similares aos elementos traqueários descritas por Davis *et al.* (1976) em cenouras (Figuras 3.15 e 3.16).

Figura 3.15. Vista microscópica de uma fatia de yacón cortada longitudinalmente próximo à casca (a); e (b) detalhe.



Fonte: Autor; Colaboração com Almeida, G.

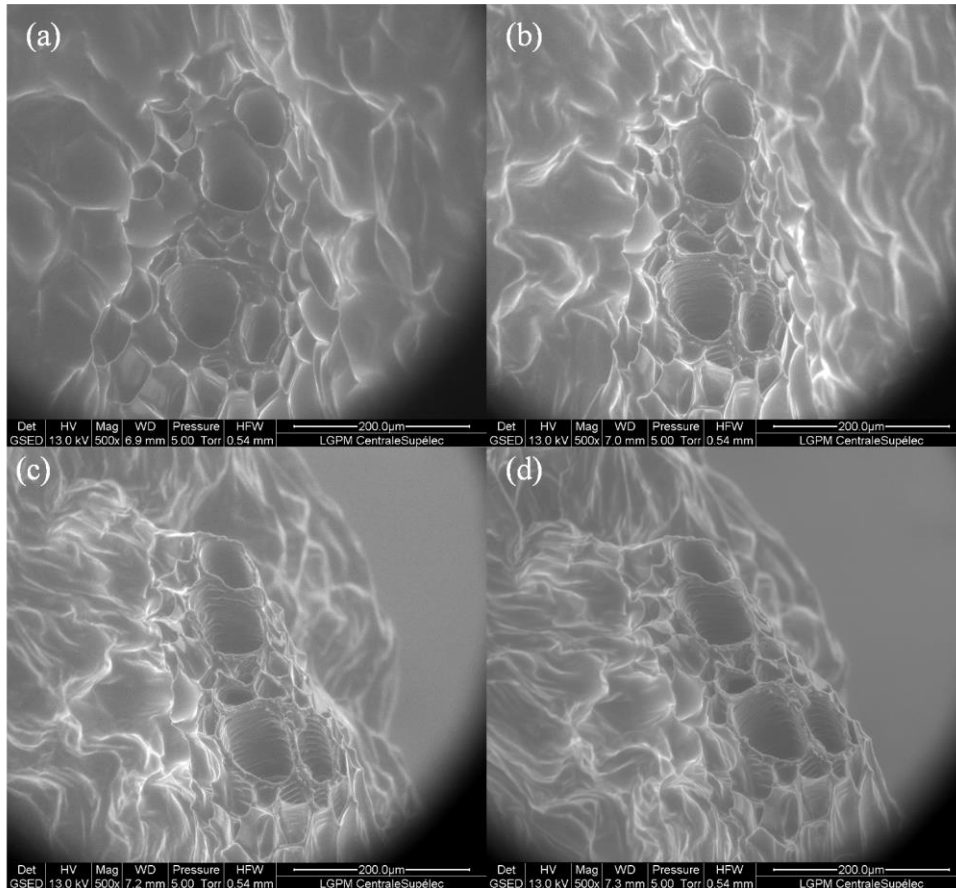
Figura 3.16. Vista microscópica de uma fatia de yacón cortada radialmente próximo à casca (a); e (b) detalhe.



Fonte: Autor; Colaboração com Almeida, G.

Essas estruturas são formadas por xilema; ao contrário do parênquima ao redor, elas não sofrem encolhimento completamente (Figura 3.17), e podem ser uma das razões para a anisotropia no encolhimento das amostras colhidas longe do centro.

Figura 3.17. Vista microscópica de uma fatia de yacón cortada radialmente próximo à casca (a) em condições de saturação; (b) após 6 min a 10 °C; (c) após 10 min a 20 °C; (d) após 60 min a 20 °C.



Fonte: Autor; Colaboração com Almeida, G.

O arranjo destes feixes tubulares também é uma explicação para a deformação observada na Figura 2.16, que mostra fatias de yacón secas em escala piloto, com estrias radiais ao longo das fatias. Ao encolher menos que o parênquima ao redor durante a desidratação, o xilema daria a aparência deformada às fatias secas de yacón (Figura 2.18).

3.5 Conclusões parciais

Neste Capítulo, foram exploradas a secagem convectiva de yacón em escala laboratorial e os aspectos microscópicos da amostra durante o processo. A ausência de poros no produto causa o colapso das células e uma drástica redução em seu volume, mas abre espaço para simplificações na descrição do encolhimento e da cinética de secagem.

Observou-se que o encolhimento também é dependente do local e da direção de amostragem, o que não estava evidente na literatura até o momento. Isso pode ter impacto na produção de produtos dependentes da forma, como *chips*.

4 SIMULAÇÃO DA SECAGEM CONVECTIVA DE UMA FATIA DE YACÓN: EVOLUÇÃO DA UMIDADE, TEMPERATURA, DIFUSIVIDADE E ATIVIDADE DE ÁGUA

4.1 Introdução

Neste Capítulo, são exploradas as distribuições de temperatura e umidade, ao longo do tempo de secagem de uma fatia de yacón, por meio de simulação em Python. O objetivo foi prever a influência do encolhimento e estimar as propriedades que não podem ser medidas diretamente, como difusividade e atividade de água.

A secagem convectiva depende de várias condições que devem ser consideradas. A taxa de secagem depende das condições do ar, como temperatura, umidade relativa, velocidade e direção, e de condições internas, como forma, estrutura e composição do material a ser seco (CASTRO; MAYORGA; MORENO, 2018).

Para desenvolver novos equipamentos e selecionar as melhores condições de secagem, a modelagem matemática é uma ferramenta útil. É necessário para isto selecionar e resolver um conjunto de equações que descrevam o fenômeno adequadamente. Sabendo-se que o yacón tem compostos bioativos suscetíveis à hidrólise (SCHER; RIOS & NOREÑA, 2008), é interessante criar um modelo capaz de descrever a evolução interna das condições de temperatura e umidade. Medições diretas destas variáveis dependeriam da interrupção do processo e da destruição das amostras, o que poderia afetar os resultados. Além disto, nas soluções puramente analíticas para descrever os perfis de temperatura e umidade dentro do produto, hipóteses frequentemente não-realistas são assumidas para serem resolvidas, devido ao forte acoplamento das transferências de calor e massa, e ao comportamento não-linear desses fenômenos (Perré *et al.*, 2023). Portanto, é proveitoso usar uma solução numérica, em uma simulação computacional.

Em uma revisão da literatura, Defraeye (2014) explora a complexidade dos fenômenos a se considerar na simulação da secagem convectiva, desde as diversas escalas possíveis, a possibilidade de se contemplar no modelo a mecânica dos sólidos envolvidos, até o acoplamento do transporte de calor e massa, a influência destes no encolhimento, e o efeito disto no coeficiente de difusão efetivo. O autor destaca o crescimento do número de publicações sobre modelagem de secagem na década de 2003 a 2013, especialmente o interesse em CFD

(fluidodinâmica computacional- do inglês *Computer fluid dynamics*), que teve considerável aumento a partir do ano 2000.

Datta (2016), em uma revisão da literatura, afirma que, para além da CFD, outras abordagens podem ser usadas, como a mecânica dos sólidos envolvidos, eletromagnetismo, e daí em diante. Por isso, introduz o termo CAE (Engenharia auxiliada por computador- do inglês *computer-aided engineering*). Envolvendo ou não abordagens além da mecânica dos fluidos, o autor frisa que simulações são úteis para testar o máximo de cenários para um sistema, usando o mínimo de experimentos e material. Mesmo assim, até o momento da publicação, a indústria de alimentos não tinha aproveitado as ferramentas de simulação tão intensamente quanto outras áreas, como a aeronáutica (DATTA; HALDER, 2008). Isso é devido aos diversos obstáculos: falta de padronização, mudanças de fase, falta de dados sobre propriedades, variações de propriedades nos materiais estudados, e até um entendimento apenas qualitativo de algumas propriedades. Os autores afirmam ainda que é útil desenvolver modelos tão mecanísticos quanto possível para explicar fenômenos, para que as simulações sejam mais flexíveis.

De acordo com Datta (2008), modelar matematicamente um processo envolvendo alimentos acarreta em diversos desafios: pode haver várias fases em um mesmo sistema, há mudanças de dimensão, podem ocorrer diversos tipos de transferência ao mesmo tempo, e nem sempre há dados disponíveis sobre a cinética dos fenômenos envolvidos. Para a secagem, o autor destaca que é de extrema importância acompanhar as mudanças das propriedades termofísicas devido à perda de água.

A modelagem da secagem pode levar ou não em conta diversos fatores. Castro, Mayorga e Moreno (2018), um artigo de revisão, fizeram um levantamento com cem estudos sobre modelagem da secagem de frutos, levando em conta as características do sistema consideradas por cada estudo. O resumo dos autores auxilia não apenas a compreender as considerações envolvidas, mas também o estado da arte:

- a) Fenômenos de transporte: A maior parte dos autores considerou transporte de massa e calor, sendo que boa parte levou em conta apenas o transporte de massa;
- b) Domínio do modelo: 92 em 100 autores levaram em conta apenas a fase sólida (modelos não-conjugados). O restante resolveu equações para o transporte de água no ar e no alimento ao mesmo tempo (modelos conjugados).
- c) Dimensionamento: Os modelos unidimensionais são mais usados que os bidimensionais. Apenas 13 dos 100 estudos utilizaram modelos tridimensionais;

- d) Escala: Datta (2016) afirma que pode-se conduzir a simulação considerando-se a matriz sólida separada do fluido vicinal e dos gases no alimento (micro ou nanoescala), ou como sólidos e líquidos representando partículas homogêneas (mesoescala), ou como um meio contínuo (macroescala). Também é possível unir as três escalas, o que caracterizaria um modelo multiescala. Tais modelos são mais complexos de implementar, mas em alguns casos ajudam a explicar “anomalias”. A maioria dos estudos foi feita em macroescala. Nanoescala e multiescala correspondem a 19 dos 100 estudos;
- e) Propriedades: Densidade, condutividade e calor específico são parâmetros importantes no estudo de secagem de frutas, e podem ou não ser considerados constantes. Apesar de ser possível estimar essas propriedades com equações apropriadas, a maior parte dos estudos considerou as propriedades constantes (62 em 100);
- f) Método de resolução: Como é comum que os modelos apresentem equações parciais diferenciais, métodos numéricos são mais populares que os analíticos. Além disso, para mapear o objeto, o método das diferenças finitas, o método do volume finito e o método dos elementos finitos têm aproximadamente a mesma popularidade entre os autores;
- g) Encolhimento: Metade dos autores levou em conta o encolhimento.

Frequentemente, a modelagem de processos com alimentos envolve mais de um fenômeno físico, sendo que uns exercem influência em outros. Se houver fenômenos acoplados dessa forma, chama-se a simulação de multifísica. Datta (2016) ressalta que, se for necessário refazer todos os passos de cálculo a cada passo no tempo em situações transientes, o tempo computacional aumenta, e isso depende de quão acoplados os fenômenos são. Por exemplo, se as propriedades térmicas ou dielétricas de um alimento mudarem durante um aquecimento por micro-ondas, haverá necessidade de refazer cálculos, e o tempo computacional aumentará.

Chua *et al.* (2002), em um trabalho sobre secagem de produtos agrícolas, afirmam que entre as várias trocas simultâneas de calor e massa a considerar, as mais importantes são o transporte de calor do ar para o material a ser seco, e da umidade do interior do produto para a superfície, e depois para o ar de secagem. Ateeque *et al.* (2014), simulando e validando a secagem de um pedaço retangular de batata, afirmam ainda que a velocidade do ar de secagem teve forte influência sobre a transferência de massa e calor na interface ar-sólido. Porém, Nguyen *et al.* (2018) não creem que a velocidade do ar é tão importante na secagem,

especialmente em relação a outros parâmetros, como o encolhimento. Cabe analisar caso a caso quais são os fatores significativos.

Kumar, Millar e Karim (2015) sugeriram uma estratégia para modelar a secagem de fatias cilíndricas de alimentos, já incluindo a possibilidade de modelagem. Os autores preveem quatro passos básicos: o primeiro de determinação da geometria e definição de parâmetros e variáveis; o segundo, de resolução das equações de transferência de massa e energia; o terceiro, de previsão das condições de temperatura e umidade; e o quarto, de checagem do passo anterior. Caso na checagem estas condições não correspondam às reais, os demais passos são repetidos.

Perré *et al.*(2023) enfatizam que, para cada material, é necessário conhecer várias propriedades físicas antes de proceder à simulação. Este problema é agravado porque as propriedades são dependentes de temperatura e composição do produto. Portanto, utilizar uma simulação para explorar o comportamento de um novo material exige uma etapa experimental de caracterização, ou uma modelagem adequada de suas propriedades.

4.1.1 Difusão da água

Para desenvolver a simulação descrita neste Capítulo, foi necessário determinar o coeficiente de difusão efetivo da água durante a secagem de yacón. Diferentes autores utilizam a expressão proposta por Crank (1975), para uma placa infinita, para estimar o coeficiente de difusão de água em fatias de frutas, quando considerado constante (BAINI; LANGRISH, 2007; ZABALAGA; CARBALLO, 2015; DAVILA, 2016):

$$\frac{M_t}{M_e} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp\left[-\left(\frac{2n+1}{2}\right)^2 \frac{\pi^2 D}{L^2} t\right] \quad (4.1)$$

Na qual M_t é a quantidade total de água perdida (g), M_e é o conteúdo total de água da placa no equilíbrio (g), L é a espessura da “placa” (m), D é o coeficiente de difusão efetivo da água ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$), e t é o tempo decorrido (s). É possível o truncamento no primeiro termo para tempos muito longos.

Caso o coeficiente de difusão não seja considerado constante, é possível estimá-lo como dependente da umidade e da temperatura da amostra. Kiranoudis *et al.* (1994) utilizaram um modelo tipo Arrhenius para descrever essa dependência:

$$D = D_0 \exp\left(-\frac{X_{w0}}{X_w}\right) \exp\left(-\frac{T_0}{T}\right) \quad (4.2)$$

Sendo D o coeficiente de difusão ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$), X o conteúdo de água em base seca (kg kg^{-1}), T a temperatura, e o subscrito 0 corresponde ao instante inicial. Os autores citados estimaram as constantes para pimenta, batata, cenoura e cebola, e Davila (2016) as obteve para banana verde.

Posteriormente, Maroulis *et al.* (2001) propuseram a seguinte equação:

$$D(X, T) = D_{X_0}(T) \left(\frac{1}{1 + X_w} \right) + D_{X_i}(T) \left(\frac{X}{1 + X_w} \right) \quad (4.3)$$

Com:

$$D_{X_0}(T) = D_0 \exp \left(-\frac{E_0}{R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ref}} \right) \right) \quad (4.4)$$

$$D_{X_i}(T) = D_i \exp \left(-\frac{E_i}{R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ref}} \right) \right) \quad (4.5)$$

Em que D_{X_0} ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$) é um parâmetro ajustável correspondente à difusividade em $X_w = 0$ e $T = T_{ref}$, D_{X_i} ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$) é um parâmetro ajustável correspondente à difusividade em $X_w = \infty$ e $T = T_{ref}$; E_0 (kJ mol^{-1}) é um parâmetro ajustável correspondente à energia de ativação em $X_w = 0$; E_i (kJ mol^{-1}) é um parâmetro ajustável correspondente à energia de ativação em $X_w = \infty$, T_{ref} é a temperatura de referência ($60 \text{ }^\circ\text{C}$), e R é a constante dos gases ideais ($8,314 \text{ J K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$)

É importante lembrar que este equacionamento não leva em conta mudanças nas dimensões das amostras. Para um material como o yacón, que apresenta um forte encolhimento durante a secagem, não seria correto atribuir um único coeficiente de difusão de umidade, e sim vários coeficientes locais que evoluem com o avanço da secagem.

A Tabela 4.1 a seguir expõe alguns métodos e resultados presentes na literatura recente sobre a difusividade efetiva da água durante a secagem de diferentes produtos.

Não há uma convenção sobre como determinar a difusividade mássica para um produto, sendo que as estimativas de cada autor são particulares ao processo estudado. Assim, tem-se, para um mesmo produto, estimativas da difusividade que diferem em várias ordens de grandeza. Acrescentando a quantidade de variedades possíveis para cada produto, é difícil a comparação.

Tabela 4.1. Difusividade efetiva da água em diferentes produtos na literatura recente, de acordo com as condições de secagem e método de cálculo

Autores	Produto e geometria	Condições do ar de secagem e método de cálculo	Coefficiente de difusão efetivo (m^2s^{-1})
Lisboa <i>et al.</i> (2018)	Yacón (cultivar não especificado), branqueado. Cilindro, 5 mm altura, 10 mm diâmetro	50, 60, 70 °C; 1,0, 1,5 e 2,0 m/s; UR não informada. Difusividade pela lei de Fick para cilindros.	(1,18 - 2,15)×10 ⁻⁹
Perussello <i>et al.</i> (2014)	Yacón (cultivar não especificado). Fatias, 2 mm altura	60 e 80 °C; secagem osmoconvectiva, velocidade e UR não informadas. Estimada por simulação (Comsol Multiphysics).	10 ⁻⁹ - 10 ⁻¹²
Shi, Zheng & Zhao (2013)	Yacón (cultivar não especificado), branqueado. Fatias, 4 mm altura	5-45 °C, 0,5-2,0 m/s, UR não informada. Difusividade de acordo com Crank (1975).	(1,09 - 7,34)×10 ⁻⁷
Gekas & Lamberg (1991)	Batata (Bintje), crua e branqueada. Fatias, 6 mm altura	60 e 80 °C, UR = 30 %, 2m/s. Difusividade de acordo com Crank (1975), ajustada ao encolhimento.	(2,13 - 2,65)×10 ⁻¹⁰
Golestani, Raisi & Aroujalian (2013)	Maçã (Golden delicious), crua. Cilindros, 60 mm diâmetro, 5 mm altura	60 e 80 °C. UR não informada. Difusividade de acordo com Doulia, Tzia & Gekas (2000), ajustada a T e X_w .	(21,2 - 34,7)×10 ⁻¹⁰
Veraverbeke <i>et al.</i> (2003)	Maçã descascada (Jonagold, Jonagostar, Elstar), crua. Cilindro, 2 cm diâmetro e 15-25 mm comprimento	0,6 - 1,1 °C, UR 92 – 95 %, 1 m/s. Permeabilidade medida diretamente.	4,33×10 ⁻¹² a 1,12× 10 ⁻¹¹
Da Silva, Hamawand & Silva (2014)	Banana (<i>Cavendish</i>), crua, inteira, descascada	40 a 70 °C. UR não informada. Difusividade de acordo com Silva <i>et al.</i> (2012) e Kiranoudis (1995).	(0,84 - 2,86)×10 ⁻⁸
Tzempelikos <i>et al.</i> (2015)	Marmelo (cultivar não especificado), cru. Fatias, altura 12 mm	40, 50 e 60 °C, 1 e 2 m/s, 2,93 - 19,54 % UR. Difusividade de acordo com a lei de Arrhenius e Tzempelikos <i>et al.</i> , 2014.	(3,82 - 9,02)×10 ⁻¹⁰
Guiné, Pinho & Barroca (2011)	Abóbora (Menina), crua. Cilindro, dimensões não informadas.	30 - 70 °C, 300 m ³ /h, UR não informada. Difusividade calculada de acordo com a lei de Arrhenius e Vega <i>et al.</i> (2007)	(0,41 - 2,35)×10 ⁻⁷
Doymaz (2007)	Morango (<i>Fragaria</i>), pré-tratado em oleato de etila. Inteiro.	50, 55 e 60 °C, 1,2 m/s, UR não informada. Difusividade de acordo com Crank (1975).	(0,49 - 1,42)×10 ⁻⁹

4.2 Métodos

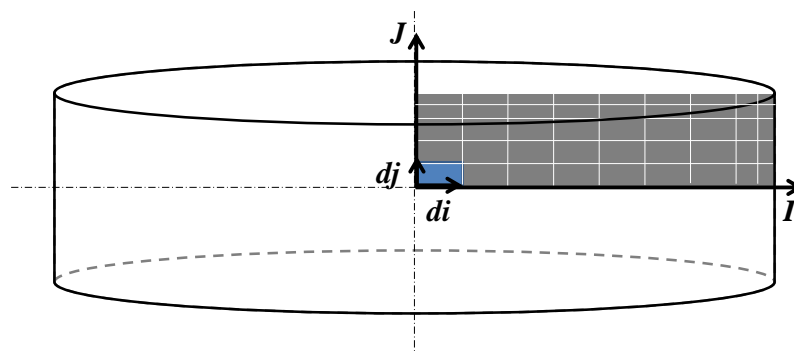
Foi realizada uma simulação do período de secagem referente ao procedimento do Capítulo 2. O código, em linguagem Python, está disponível no Apêndice E, e foi desenvolvido com o auxílio dos pesquisadores da Agro Paristech, Artemio Plana-Fattori e Denis Flick.

Assumiram-se as seguintes condições:

A) Geometria (Figura 4.1):

- i) Assumiu-se inicialmente uma malha retangular 5x30, considerando-se a fatia de yacón dos eixos de simetria até a superfície (Figura 4.1).
- ii) A malha é tetraédrica e estruturada. No início da simulação todas as células são retangulares. As células próximas ao eixo de simetria horizontal foram assumidas como sempre retangulares no decurso da simulação, enquanto as demais podem se tornar trapezoidais.
- iii) Para refinamento, as células próximas à superfície têm metade do comprimento/altura das demais, para levar em consideração a desidratação mais rápida.
- iv) A altura das células (direção j) varia proporcionalmente à perda de volume em água.
- v) A dimensão radial permanece ancorada no eixo horizontal de simetria, de acordo com observações experimentais anteriores, encolhendo até 5/6 do raio original.

Figura 4.1. Representação da fatia de yacón. A zona em cinza é a área considerada na simulação. A zona em azul representa uma das células da malha.



Fonte: Autor

B) Hipóteses:

- i) A evaporação só ocorre na superfície;
- ii) A transferência de energia ocorre por condução de calor no interior do material, e por convecção na superfície;
- iii) A água migra em estado líquido no interior do material, seguindo o gradiente de umidade;
- iv) Não são formados poros durante o processo de secagem.

C) Condições de operação e propriedades do material

- i) A temperatura do ar foi assumida como 60 °C, e a umidade relativa, 20 %; A temperatura inicial do produto foi considerada 20 °C;
- ii) Considerou-se $h = 33 \text{ W m}^{-2}\text{K}^{-1}$ (obtido considerando-se a equação 2.26 e o experimento a 60 °C, 20% UR do Capítulo 2);
- iii) O conteúdo de água no equilíbrio foi baseado nas isotermas de sorção obtidas a 50 °C, mais próximo da temperatura de bulbo úmido, com as constantes do modelo GAB (Vide Seção 5.1.1) $X_{wm} = 0,137$, $C = 1,17$, $K = 0,97$.
- iv) No início da simulação, valores aleatórios da difusividade da água foram adotados e a cinética de secagem resultante foi comparada graficamente com valores experimentais.

D) Tempo

- i) O tempo máximo de simulação foi estabelecido em 6 h;
- ii) O passo entre iterações era de 0,01s inicialmente, sujeito a ajustes.

E) Esquema de resolução

- i) O método dos volumes finitos foi escolhido como o mais adequado para resolver os balanços de massa e energia nas fronteiras;
- ii) Utilizou-se resolução explícita.

Como mencionado na Seção 4.1.1, nesta simulação, a difusividade de água não foi calculada pelo método tradicional de Crank (1975). Em vez disso, seu valor foi ajustado conforme o modelo descrito por Maroulis *et al.* (2001), capaz de prever diferentes difusividades em relação à temperatura e à umidade:

$$D = \frac{1}{1 + X_w} D_0 \exp\left[-\frac{E_0}{R}\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_r}\right)\right] + \frac{1}{1 + X_w} D_i \exp\left[-\frac{E_i}{R}\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_r}\right)\right] \quad (4.6)$$

Em que D_0 e D_i ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$) são, respectivamente, a difusividade térmica efetiva da água quando $X_w = 0$ e quando X_w é o conteúdo de água do sólido úmido; T_r [$^{\circ}\text{C}$] é a temperatura de referência, assumida como 60°C ; E_0 e E_i são as energias de ativação para difusão, respectivamente, no material seco e úmido; e R é a constante dos gases ideais ($8,3143 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$).

Valores de energia de ativação para yacón, calculados por Shi *et al.* (2013), foram usados como chutes iniciais na simulação. Os chutes iniciais da difusividade e da energia de ativação foram então repetidamente atualizados, com o objetivo de reduzir o erro em relação aos valores experimentais.

4.1.1 Balanço de massa e energia

O balanço de massa seguiu a seguinte equação de conservação, na forma convectiva:

$$\frac{\partial X_w}{\partial t} + \vec{v}_{dm} \cdot \vec{\nabla} X_w = \frac{1}{\rho_{dm}} \vec{\nabla} \cdot \vec{j}_{w/dm} \quad (4.7)$$

Em que \vec{v}_{dm} é a velocidade da água em relação à matéria seca (m s^{-1}), t é o tempo (s), X_w é a umidade em base seca (-), ρ_{dm} é a densidade da matéria seca (kg m^{-3}), e $\vec{\nabla} \cdot \vec{j}_{w/dm}$ é o fluxo de água em relação à matéria seca ($\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$). Este último é definido como:

$$\vec{j}_{w/dm} = -D \vec{\nabla} (\rho_{dm} X_w) \quad (4.8)$$

Em que D é a difusividade da água ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$).

A equação de conservação pode ser resolvida com a seguinte condição de contorno na superfície:

$$\vec{j}_{w/dm} \cdot \vec{n} = k'' \left((a_w \{X_w\} C_{sat} \{T\} - UR_{ar} C_{sat} \{T_{ar}\}) \right) \quad (4.9)$$

Em que \vec{n} é o vetor unitário normal à superfície, k'' é o coeficiente de transferência de massa (m s^{-1}), a_w é a atividade de água (-), C_{sat} é a concentração de água na saturação, na temperatura atual (kg m^{-3}), T é a temperatura ($^{\circ}\text{C}$), e UR é a umidade relativa do ar (%).

Para o balanço de energia, define-se a energia interna como a soma da energia da água e da matéria seca:

$$u = u_{dm} + X_w u_w = (c_{p,dm} + X_w c_{p,w}) T \quad (4.10)$$

Em que u é a energia interna (J kg^{-1}) e c_p é o calor específico ($\text{J kg}^{-1} \text{ K}$).

A equação de conservação, na forma convectiva, é:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \vec{v}_{dm} \cdot \vec{\nabla} u = \frac{1}{\rho_{dm}} \left(\vec{\nabla} \cdot \vec{j}_{w/dm} u_w + \vec{\nabla} \cdot \vec{j}_q \right) \quad (4.11)$$

Em que \vec{j}_q é o fluxo de energia ($\text{J m}^{-2} \text{s}^{-1}$).

Ela pode ser resolvida com a condição de contorno na superfície:

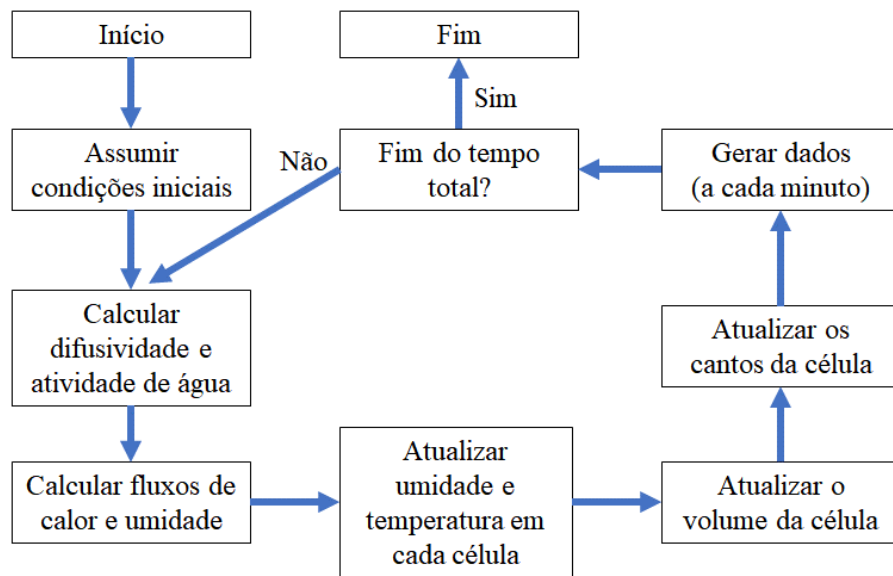
$$\vec{j}_q \cdot \vec{n} = h(T - T_{ar}) + L_v \vec{j}_{w/dm} \cdot \vec{n} \quad (4.12)$$

Em que h ($\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$) é o coeficiente convectivo e L_v é o calor latente de evaporação da água (J kg^{-1}).

4.1.2 Algoritmo e testes de sensibilidade

O algoritmo utilizado para descrever a secagem do yacón funciona está descrito na Figura 4.2:

Figura 4.2. Representação do algoritmo utilizado na simulação da secagem de uma fatia de yacón.



Fonte: Autor/Colaboração com Plana-Fattori, A. e Flick, D.

Para avaliar a sensibilidade do modelo a mudanças em diversos parâmetros, foram realizados testes com variações da malha, do passo de tempo, do coeficiente de transferência de calor e das condições ambientais, cujo resumo dos testes está mostrado na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 Testes de sensibilidade. As células em negrito são variações em relação ao caso-base (A). Para mais detalhes, vide o Apêndice F.

Teste	T_{ar} (°C)	UR (%)	D_0 (m ² s ⁻¹)	D_i (m ² s ⁻¹)	$E_0 = E_i$ (kJ mol ⁻¹)	h (Wm ⁻² K ⁻¹)	Malha (j x i)	Δt (s)
A	60	20	1 10 ⁻¹³	1.7 10 ⁻¹⁰	30	33	5 x 30	10 ⁻²
B1-B2	60	20	± 50 %	1.7 10 ⁻¹⁰	30	33	5 x 30	10 ⁻²
B3-B6	60	20	1 10 ⁻¹³	± 50 %	30	33	5 x 30	10 ⁻²
B7-B10	60	20	1 10 ⁻¹³	1.7 10 ⁻¹⁰	± 50 %	33	5 x 30	10 ⁻²
C1-C6	60	20	1 10 ⁻¹³	1.7 10 ⁻¹⁰	30	± 50 %	5 x 30	10 ⁻²
D1-D11	60	20	1 10 ⁻¹³	1.7 10 ⁻¹⁰	30	33	variados	10 ⁻²
E1-E9	60	20	1 10 ⁻¹³	1.7 10 ⁻¹⁰	30	33	5 x 30	5×10⁻³- 1×10⁻¹
F	60	30	1 10 ⁻¹³	1.7 10 ⁻¹⁰	30	37	5 x 30	10 ⁻²
G	50	20	1 10 ⁻¹³	1.7 10 ⁻¹⁰	30	31	5 x 30	10 ⁻²
H	50	30	1 10 ⁻¹³	1.7 10 ⁻¹⁰	30	35	5 x 30	10 ⁻²

A lista completa dos testes realizados está disponível no Apêndice F. Como critério para a qualidade dos resultados, foi usada a raiz do erro quadrático médio:

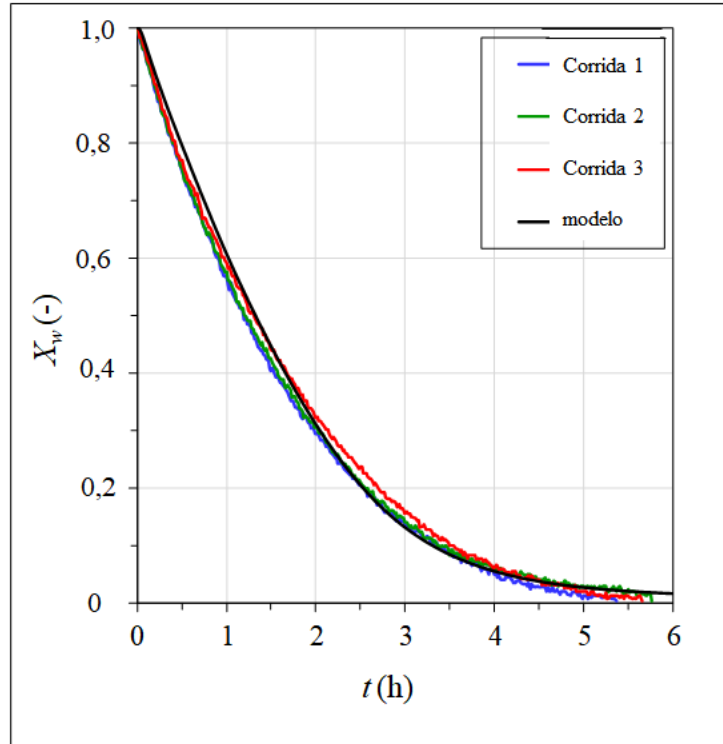
$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (4.7)$$

Em que $RMSE$ é a raiz do erro quadrático médio (do inglês *root mean square error*), n é o número de observações, y_i é a umidade média experimental da fatia, e \hat{y}_i é a umidade média simulada.

4.3 Resultados e discussão

Na Figura 4.3 a seguir, são comparados resultados experimentais da cinética de secagem de yacón com a curva obtida pela simulação, para (60 °C, 20 % UR).

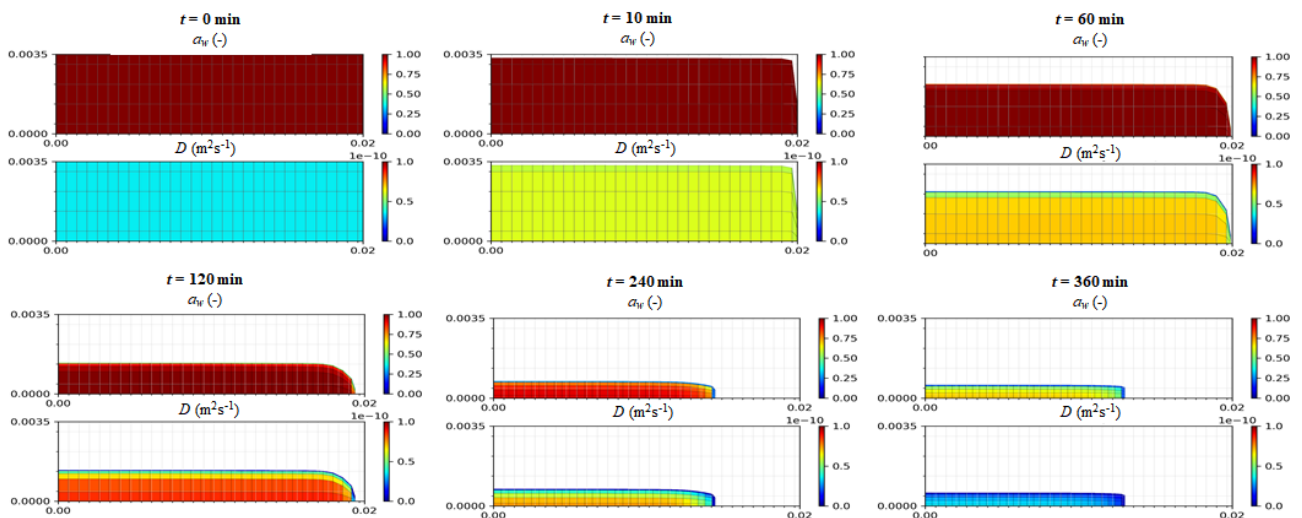
Figura 4.3. Cinética obtida por simulação, em comparação às curvas obtidas experimentalmente em escala piloto (60 °C, 20 %).



Fonte: Autor; Colaboração com Plana-Fattori,A.

Com esse ajuste, a simulação, em média, superestima a umidade nas primeiras duas horas de secagem, e a subestima depois disso, até a quarta hora. Esse resultado, porém, não leva em conta as variações locais, como as mostradas nas Figuras 4.4 e 4.5.

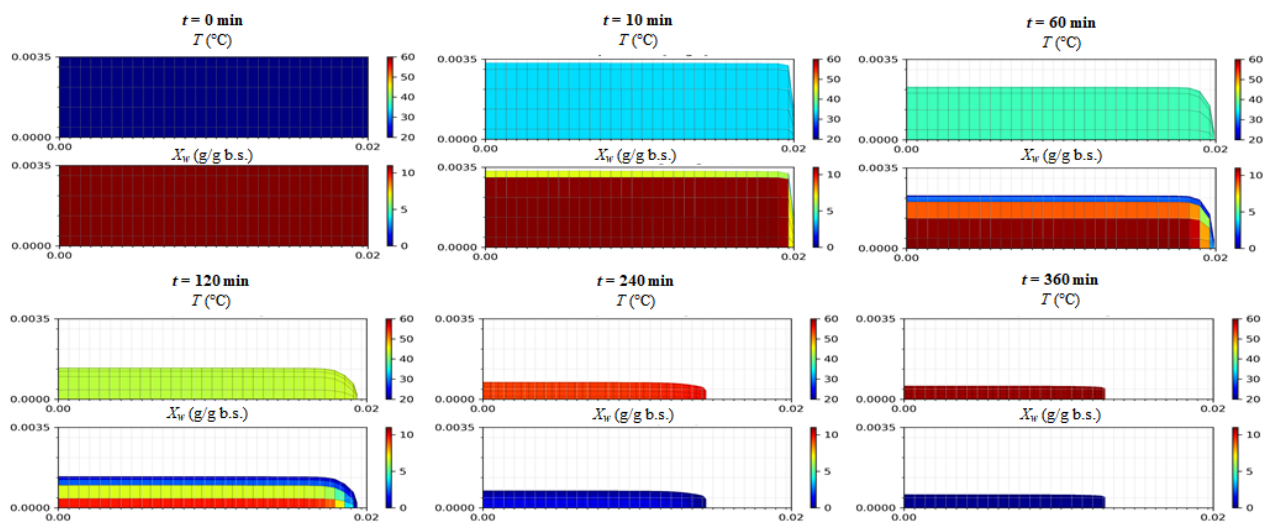
Figura 4.4. Evolução da atividade de água¹ e do coeficiente de difusão efetivo da água em uma fatia de yacón seca a 60 °C, 20 % UR (Simulação- Caso A)



Fonte: Autor, Colaboração com Plana-Fattori,A.

¹ Para mais informação sobre a atividade de água, vide Seção 5.4.4.

Figura 4.5. Evolução da umidade e da temperatura em uma fatia de yacón seca a 60 °C, 20 % UR (Simulação- Caso A)



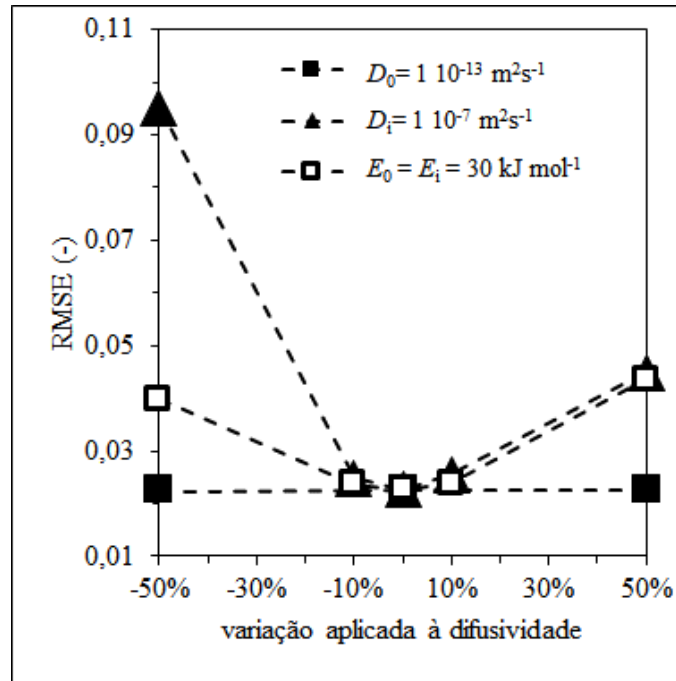
Fonte: Autor, Colaboração com Plana-Fattori,A.

Observa-se que, nas primeiras horas de secagem, não houve variação considerável da umidade no interior da fatia de yacón, e a atividade de água permaneceu alta. As últimas horas de secagem, no entanto, devem ser acompanhadas com cautela para que o produto final seque o suficiente para o armazenamento.

Nas Figuras 4.6 a 4.11 a seguir, são mostrados os resultados dos testes de sensibilidade em relação aos parâmetros assumidos neste modelo: difusividade, coeficiente de transferência de calor, malha e passo de tempo.

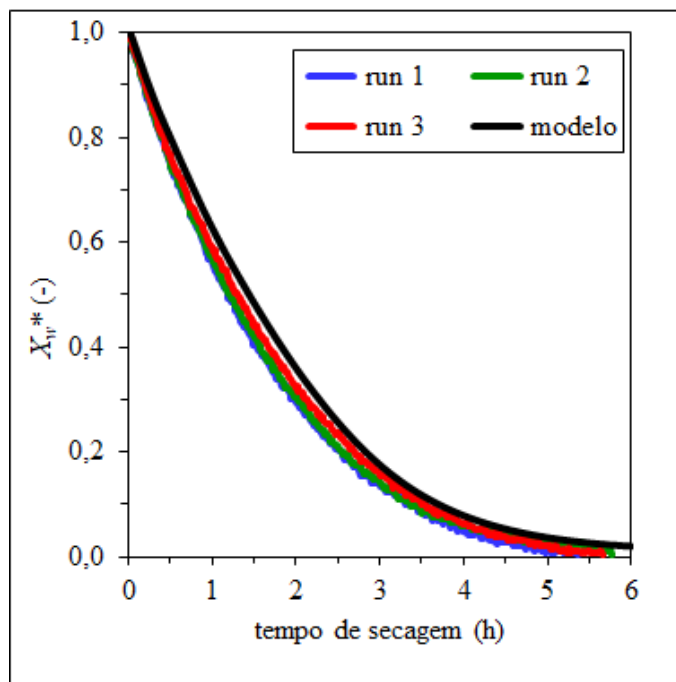
Ao alterar a difusividade do material seco, as variações na umidade média foram desprezíveis, o que não foi o caso da difusividade do material úmido (como mostrado no exemplo da Figura 4.7). Variações nas energias de ativação também causaram variações significativas no erro do modelo em relação ao experimental.

Figura 4.6. Efeito da variação da difusividade da água no material seco (D_0), do material úmido (D_i) e da energia de ativação do material seco (E_0) e úmido (E_i), na difusividade efetiva da água, conforme o modelo de Maroulis *et al.* (2001), de -50 % a +50 % em relação aos valores discriminados na legenda, utilizados na simulação base.



Fonte: Autor; Colaboração com Plana-Fattori,A.

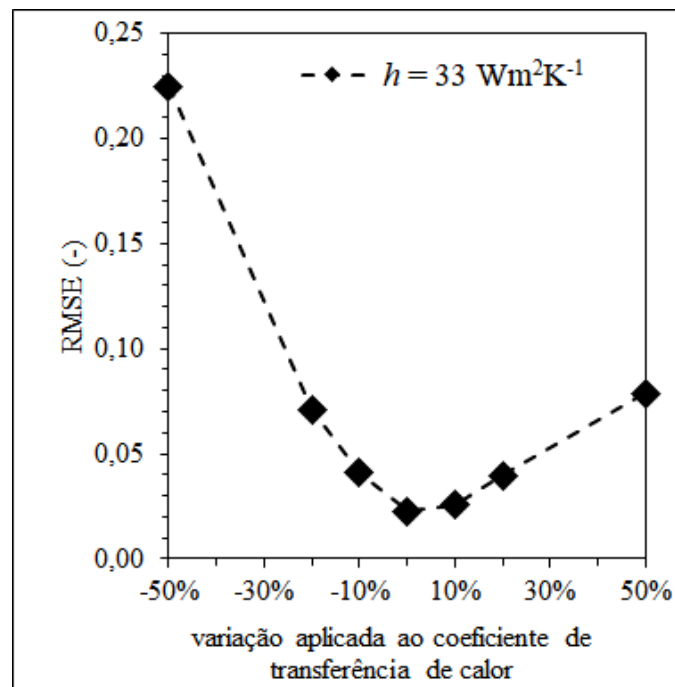
Figura 4.7. Efeito na umidade durante a simulação de secagem, ao variar a difusividade do material úmido em -50 % (caso B3).



Fonte: Autor; Colaboração com Plana-Fattori,A.

Mesmo com uma variação de -50 % em D_i , observa-se que a curva, apesar de menos ajustada que o Caso A (Fig. 4.3), manteve-se próxima ao formato original. Um valor menor da difusividade aumentou a umidade média simulada durante a secagem, como esperado. O modelo é, portanto, mais sensível às variações de D_i , E_i e E_0 , que de D_0 , mas ainda assim não é sensível a esses parâmetros.

Figura 4.8. Efeito da variação do coeficiente de transferência de calor (h) de -50 % a +50 % em relação ao valor utilizado na simulação base (mostrado na legenda).



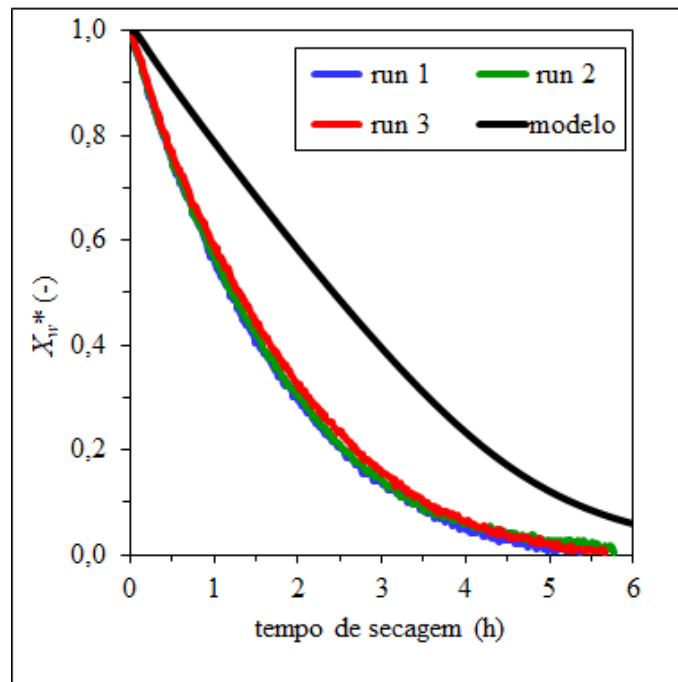
Fonte: Autor; Colaboração com Plana-Fattori,A.

Ao variar o coeficiente de transferência de calor, o erro aumentou consideravelmente, especialmente ao diminuí-lo em 50 %. Considerando que o coeficiente de calor foi estimado com base nas condições do Caso A, e que ele tende a aumentar com a redução das dimensões da amostra (Equação 2.23), é coerente que o erro aumente com a redução do seu valor. Na Figura 4.9, é mostrado o efeito de se reduzir este coeficiente em 50 %.

Ao se reduzir o coeficiente convectivo, observa-se que a umidade estimada é, coerentemente, maior que a experimental. No entanto, o efeito da redução deste parâmetro é apreciavelmente mais intenso do que da redução da difusividade (Figura 4.7).

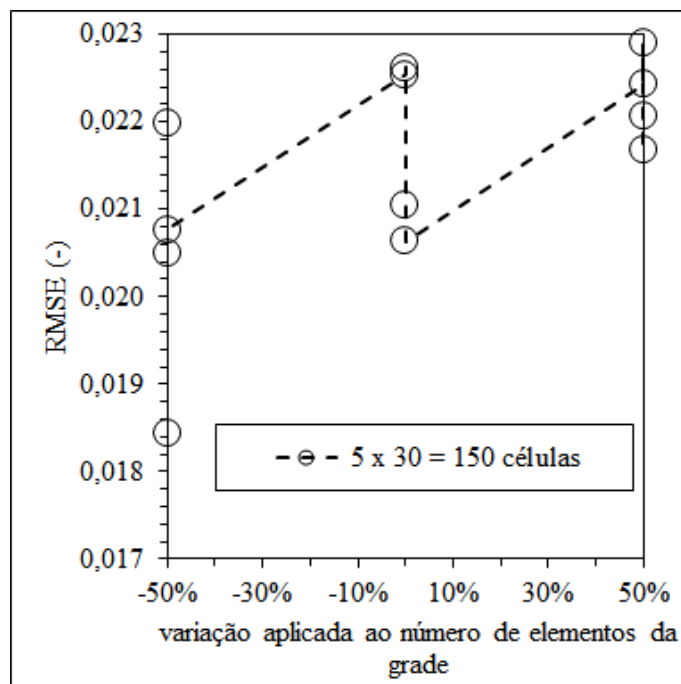
Na Figura 4.10 são mostrados os efeitos de se variar a quantidade e distribuição de células na malha da simulação. Como existem números de células próximos uns aos outros, na Tabela 4.3 informações sobre cada caso são descritas.

Figura 4.9. Efeito na umidade durante a simulação de secagem, ao variar o coeficiente convectivo h em -50 % (Caso C1).



Fonte: Autor; Colaboração com Plana-Fattori,A.

Figura 4.10. Efeito da variação do número de células na simulação, em diversas conformações, de -50 % a +50 % em relação número de células utilizado na simulação base (mostrado na legenda).



Fonte: Autor; Colaboração com Plana-Fattori,A.

Tabela 4.3. Raiz do erro quadrático médio dos testes de sensibilidade com variação na malha.

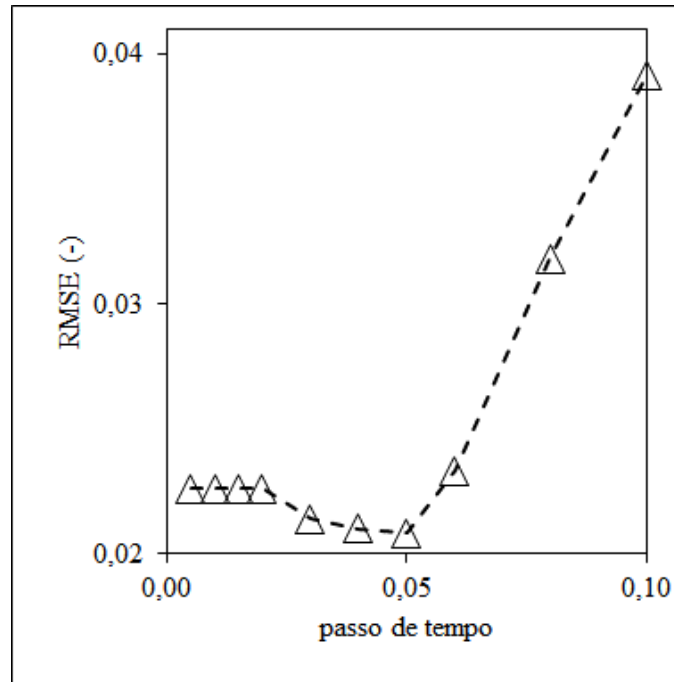
Teste	Malha $i \times j$	RMSE
D1	3 x 25 (75 células)	$2,198 \times 10^{-2}$
D2	5 x 15 (75 células)	$2,050 \times 10^{-2}$
D3	7 x 11 (77 células)	$1,843 \times 10^{-2}$
D4	9 x 8 (72 células)	$2,077 \times 10^{-2}$
D5	3 x 50 (150 células)	$2,254 \times 10^{-2}$
D6	7 x 21 (147 células)	$2,104 \times 10^{-2}$
D7	9 x 17 (153 células)	$2,063 \times 10^{-2}$
D8	3 x 75 (225 células)	$2,242 \times 10^{-2}$
D9	5 x 45 (225 células)	$2,289 \times 10^{-2}$
D10	7x 32 (224 células)	$2,207 \times 10^{-2}$
D11	9 x 25 (225 células)	$2,168 \times 10^{-2}$

Observa-se que a variação no número de células provoca pouco efeito sobre o erro da umidade simulada ao longo do processo, sendo que o caso com menor erro tem o menor número de células. Manter a malha “grosseira” implica em menos esforço computacional e não influencia o erro da umidade média simulada.

Na Figura 4.11, é mostrado o efeito de se variar o passo de tempo utilizado nas simulações, desde metade do passo original (0,005 s) até dez vezes este valor (0,1 s).

Observa-se que aumentar o passo de tempo resulta em um maior erro em relação aos valores experimentais. No entanto, reduzir este parâmetro (inicialmente 1×10^{-2}) não implica em um erro menor. Considerando-se que um menor passo de tempo exige maior tempo computacional, aplicar um passo mais refinado não resulta em erros menores.

Figura 4.11 Efeito da variação do passo de tempo.



Fonte: Autor; Colaboração com Plana-Fattori,A.

4.4 Conclusões parciais

Foi possível desenvolver um modelo para descrever a secagem convectiva de uma fatia de yacón, resolvendo-se fenômenos de transferência de calor e massa, considerando o encolhimento, evitando assim o uso de parâmetros difíceis de medir experimentalmente, como as propriedades viscoelásticas do material. A difusividade térmica efetiva da água foi considerada de forma dinâmica, dependendo tanto da umidade quanto da temperatura; essa abordagem permite explorar novas possibilidades no futuro, como o emprego de uma cinética de reação e a estimativa da difusividade baseada em sua composição. O modelo representa bem o encolhimento da fatia de yacón e sua cinética de secagem. Os resultados dos testes de sensibilidade sugerem que malhas mais grosseiras poderiam ter sido utilizadas para reduzir o tempo computacional, e que um passo de tempo menor não melhora significativamente a qualidade do modelo. Este modelo pode ser utilizado para outros materiais que sofrem grandes deformações, conhecendo-se a evolução geométrica destas últimas, para prever as condições de temperatura e umidade e sua distribuição espacial ao longo do tempo de secagem.

5 PROPRIEDADES DO YACÓN, DIAGRAMAS DE ESTADO E EFEITO DA SECAGEM SOBRE O CONTEÚDO DE FIBRAS

5.1 Introdução

Neste Capítulo são abordadas as propriedades termofísicas do yacón, bem como as mudanças por ele sofridas durante o processo de secagem, considerando-se as variações de temperatura e composição. O objetivo dos testes aqui mencionados foi dar embasamento à modelagem descrita nos Capítulos anteriores.

5.1.1 Sorção de vapor

Sorção é um fenômeno no qual moléculas de um líquido ou gás, chamado de sorbato, aderem a (adsorção), ou se desprendem de (dessorção) uma superfície. A quantidade de moléculas aderidas à superfície depende da atividade do sorbato no ambiente. Esta é definida como a razão entre a pressão de vapor do sorbato no ambiente e a sua pressão de vapor de saturação. A relação entre a atividade e a quantidade adsorvida é descrita pelas isotermas de sorção.

Propuseram-se diversos modelos para descrever matematicamente as isotermas de sorção, seja de forma mecanística, empírica ou semi-empírica. O primeiro deles, possivelmente, foi o que Langmuir (1918) propôs, no artigo em que lançou sua teoria de sorção de gases sendo adsorvidos em superfícies de vidro, mica e platina:

$$a_w \left(\frac{1}{X} - \frac{1}{X_{mono}} \right) = \frac{1}{CX_{mono}} \quad (5.1)$$

Em que a_w é a atividade do material adsorbato (adimensional), C é uma constante (adimensional), X é a fração de adsorbato (g/g amostra sem adsorbato) e X_{mono} é a fração de adsorbato correspondente à monocamada (g/g sem adsorbato).

O modelo de Langmuir, porém, foi criado apenas para isotermas do tipo I. Modelos com aplicabilidade restrita, como o de Oswin (1946) e o de Henderson (1952), não serão abordados nesta revisão, que passa a considerar o adsorbato como vapor d'água.

Um modelo semi-empírico que se adapta a uma gama mais abrangente de isotermas é o de Brunauer, Emmett e Teller (1938), conhecido como BET:

$$\frac{X_w}{X_{w,mono}} = \frac{Ca_w}{(1-a_w)[1+(C-1)a_w]} \quad (5.2)$$

No qual a_w é a atividade de água (adimensional), X_w é a fração de água (g/g amostra seca), $X_{w,mono}$ é a fração de água correspondente à monocamada (g/g amostra seca), e C é uma constante adimensional. Neste modelo, assume-se que a energia de sorção do adsorbato é a mesma em toda a monocamada, e que a energia de sorção das camadas seguintes é igual à do adsorbato puro. Apesar de restritas hipóteses e da faixa de validade (a_w de 0,05 a 0,5), o modelo tem sido aplicado com sucesso em isotermas de sorção de alimentos (BASU; SHIVHARE; MUJUMDAR, 2006; LEWICKI, 2009).

O modelo conhecido como GAB, proposto por Anderson (1946), De Boer (1953) e Guggenheim (1966), é uma versão reformulada do modelo BET, com três parâmetros, e é mais apropriado que o modelo de BET, pois é válido para valores de atividade de água acima de 0,5, embora seja mais difícil o ajuste com 3 parâmetros.

$$\frac{X_w}{X_{w,mono}} = \frac{KCa_w}{(1-Ka_w)[1-Ka_w + CKa_w]} \quad (5.3)$$

Em que K é uma constante adimensional. O parâmetro C é chamado de constante de Guggenheim, e é análogo ao parâmetro C do modelo de BET (FIGURA; TEIXEIRA, 2007) e é dependente da temperatura na forma da equação de Arrhenius:

$$C = C' \exp\left(\frac{\Delta H_{mono}}{y_A \times T}\right) \quad (5.4)$$

Em que ΔH_{mono} é a entalpia de ligação na monocamada ($J \text{ kg}^{-1}$), y_A é uma constante específica do adsorbato ($J \text{ kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$), e C' é a constante na temperatura de referência.

O parâmetro k é uma correção em relação ao modelo de BET, que leva em conta que camadas adsorvidas depois da monocamada não são tão fortemente ligadas. Assim como C , a constante k é dependente da temperatura na forma de Arrhenius.

$$k = k' \cdot \exp\left(\frac{\Delta h_k}{y_A \cdot T}\right) \quad (5.5)$$

Em que k' é a constante k na temperatura de referência, e Δh_k é a entalpia média de ligação de camadas de adsorbato ($J \text{ kg}^{-1}$).

Atualmente o modelo GAB é o mais amplamente utilizado para descrever isotermas de sorção de alimentos. Há modelos mais recentes, como o de Zhang, Grace e Sun (2022), que

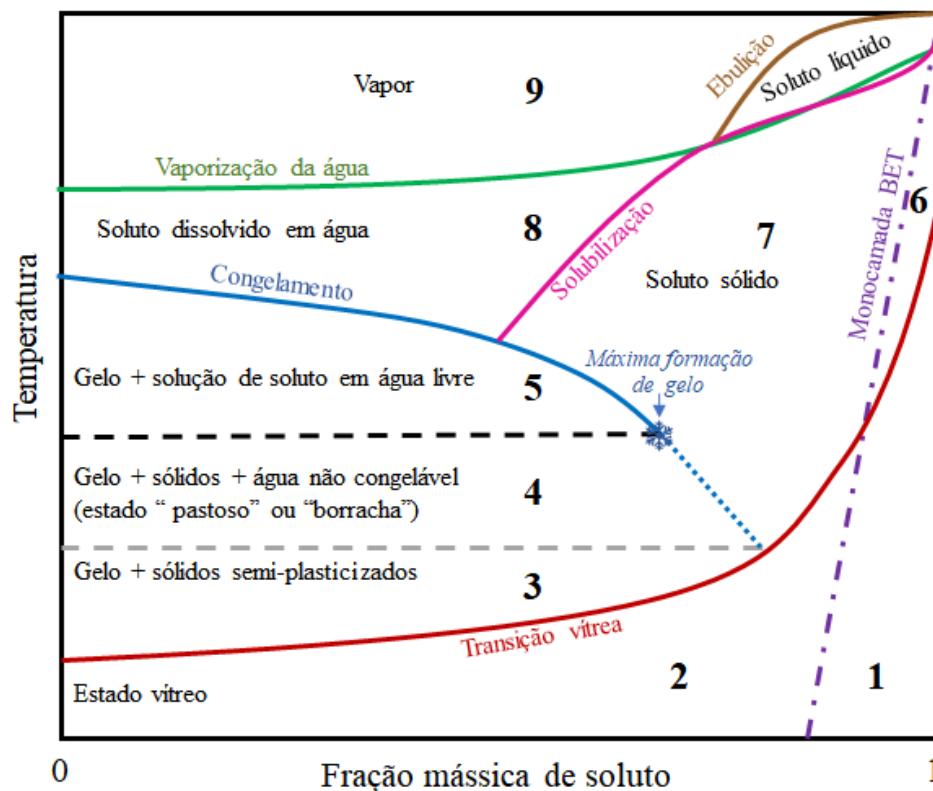
considera a interação entre os sólidos do material e descreve a sua higroscopicidade; porém, a comparação com a literatura é facilitada com o uso de um modelo amplamente utilizado.

5.1.2 Diagramas de estado

Diagramas de estado são uma forma gráfica de descrever o comportamento de um sistema em relação à temperatura e composição. Ao contrário dos diagramas de fase, este tipo de diagrama não considera um sistema em equilíbrio, mas em metaestabilidade, como proposto por McKenzie (1977). Este conhecimento é útil para planejar as condições de armazenamento de um produto, e também para sugerir condições de processamento, como extrusão, cozimento e assamento.

Para construir diagramas de estado, utilizam-se principalmente técnicas calorimétricas e reológicas, de forma a definir o estado do material a ser estudado. O diagrama costuma ter uma disposição similar à da Figura 5.1, embora não necessariamente com todas as zonas representadas (RAHMAN, 2010). Ocasionalmente, incluem-se fenômenos específicos ao sistema representado (*e.g.* reação, solubilização, gelatinização, vaporização, aglomeração).

Figura 5.1. Exemplo de disposição de um diagrama de estado. As zonas são numeradas da mais estável à menos estável.



Fonte: Adaptado de Rahman (2010)

Na Figura 5.1, as zonas são numeradas da mais estável, com menor mobilidade molecular, à mais instável. Na zona 1, toda a água livre está congelada, o sistema está em estado vítreo, e abaixo da umidade de monocamada. Na zona 2, há mais água no sistema, mas, como este está em estado vítreo, continua sendo estável. Nas zonas 3 e 4, com uma temperatura maior que a da zona 2, a água livre está congelada, mas os sólidos não estão imobilizados; eles encontram-se em um estado referido como “*rubbery*” na literatura, que, em tradução livre, seria “pastoso” ou “borrachudo”. Na zona 5, há gelo formado, mas o sistema possui água ainda por congelar. A zona 6 tem alta estabilidade por estar abaixo da umidade de monocamada. A diferença de estabilidade entre as zonas 7 e 8 é que a zona 7, apesar de estar em temperatura acima do congelamento, tem água insuficiente para dissolver os sólidos, enquanto a zona 8 tem mobilidade molecular mais alta, favorecendo por exemplo reações e a ação de micro-organismos. Na zona 9, a temperatura é suficiente para a vaporização da água e o estado do sistema é instável. Rahman (2010) propõe diversas outras micro-regiões que podem ser incluídas neste diagrama, incluindo a possibilidade de diversas transições vítreas, colapso e cristalização: em suma, o diagrama proposto é adaptável, de forma a poder ser usado em sistemas de composições variáveis como os alimentos.

Para a descrição de yacón, Shi, Zheng e Zhao (2015) desenvolveram um diagrama de estado apenas com as curvas de congelamento e transição vítrea.

5.1.3 Propriedades termofísicas

Nesta Seção estão reunidas as equações utilizadas para cálculo da condutividade térmica, da densidade, do calor específico e da difusividade térmica do yacón.

5.1.3.1 Condutividade térmica

Para resolver problemas envolvendo transferência de calor em processamento de alimentos, é importante definir algumas propriedades termofísicas. A condutividade térmica é definida pela Lei de Fourier para transporte de calor por condução (RAHMAN, 2009):

$$\dot{Q} = -KA \frac{\partial T}{\partial x} \quad (5.6)$$

Em que \dot{Q} é o fluxo de calor (J s^{-1}), A é a área (m^2), $\partial T / \partial x$ é o gradiente de temperatura na direção x , e K é a condutividade térmica ($\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$).

Rahman (1991) propôs a seguinte equação como alternativa ao método desenvolvido por Mattea, Urbicain e Rotstein (1986) para prever a condutividade térmica em função da umidade e da porosidade.

$$\left(\frac{K_s}{K_0}\right)\left(\frac{1}{1-\varepsilon}\right) = \left[1,82 - 1,66 \exp\left(-0,85 \frac{X_w}{X_{w0}}\right)\right] \quad (5.7)$$

Sendo K a condutividade ($\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$), ε a porosidade, e X_w a fração mássica de água em base seca, o subscrito 0 indica a variável no início do processo, e o subscrito s indica o material seco.

5.1.3.2 Difusividade térmica

A difusividade térmica pode ser entendida como a rapidez com a qual o calor se difunde no material (RAHMAN, 2009), e é definida como:

$$\alpha = \frac{K}{\rho c_p} \quad (5.8)$$

Em que α é a difusividade térmica (m^2/s), K a condutividade térmica ($\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$), ρ a densidade (kg m^{-3}) e c_p o calor específico ($\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$) a pressão constante.

Se o calor específico for medido em unidades de volume, não é necessário ter a densidade do material, conforme demonstrado:

$$[c_{p,v}] = \text{J/m}^3\text{K}; [c_p] = \text{J/kgK} \quad (5.9)$$

$$c_p = \frac{c_{p,v}}{\rho} \quad (5.10)$$

$$\alpha = \frac{k}{\rho c_p} = \frac{k}{\rho \frac{c_{p,v}}{\rho}} = \frac{k}{c_{p,v}} \quad (5.11)$$

Segundo Singh (1982), a difusividade térmica de um alimento é fortemente dependente do seu conteúdo de água, além da porosidade e composição. Para predizer esse parâmetro, os modelos mais comuns na literatura são os empíricos.

5.1.3.3 Calor específico

O calor específico de um material é definido como a quantidade de calor (J) necessário para aumentar em 1 K a temperatura de 1 kg de material (RAHMAN, 2009). Por ter um calor específico alto, a água é o componente que mais influencia o calor específico de um alimento (DATTA, 2008), de forma que em alguns casos é possível prever esse valor como função linear do conteúdo de água, se este for acima de 0,6. Diversas relações foram propostas para conteúdos de água diferentes, como a proposta por Choi e Okos (1986), considerando o alimento uma mistura de n componentes:

$$c_p = \sum_{i=1}^n c_{pi} X_i \quad (5.12)$$

Sendo c_p o calor específico em $\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$, c_{pi} o calor específico do componente i , e X_i a fração mássica do i -ésimo componente. Essa relação é interessante considerando que a fração mássica de água do yacón é maior que 0,85, e a fração de sólidos é constituída em grande parte por carboidratos, para os quais é possível estimar o seu calor específico.

5.1.3.4 Densidade

A densidade varia não-linearmente com a umidade de um alimento (RAHMAN, 2009), e pode ser prevista como a soma da massa dos seus componentes, dividida pelos seus volumes reais. Como é difícil estimar o volume real de um componente em um alimento, são utilizados ajustes polinomiais em relação à fração mássica de água. É possível comparar esse parâmetro a modelos desenvolvidos para alimentos com composição semelhante, como o proposto por Choi e Okos (1986) em função da fração mássica de todos os componentes:

$$\frac{1}{\rho} = \sum_{j=1}^n \frac{X_j}{\rho_j} \quad (5.13)$$

Em que ρ é a densidade em kg m^{-3} e X_j é a fração mássica do componente em questão. As densidades reais de cada componente são tabeladas, mas este modelo não considera ar ou interações entre os componentes. Para considerar o ar, em produtos porosos, a densidade é descrita como:

$$\frac{1-\varepsilon}{\rho} = \sum_{j=1}^n \frac{X_j}{\rho_j} \quad (5.14)$$

Sendo ε a porosidade (-).

Perussello *et al.* (2015) mediram as propriedades termofísicas do yacón após desidratação osmótica e secagem convectiva, em função do conteúdo de água; e propuseram modelos empíricos para prever estas propriedades. Embora não tenham usado os mesmos métodos que os deste trabalho, os resultados destes autores (Tabela 5.1) podem ser interessantes para comparação.

Tabela 5.1. Modelos empíricos sugeridos na literatura para as propriedades termofísicas do yacón.

Propriedade	Equação	R ²
Massa específica (kg m ⁻³)	$\rho(X_w) = 1525,18 - 466,07 \left(1 - \exp\left(\frac{X_w}{0,9325}\right) \right)$	0,9896
Calor específico (J kg ⁻¹ K ⁻¹)	$C_p(X_w) = 433 \ln(X_w) + 2959$	0,9660
Condutividade térmica (W m ⁻¹ K ⁻¹)	$K(X_w) = 0,25 + 0,2594 \left(1 - \exp\left(-\frac{X_w}{1,0034}\right) \right)$	0,9883
Difusividade térmica (m ² s ⁻¹)	$\alpha(X_w) = -10^{-7} + 2,8 \cdot 10^{-8} (1 - \exp(-X_w))$	0,9023

Com X_w =conteúdo de água em base seca. Fonte: Perusello *et al.* (2015)

5.2 Materiais e métodos

Nesta Seção, são explicitados os métodos utilizados para caracterizar e descrever as raízes de yacón. Estes métodos, dependendo da propriedade estudada, foram realizados antes, durante ou após a secagem:

- Determinação de sólidos solúveis: realizada apenas nas raízes frescas;
- Medição de volume: realizada antes, durante e após a secagem;
- Propriedades termofísicas (calor específico, condutividade térmica e difusividade térmica): medidas antes, durante e após a secagem;
- Sorção de vapor: iniciada com raízes frescas;
- Calorimetria exploratória diferencial: realizada com raízes secas;
- Conteúdo de frutanos: medido antes e após secagem.

5.2.1 Sólidos solúveis

Quatro raízes foram selecionadas e cortadas transversalmente a cerca de 3 cm de uma das pontas. Com uma espátula metálica, raspou-se o centro da raiz, de forma a gerar um purê *in loco*. Uma gota deste purê foi colocada na cavidade do refratômetro digital (ATR-BR, Schmidt-Haensch, Alemanha); quando estabilizou a temperatura em $20 \pm 0,5$ °C, a medida dos sólidos solúveis foi realizada. Depois, a raiz foi cortada em outro ponto a 2 cm do corte original, e raspada novamente. O processo foi repetido até que, para cada raiz, quatro medições fossem realizadas.

De forma similar à determinação dos sólidos solúveis das raízes utilizadas nos testes em escala piloto, para as utilizadas nos testes em escala laboratorial, três raízes foram selecionadas, e o procedimento foi repetido usando um refratômetro portátil (PAL-1, Atago, Japão). A medida foi realizada em sala condicionada a 20 ± 2 °C.

5.2.2 Volume real e aparente

Para determinação do volume, 15 fatias de yacón foram preparadas de acordo com o procedimento descrito anteriormente para secagem (Capítulo 2), cortadas em quatro partes, e secas na secadora, a 50 ° C e umidade relativa de 20 %. No início do processo e a cada hora, duas porções de cerca de 2 g de yacón foram removidas aleatoriamente da bandeja da secadora, pesadas, medidos o seu volume real e o volume aparente.

Mediu-se o volume real das amostras usando um picnômetro a gás Accupyc II (Micromeritics, EUA), com uma câmara de 10 cm³, gás hélio, e cinco repetições. O volume aparente foi medido pelo método de deslocamento de volume descrito por Rahman (2009), usando um picnômetro de alumínio de cerca de 25 cm³ preenchido com tolueno. Após as determinações de volume, mediu-se o conteúdo de água de cada amostra de acordo com a seção 2.2.1.

5.2.3 Calor específico, condutividade térmica e difusividade térmica

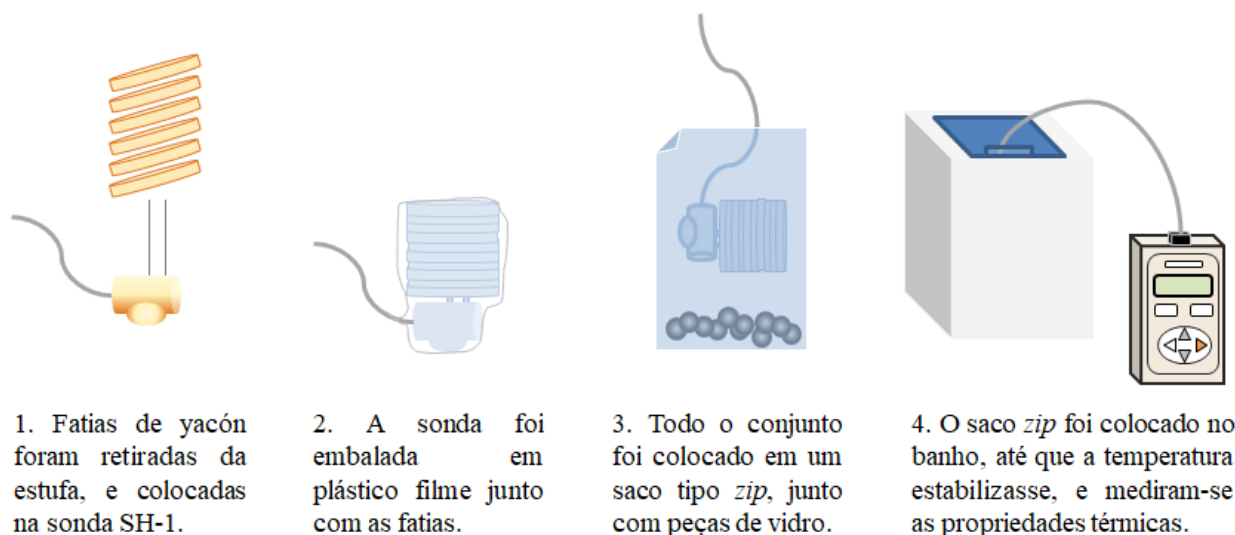
Foi utilizado um medidor portátil de propriedades termofísicas (KD2-PRO, Decagon, EUA) equipado com o sensor de agulha dupla SH-1, para medir a condutividade térmica e o calor específico do yacón.

Prepararam-se as fatias de yacón com 3,5 mm de altura e 4 cm de diâmetro, as quais foram imersas no banho de ácido cítrico descrito na seção 2.2.2 (branqueamento e secagem de fatias de yacón). Depois do preparo, colocaram-se as fatias em uma bandeja de metal perfurado, a qual foi colocada em uma estufa de circulação forçada (Nova Ética N480, Brasil). A cada hora, por seis horas, retiraram-se cinco a vinte fatias da estufa; o suficiente para uma sobre a outra, cobrirem a sonda SH-1 do KD2-PRO (~3,5 cm). As fatias foram empilhadas perfuradas pela sonda, e envolveu-se esse conjunto em filme plástico.

Para medir as propriedades térmicas do yacón na temperatura de secagem, a temperatura foi estabilizada usando um banho de água. O conjunto fatias + filme plástico + sonda foi imerso em um banho termostático (modelo EcoGold, Lauda, Alemanha), dentro de um saco plástico tipo *zip* (Wyda, Brasil), e para mantê-lo totalmente imerso, 8 peças de vidro (3 x 3 x 4) cm cada, foram inseridas no conjunto, como pode ser observado na Fig. 5.2.

Aguardou-se a estabilização da temperatura e realizaram-se no mínimo quatro medidas das propriedades térmicas. O KD2-PRO com o sensor SH-1 mede a temperatura T ($^{\circ}\text{C}$), o calor específico por unidade de volume c ($\text{MJ m}^{-3}\text{K}^{-1}$), e a condutividade térmica k ($\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$).

Figura 5.2. Procedimento para medição das propriedades térmicas.



Fonte: Autor.

5.2.4 Sorção de vapor

Obtiveram-se isotermas de sorção com a finalidade de determinar a umidade de equilíbrio das amostras, necessário na modelagem da secagem, e para delimitar a umidade da monocamada no diagrama de estado. Antes dos testes, realizou-se a verificação da calibração, efetuando-se medidas de atividade de água com padrões certificados (Decagon Devices, Pullman, EUA): uma solução saturada de cloreto de lítio ($a_w = 0,250$) e uma solução saturada de cloreto de sódio ($a_w = 0,760$). As isotermas de sorção foram obtidas utilizando-se um analisador de sorção de vapor (VSA) modelo 1055 (Decagon Devices, Pullman, EUA).

As temperaturas testadas foram inicialmente as aplicadas na secagem em escala piloto (50°C ou 60°C), na faixa de $a_w = 0,1$ a $a_w = 0,9$, pelo método estático (DVS) e dinâmico (DDI), com passo de 0,1. Depois, obtiveram-se isotermas no método DVS a 35°C , para comparação com a etapa descrita no parágrafo seguinte. O critério de equilíbrio foi 0,01 % de variação de massa por minuto. As isotermas foram obtidas em duplicata.

Na etapa de secagem em escala laboratorial (realizada na AgroParistech, França), as isotermas de sorção foram obtidas em equipamento diferente do descrito anteriormente (Intrinsic, Surface Measurement Systems, Reino Unido), capaz apenas de realizar o método

DVS. Devido a limitações da balança deste equipamento, não foi possível obter as isotermas às mesmas temperaturas da etapa em escala piloto; foi então selecionada a temperatura de 35°C, a mais alta possível. Equilibraram-se as amostras a $a_w = 0,9$, e a atividade de água foi reduzida em passos de 0,1 até $a_w = 0,0$ (sob atmosfera de nitrogênio). O critério de equilíbrio padrão deste equipamento é de 0,002 % de variação de massa por minuto, durante 15 min. Este teste foi realizado em triplicata e os dados foram descritos usando o modelo GAB.

5.2.5 Análise térmica

Para construção de um diagrama de estado, yacón seco foi condicionado em diferentes teores de umidade e testado utilizando-se calorimetria exploratória diferencial (DSC).

Amostras de quatro a cinco fatias yacón seco, obtidas nas quatro condições descritas no Capítulo 3, seção 2.3.1 (descrição da cinética de secagem em escala piloto) foram moídas, separadamente em um moinho de bola (modelo KM1, MLW, Alemanha), em potência máxima, por 10 min. As amostras secas a 60 °C, 20 % UR e moídas foram utilizadas neste experimento. Com dados do teste de umidade (seção 2.2.4- determinação de umidade), a quantidade de água e sólidos da amostra foi calculada. Para os testes no DSC, sólidos e água foram misturados diretamente nos cadinhos herméticos de alumínio (Tzero, TA Instruments EUA) e pesados em uma balança analítica (Mettler Toledo, XSR225 DualRange). A quantidade de sólidos e água foi ajustada de modo que:

- a) O total de sólidos e amostra, somados, chegasse o mais próximo possível a 10 mg;
- b) O teor de água foi calculado levando em conta a água já existente nos sólidos e a água adicionada;
- c) O conteúdo de água em base úmida chegasse o mais próximo possível a: 0,9; 0,8; 0,7; 0,6; 0,5; 0,4; 0,3; 0,2 e 0,1 g/g, de acordo com a Equação 2.3-cálculo de umidade. Cada teste foi realizado em duplicata, exceto para as umidades superiores a 0,6 g/g. Nestas condições, as curvas têm características similares à da água pura e picos fortes de congelamento, impedindo a visualização de transições vítreas, que são o fenômeno que se deseja observar.

O teste foi realizado em um DSC Q2000, acoplado a um sistema refrigerador RCS90 (TA Instruments, EUA), seguindo as etapas:

1. Estabilização a 20 °C por 10 min;
2. Resfriamento até -30 °C, a 10 °C/min;
3. Estabilização a -30 °C por 30 min;

4. Resfriamento até $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$, a $10\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$;
5. Estabilização por 10 min;
6. Aquecimento até $90\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $10\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$.

Após os testes, cada cadinho foi perfurado e a umidade foi determinada em estufa a $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ sob vácuo (de acordo com o procedimento descrito na Seção 2.2.4), para o cálculo da umidade real, calculada de acordo com a Equação 2.3. Cada teste foi considerado então como um ponto no eixo *X*, e os termogramas obtidos com o calorímetro foram utilizados para construir um diagrama de estado, contendo os pontos de fusão e transição vítrea, complementados com os dados de umidade de monocamada provenientes das isotermas de sorção.

5.2.6 Conteúdo de frutanos

Mediu-se o conteúdo de fruto-oligossacarídeos (FOS) e inulina utilizando-se um kit comercial para testagem de frutanos (K-FRUC, Megazyme, Irlanda). O método segue as normas: AACC-Método 32-32.01, AOAC-Método 999.03, e CODEX-Método Tipo III e consiste nos seguintes passos:

- a) Moagem da amostra, dissolução de 100 mg em 25 mL de água, fervura por 30 min, e centrifugação a 13000 rpm por 5 min;
- b) Digestão da sacarose e do amido contidos na amostra, utilizando-se sacarase, amilase e maltase em tampão (pH 6,5), a $30\text{ }^{\circ}\text{C}$, por 30 min;
- c) Redução da D-frutose e da D-glicose resultantes da digestão da sacarose e do amido, utilizando-se solução alcalina de borohidreto de sódio a $40\text{ }^{\circ}\text{C}$, por 30 min;
- d) Hidrólise dos frutanos nativos e inulina restantes, utilizando-se frutanase em tampão (pH 4,5) a $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ por 30 min;
- e) Formação de complexo colorido com a frutose e a glicose resultantes da digestão dos frutanos e inulina, utilizando-se hidrazida do ácido para-hidroxibenzoico (PAHBAH), em banho fervente por 6 min;
- f) Medição da absorbância a 410 nm em espectrofotômetro.

Determinou-se o conteúdo de frutanos de cada uma das amostras produzidas nos experimentos em escala piloto ($60\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $50\text{ }^{\circ}\text{C}$; 20 % UR e 30 % UR), em triplicata. As amostras

foram armazenadas em dessecador a vácuo até o teste. A descrição completa do método encontra-se no material do fabricante (MEGAZYME, 2020).

Para comparação, uma amostra do mesmo lote de yacón foi congelada a $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ e liofilizada por 24 h.

5.3 Modelagem

5.3.1 Isotermas de sorção

Para descrição de todas as isotermas, foi ajustado o modelo GAB (ANDERSON, 1946; DE BOER, 1953; GUGGENHEIM, 1966; BASU; SHIVHARE; MUJUMDAR, 2006):

$$\frac{X_w}{X_{w,mono}} = \frac{KCa_w}{(1 - Ka_w)[1 - Ka_w + CKa_w]} \quad (5.15)$$

No qual a_w é a atividade de água (adimensional), X_w é a fração de água (g/g amostra seca), $X_{w,mono}$ é a fração de água correspondente à monocamada (g/g amostra seca), e K e C são constantes adimensionais.

Para ajustar o modelo, utilizou-se a ferramenta Solver do Excel (Microsoft, EUA), de modo a minimizar a soma dos quadrados dos erros:

$$SEQ = \sum (X_{w,real} - X_{w,calc})^2 \quad (5.16)$$

Em que SEQ é a soma dos quadrados dos erros (-), $X_{w,real}$ (g/g) é o valor medido para X_w , e $X_{w,calc}$ (g/g) é o valor calculado pelo modelo.

5.3.2 Modelagem usada no diagrama de estado

Para modelar a curva de congelamento, utilizou-se o modelo de Chen *et al.*(1990), proposto para frutas e vegetais:

$$\Delta T = 10X_s + 50X_s^3 \quad (5.17)$$

Em que ΔT é a diferença entre o ponto de fusão da água pura, e a temperatura de início de congelamento da mistura; e X_s é a fração inicial de sólidos em base úmida.

Para descrever a transição vítrea, utilizou-se o modelo de Gordon e Taylor (1953), que considera uma mistura de sólidos e água, expresso como:

$$T_{gm} = \frac{X_s T_{gs} + k' X_w T_{gw}}{X_s + k' X_w} \quad (5.18)$$

T_{gm} é a temperatura de transição vítrea da mistura (°C); X_s e X_w são, respectivamente, a fração mássica de sólidos e de água (g/g de amostra, b.u.); T_{gs} e T_{gw} são, respectivamente, as temperaturas de transição vítrea dos sólidos puros e da água pura, considerada como $-137,15$ °C (VELIKOV, BORICK, ANGELL, 2001) (°C); k' é o parâmetro de Gordon-Taylor (-).

5.4 Resultados e discussão

5.4.1 Sólidos solúveis

Na Tabela 5.2 a seguir são mostrados os teores de sólidos solúveis medidos nas raízes de yacón nas duas etapas.

Tabela 5.2. Teor de sólidos solúveis medidos nas raízes utilizadas na etapa piloto (Brasil) e na etapa laboratorial (França).

Raiz	Conteúdo de sólidos solúveis (°Brix)*
<i>Etapa piloto</i>	
Raiz 1	9,58 ± 1,03 ^a
Raiz 2	8,14 ± 0,35 ^b
Raiz 3	7,99 ± 0,34 ^b
Raiz 4	9,20 ± 0,45 ^a
<i>Etapa laboratorial</i>	
Raiz 1	12,46 ± 0,47 ^c
Raiz 2	11,35 ± 1,17 ^d
Raiz 3	12,92 ± 0,85 ^c

*Mesma letra indica que não há diferença estatisticamente significativa em ANOVA *one-way* ($p > 0,05$).

Na literatura, o teor de sólidos solúveis para yacón foi reportado entre 9,3 e 17,6° Brix (GRAEFE *et al.*, 2004; SCHER *et al.*, 2009; PERUSSELLO *et al.*, 2014). Essa variação pode ser causada por diferenças na estação da colheita, do solo, e da variedade utilizada.

Os teores de sólidos solúveis observados nas raízes utilizadas na escala laboratorial são similares aos observados na literatura (GRAEFE *et al.*, 2004; SCHER, RIOS & NOREÑA, 2009; PERUSSELLO *et al.*, 2014), maiores que os observados na escala piloto, e apresentam diferenças entre raízes do mesmo lote. A diferença de variedade e de local de plantio pode ser responsável por essas diferenças.

5.4.2 Conteúdo de frutanos

A Tabela 5.3 a contém o conteúdo de fruto-oligossacarídeos (FOS) e inulina das amostras testadas:

Tabela 5.3. Conteúdo total de frutanos (FOS e inulina) do yacón seco sob diversas condições.

Condição de secagem da amostra	Conteúdo de frutanos* (g/100 g b.s.)
60 °C, 20 % UR	29,61 ± 1,35 ^a
60 °C, 30 % UR	40,74 ± 0,70 ^b
50 °C, 20 % UR	36,33 ± 0,89 ^c
50 °C, 30 % UR	31,20 ± 2,43 ^a
Liofilizada	28,15 ± 1,82 ^a

*Mesma letra indica que não há diferença significativa ($p > 0.05$ em um teste de Tukey *post-hoc*).

Observa-se que a amostra com menor conteúdo de frutanos é a liofilizada, embora não haja diferença significativa em relação a outros dois tratamentos. Este é um resultado inesperado: como a liofilização é um processo sem aquecimento, esperava-se utilizar a amostra assim processada como parâmetro de conteúdo máximo possível. As seguintes hipóteses poderiam explicar esta diferença:

- a) Variação natural do conteúdo inicial de frutanos entre as raízes, mesmo com a precaução de se utilizar mais de uma raiz por teste.
- b) Lixiviação: Apesar de a amostra entrar congelada na câmara de liofilização, esta não tem resfriamento. Portanto, antes de ser atingida a pressão necessária à sublimação da água, poderia ser formada água líquida, que carregaria compostos solúveis como os frutanos.

Observa-se também que o yacón seco a 60 °C com 30 % de umidade relativa apresenta o maior conteúdo de frutanos. Scher, Rios e Noreña (2009) também observaram um maior conteúdo de frutanos em amostras secas a 60 °C em relação às secas a 50 °C, mas não mencionaram umidade relativa para comparação. Possivelmente, a amostra seca a 60 °C, 30 % UR, ao ficar mais tempo na secadora do que a amostra seca a 60 °C, 20 % UR, teve a maior inativação das frutanasas, para as quais há evidência de degradação a 60 °C (MARTEL *et al.*, 2010). Outra hipótese seria a inativação das frutanasas pelo próprio branqueamento, por exposição ao ácido cítrico, em vez de devido à temperatura, como reportado por Lago e Noreña (2014).

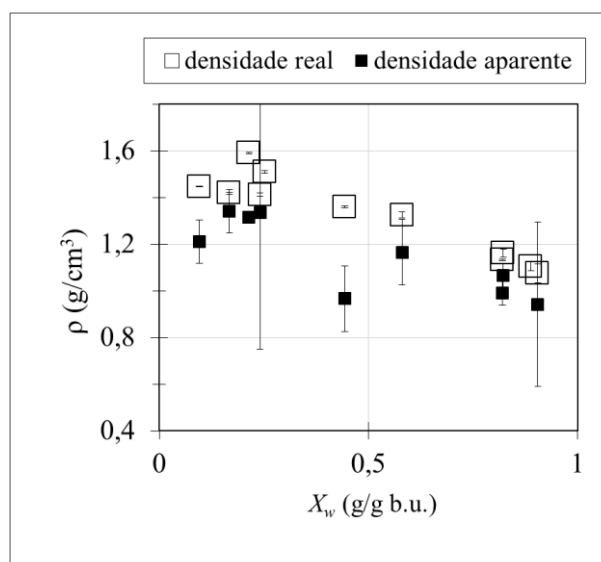
Como comparação, Gabriel A. A. da Silva, aluno de iniciação científica do laboratório de Engenharia de Alimentos da Escola Politécnica da USP, mediu o conteúdo de frutanos de yacón fresco, em um estudo ainda não publicado, com colaboração direta da autora desta tese. O yacón foi comprado em março de 2023 na Ceagesp-SP. O conteúdo de frutanos medido foi de 41,7±4,9 g/100g (b.s.). Embora sejam de um lote diferente do utilizado neste trabalho, as

raízes foram compradas no mesmo local, e tinham as mesmas características de cor e tamanho, sendo provavelmente da mesma variedade.

5.4.3 Propriedades termofísicas

Na Figura 5.3 a seguir, a densidade real e aparente obtidas são apresentadas para as amostras durante a secagem. Observa-se que a densidade aparente, em dois dos pontos, tem desvio maior do que nos outros. Isso pode ser devido a uma falha em remover bolhas presentes no picnômetro. Como esperado, a densidade real medida é consistentemente maior do que a aparente, por não considerar o ar; e aumenta conforme a remoção de água.

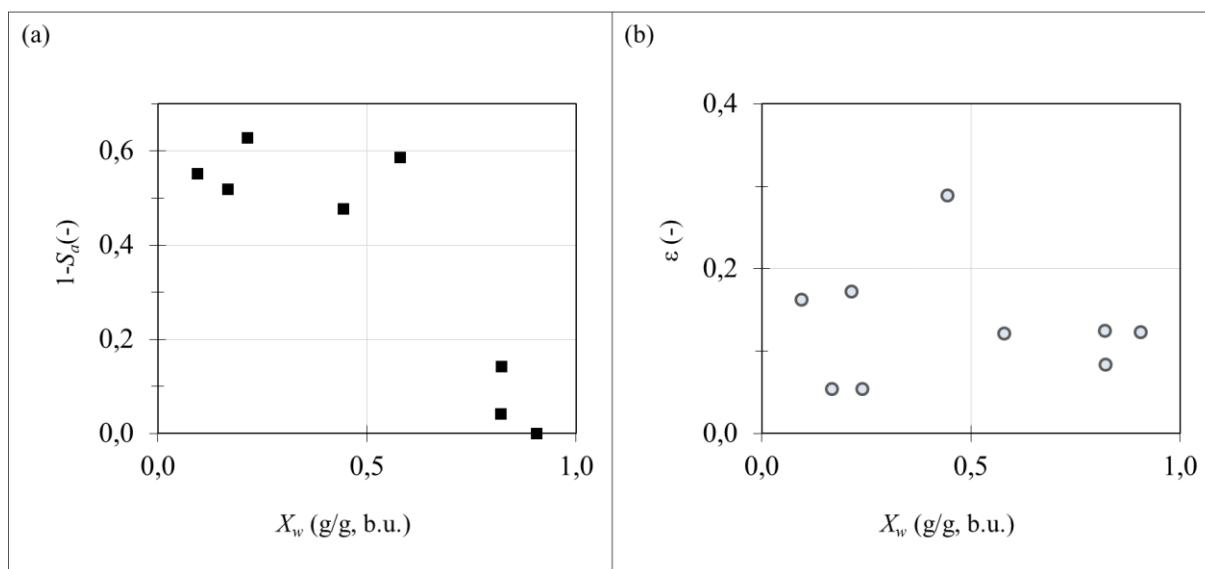
Figura 5.3. Densidade real e aparente.



Fonte: Autor

Removendo-se os dois pontos com o desvio maior, por conta das bolhas, é possível calcular a porosidade e o encolhimento aparente das amostras:

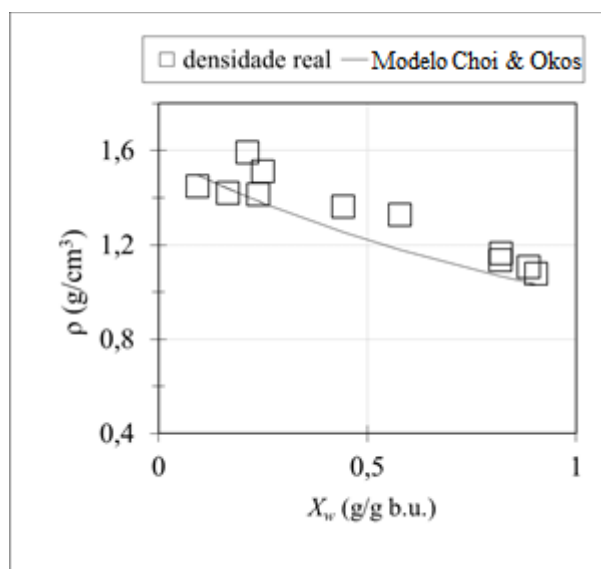
Figura 5.4. Fração de perda de volume (a) e porosidade aparente (b)



Fonte: Autor

O modelo de Choi e Okos (1986), preditivo, subestimou a densidade real das amostras:

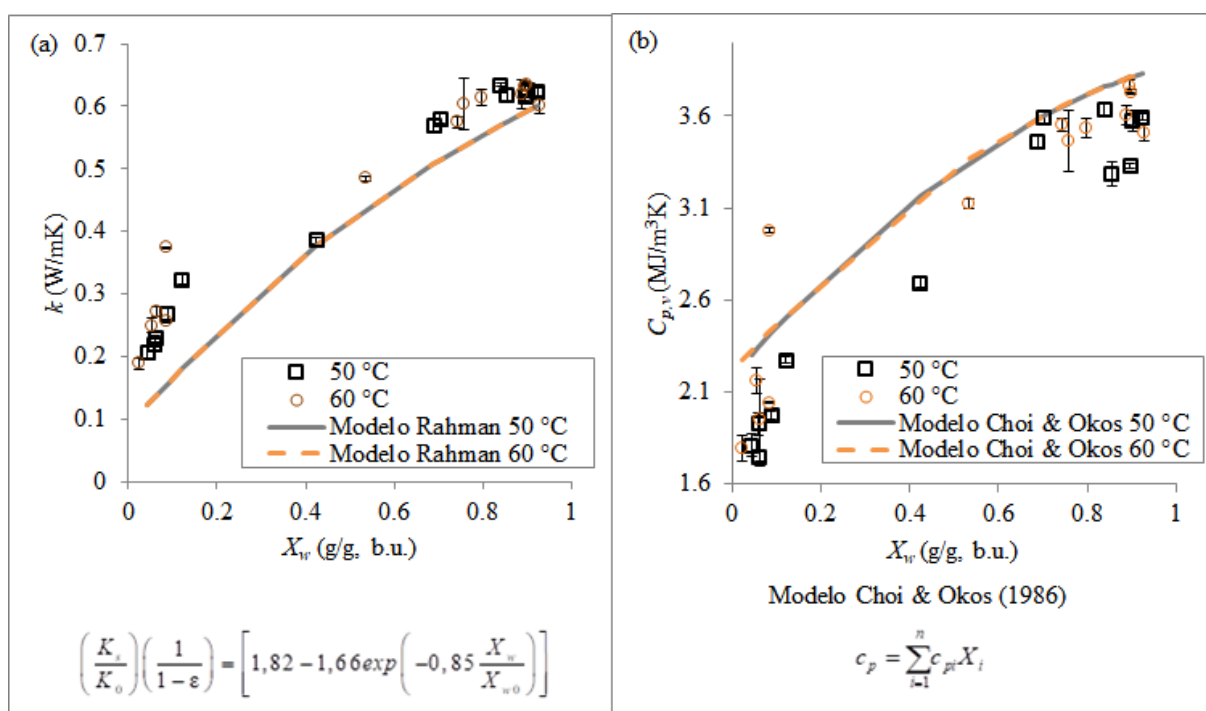
Figura 5.5. Densidade real das fatias de yacón, em comparação ao modelo de Choi e Okos (1986)



Fonte: Autor

As propriedades termofísicas medidas são mostradas na Figura 5.6. Para descrever os valores experimentais de calor específico e condutividade térmica, ajustaram-se os modelos de Choi e Okos (1986) e Rahman (1991):

.Figura 5.6. Dados experimentais da condutividade térmica (a) e do calor específico* (b), em comparação com os modelos de Rahman (1991) e Choi e Okos (1986).

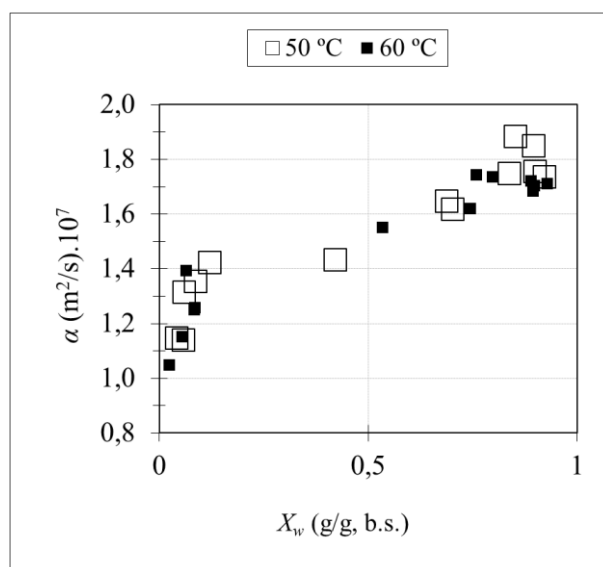


* Os valores de calor específico são dados multiplicados pela densidade, para comparação direta com a leitura do KD2-PRO. Fonte: Autor

Essas propriedades, normalmente, são fortemente influenciadas pela composição do alimento, especialmente do seu conteúdo de água, além da estrutura e das condições de processo. Nesse caso, a composição influenciou mais do que a temperatura. Em umidades altas ($X_w > 0.8$), os valores da condutividade e do calor específico são próximos aos da água. Ao final do processo, a condutividade do material diminuiu até $0,25 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$, valor similar ao de fibras e carboidratos solúveis (CARSON, 2006; RAHMAN, 2009).

Essas propriedades tornam possível calcular a difusividade térmica $\alpha = k / \rho c_p$, mostrada na Figura 5.7:

Figura 5.7. Difusividade térmica do yacón.

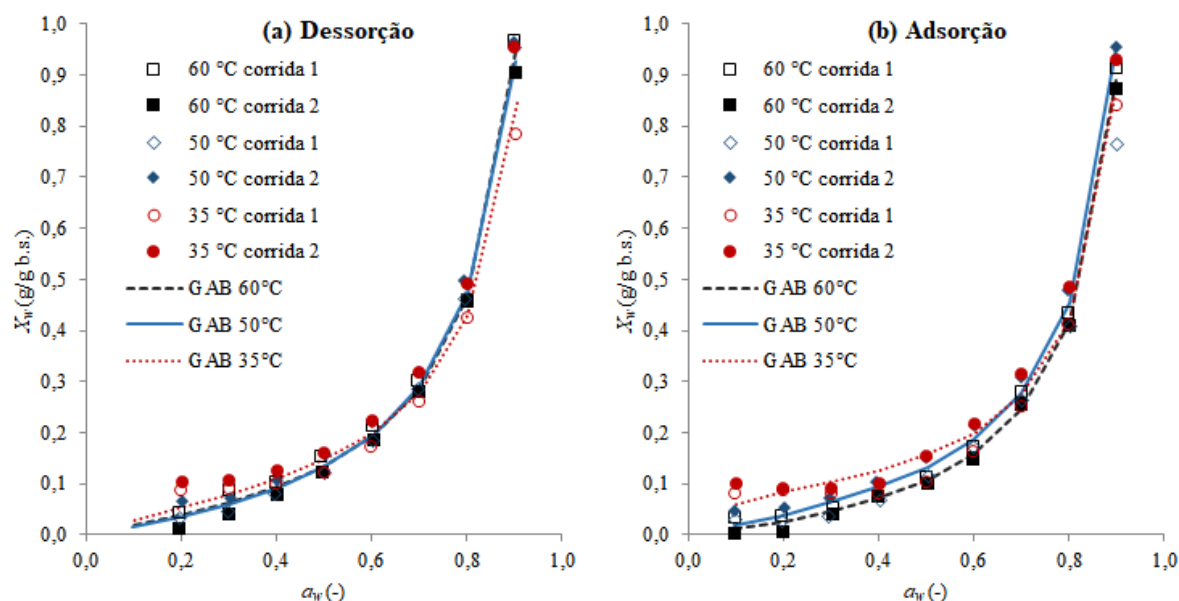


Fonte: Autor

5.4.4 Isotermas de sorção

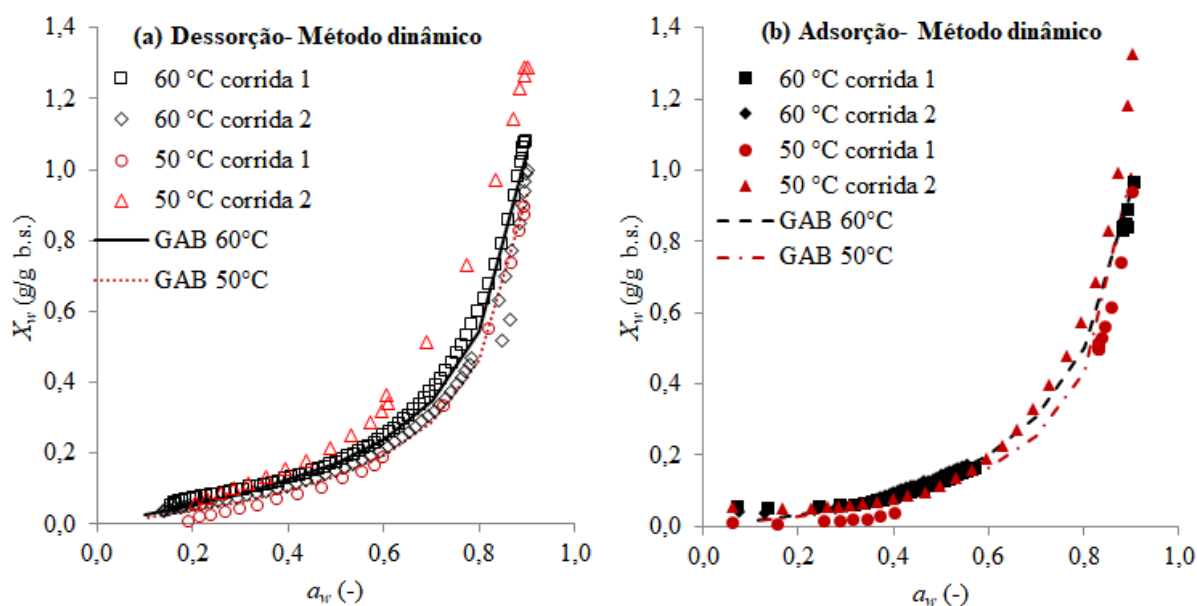
Nas Figuras 5.8 e 5.9 a seguir estão apresentadas as isotermas de sorção de vapor obtidas nas condições testadas, que têm o formato do Tipo III, comum para alimentos com açúcares dissolvidos (RAO; RIZVI; DATTA, 2005). Se observa que o modelo de GAB ajustou-se bem aos dados. Além disso, a diferença entre o teor de sólidos solúveis das amostras, mencionada na seção 5.4.1, não influenciou a reprodutibilidade das isotermas de sorção.

Figura 5.8. Isotermas de sorção de fatias de yacón, obtidas no modo estático (DVS): (a) dessorção e (b) adsorção.



Fonte: Autor

Figura 5.9. Isotermas de sorção obtidas para fatias de yacón, no modo dinâmico (DDI): (a) dessorção e (b) adsorção.



Fonte: Autor

No modo dinâmico (DDI), durante a adsorção, os valores de X_w aumentam bruscamente a partir de $a_w = 0,6$, cuja razão pode ser a própria natureza do teste. Se a vazão de ar úmido na câmara, de 150 mL/min, foi muito alta, é possível que a amostra não tenha tido tempo de atingir o equilíbrio, e a superfície úmida apresenta um valor alto de atividade de água, fato esperado em um teste que simula um processo fora do equilíbrio.

Na Tabela 5.4 a seguir estão os parâmetros do modelo de GAB após o ajuste às isotermas obtidas.

Tabela 5.4. Parâmetros do modelo de GAB, para as isotermas de adsorção (ads.) e dessorção (des.) de yacón

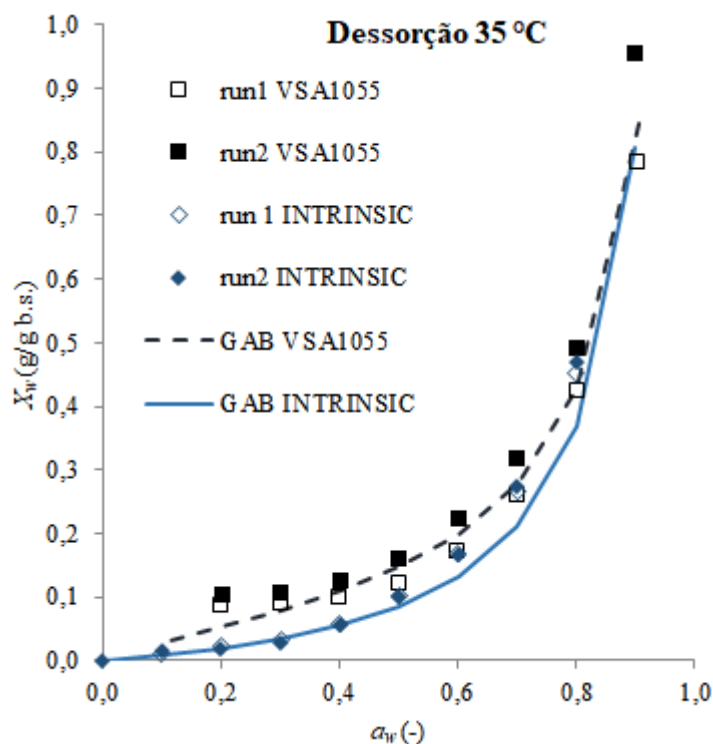
Modo	X_{wmono} (g/g, b.s.)		C		K		R^2	
	ads.	des.	ads.	des.	ads.	des.	ads.	des.
DDI 50 °C	0,10	0,12	1,12	1,46	1,00	0,98	0,999	1,000
DDI 60 °C	0,18	0,13	0,73	2,06	0,94	0,98	0,998	1,000
DVS 50 °C	0,11	0,14	1,73	1,17	1,00	0,97	0,997	0,997
DVS 60 °C	0,12	0,12	0,91	1,45	0,98	0,98	0,999	1,000
DVS 35 °C	0,08	0,10	17,54	2,95	1,00	0,98	0,992	0,986

Os valores obtidos para os parâmetros do modelo de GAB estão próximos aos observados na literatura; exceto C , que geralmente é um valor mais alto, embora não esteja fora do esperado (RAHMAN, 2009).

Observa-se que o parâmetro $X_{w,mono}$, neste ajuste, está dentro do esperado em cada condição individual. Porém, comparando-se entre temperaturas, seria esperado que o estimado para 35 °C fosse maior que o estimado para 50 °C, e ambos seriam maiores que as estimativas para 60 °C. Para uso nos diagramas de estado, foi feito um novo ajuste, desta vez considerando-se os pontos abaixo de $X_w = 0,4$, tanto de adsorção quanto de dessorção, região mais próxima da umidade de monocamada. Os resultados para este parâmetro foram: $X_{w,mono} = 0,036$ a 60 °C, 0,069 a 50 °C e 0,11 a 35 °C.

Ao ajustar o modelo GAB às isotermas de sorção obtidas no DVS Intrinsic (junto com os experimentos em escala laboratorial), os resultados foram: $X_{w,mono} = 0,12$ (g/g, b.s.); $C = 0,50$ e $K = 0,98$, com R^2 de 1,00. Na Figura 5.10 a seguir, as isotermas de sorção obtidas na etapa laboratorial com a variedade de yacón obtida na França (Capítulo 3), em comparação às obtidas para as amostras cultivadas no Brasil (Capítulo 2), são apresentadas.

Figura 5.10. Isotermas de sorção obtidas utilizando as amostras da etapa piloto (no VSA1055) e da etapa laboratorial (no DVS INTRINSIC).



Fonte: Autor

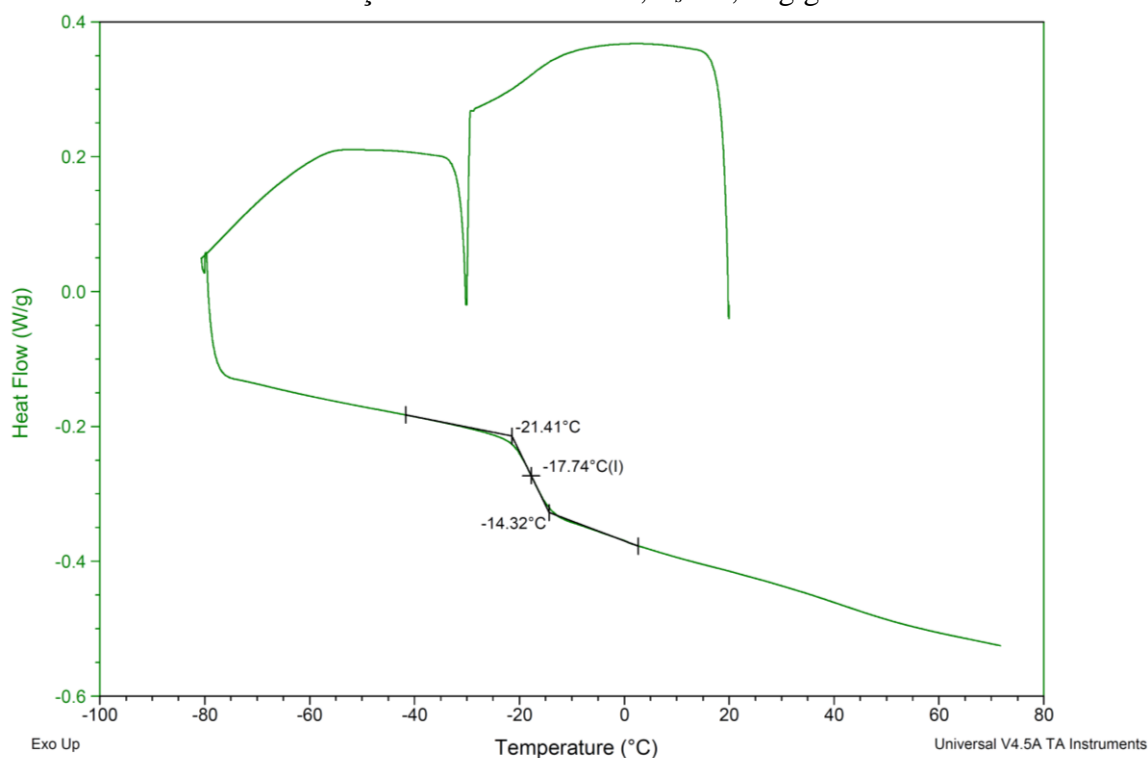
As curvas, embora realizadas à mesma temperatura, foram obtidas em equipamentos diferentes, com tamanhos de amostra diferentes, e com variedades de yacón diferentes. O equipamento utilizado na etapa piloto tem um gatilho de menos de 0,01 % de variação máxima de massa, enquanto o utilizado na etapa laboratorial tem um gatilho de 0,002 %. Isso, junto à variedade diferente, pode justificar o comportamento diferente entre as curvas obtidas.

As isotermas de sorção podem ser influenciadas por uma diferença na quantidade de açúcares em uma amostra. Um aumento nessa quantidade reduz a pressão parcial de vapor de água no sistema (LEWICKI, 2009), o que poderia alterar a atividade de água medida. Porém, conforme exposto na Seção 5.4.1, a diferença no teor de sólidos solúveis não causou esta alteração.

5.4.5 Análise térmica

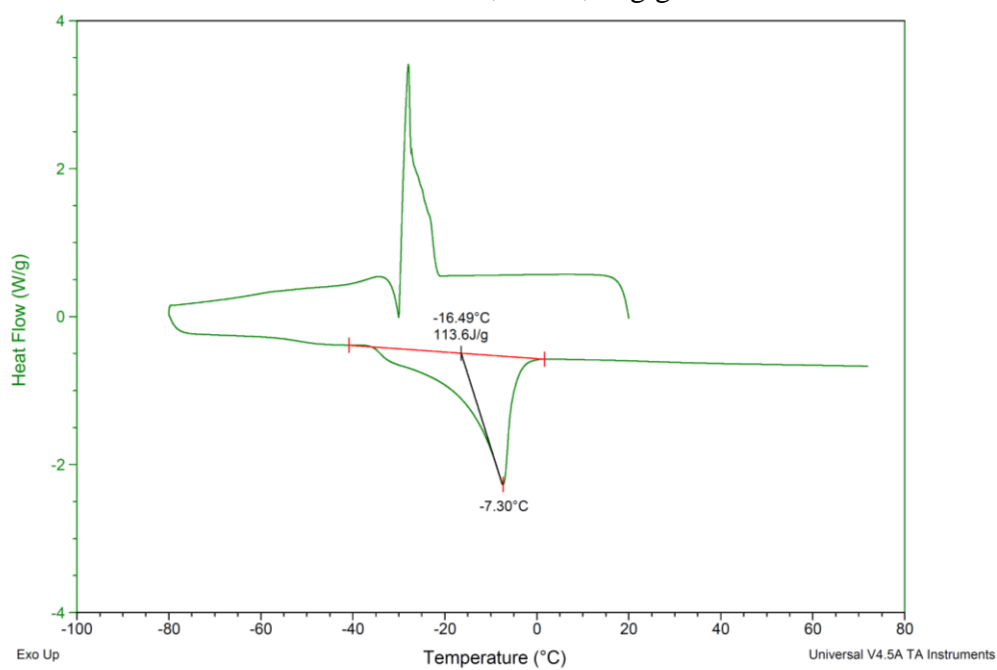
Durante a calorimetria exploratória diferencial, é comum que o conteúdo de água seja um dos principais fatores a influenciar o termograma. Altos conteúdos de água podem impossibilitar a detecção de transições vítreas, visíveis na Figura 5.11, mas não na Figura 5.12.

Figura 5.11. Termograma típico de amostras com baixo teor de água, com destaque para uma transição vítrea. Neste caso, $X_s = 0,94$ g/g b.s.



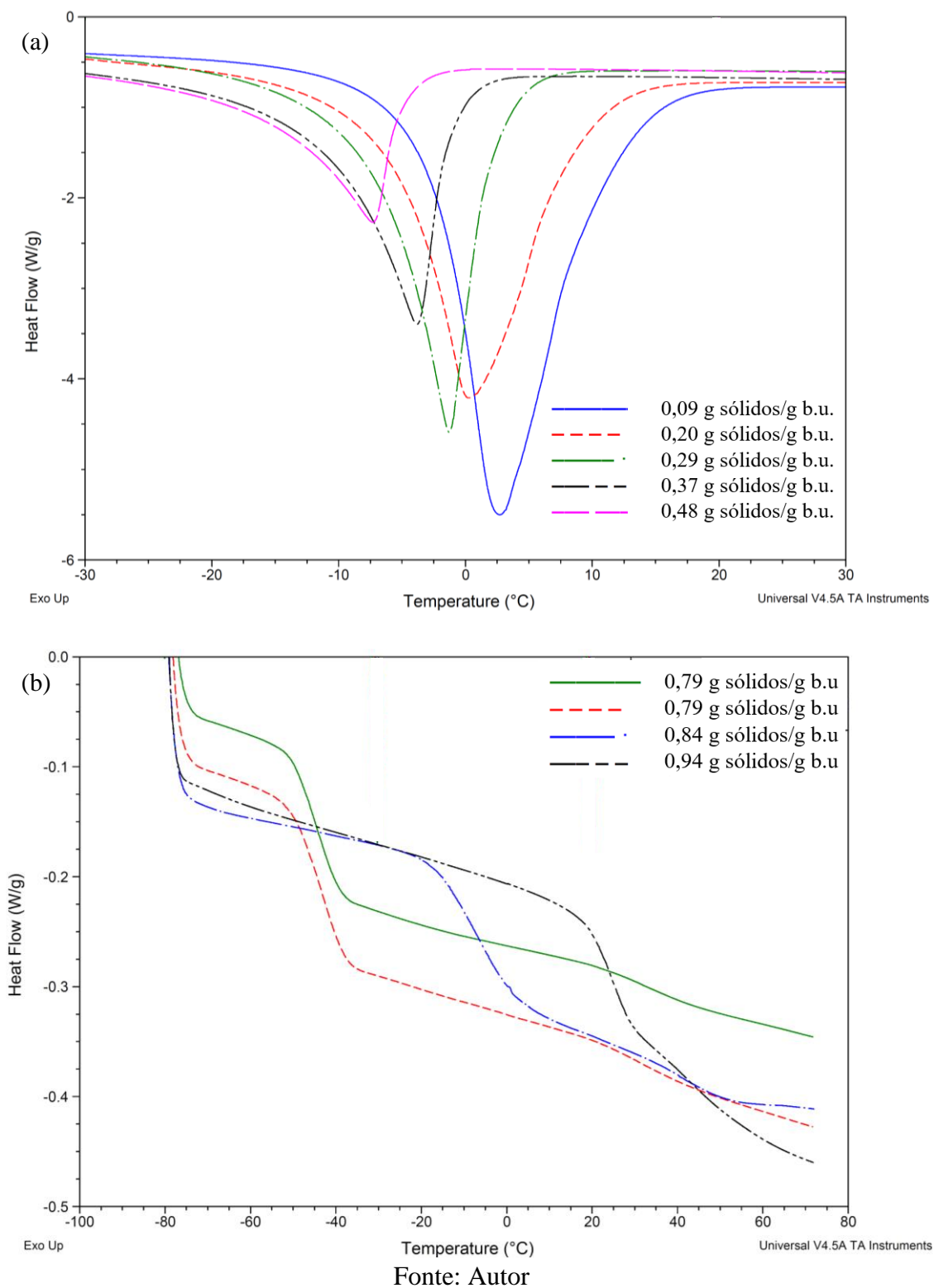
Fonte: Autor

Figura 5.12. Termograma típico de amostras com alto teor de água, com destaque para uma fusão. Neste caso, $X_s = 0,37$ g/g b.s.



Fonte: Autor

Figura 5.13. Termogramas de misturas de yacón seco e água em diversas proporções, mostrando (a) fusões de amostras com alto teor de água e (b) transição vítrea de amostras com baixo teor de água.



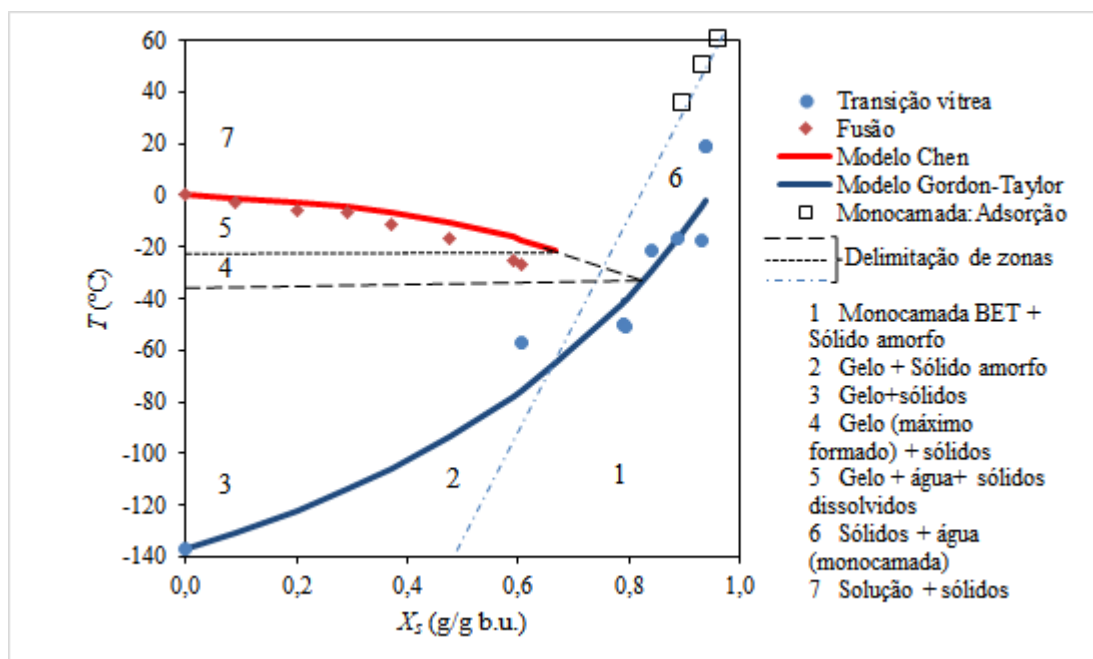
Sobrepondo-se os termogramas, fica evidente o efeito da água sobre a queda da temperatura de transição vítrea (Figura 5.13), e o efeito dos sólidos na fusão da água (5.13a).

Transições vítreas foram observadas de 19,10 °C, em amostras secas, até -57 °C (amostras úmidas). Além deste ponto, a água passa a ser congelável, o que ocasiona o aparecimento de picos de congelamento e impossibilita a leitura da transição vítrea.

5.4.6 Diagrama de estado

Para a construção do diagrama de estado (Figura 5.14), foi considerada da literatura, a temperatura de transição vítrea teórica da água de -137,15 °C (VELIKOV, BORICK, ANGELL, 2001), pois o equipamento disponível não chega à temperatura necessária.

Figura 5.14. Diagrama de estado de yacón .



Fonte: Autor

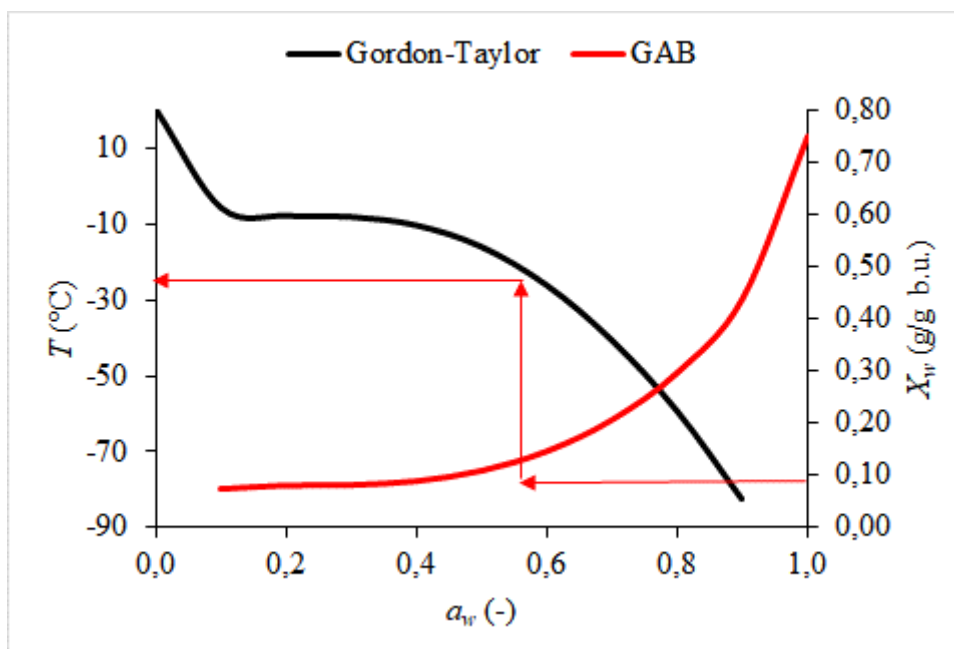
Apesar de apresentar um coeficiente de determinação de 0,99, o modelo de Chen superestima a temperatura de fusão em conteúdos de sólidos mais altos. Como este modelo é preditivo, ele foi mantido para comparação. O modelo de Gordon-Taylor, com um coeficiente de correlação de 0,91, apresenta a curvatura típica de diagramas de estado de amostras com amido e fibras, similar ao observado por Wan *et al.* (2018) em mistura de amido e fibras e Al-

Ghamdi *et al.* (2020) em abóbora. A linha estimada para a monocamada BET é uma simples reta.

Ao analisar um diagrama de estado como o da Figura 5.14, quanto menor o número da zona, maior será a estabilidade estimada. Idealmente, na zona 1, toda a água disponível está na monocamada, e a amostra está em estado vítreo, indicando baixíssima mobilidade de água. Na Zona 2, a água está em quantidade acima da monocamada, mas os sólidos estão em estado amorfo, estável. Na Zona 3, a água livre está congelada, mas os sólidos estão em estado “borrachudo/gomoso” (tradução livre do inglês *rubbery*). Nas Zonas 4 e 5, a água livre não está necessariamente toda congelada: há gelo, sólidos e solução. A Zona 6 está acima da temperatura de congelamento, mas não tem praticamente água livre. Na Zona 7, a mais instável, a água está em sua maioria não ligada e não congelada.

Intuitivamente, para o máximo de estabilidade possível, seria coerente tentar armazenar o yacón na Zona 1. Isso, porém, envolveria altos custos de secagem e congelamento. Uma análise desenvolvida por Roos (1995) ajuda a comparar os critérios de estabilidade de transição vítrea e atividade de água.

Figura 5.15. Comparação entre os conceitos de atividade de água e transição vítrea



Fonte: Autor

Tomando como critério a umidade de monocamada, o yacón estaria estável a uma umidade de 0,12 g/g b.u., o que corresponde a uma atividade de água de aproximadamente 0,15; nesta umidade, a temperatura de transição vítrea seria cerca de -5 °C, de acordo com o modelo

de Gordon-Taylor. O caminho reverso para esta análise seria estimar a partir da transição vítrea qual a umidade correspondente; porém, de acordo com esta estimativa, o produto não está em estado vítreo à temperatura ambiente, mesmo seco. Portanto, a recomendação seria armazenar o yacón seco abaixo da umidade de monocamada.

5.5 Conclusões parciais

Neste Capítulo, diferentes propriedades do yacón foram medidas. A relevância de algumas delas, como as propriedades termofísicas, envolveu o seu uso em Capítulos anteriores, especialmente as relacionadas à modelagem. Os teores de frutanos e de sólidos solúveis observados foram inferiores, porém próximos, aos indicados por outros autores na literatura. Esta diferença pode ser devida a diversos fatores, dentre os quais a variedade de yacón e suas condições de cultivo.

Das informações fornecidas pelo diagrama de estado, recomenda-se armazenar o yacón seco com teor de umidade abaixo da monocamada. Além disto, do ponto de vista da preservação dos frutanos, secar o yacón a 50 °C não apresentou vantagens. Pode-se aproveitar o menor tempo de secagem a 60 °C sem prejuízo à qualidade do produto final.

6 CONCLUSÕES

Estudou-se a secagem convectiva de yacón levando-se em conta diferentes escalas, condições de secagem e abordagens. Na primeira etapa, foi abordada a secagem em escala piloto, com diversas análises macroscópicas e obtenção de parâmetros da secadora. Especificamente na literatura relacionada à secagem de yacón, este foi o primeiro trabalho a controlar a umidade do ar de secagem. Na segunda etapa, foi realizada a secagem convectiva em escala laboratorial, e foi incluída uma análise microscópica para avaliação do encolhimento considerando-se a influência da morfologia do yacón. Finalmente, foi realizada a modelagem, para obtenção de dados que não podem ser medidos diretamente sem perturbar o processo, e considerando-se os dados obtidos nas etapas anteriores. Os resultados relacionados à cinética de secagem, como o fluxo evaporativo inicial dependendo da temperatura e da umidade do ar de secagem, eram esperados; mas os resultados relacionados à anisotropicidade no encolhimento e à ausência de formação de poros são novidades ainda não mencionadas na literatura. O conteúdo de frutanos medido, ligeiramente abaixo do normalmente observado na literatura, foi maior nas amostras secas a 60 °C, 30 % UR.

6.1 Sugestões para trabalhos futuros

Indica-se um estudo mais aprofundado da distribuição das temperaturas na secadora. Em vez de termopares com fios, um método de medição que permita a aferição por infravermelho ou sem fio, por exemplo, causaria menor perturbação do sistema do que o método utilizado neste trabalho.

A balança da secadora utilizada em escala piloto apresenta perturbações que não são de grande importância nas primeiras horas de secagem; mas, conforme a massa diminui, tornam-se mais importantes. Neste trabalho foram tomadas providências para mitigar este efeito, mas o ideal seria trabalhar com massas maiores de amostra. Trabalhos futuros poderiam incluir um estudo deste fenômeno na balança utilizada em escala piloto.

É necessário um esforço de identificação das diversas variedades de yacón disponíveis. Esta informação não está prontamente disponível junto aos produtores, de forma que, dentre toda a literatura revista neste trabalho, nenhum estudo descreve a variedade de yacón utilizada. Houve dificuldades em obter informações dos próprios produtores quanto às variedades disponíveis, e foram feitos esforços para deixar as características claras: local de produção, época, local de compra e características das raízes foram reportados para comparação futura.

Um desenvolvimento natural para os trabalhos com este modelo para descrição de secagem seria aplicá-lo a outras geometrias (por exemplo a adotada na fase em escala laboratorial) e a outros produtos.

7 REFERÊNCIAS

ABRAMOWITZ, M.; IRENE, S. *Handbook of mathematical functions*. 10. ed. [s.l.] United Stated department of Commerce- National bureau of standards, 1972.

ADEX. *EE.UU. Importó yacón peruano por us\$ 1 millón 533 mil.*
<https://www.adexperu.org.pe/notadeprensa/ee-uu-importo-yacon-peruano-por-us-1-millon-533-mil/> Acessado 09/11/2022 às 16:50

AL-GHAMDI, S.; HONG, Y.; QU, Z.; SABLANI, S. State diagram , water sorption isotherms and color stability of pumpkin (*Cucurbita pepo* L .). *Journal of Food Engineering*, v. 273, n. October 2019, p. 109820, 2020. DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2019.109820. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2019.109820>.

AL-MUHTASEB, a. H.; MCMINN, W. a. M.; MAGEE, T. R. a. Moisture Sorption Isotherm Characteristics of Food Products: A Review. *Food and Bioproducts Processing*, v. 80, n. 2, p. 118–128, 2002.

ALMEIDA, G.; LANCHA, J.; PIERRE, F.; CASALINHO, J.; PERRÉ, P.. Physical behavior of highly deformable products during convective drying assessed by a new experimental device. *Drying Technology*, v. 35, n. 8, p. 906–917, 2017. DOI: 10.1080/07373937.2016.1233883.

ANDERSON, R. B. Modification of the Brunauer, Emmett and Teller equation. *Journal of the American Chemical Society*, v. 68, p. 686–691, 1946.

AOAC-ASSOCIATION OF OFFICIAL ANALYTICAL CHEMISTS. Official methods of analysis of the Association of Official Analytical Chemists (method 926.12). Arlington: 1996, chapter 33. p. 5

APRAJEETA, J.; GOPIRAJAH, R.; ANANDHARAMAKRISHNAN, C. Shrinkage and porosity effects on heat and mass transfer during potato drying. *Journal of Food Engineering*, v. 144, p. 119–128, 2015. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2014.08.004>>.

ATEEQUE, M. *et al.* Numerical modeling of convective drying of food with spatially dependent transfer coefficient in a turbulent flow field. *International Journal of Thermal Sciences*, v. 78, p. 145–157, 2014. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2013.12.003>>.

BAINI, R.; LANGRISH, T. A. G. Choosing an appropriate drying model for intermittent and continuous drying of bananas. *Journal of Food Engineering*, v. 79, n. 1, p. 330–343, 2007.

BALZARINI, M. F. *et al.* Mathematical model, validation and analysis of the drying treatment on quality attributes of chicory root cubes considering variable properties and shrinkage. *Food and Bioproducts Processing*, v. 111, p. 114–128, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.fbp.2018.07.005>>.

BARBOSA, R. *et al.* Renal toxicity caused by oral use of medicinal plants : The yacon example. *Journal of Ethnopharmacology* v. 133, p. 434–441, 2011.

BASU, S.; SHIVHARE, U. S.; MUJUMDAR, A. S. Models for sorption isotherms for foods: A review. *Drying Technology*, v. 24, n. 8, p. 917–930, 2006.

BERNSTEIN, A.; NOREÑA, C. P. Z. Study of Thermodynamic, Structural, and Quality Properties of Yacon (*Smallanthus sonchifolius*) During Drying. *Food and Bioprocess Technology*, v. 7, n. 1, p. 148–160, 2014.

BRUNAUER, S. *et al.* On a Theory of the van der Waals Adsorption of Gases. *Journal of American Chemical Society*, v. 62, n. 7, p. 1723–1732, 1940. Disponível em: <<http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-33947445734&partnerID=tZOtx3y1>>.

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.

BUDDINGTON, K. K.; DONAHOO, J. B.; BUDDINGTON, R. K. Dietary oligofructose and inulin protect mice from enteric and systemic pathogens and tumor inducers. *The Journal of nutrition*, v. 132, n. 3, p. 472–477, 2002.

CAMPBELL, J. M. *et al.* Selected Fructooligosaccharide (1-Kestose, Nystose, and 1 F - β -Fructofuranosylnystose) Composition of Foods and Feeds. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, v. 45, n. 8, p. 3076–3082, 1997.

CARSON, J. K. Review of effective thermal conductivity models for foods. *International Journal of Refrigeration*, v. 29, n. 6, p. 958–967, 2006.

CASTRO, A. M.; MAYORGA, E. Y.; MORENO, F. L. Mathematical modelling of convective drying of fruits: A review. *Journal of Food Engineering*, v. 223, p. 152–167, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2017.12.012>>.

CHEN, C.S.; NGUYEN, T.K.; BRADDOCK, R. J. Relationship between freezing point depression and solute composition of fruit juice systems. *Journal of Food Science*, v. 22, n. 2, p. 566–567 e 569, 1990.

CHERBUT, C. Inulin and oligofructose in the dietary fibre concept. *British Journal of Nutrition*, v. 87, n. 6, p. 159–162, 2002. Disponível em: <<http://www.ingentaselect.com/rpsv/cgi-bin/cgi?ini=xref&body=linker&reqdoi=10.1079/BJNBJN2002532>>.

CHOI, Y.; OKOS, M. R. Effects of temperature and composition on the thermal and properties of foods. In: LAMAGUER, M.; JELEN, P. (Ed.). *Food Processing and Process Applications Vol. I Transport Phenomena*. M. Le Magu ed. Nova York: Elsevier, 1986. p. 93–101.

CHUA, K. J. *et al.* Modelling the moisture and temperature distribution within an agricultural product undergoing time-varying drying schemes. *Biosystems Engineering*, v. 81, n. 1, p. 99–111, 2002.

COLL ARÁOZ, María V.; KORTSARZ GONZÁLEZ, Alejandra M.; MERCADO, María I.; PONESSA, Graciela I.; GRAU, Alfredo; CATALÁN, César A. N. Ontogeny and total sugar content of yacon tuberous roots and other three *Smallanthus* species (Heliantheae, Asteraceae), insights on the development of a semi-domesticated crop. *Genetic Resources and Crop Evolution*, v. 61, n. 1, p. 163–172, 2014. DOI: 10.1007/s10722-013-0022-0.

CRANK, J. *The Mathematics of Diffusion*. 2. ed. Londres: Oxford University Press, 1975.

CURCIO, S. *et al.* Formulation of a 3D conjugated multiphase transport model to predict drying process behavior of irregular-shaped vegetables. *Journal of Food Engineering*, v. 176, p. 36–55, 2016.

DA SILVA, W.; HAMAWAND, I.; SILVA, C. M. D. P. S. A liquid diffusion model to describe drying of whole bananas using boundary-fitted coordinates. *Journal of Food Engineering*, v. 137, p. 32–38, 2014. DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2014.03.029.

DAVIS, E. A., GORDON, J., & HUTCHINSON, T. E. (1976). Scanning Electron Microscope Studies on Carrots: Effects of Cooking on the Xylem and Phloem. *Home Economics Research Journal*, 4(4), 214–224. <https://doi.org/10.1177/1077727X7600400401>

DATTA, A. K. Status of Models in the Design of Food Products , Processes , and Equipment. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, v. 7, n. 2007, p. 121–129, 2008.

DATTA, A. K. Toward computer-aided food engineering: Mechanistic frameworks for evolution of product, quality and safety during processing. *Journal of Food Engineering*, v. 176, p. 9–27, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2015.10.010>>.

DATTA, A. K.; HALDER, A. Status of food process modeling and where do we go from here (Synthesis of the outcome from brainstorming). *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, v. 7, n. 1, p. 117–120, 2008.

DAVILA, R. F. Z. *Mathematical modeling of drying process of unripe banana slices*. Tese de doutorado. Universidade de São Paulo, 2016.

DE BOER, J. H. *The Dynamic Character of Adsorption*. Oxford: Clarendon Press, 1953.

DEFRAEYE, Thijs. Advanced computational modelling for drying processes - A review. *Applied Energy*, v. 131, p. 323–344, 2014. DOI: 10.1016/j.apenergy.2014.06.027.

DOYMAZ, I. Convective drying kinetics of strawberry. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, v. 47, n. 5, p. 914–919, 2007. DOI: 10.1016/j.cep.2007.02.003.

DRABIŃSKA, N.; ZIELIŃSKI, H.; KRUPA-KOZAK, U. Technological benefits of inulin-type fructans application in gluten-free products – A review. *Trends in Food Science and Technology*, v. 56, p. 149–157, 2016.

ENGLYST, H. Classification and measurement of plant polysaccharides. *Animal Feed Science and Technology*, v. 23, n. 1–3, p. 27–42, 1989. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0377840189900874>>.

FAOSTAT. *Production quantities by country*. Disponível em <https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL/visualize>, 2020

FIGURA, L.; TEIXEIRA, A. *Food Physics*. 1. ed. Berlim: Springer, 2007.

FLAMM, G. *et al.* Inulin and oligofructose as dietary fiber: A review of the evidence. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, v. 41, n. 5, p. 353–362, 2001.

FORGO, P. *et al.* Thermal degradation and consequent fragmentation of widely applied oligosaccharides. *Microchemical Journal*, v. 107, p. 37–46, 2013.

FRANCK, A.; ALEXIOU, H. Inulin and oligofructose. In: JARDINE, S. (Ed.). *Prebiotics and Probiotics*. Chichester: Wiley- Blackwell, 2009. p. 3–24.

FRÍAS, A.; CLEMENTE, G.; MULET, A. Potato shrinkage during hot air drying. *Food Science and Technology International*, v. 16, n. 4, p. 337–341, 2010. DOI: 10.1177/1082013210366967.

GAVRILA, C.; GHIAUS, A. G.; GRUIA, I. Heat and Mass Transfer in Convective Drying Processes. In: *COMSOL Conference 2008 Hannover Anais-2008*.

GEKAS, V.; LAMBERG, I. Determination of diffusion coefficients in volume-changing systems-Application in the case of potato drying. *Journal of Food Engineering*, v. 14, n. 4, p. 317–326, 1991. DOI: 10.1016/0260-8774(91)90021-J.

GENTA, S. B. *et al.* Subchronic 4-month oral toxicity study of dried *Smallanthus sonchifolius* (yacon) roots as a diet supplement in rats. *Food and chemical toxicology* v. 43, p. 1657–1665, 2005.

GIBSON, G. R. *et al.* Selective Stimulation of Bifidobacteria in the Human Colon by Oligofructose and Inulin. *Gastroenterology*, v. 108, p. 975–982, 1995.

GOLESTANI, R.; RAISI, A.; AROUJALIAN, A.. Mathematical Modeling on Air Drying of Apples Considering Shrinkage and Variable Diffusion Coefficient. *Drying Technology*, v. 31, n. 1, p. 40–51, 2013. DOI: 10.1080/07373937.2012.714826.

GORDON, M.; TAYLOR, J. Ideal copolymers and the second-order transitions of synthetic rubbers. I. Noncrystalline copolymers. *Rubber chemistry and technology*, v. 26, n. 2, p. 323–335, 1953.

GRAEFE, S. *et al.* Effects of post-harvest treatments on the carbohydrate composition of yacon roots in the Peruvian Andes. *Field Crops Research*, v. 86, n. 2–3, p. 157–165, 2004.

GUGGENHEIM, E. A. *Application of Statistical Mechanics*. Oxford: Clarendon Press, 1966.

GUINÉ, Raquel de P. F. Influence of drying method on density and porosity of pears. *Food and Bioproducts Processing*, v. 84, n. 3 C, p. 179–185, 2006. DOI: 10.1205/fbp.05106.

HENDERSON, S. A basic concept of equilibrium moisture. *Agricultural Engineering*, n. 33, p. 29–32, 1952.

HERMANN, M.; FREIRE, I.; PAZOS, C. Compositional Diversity of the Yacon Storage Root. In: *CIP Program Report, Anais de conferência-1998*.

HERMANN, M.; HELLER, J. *Andean roots and tubers: Ahipa, arracacha, maca and yacon*. Roma: Institute of Plant Genetics and Crop Plant Research, 1997.

INCROPERA, F.; DEWITT, D. *Fundamentos de Transferência de Calor e Massa*. Rio de Janeiro: LTC, 2008.

JOARDDER, M. U. H. *et al.* Effect of cell wall properties on porosity and shrinkage of dried apple. *International Journal of Food Properties*, v. 18, n. 10, p. 2327–2337, 2015. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1080/10942912.2014.980945>>.

KHAN, M. I. H. *et al.* Investigation of bound and free water in plant-based food material using NMR T2 relaxometry. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, v. 38, p. 252–261, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.ifset.2016.10.015>>.

KHAN, M. I. H. *et al.* Determination of appropriate effective diffusivity for different food materials. *Drying Technology*, v. 35, n. 3, p. 335–346, 2017.

KHAN, M. I. H. *et al.* Multiphase porous media modelling: A novel approach to predicting food processing performance. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, v. 58, n. 4, p. 528–546, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1080/10408398.2016.1197881>>.

KILPATRICK, P.; LOWE, E.; ARDSEL, W. V. Tunnel Dehydrators for Fruits and Vegetables. *Advances in Food Research*, v. 6, p. 313–372, 1955.

KIRANOUDIS, C. T. *et al.* Estimation of the effective moisture diffusivity from drying data. Application to some vegetables. In: *Developments in Food Engineering*, 4, Anais de conferência, 1994.

KOO, W. Plantas y Semillas de Perfumería y Medicina Perú , Albahaca , Barbasco , *Agrodata Peru*, 2015.

KROKIDA, M. K.; MAROULIS, Z. B. Effect of drying method on shrinkage and porosity. *Drying Technology*, v. 15, n. 10, p. 2441–2458, 1997.

KUMAR, C.; MILLAR, G. J.; KARIM, M. A. Effective Diffusivity and Evaporative Cooling in Convective Drying of Food Material. *Drying Technology*, v. 33, n. 2, p. 227–237, 2015.

LACHMAN, J.; FERNÁNDEZ, E. C.; ORSÁK, M. Yacon [*Smallanthus sonchifolia* (Poepp. et Endl.) H. Robinson] chemical composition and use - A review. *Plant, Soil and Environment*, v. 49, n. 6, p. 283–290, 2003.

LAGO, C.; NOREÑA, C. Kinetic and Thermodynamic of Thermal Inactivation of the Peroxidase, Polyphenoloxidase and Inulinase Activities during Blanching of Yacon (*Smallanthus sonchifolius*) Juice. *Food and Bioprocess Technology*, v. 7, n. 12, p. 3560–3568, 2014. DOI: 10.1007/s11947-014-1366-y.

LAND, C. M. V. *Drying in the Process Industry*. 1. ed. Wiley, Nova Jersey, 2012.

LANGMUIR, I. The adsorption of gases on plane surfaces of glass, mica and platinum. *Journal of the American Chemical Society*, v. 40, n. 9, 1918.

LEWICKI, P. P. Data and models of water activity. II: Solid foods. In: M.S.RAHMAN (Ed.). *Food Properties Handbook*, Second Edition. 2. ed. Boca Raton: Taylor & Francis, 2009. p. 33–62.

LEWIS, W. K. The rate of drying of solid materials. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 13, 427–432, 1921

LISBOA, C. ; GOMES, J.; FIGUEIRÊDO, R. ; QUEIROZ, A., DIÓGENES, A., João C. Effective diffusivity in yacon potato cylinders during drying. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 22, n. 8, p. 564–569, 2018. DOI: 10.1590/1807-1929/agriambi.v22n8p564-569.

LOZANO, J. E.; ROTSTEIN, E.; URBICAIN, M. J. Total porosity and open-pore porosity in the drying of fruits. *Journal of Food Science*, v. 45, p. 1403–1407, 1980.

LUDGER FIGURA, A., TEIXEIRA A. *Food Physics*. Berlim: Springer-Verlag, 2007.

MACHADO, S.; OLIVEIRA, D.; DIP, M.; MENEZES, N.. Morfoanatomia do sistema subterrâneo de *Smallanthus sonchifolius* (Poepp. & Endl.) H. Robinson (*Asteraceae*). *Revista Brasileira de Botânica*, v. 27, n. 1, p. 115–123, 2004. DOI: 10.1590/s0100-84042004000100013.

MADAMBA, P. S.; DRISCOLL, R. H.; BUCKLE, K. A. Shrinkage, density and porosity of garlic during drying. *Journal of Food Engineering*, v. 23, n. 3, p. 309–319, 1994.

MAHIUDDIN, M. *et al.* Shrinkage of Food Materials During Drying: Current Status and Challenges. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, v. 17, n. 5, p. 1113–1126, 2018.

MARQUES, B.; PLANA-FATTORI, A.; FLICK, D.; TADINI, C.. Convective drying of yacón (*Smallanthus sonchifolius*) slices: A simple physical model including shrinkage. *LWT*, v. 159, n. July 2021, p. 113151, 2022. DOI: 10.1016/j.lwt.2022.113151. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2022.113151>.

MARQUES, B.; PERRÉ, P.; CASALINHO, J; TADINI, C.; PLANA-FATTORI, A.; ALMEIDA, G. Evidence of iso-volume deformation during convective drying of yacón: An extended van Meel model adapted to large volume reduction. *Journal of Food Engineering*, , v. 341, n. August 2022, p. 111311, 2023. DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2022.111311. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2022.111311>.

MAROULIS, Z. B.; SARAVACOS, G. D.; PANAGIOTOU, N. M.; KROKIDA, M. K. Moisture diffusivity data compilation for foodstuffs: Effect of material moisture content and temperature. *International Journal of Food Properties*, v. 4, n. 2, p. 225–237, 2001. DOI: 10.1081/JFP-100105189.

MARTEL, C. M. *et al.* Expression, purification and use of the soluble domain of *Lactobacillus paracasei* β -fructosidase to optimise production of bioethanol from grass fructans. *Bioresource Technology*, v. 101, n. 12, p. 4395–4402, 2010. DOI: 10.1016/j.biortech.2010.01.084.

MATTEA, M.; URBICAIN, M.; ROTSTEIN, E. Prediction of thermal conductivity of vegetable foods by the Effective Medium Theory. *Journal of Food Science*, v. 51, p. 113–115, 1986.

MAY, B. K.; PERRÉ, P. The importance of considering exchange surface area reduction to exhibit a constant drying flux period in foodstuffs. *Journal of Food Engineering*, v. 54, n. 4, p. 271–282, 2002. DOI: 10.1016/S0260-8774(01)00213-8.

MAYOR, L.; SERENO, A. M. Modelling shrinkage during convective drying of food materials: A review. *Journal of Food Engineering*, v. 61, n. 3, p. 373–386, 2004.

MCCABE, W., SMITH, J., & HARRIOTT, P. Drying of solids. *In: Unit operations of chemical engineering* (7^a ed.). Mc Graw Hill, 2014.

MCKENZIE, A. B. Non-equilibrium freezing behavior of aqueous systems. *In: Philosophical transactions of the royal society of London- Anais de conferência*, 1977, p. 167–189. DOI: 10.1098/rsta.1892.0001.

- MEGAZYME. *Fructan assay procedure for the measurement of fructo-oligosaccharides (FOS) and inulin, levan and branched fructan polysaccharides in foods, feeds and ingredients*. Disponível em: https://www.megazyme.com/documents/Assay_Protocol/K-FRUC_DATA.pdf
Acessado 20/02/2023 21:50
- MENSINK, M. A. *et al.* Inulin, a flexible oligosaccharide. II: Review of its pharmaceutical applications. *Carbohydrate Polymers*, v. 134, p. 418–428, 2015.
- MERRY, R. J.; WINTERS, A. L.; THOMAS, P. I.; MÜLLER, M.; MÜLLER, T. Degradation of fructans by epiphytic and inoculated lactic acid bacteria and by plant enzymes during ensilage of normal and sterile hybrid ryegrass. *Journal of Applied Bacteriology*, v. 79, n. 6, p. 583–591, 1995. DOI: 10.1111/j.1365-2672.1995.tb00941.x.
- MISHCHENKO, L; MOLODCHENKOVA, O; DUNICH, A.; MISHCHENKO, I; DASHCHENKO, A. Prospects of Yacon (*Polymnia Sohchifolia Poepp. & Endl*) Using for Astronauts Life Support. *Journal of Deep Space Exploration*, v. 7, n. 5, p. 508–514, 2020. DOI: 10.15982/j.issn.2096-9287.2020.20191111001.
- MUJUMDAR, A. S. *Handbook of Industrial Drying*. [s.l.] Taylor and Francis, 2006.
- MULET, A. *et al.* Effect of shape on potato and cauliflower shrinkage during drying. *Drying Technology*, v. 18, n. 6, p. 1201–1219, 2000.
- MUSSATTO, S. I.; MANCILHA, I. M. Non-digestible oligosaccharides: A review. *Carbohydrate Polymers*, v. 68, n. 3, p. 587–597, 2007. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0144861706006151>>.
- NGUYEN, T. K. *et al.* Shrinkage and porosity evolution during air-drying of non-cellular food systems: Experimental data versus mathematical modelling. *Food Research International*, v. 103, n. October 2017, p. 215–225, 2018.
- OSWIN, C. R. The kinetics of Package Life III- The Isotherm. *Journal of Chemical Industry*, n. 65, p. 419–421, 1946.
- PAGE, G. *Factors influencing the maximum rates of air drying shelled corn in thin-layers*. Dissertação de mestrado. Department of Mechanical Engineering, Purdue University, West Lafayette, Indiana, EUA; 1949.
- PARK, K. J. *et al.* *Conceito de processo e equipamentos de secagem*. Campinas: UNICAMP, 2007.

PEREIRA, J. *et al.* Combined effects of yacon flour and probiotic yogurt on the metabolic parameters and inflammatory and insulin signaling proteins in high-fat-diet-induced obese mice. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, v. 102, n. 15, p. 7293–7300, 2022. DOI: 10.1002/jsfa.12095.

PERRÉ, P. Meshpore: A Software Able to Apply Image-Based Meshing Techniques to Anisotropic and Heterogeneous Porous Media, *Drying Technology*, 2005, 23:9-11, 1993-2006, DOI: 10.1080/07373930500210432

PERRÉ, P.; RÉMOND, R.; ALMEIDA, G.; AUGUSTO, P.; TURNER, I. State-of-the-art in the mechanistic modeling of the drying of solids: A review of 40 years of progress and perspectives. *Drying Technology*, v. 0, n. 0, p. 1–26, 2023. DOI: 10.1080/07373937.2022.2159974.

PERRY, R. H.; GREEN, D. W. *Perry's Engineers' Handbook*. 7th ed. McGrawHill.

PERUSSELLO, C. A. *et al.* Heat and mass transfer modeling of the osmo-convective drying of yacon roots (*Smallanthus sonchifolius*). *Applied Thermal Engineering*, v. 63, n. 1, p. 23–32, 2014. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2013.10.020>>.

PERUSSELLO, C. A. *et al.* Propriedades termofísicas do yacon (*Smallanthus sonchifolius*): Determinação experimental e efeito do conteúdo de umidade. *Acta Scientiarum - Technology*, v. 37, n. 1, p. 167–173, 2015.

PRAUSNITZ, J.; LICHTENTHALER, R.; AZEVEDO, E. *Molecular thermodynamics of fluid-phase equilibria*. 3. ed. New Jersey: prentice Hall, 1999.

RAHMAN, M. S. Thermal Conductivity of four food models as a single function of porosity and water content. *Journal of Food Engineering*, v. 15, p. 261–268, 1991.

RAHMAN, M. S. *Food properties handbook*. 2nd. ed. Boca Raton: CRC press, 2009.

RAHMAN, M.S. Applications of macro-micro region concept in the state diagram and critical temperature concepts in determining the food stability. *Food Chemistry*, v. 132, n. 4, p. 1679–1685, 2010. DOI: 10.1016/j.foodchem.2011.09.092. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.foodchem.2011.09.092>.

RAO, M. A.; RIZVI, S. H.; DATTA, A. K. *Engineering Properties of Foods*. 3rd. ed. Boca Raton: CRC Press, 2005.

RATTI, C. Shrinkage during drying of foodstuffs. *Journal of Food Engineering*, v. 23, n. 1, p. 91–105, 1994.

REIS, F. R. *et al.* Vacuum drying kinetics of yacon (*Smallanthus sonchifolius*) and the effect of process conditions on fractal dimension and rehydration capacity. *Drying Technology*, v. 30, n. 1, p. 13–19, 2012.

RIBEIRO, J. D. A. *Estudos químico e bioquímico do yacon (Smallanthus sonchifolius) in natura e processado e influência do seu consumo sobre níveis glicêmicos*. 2008. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Lavras, 2008.

ROBERFROID, G. R.; GIBSON, M. Dietary Modulation of the Human Colonic Microbiota: Introducing the Concept of Prebiotics. *The Journal of Nutrition*, v. 125, n. 6, p. 1401–1412, 1995.

ROBERFROID, M.; GIBSON, G. R. Prebiotic effects: Metabolic and health benefits. *British Journal of Nutrition*, v. 104, p. S1–S63, 2010.

ROCHA, D. M. U. P. *et al.* Acute consumption of yacon shake did not affect glycemic response in euglycemic, normal weight, healthy adults. *Journal of Functional Foods*, v. 44, n. February, p. 58–64, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jff.2018.02.029>>.

RODICA, C.; ADRIAN, C.; JULEAN, C. Biochemical Aspects of Non-Starch Polysaccharides. *Animal Science and Biotechnologies*, v. 43, n. 1, p. 368–375, 2010.

RODRIGUES, O. R. L.; ASQUIERI, E. R.; ORSI, D. C. Prevention of enzymatic browning of yacon flour by the combined use of anti-browning agents and the study of its chemical composition. *Food Science and Technology (Campinas)*, v. 34, n. 2, p. 275–280, 2014. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0101-20612>

ROOS, Yrjö. Prediction of the Physical State. *In: Phase Transitions in Foods*, p. 157–192, 1995. 014000200008&lng=en&nrm=iso&tlng=en>.

ROSS, G. D.; VĚTVICKA, V. CR3 (CD11b, CD18): a phagocyte and NK cell membrane receptor with multiple ligand specificities and functions. *Clinical and experimental immunology*, v. 92, n. 2, p. 181–4, 1993.

RSTUDIO TEAM *RStudio: Integrated Development for R*. RStudio, PBC, Boston, MA, 2020

RUEDEN, C. T.; SCHINDELIN, J. & HINER, M. C. *et al.* (2017), "ImageJ2: ImageJ for the next generation of scientific image data", *BMC Bioinformatics* 2017,18:529, PMID 29187165, doi:10.1186/s12859-017-1934-z

Safra da batata yacon foi boa e os produtores de SP estão satisfeitos. Globo Rural, 2 set. 2013. Disponível em: <g1.globo.com/economia/agronegocios/noticia/2013/09/safra-da-batata-yacon-foi-boa-e-os-produtores-de-sp-estao-satisfeitos.htm>.

SALINAS, J. G. *et al.* The influence of convection drying on the physicochemical properties of yacón (*Smallanthus sonchifolius*). *Heat and mass transfer* (2018) 54:2951–2961

SANTANA, I.; CARDOSO, M. H. Raiz tuberosa de yacon (*Smallanthus sonchifolius*): Potencialidade de cultivo, aspectos tecnológicos e nutricionais. *Ciencia Rural*, v. 38, n. 3, p. 898–905, 2008.

SCHER, C.; RIOS, A.; NOREÑA, C. Hot air drying of yacon (*Smallanthus sonchifolius*) and its effect on sugar concentrations. *International Journal of Food Science and Technology*, v. 44, n. 11, p. 2169–2175, 2009. DOI: 10.1111/j.1365-2621.2009.02056.x.

SCHINDELIN, J.; ARGANDA-CARRERAS, I. & FRISE, E. *et al.* "Fiji: an open-source platform for biological-image analysis", *Nature methods*, 2012 9(7): 676-682, PMID 22743772, doi:10.1038/nmeth.2019

SCHNEEMAN, B. O. Fiber, Inulin and Oligofructose: Similarities and Differences. In: Anais de conferência- *American Society for Nutritional Sciences*, 1999.

SCHULTZ, E.; MAZZUCO, M.; MACHADO, R.; BOLZAN, A.; QUADRI, M.; QUADRI, M. G. Effect of pre-treatments on drying, density and shrinkage of apple slices. *Journal of Food Engineering*, v. 78, n. 3, p. 1103–1110, 2007. DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2005.12.024.

SCOTT, W. Water Relations of *Staphylococcus Aureus* At 30°C. *Australian Journal of Biological Sciences*, v. 6, n. 4, p. 549–564, 1953. Disponível em: <http://www.publish.csiro.au/view/journals/dsp_journal_fulltext.cfm?nid=280&f=BI9530549>.

SEMINARIO, J.; VALDERRAMA, M.; MANRIQUE, I. *El yacón: fundamentos para el aprovechamiento de un recurso promisorio*. Lima: Centro Internacional de la Papa (CIP), Universidad Nacional de Cajamarca, Agencia Suiza para el Desarrollo y la Cooperación (COSUDE), 2003.

SERRA-BARCELONA, C. *et al.* Yacon roots (*Smallanthus sonchifolius*) improve oxidative stress in diabetic rats. *Pharmaceutical Biology*, v. 53, n. 8, p. 1183–1193, 2015.

SERRA, C. *et al.* Safety assessment of aqueous extract from leaf *Smallanthus sonchifolius* and its main active lactone, enhydrin. *Journal of ethnopharmacology* v. 144, p. 362–370, 2012.

SHI, Q.; ZHENG, Y.; ZHAO, Y. Mathematical modeling on thin-layer heat pump drying of yacon (*Smallanthus sonchifolius*) slices. *Energy Conversion and Management*, v. 71, p. 208–216, 2013. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2013.03.032>>.

SHI, Q.; ZHENG, Y.; ZHAO, Y. Thermal transition and state diagram of yacon dried by combined heat pump and microwave method. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, v. 119, n. 1, p. 727–735, 2015.

SINGH, R. J. *Genetic resources, chromosome engineering, and crop improvement: Medicinal plants*. v. 6 (2011)

SINGH, R. P. Thermal diffusivity in food processing. *Food Technology*, v. 36, n. 2, p. 87, 1982.

SJÖHOLM, I.; GEKAS, V. Apple shrinkage upon drying. *Journal of Food Engineering*, v. 25, n. 1, p. 123–130, 1995.

SOUSA, S. *et al.* Antioxidant properties of sterilized yacon (*Smallanthus sonchifolius*) tuber flour. *Food Chemistry*, v. 188, p. 504–509, 2015.

TOMKINS, R. G. Studies of the growth of moulds. *Proceedings of the Royal Society B*, v. 105, n. 738, p. 375–401, 1929.

TZEMPELIKOS, D. A. *et al.* Numerical modeling of heat and mass transfer during convective drying of cylindrical quince slices. *Journal of Food Engineering*, v. 156, p. 10–21, 2015. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2015.01.017>>.

VALENTOVÁ, K.; ULRICHOVÁ, J. *Smallanthus sonchifolius* and *Lepidium meyenii* - prospective Andean crops for the prevention of chronic diseases. *Biomedical papers of the Medical Faculty of the University Palack, Olomouc, Czechoslovakia*, v. 147, n. 2, p. 119–130, 2003.

VAN MEEL, D. A. Adiabatic convection batch drying with recirculation of air. *Chemical Engineering Science*, v. 9, n. 1, p. 36–44, 1958. DOI: 10.1016/0009-2509(58)87005-0.

- VAZ-TOSTES, M. D. G. *et al.* Yacon effects in immune response and nutritional status of iron and zinc in preschool children. *Nutrition* v. 30, n. 6, p. 666–72, 2014.
- VELIKOV, V.; BORICK, S.; ANGELL, C. A. The Glass Transition of Water , Based on Hyperquenching Experiments. *Science (80-.)*294 (December), 2335–2339, 2001.
- VERAVERBEKE, Els A.; VERBOVEN, Pieter; SCHEERLINCK, Nico; HOANG, My Lan; NICOLAÏ, Bart M. Determination of the diffusion coefficient of tissue, cuticle, cutin and wax of apple. *Journal of Food Engineering*, v. 58, n. 3, p. 285–294, 2003. DOI: 10.1016/S0260-8774(02)00387-4.
- VILHENA, S. M. C.; CÂMARA, F. L. A. .; KAKIHARA, S. T. O cultivo de Yacon no Brasil. *Horticultura Brasileira*, p. 05–09, 2000.
- WAN, J.; ZHOU, G.; LUO, S.; LIU, C.; LIU, F.; DING, Y. State Diagram for a Waxy Rice Starch–Soluble Dietary Fiber Composite System. *Starch/Staerke*, v. 70, n. 7–8, p. 1–7, 2018. DOI: 10.1002/star.201700274.
- WANG, N.; BRENNAN, J. G. Changes in structure, density and porosity of potato during dehydration. *Journal of Food Engineering*, v. 24, n. 1, p. 61–76, 1995.
- WATZL, B.; GIRRBACH, S.; ROLLER, M. Inulin, oligofructose and immunomodulation. *British Journal of Nutrition*, v. 93, n. S1, p. S49, 2005. Disponível em: <http://www.journals.cambridge.org/abstract_S0007114505000802>.
- WHITE, G. M.; ROSS, I. J.; PONELEIT, C. G. Fully-exposed drying of popcorn. *Transactions of the ASAE*, p. 466–469, 1981.
- YAN, X. *et al.* Extraction and identification of antioxidants in the roots of yacon (*Smallanthus sonchifolius*). *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, v. 47, n. 11, p. 4711–4713, 1999.
- YANG, ; SAKAI, N. Shrinkage and Mechanical Characteristics of Potato Undergoing Air Convection Drying. *Nihon Shokuhin Kougakukaishi (Japan Journal of Food Engineering)*, v. 2, n. 2, p. 67–72, 2001. DOI: 10.11301/jsfe2000.2.67.
- ZABALAGA, R. F.; CARBALLO, S. C. Convective Drying and Water Adsorption Behavior of Unripe Banana: Mathematical Modeling. *Journal of Food Processing and Preservation*, v. 39, n. 6, p. 1334–1341, 2015.

ZABALAGA, R. F.; LA FUENTE, C. I. A.; TADINI, C. C. Experimental determination of thermophysical properties of unripe banana slices (*Musa cavendishii*) during convective drying. *Journal of Food Engineering*, v. 187, p. 62–69, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2016.04.020>>.

ZENEON, O.; PASCUET, N.; TIGLEA, P. *Métodos físico-químicos para análise de alimentos*. 4. ed. São Paulo: Instituto Adolfo Lutz, 2008.

ZHANG, Lida; GRACE, Patrick M.; SUN, Da Wen. A new theoretical model for moisture sorption isotherms and its application in deriving a hygroscopicity index for food products. *Journal of Food Engineering*, 2022. DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2021.110817.

Figura A1. Aferição da balança 1 da secadora, a temperatura ambiente (caso a).

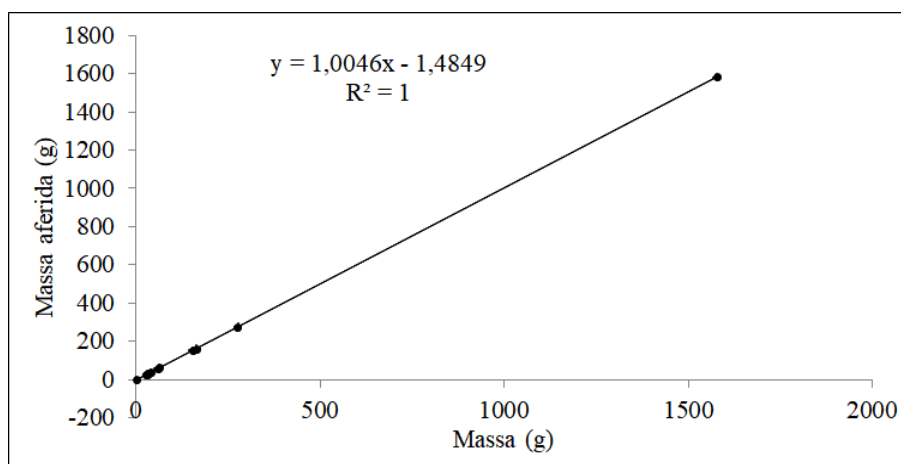


Tabela A2. Aferição da balança 1 da secadora, a 50 °C (caso b).

Objeto	Massa real	Medida 1	Medida 2	Média	Desvio	Erro
1	1620	1620	1624	1622	3	2
2	6,1	5	4	5	1	-2
3	9,4	6	10	8	3	-1
4	126,6	126	128	127	1	0
5	18,3	15	17	16	1	-2
6	386,2	385	387	386	1	0
7	29	25	27	26	1	-3
8	438,4	433	439	436	4	-2
tara	0	0	0	0,00	0,00	0,00

Figura A2. Aferição da balança 1 da secadora, a 50 °C (caso b).

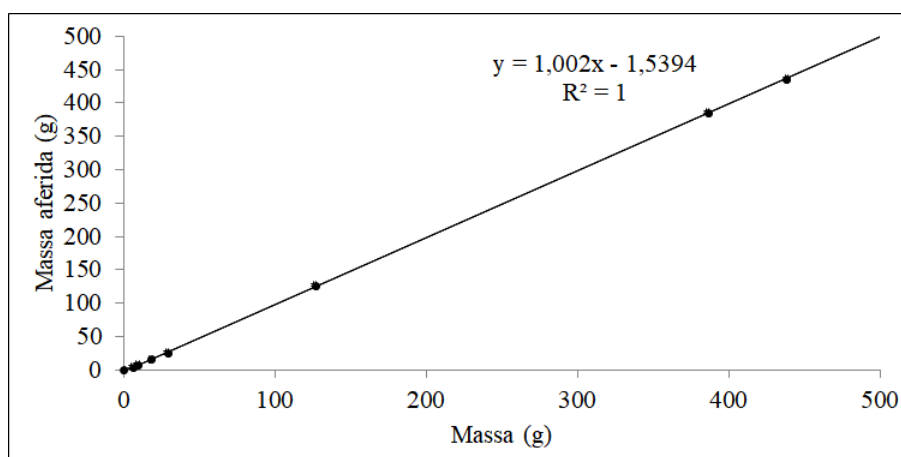
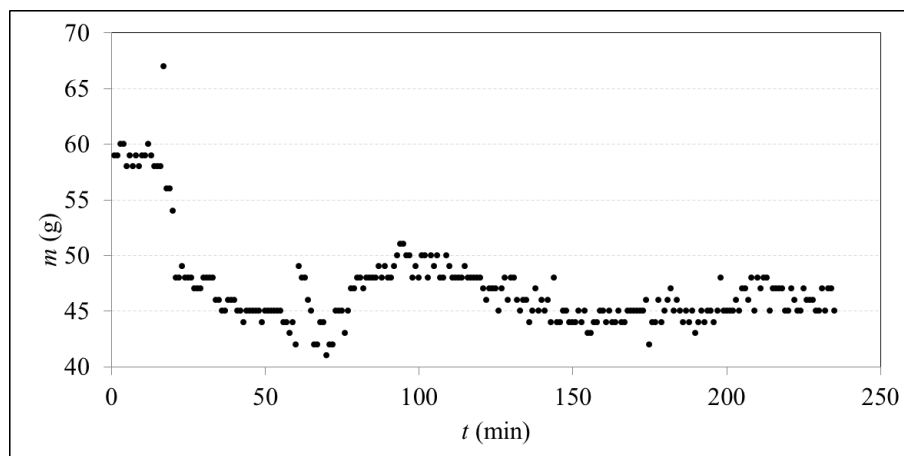


Figura A3. Aferição da balança 1 da secadora, contínua, a 60 °C (caso c).



Embora a variação seja de até 20 g em relação à massa real, considerando-se que a bandeja da balança tem massa de 1620 g, a variação em relação ao total fica em torno de 1,2 %, considerada razoável para o desenvolvimento do projeto.

APÊNDICE B- Imagens obtidas com o microscópio Leica S6D

Figura B1. Condensação na janela de quartzo, dificultando a aquisição de imagens. Condições do ar na câmara: 60 °C, UR = 30 %.

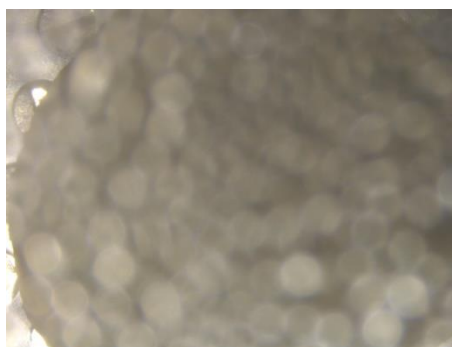


Figura B2. (a) a (f): fase final do encolhimento, (g) ampliação de 40x da fatia fresca, (h) ampliação de 40x da borda da fatia em fase final de secagem. (i) ampliação de 40x do produto seco. Condições do ar na câmara: 50 °C, UR = 20 %

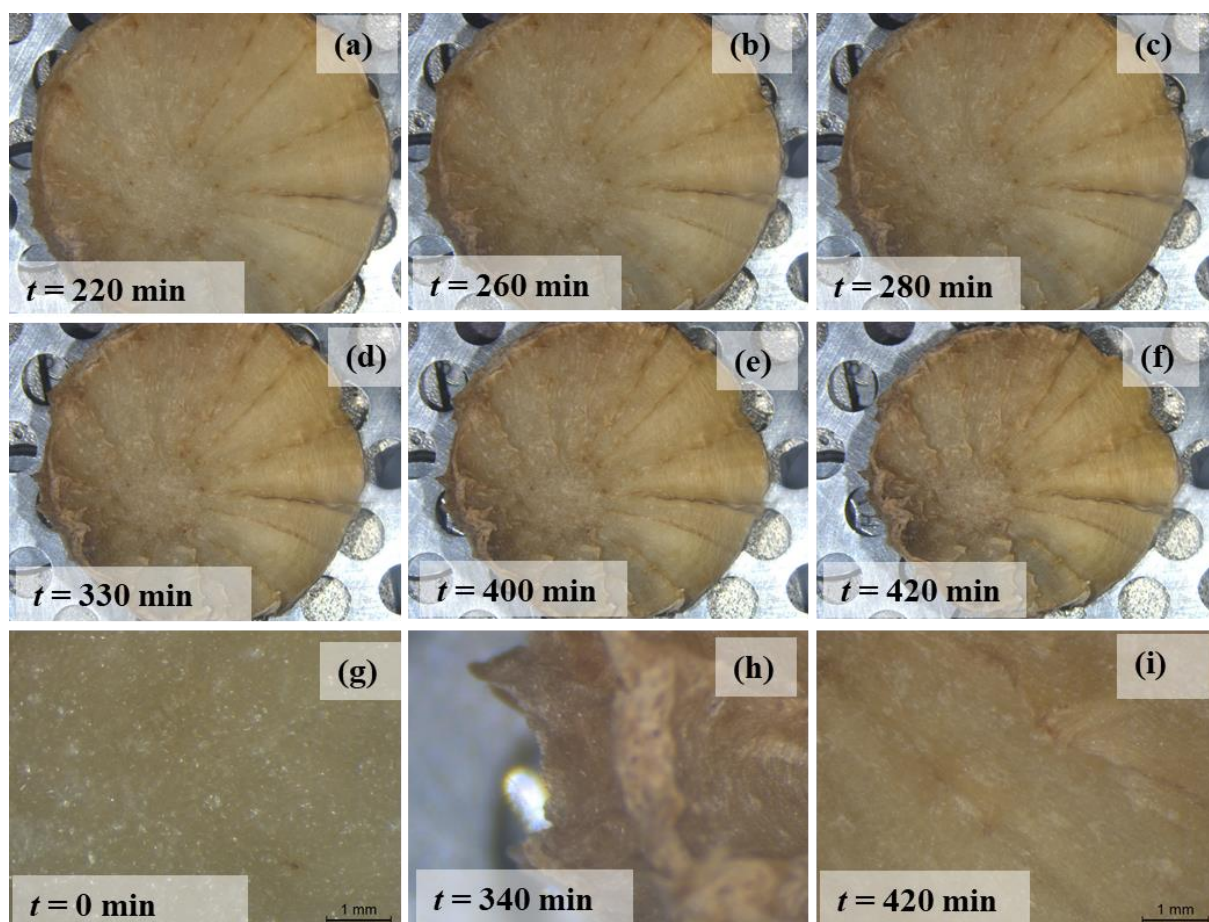


Figura B3. (a) a (i): Encolhimento ao longo da secagem, (j) ampliação de 40x da fatia fresca, (k) ampliação de 40x da fatia durante a secagem. (l) ampliação de 40x do produto seco.

Condições do ar na câmara: 50 °C, UR = 30 %

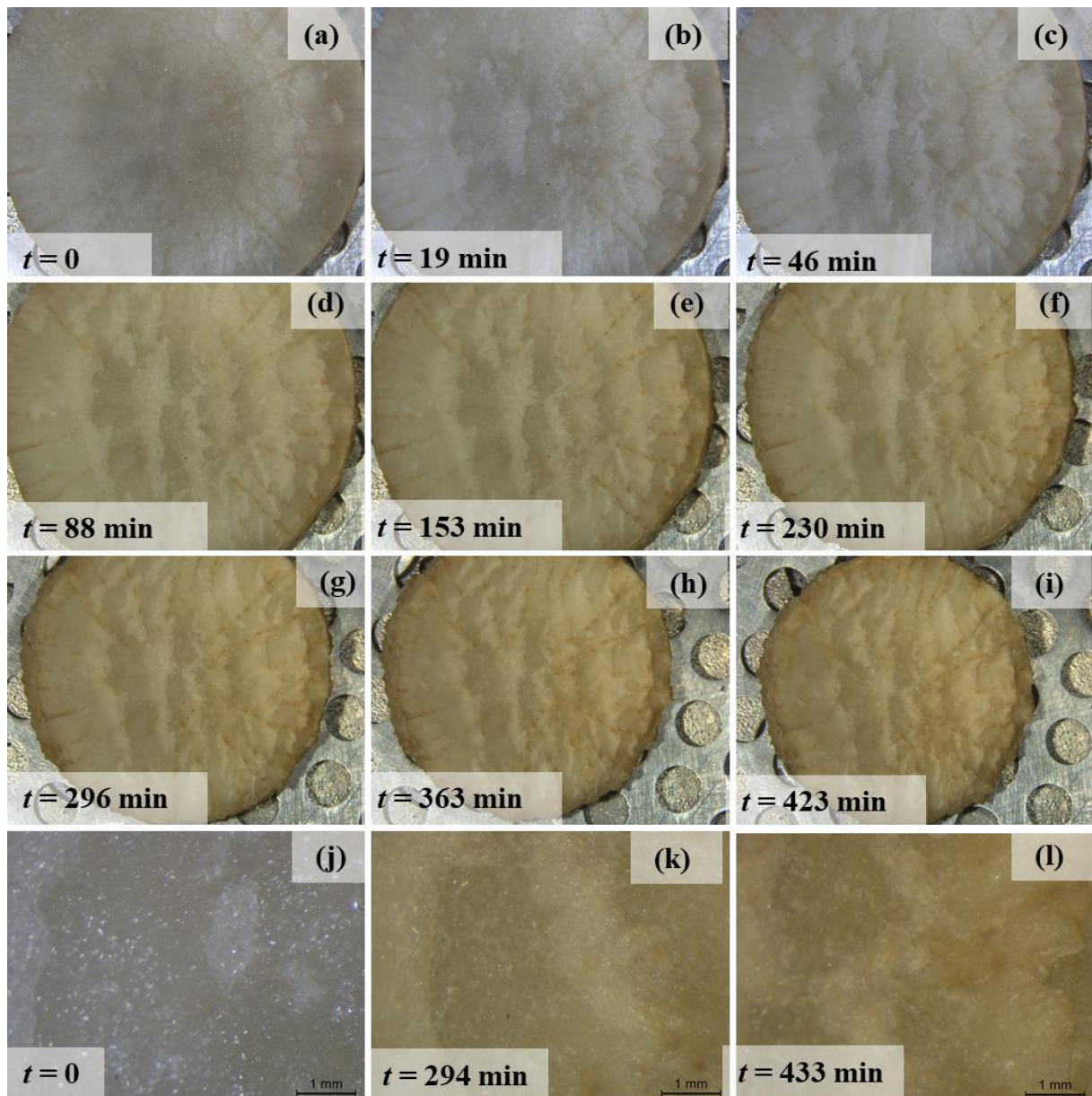


Figura B4. (a) a (i): Demonstração do funcionamento da medição de diâmetro com o software LAS6. Exemplo usado: fatia seca a 50 °C e 30 % (a) no início e (b) após 423 min. A circunferência é delimitada manualmente pelo usuário.

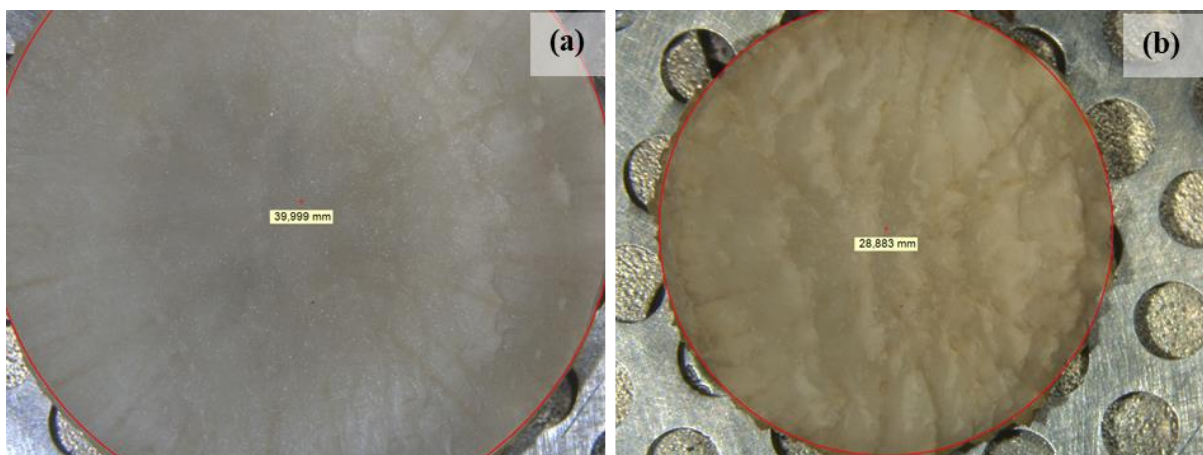


Figura B5. (a) a (i): Encolhimento ao longo da secagem a 60 °C, UR = 20%

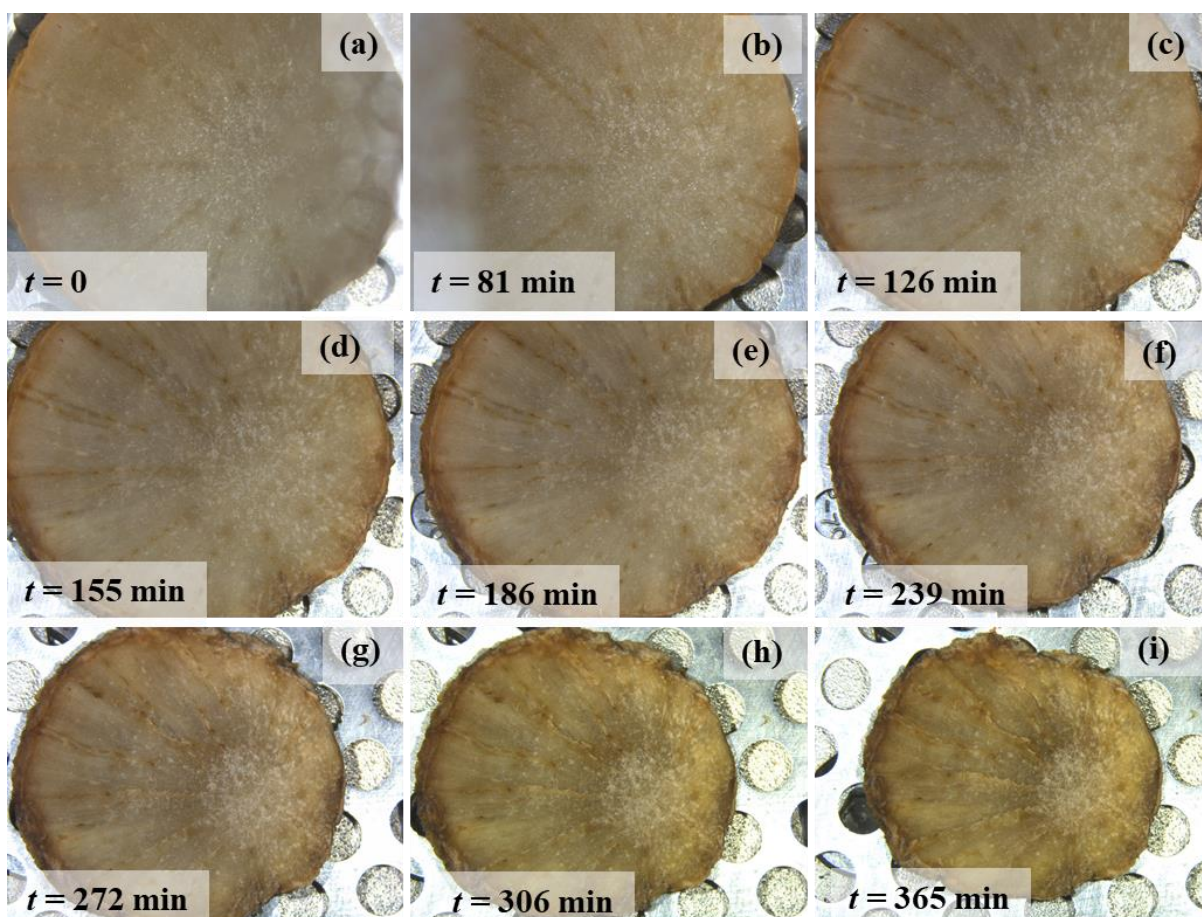
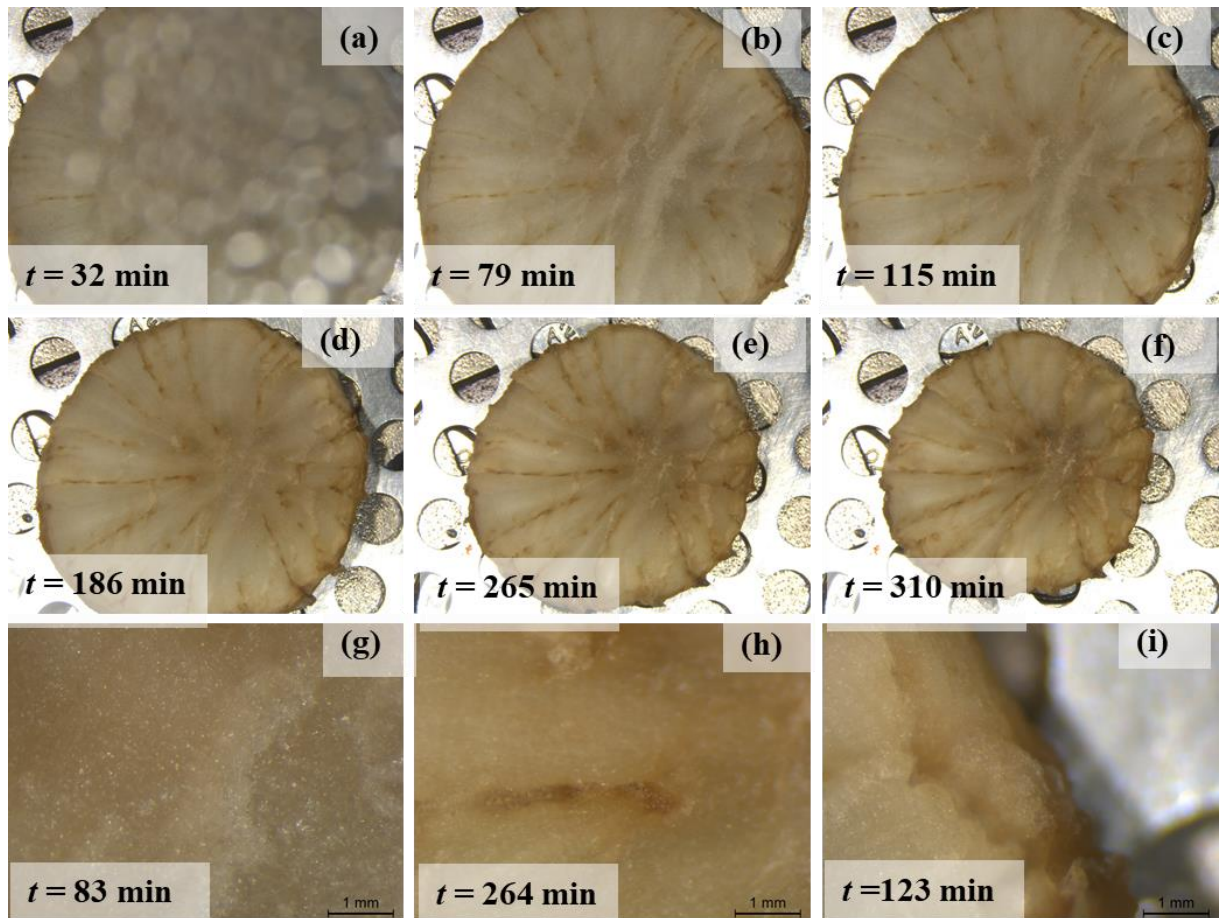


Figura B6. (a) a (f): Encolhimento ao longo da secagem a :60 °C, UR = 30 %; (g) a (h) ampliação de 40x; (i) borda da fatia com ampliação 40x.



APÊNDICE C- Código usado na estimativa do coeficiente convectivo (Python)

```

# -*- coding: utf-8 -*-
"""
Created on Mon Oct 5 11:38:27 2020
@author: Bernuau/Marques
"""
# importing libraries
import numpy as np
from scipy.integrate import odeint
from scipy.optimize import minimize
import matplotlib.pyplot as plt
import pandas as pd          # to import data from Excel

# importing values
data_exp = np.array(pd.read_excel('Tcyl20v2.xlsx')) # cylinder temperature data
data_inf = np.array(pd.read_excel('Tinf20v2.xlsx')) # air temperature data
texp = data_exp[:,0]          # defining time data
Texp = data_exp[:,1:]
Tinf = data_inf[:,1:]
tsim = np.linspace(0,572,573)

# declaring functions and parameters
experiment_length = len(Tinf)

As = 5.03e-4 # m2
rho = 2700 # kg/m3
V = 8.72e-7 #m3
C = 917.6 #J/kg/K

def velocity (T,t,h):
    t_floor = int(t)
    if t_floor >= len(Tinf)-1:
        Tinf_interpolated = Tinf[-1,:]
    else:
        Tinf_interpolated = Tinf[t_floor,:]+(t-t_floor)*(Tinf[t_floor+1,:]-Tinf[t_floor,:])
    return h*As/(rho*V*C)*(Tinf_interpolated-T)

TA = 30.37 # Celsius
TB = 31.76 # Celsius
TC = 38.18 # Celsius
T_ini = np.array([TA, TB, TC])

# defining the variable to be minimized
def sum_of_squares (h):
    Tsim = odeint(velocity, T_ini, tsim, args=(h,)) # integrating the velocity function
    return sum(sum((Tsim-Texp)**2))          # (calculated-experimental)^2

```

```

# defining h values to sweep, and corresponding values of the function to be minimized
h_list = np.linspace(1,50,50)
costs_list = []
for h in h_list:
    costs_list.append(sum_of_squares(h))

# run this line in the command window to show the error according to the h values
# plt.plot(h_list, costs_list)

h0 = 10
res = minimize(sum_of_squares, h0, method='nelder-mead', options={'xtol': 1e-3, 'disp': True})
h_opti = res.x
print(h_opti)

Tsim_opti = odeint(lambda T,t : velocity(T,t,h_opti), T_ini, tsim)
T1sim_opti = Tsim_opti[:,0]
T2sim_opti = Tsim_opti[:,1]
T3sim_opti = Tsim_opti[:,2]
T1exp = Texp[:,0]
T2exp = Texp[:,1]
T3exp = Texp[:,2]
T1inf = Tinf[:,0]
T2inf = Tinf[:,1]
T3inf = Tinf[:,2]
plt.subplot(3,1,1)
plt.axis([0, 600, 20, 60])
plt.subplot(2,1,1)
plt.axis([0, 600, 20, 60])
plt.plot(tsim, T2sim_opti, 'g', label='simulated')
plt.plot(tsim, T2exp, '-r', label='cylinder')
plt.plot(tsim, T2inf, '--b', label='air')
plt.legend(loc="lower right")
plt.subplot(2,1,2)
plt.axis([0, 600, 20, 60])
plt.plot(tsim, T3sim_opti, 'g', label='simulated')
plt.plot(tsim, T3exp, '-r')
plt.plot(tsim, T3inf, '--b')

```

APÊNDICE D. Imagens da microscopia eletrônica de varredura

Figura D1. Micrografia de uma fatia de yacón cortada longitudinalmente, aumentada 500x.

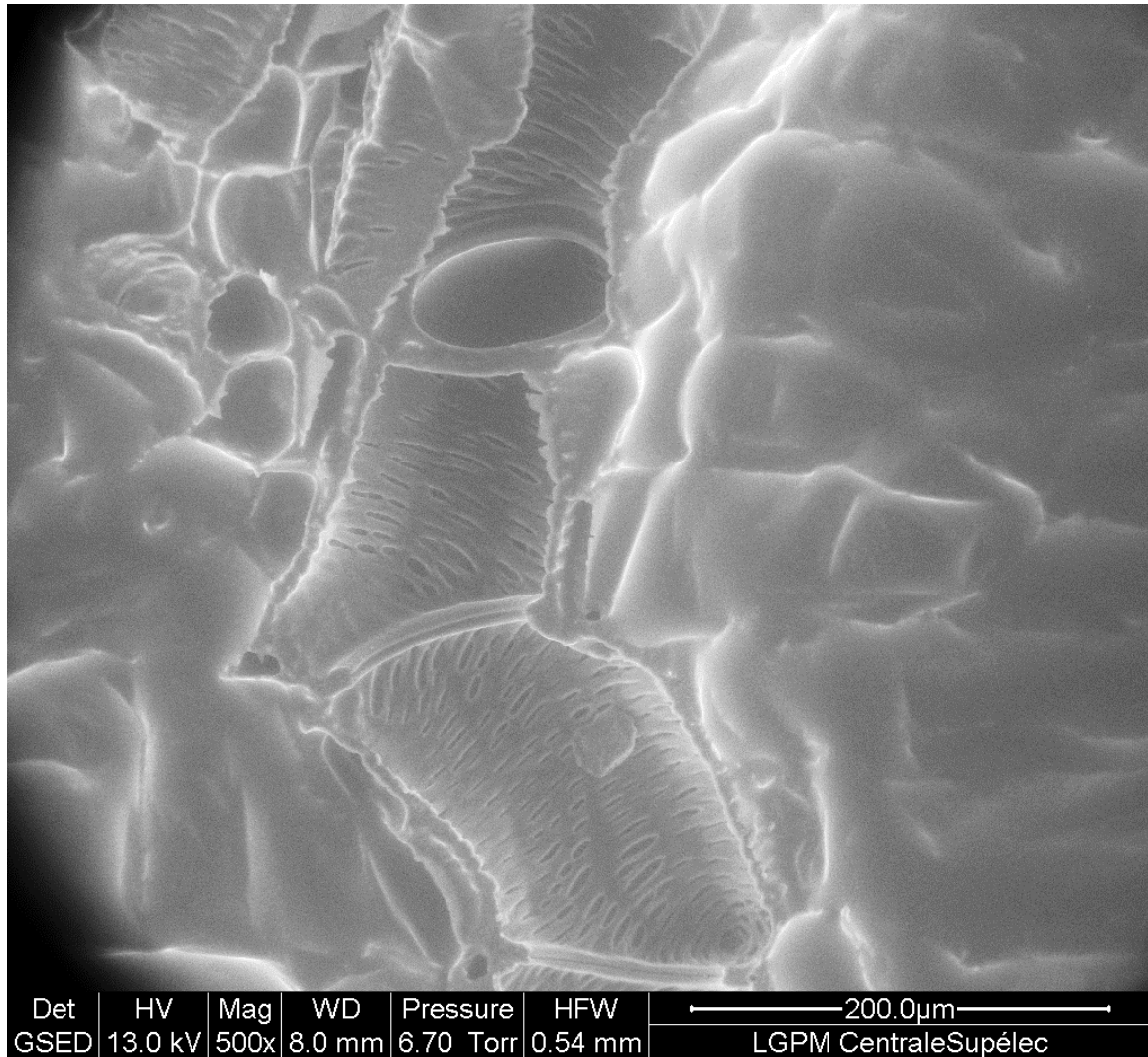


Figura D2. Vista microscópica de uma fatia de yacón cortada longitudinalmente (a) e (b) detalhe

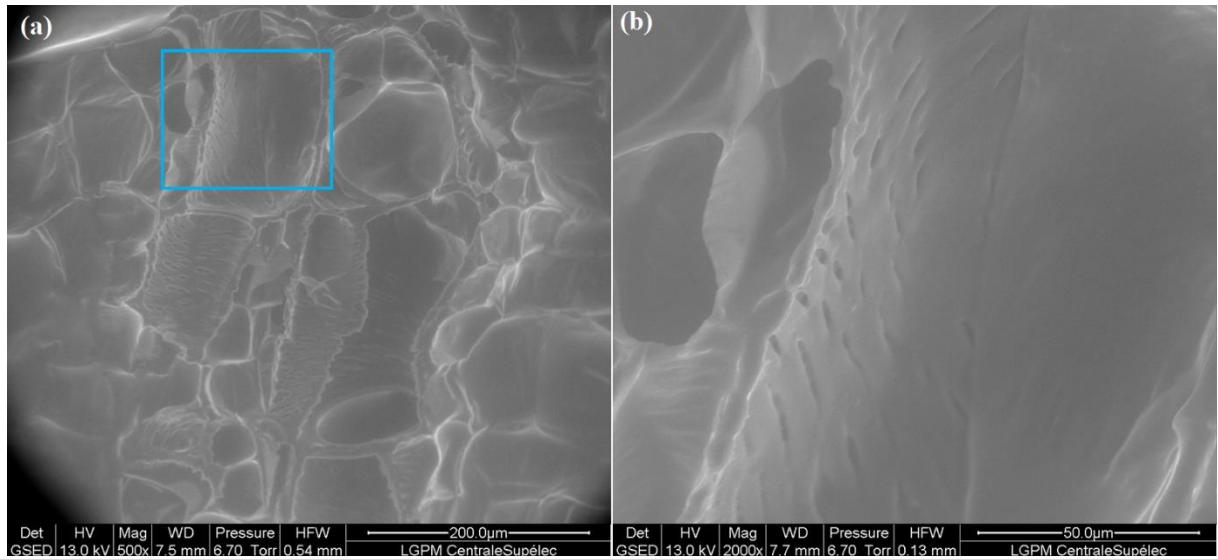
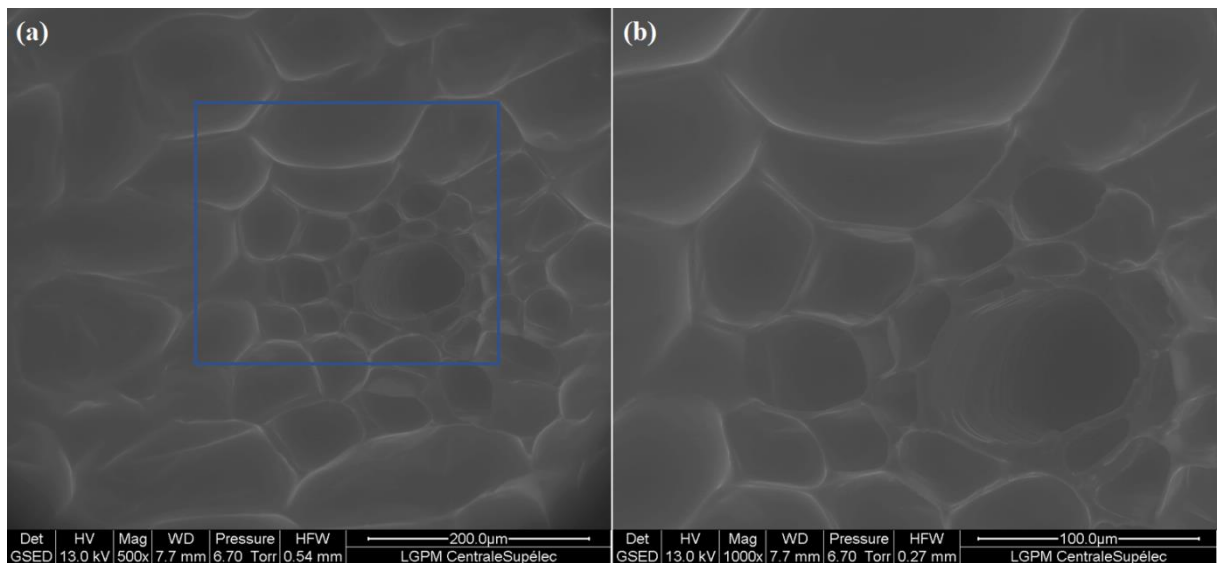


Figura D3. Vista microscópica de uma fatia de yacón cortada radialmente (a) e (b) detalhe.



APÊNDICE E -Código da simulação (Python)

```

#-----
#  LOADING PYTHON LIBRAIRIES AND MODULES
#-----
import numpy as np
import math
import matplotlib
from matplotlib.ticker import (FormatStrFormatter);
from time import perf_counter as pc

#-----
#  MODEL PARAMETERS: AIR CONVECTIVE DRYING OPERATING CONDITIONS
#-----

Ta = 50.;      # température de l'air [degC]
RH = 0.3;     # humidité relative de l'air [-]
tmax = 6*3600.; # durée totale du séchage [s]
#-----
#  MODEL PARAMETERS: SLICE INITIAL CONDITIONS
#-----

T0 = 20.;     # température initiale (produit) [degC]
Xw0 = 11.;    # teneur en eau initiale (produit) [kg-w/kg-dm]
Rayon = 0.02; # rayon du cylindre avant séchage [m]
Hauteur = 0.007; # hauteur du cylindre avant séchage [m]
DemiHauteur = Hauteur/2; # hauteur du domaine de simulation (plan de symétrie !)
#-----
#  MODEL PARAMETERS: SUBDIVISION INTO SMALL VOLUMES (MESH)
#-----

J = 5; # nombre de mailles selon la hauteur
I = 6 * J; # nombre de mailles selon le rayon
Jm = 1; # index de la maille à mi-hauteur
#-----
#  MODEL PARAMETERS: DRY MATTER PROPERTIES
#-----

rhodmstar = 1590. # masse volumique intrinsèque de la matière sèche du yacon à 40 Celsius
Cpdm = 1620. # capacité thermique massique de la matière sèche du yacon à 40 Celsius
kdm = 0.250; # conductivité thermique de la matière sèche du yacon à 40 Celsius
#-----
#  MODEL PARAMETERS: WATER PROPERTIES
#-----

rhowstar = 991. # masse volumique intrinsèque de l'eau [kg-w/m3] à 40 Celsius
Cpw = 4180. # capacité thermique massique de l'eau [J/kg-w/K] à 40 Celsius
kw = 0.631; # conductivité thermique de l'eau [W/m/K] à 40 Celsius

Lv = 2.36e6; # chaleur latente d évaporation de l eau [J/kg] à 60 Celsius

# Concentration massique de saturation de la vapeur d'eau [kg/m3];
# l'expression pour la pression partielle de saturation est proposée par Wexler (1976)

```

```

def Cwsat(T):
    psat = math.exp( (-6043.6117)/(T+273.15) + (18.93292601) + (-0.028244925)*(T+273.15)
+ (0.000017250331)*(T+273.15)*(T+273.15) + (2.858487)*math.log(T+273.15) );
    return( psat*0.018015/8.314/(T+273.15) );

Cwsat_Ta = Cwsat(Ta); # concentration de saturation dans l'air
#-----
#  MODEL PARAMETERS: PRODUCT (DRY MATTER AND WATER)
#-----

Xwm = 0.116; #
C = 1.45; # paramètres pour la fonction Aw d'après Carmen Tadini (le 19.04.2021: desorption
curves under 60 Celsius, DVS method)
K = 0.984; #

# Activité de l'eau dans la matrice; Xw en base sèche [kg-w/kg-dm];
# cette expression constitue la fonction inverse du modèle GAB (van den Berg, 1984)
def Aw(Xw):
    return(      2+(Xwm/Xw-1)*C-math.sqrt((2+(Xwm/Xw-1)*C)*(2+(Xwm/Xw-1)*C)-4*(1-
C)))/(2*K*(1-C) );
AwXw = np.zeros((I+1,J+1));

Xweq = Xwm*C*K*RH/(1-K*RH)/(1+(C-1)*K*RH); # teneur en eau 'd'équilibre'

# Conductivité thermique la matrice [W/m/K]
def Lambda(T,Xw):
    fracVdm = 1/(1+(rhodmstar/rhowstar)*Xw);
    return( kdm**fracVdm * kw**(1-fracVdm) );

# Diffusivité de l'eau dans le yacon [m2/s]
def Dw(T,Xw):
    # Arrhenius constants at Tref = 60+273.15 K
    Do = 1.0e-13; # diffusivity at Xw = 0
    Di = 1.7e-10; # diffusivity at Xw->infy
    # énergie d'activation proposée par Shi et al. (2013) pour le yacon:
    Eo = 30; # [kJ/mol] # activation energy
    Ei = Eo;
    # Maroulis et al. (2001)'s formulation:
    DXo = Do * math.exp( -(Eo/0.008314)*(1/(T+273.15)-1/(60+273.15)) );
    DXi = Di * math.exp( -(Ei/0.008314)*(1/(T+273.15)-1/(60+273.15)) );
    return( (1/(1+Xw))*DXo + (Xw/(1+Xw))*DXi );
DwTXw = np.zeros((I+1,J+1));

#-----
#  MODEL PARAMETERS: HEAT AND MASS TRANSFER
#-----

if Ta==60. : # case A
    if RH==0.2 : #
        htop = 33; # coeff. transf. chaleur (surf. sup.) [W/m2/K]

if Ta==60. : # case F
    if RH==0.3 : #
        htop = 37; # coeff. transf. chaleur (surf. sup.) [W/m2/K]

```

```

if Ta==50. : # case G
  if RH==0.2 : #
    htop = 31; # coeff. transf. chaleur (surf. sup.) [W/m2/K]

if Ta==50. : # case H
  if RH==0.3 : #
    htop = 35; # coeff. transf. chaleur (surf. sup.) [W/m2/K]

hlat = htop; # coeff. transf. chaleur (surf. lat.) [W/m2/K]
hbot = 0.; # pas de transfert de chaleur (il y a un plan de symétrie !!!)
k_h = 1.02e-3; # rapport entre coeffs. transf. masse et chaleur = Le^-0.67/rhoair/cpair à 60°C,
avec Le=0.895
#-----
# MODEL PARAMETERS: SLICE SHRINKAGE
#-----

rradial = 1/6; # exposant du retrecissement radial (1/3 pour isotropique)
rmax = 0.05; # valeur maximale du retrecissement vertical
#-----
# MODEL PARAMETERS: TIME STEP AND DERIVED QUANTITIES
#-----

dt = 0.01; # pas de temps imposé [s]
if dt==0 :
  dx0 = min(Rayon/I,DemiHauteur/J); # pas d'espace initial
  dt=dx0**2/max(1e-7,1e-9)/100; # 1e-7 ~ diffusivité thermique, 1e-9 ~ diffusivité eau
100=coef.securité
  dt=min(dt,dx0/(htop/4e6)/100); # 4e6~rhocp
  print('dt',dt);

nmax = math.ceil(tmax/dt); # nombre de pas de temps
t = np.zeros(nmax+1); # temps pendant le séchage [s], [0...nmax]

dtg = tmax/6; # durée entre deux graphiques

tic = pc();
#-----
# MODEL INITIALIZATION
#-----
rhodm0 = 1./((1./rhodmstar)+(Xw0/rhowstar)); # masse de matière sèche /m3 avant séchage
[kg-dm/m3]
V0tot = math.pi*( Rayon**2 )*DemiHauteur; # volume du domaine avant séchage [m3]
mdmt0 = rhodm0 * V0tot; # masse totale de la matière sèche (avant séchage) [kg-
dm]

r = np.zeros((I+1,J+1)); # 'centre' des cellules [0...I,0...J] position de T et Xw
z = np.zeros((I+1,J+1));
for i in range(1,I+1):
  for j in range(1,J+1):
    r[i,j] = Rayon*(i-0.5)/(I-0.5);
    z[i,j] = DemiHauteur*(j-1)/(J-1);
zm = z[1,Jm];

```



```

R = np.zeros((I+1+1,J+1+1)); # coin en bas à gauche # [0...I+1,0...J+1]
Z = np.zeros((I+1+1,J+1+1));
R0 = np.zeros((I+1+1,J+1+1));
Z0 = np.zeros((I+1+1,J+1+1));
for i in range(1,I+1):
    for j in range(1,J+1+1):
        R[i,j] = Rayon * ( (i-1)/(I-0.5) );
R[I+1,1:J+1+1] = Rayon;
for i in range(1,I+1+1):
    for j in range(1+1,J+1):
        Z[i,j] = DemiHauteur*(j-1.5)/(J-1);
Z[1:I+1+1,J+1] = DemiHauteur;
for i in range(1,I+1+1):
    for j in range(1,J+1+1):
        R0[i,j] = R[i,j];
        Z0[i,j] = Z[i,j];

dS = np.zeros((I+1,J+1+1)); # aire [m2] face du bas cellule # [0...I,0...J+1]
dR = np.zeros((I+1,J+1+1)); # pas radial [m] de la cellule # [0...I,0...J+1]
dZ = np.zeros((I+1+1,J+1)); # épaisseur [m] cellule face gauche # [0...I+1,0...J]

dS0 = np.zeros((I+1,J+1+1)); # valeurs initiales
dR0 = np.zeros((I+1,J+1+1));
dZ0 = np.zeros((I+1+1,J+1));

for i in range(1,I+1):
    for j in range(1,J+1+1):
        dR[i,j] = R[i+1,j]-R[i,j];
        dR0[i,j] = dR[i,j]
        dS[i,j] = math.pi*(R[i+1,j]**2-R[i,j]**2);
        dS0[i,j] = dS[i,j]
for i in range(1,I+1+1):
    for j in range(1,J+1):
        dZ[i,j] = Z[i,j+1]-Z[i,j];
        dZ0[i,j] = dZ[i,j];

# abscisses et ordonnées de la grille des figures 2D
abscisses = np.zeros(I+1+1);
ordonnees = np.zeros(J+1+1);
for i in range(I+1+1):
    abscisses[i] = R[i,1];
for j in range(J+1+1):
    ordonnees[j] = Z[1,j];

V = np.zeros((I+1,J+1)); # volume cellule [m3]
V0 = np.zeros((I+1,J+1)); # volume initial cellule [m3]
rhodm = np.zeros((I+1,J+1)); # masse de matière sèche /m3 cellule [kg-dm/m3]
mdm = np.zeros((I+1,J+1)); # masse de matière sèche cellule [kg-dm]
T = np.zeros((I+1,J+1)); # température cellule [K]
dT = np.zeros((I+1,J+1)); # variation de la température cellule [K]
Xw = np.zeros((I+1,J+1)); # teneur en eau [kg-w/kg-dm]
dXw = np.zeros((I+1,J+1)); # variation de teneur en eau [kg-w/kg-dm]

for i in range(1,I+1):

```

```

for j in range(1,J+1):
    V[i,j] = math.pi*(R[i+1,j]**2-R[i,j]**2)*(Z[i,j+1]-Z[i,j]);
    V0[i,j] = V[i,j];
    rhodm[i,j] = rhodm0;
    mdm[i,j] = rhodm0 * V[i,j];
    T[i,j] = T0;
    Xw[i,j] = Xw0;

phiTz = np.zeros((I+1,J+1+1)); # flux axial de chaleur [J/s] face du bas # [0...I,0...J+1]
phiTr = np.zeros((I+1+1,J+1)); # flux radial de chaleur[J/s] face gauche # [0...I+1,0...J]

phiXz = np.zeros((I+1,J+1+1)); # flux axial d'eau [kg-w/s] face du bas # [0...I,0...J+1]
phiXr = np.zeros((I+1+1,J+1)); # flux radial d'eau [kg-w/s] face gauche # [0...I+1,0...J]

rho = np.zeros((I+1,J+1)); # masse volumique de la matrice (kg/m3)
w = np.zeros((I+1,J+1)); # fraction MASSIQUE d'eau dans la matrice [-]
#-----
# OUTPUT FILE CONTAINING ONE-MINUTE RESULTS
#-----
outfile = open('caseH__yacon20221122c_evolution.txt', 'w');
Xw_moyenne = np.zeros(nmax+1); # teneur en eau [kg-w/kg-dm], [0...nmax]
Xw_moyenne[0] = Xw0;

print('\n','t[n] = {:.4e}, Xw_moyenne[n] = {:.8e}'.format( 0,Xw_moyenne[0] ));
EVOLUTIONS = np.zeros(1+25);
outfile.write(' COLONNE_VIDE t Xw Xw* MR H D S_LATERALE S_SUPERIEURE
S_TOTALE V T_positionA Xw_positionA Dw_o_positionA Dw_i_positionA Aw_positionA T_positionB
Xw_positionB Dw_o_positionB Dw_i_positionB Aw_positionB T_positionC Xw_positionC
Dw_o_positionC Dw_i_positionC Aw_positionC \n');
# temps de séchage [s]
EVOLUTIONS[1] = t[0];
# valeur moyenne de la teneur en eau [kg-w/kg-dm]
EVOLUTIONS[2] = Xw0;
# valeur adimensionnelle de la teneur en eau (Xwstar)
EVOLUTIONS[3] = Xw0/Xw0;
# 'moisture ratio' (MR)
EVOLUTIONS[4] = (Xw0-Xweq)/(Xw0-Xweq);
# hauteur à l'axe [m]
EVOLUTIONS[5] = Hauteur;
# diamètre à mi-hauteur [m]
EVOLUTIONS[6] = 2. * Rayon;
# surface latérale [m2]
for j in range(1,J+1):
    EVOLUTIONS[7] = EVOLUTIONS[7] + 2 * math.pi * R[I+1,j] * ( Z[I+1,j+1] - Z[I+1,j] );
EVOLUTIONS[7] = (1+1) * EVOLUTIONS[7];
# surface supérieure [m2]
for i in range(1,I+1):
    cosTHETA = ( R[i+1,J+1] - R[i,J+1] ) / math.sqrt( ( R[i+1,J+1] - R[i,J+1] )**2 + ( Z[i,J+1]
- Z[i+1,J+1] )**2 );
    EVOLUTIONS[8] = EVOLUTIONS[8] + ( 2 * math.pi / cosTHETA / 2 ) * ( R[i+1,J+1]**2
- R[i,J+1]**2 );
# surface totale [m2]
EVOLUTIONS[9] = EVOLUTIONS[7] + 2 * EVOLUTIONS[8];
# volume total [m3]
for i in range(1,I+1):

```

```

for j in range(1,J+1):
    EVOLUTIONS[10] = EVOLUTIONS[10] + V[i,j];
# température, teneur en eau, diffusivité et activité de l'eau   trois positions
EVOLUTIONS[11] = T0; # T_A
EVOLUTIONS[12] = Xw0; # Xw_A
EVOLUTIONS[13] = Dw(T0,Xw0); # Dw_o_A
EVOLUTIONS[14] = Dw(T0,Xw0); # Dw_i_A
EVOLUTIONS[15] = min(1,Aw(Xw0)); # Aw_A
EVOLUTIONS[16] = T0; # T_B
EVOLUTIONS[17] = Xw0; # Xw_B
EVOLUTIONS[18] = Dw(T0,Xw0); # Dw_o_B
EVOLUTIONS[19] = Dw(T0,Xw0); # Dw_i_B
EVOLUTIONS[20] = min(1,Aw(Xw0)); # Aw_B
EVOLUTIONS[21] = T0; # T_C
EVOLUTIONS[22] = Xw0; # Xw_C
EVOLUTIONS[23] = Dw(T0,Xw0); # Dw_o_C
EVOLUTIONS[24] = Dw(T0,Xw0); # Dw_o_C
EVOLUTIONS[25] = min(1,Aw(Xw0)); # Aw_C

for column in EVOLUTIONS: #
    outfile.write(' %.15e' % column); # remplissage du fichier de sortie
outfile.write('\n'); #

#-----DEBUT DE LA BOUCLE SUR LE TEMPS-----#
tg=0; ns=0;
for n in range(1,nmax+1):
    t[n] = n * dt;
# print('\n','t[n] = {:.4e}'.format( t[n] ));
for i in range(1,I+1):
    for j in range(1,J+1):
        rhodm[i,j] = mdm[i,j]/V[i,j];
        rho[i,j] = rhodm[i,j]*(1+ Xw[i,j] );
        w[i,j] = Xw[i,j]/(1+Xw[i,j]);

# bilan masse
for i in range(1,I+1): # 1, 2, 3...I flux vertical eau
    for j in range(2,J+1): # 2, 3, 4...J faces internes basses des cellules
        rhodm_moy = ( rhodm[i,j-1] + rhodm[i,j] )*0.5;
        Dw_moy = ( Dw(T[i,j-1],Xw[i,j-1]) + Dw(T[i,j],Xw[i,j]))*0.5;
        phiXz[i,j]=dS[i,j]*Dw_moy*rhodm_moy*(Xw[i,j-1]-Xw[i,j])/(z[i,j]-z[i,j-1]);
for j in range(1,J+1): # 1, 2, 3...J flux radial eau
    for i in range(2,I+1): # 2, 3, 4...I faces internes gauche des cellules
        rhodm_moy = ( rhodm[i-1,j] + rhodm[i,j] )*0.5;
        Dw_moy = ( Dw(T[i-1,j],Xw[i-1,j]) + Dw(T[i,j],Xw[i,j]))*0.5;
        phiXr[i,j] = 2*math.pi*dZ[i,j]*Dw_moy*rhodm_moy*(Xw[i-1,j]-
Xw[i,j])/np.log(r[i,j]/r[i-1,j]);
for i in range(1,I+1): # 1, 2, 3...I interface Sinf/Ssupranche
    Cwsat_T = Cwsat(T[i,1]);
    aw_Xw = min(1,Aw(Xw[i,1]));
    phiXz[i,1] = -dS[i,1]*hbot*k_h*(aw_Xw*Cwsat_T-RH*Cwsat_Ta);
    Cwsat_T = Cwsat(T[i,J]);
    aw_Xw = min(1,Aw(Xw[i,J]));
    phiXz[i,J+1] = dS[i,J+1]*htop*k_h*(aw_Xw*Cwsat_T-RH*Cwsat_Ta);
for j in range(1,J+1): # 1, 2, 3...J axe et interface laterale tranche
    phiXr[1,j] = 0.;

```

```

Cwsat_T = Cwsat(T[I,j]);
aw_Xw = min(1, Aw(Xw[I,j]));
phiXr[I+1,j] = 2*math.pi*r[I,j]*dZ[I+1,j]*hlat*k_h*(aw_Xw*Cwsat_T-RH*Cwsat_Ta)
for i in range(1,I+1):
    for j in range(1,J+1):
        dXw[i,j] = ( ( phiXz[i,j] - phiXz[i,j+1] ) +
            ( phiXr[i,j] - phiXr[i+1,j] ) ) * dt / mdm[i,j];
        Xw[i,j] = min(Xw0,max(Xweq,Xw[i,j]+dXw[i,j]));

# bilan energy
for i in range(1,I+1):      # 1, 2, 3...I flux axial de chaleur
    for j in range(2,J+1):  # 2, 3, 4...J face internes basses des cellules
        Lambda_moy = ( Lambda(T[i,j-1],Xw[i,j-1]) + Lambda(T[i,j],Xw[i,j]) )*0.5;
        phiTz[i,j] = dS[i,j] * Lambda_moy * ( T[i,j-1] - T[i,j] ) / ( z[i,j] - z[i,j-1] );
for i in range(1,I+1):      # 1, 2, 3...I interface Sinf/Ssuptranche
    phiTz[i,1] = 0;
    phiTz[i,1] = -dS[i,1] * hbot * ( T[i,1] - Ta ) + Lv * phiXz[i,1]; #----- Artemio:
correction
    phiTz[i,J+1] = dS[i,J+1] * htop * ( T[i,J] - Ta ) + Lv * phiXz[i,J+1];

for j in range(1,J+1):      # 1, 2, 3...J flux radial de chaleur
    for i in range(2,I+1):  # 2, 3, 4...I
        Lambda_moy = ( Lambda(T[i-1,j],Xw[i-1,j]) + Lambda(T[i,j],Xw[i,j]) )*0.5;
        phiTr[i,j] = 2*math.pi*dZ[i,j]*Lambda_moy*(T[i-1,j]-T[i,j])/np.log(r[i,j]/r[i-1,j]);
for j in range(1,J+1):      # 1, 2, 3...J axe et interface laterale tranche
    phiTr[1,j] = 0.;
    phiTr[I+1,j] = 2*math.pi*r[I,j]*dZ[I+1,j]*hlat*(T[I,j]-Ta)+Lv*phiXr[I+1,j];

for i in range(1,I+1):
    for j in range(1,J+1):
        dT[i,j] = ( ( phiTz[i,j] - phiTz[i,j+1] ) +
            ( phiTr[i,j] - phiTr[i+1,j] ) ) * dt / mdm[i,j] / ( Cpdm + Xw[i,j] * Cpw )
        T[i,j] = min(Ta,max(T0,T[i,j]+dT[i,j]));

# retrécissement : colonne i=1:rectangle, autres colonnes:trapèze
#
# a) pour toutes les cellules: on actualise leur volume:
for i in range(1,I+1):
    for j in range(1,J+1):
        V[i,j] = mdm[i,j]*(1/rhodmstar+Xw[i,j]/rhowstar);
#
# b) on calcule la largeur dR de la cellule à mi-hauteur à l'axe:
dR[1,Jm] = dR0[1,Jm]*(V[1,Jm]/V0[1,Jm])**rradial;
#
# c) pour cette cellule, on actualise la coordonnée R du sommet "à droite":
R[2,Jm] = dR[1,Jm];

# d) pour cette cellule, on actualise la surface dS:
dS[1,Jm] = math.pi*R[2,Jm]**2;

# pour toutes les autres cellules à l'axe:
for j in range(1,J+1+1):
# e) on attribue la même largeur dR que à la mi-hauteur:
dR[1,j] = dR[1,Jm];

```

```

# f) on attribue la même coordonnée R à tous les sommets "à droite":
    R[2,j] = R[2,Jm];

# g) on attribue la même surface dS:
    dS[1,j] = dS[1,Jm];

# h) pour toutes les cellules à l'axe, on calcule la hauteur dZ (rectangles):
    for j in range(1,J+1):
        dZ[1,j] = V[1,j]/dS[1,j];
        dZ[2,j] = dZ[1,j];

# pour toutes les autres colonnes:
    for i in range(2,I+1):
# i) on calcule la largeur dR de la cellule à mi-hauteur:
        dR[i,Jm] = dR0[i,Jm]*(V[i,Jm]/V0[i,Jm])**rradial;

# j) pour la cellule à mi-hauteur, on actualise la coordonnée R du sommet "à droite":
        R[i+1,Jm] = R[i,Jm] + dR[i,Jm];

# k) pour la cellule à mi-hauteur, on calcule la surface dS:
        dS[i,Jm] = math.pi*( R[i+1,Jm]**2-R[i,Jm]**2 );

# L) on attribue la même largeur dR que à la mi-hauteur:
        for j in range(1,J+1+1):
            dR[i,j] = dR[i,Jm];

# m) on attribue la même coordonnée R que à la mi-hauteur:
            R[i+1,j] = R[i+1,Jm];

# n) on attribue la même surface dS que à la mi-hauteur
            dS[i,j] = dS[i,Jm];

# o) on calcule la hauteur dZ:
        for i in range(2,I+1):
            C1 = 2*math.pi*( (1/6)*R[i+1,1]**3 + (1/3)*R[i,1]**3 - (1/2)*R[i+1,1]*R[i,1]**2 ) / (
R[i+1,1]-R[i,1] );
            C2 = 2*math.pi*( (1/6)*R[i,1]**3 + (1/3)*R[i+1,1]**3 - (1/2)*R[i,1]*R[i+1,1]**2 ) / (
R[i+1,1]-R[i,1] );
            for j in range(1,J+1):
                dZ[i+1,j] = max( rmax*dZ0[i,j], ( V[i,j] - C1 * dZ[i,j] ) / C2 );

# p) pour toutes les autres colonnes:
# on calcule les coordonnées Z (voir Denis):
        for i in range(1,I+1+1):
            for j in range(1,J+1):
                Z[i,j+1]=Z[i,j]+dZ[i,j];

# (mise à jour des positions z et r 'centres' des cellules
    for i in range(1,I):
        # 1, 2, 3...I-1
        r[i,1] = ( R[i,1] + R[i+1,1] )/2.;
        z[i,1]=0
        z[i,1] = ( Z[i,1] + Z[i+1,1] )/2.;
    for j in range(2,J):
        # 2, 3, 4...J-1
        r[i,j] = ( R[i,j] + R[i,j+1] + R[i+1,j] + R[i+1,j+1] )/4.;
        z[i,j] = ( Z[i,j] + Z[i,j+1] + Z[i+1,j] + Z[i+1,j+1] )/4.;

```

```

r[i,J] = ( R[i,J+1] + R[i+1,J+1] )/2.;
z[i,J] = ( Z[i,J+1] + Z[i+1,J+1] )/2.;
for j in range(2,J): # 2, 3, 4...J-1
    r[I,j] = ( R[I+1,j] + R[I+1,j+1] )/2.;
    z[I,j] = ( Z[I+1,j] + Z[I+1,j+1] )/2.;
r[I,1] = R[I+1,1];
z[I,1] = Z[I+1,1];
r[I,J] = R[I+1,J+1];
z[I,J] = Z[I+1,J+1];

#-----
# OUTPUT FILE CONTAINING ONE-MINUTE RESULTS
#-----

if ( ( t[n] % 60 ) < 1e-6 ): # toutes les minutes
    for i in range(1,I+1):
        for j in range(1,J+1):
            # masse d'eau totale [kg-w]
            Xw_moyenne[n] = Xw_moyenne[n] + mdm[i,j]*Xw[i,j];
        # temps de séchage [s]
        EVOLUTIONS[1] = t[n];
        # valeur moyenne de la teneur en eau [kg-w/kg-dm]
        EVOLUTIONS[2] = Xw_moyenne[n]/mdmt0;
        # valeur adimensionnelle de la teneur en eau (Xwstar)
        EVOLUTIONS[3] = Xw_moyenne[n]/mdmt0/Xw0;
        # 'moisture ratio' (MR)
        EVOLUTIONS[4] = (Xw_moyenne[n]/mdmt0-Xweq)/(Xw0-Xweq);
        # hauteur à l'axe [m]
        EVOLUTIONS[5] = (1+1) * ( Z[1,J+1] - Z[1,1] );
        # diamètre à mi-hauteur [m]
        EVOLUTIONS[6] = 2 * R[I+1,Jm];
        # surface latérale [m2]
        EVOLUTIONS[7] = 0;
        for j in range(1,J+1):
            EVOLUTIONS[7] = EVOLUTIONS[7] + 2 * math.pi * R[I+1,j] * ( Z[I+1,j+1] -
Z[I+1,j] );
            EVOLUTIONS[7] = (1+1) * EVOLUTIONS[7];
            # surface supérieure [m2]
            EVOLUTIONS[8] = 0;
            for i in range(1,I+1):
                cosTHETA = ( R[i+1,J+1] - R[i,J+1] ) / math.sqrt( ( R[i+1,J+1] - R[i,J+1] )**2 + (
Z[i,J+1] - Z[i+1,J+1] )**2 );
                EVOLUTIONS[8] = EVOLUTIONS[8] + ( 2 * math.pi / cosTHETA / 2 ) * (
R[i+1,J+1]**2 - R[i,J+1]**2 );
                # surface totale [m2]
                EVOLUTIONS[9] = EVOLUTIONS[7] + 2 * EVOLUTIONS[8];
                # volume total [m3]
                EVOLUTIONS[10] = 0;
                for i in range(1,I+1):
                    for j in range(1,J+1):
                        EVOLUTIONS[10] = EVOLUTIONS[10] + V[i,j];
                    # température, teneur en eau, diffusivité et activité de l'eau à trois positions
                    EVOLUTIONS[11] = T[1,J]; # T_A
                    EVOLUTIONS[12] = Xw[1,J]; # Xw_A

```

```

EVOLUTIONS[13] = Dw(T[1,J],Xw[1,J]); # Dw_o_A
EVOLUTIONS[14] = Dw(T[1,J],Xw[1,J]); # Dw_i_A
EVOLUTIONS[15] = min(1,Aw(Xw[1,J])); # Aw_A
EVOLUTIONS[16] = T[I,Jm]; # T_B
EVOLUTIONS[17] = Xw[I,Jm]; # Xw_B
EVOLUTIONS[18] = Dw(T[I,Jm],Xw[I,Jm]); # Dw_o_B
EVOLUTIONS[19] = Dw(T[I,Jm],Xw[I,Jm]); # Dw_i_B
EVOLUTIONS[20] = min(1,Aw(Xw[I,Jm])); # Aw_B
EVOLUTIONS[21] = T[1,Jm]; # T_C
EVOLUTIONS[22] = Xw[1,Jm]; # Xw_C
EVOLUTIONS[23] = Dw(T[1,Jm],Xw[1,Jm]); # Dw_o_C
EVOLUTIONS[24] = Dw(T[1,Jm],Xw[1,Jm]); # Dw_i_C
EVOLUTIONS[25] = min(1,Aw(Xw[1,Jm])); # Aw_C

for column in EVOLUTIONS: #
    outfile.write(' %.15e' % column); # remplissage du fichier de sortie
outfile.write('\n'); #

#-----FIGURES 2D-----#
if t[n] >= tg :
    tg+= dtg;
# print('t',t)

#-----TEMPERATURE ET TENEUR EN EAU-----#
# "Add a subplot to the current figure."
fig, (ax0, ax1) = matplotlib.pyplot.subplots(nrows=2, sharex=False);
# "Add a centered suptitle to the figure."
time = tg-dtg;
fig.suptitle('TIME: {} minutes'.format(time/60),x=0.425)
# "Set a title for the axes."
ax0.set_title('temperature [degC]');
ax1.set_title('water content [kg-w/kg-dm]');
# "Set the x-axis and y-axis view limits."
ax0.set_xlim((0, Rayon));
ax0.set_ylim((0, DemiHauteur));
ax1.set_xlim((0, Rayon));
ax1.set_ylim((0, DemiHauteur));
Xmajors = [0, Rayon];
Xminors = abscisses;
Ymajors = [0, DemiHauteur];
Yminors = ordonnees;
# "Set the locator of the major X and Y tickers."
ax0.xaxis.set_major_locator(matplotlib.ticker.FixedLocator(Xmajors));
ax0.yaxis.set_major_locator(matplotlib.ticker.FixedLocator(Ymajors));
ax1.xaxis.set_major_locator(matplotlib.ticker.FixedLocator(Xmajors));
ax1.yaxis.set_major_locator(matplotlib.ticker.FixedLocator(Ymajors));
# "Set the formatter of the major X and Y tickers."
ax0.xaxis.set_major_formatter(FormatStrFormatter('%0.2f'));
ax0.yaxis.set_major_formatter(FormatStrFormatter('%0.4f'));
ax1.xaxis.set_major_formatter(FormatStrFormatter('%0.2f'));
ax1.yaxis.set_major_formatter(FormatStrFormatter('%0.4f'));
# "Set the locator of the minor X and Y tickers."
ax0.xaxis.set_minor_locator(matplotlib.ticker.FixedLocator(Xminors));
ax0.yaxis.set_minor_locator(matplotlib.ticker.FixedLocator(Yminors));
ax1.xaxis.set_minor_locator(matplotlib.ticker.FixedLocator(Xminors));

```

```

ax1.yaxis.set_minor_locator(matplotlib.ticker.FixedLocator(Yminors));
matplotlib.pyplot.subplots_adjust(left=0.125, bottom=0.1, right=0.9, top=0.9,
wspace=0.2, hspace=0.35);
matplotlib.pyplot.subplots_adjust(left=0.125, bottom=0.1, right=0.9, top=0.85,
wspace=0.2, hspace=0.35);
# voici un rappel visuel des volumes élémentaires AVANT le séchage
for i in range(1,I+1):
    for j in range(1,J+1):
        ax0.fill([R0[i,j],R0[i+1,j],R0[i+1,j+1],R0[i,j+1]],
                [Z0[i,j],Z0[i+1,j],Z0[i+1,j+1],Z0[i,j+1]],
                closed=True, # OK pour fermer le polygone
                fill=False, # NON pour le remplissage
                linewidth=0.25, # largeur des traits
                edgecolor='lightgray'); # couler des traits
        ax1.fill([R0[i,j],R0[i+1,j],R0[i+1,j+1],R0[i,j+1]],
                [Z0[i,j],Z0[i+1,j],Z0[i+1,j+1],Z0[i,j+1]],
                closed=True, # OK pour fermer le polygone
                fill=False, # NON pour le remplissage
                linewidth=0.25, # largeur des traits
                edgecolor='lightgray'); # couler des traits
# voici les volumes élémentaires PENDANT le séchage
for i in range(1,I+1):
    for j in range(1,J+1):
        ax0.fill([R[i,j],R[i+1,j],R[i+1,j+1],R[i,j+1]],
                [Z[i,j],Z[i+1,j],Z[i+1,j+1],Z[i,j+1]],
                closed=True, # OK pour fermer le polygone
                fill=False, # NON pour le remplissage
                linewidth=0.1, # largeur des traits
                edgecolor='black'); # couler des traits
        ax1.fill([R[i,j],R[i+1,j],R[i+1,j+1],R[i,j+1]],
                [Z[i,j],Z[i+1,j],Z[i+1,j+1],Z[i,j+1]],
                closed=True, # OK pour fermer le polygone
                fill=False, # NON pour le remplissage
                linewidth=0.1, # largeur des traits
                edgecolor='black'); # couler des traits
# voici les champs 2D de certaines variables PENDANT le séchage
# "Mask an array where equal to a given value."
pcolorT = np.ma.masked_equal(T,0);
pcolorXw = np.ma.masked_equal(Xw,0);
# "Create a pseudocolor plot with a non-regular rectangular grid."
FIGURE0 = ax0.pcolor(R, Z, pcolorT, cmap='jet', vmin=T0, vmax=Ta);
FIGURE1 = ax1.pcolor(R, Z, pcolorXw, cmap='jet', vmin=0, vmax=Xw0);
# "Add a colorbar to a plot."
matplotlib.pyplot.colorbar(FIGURE0, ax=ax0);
matplotlib.pyplot.colorbar(FIGURE1, ax=ax1);
# "Display all open figures."
# matplotlib.pyplot.show();
# "Save the current figure."
if time == 0:
    fname = 'Temperature_Moisture_0h.png';
if time == 3600:
    fname = 'Temperature_Moisture_1h.png';
if time == 7200:
    fname = 'Temperature_Moisture_2h.png';
if time == 10800:

```



```

        fname = 'Temperature_Moisture_3h.png';
    if time == 14400:
        fname = 'Temperature_Moisture_4h.png';
    if time == 18000:
        fname = 'Temperature_Moisture_5h.png';
    if time == 21600:
        fname = 'Temperature_Moisture_6h.png';
    matplotlib.pyplot.savefig(fname, dpi=300);

#-----DIFFUSIVITE ET ACTIVITE DE L'EAU-----#
# "Add a subplot to the current figure."
    fig, (ax0, ax1) = matplotlib.pyplot.subplots(nrows=2, sharex=False);
# "Add a centered supitle to the figure."
    time = tg-dtg;
    fig.suptitle('TIME: {} minutes'.format(time/60),x=0.425)
# "Set a title for the axes."
    ax0.set_title('water activity [-]');
    ax1.set_title('water diffusivity [m2/s]');
# "Set the x-axis and y-axis view limits."
    ax0.set_xlim((0, Rayon));
    ax0.set_ylim((0, DemiHauteur));
    ax1.set_xlim((0, Rayon));
    ax1.set_ylim((0, DemiHauteur));
    Xmajors = [0, Rayon];
    Xminors = abscisses;
    Ymajors = [0, DemiHauteur];
    Yminors = ordonnees;
# "Set the locator of the major X and Y tickers."
    ax0.xaxis.set_major_locator(matplotlib.ticker.FixedLocator(Xmajors));
    ax0.yaxis.set_major_locator(matplotlib.ticker.FixedLocator(Ymajors));
    ax1.xaxis.set_major_locator(matplotlib.ticker.FixedLocator(Xmajors));
    ax1.yaxis.set_major_locator(matplotlib.ticker.FixedLocator(Ymajors));
# "Set the formatter of the major X and Y tickers."
    ax0.xaxis.set_major_formatter(FormatStrFormatter('%0.2f'));
    ax0.yaxis.set_major_formatter(FormatStrFormatter('%0.4f'));
    ax1.xaxis.set_major_formatter(FormatStrFormatter('%0.2f'));
    ax1.yaxis.set_major_formatter(FormatStrFormatter('%0.4f'));
# "Set the locator of the minor X and Y tickers."
    ax0.xaxis.set_minor_locator(matplotlib.ticker.FixedLocator(Xminors));
    ax0.yaxis.set_minor_locator(matplotlib.ticker.FixedLocator(Yminors));
    ax1.xaxis.set_minor_locator(matplotlib.ticker.FixedLocator(Xminors));
    ax1.yaxis.set_minor_locator(matplotlib.ticker.FixedLocator(Yminors));
    matplotlib.pyplot.subplots_adjust(left=0.125, bottom=0.1, right=0.9, top=0.9,
wspace=0.2, hspace=0.35);
    matplotlib.pyplot.subplots_adjust(left=0.125, bottom=0.1, right=0.9, top=0.85,
wspace=0.2, hspace=0.35);
# voici un rappel visuel des volumes élémentaires AVANT le séchage
    for i in range(1,I+1):
        for j in range(1,J+1):
            ax0.fill([R0[i,j],R0[i+1,j],R0[i+1,j+1],R0[i,j+1]],
                    [Z0[i,j],Z0[i+1,j],Z0[i+1,j+1],Z0[i,j+1]],
                    closed=True, # OK pour fermer le polygone
                    fill=False, # NON pour le remplissage
                    linewidth=0.25, # largeur des traits
                    edgecolor='lightgray'); # couler des traits

```

```

ax1.fill([R0[i,j],R0[i+1,j],R0[i+1,j+1],R0[i,j+1]],
         [Z0[i,j],Z0[i+1,j],Z0[i+1,j+1],Z0[i,j+1]],
         closed=True,      # OK pour fermer le polygone
         fill=False,       # NON pour le remplissage
         linewidth=0.25,   # largeur des traits
         edgecolor='lightgray'); # couler des traits
for i in range(1,I+1):
    for j in range(1,J+1):
        DwTXw[i,j] = Dw(T[i,j],Xw[i,j]);
        AwXw[i,j] = min(1,Aw(Xw[i,j]));
# voici les volumes élémentaires PENDANT le séchage
for i in range(1,I+1):
    for j in range(1,J+1):
        ax0.fill([R[i,j],R[i+1,j],R[i+1,j+1],R[i,j+1]],
                 [Z[i,j],Z[i+1,j],Z[i+1,j+1],Z[i,j+1]],
                 closed=True,      # OK pour fermer le polygone
                 fill=False,       # NON pour le remplissage
                 linewidth=0.1,    # largeur des traits
                 edgecolor='black'); # couler des traits
        ax1.fill([R[i,j],R[i+1,j],R[i+1,j+1],R[i,j+1]],
                 [Z[i,j],Z[i+1,j],Z[i+1,j+1],Z[i,j+1]],
                 closed=True,      # OK pour fermer le polygone
                 fill=False,       # NON pour le remplissage
                 linewidth=0.1,    # largeur des traits
                 edgecolor='black'); # couler des traits
# voici les champs 2D de certaines variables PENDANT le séchage
# "Mask an array where equal to a given value."
pcolorAw = np.ma.masked_equal(AwXw,0);
pcolorDw = np.ma.masked_equal(DwTXw,0);
# "Create a pseudocolor plot with a non-regular rectangular grid."
FIGURE0 = ax0.pcolor(R, Z, pcolorAw, cmap='jet', vmin=0, vmax=1);
FIGURE1 = ax1.pcolor(R, Z, pcolorDw, cmap='jet', vmin=0, vmax=1e-10);
# "Add a colorbar to a plot."
matplotlib.pyplot.colorbar(FIGURE0, ax=ax0);
matplotlib.pyplot.colorbar(FIGURE1, ax=ax1);
# "Display all open figures."
# matplotlib.pyplot.show();
# "Save the current figure."
if time == 0:
    fname = 'Activity_Diffusivity_0h.png';
if time == 3600:
    fname = 'Activity_Diffusivity_1h.png';
if time == 7200:
    fname = 'Activity_Diffusivity_2h.png';
if time == 10800:
    fname = 'Activity_Diffusivity_3h.png';
if time == 14400:
    fname = 'Activity_Diffusivity_4h.png';
if time == 18000:
    fname = 'Activity_Diffusivity_5h.png';
if time == 21600:
    fname = 'Activity_Diffusivity_6h.png';
matplotlib.pyplot.savefig(fname, dpi=300);

# ----- FIN DE LA BOUCLE SUR LE TEMPS -----

```

```

# suivi de la température et de la concentration d'eau
# à trois positions choisies (voir article FOODSIM'2020)
print('\n', 'T_A = {:.15e}, T_B = {:.15e}, T_C = {:.15e}'.format( EVOLUTIONS[11],
EVOLUTIONS[16], EVOLUTIONS[21] ) );
print( 'Xw_A = {:.15e}, Xw_B = {:.15e}, Xw_C = {:.15e}'.format( EVOLUTIONS[12],
EVOLUTIONS[17], EVOLUTIONS[22] ) );
print( 'Dw_A = {:.15e}, Dw_B = {:.15e}, Dw_C = {:.15e}'.format(
EVOLUTIONS[13]+EVOLUTIONS[14], EVOLUTIONS[18]+EVOLUTIONS[19],
EVOLUTIONS[23]+EVOLUTIONS[24] ) );
print( 'Aw_A = {:.15e}, Aw_B = {:.15e}, Aw_C = {:.15e}'.format( EVOLUTIONS[15],
EVOLUTIONS[20], EVOLUTIONS[25] ) );

# ----- MESURE DU TEMPS de calcul -----
toc = pc();

#-----RESULTATS TOUTES LES MINUTES (CLOTURE DE FICHER)----#
outfile.close();

print('\n','temps d execution = {:.2e} [s]'.format( toc-tic ));

```

APÊNDICE F- Testes de sensibilidade

Tabela F1. Relação completa dos testes de sensibilidade. Parâmetros em negrito representam as variações em relação ao caso base (A).

Caso	T_{ar} [°C]	UR [%]	D_0 [m ² s ⁻¹]	D_i [m ² s ⁻¹]	$E_0=E_i$ [kJ mol ⁻¹]	h [Wm ⁻² K ⁻¹]	Malha [j x i]	Δt [s]
A	60	20	1 10⁻¹³	1.7 10⁻¹⁰	30	33	5 x 30	10⁻²
B1	60	20	-50%	1.7 10 ⁻¹⁰	30	33	5 x 30	10 ⁻²
B2	60	20	+50%	1.7 10 ⁻¹⁰	30	33	5 x 30	10 ⁻²
B3	60	20	1 10 ⁻¹³	-50%	30	33	5 x 30	10 ⁻²
B4	60	20	1 10 ⁻¹³	-10%	30	33	5 x 30	10 ⁻²
B5	60	20	1 10 ⁻¹³	+10%	30	33	5 x 30	10 ⁻²
B6	60	20	1 10 ⁻¹³	+50%	30	33	5 x 30	10 ⁻²
B7	60	20	1 10 ⁻¹³	1.7 10 ⁻¹⁰	-50%	33	5 x 30	10 ⁻²
B8	60	20	1 10 ⁻¹³	1.7 10 ⁻¹⁰	-10%	33	5 x 30	10 ⁻²
B9	60	20	1 10 ⁻¹³	1.7 10 ⁻¹⁰	+10%	33	5 x 30	10 ⁻²
B10	60	20	1 10 ⁻¹³	1.7 10 ⁻¹⁰	+50%	33	5 x 30	10 ⁻²
C1	60	20	1 10 ⁻¹³	1.7 10 ⁻¹⁰	30	- 50%	5 x 30	10 ⁻²
C2	60	20	1 10 ⁻¹³	1.7 10 ⁻¹⁰	30	- 20%	5 x 30	10 ⁻²
C3	60	20	1 10 ⁻¹³	1.7 10 ⁻¹⁰	30	- 10%	5 x 30	10 ⁻²
C4	60	20	1 10 ⁻¹³	1.7 10 ⁻¹⁰	30	+10%	5 x 30	10 ⁻²
C5	60	20	1 10 ⁻¹³	1.7 10 ⁻¹⁰	30	+20%	5 x 30	10 ⁻²
C6	60	20	1 10 ⁻¹³	1.7 10 ⁻¹⁰	30	+50%	5 x 30	10 ⁻²
D1	60	20	1 10 ⁻¹³	1.7 10 ⁻¹⁰	30	33	3 x 25	10 ⁻²
D2	60	20	1 10 ⁻¹³	1.7 10 ⁻¹⁰	30	33	5 x 15	10 ⁻²
D3	60	20	1 10 ⁻¹³	1.7 10 ⁻¹⁰	30	33	7 x 11	10 ⁻²
D4	60	20	1 10 ⁻¹³	1.7 10 ⁻¹⁰	30	33	9 x 8	10 ⁻²
D5	60	20	1 10 ⁻¹³	1.7 10 ⁻¹⁰	30	33	3 x 50	10 ⁻²
D6	60	20	1 10 ⁻¹³	1.7 10 ⁻¹⁰	30	33	7 x 21	10 ⁻²
D7	60	20	1 10 ⁻¹³	1.7 10 ⁻¹⁰	30	33	9 x 17	10 ⁻²
D8	60	20	1 10 ⁻¹³	1.7 10 ⁻¹⁰	30	33	3 x 75	10 ⁻²
D9	60	20	1 10 ⁻¹³	1.7 10 ⁻¹⁰	30	33	5 x 45	10 ⁻²

Tabela F1 (*continuação*). Relação completa dos testes de sensibilidade. Parâmetros em **negrito** representam as variações em relação ao caso base (A).

Teste	T_{ar} [°C]	UR [%]	D_0 [m ² s ⁻¹]	D_i [m ² s ⁻¹]	$E_0=E_i$ [kJ mol ⁻¹]	h [Wm ⁻² K ⁻¹]	Malha [j x i]	Δt [s]
A	60	20	1 10⁻¹³	1.7 10⁻¹⁰	30	33	5 x 30	10⁻²
D10	60	20	1 10 ⁻¹³	1.7 10 ⁻¹⁰	30	33	7x 32	10 ⁻²
D11	60	20	1 10 ⁻¹³	1.7 10 ⁻¹⁰	30	33	9 x 25	10 ⁻²
E1	60	20	1 10 ⁻¹³	1.7 10 ⁻¹⁰	30	33	5 x 30	5 10⁻³
E2	60	20	1 10 ⁻¹³	1.7 10 ⁻¹⁰	30	33	5 x 30	1.5 10⁻²
E3	60	20	1 10 ⁻¹³	1.7 10 ⁻¹⁰	30	33	5 x 30	2 10⁻²
E4	60	20	1 10 ⁻¹³	1.7 10 ⁻¹⁰	30	33	5 x 30	3 10⁻²
E5	60	20	1 10 ⁻¹³	1.7 10 ⁻¹⁰	30	33	5 x 30	4 10⁻²
E6	60	20	1 10 ⁻¹³	1.7 10 ⁻¹⁰	30	33	5 x 30	5 10⁻²
E7	60	20	1 10 ⁻¹³	1.7 10 ⁻¹⁰	30	33	5 x 30	6 10⁻²
E8	60	20	1 10 ⁻¹³	1.7 10 ⁻¹⁰	30	33	5 x 30	8 10⁻²
E9	60	20	1 10 ⁻¹³	1.7 10 ⁻¹⁰	30	33	5 x 30	1 10⁻¹
F	60	30	1 10 ⁻¹³	1.7 10 ⁻¹⁰	30	37	5 x 30	10 ⁻²
G	50	20	1 10 ⁻¹³	1.7 10 ⁻¹⁰	30	31	5 x 30	10 ⁻²
H	50	30	1 10 ⁻¹³	1.7 10 ⁻¹⁰	30	35	5 x 30	10 ⁻²