



FCTUC FACULDADE DE CIÊNCIAS
E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

DEPARTAMENTO DE
ENGENHARIA MECÂNICA

Estudo Laboratorial da Cinética do Processo de Secagem de Frutos em Contexto Industrial

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica na Especialidade de Energia e Ambiente

Autor

Tiago Pereira Henriques

Orientadores

Professor Doutor José Joaquim da Costa

Doutor Vítor Manuel Alves da Silva

Júri

Presidente Professor Doutor Miguel Rosa Oliveira Panão
Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra

Vogais Professor Doutor António Manuel Mendes Raimundo
Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra

Orientador Professor Doutor José Joaquim da Costa
Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra

Colaboração Institucional



Coimbra, Julho, 2015

“A sorte não existe. Aquilo a que chamais sorte é o cuidado com os
pormenores.”

Winston Churchill

Aos meus pais e irmão.

Agradecimentos

No final da etapa mais importante da minha vida até ao momento, existem várias pessoas às quais devo deixar algumas palavras de apreço e agradecimento por tudo o que me proporcionaram nestes últimos anos.

Ao Professor Doutor José Costa pela oportunidade de integrar este trabalho, pelos esclarecimentos prestados, pela preocupação sobre o progresso e os resultados alcançados e pela motivação transmitida para fazer mais e melhor.

Ao Doutor Vítor Silva por toda a disponibilidade demonstrada ao longo do trabalho, por todo o conhecimento e esclarecimentos dados, pela maneira como me cativou e motivou a melhorar, graças à forma sempre intensa com que aborda este tema, e pelo à vontade com que sempre me deixou na hora de marcar os compromissos.

Ao Professor Doutor Rui Figueiredo deixo também uma palavra de gratidão pelo auxílio prestado durante a realização deste trabalho, simplificando o que por vezes se tornou complexo.

Um grande obrigado à Ana Côrte-Real, ao João Costa, à Mafalda Cardoso, à Marta Moura, ao Ricardo Santos, ao Sérgio Miranda e à Sónia Mendes por me acolherem neste grupo, pela amizade demonstrada, por todos os momentos e aventuras que tivemos, dentro e fora do distrito de Coimbra, e por todo o apoio ao longo deste meu percurso académico.

Aos meus amigos Inês Costa, Pedro Lopes, Paulo Cristóvão, Rui Martins e Telmo Simões muito obrigado pela motivação e incentivo que me transmitiram ao longo destes anos, por se preocuparem com as minhas peras nesta fase final, por todos os momentos únicos que proporcionaram, pelos óculos de sol perdidos no mar e por todos os cafés e jantares recheados de tortura psicológica entre nós.

A todos os amigos aos quais eu não me referi particularmente, obrigado por tudo mas peço desculpa, agradecer a todos dava para escrever uma dissertação.

A toda a minha família o meu sincero obrigado. À Avó Lina e ao avô Zé Pires por tudo o que me deram, à avó Belmira e madrinha Armanda pelo interesse e apoio que sempre manifestaram e à família Carreira pelo apoio, incentivo e força que sempre me

transmitiram. Avô Armando e avó Pureza: tenho a certeza que estariam orgulhosos neste momento.

À Lina e ao Beto Correia agradeço a vossa amizade e todo o apoio ao longo destes anos. Na verdade, vocês são família (já perdi a conta ao número de anos que me chamam de genro).

Ao Tomás agradeço pelas interrupções nas tardes/noites de estudo (em que por vezes quase adormeceste à espera que o mano fosse jogar contigo), pelos filmes antes de dormir e por seres o irmão atencioso que és. Embora não pareça, eu tenho muito orgulho em ti miúdo.

Um enorme obrigado aos meus pais por tudo o que me deram ao longo destes anos, por todo o amor e carinho, pela paciência que tiveram, por todos os sacrifícios que fizeram por mim, por me apoiarem sempre e motivarem-me a “levar este barco a bom porto”, mesmo quando as coisas não correram bem por minha culpa. A pessoa que sou hoje é graças a vocês, por todos os valores transmitidos e pela confiança que depositaram em mim. O meu sucesso é vosso também!

E, por fim, mas não menos importante, quero expressar a minha maior gratidão à menina que eu vi crescer e tornar-se mulher: Cátia Correia. Dizem que o sucesso de um homem tem muito a ver com a mulher que ele tem na sua vida, e se eu ultrapassei as dificuldades e consegui triunfar nesta etapa foi por estares ao meu lado. Muito obrigado pelo teu apoio, carinho, incentivo, amor e paciência ao longo destes anos, por todos os momentos únicos que tivemos, por me abrires os olhos nos momentos certos e por seres mais que uma namorada, por seres a minha melhor amiga e a minha confidente. Muito obrigado *Boo!* Agora é a tua vez e eu tenho a certeza que também vais conseguir!

O presente trabalho de investigação foi desenvolvido no âmbito do projeto “Fruit ECO-Drying Line” (F-ECO-DL) nº 23266, financiado pelo POFC-SIIDT em Co-Promoção/QREN.

Resumo

No presente trabalho foi estudada a cinética de secagem de peras em modo contínuo e, especialmente, descontínuo, com o objetivo de integrar o método tradicional de produção de *Pera Passa* num contexto industrial. Realizaram-se ensaios a 40 e 50 °C, com velocidades de escoamento de 1,3 e 2,7 m/s. Verificou-se que a temperatura tem uma maior influência na cinética global quando comparada com a velocidade do ar.

Os resultados experimentais foram comparados com um modelo de difusão baseado na lei de Fick, considerando uma condição convectiva à superfície e raio da amostra e coeficiente de difusão variáveis ao longo dos ensaios. O modelo e os dados experimentais foram ajustados, observando-se uma boa concordância entre ambos. Os coeficientes de transferência de massa obtidos variaram entre $1,9 \times 10^{-7}$ e $3,7 \times 10^{-7}$ m/s, e os coeficientes de difusão calculados situaram-se entre $6,0 \times 10^{-11}$ e $2,5 \times 10^{-9}$ m²/s.

Demonstrou-se ainda que a introdução de interrupções durante o processo permitiu reduzir o tempo efetivo de secagem, não obstante o aumento do tempo total, tendo sido, contudo, verificado que tal apenas acontece quando o período de repouso é suficiente para permitir uma adequada redistribuição do teor de água no interior do fruto.

Palavras-chave: Secagem convectiva, secagem descontínua, transferência de massa, difusão, lei de Fick, *shrinkage*.

Abstract

The present work is focused on the kinetic behavior of pears during drying in continuous and discontinuous mode in order to adapt the traditional drying of *Pera Passa* to an industrial context. The tests were carried out at 40 and 50 °C, with flow rates of 1,3 and 2,7 m/s. It was observed that the temperature has a greater influence on the global kinetics when compared to the air velocity.

The experimental results were compared with the Fick's diffusion model, considering a convective boundary condition and variable radius and diffusion coefficient throughout the tests. The modeled and experimental results fitted with a good agreement. The mass transfer coefficients varied between $1,9 \times 10^{-7}$ and $3,7 \times 10^{-7}$ m/s, while the diffusion coefficients varied between $6,0 \times 10^{-11}$ and $2,5 \times 10^{-9}$ m²/s.

It is shown that the introduction of pauses in the process reduces the effective drying time, despite the increase of the total duration. However, this aspect was verified only when the pauses duration was great enough to guarantee water redistribution inside the fruit in these periods.

Keywords Convective drying, discontinuous drying, mass transfer, diffusion, Fick's law, shrinkage.

Índice

Índice de Figuras.....	xi
Índice de Tabelas	xv
Simbologia e Siglas.....	xvii
Simbologia.....	xvii
Siglas	xviii
1. Introdução.....	1
1.1. Objetivos	1
1.2. Estrutura da Dissertação.....	2
1.3. Conceitos Gerais.....	2
1.4. Condições e Parâmetros de Secagem.....	6
1.5. Métodos e Equipamentos de Secagem.....	9
1.5.1. Equipamentos de Secagem Solar.....	9
1.5.2. Outros Equipamentos de Secagem	11
1.6. Exemplos de Produtos Secados	14
1.7. Pera de <i>São Bartolomeu</i>	15
2. Materiais e Métodos.....	19
2.1. Instalação Experimental.....	19
2.2. Aquisição de Dados	21
2.3. Determinação do Calibre e Humidade Inicial das Peras.....	21
2.4. Determinação do Teor de Equilíbrio	22
2.5. Determinação da Diminuição do Raio (<i>Shrinkage</i>).....	23
2.6. Condições dos Ensaio Realizados	23
3. Resultados e Discussão.....	25
3.1. Dados Iniciais dos Ensaio.....	25
3.2. Teor de Equilíbrio a 50°C e 15%HR.....	26
3.3. Resultados Experimentais	26
3.3.1. Influência da Temperatura	30
3.3.2. Influência da Velocidade do Ar.....	31
3.3.3. Influência do Número de Pausas	32
3.3.4. Influência da Duração das Pausas	33
3.4. Avaliação da Diminuição do Raio (<i>Shrinkage</i>).....	34
3.5. Modelação Matemática.....	36
3.6. Aplicação do Modelo Matemático.....	38
4. Conclusões.....	45
Referências Bibliográficas	47
ANEXO A – Equações de Fick	53
ANEXO B – Velocidades de Escoamento	55
ANEXO C – Representação Gráfica da Aplicação do Modelo de Secagem	57

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Exemplo de curvas isotérmicas de adsorção (A) e dessorção (B)	4
Figura 1.2. Representação esquemática da secagem	5
Figura 1.3. Representação das diferentes fases de secagem	7
Figura 1.4. Classificação de secadores solares	10
Figura 1.5. Pereira da variedade <i>São Bartolomeu</i>	15
Figura 1.6. Aspeto das peras durante o processo tradicional de secagem: a) peras após colheita; b) peras durante a primeira secagem; c) peras durante a segunda secagem, após espalma; d) aspeto final das peras.....	16
Figura 2.1. Instalação experimental utilizada: a) câmara climática; b) caixa de ensaios; c) caixa de ensaios no interior da câmara climática.	19
Figura 2.2. Caracterização do escoamento: a) colocação da sonda junto ao tabuleiro de ensaios; b) interface da sonda no exterior da câmara climática.	20
Figura 2.3. Equipamento utilizado para aquisição de dados: a) balança; b) interface <i>PICO TC 08</i>	21
Figura 2.4. Determinação da humidade: a) estufa <i>WTC Binder</i> ; b) pormenor da colocação das amostras.	22
Figura 3.1. Aspeto das peras na determinação do teor de equilíbrio: a) início do ensaio; b) fim do ensaio.	26
Figura 3.2. Variação temporal da massa de água normalizada para os ensaios realizados.	27
Figura 3.3. Evolução temporal do teor de água em base seca e temperaturas durante o ensaio 5.	27
Figura 3.4. Evolução temporal do teor de água em base seca e temperaturas durante o ensaio 9.	28
Figura 3.5. Aspeto visual das peras para o ensaio 8 (contínuo): a) início do ensaio; b) fim do ensaio.	29
Figura 3.6. Aspeto visual das peras para o ensaio 10 (descontínuo, com 3 pausas): a) início do ensaio; b) 24 horas de ensaio; c) 72 horas de ensaio; d) fim do ensaio.	29
Figura 3.7. Variação temporal da massa de água normalizada para os ensaios 1 e 5 (contínuos) e 4 e 6 (descontínuos).	30
Figura 3.8. Variação temporal da massa de água normalizada para os ensaios 5 a 10.	31
Figura 3.9. Variação temporal da massa de água normalizada para os ensaios 8 a 11.	32
Figura 3.10. Variação temporal da massa de água normalizada para os ensaios 1 a 3.	33
Figura 3.11. Evolução temporal do raio.	35

Figura 3.12. Relação linear do <i>shrinkage</i> com o teor de água em base seca, de acordo com dados experimentais.....	35
Figura 3.13. Aplicação do modelo matemático de difusão ao ensaio 1.	40
Figura 3.14. Aplicação do modelo matemático de difusão ao ensaio 9.	40
Figura 3.15. Distribuição radial prevista pelo modelo matemático no período da 1ª pausa do ensaio 6.....	41
Figura 3.16. Distribuição radial prevista pelo modelo matemático no período da 2ª pausa do ensaio 6.....	41
Figura 3.17. Evolução ao longo das pausas da percentagem de água à superfície no ensaio 6.	42
Figura 3.18. Evolução ao longo das pausas da percentagem de água à superfície no ensaio 2.	43
Figura A.1. Elemento de volume	53
Figura C.1. Aplicação do modelo matemático de difusão ao ensaio 2.....	57
Figura C.2. Distribuição radial prevista pelo modelo matemático de difusão para a 1ª pausa do ensaio 2.....	57
Figura C.3. Distribuição radial prevista pelo modelo matemático de difusão para a 2ª pausa do ensaio 2.....	58
Figura C.4. Distribuição radial prevista pelo modelo matemático de difusão para a 3ª pausa do ensaio 2.....	58
Figura C.5. Distribuição radial prevista pelo modelo matemático de difusão para a 4ª pausa do ensaio 2.....	59
Figura C.6. Distribuição radial prevista pelo modelo matemático de difusão para a 5ª pausa do ensaio 2.....	59
Figura C.7. Distribuição radial prevista pelo modelo matemático de difusão para a 6ª pausa do ensaio 2.....	60
Figura C.8. Aplicação do modelo matemático de difusão ao ensaio 3.....	60
Figura C.9. Distribuição radial prevista pelo modelo matemático de difusão para a 1ª pausa do ensaio 3.....	61
Figura C.10. Distribuição radial prevista pelo modelo matemático de difusão para a 2ª pausa do ensaio 3.....	61
Figura C.11. Distribuição radial prevista pelo modelo matemático de difusão para a 3ª pausa do ensaio 3.....	62
Figura C.12. Distribuição radial prevista pelo modelo matemático de difusão para a 4ª pausa do ensaio 3.....	62
Figura C.13. Distribuição radial prevista pelo modelo matemático de difusão para a 5ª pausa do ensaio 3.....	63
Figura C.14. Aplicação do modelo matemático de difusão ao ensaio 4.....	63

Figura C.15. Distribuição radial prevista pelo modelo matemático de difusão para a 1ª pausa do ensaio 4.	64
Figura C.16. Distribuição radial prevista pelo modelo matemático de difusão para a 2ª pausa do ensaio 4.	64
Figura C.17. Aplicação do modelo matemático de difusão ao ensaio 5.	65
Figura C.18. Aplicação do modelo matemático de difusão ao ensaio 6.	65
Figura C.19. Aplicação do modelo matemático de difusão ao ensaio 7.	66
Figura C.20. Distribuição radial prevista pelo modelo matemático de difusão para a 1ª pausa do ensaio 7.	66
Figura C.21. Distribuição radial prevista pelo modelo matemático de difusão para a 2ª pausa do ensaio 7.	67
Figura C.22. Distribuição radial prevista pelo modelo matemático de difusão para a 3ª pausa do ensaio 7.	67
Figura C.23. Aplicação do modelo matemático de difusão ao ensaio 8.	68
Figura C.24. Distribuição radial prevista pelo modelo matemático de difusão para a 1ª pausa do ensaio 9.	68
Figura C.25. Distribuição radial prevista pelo modelo matemático de difusão para a 2ª pausa do ensaio 9.	69
Figura C.26. Aplicação do modelo matemático de difusão ao ensaio 10.	69
Figura C.27. Distribuição radial prevista pelo modelo matemático de difusão para a 1ª pausa do ensaio 10.	70
Figura C.28. Distribuição radial prevista pelo modelo matemático de difusão para a 2ª pausa do ensaio 10.	70
Figura C.29. Distribuição radial prevista pelo modelo matemático de difusão para a 3ª pausa do ensaio 10.	71
Figura C.30. Aplicação do modelo matemático de difusão ao ensaio 11.	71
Figura C.31. Distribuição radial prevista pelo modelo matemático de difusão para a 1ª pausa do ensaio 11.	72
Figura C.32. Distribuição radial prevista pelo modelo matemático de difusão para a 2ª pausa do ensaio 11.	72
Figura C.33. Distribuição radial prevista pelo modelo matemático de difusão para a 3ª pausa do ensaio 11.	73
Figura C.34. Distribuição radial prevista pelo modelo matemático de difusão para a 4ª pausa do ensaio 11.	73

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1.1. Temperaturas e velocidades do ar em processos de secagem de frutos.....	8
Tabela 2.1. Resumo das condições dos ensaios.....	24
Tabela 3.1. Calibre e teores de água iniciais das peras nos ensaios realizados.	25
Tabela 3.2. Valores dos coeficientes obtidos.	38
Tabela 3.3. Valores do coeficiente de difusão para outros produtos biológicos.	39

SIMBOLOGIA E SIGLAS

Simbologia

a_w – atividade da água [-]

A – área exposta ao escoamento [m^2]

C – concentração de água [kg/m^3]

\bar{C} – concentração média de água [kg/m^3]

C_{eq} – concentração de água no equilíbrio [kg/m^3]

C_i – concentração inicial de água [kg/m^3]

C_s – concentração de água à superfície [kg/m^3]

C_s^* – concentração de água normalizada á superfície ($= C_s/\bar{C}$) [%]

D – coeficiente de difusão [m^2/s]

F – fluxo de massa [$kg/(m^2.s)$]

F_x – fluxo de massa segundo a coordenada espacial x [$kg/m^2.s$]

F_y – fluxo de massa segundo a coordenada espacial y [$kg/(m^2.s)$]

F_z – fluxo de massa segundo a coordenada espacial z [$kg/(m^2.s)$]

h_m – coeficiente de transferência de massa [m/s]

HR – humidade relativa do ar [%]

l – distância da caixa de ensaios em relação à zona de extração de ar [mm]

m_s – massa seca [kg]

m_t – massa total [kg]

m_w – massa de água [kg]

M^* – massa de água normalizada ($= m_w(t)/m_w(t=0)$) [-]

MAPE – erro médio percentual absoluto [%]

p – pressão parcial do vapor de água [Pa]

p_0 – pressão parcial do vapor de água pura [Pa]

r – raio [m]

r_0 – raio máximo no início de cada período de repouso [m]

r_t – raio obtido pelo modelo de *shrinkage* [m]

- r_{exp} – raio medido experimentalmente [m]
 R^2 – coeficiente de determinação [-]
 t – tempo [h];[s]
 T – temperatura [°C]
 T_{cam} – temperatura da câmara climática [°C]
 T_{int} – temperatura no interior das peras [°C]
 T_{sup} – temperatura na superfície das peras [°C]
 T_{tab} – temperatura à altura do tabuleiro dentro da caixa de ensaios [°C]
 U – velocidade do escoamento [m/s]
 V – volume [m³]
 V_0 – volume inicial [m³]
 $W_{b.h.}$ – teor de água em base húmida [kg (H₂O)/kg (m_i)]
 $W_{b.s.}$ – teor de água em base seca [kg (H₂O)/kg (m_s)]
 $W_{equilíbrio}$ – teor de água em base seca no equilíbrio [kg (H₂O)/kg (m_s)]
 x – coordenada espacial [m]
 y – coordenada espacial [m]
 z – coordenada espacial [m]
- Δm_w – variação da massa de água [kg]
 ΔV – variação de volume [m³]
- ρ_w – densidade da água [kg/m³]

Siglas

- BLC3 – Plataforma Para o Desenvolvimento da Região Interior Centro
F-ECO-DL – Fruit ECO-Drying Line

1. INTRODUÇÃO

A secagem de produtos biológicos tem sido utilizada pelo ser humano ao longo da sua existência, tratando-se de um dos métodos mais antigos para preservar alimentos. De acordo com Belessiotis e Delyannis (2011), a primeira instalação para o efeito, com recurso à energia solar, foi encontrada no sul de França e remonta aos anos 8000 A.C.. Este tipo de procedimento continua a ser bastante útil por estabilizar a atividade microbológica dos produtos, permitir dispor dos mesmos em qualquer altura do ano, diminuir o seu peso final, reduzindo os custos de transporte e armazenamento, e disponibilizar ao consumidor uma maior variedade de sabores e texturas (Ferreira e Candeias, 2005; Guiné, 2008).

Tradicionalmente, a secagem é feita por exposição solar do fruto, o que apresenta várias desvantagens: dependência das condições meteorológicas, a necessidade de recurso a muita mão-de-obra e a vulnerabilidade a infestações por parte de agentes exteriores, como insetos e poeiras, sendo impossível assegurar as condições de higiene requeridas para a comercialização do produto secado (Silva *et al.*, 2014). Além disso, devido também às maiores exigências do mercado e dos consumidores, a secagem em contexto industrial com recurso a equipamentos apropriados é uma das alternativas ao método tradicional. Importa, para isso, saber de antemão quais as condições de secagem apropriadas de forma a industrializar o processo. Ademais, para garantir um produto final com qualidade e aspeto visual melhores e mais uniformes, relativamente ao tradicional, deve-se conhecer a cinética de secagem do fruto que se pretende secar e as condições a impor no processo.

1.1. Objetivos

No âmbito desta dissertação estudou-se o comportamento cinético de peras da variedade *Rocha* no processo de secagem, simulando diferentes fases de processamento. Estas fases representam uma adaptação para o contexto industrial do método tradicional de secagem de peras, que utiliza como matéria-prima a variedade *São Bartolomeu*, sendo o produto final conhecido como *Pera Passa*. A otimização do processo visa a sua aplicação a nível industrial, com o objetivo de recuperar e valorizar um produto regional de alta

qualidade. O conjunto de objetivos adotados enquadra-se num projeto de investigação e desenvolvimento tecnológico designado por *F-ECO-DL (Fruit ECO-Drying Line)*.

1.2. Estrutura da Dissertação

O presente trabalho encontra-se dividido em quatro capítulos, subdivididos sequencialmente de forma a fornecer todas as informações necessárias ao leitor para uma melhor compreensão dos resultados alcançados.

No presente capítulo foi feita uma introdução ao tema, apresentando a sua importância, o contexto em que se insere e os objetivos pretendidos. É ainda feita uma revisão de conceitos relacionados com o tema, bem como uma análise dos estudos presentes na literatura sobre secagem de produtos biológicos. É realizada ainda uma descrição do processo tradicional de secagem de *Pera Passa* e a adaptação pretendida para a aplicação industrial.

No **Capítulo 2** são descritos os equipamentos utilizados para a realização dos ensaios de secagem e para determinação e aquisição de todos os elementos necessários no estudo realizado.

No **Capítulo 3** apresentam-se os resultados obtidos, sendo feita uma análise crítica aos mesmos. É apresentada ainda a modelação matemática utilizada no tratamento de dados.

Por fim, o **Capítulo 4** resume as principais conclusões apresentando ainda algumas sugestões para o desenvolvimento de trabalhos futuros relacionados com este tema.

1.3. Conceitos Gerais

O processo de secagem consiste em retirar uma substância volátil presente num sólido (McMinn e Magee, 1999). No caso específico dos alimentos, trata-se de um método para remover o conteúdo de água de um produto e prevenir o crescimento de micro-organismos, possibilitando o seu armazenamento durante um maior período de tempo (Ferreira e Candeias, 2005). A água nos produtos biológicos encontra-se em equilíbrio termodinâmico para uma temperatura constante sob várias formas, nomeadamente no

estado livre ou na forma de solução com outros constituintes, como sais, açúcares, proteínas e outros nutrientes.

O teor de água de um produto pode ser expresso em base húmida ($W_{b.h.}$),

$$W_{b.h.} = \frac{m_w}{m_w + m_s} = \frac{m_t - m_s}{m_t}, \quad (1.1)$$

ou em base seca ($W_{b.s.}$),

$$W_{b.s.} = \frac{m_w}{m_s} = \frac{m_t - m_s}{m_s}, \quad (1.2)$$

sendo que m_w representa a massa de água, m_s a massa de matéria seca e m_t a massa total da amostra (Belessiotis e Delyannis, 2011).

Ao reduzir o conteúdo de água de um produto, modera-se o seu número de reações químicas e enzimáticas e contém-se o crescimento de bactérias, leveduras e bolores (Belessiotis e Delyannis, 2011; Ferreira e Candeias, 2005). A atividade da água (a_w) representa o teor de água livre que se encontra disponível no fruto, contribuindo para o desenvolvimento microbiológico, e é dada pela relação entre a pressão parcial de vapor da água presente na amostra (p) e a pressão parcial de vapor da água pura (p_0) à mesma temperatura (T) (Park *et al.*, 2001a):

$$a_w = \left[\frac{p}{p_0} \right]_T. \quad (1.3)$$

Este parâmetro varia entre 0 e 1, sendo este último o valor da atividade da água no estado puro. Trata-se de uma medida, e simultaneamente de um critério, para avaliar a deterioração e prever a estabilidade do fruto. Todos os produtos biológicos têm um valor limite abaixo do qual os micro-organismos não se desenvolvem: a maioria das bactérias deixam de se multiplicar para valores inferiores a 0,85 e os bolores e as leveduras deixam de proliferar para valores abaixo de 0,60 (Belessiotis e Delyannis, 2011).

Durante a secagem convectiva, em que é removida água do produto, sendo esta transportada pelo ar que circula à sua volta, o material biológico é exposto a um ambiente com um determinado nível de humidade, perdendo ou ganhando água até estabelecer o equilíbrio com o meio em que está inserido (Ekechukwu e Norton, 1999; Park *et al.*, 2001a). O equilíbrio é atingido quando a pressão de vapor da água na superfície do fruto iguala a pressão de vapor no ar circundante. Nestas condições, a humidade relativa do meio

é designada por humidade relativa de equilíbrio (Belessiotis e Delyannis, 2011; Guiné, 2006).

A eficácia da secagem e do posterior armazenamento de produtos biológicos depende do conhecimento do comportamento do produto no meio em que se encontra. Como a atividade da água é dependente da temperatura, é necessário saber a relação entre este parâmetro e o teor de água do produto a secar, relação essa que é obtida com recurso a curvas isotérmicas de adsorção e dessorção (**Figura 1.1**), sendo que todos os alimentos são caracterizados por ambas (Guiné e Castro, 2002a; Uribe *et al.*, 2009). Conhecendo as propriedades higrotérmicas do meio em que se encontra o produto e a respetiva curva isotérmica de dessorção, é possível obter o conteúdo de água a partir do qual este fica estabilizado, ou seja, o teor de água do produto em equilíbrio. O conhecimento deste parâmetro é importante no processo de secagem, pois representa o teor de água atingível, se a secagem for realizada durante tempo suficiente para se atingir o equilíbrio.

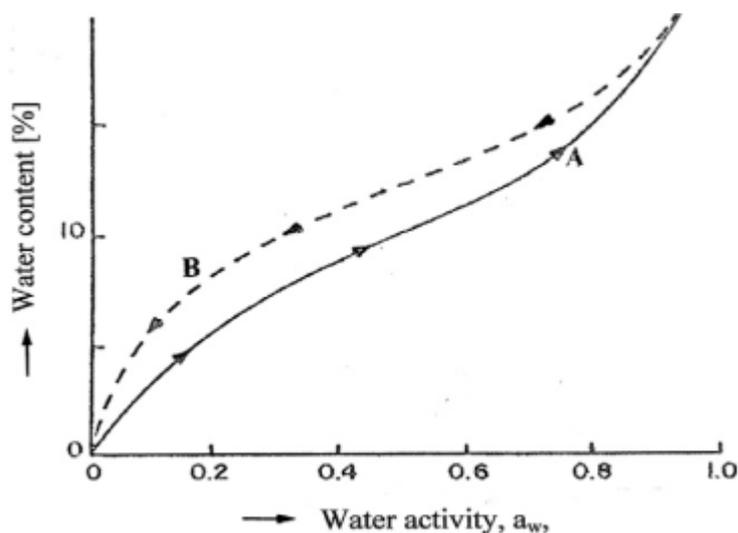


Figura 1.1. Exemplo de curvas isotérmicas de adsorção (A) e dessorção (B) (adaptada de Belessiotis e Delyannis, 2011).

É possível obter as curvas isotérmicas de adsorção e dessorção por via experimental, em ambientes com controlo de temperatura e humidade relativa.

Sendo a secagem um processo de remoção do conteúdo de água de um produto, representado esquematicamente na **Figura 1.2**, e tendo em conta o objetivo desta dissertação, é necessário saber quais os mecanismos de transporte que têm influência no processo.

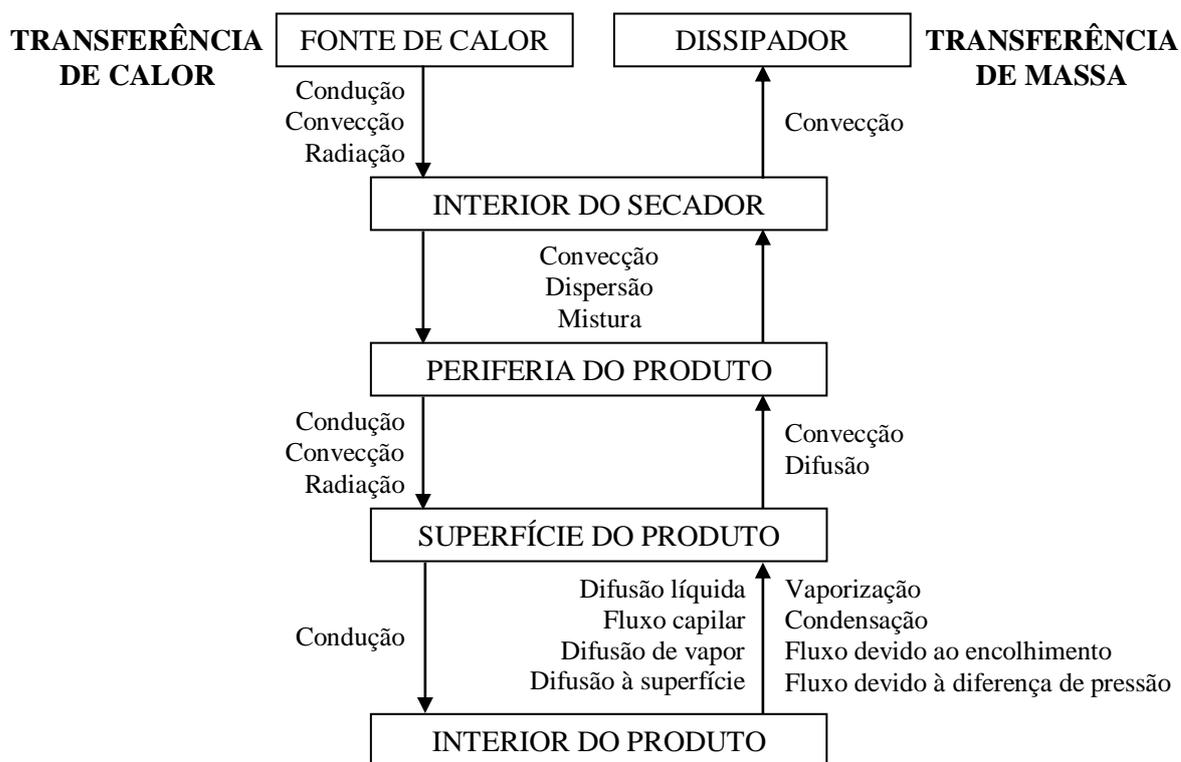


Figura 1.2. Representação esquemática da secagem (adaptada de McMinn e Magee, 1999).

Belessiotis e Delyannis (2011) descrevem dois mecanismos básicos envolvidos na secagem convectiva de um produto: a migração de água do interior até à superfície e a sua remoção da superfície para o ar envolvente, sob a forma de vapor. A cada um destes mecanismos de transferência correspondem, respetivamente, o coeficiente de difusão da água (no interior) e o coeficiente de transferência de massa por convecção (à superfície). Para determinar estes coeficientes, é necessário recorrer à modelação matemática do processo de secagem. Guiné (2008) refere que este tipo de representação é bastante complexo, pois envolve simultaneamente transferência de calor e de massa, para além das alterações a nível físico e estrutural que ocorrem no fruto.

De acordo com Golestani *et al.* (2013), os modelos matemáticos de secagem classificam-se segundo três tipologias: teóricos, semi-teóricos e empíricos. Os modelos semi-teóricos e empíricos baseiam-se em análises experimentais do processo e os modelos teóricos consistem em soluções analíticas ou numéricas de equações da conservação de energia e de massa.

De um modo geral, os modelos teóricos conhecidos na literatura baseiam-se na segunda lei de Fick para a difusão, com as respectivas adaptações aos casos em estudo. No **ANEXO A** encontra-se a dedução da equação da segunda lei de Fick na sua forma geral. Dos vários modelos propostos para a secagem de frutos, os modelos de difusão de massa em regime transiente baseados nesta lei são os mais apropriados (Guiné *et al.*, 2007a), pois o transporte da água durante o processo deve-se à ocorrência de gradientes de concentração no produto. Contudo, os mesmos autores referem ainda que muitos destes modelos ignoram o efeito do encolhimento do fruto durante o processo, levando essa simplificação a soluções apenas aproximadas. A variação do volume do produto devido a este fenómeno tem uma influência muito significativa na previsão dos perfis de temperatura e da distribuição da concentração de água, afetando o coeficiente de difusão e alterando a área de transferência de calor e massa (Golestani *et al.*, 2013). Além disso, características como a densidade e a porosidade também sofrem alterações, o que provoca mudanças na textura e na qualidade do produto final (Guiné, 2006; Guiné *et al.*, 2006).

Nesta dissertação adotou-se o modelo utilizado por Silva *et al.* (2014) para a secagem de peras da variedade de *São Bartolomeu*, sendo feito o respetivo ajuste para a avaliação do encolhimento. A explicação do modelo utilizado e as respetivas equações é apresentada de forma detalhada mais à frente.

1.4. Condições e Parâmetros de Secagem

Os alimentos são muito sensíveis às condições de secagem. Belessiotis e Delyannis (2011) referem que o processo deve ser feito de forma a não afetar prejudicialmente a cor do produto, o seu sabor, a sua textura e o seu valor nutricional. Tendo como referência a secagem convectiva abordada nesta dissertação, é necessário conhecer quais as condições higrotérmicas a utilizar durante o processo, de modo a conservar as propriedades organoléticas dos alimentos.

Segundo os mesmos autores, como os produtos agrícolas são higroscópicos, isto é, absorvem a humidade do meio em que se encontram, é importante conhecer as diferentes taxas de secagem que podem ocorrer durante o processo. Estas dependem da temperatura e do teor de humidade do produto, bem como da temperatura, da humidade relativa e da velocidade do ar em escoamento. Na **Figura 1.3** estão representadas as diferentes fases que podem ocorrer durante a secagem.

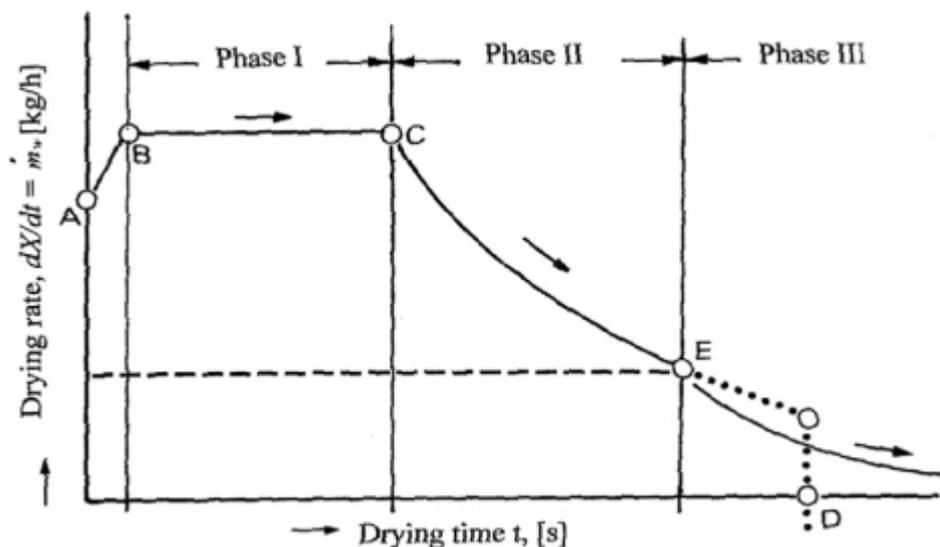


Figura 1.3. Representação das diferentes fases de secagem (adaptada de Belessiotis e Delyannis, 2011).

Existem assim, de acordo com Belessiotis e Delyannis (2011), três fases distintas durante o processo, sendo que a reta AB corresponde ao aquecimento do produto até este atingir a temperatura de secagem. A fase I, correspondente a BC, representa a taxa de secagem constante e verifica-se enquanto a superfície do fruto está saturada de água, sendo determinada pelas trocas de calor convectivas, caracterizadas pelo coeficiente de transferência de massa (Karathanos e Belessiotis, 1997). A fase II, representada na figura pela secção CE, corresponde ao início do decréscimo da taxa de secagem, passando o processo a ser controlado pelo coeficiente de difusão. Nesta fase, a velocidade de remoção da água à superfície do produto é superior à velocidade com que ele é transportado do interior do mesmo até à região exterior, sendo a difusão decrescente ao longo do tempo. A fase III representa um segundo período de taxa de secagem decrescente, onde o teor de água do fruto continua a ser removido até se atingir o equilíbrio com o ar em escoamento, no caso de produtos higroscópicos. Para um grande número de produtos, a secagem termina antes de se iniciar esta fase, na proximidade do ponto D da figura, sendo atingido o teor final de água que é normalmente desejado. Muitos produtos biológicos não evidenciam a presença da fase I, sendo esta muito curta ou até mesmo inexistente. Este fenómeno é confirmado por diversos autores em diferentes tipos de produtos biológicos (Babalís e Belessiotis, 2004; Doymaz, 2005; Doymaz, 2009; Guiné e Castro, 2002b; Mohamed *et al.*, 2008; Mrad *et al.*, 2012; Sacilik *et al.*, 2006; Uribe *et al.*, 2009). McMinn

e Magee (1999) referem que esta fase, quando se verifica, é provocada pelo baixo potencial de secagem do ar utilizado (baixas temperaturas e velocidades de escoamento), aliado a um elevado teor de água presente no produto.

No período de taxa de secagem decrescente (fase II e III), a superfície do produto não se encontra saturada de água e a velocidade do processo é controlada essencialmente pela difusão da água do interior até à superfície do fruto. Assim, das três variáveis que podem ser definidas na secagem convectiva, a temperatura é a que tem mais influência sobre a cinética do processo (Babalis e Belessiotis, 2004; Doymaz, 2013; Lashani *et al.*, 2004; Mohamed *et al.*, 2008). Oliviero *et al.* (2013) referem que as temperaturas de secagem geralmente utilizadas na indústria alimentar variam entre 40°C e 80°C. Porém, temperaturas excessivamente elevadas levam a maiores alterações na coloração dos frutos, destroem os nutrientes e provocam o seu endurecimento (Mrad *et al.*, 2012; Mujundar e Law, 2010), para além de estarem associadas a um maior consumo energético do equipamento a utilizar. Na **Tabela 1.1** apresentam-se alguns exemplos de temperaturas e de velocidades de escoamento (U) utilizadas em vários trabalhos de secagem convectiva de frutos.

Tabela 1.1. Temperaturas e velocidades do ar em processos de secagem de frutos.

Referência	Produto	T [°C]	U [m/s]
Guiné <i>et al.</i> (2007a)	Peras (<i>São Bartolomeu</i>)	30 – 50	0,5 – 1,5
Guiné (2008)	Peras (<i>Dona Joaquina</i>)	30 – 50	0,5 – 1,5
Babalis e Belessiotis (2004)	Figos	55 – 85	0,5 – 3,0
Zlatanović <i>et al.</i> (2013)	Maçãs	35 – 55	1,0 – 2,0
Uribe <i>et al.</i> (2009)	Pepino Doce	50 – 90	2,0
Jannot <i>et al.</i> (2004)	Bananas	40 – 60	0,5 – 2,0

A humidade relativa do ar durante o processo de secagem deve ser suficientemente baixa, de forma a garantir que o produto atinja o teor de água final o mais rapidamente possível.

1.5. Métodos e Equipamentos de Secagem

1.5.1. Equipamentos de Secagem Solar

No sentido de conservar os alimentos, nos países em desenvolvimento, onde as ofertas de eletricidade e de fontes de energia não renovável são poucas ou quase nulas, o processo de secagem é feito com recurso a energia solar, tipicamente por exposição direta do produto ao sol (Ekechukwu e Norton, 1999; Sharma *et al.*, 2009). A secagem solar direta está sujeita à variação das condições meteorológicas, necessita de muita mão-de-obra e de áreas de secagem bastante elevadas. Os produtos encontram-se vulneráveis à contaminação por parte dos agentes exteriores, como as poeiras e os insetos, e não existem meios de controlo durante o processo, sendo este baseado na experiência de pessoal não qualificado (Belessiotis e Delyannis, 2011; Sharma *et al.*, 2009; Silva *et al.*, 2014). Muitos dos países do chamado terceiro mundo produzem grandes quantidades de frutas e vegetais, tanto para consumo próprio como para exportação, pelo que é necessário utilizar alternativas de baixo custo para secar os produtos de forma limpa e com as condições de higiene exigidas pelos padrões nacionais e internacionais (Sharma *et al.*, 2009).

Importa, neste contexto, fazer uma breve distinção entre dois conceitos similares: Sharma *et al.* (2009) distinguem a “*secagem solar*” da “*secagem ao sol*”, por ser usado, no primeiro caso, equipamento próprio para recolher a radiação e aproveitá-la da melhor forma no processo. Assim, quando se fala em secagem solar, está implicitamente associado o uso de sistemas, mais ou menos complexos, onde o produto não está diretamente exposto ao sol e se encontra resguardado das condições exteriores (Silva, 2013).

O objetivo de um sistema de secagem é fornecer mais calor ao produto, aumentando a pressão de vapor da água no seu interior e, ao mesmo tempo, expô-lo a uma humidade relativa mais baixa, garantindo uma menor humidade de equilíbrio e uma maior “rapidez” de secagem (Ekechukwu e Norton, 1999). Têm sido desenvolvidos, nos últimos anos, vários equipamentos para aproveitamento da energia solar para secagem, apresentando muitos deles baixo custo de construção e manutenção. Estes sistemas são geralmente construídos com materiais acessíveis, como madeira, pedaços de metal, placas de vidro e plástico (Belessiotis e Delyannis, 2011; Ekechukwu e Norton, 1999; Sharma *et*

al., 2009; Silva, 2013). Ekechukwu e Norton (1999) sugerem a classificação destes sistemas de acordo com o esquema da **Figura 1.4**.

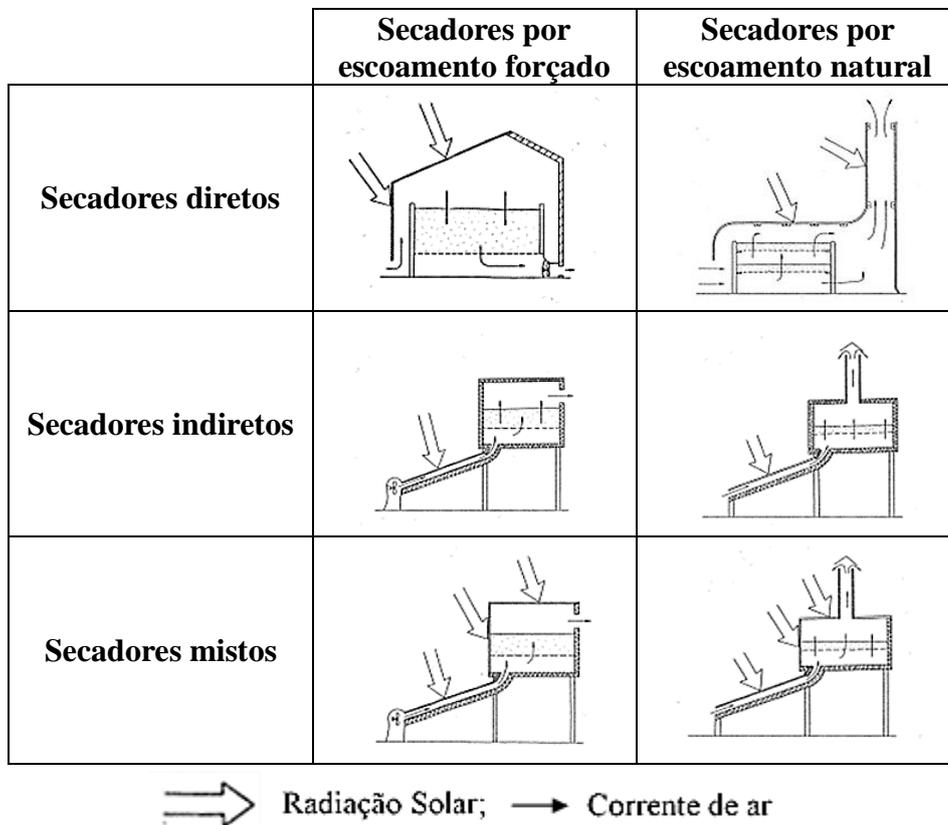


Figura 1.4. Classificação de secadores solares (adaptada de Ekechukwu e Norton, 1999).

Assim os secadores solares podem ser classificados quanto ao tipo de escoamento como:

- **Secadores por escoamento forçado:** a secagem é feita através de convecção forçada de ar sobre o produto, sendo incorporados meios auxiliares para promover o escoamento na zona de secagem, como ventoinhas ou bombas. Em alguns casos, estes secadores podem ter a designação de híbridos, por possuírem fontes de energia auxiliar para operarem em regime contínuo, sendo por isso sistemas mais complexos e dispendiosos quando comparados com os secadores passivos (Belessiotis e Delyannis, 2011; Sharma *et al.*, 2009).

- **Secadores por escoamento natural:** o escoamento do ar é feito através de convecção natural. São bastante acessíveis em termos económicos e fáceis de instalar e

operar, principalmente em zonas onde não existe eletricidade, mas apresentam uma menor capacidade de carga em relação aos sistemas ativos (Belessiotis e Delyannis, 2011; Ekechukwu e Norton, 1999);

Em relação à forma de aproveitamento da radiação solar, os secadores ativos e passivos podem ainda subdividir-se em:

- **Secadores diretos:** a radiação solar incide diretamente no local de secagem do produto. As estruturas mais comuns são as estufas ou túneis de secagem, com coberturas de vidro ou de plástico (Silva, 2013);

- **Secadores indiretos:** a radiação solar incide sobre um coletor, aquecendo o ar que posteriormente será conduzido até à zona de secagem. Neste tipo de sistema, o produto não está diretamente exposto à radiação (Sharma *et al.*, 2009; Silva, 2013);

- **Secadores mistos:** os secadores mistos são uma combinação dos secadores diretos e indiretos, ou seja, a radiação solar incide sobre um coletor para aquecimento do ar e também sobre o local de secagem (Silva, 2013).

Um sistema de secagem solar apresenta várias vantagens relativamente à secagem tradicional ao sol. A duração do processo é substancialmente reduzida, devido à acumulação de calor na zona de secagem e/ou à maior quantidade de energia solar recolhida pelo coletor utilizado. Esta redução do tempo leva a um aumento da eficiência do processo, devido à diminuição das perdas de material por deterioração, verificando-se também um aumento da qualidade dos produtos, pois são secados com condições de temperatura otimizadas e em ambiente controlado, tornando o processo também mais higiénico. Além disso, possibilita um aumento da produtividade, pois os secadores podem ser novamente carregados com produto em pouco tempo e a flexibilidade do secador permite a sua utilização para vários tipos de produtos ao longo do ano, evitando-se o uso sazonal (Belessiotis e Delyannis, 2011; Sharma *et al.*, 2009).

1.5.2. Outros Equipamentos de Secagem

Nos países desenvolvidos, a secagem ao sol foi sendo progressivamente substituída por métodos e equipamentos mais sofisticados, dando origem à indústria de secagem convencional, que principiou no século XVII (Belessiotis e Delyannis, 2011). Inicialmente, os sistemas utilizados eram baseados em energia solar, surgindo posteriormente secadores mecânicos de vários tipos, como os secadores de tabuleiros ou

prateleiras e os túneis de secagem, caldeiras para aquecimento do ar e sistemas de ventilação forçada, tornando a secagem bastante mais rápida com obtenção de produtos de qualidade (Sharma *et al.*, 2009).

Dos vários secadores convencionais utilizados na indústria, podem ser referidos os secadores rotativos, os secadores de tambor, os sistemas de secagem por *spray* e os secadores de leito fluidizado.

Os secadores rotativos consistem numa câmara de secagem cilíndrica, geralmente inclinada, onde é injetado ar quente, em contacto direto ou indireto, para secar o produto. O produto é colocado na parte superior da câmara e, através da rotação, vai descendo até à zona de saída (Mujumdar, 2006; Mujumdar e Law, 2010).

Os secadores de tambor são tipicamente utilizados na secagem de produtos viscosos, soluções concentradas ou pastas. O material é espalhado mecanicamente sob a forma de película na superfície quente do tambor, sendo secado rapidamente através do contacto direto com essa superfície. Antes do produto dar uma volta completa, é retirado dessa superfície com recurso a uma espátula. Para produtos com elevados teores de humidade, a secagem pode ser auxiliada através de convecção de ar quente na câmara de secagem. Devido às elevadas temperaturas utilizadas, este processo não é apropriado para produtos sensíveis ao calor (Mujumdar, 2006).

A secagem por *spray* é um método utilizado em aplicações industriais para secagem e pulverização de alimentos sensíveis ao calor no estado líquido, sendo o produto final obtido na forma de um pó de boa qualidade. Neste tipo de sistema, o atomizador é instalado no topo da câmara de secagem larga o líquido sob a forma de gotículas, que vão ser desidratadas através do contacto com ar quente, em co-corrente ou em contracorrente. O ar sai depois da câmara de secagem juntamente com o pó e a separação é feita com recurso a um ciclone (Dev e Raghavan, 2012; Mujumdar e Law, 2010).

Os sistemas de secagem por leito fluidizado têm um funcionamento semelhante aos secadores por *spray*. O material a secar, geralmente na forma de partículas ou grãos, é colocado na base da câmara de secagem. Posteriormente, uma corrente de ar quente é injetada na mesma base, através da camada formada pelo produto. A velocidade do ar deve ser suficientemente elevada de forma a garantir que parte do produto fique suspensa na corrente. Apresentam uma grande área de contacto entre o meio de secagem e o produto, levando a elevadas taxas de secagem e eficiência térmica. Porém, consomem bastante

energia e por vezes verifica-se uma não uniformização na qualidade do produto (Mujumdar, 2006; Mujundar e Law, 2010).

Mais recentemente, como alternativa para o aquecimento do ar, têm sido estudadas as vantagens da aplicação de bombas de calor no processo de secagem (Aktaş *et al.*, 2009; Mujundar e Law, 2010). Num sistema de secagem convencional é utilizado um permutador de calor para pré-aquecer o fluxo de ar à entrada, recuperando apenas o calor sensível do ar de saída, levando a perdas de energia consideráveis. Com a utilização de uma bomba de calor, através da recirculação do ar de secagem, o calor latente presente no fluxo de exaustão é recuperado no seu evaporador pelo líquido refrigerante, tornando a secagem mais eficiente e com menores perdas energéticas, sendo vantajoso para aplicações industriais de produtos de elevado valor, devido à qualidade do produto final (Dev e Raghavan, 2012; Mujundar e Law, 2010).

Relativamente a técnicas de secagem alternativas, podem ser mencionadas a secagem por congelamento e a secagem assistida por micro-ondas. A secagem por congelamento, também denominada liofilização, é, de acordo com Dev e Raghavan (2012), Doymaz (2009) e Huang e Zhang (2012), um método que permite obter produtos de qualidade superior relativamente a qualquer outra técnica de secagem, devido à boa retenção de sabor e aroma. Consiste no congelamento rápido da água livre presente no produto e a sua subsequente sublimação, sendo geralmente realizada a vácuo (Dev e Raghavan, 2012; Huang e Zhang, 2012). Porém, o processo é mais lento devido às baixas taxas de transferência de calor e de massa, o que leva a consumos energéticos bastante elevados (Doymaz, 2009; Huang e Zhang, 2012; Mujumdar, 2006).

Na secagem assistida por micro-ondas, o produto é aquecido por excitação das moléculas de água, com recurso a ondas eletromagnéticas. Porém, é insuficiente para remover a água presente no produto, pelo que geralmente é combinada com a secagem a vácuo ou aplicada em métodos de secagem por convecção forçada (Mujundar e Law, 2010). No último caso, permite reduzir o tempo de secagem na fase final do processo ao aquecer especificamente a água residual que se encontra no material, reduzindo também o consumo de energia (Dev e Raghavan, 2012; Mujundar e Law, 2010). De acordo com Huang e Zhang (2012), as desvantagens na aplicação de micro-ondas são a não uniformidade do campo eletromagnético e a pouca penetração deste nos produtos.

De um modo geral, os métodos de secagem combinados, ou híbridos, permitem obter em conjunto as vantagens de cada um dos diferentes métodos utilizados e evitar algumas das desvantagens dos mesmos, permitindo reduzir o tempo da secagem e diminuir o consumo de energia (Huang e Zhang, 2012). O método ou o equipamento a aplicar dependem sempre do produto que se pretende desidratar.

1.6. Exemplos de Produtos Secados

Dos vários produtos biológicos secados, os frutos são aqueles que têm uma maior expressão: são exemplos de frutos secados, presentes na literatura, maçãs (Cruz *et al.*, 2014; Lengyel, 2007; Mabrouk *et al.*, 2012; Sturm *et al.*, 2014), figos (Babalís e Belessiotis, 2004; Doymaz, 2005; Karathanos e Belessiotis, 1997), uvas (Belessiotis e Delyannis, 2011; Karathanos e Belessiotis, 1997; Ramos *et al.*, 2005), peras (Guiné, 2005; Guiné, 2006; Guiné *et al.*, 2006; Park *et al.*, 2001b), damascos e ameixas (Karathanos e Belessiotis, 1997), bananas (Baini e Langrish, 2007; da Silva *et al.*, 2015; Jannot *et al.*, 2004), pepino doce (Uribe *et al.*, 2009), fruto do cato (Lashani *et al.*, 2004), ananás (Ramallo e Mascheroni, 2013), pêsego (Zhu e Shen, 2014), coco (da Silva *et al.*, 2014) e acerola (Koyuncu *et al.*, 2007). Também existem estudos relativos à secagem de outros produtos alimentares como algas comestíveis (Mohamed *et al.*, 2008), abóbora (Doymaz, 2007), tomate (Ehiem *et al.*, 2009; Hossain *et al.*, 2008; Sacilik *et al.*, 2006), cenoura (Barati e Esfahani, 2012), batata-doce (Singh e Pandey, 2012), cebola (Mota *et al.*, 2010) e brócolos (Oliviero *et al.*, 2013).

Dos frutos referidos, é possível encontrar ainda bastantes trabalhos sobre a pera da variedade *São Bartolomeu* (Guiné, 2013; Guiné e Castro, 2002b; Guiné e Castro, 2003; Guiné *et al.*, 2007a; Guiné *et al.*, 2007b; Guiné *et al.*, 2011; Silva *et al.*, 2014). Destaca-se esta variedade, tradicionalmente secada por exposição solar direta, por ser um produto regional em risco de extinção e que se pretende valorizar. Na secção seguinte será feita uma apresentação mais detalhada sobre esta variedade, com ênfase no processamento tradicional da mesma e realçando os objetivos pretendidos no projeto *F-ECO-DL*.

1.7. Pera de São Bartolomeu

A pera de *São Bartolomeu* (**Figura 1.5** e **Figura 1.6.a**) é uma variedade rara com origens na zona centro de Portugal, mais precisamente na região da Beira Alta. É possível encontrar as suas pereiras nos concelhos de Carregal do Sal, Oliveira do Hospital, Nelas, Seia e Tábua. Trata-se de uma pera de pequena dimensão e com um sabor agreste, quando consumida no seu estado natural; porém, depois de secada, possui características muito apreciadas pelos consumidores (Lima *et al.*, 2010; Silva *et al.*, 2014).



Figura 1.5. Pereira da variedade *São Bartolomeu* (adaptada de Lima *et al.*, 2010).

A obtenção da *Pera Passa* por secagem é feita de modo artesanal, através da exposição direta ao sol, e consiste em seis fases distintas: i) colheita do produto; ii) descasque manual sem remoção do pedúnculo; iii) primeira secagem durante cinco dias em local arejado e com boa exposição solar (**Figura 1.6.b**); iv) recolha das peras, no fim da primeira secagem, à hora de maior calor para cestos, que são posteriormente cobertos com mantas e guardados à sombra durante dois dias (esta fase do processo tem o objetivo de amolecer a polpa e tornar o produto mais elástico para o seu processamento na fase seguinte); v) espalma, de forma a achatar o produto, dando-lhe um aspeto característico (geralmente designado por “presuntinho”); vi) segunda secagem, com duração de dois a quatro dias (**Figura 1.6.c**). O produto final apresenta um formato de viola com uma coloração vermelho-acastanhado (**Figura 1.6.d**), típica desta pera secada, sendo esta cor uma característica única quando comparada com outras variedades secadas (Lima *et al.*, 2010; Guiné, 2013).



Figura 1.6. Aspeto das peras durante o processo tradicional de secagem: a) peras após colheita; b) peras durante a primeira secagem; c) peras durante a segunda secagem, após espalma; d) aspeto final das peras (adaptada de Lima *et al.*, 2010).

Atualmente, o valor de mercado da *Pera Passa* pode chegar até 30 €/kg. Porém, devido aos constrangimentos do processo tradicional, nomeadamente a variabilidade das condições meteorológicas, a contaminação por agentes exteriores e a elevada mão-de-obra requerida, foi-se perdendo o interesse na sua produção, resultando quase no total desaparecimento do produto (Silva *et al.*, 2014).

De modo a recuperar esta riqueza regional, o projeto *F-ECO-DL* pretende criar uma unidade piloto que automatize o processo de secagem da pera de *São Bartolomeu*, desde o descasque até ao embalamento. Para tornar o processo competitivo economicamente, a linha de secagem será eco eficiente, com recurso a energia solar e biomassa. A otimização do processo nessa unidade permitirá posteriormente a sua aplicação a nível industrial.

O processo tradicional de secagem tem uma duração entre nove a doze dias, dependendo das condições meteorológicas. Além disso, é uma secagem descontínua pois é

baseada no aproveitamento da radiação solar, por exposição direta. De forma a reduzir o tempo de processamento e para obter um produto final próximo do artesanal, com as características texturais e cromáticas típicas da *Pera Passa*, pretende-se que a secagem a nível industrial seja realizada em ciclos, sendo estes constituídos por três fases distintas:

- Uma fase convectiva, com condições de temperatura elevada e humidade relativa reduzida.
- Uma fase de repouso (convecção natural) quente e húmida, de forma a simular a fase iv) do processo tradicional.
- Uma fase de repouso (convecção natural) fria e húmida, para simular as condições de repouso durante o período noturno.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Instalação Experimental

Para a realização dos diferentes ensaios de secagem convectiva utilizou-se a câmara climática ilustrada na **Figura 2.1.a**. Trata-se de uma Unidade *Fito Clima 300 EDTU*, que permite, mediante programação prévia, o controlo da humidade e da temperatura no seu interior, com as dimensões interiores de 64 cm de largura, 78 cm de altura e 57,5 cm de profundidade.

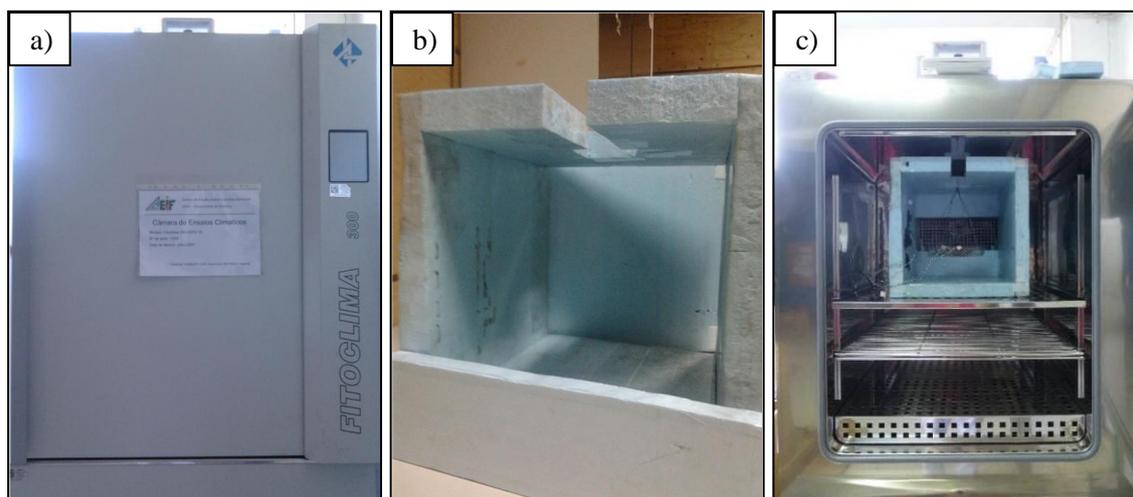


Figura 2.1. Instalação experimental utilizada: a) câmara climática; b) caixa de ensaios; c) caixa de ensaios no interior da câmara climática.

A homogeneização das condições higrotérmicas no interior da câmara é garantida pela permanente recirculação do ar, que é insuflado pela base perfurada e extraído pela parede posterior. Porém, esta câmara climática não permite o controlo nem a variação da velocidade do escoamento de ar. Por conseguinte, foi feita uma adaptação na zona de ensaios através da construção de uma caixa em polietileno extrudido de alta densidade (ilustrada na **Figura 2.1.b**), com as dimensões de 0,38 m \times 0,38 m \times 0,38 m. Esta caixa possui um conjunto de placas amovíveis nas secções frontal e traseira, permitindo obter diferentes velocidades de escoamento no seu interior (a zona de ensaio,

propriamente dita). O acoplamento das placas é feito com recurso a tiras de velcro. Na secção superior da caixa existe uma abertura que permite a colocação do tabuleiro, onde são colocadas as peras, estando este por sua vez suspenso de uma balança que permite a medição e o registo contínuos da massa. Na **Figura 2.1.c** observa-se a posição da caixa de ensaios no interior da câmara climática.

De forma a medir a velocidade do ar na zona de ensaios, realizaram-se vários testes com diferentes configurações da caixa de ensaios e considerando diferentes distâncias desta à parede posterior da câmara climática, onde é feita a extração do ar de recirculação. A velocidade do escoamento foi medida com uma sonda anemométrica *Swema Air 300*, colocada junto ao tabuleiro de ensaios. Nos diferentes testes realizados utilizaram-se moldes de papel, com um diâmetro aproximado de cinco centímetros, de forma a simular peras (**Figura 2.2.a**). Os valores da velocidade do escoamento considerados representam a média de 45 aquisições feitas durante três minutos, obtidas através do *software* inserido na interface da sonda anemométrica, visível na **Figura 2.2.b**.

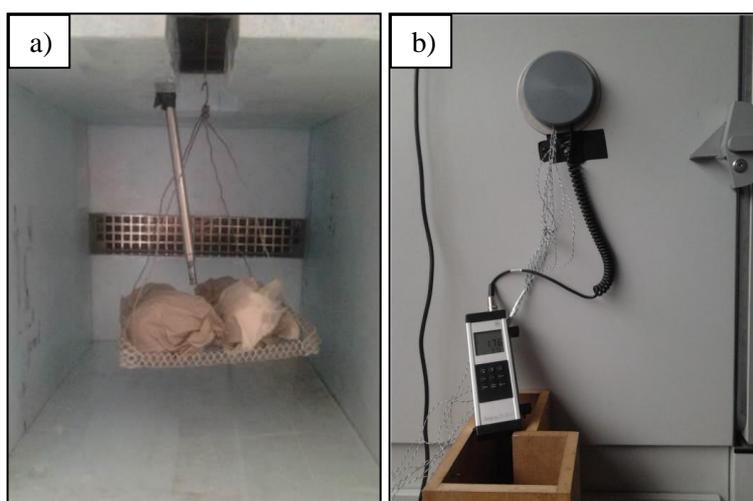


Figura 2.2. Caracterização do escoamento: a) colocação da sonda junto ao tabuleiro de ensaios; b) interface da sonda no exterior da câmara climática.

No **ANEXO B** estão descritas as diferentes configurações testadas, bem como as velocidades de escoamento obtidas. Os valores listados encontram-se dentro da gama utilizada por outros autores em secagem convectiva de frutos, como se pode observar na **Tabela 1.1**.

2.2. Aquisição de Dados

Durante os ensaios realizados foram monitorizadas de forma contínua a variação de massa das peras utilizadas e as temperaturas do ar no interior da câmara climática, bem como as temperaturas no interior e à superfície das peras. A aquisição de massas foi realizada com uma balança *KERN PRJ-320*, ilustrada na **Figura 2.3.a**, com uma resolução de 0,001 g. Os dados foram registados através de *software* próprio da balança, com registos periódicos em intervalos de um minuto. O controlo das temperaturas foi feito através de termopares do tipo *K*, ligados a uma interface *PICO TC 08*, representada na **Figura 2.3.b**. Os valores foram obtidos através do *software PICOLOG*, com aquisições periódicas de um minuto.

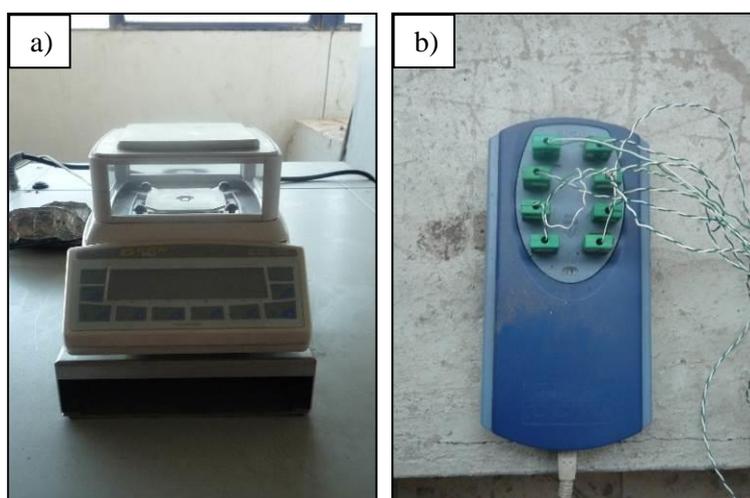


Figura 2.3. Equipamento utilizado para aquisição de dados: a) balança; b) interface *PICO TC 08*.

2.3. Determinação do Calibre e Humidade Inicial das Peras

Para a determinação do calibre médio das peras utilizadas durante cada ensaio de secagem, retiraram-se dez peras de cada lote e mediram-se as mesmas com um paquímetro, tendo sido registado o valor médio e o desvio padrão de cada conjunto de medições.

A determinação da humidade inicial das peras realizou-se numa estufa *WTC Binder*, representada na **Figura 2.4.a**, durante vinte e quatro horas a 105 °C. Para esta determinação seleccionaram-se entre quatro a cinco peras de cada lote utilizado, sendo estas

descascadas e cortadas em lâminas com aproximadamente cinco milímetros de espessura, juntamente com as sementes. De seguida, as lâminas foram distribuídas uniformemente em três amostras e colocadas em folhas de alumínio separadas, como exemplificado na **Figura 2.4.b**. Foi feita a pesagem de cada uma das amostras consideradas antes e depois da secagem em estufa numa balança *AND GF 3000*, com 0,01 g de resolução, sendo o valor final considerado como a massa seca da amostra. A diferença entre as duas pesagens realizadas permite obter a quantidade total de água removida, obtendo-se o valor médio da humidade em base húmida (se dividido pela massa inicial) e em base seca (se dividido pela massa seca).

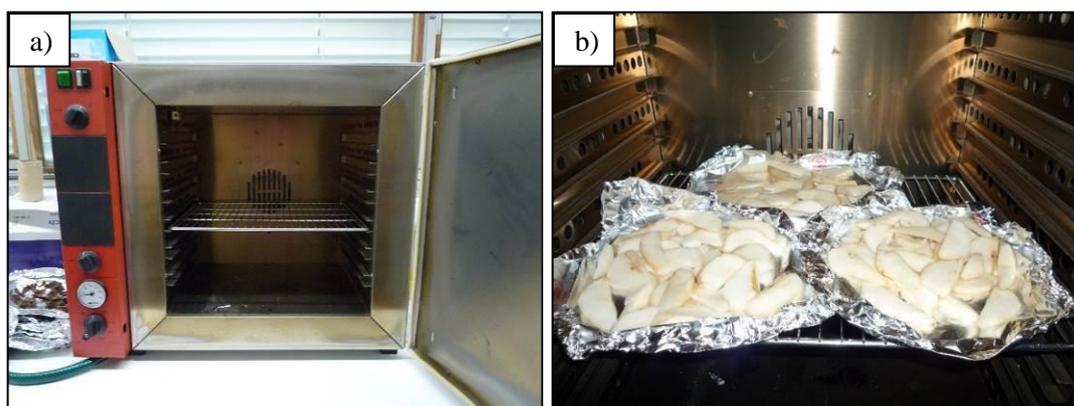


Figura 2.4. Determinação da humidade: a) estufa *WTC Binder*; b) pormenor da colocação das amostras.

2.4. Determinação do Teor de Equilíbrio

Tal como referido em **1.3**, o conhecimento do teor de equilíbrio do fruto, para as condições de temperatura e humidade relativa utilizadas durante a secagem, é essencial para o conhecimento da evolução do teor de água durante o processo e das condições finais possíveis de se atingir. Assim, por não ter sido possível obter a informação relativa a teores de equilíbrio para peras a 50 °C foi necessária a determinação experimental da mesma pelo método a seguir descrito.

Foram descascadas três peras e cortadas em pedaços com aproximadamente dois milímetros de espessura. Estas foram de seguida colocadas no tabuleiro de ensaios da câmara descrita em **2.1**, com a caixa configurada para uma fase convectiva com uma velocidade de escoamento de 1,28 m/s, sendo a câmara climática programada para as condições higrotérmicas pretendidas nesta determinação. Durante o ensaio, com a duração

de 96h, fez-se a aquisição contínua da massa da amostra, até se obter uma massa constante. A diferença entre o valor da massa no fim do ensaio e a massa seca da amostra, determinada pelo método referido em 3.3, permite obter o teor de água de equilíbrio, para as condições testadas.

2.5. Determinação da Diminuição do Raio (*Shrinkage*)

Para aferir o modelo matemático usado, avaliou-se experimentalmente a variação de tamanho das peras inteiras utilizadas ao longo de um ensaio de secagem. Para isso, realizou-se um teste em modo descontínuo e, nas transições das fases, em que se procede à abertura da câmara climática para a necessária alteração de configuração da caixa de ensaios, e ainda no início e fim dos testes, foram feitas duas medições individuais a cada uma das peras utilizadas, com recurso a um paquímetro, anotando-se os valores e estabelecendo a sua média como o diâmetro. Os valores do raio determinados foram comparados com o modelo referido em 3.4.

2.6. Condições dos Ensaios Realizados

Nos ensaios realizados no âmbito desta dissertação utilizou-se pera *Rocha*, devido à impossibilidade de obter peras da variedade *São Bartolomeu*. Em cada ensaio, selecionaram-se três ou quatro peras do lote em estudo, de forma aproximadamente esférica e com calibre semelhante. De seguida, foram descascadas, mantendo o pedúnculo intacto, e distribuídas no tabuleiro de ensaios.

Tendo em conta as diferentes fases pretendidas para o processo cíclico de secagem descontínua, descritas em 1.7, adotou-se a seguinte designação nos ensaios realizados:

- **Fase C** - fase convectiva com temperatura elevada e 15 % de humidade relativa do ar.
- **Fase RQ** - fase de repouso “quente”, com temperatura igual à fase convectiva e 80 % de humidade relativa do ar.
- **Fase RF** - fase de repouso “frio”, igual para todos os ensaios de secagem descontínua, a 17 °C de temperatura e 80 % de humidade relativa do ar.

Na **Tabela 2.1** encontra-se resumida a restante informação e a designação relativa aos onze ensaios realizados. Adotou-se ainda a utilização de um código identificativo para melhor interpretação das figuras, sendo constituído pela identificação do tipo de secagem (C para contínua e D para descontínua), seguido do valor da temperatura do ensaio, V1 para 1,28 m/s ou V2 para 2,66 m/s e, por fim, no caso dos ensaios descontínuos, P e o número de pausas utilizadas.

Tabela 2.1. Resumo das condições dos ensaios.

Ensaio	Código	Fase C			Fase RQ + RF	Nº Ciclos
		T [°C]	U [m/s]	Duração [h]	Duração [h]	
1	C40V1	40	1,28	-	-	Contínuo
2	D40V1P6			8	10	6
3	D40V1P5			10	14	5
4	D40V1P2			10	14	2
5	C50V1	50	1,28	-	-	Contínuo
6	D50V1P2			10	14	2
7	D50V1P3			10	14	3
8	C50V2	50	2,66	-	-	Contínuo
9	D50V2P2			10	14	2
10	D50V2P3			10	14	3
11	D50V2P4			10	14	4

A fase de repouso é constituída pelas fases RQ e RF, sendo a sua duração, indicada na tabela, repartida de igual modo entre estas. Além disso, estão incluídos nessa duração trinta minutos de transição em patamares, para uma mudança menos brusca entre temperaturas, e dois períodos de cinco minutos para mudança de configuração da caixa de ensaios entre a fase de repouso e a fase convectiva. Os ensaios iniciam-se sempre com a fase C e os ciclos são constituídos pela sequência de fases (C, RQ, RF), com as durações presentes na tabela. Nos ensaios descontínuos, após a realização do número de ciclos pré-estabelecidos, estes continuam com a fase C até ao fim. Para todos os ensaios realizados, o objetivo final foi de, aproximadamente e sempre que possível, 18% em base seca. Em todos os testes, a câmara climática foi ligada previamente de forma a estabilizar as condições de temperatura e de humidade relativa especificadas para a fase C inicial.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Dados Iniciais dos Ensaiois

Na **Tabela 3.1** apresentam-se os valores iniciais de diâmetro e de teor de água (em base húmida e seca) dos vários lotes de peras utilizados nos diferentes ensaios.

Tabela 3.1. Calibre e teores de água iniciais das peras nos ensaios realizados.

Ensaio	Calibre [cm]	W _{b.h.} [%]	W _{b.s.} [kg (H ₂ O)/kg (m _s)]
1	5,30 (±0,17)	84,9 (±0,2)	5,64 (±0,09)
2	5,60 (±0,21)	86,3 (±0,2)	6,30 (±0,09)
3	5,30 (±0,17)	84,3 (±0,5)	5,37 (±0,21)
4	5,36 (±0,16)	86,6 (±0,6)	6,48 (±0,33)
5	5,24 (±0,15)	84,7 (±0,3)	5,55 (±0,14)
6	5,32 (±0,22)	86,1 (±0,1)	6,21 (±0,03)
7	5,70 (±0,29)	86,2 (±0,1)	6,25 (±0,04)
8	5,49 (±0,40)	84,3 (±0,2)	5,38 (±0,10)
9	5,44 (±0,11)	87,9 (±0,1)	7,24 (±0,04)
10	5,64 (±0,17)	87,4 (±0,1)	6,93 (±0,09)
11	5,56 (±0,19)	87,2 (±0,3)	6,80 (±0,18)

Verifica-se que os calibres dos diferentes lotes são semelhantes, encontrando-se dentro do esperado e de acordo com a informação presente nas próprias embalagens. As peras utilizadas apresentam dimensões semelhantes à variedade *São Bartolomeu*, tendo igualmente sido selecionados frutos com geometria aproximadamente esférica.

Em relação aos teores de água em base seca das amostras (5,37-7,24 [kg (H₂O)/kg (m_s)]), os valores encontram-se dentro do esperado para peras da mesma variedade face aos dados da literatura (Guiné, 2005) e bastante próximos dos de outras variedades, inclusive *São Bartolomeu* (Guiné, 2006; Mrad *et al.*, 2012).

3.2. Teor de Equilíbrio a 50°C e 15%HR

Para estes ensaios, foi necessário determinar o teor de equilíbrio devido à impossibilidade de encontrar na literatura um valor adequado. Seguindo a metodologia referida na secção 2.4, o valor obtido é de $W_{\text{equilíbrio}} = 0,0993 \text{ kg (H}_2\text{O)/kg (m}_s\text{)}$. Na **Figura 3.1** é visível o aspeto inicial e final das amostras.

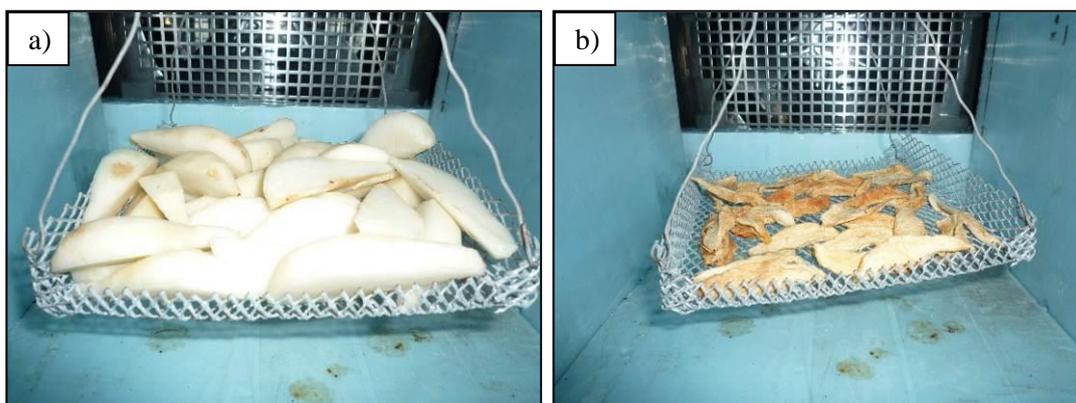


Figura 3.1. Aspeto das peras na determinação do teor de equilíbrio: a) início do ensaio; b) fim do ensaio.

3.3. Resultados Experimentais

Na **Figura 3.2** encontra-se representada a evolução temporal da massa de água normalizada (M^*) para os onze ensaios realizados.

Verifica-se que as três secagens contínuas (ensaios 1, 5 e 8) foram claramente mais rápidas que as restantes. A análise mais detalhada da influência da temperatura, da velocidade do ar, do número de ciclos e duração de cada fase, será detalhada nas subsecções 3.3.1, 3.3.2, 3.3.3 e 3.3.4, respetivamente. Na **Figura 3.3** e na **Figura 3.4** estão representadas as evoluções das temperaturas e dos teores de água em base seca para um ensaio contínuo e um ensaio descontínuo, respetivamente. As temperaturas representadas correspondem ao interior e à superfície das peras (T_{int} e T_{sup}), à temperatura na câmara climática (T_{cam}) e à temperatura à altura do tabuleiro dentro da caixa de ensaios (T_{tab}).

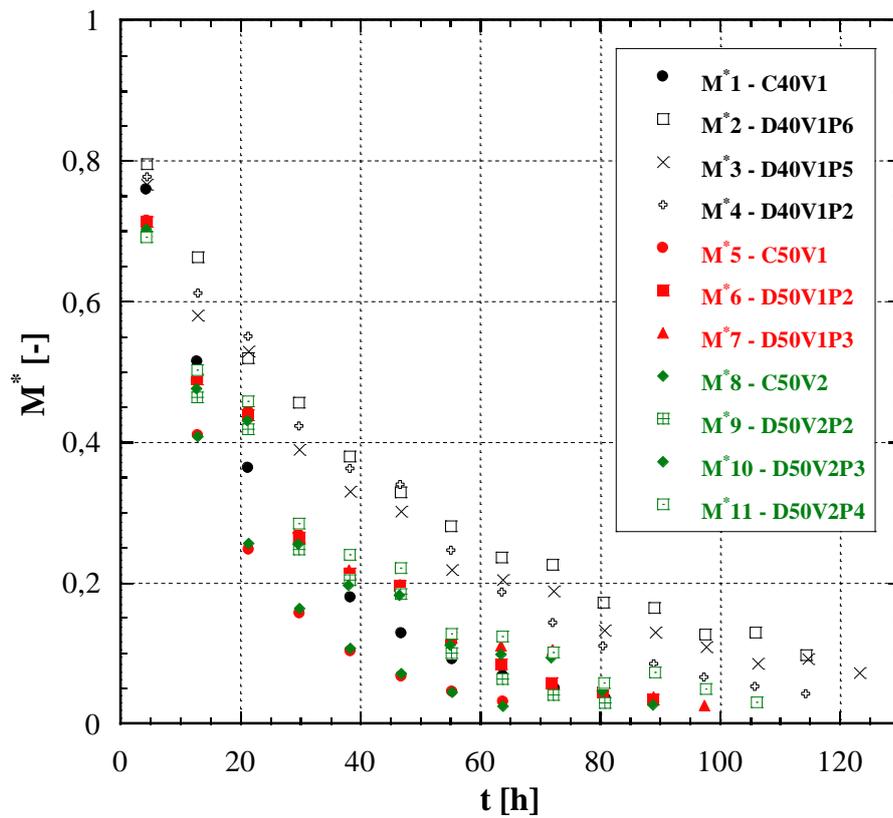


Figura 3.2. Variação temporal da massa de água normalizada para os ensaios realizados.

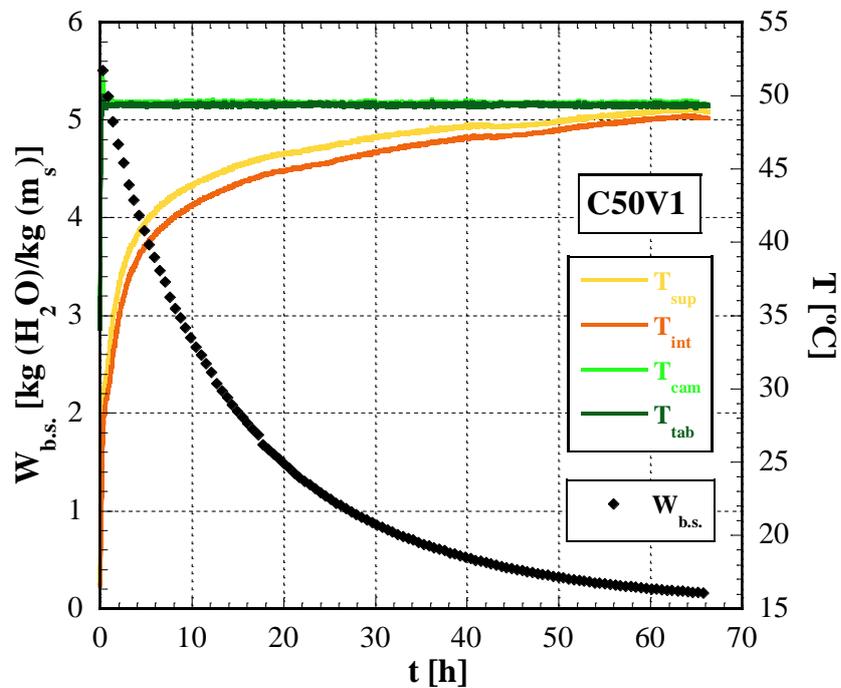


Figura 3.3. Evolução temporal do teor de água em base seca e temperaturas durante o ensaio 5.

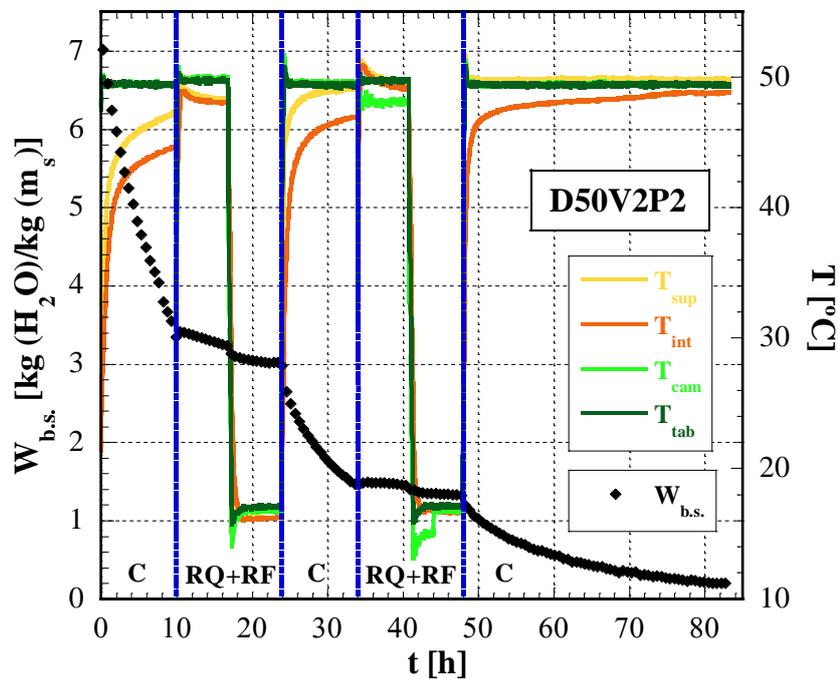


Figura 3.4. Evolução temporal do teor de água em base seca e temperaturas durante o ensaio 9.

Verifica-se que nos períodos correspondentes às fases C, a evolução das temperaturas das peras é contrária à evolução dos teores de água, para os dois exemplos. Observa-se também que a temperatura à superfície das peras é sempre superior à temperatura no seu interior. Constatou-se igualmente que o gradiente de temperatura no fruto é variável ao longo do ensaio. Esta variação, de acordo com Lengyel (2007), evidencia a inexistência de um período com taxa de secagem constante. Ainda na **Figura 3.4**, nos períodos correspondentes à fase RQ, com humidade relativa do ar elevada, devido à ausência de escoamento, as temperaturas interna e externa das peras encontram-se próximas da temperatura do ar de secagem e o gradiente entre elas é menor, sendo o mesmo fenómeno constatado na fase RF. Todos os ensaios realizados apresentam perfis semelhantes de temperaturas, para fases iguais.

Na **Figura 3.5** e **Figura 3.6** estão ilustradas as evoluções do aspeto das peras, a título de exemplo, para um ensaio contínuo e um ensaio descontínuo, respetivamente.

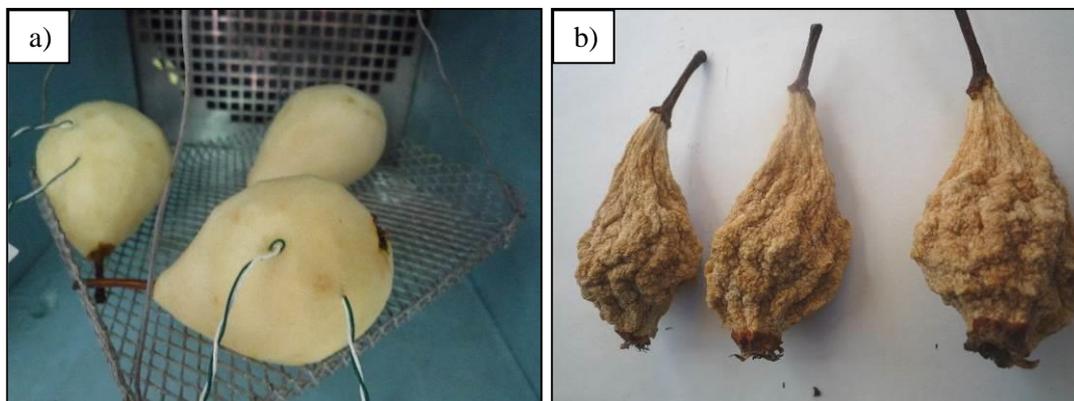


Figura 3.5. Aspeto visual das peras para o ensaio 8 (contínuo): a) início do ensaio; b) fim do ensaio.

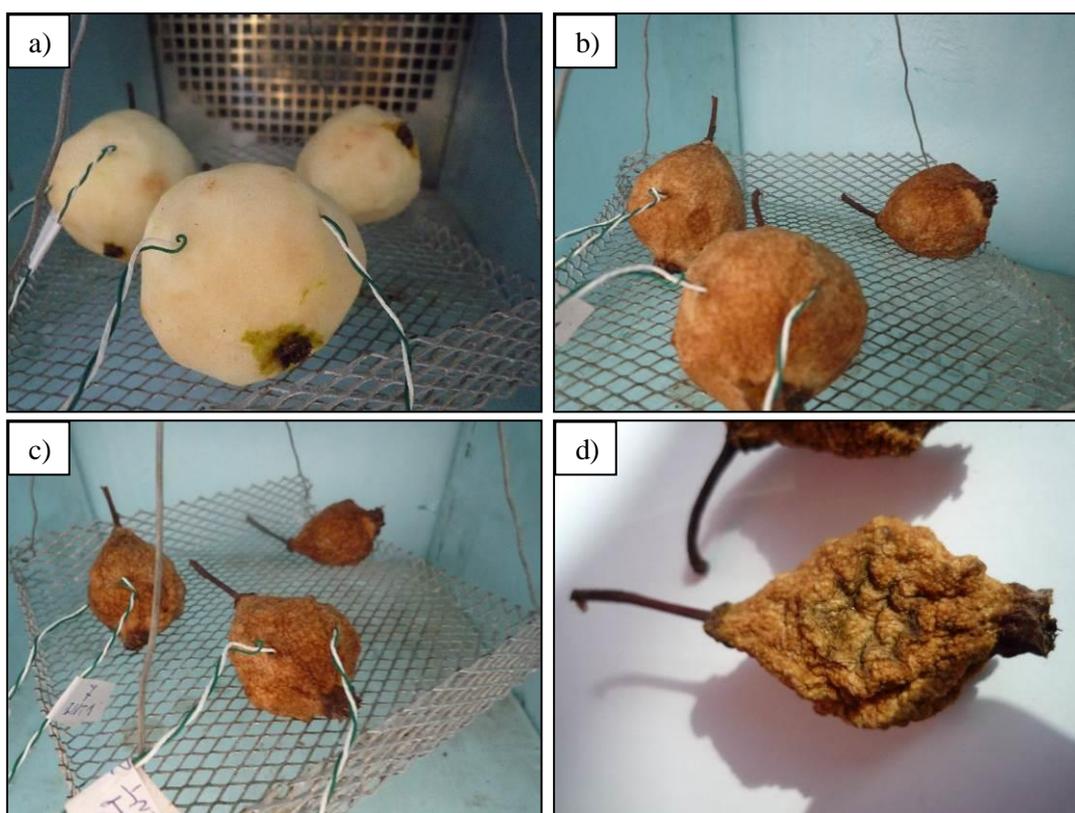


Figura 3.6. Aspeto visual das peras para o ensaio 10 (descontínuo, com 3 pausas): a) início do ensaio; b) 24 horas de ensaio; c) 72 horas de ensaio; d) fim do ensaio.

Comparando as figuras, verifica-se que a coloração das peras no final do ensaio descontínuo é a mais próxima da cor típica da *Pera Passa* tradicional.

3.3.1. Influência da Temperatura

A Figura 3.7 mostra a evolução da massa de água normalizada em função do tempo para os ensaios 1, 4, 5 e 6.

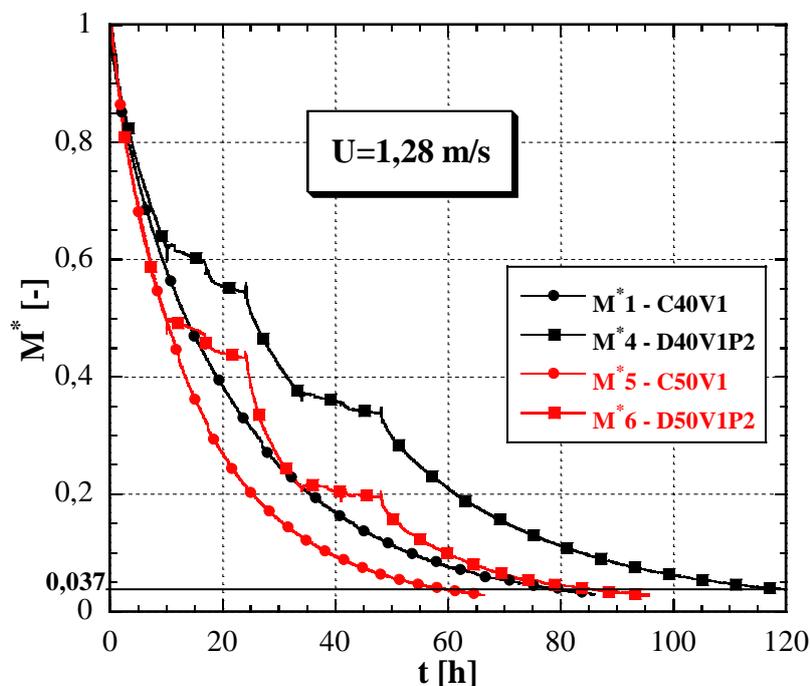


Figura 3.7. Variação temporal da massa de água normalizada para os ensaios 1 e 5 (contínuos) e 4 e 6 (descontínuos).

É possível observar na figura que a temperatura do ar tem bastante influência na cinética de secagem, reduzindo o tempo total do processo: para $M^* = 0,037$, o aumento da temperatura leva a uma redução de 24,4% e 29,0% do tempo total para os ensaios contínuos (1 e 5) e descontínuos (4 e 6), respectivamente. Esta influência é corroborada por outros autores em secagens de diferentes produtos biológicos (Babalís e Belessiotis, 2004; Doymaz, 2013; Mrad *et al.*, 2012; Uribe *et al.*, 2009). Segundo Doymaz (2013), o aumento da temperatura de secagem facilita a migração do teor de água do interior do fruto até à sua superfície e aumenta a pressão parcial de vapor no interior das peras.

3.3.2. Influência da Velocidade do Ar

A **Figura 3.8** mostra a variação temporal da massa de água normalizada para os ensaios 5 a 10.

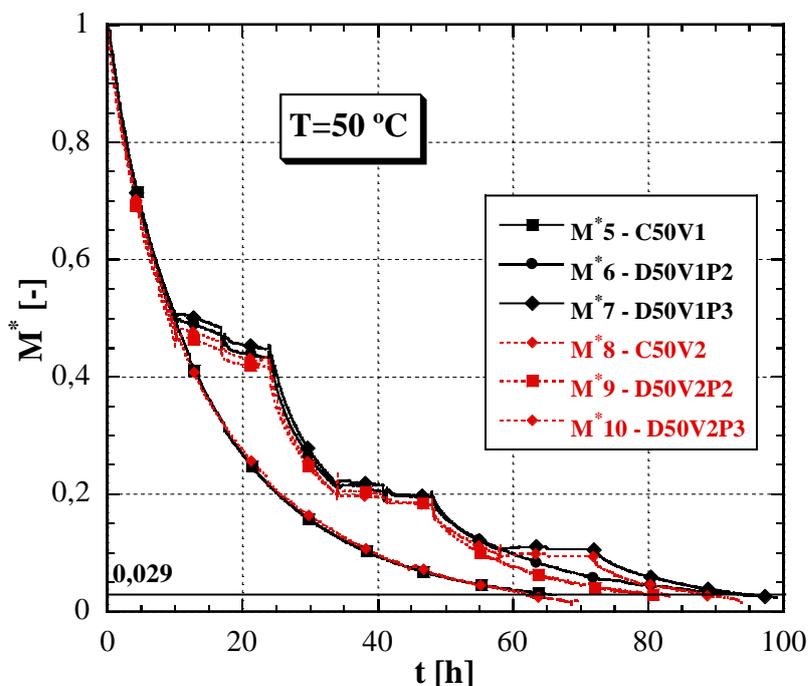


Figura 3.8. Variação temporal da massa de água normalizada para os ensaios 5 a 10.

Verifica-se que para um valor final do teor de água adimensional de 0,029, o aumento da velocidade do escoamento levou a uma redução do tempo total do processo de 6,9% nos ensaios contínuos (5 e 8), 16,6% nos ensaios descontínuos com duas pausas (6 e 9) e 7,0% nos ensaios descontínuos com três pausas (7 e 10). Constata-se, assim, que a velocidade do ar tem uma menor influência do que a temperatura na cinética de secagem. Esta observação vai de encontro ao que se encontra na literatura, para vários produtos biológicos (Babalís e Belessiotis, 2004; Mohamed *et al.*, 2008; Zlatanović *et al.*, 2013).

3.3.3. Influência do Número de Pausas

A Figura 3.9 mostra a evolução temporal da massa de água normalizada para os ensaios 8 a 11.

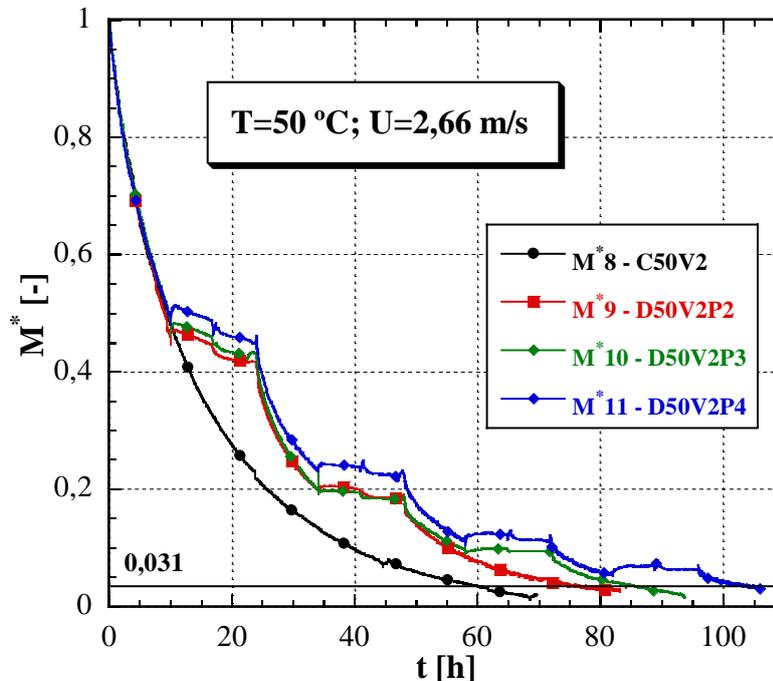


Figura 3.9. Variação temporal da massa de água normalizada para os ensaios 8 a 11.

Para um valor final de $M^* = 0,031$, o tempo total do processo para os referidos ensaios é de 61,4 h, 77,7 h, 87,2 h e 106,0 h respetivamente. Apesar do aumento no tempo total do processo com a introdução das fases de repouso, o tempo efetivo de secagem convectiva é de 49,7 h para o ensaio 9 (duas pausas), 45,2 h para o ensaio 10 (três pausas) e 50 h para o ensaio 11 (quatro pausas). Em comparação com o ensaio contínuo, as reduções do tempo efetivo de secagem são, respetivamente, 19,2%, 26,4% e 18,6%. Constata-se, assim, que a introdução de interrupções no processo de secagem leva a uma redução do tempo efetivo de operação, apesar de um ligeiro aumento no tempo global do processo. O período de repouso, em que o escoamento é praticamente nulo, vai permitir a redistribuição do teor de água no interior do produto, tornando a secagem mais eficiente na fase convectiva seguinte. Este fenómeno é demonstrado por vários autores em diferentes trabalhos (da Silva *et al.*, 2015; Kumar *et al.*, 2014; Silva *et al.*, 2014). A redistribuição da água nas peras durante os períodos de pausa será mais pormenorizada em 3.6.

3.3.4. Influência da Duração das Pausas

A variação temporal da massa de água adimensional para os ensaios 1, 2 e 3, encontra-se representada na **Figura 3.10**.

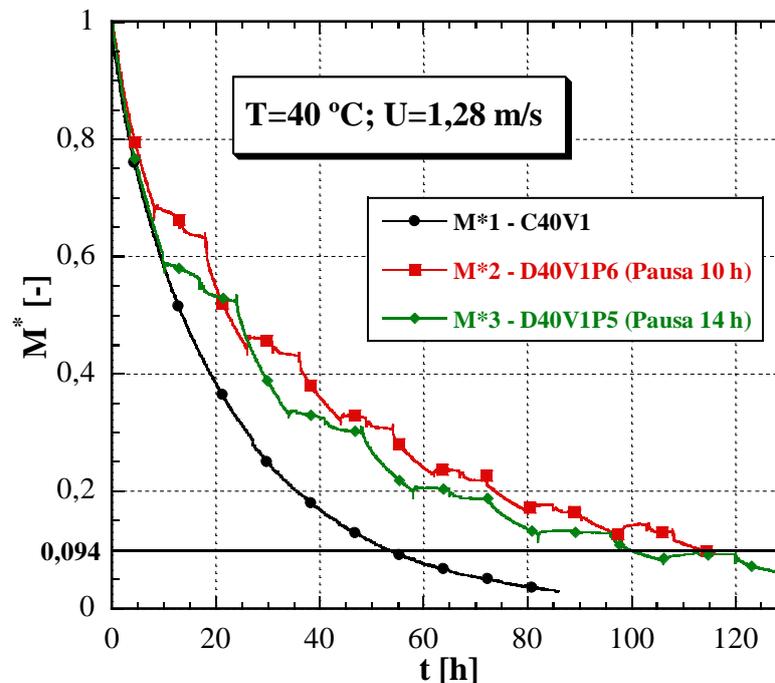


Figura 3.10. Variação temporal da massa de água normalizada para os ensaios 1 a 3.

Para um valor final de $M^* = 0,094$, o tempo total do processo foi de 54,7 h para o ensaio 1, 116 h para o ensaio 2 (com 10 h de duração para os períodos de repouso) e 101,2 h para o ensaio 3 (com 14 h de duração para os períodos de repouso). O tempo efetivo de operação foi de 56 h e 45,2 h para os ensaios 2 e 3, respetivamente, levando a um aumento do tempo de secagem de 2,4% para o ensaio 2 e uma diminuição de 17,4% para o ensaio 3, em relação ao ensaio contínuo. Facilmente se verifica que, contrariamente ao que foi referido em 3.3.3, a introdução de pausas não foi vantajosa no caso do ensaio 2, o que permite inferir que a duração dos períodos de repouso neste teste foi insuficiente para garantir uma redistribuição suficiente do teor de água no fruto. O tempo necessário para uniformização do teor de água nas peras é adiante analisado na secção 3.6, considerando uma solução para esferas de superfície impermeável (Crank, 1975), apresentada na secção 3.5.

3.4. Avaliação da Diminuição do Raio (*Shrinkage*)

De forma a avaliar o encolhimento (*shrinkage*) do produto ao longo do processo de secagem, considera-se como hipótese inicial que esta alteração é proporcional ao teor de água removido no fruto. Assim, conhecendo o valor do raio inicial das amostras medido experimentalmente, podemos admitir que a variação do volume (ΔV) é dada por

$$\Delta V = \frac{\Delta m_w}{\rho_w}, \quad (3.1)$$

sendo ρ_w a densidade da água. Desta forma, a evolução temporal do volume, entre dois instantes (t) consecutivos, é definida como

$$V_t = V_{t-1} - \Delta V, \quad (3.2)$$

e, conseqüentemente, o raio do produto ao longo do ensaio (r_t) é

$$r_t = \left(\frac{3V_t}{4\pi} \right)^{1/3}. \quad (3.3)$$

Foi utilizado o ensaio 11 para a determinação experimental da variação dimensional do produto ao longo do processo de secagem. Na **Figura 3.11** encontram-se os valores do raio medidos e os valores do raio obtidos para os mesmos instantes através do modelo representado pelas equações (3.1) a (3.3). Verifica-se que este modelo simples não é de todo irrealista, embora pareça subavaliar o encolhimento do produto, particularmente no final do processo de secagem.

Em alternativa, apresenta-se na **Figura 3.12** a variação do volume adimensional (V/V_0) em função da diminuição do teor de água em base seca. Verifica-se que a diminuição do volume deste fruto durante o processo de secagem apresenta uma relação linear direta com o teor de água. Moreira *et al.* (2000) obtiveram um coeficiente de R^2 de 0,98 para a mesma relação linear na secagem de discos de maçã. Existem ainda na literatura mais relações idênticas para outros produtos biológicos (Baini e Langrish, 2007; da Silva *et al.*, 2015; Mrad *et al.*, 2012; Ramos *et al.*, 2005).

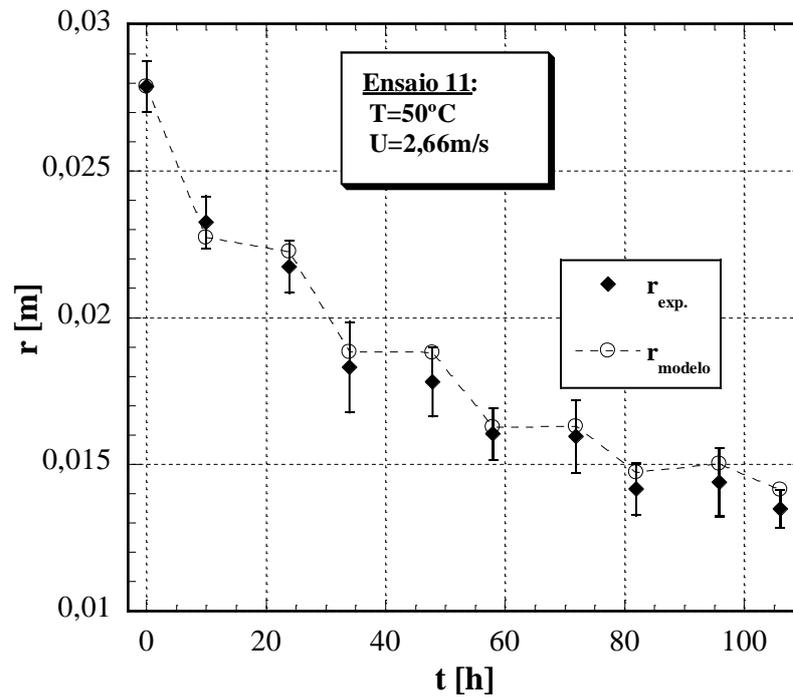


Figura 3.11. Evolução temporal do raio.

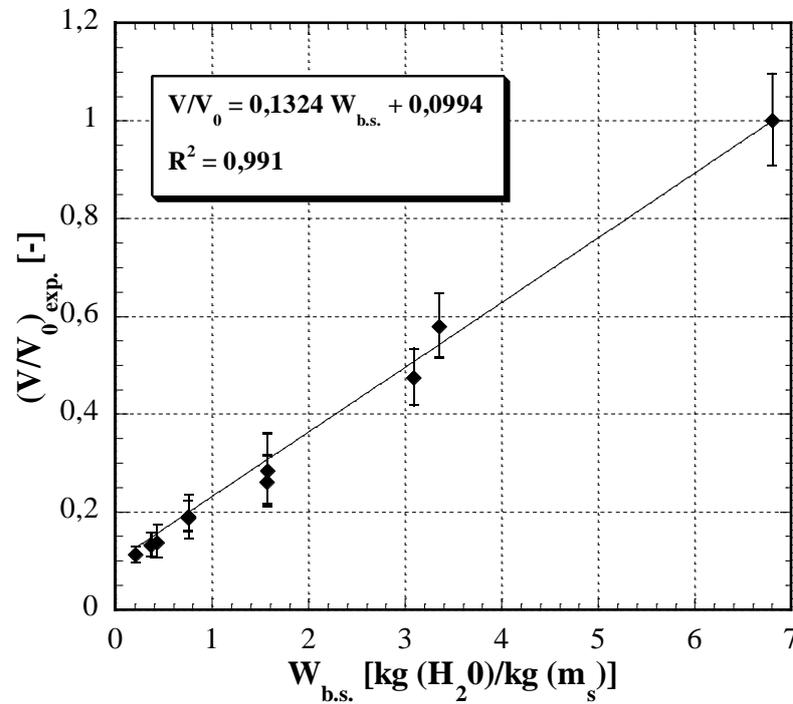


Figura 3.12. Relação linear do *shrinkage* com o teor de água em base seca, de acordo com dados experimentais.

3.5. Modelação Matemática

Admitindo uma condição de fronteira convectiva à superfície das peras, é possível obter o coeficiente de transferência de massa (h_m), a partir dos dados experimentais, através da seguinte equação,

$$h_m = \frac{-\frac{dm_w}{dt}}{A(C_s - C_{eq})}, \quad (3.4)$$

sendo que A representa a área total da superfície das peras exposta ao escoamento, C_s a concentração média de água à superfície para o intervalo de tempo considerado e C_{eq} a concentração de água do fruto no equilíbrio para as condições higrótérmicas utilizadas.

Para todos os ensaios contínuos e no início de todas as fases C nos ensaios de secagem descontínua admite-se que o teor de água inicial está uniformemente distribuído nas peras e que o valor da concentração de água à superfície é praticamente constante, nos instantes iniciais. Além disso, considera-se que não existe, nesses instantes, um período de taxa de secagem constante. Esta simplificação foi adotada por Silva *et al.* (2014) na secagem de peras de *São Bartolomeu*, bem como por outros autores na secagem de vários produtos biológicos (Doymaz, 2005; Guiné *et al.*, 2007b; Mohamed *et al.*, 2008; Sacilik *et al.*, 2006; Singh e Pandey, 2012; Zhu e Shen, 2014). Considera-se ainda que o valor do coeficiente de transferência massa, obtido a partir da equação (3.4) para os instantes iniciais dos ensaios realizados, não varia ao longo da secagem convectiva.

Assim, e tendo em conta a variação do raio das peras com o teor de água referido na secção 3.4, adotando a solução de Fick para uma esfera de diâmetro conhecido, a solução inicial e a condição de fronteira convectiva em qualquer instante são definidas por

$$\begin{cases} 0 \leq r \leq r_t; t = 0 : C(r, 0) = C_i \\ -D \frac{dC(t, r)}{dr} \Big|_{r=r_t} = h_m (C(t, r_t) - C_{eq}) \end{cases} \quad (3.5)$$

A concentração $C(t, r)$, solução da equação para a difusão de massa numa esfera nas condições referidas é obtida por (Crank, 1975):

$$\frac{C(t, r) - C_{eq}}{C_i - C_{eq}} = \frac{2Lr_t}{r} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{e^{-D\beta_n^2 t / r_t^2}}{[\beta_n^2 + L(L-1)]} \frac{\sin(\beta_n r / r_t)}{\sin \beta_n}, \quad (3.6)$$

sendo a evolução temporal da concentração média (\bar{C}) obtida por:

$$\frac{\bar{C}(t) - C_{eq}}{C_i - C_{eq}} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{6L^2 e^{-D\beta_n^2 t/r_t^2}}{\beta_n^2 [\beta_n^2 + L(L-1)]}. \quad (3.7)$$

De forma análoga, a evolução temporal da massa de água nas peras pode ser obtida através da expressão:

$$\frac{m_{w_i} - m_w(t)}{m_{w_i} - m_{w_{eq}}} = 1 - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{6L^2 e^{-D\beta_n^2 t/r_t^2}}{\beta_n^2 [\beta_n^2 + L(L-1)]}, \quad (3.8)$$

em que β_n são as soluções da equação

$$\beta_n \cot(\beta_n) + L - 1 = 0, \quad (3.9)$$

e L é um parâmetro adimensional, análogo a um número de Biot de massa, definido por

$$L = \frac{r_t h_m}{D}. \quad (3.10)$$

A aplicação da equação (3.8) permite determinar o coeficiente de difusão da água no interior do fruto (D) correspondente ao melhor ajustamento com os dados experimentais. O critério para o melhor ajuste é o da minimização do erro médio percentual absoluto (MAPE), definido por Hyndman e Koehler (2006).

Para os períodos de repouso, a validade da aplicação da equação de difusão de Fick baseia-se em duas condições: (i) a superfície das peras é considerada impermeável, ou seja, a concentração global de água não varia durante as fases de repouso, desprezando-se a ligeira perda de massa verificada em alguns destes períodos nos ensaios experimentais; (ii) a distribuição da concentração no início destes períodos é coincidente com a do instante final dos períodos convectivos precedentes, sendo obtida com recurso à equação (3.6).

Nestas condições, a solução proposta por Crank (1975) é:

$$C(t, r) = \frac{3}{r_0^3} \int_0^{r_0} r^2 f(r) dr + \frac{2}{r_0 r} \sum_{n=1}^{\infty} e^{-D\alpha_n^2 t} \frac{\sin(\alpha_n r)}{\sin^2(\alpha_n r_0)} \int_0^{r_0} r' f(r') \sin(\alpha_n r') dr', \quad (3.11)$$

em que $f(r)$ é a distribuição da concentração no instante inicial do período de repouso em análise, r' é uma variável muda e $\alpha_n r_0$ são as raízes positivas da equação

$$\alpha_n r_0 \cot(\alpha_n r_0) = 1. \quad (3.12)$$

A aplicação da equação (3.11) permite obter a evolução temporal da distribuição radial da concentração de água nas peras.

3.6. Aplicação do Modelo Matemático

Na **Tabela 3.2** apresentam-se os valores dos coeficientes de transferência de massa e de difusão para os ensaios realizados, obtidos através da aplicação das equações (3.4) e (3.8) respetivamente. O coeficiente de difusão varia ao longo de todo o ensaio, sendo os valores máximos e mínimos registados ao fim de 1 h e no final dos testes, respetivamente.

Tabela 3.2. Valores dos coeficientes obtidos.

Ensaio	$W_{b.s.}$ [kg (H ₂ O)/kg (m _s)]	Duração [h]	$h_m \times 10^7$ [m/s]	$D_{máximo} \times 10^9$ [m ² /s]	$D_{mínimo} \times 10^{10}$ [m ² /s]	MAPE _{médio} (D) [%]
1	0,169	85,9	1,88	2,5	2,4	0,821
2	0,594	116,0	1,90	1,1	0,6	1,109
3	0,322	130,0	1,93	1,6	1,1	0,491
4	0,238	121,0	1,94	1,5	2,3	0,491
5	0,159	66,2	3,22	1,0	5,0	0,573
6	0,177	95,6	3,15	1,3	4,0	1,641
7	0,148	99,0	2,80	2,4	5,5	3,493
8	0,105	69,7	3,54	1,4	1,9	0,744
9	0,189	83,2	3,68	2,4	7,4	1,272
10	0,110	93,8	3,60	2,1	3,8	4,762
11	0,202	106,0	3,54	2,4	4,0	1,940

Por observação dos valores apresentados na tabela, é possível agrupar os ensaios realizados com base no **coeficiente de transferência de massa**: os ensaios 1 a 4, realizados a **40 °C** e **1,28 m/s**, apresentam um valor médio de **$1,91 \times 10^{-7}$ m/s**; para os ensaios 5 a 7, com **50 °C** e **1,28 m/s**, o valor médio é de **$3,06 \times 10^{-7}$ m/s**; por fim, os ensaios 8 a 11, para a temperatura de **50 °C** e escoamento de **2,66 m/s**, a média dos valores é de **$3,59 \times 10^{-7}$ m/s**. Pode-se concluir que, tal como foi referido em 3.3.1, o aumento da temperatura facilita a evaporação da água na superfície das peras. Verifica-se ainda que o efeito da velocidade do ar na cinética de secagem é inferior ao efeito da temperatura: para a mesma velocidade, o aumento da temperatura levou a um aumento de 37,5% no coeficiente de transferência de massa; o aumento da velocidade do ar levou apenas a um aumento de 14,6% no mesmo parâmetro.

Em relação aos valores obtidos para o **coeficiente de difusão**, e seguindo o mesmo agrupamento do parágrafo anterior, os valores médios são de $9,2 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ para os ensaios 1 a 4, $1,0 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ para os testes 5 a 7 e $1,3 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ para as secagens 8 a 11. Assim, também neste parâmetro o efeito da temperatura leva a uma subida dos valores médios, sendo este efeito menos notório quando se aumenta a velocidade do escoamento. Na **Tabela 3.3** apresentam-se alguns exemplos de valores médios obtidos por diversos autores para D, em condições de secagem semelhantes.

Tabela 3.3. Valores do coeficiente de difusão para outros produtos biológicos.

Referência	Produto	$D \times 10^{10} [\text{m}^2/\text{s}]$
Guiné <i>et al.</i> (2007b)	Peras (4 variedades)	9,77 a 11,6
Park <i>et al.</i> (2001b)	Pera fatiada	55,6 a 137
Uribe <i>et al.</i> (2009)	Pepino Doce	2,55 a 7,29
Singh e Pandey, (2012)	Batata-doce	11,6 a 88,0
Zhu e Shen (2014)	Pêssego	5,61 a 13,4

Pode-se constatar a proximidade entre os valores obtidos no presente estudo e os que se encontram na literatura. Destaca-se a semelhança dos valores calculados por Guiné *et al.* (2007b) para diferentes variedades de peras. Ainda na **Tabela 3.2** é possível verificar que os valores de MAPE obtidos demonstram o ajuste satisfatório entre os dados experimentais e previstos pelo modelo matemático. A título de exemplo, estão representadas na **Figura 3.13** e **Figura 3.14** as evoluções dos teores de água em base seca, modelados e determinados experimentalmente, ao longo de um ensaio contínuo e um de ensaio descontínuo, respetivamente. No **ANEXO C** encontram-se as correspondentes evoluções para os restantes testes realizados.

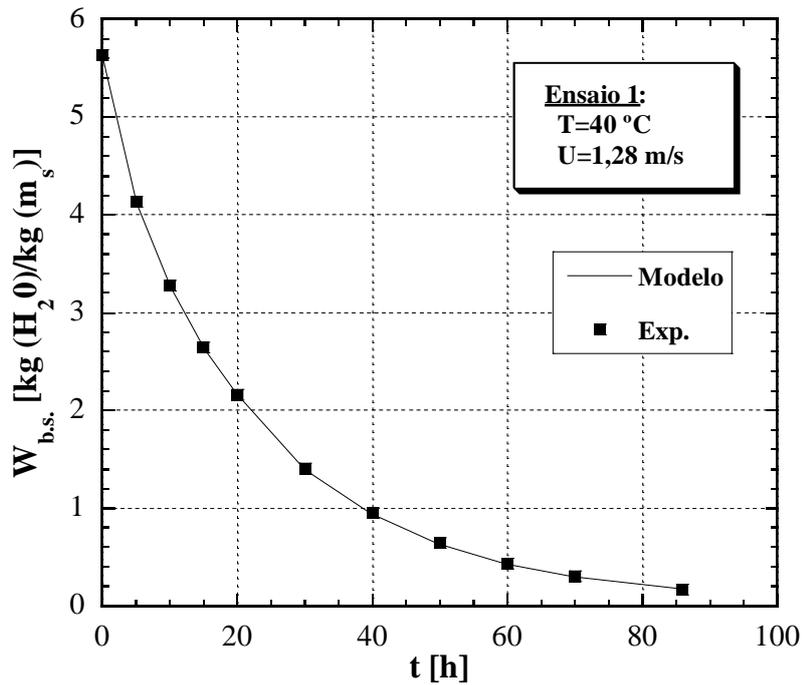


Figura 3.13. Aplicação do modelo matemático de difusão ao ensaio 1.

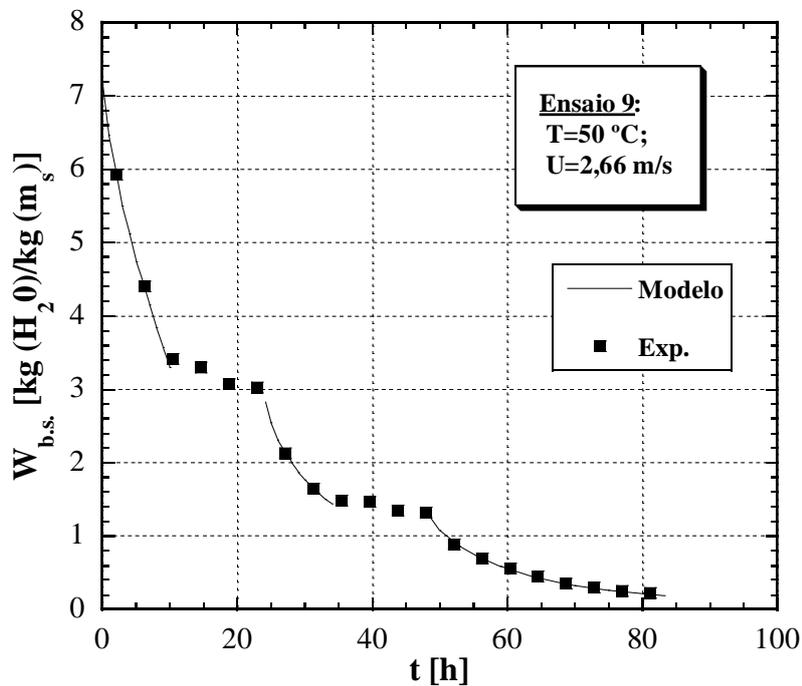


Figura 3.14. Aplicação do modelo matemático de difusão ao ensaio 9.

Este modelo permite igualmente avaliar a redistribuição do teor de água no interior das peras durante as fases de repouso. Na **Figura 3.15** e **Figura 3.16** mostram-se

as evoluções temporais da distribuição radial da concentração de água para as duas pausas do ensaio 6, obtidas através da equação (3.11).

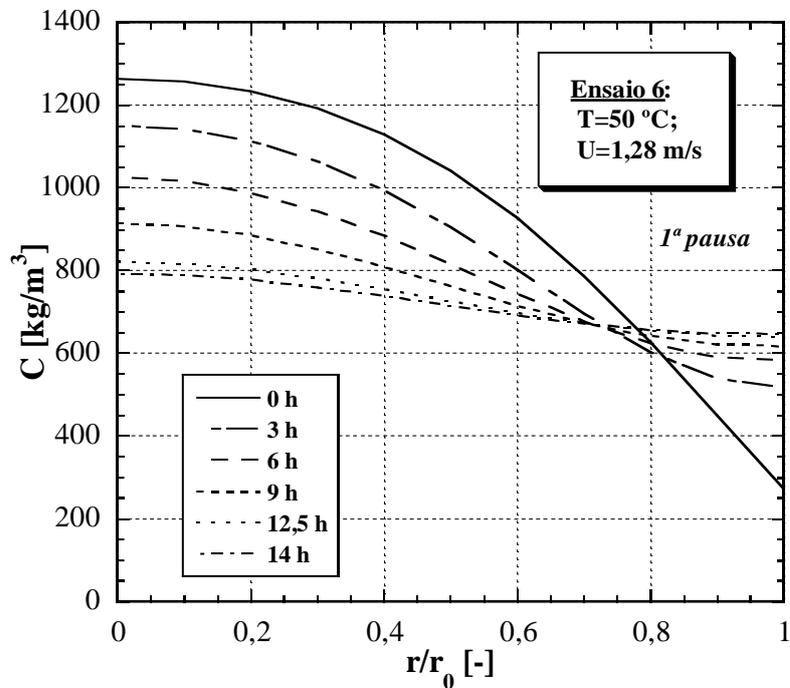


Figura 3.15. Distribuição radial prevista pelo modelo matemático no período da 1ª pausa do ensaio 6.

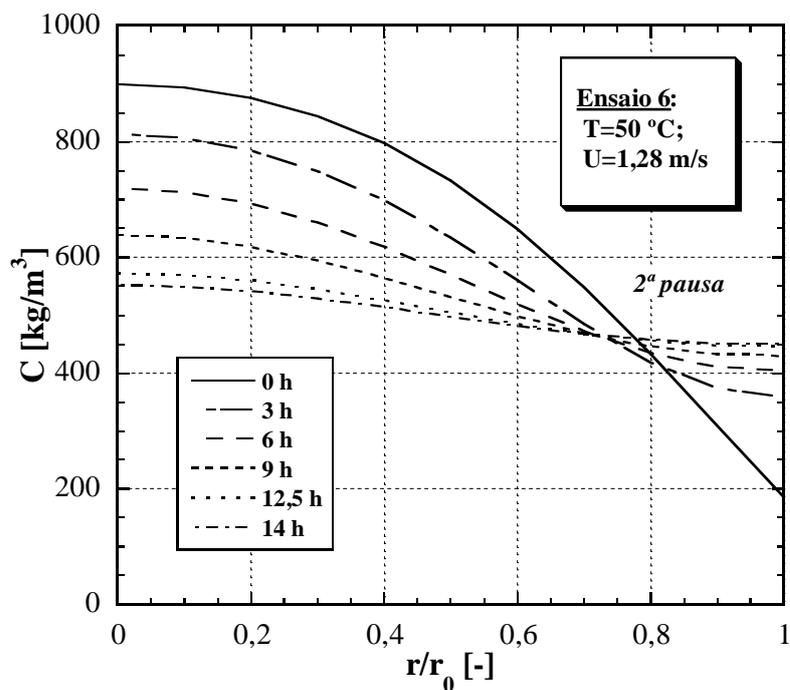


Figura 3.16. Distribuição radial prevista pelo modelo matemático no período da 2ª pausa do ensaio 6.

No **ANEXO C** encontram-se as restantes distribuições radiais obtidas para os períodos de repouso dos vários ensaios descontínuos realizados.

É possível verificar através das figuras que a duração das pausas deste ensaio foi suficiente para se obter uma boa uniformização da concentração nas peras. Por forma a confirmar esta observação, é possível determinar o tempo necessário para a água se redistribuir no interior do fruto, através da percentagem da concentração média de água verificada à superfície. Na **Figura 3.17** encontra-se ilustrada a evolução da concentração à superfície para as duas pausas do ensaio 6.

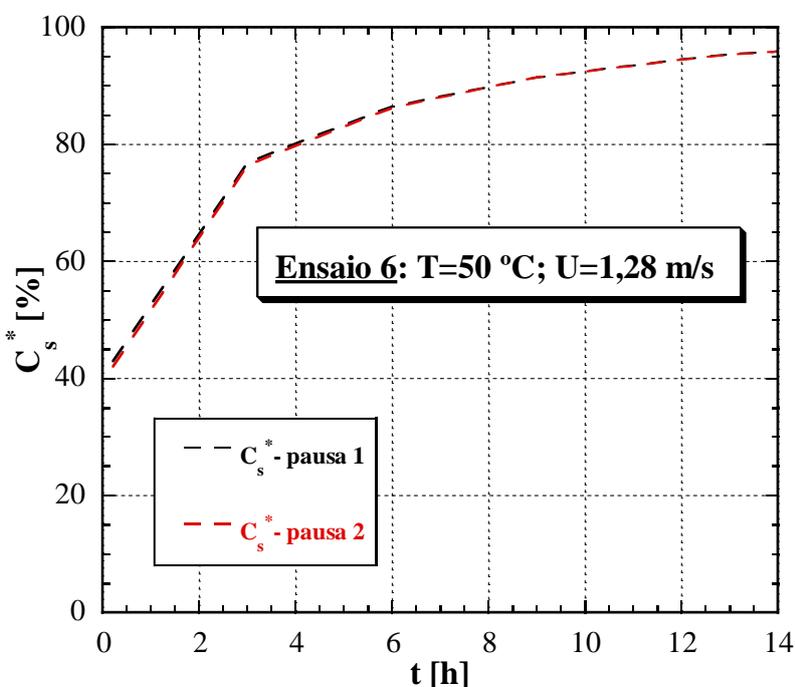


Figura 3.17. Evolução ao longo das pausas da percentagem de água à superfície no ensaio 6.

O parâmetro C_s^* representa a percentagem de água na superfície das peras em relação à concentração média de água no período de repouso em questão. Para as condições do ensaio 6, a duração de 14 horas imposta para os períodos de repouso foi suficiente para se atingir à superfície 96% do valor da concentração média nas duas pausas, pelo que se confirma que os tempos utilizados foram suficientes para uma satisfatória redistribuição da água no interior das peras. Na **Figura 3.18** é representada a mesma evolução para as pausas do ensaio 2.

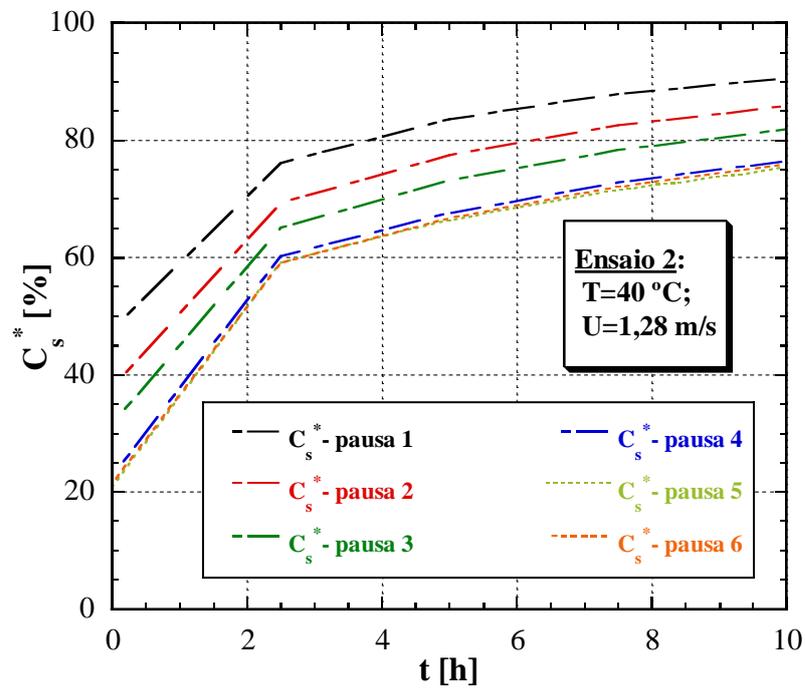


Figura 3.18. Evolução ao longo das pausas da percentagem de água à superfície no ensaio 2.

Tal como sugerido em 3.3.4, a duração das pausas deste ensaio foi insuficiente para se atingir uma satisfatória homogeneização: embora se tenha atingido à superfície 91% da concentração média na 1ª pausa, valor este que pode ser considerado satisfatório, esta relação entre C_s e \bar{C} caiu para 86%, 82%, 77%, 76% e 76% nas pausas seguintes, respetivamente.

4. CONCLUSÕES

Os testes realizados permitiram estudar a cinética de secagem de peras da variedade *Rocha* em modo contínuo e descontínuo, com vista à otimização da adaptação industrial do método tradicional de secagem para produção de *Pera Passa*.

Assim, foram testadas duas temperaturas de processamento (40 e 50 °C), duas velocidades do ar (1,28 e 2,66 m/s), introduziram-se diferentes números de descontinuidades (pausas) e diferentes durações destas. Além disso, compararam-se os resultados experimentais com um modelo matemático baseado nas equações de difusão de Fick, impondo uma condição convectiva à superfície e raio das peras e coeficiente de difusão variáveis.

Conclui-se que o aumento da temperatura tem uma maior influência na cinética de secagem, quando comparado com o aumento da velocidade de escoamento: o aumento de 40 para 50 °C permitiu uma redução entre 24,4 e 29,0% do tempo total do processo; o aumento da velocidade do ar de 1,28 para 2,66 m/s reduziu a duração total do mesmo entre 6,9 e 16,6%.

Verificou-se também que a utilização de interrupções permite reduzir o tempo efetivo de secagem: o uso de dois a quatro períodos de repouso com duração de 14 horas proporcionou uma redução entre 18,6 a 26,4% do tempo convectivo, apesar do aumento do tempo total. Observou-se também que a duração destas pausas deve ser suficiente para permitir a redistribuição de água ao longo do raio do fruto nas pausas.

Os resultados obtidos pelo modelo matemático utilizado ajustam-se satisfatoriamente aos dados experimentais, demonstrando particularmente a influência das alterações estruturais ocorridas durante o processo, ou seja, o encolhimento do fruto com a respetiva diminuição do raio.

No global, pode concluir-se que as secagens descontínuas permitem uma redução do tempo efetivo de operação convectiva, não obstante o aumento do tempo global de processamento, levando a poupanças energéticas e à possível integração nestes processos de fontes de energia renovável de carácter intermitente, como a energia solar.

Assim, torna-se interessante otimizar as durações e frequências de ciclos secagem/repouso, estabelecendo com os produtores/indústria uma relação ideal entre os tempos de processamento pretendidos, os gastos energéticos desejáveis e, obviamente, o tipo de produto final pretendido.

O modelo matemático utilizado admitiu que o coeficiente de transferência de massa se mantém constante ao longo de todo o processo. Apesar dos bons resultados obtidos com esta aproximação, importa futuramente avaliar a influência das alterações dimensionais sobre este parâmetro.

Deve-se ainda procurar validar a relação linear de variação de volume com o teor de água da amostra para outras temperaturas do ar de secagem e outras geometrias do produto a secar.

Igualmente, importa aplicar o modelo de difusão utilizado em outros produtos biológicos, procurando o quanto possível desenvolver novos produtos secados e valorizar os existentes.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aktaş, M., Ceylan, I., Yilmaz, S. (2009). Determination of drying characteristics of apples in a heat pump and solar dryer. *Desalination*, 238, 266–275.
- Babalís, S.J., Belessiotis, V.G. (2004). Influence of the drying conditions on the drying constants and moisture diffusivity during the thin-layer drying of figs. *Journal of Food Engineering*, 65, 449–458.
- Baini, R., Langrish, T.A.G. (2007). Choosing an appropriate drying model for intermittent and continuous drying of bananas. *Journal of Food Engineering*, 79 (1), 330–343.
- Barati, E., Esfahani, J.A. (2012). Mathematical simulation of convective drying: spatially distributed temperature and moisture in carrot slab. *International Journal of Thermal Sciences*, 56, 86–94.
- Belessiotis, V., Delyannis, E. (2011). Solar drying. *Solar Energy*, 85 (8), 1665–1691.
- Crank, J. (1975). The mathematics of diffusion. Second edition. Cap. I e VI. Oxford University Press, Ely house, London, Great Britain.
- Cruz, A.C., Guiné, R.P.F., Gonçalves, J.C. (2014). Drying kinetics and product quality for convective drying of apples (cvs. *Golden Delicious* and *Granny Smith*). *International Journal of Fruit Science*, 15, 54–78.
- da Silva, W.P., Rodrigues, A.F., e Silva, C.M.D.P.S., de Castro, D.S., Gomes, J.P. (2015). Comparison between continuous and intermittent drying of whole bananas using empirical and diffusion models to describe the processes. *Journal of Food Engineering*, 166, 230–236.

- da Silva, W.P., Silva, C.M.D.P.S., Aires, J.E.F., Junior, A.F.S. (2014). Osmotic dehydration and convective drying of coconut slices: experimental determination and description using one-dimensional diffusion model. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 13 (2), 162–168.
- Dev, S.R.S., Raghavan, V.G.S. (2012). Advancements in drying techniques for food, fiber, and fuel. *Drying Technology*, 30, 1147–1159.
- Doymaz, I. (2005). Sun drying of figs: an experimental study. *Journal of Food Engineering*, 71, 403–407.
- Doymaz, I. (2007). The kinetics of forced convective air-drying of pumpkin slices. *Journal of Food Engineering*, 79, 243–248.
- Doymaz, I. (2009). An experimental study on drying of green apples. *Drying Technology*, 27, 478–485.
- Doymaz, I. (2013). Experimental study on drying of pear slices in a convective dryer. *International Journal of Food Science and Technology*, 48, 1909–1915.
- Ehiem, J.C., Irtwange, S.V, Obetta, S.E. (2009). Design and development of an industrial fruit and vegetable dryer. *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology*, 1 (2), 44–53.
- Ekechukwu, O., Norton, B. (1999). Review of solar-energy drying systems II: an overview of solar drying technology. *Energy Conversion and Management*, 40, 615–655.
- Ferreira, A, Candeias, M. (2005). Secagem solar de frutos e plantas aromáticas. *Revista de Ciências Agrárias*, 28 (1), 363–370.
- Golestani, R., Raisi, A., Aroujalian, A. (2013). Mathematical modeling on air drying of apples considering shrinkage and variable diffusion coefficient. *Drying Technology*, 31, 40–51.
- Guiné, R.P.F. (2005). Drying kinetics of some varieties of pears produced in Portugal. *Food and Bioproducts Processing*, 83, 273–276.

- Guiné, R.P.F. (2006). Influence of drying method on density and porosity of pears. *Food and Bioproducts Processing*, 84 (3), 179–185.
- Guiné, R.P.F. (2008). Pear drying: experimental validation of a mathematical prediction model. *Food and Bioproducts Processing*, 86, 248–253.
- Guiné, R.P.F. (2013). Variation of textural attributes of *S. Bartolomeu* pears at maturation, storage, and drying. *International Journal of Food Properties*, 16, 180–192.
- Guiné, R.P.F., Barroca, M.J., Lima, M.J.R. (2011). Comparative study of the drying of pears using different drying systems. *International Journal of Fruit Science*, 11, 55–73.
- Guiné, R.P.F., Castro, J.A.A.M. (2002a). Experimental determination and computer fitting of desorption isotherms of *D. Joaquina* pears. *Trans IChemE*, 80, Part C, 0–5.
- Guiné, R.P.F., Castro, J.A.A.M. (2002b). Pear drying process analysis: drying rates and evolution of water and sugar concentrations in space and time. *Drying Technology*, 20, 1515–1526.
- Guiné, R.P.F., Castro, J.A.A.M. (2003). Analysis of moisture content and density of pears during drying. *Drying Technology*, 21, 581–591.
- Guiné, R.P.F., Ferreira, D.M.S., Barroca, M.J., Gonçalves, F. M. (2007b). Study of the drying kinetics of solar-dried pears. *Biosystems Engineering*, 98, 422–429.
- Guiné, R.P.F., Ramos, M.A., Figueiredo, M.M. (2006). Shrinkage characteristics and porosity of pears during drying. *Drying Technology*, 24, 1525–1530.
- Guiné, R.P.F., Rodrigues, A.E., Figueiredo, M.M. (2007a). Modelling and simulation of pear drying. *Applied Mathematics and Computation*, 192, 69–77.
- Hossain, M. A., Amer, B. M. A., Gottschalk, K. (2008). Hybrid solar dryer for quality dried tomato. *Drying Technology*, 26, 1591–1601.
- Huang, L., Zhang, M. (2012). Trends in development of dried vegetable products as snacks. *Drying Technology*, 30, 448–461.

- Hyndman, R. J., Koehler, A. B. (2006). Another look at measures of forecast accuracy. *International Journal of Forecasting*, 22, 679–688.
- Jannot, Y., Talla, A., Nganhou, J., Puiggali, J.R. (2004). Modeling of banana convective drying by the drying characteristic curve (DCC) method. *Drying Technology*, 22 (8), 1949-1968.
- Karathanos, V.T., Belessiotis, V.G. (1997). Sun and artificial air drying kinetics of some agricultural products. *Journal of Food Engineering*, 31 (96), 35–46.
- Koyuncu, T., Pinar, Y., Lule, F. (2007). Convective drying characteristics of azarole red (*Crataegus monogyna Jacq.*) and yellow (*Crataegus aronia Bosc.*) fruits. *Journal of Food Engineering*, 78, 1471–1475.
- Kumar, C., Karim, M. A., Joardder, M.U.H. (2014). Intermittent drying of food products: a critical review. *Journal of Food Engineering*, 121 (1), 48–57.
- Lahsasni, S., Kouhila, M., Mahrouz, M. (2004). Adsorption-desorption isotherms and heat of sorption of prickly pear fruit (*Opuntia ficus indica*). *Energy Conversion and Management*, 45, 249–261.
- Lengyel, A. (2007). The change of body temperature during convective drying of cube-shaped apple pieces. *Drying Technology*, 25, 1275–1280.
- Lima, M.J., Guiné, R.P.F., Ferreira, D., Barroca, M. J. (2010). Método tradicional de produção da “Pêra Passa de Viseu”, em Guiné, R. – Secagem de Peras: da tradição à ciência. ESAV/CI&DETS ed, Viseu, Portugal, 7-16.
- Mabrouk, B.S., Benali, E., Oueslati, H. (2012). Experimental study and numerical modelling of drying characteristics of apple slices. *Food and Bioproducts Processing*, 90 (4), 719–728.
- McMinn, W.A.M., Magee, T.R.A. (1999). Principles, methods and applications of the convective drying of foodstuffs. *Trans IChemE*, 77 (C), 175–193.

- Mohamed, L.A., Kane, C.S.E., Kouhila, M., Jamali, A., Mahrouz, M., Kechaou, N. (2008). Thin layer modelling of *Gelidium sesquipedale* solar drying process. *Energy Conversion and Management*, 49, 940–946.
- Moreira, R., Figueiredo, A., Sereno, A. (2000). Shrinkage of apple disks during drying by warm air convection and freeze drying. *Drying Technology*, 18 (1-2), 279–294.
- Mota, C. L., Luciano, C., Dias, A., Barroca, M. J., Guiné, R. P. F. (2010). Convective drying of onion: Kinetics and nutritional evaluation. *Food and Bioproducts Processing*, 88, 115–123.
- Mrad, N.D., Boudhrioua, N., Kechaou, N., Courtois, F., Bonazzi, C. (2012). Influence of air drying temperature on kinetics, physicochemical properties, total phenolic content and ascorbic acid of pears. *Food and Bioproducts Processing*, 90 (3), 433–441.
- Mujumdar, A.S., Law, C.L. (2010). Drying Technology: trends and applications in postharvest processing. *Food and Bioprocess Technology*, 3, 843–852.
- Mujumdar, A.S. (2006). Handbook of Industrial Drying. Third Edition, CRC Press.
- Oliviero, T., Verkerk, R., Dekker, M. (2013). A research approach for quality based design of healthy foods: dried broccoli as a case study. *Trends in Food Science and Technology*, 30 (2), 178–184.
- Park, K.J., Bin, A., Brod, F.P.R. (2001a). Obtenção das isotermas de sorção e modelagem matemática para a pêra *Bartlett* (*Pyrus sp.*) com e sem desidratação osmótica. *Ciência E Tecnologia de Alimentos*, 21 (1), 73–77.
- Park, K.J., Yado, M.K.M., Brod, F.P.R. (2001b). Estudo de secagem de pêra *Bartlett* (*Pyrus sp.*) em fatias. *Ciência E Tecnologia de Alimentos*, 21 (3), 288–292.
- Ramallo, L.A., Mascheroni, R.H. (2013). Effect of shrinkage on prediction accuracy of the water diffusion model for pineapple drying. *Journal of Food Process Engineering*, 36 (1), 66–76.

- Ramos, I.N., Brandão, T.R.S., Silva, C.L.M. (2005). Integrated approach on solar drying, pilot convective drying and microstructural changes. *Journal of Food Engineering*, 67, 195–203.
- Sacilik, K., Keskin, R., Elicin, A.K. (2006). Mathematical modelling of solar tunnel drying of thin layer organic tomato. *Journal of Food Engineering*, 73, 231–238.
- Sharma, A., Chen, C.R., Lan, N.V. (2009). Solar-energy drying systems: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13, 1185–1210.
- Silva, V. (2013). “Coletor solar de baixo custo. Aplicação à secagem de produtos agroalimentares”. Tese de Doutorado em Engenharia Mecânica na especialidade de Transmissão de Calor, Departamento de Engenharia Mecânica, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade de Coimbra, Coimbra.
- Silva, V., Figueiredo, A.R., Costa, J.J., Guiné, R.P.F. (2014). Experimental and mathematical study of the discontinuous drying kinetics of pears. *Journal of Food Engineering*, 134, 30–36.
- Singh, N.J., Pandey, R.K. (2012). Convective air drying characteristics of sweet potato cube (*Ipomoea batatas L.*). *Food and Bioprocess Processing*, 90 (2), 317–322.
- Sturm, B., Vega, A.M.N., Hofacker, W. C. (2014). Influence of process control strategies on drying kinetics, colour and shrinkage of air dried apples. *Applied Thermal Engineering*, 62 (2), 455–460.
- Uribe, E., Vega-Gálvez, A., Di Scala, K., Oyanadel, R., Torrico, J.S., Miranda, M. (2009). Characteristics of convective drying of Pepino Fruit (*Solanum muricatum Ait.*): application of weibull distribution. *Food and Bioprocess Technology*, 4, 1349–1356.
- Zhu, A., Shen, X. (2014). The model and mass transfer characteristics of convection drying of peach slices. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 72, 345–351.
- Zlatanović, I., Komatina, M., Antonijević, D. (2013). Low-temperature convective drying of apple cubes. *Applied Thermal Engineering*, 53, 114–123.

ANEXO A – EQUAÇÕES DE FICK

A difusão é um processo no qual a matéria é transportada de uma parte do sistema para outra como resultado de movimentos moleculares. A teoria matemática da difusão em substâncias isotrópicas é baseada na hipótese de que uma substância tem uma taxa de difusão, através de uma secção de área unitária, proporcional ao gradiente de concentração medido na normal à secção, ou seja

$$F = -D \frac{\partial C}{\partial x}, \quad (\text{A.1})$$

em que F é o fluxo da substância por unidade de área da secção, C é a concentração da substância em difusão, x é a coordenada espacial medida na normal à secção e D é o coeficiente de difusão. O sinal negativo deve-se ao fato da difusão ocorrer na direção contrária do gradiente de concentração. Esta equação é válida para um meio isotrópico, cuja estrutura e respetivas propriedades difusivas são iguais em todas as direções espaciais, sendo denominada de primeira lei de Fick (Crank, 1975).

Considere-se agora o volume da **Figura A.1**, cujos lados são paralelos aos eixos coordenados e com as respetivas medidas indicadas na figura. O centro do elemento situa-se no ponto $P(x,y,z)$ e a concentração da substância em difusão é C .

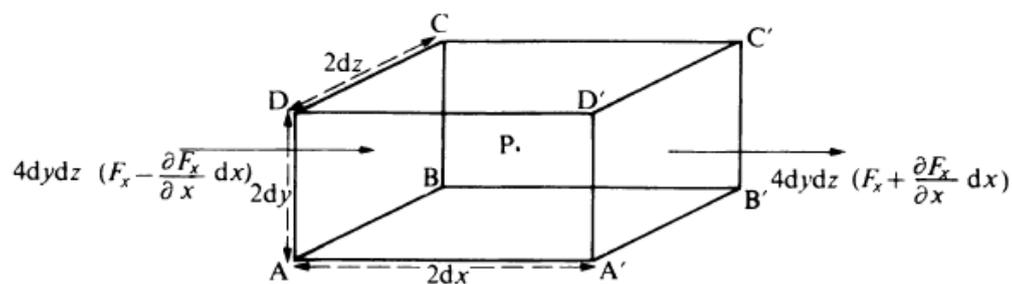


Figura A.1. Elemento de volume (adaptada de Crank, 1975).

As faces $ABCD$ e $A'B'C'D'$ são perpendiculares segundo o eixo x . A taxa da substância em difusão que entra no elemento pela face $ABCD$ no plano $x-dx$ é dada por

$$4dydz \left(F_x - \frac{\partial F_x}{\partial x} dx \right), \quad (\text{A.2})$$

em que F_x é o fluxo de transferência por área unitária através do plano correspondente ao ponto P. De modo semelhante, na face A'B'C'D', a taxa da substância em difusão que sai do elemento é

$$4dydz \left(F_x + \frac{\partial F_x}{\partial x} dx \right). \quad (\text{A.3})$$

O contributo para o aumento do fluxo em difusão no volume através destas duas faces é então

$$-8dx dy dz \frac{\partial F_x}{\partial x}. \quad (\text{A.4})$$

De modo análogo para as outras faces vem

$$-8dx dy dz \frac{\partial F_y}{\partial y}, \quad (\text{A.5})$$

$$-8dx dy dz \frac{\partial F_z}{\partial z}. \quad (\text{A.6})$$

O aumento do fluxo em difusão no elemento também pode ser calculado por

$$8dx dy dz \frac{\partial C}{\partial t}, \quad (\text{A.7})$$

e assim tem-se que

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial F_x}{\partial x} + \frac{\partial F_y}{\partial y} + \frac{\partial F_z}{\partial z} = 0. \quad (\text{A.8})$$

Admitindo que o coeficiente de difusão é constante e obtendo F_x , F_y e F_z através da equação (A.1), substituindo em (A.8) tem-se

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \left(\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \right), \quad (\text{A.9})$$

e simplificando para o caso unidimensional vem

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2}. \quad (\text{A.10})$$

A equação (A.10) é válida quando se verifica um gradiente de concentração segundo o eixo x, sendo denominada de segunda lei de Fick (Crank, 1975).

ANEXO B – VELOCIDADES DE ESCOAMENTO

De seguida apresentam-se as diferentes velocidades do escoamento possíveis com as diferentes configurações estudadas, sendo que U representa a velocidade média do escoamento na zona de ensaios e l a distância da caixa à zona de extração de ar da câmara climática.

- **Fase de repouso**

- **Configuração:** caixa fechada atrás, tampa parcial frontal e rede uniforme (malha de 0,5 cm).



l [mm]	U [m/s]
90	0,16

- **Fase convectiva**

- **Configuração:** caixa aberta atrás e tampa parcial frontal.



l [mm]	U [m/s]
0	3,15

- **Configuração:** caixa aberta atrás e sem tampa frontal.



I [mm]	U [m/s]
0	2,66
11	2,57
30	1,94
60	1,69
71	1,70
90	1,42

- **Configuração:** sem tampa frontal e com secção traseira de 13 cm × 30 cm.



I [mm]	U [m/s]
60	1,45
90	1,28

- **Configuração:** sem tampa frontal e com secção traseira de 5,5 cm × 30 cm.



I [mm]	U [m/s]
60	1,04
90	0,47

ANEXO C – REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DA APLICAÇÃO DO MODELO DE SECAGEM

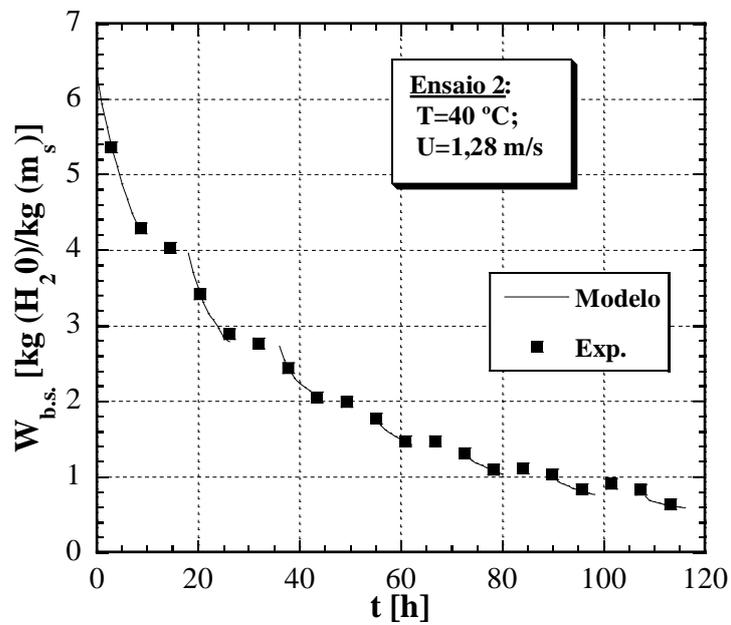


Figura C.1. Aplicação do modelo matemático de difusão ao ensaio 2.

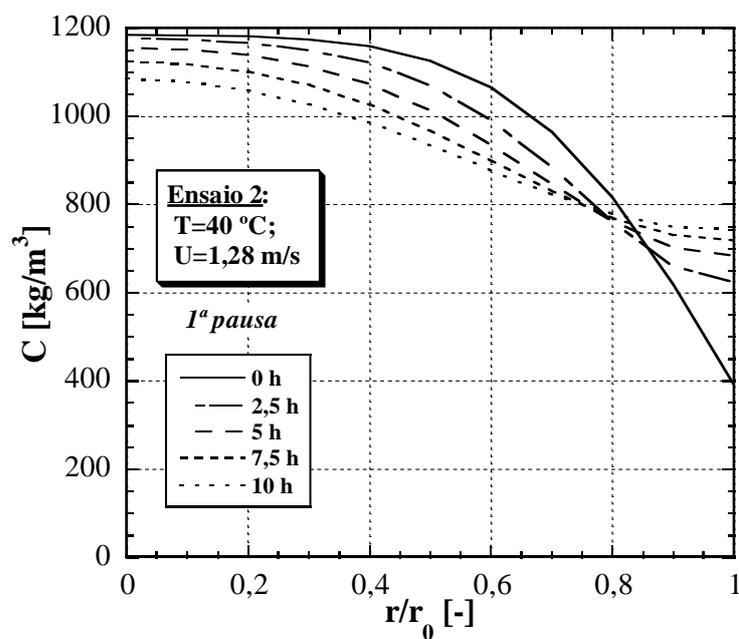


Figura C.2. Distribuição radial prevista pelo modelo matemático de difusão para a 1ª pausa do ensaio 2.

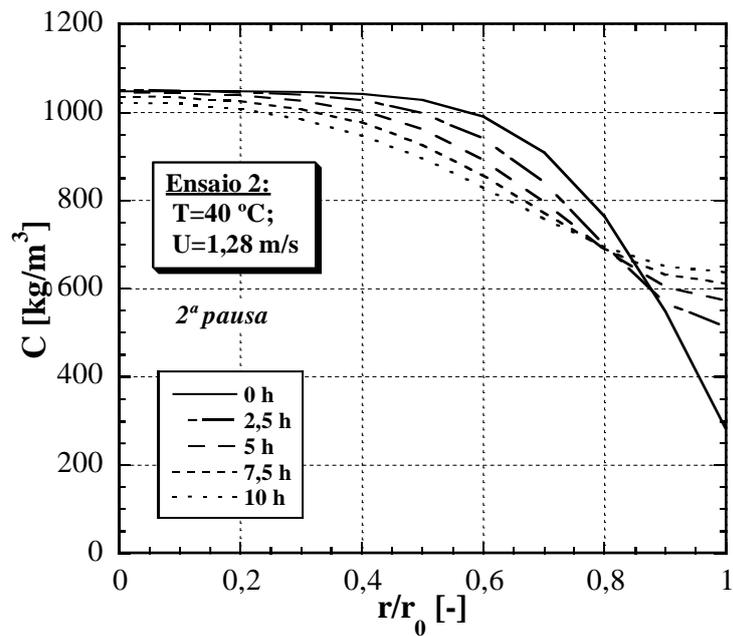


Figura C.3. Distribuição radial prevista pelo modelo matemático de difusão para a 2ª pausa do ensaio 2.

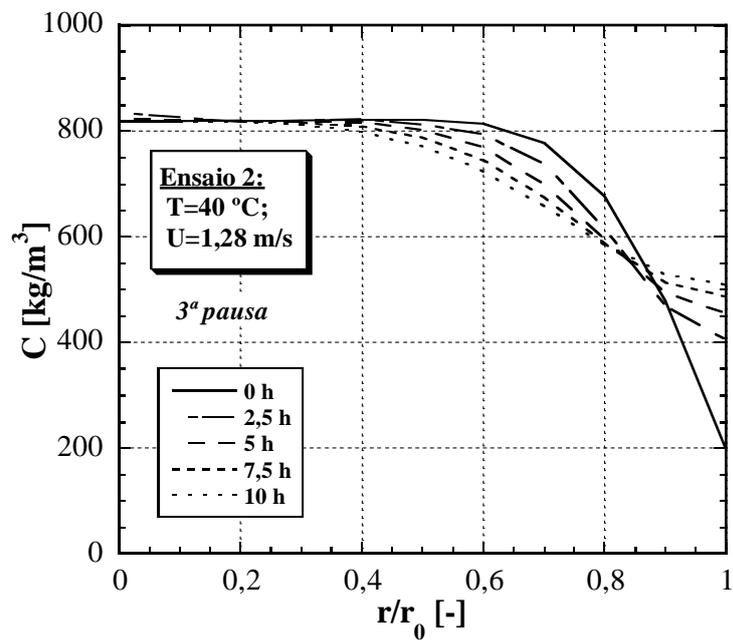


Figura C.4. Distribuição radial prevista pelo modelo matemático de difusão para a 3ª pausa do ensaio 2.

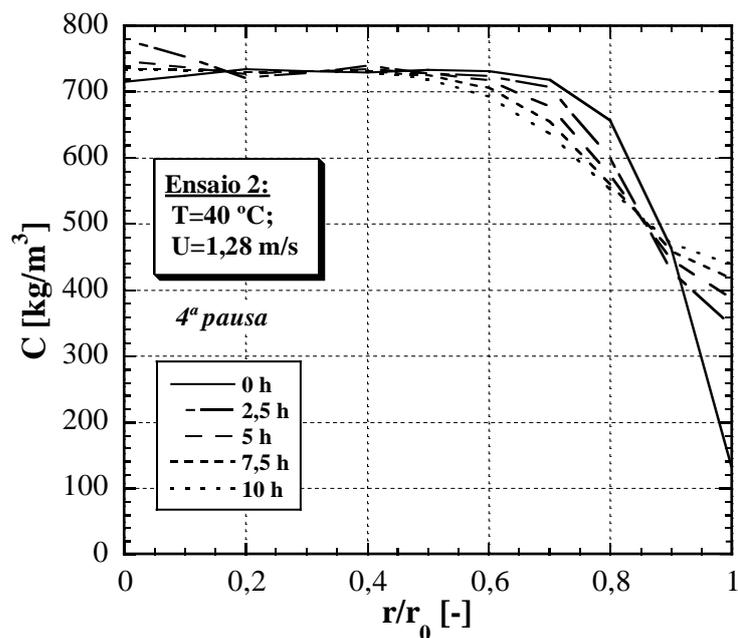


Figura C.5. Distribuição radial prevista pelo modelo matemático de difusão para a 4ª pausa do ensaio 2.

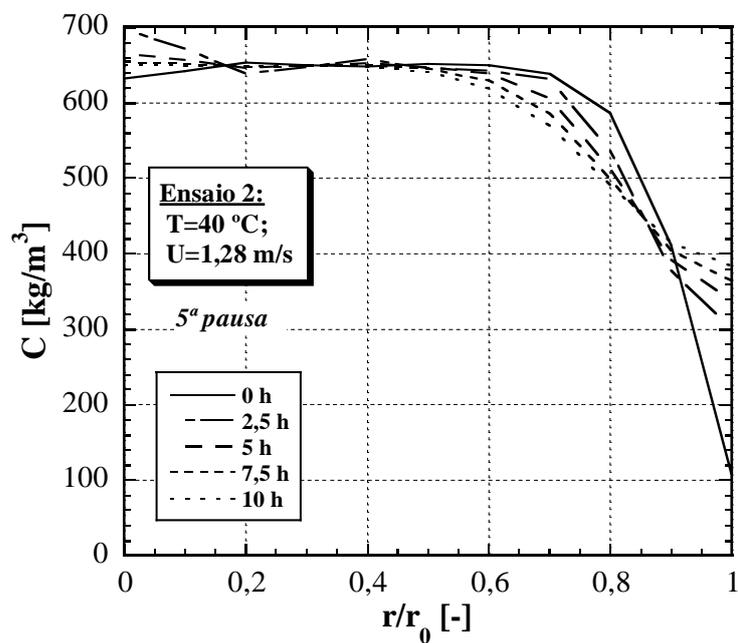


Figura C.6. Distribuição radial prevista pelo modelo matemático de difusão para a 5ª pausa do ensaio 2.

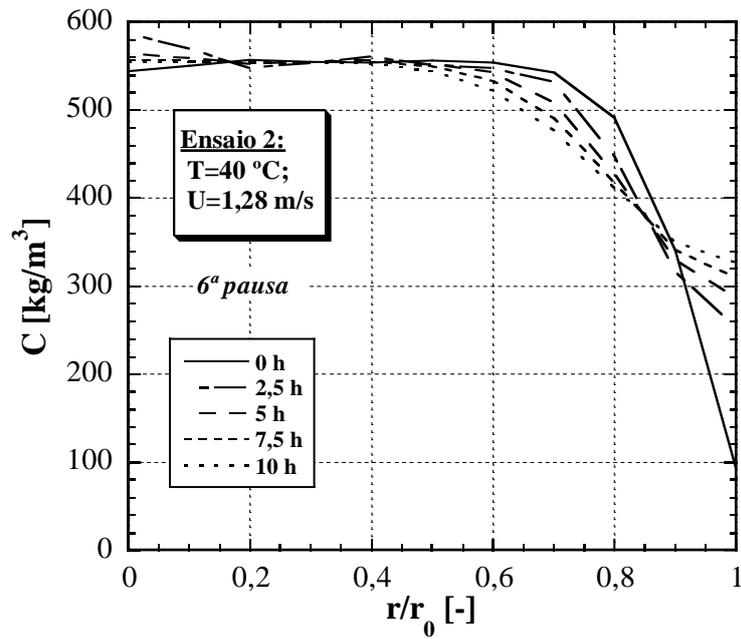


Figura C.7. Distribuição radial prevista pelo modelo matemático de difusão para a 6ª pausa do ensaio 2.

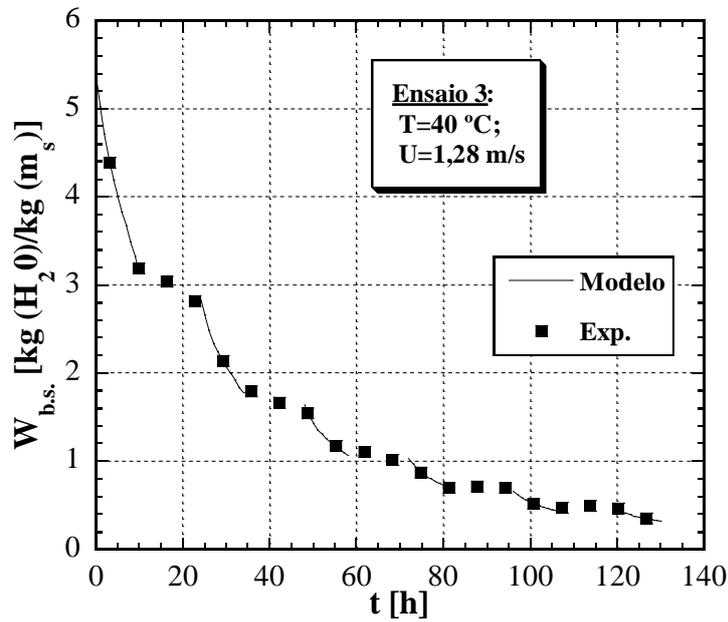


Figura C.8. Aplicação do modelo matemático de difusão ao ensaio 3.

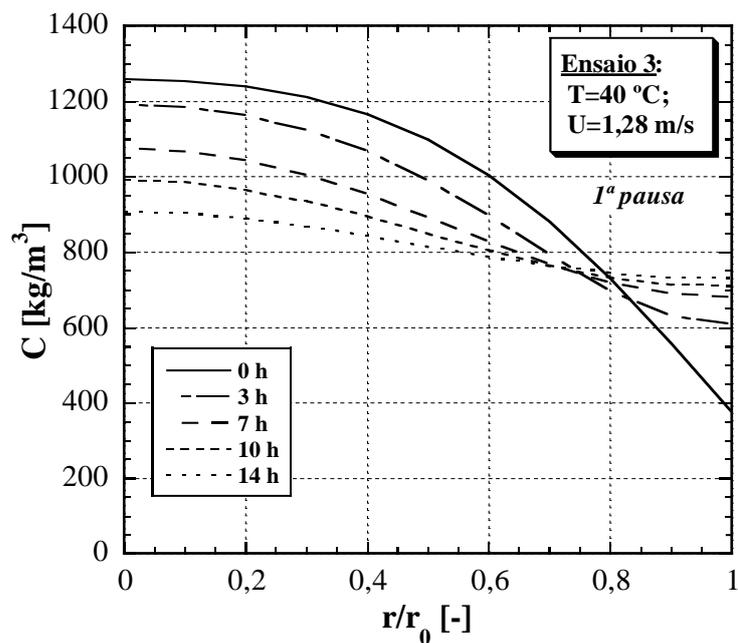


Figura C.9. Distribuição radial prevista pelo modelo matemático de difusão para a 1ª pausa do ensaio 3.

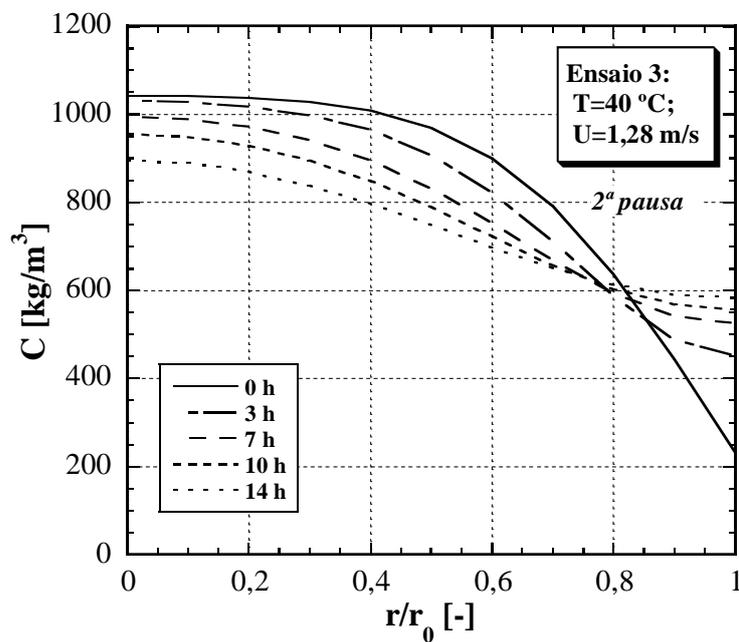


Figura C.10. Distribuição radial prevista pelo modelo matemático de difusão para a 2ª pausa do ensaio 3.

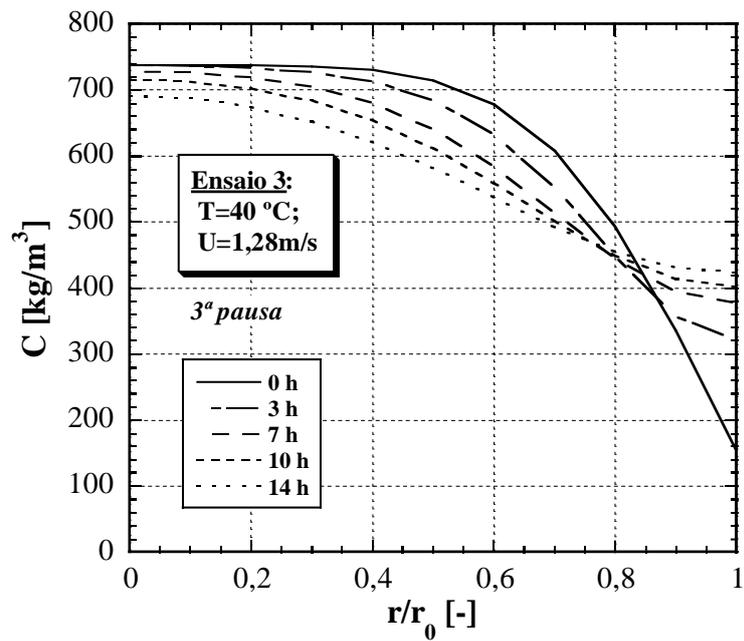


Figura C.11. Distribuição radial prevista pelo modelo matemático de difusão para a 3ª pausa do ensaio 3.

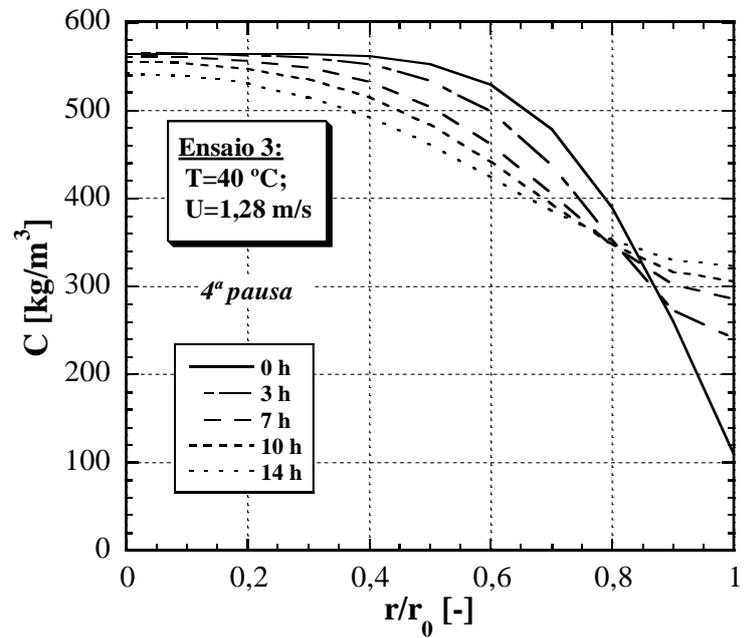


Figura C.12. Distribuição radial prevista pelo modelo matemático de difusão para a 4ª pausa do ensaio 3.

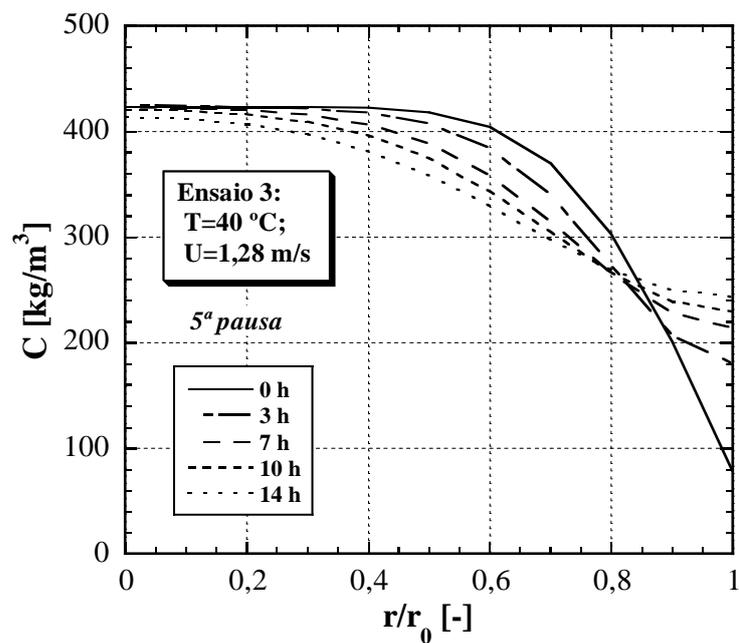


Figura C.13. Distribuição radial prevista pelo modelo matemático de difusão para a 5ª pausa do ensaio 3.

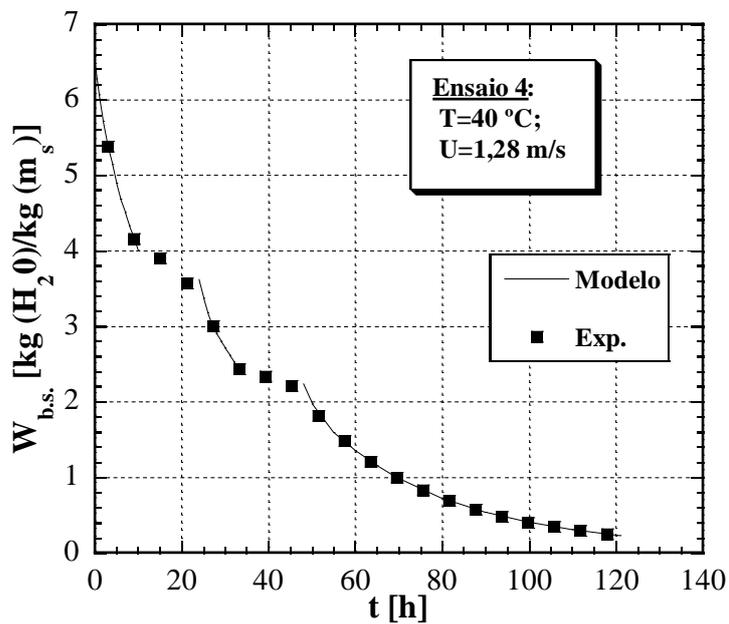


Figura C.14. Aplicação do modelo matemático de difusão ao ensaio 4.

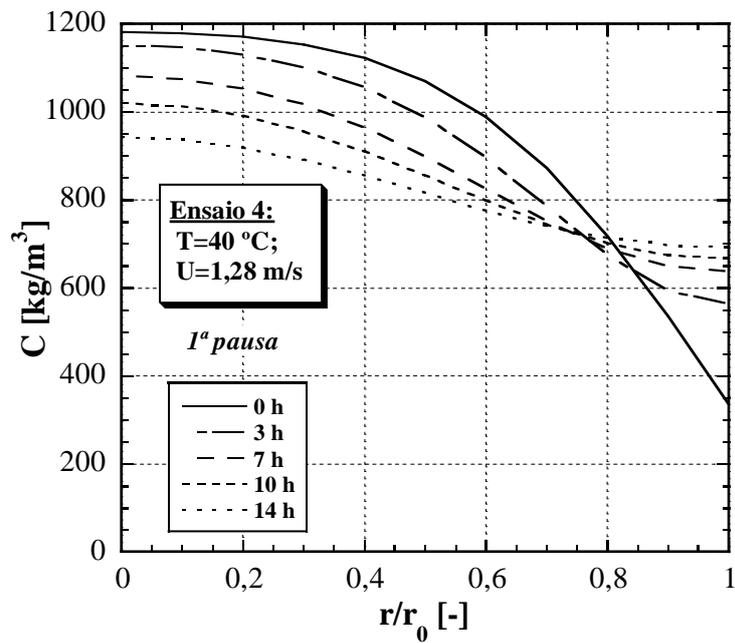


Figura C.15. Distribuição radial prevista pelo modelo matemático de difusão para a 1ª pausa do ensaio 4.

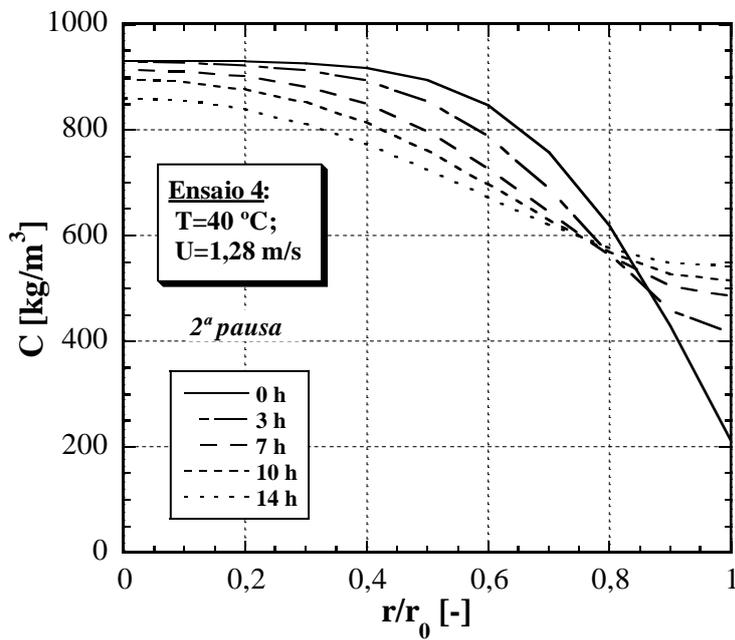


Figura C.16. Distribuição radial prevista pelo modelo matemático de difusão para a 2ª pausa do ensaio 4.

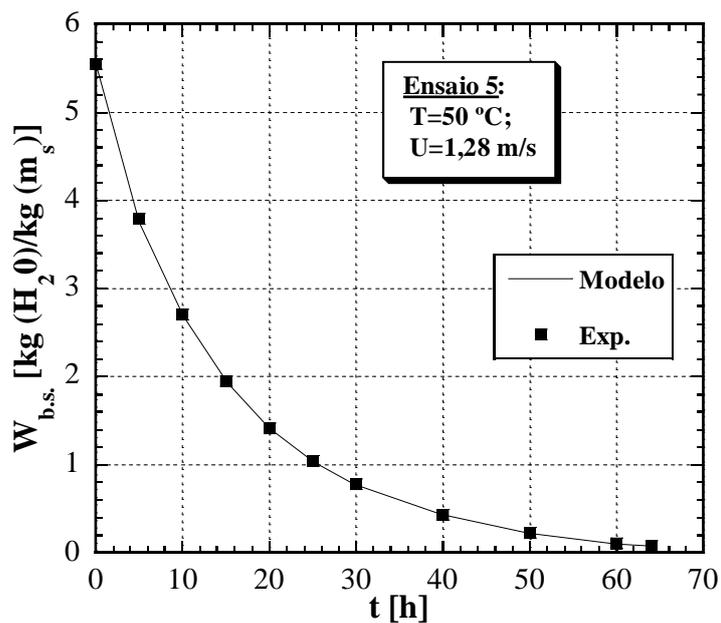


Figura C.17. Aplicação do modelo matemático de difusão ao ensaio 5.

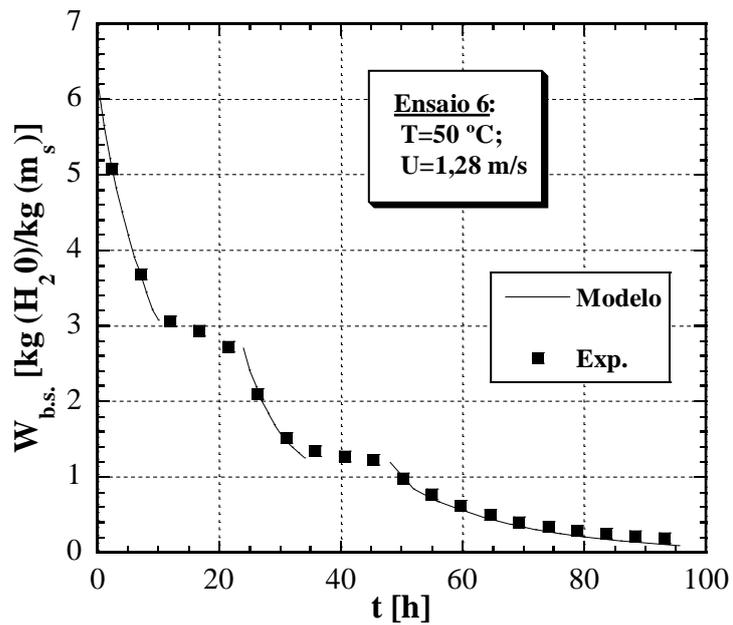


Figura C.18. Aplicação do modelo matemático de difusão ao ensaio 6.

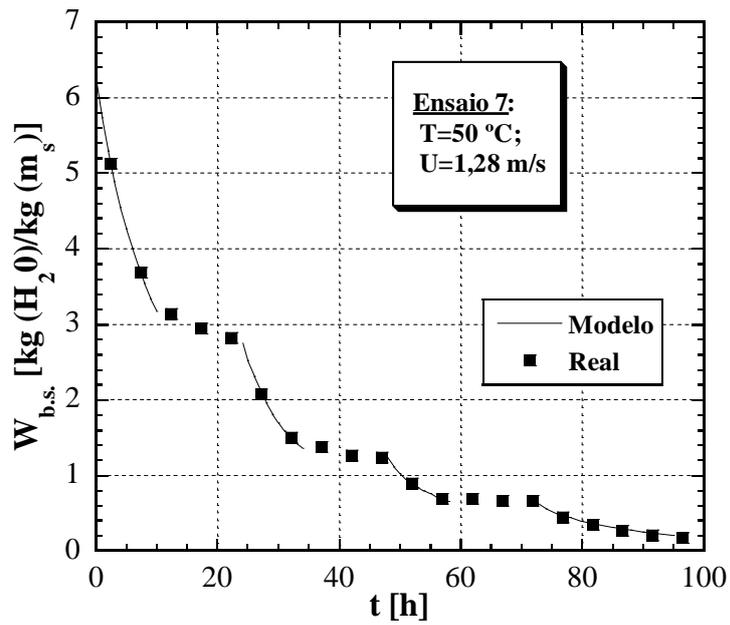


Figura C.19. Aplicação do modelo matemático de difusão ao ensaio 7.

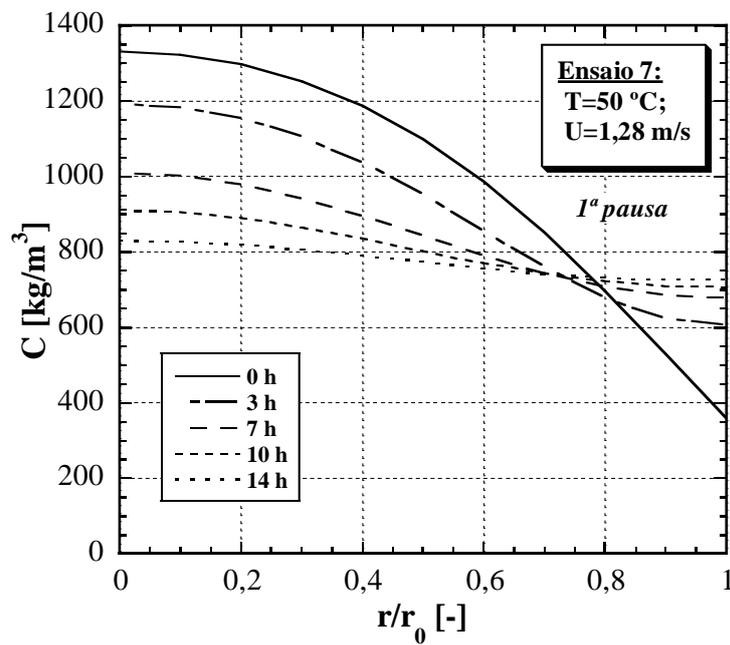


Figura C.20. Distribuição radial prevista pelo modelo matemático de difusão para a 1ª pausa do ensaio 7.

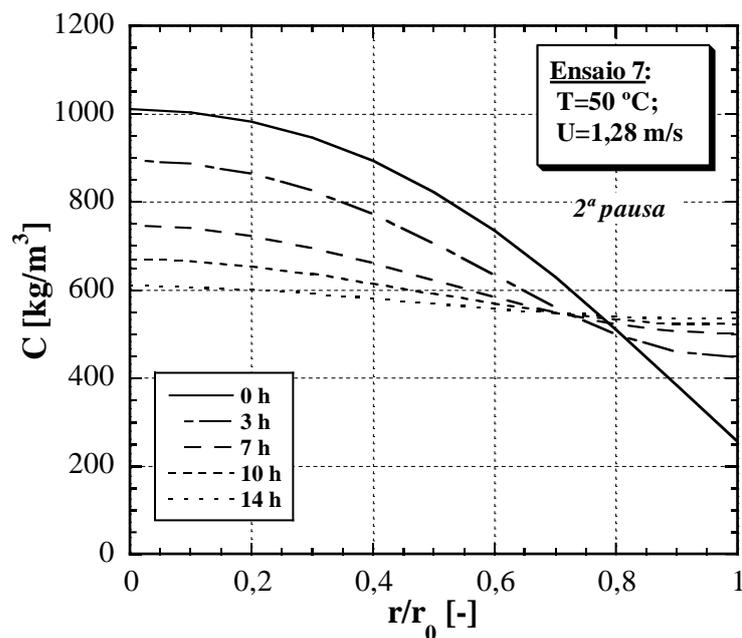


Figura C.21. Distribuição radial prevista pelo modelo matemático de difusão para a 2ª pausa do ensaio 7.

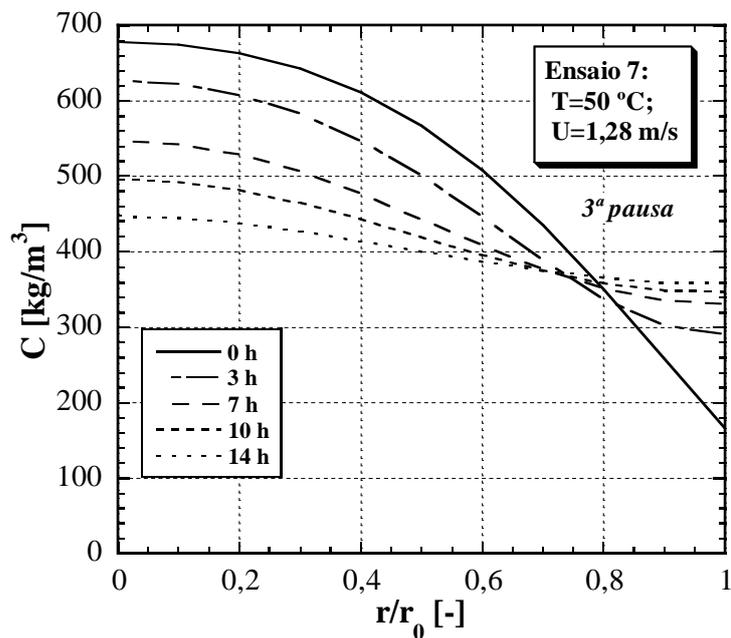


Figura C.22. Distribuição radial prevista pelo modelo matemático de difusão para a 3ª pausa do ensaio 7.

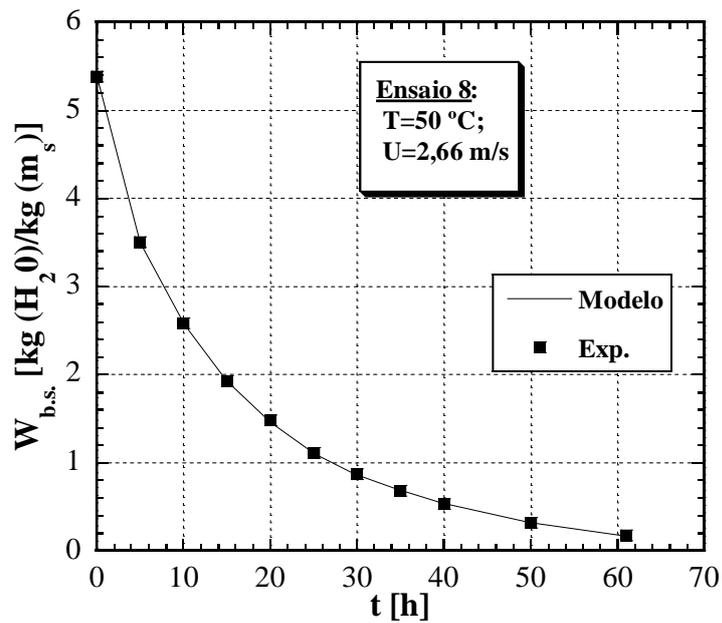


Figura C.23. Aplicação do modelo matemático de difusão ao ensaio 8.

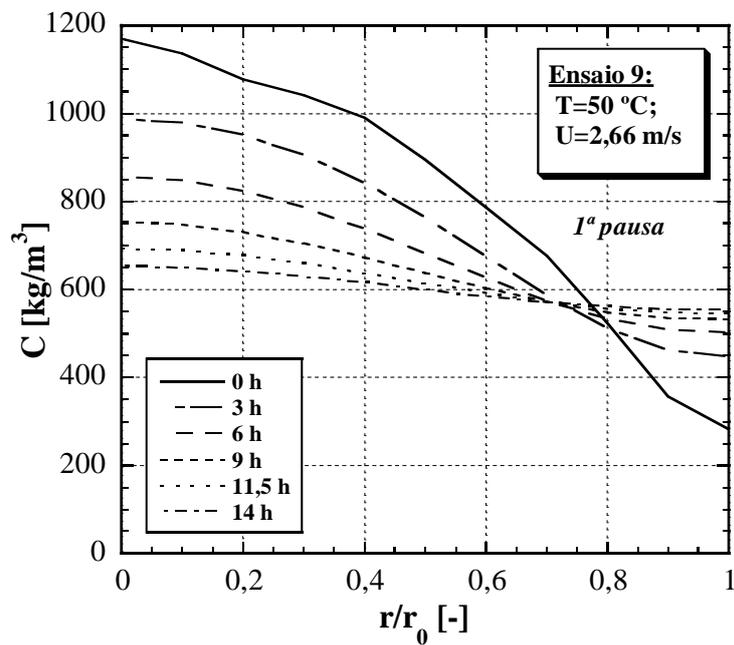


Figura C.24. Distribuição radial prevista pelo modelo matemático de difusão para a 1ª pausa do ensaio 9.

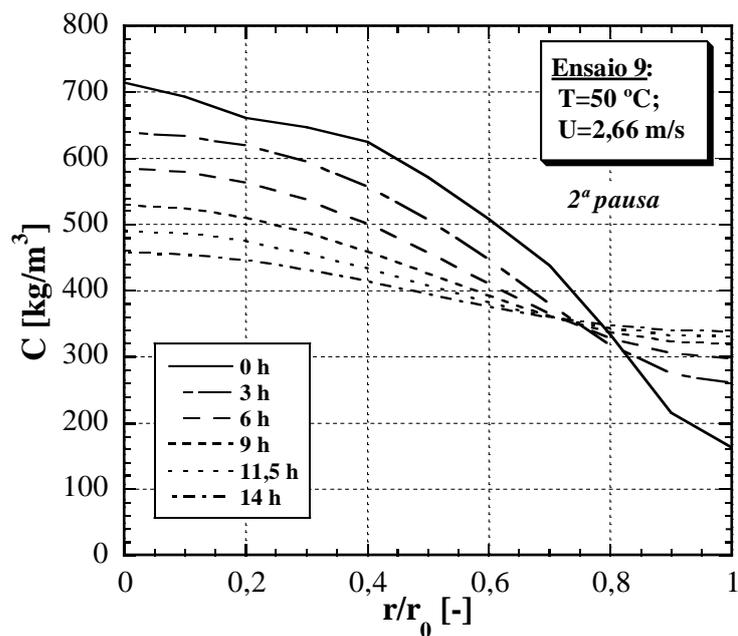


Figura C.25. Distribuição radial prevista pelo modelo matemático de difusão para a 2ª pausa do ensaio 9.

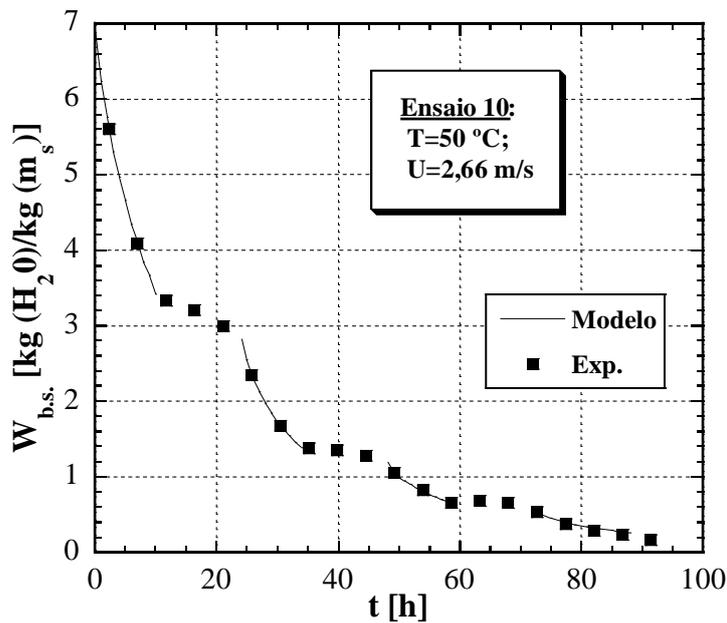


Figura C.26. Aplicação do modelo matemático de difusão ao ensaio 10.

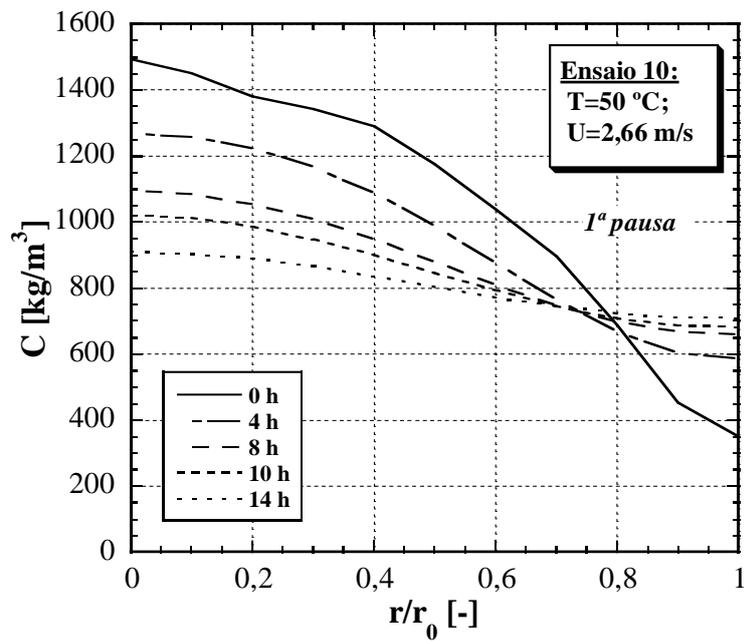


Figura C.27. Distribuição radial prevista pelo modelo matemático de difusão para a 1ª pausa do ensaio 10.

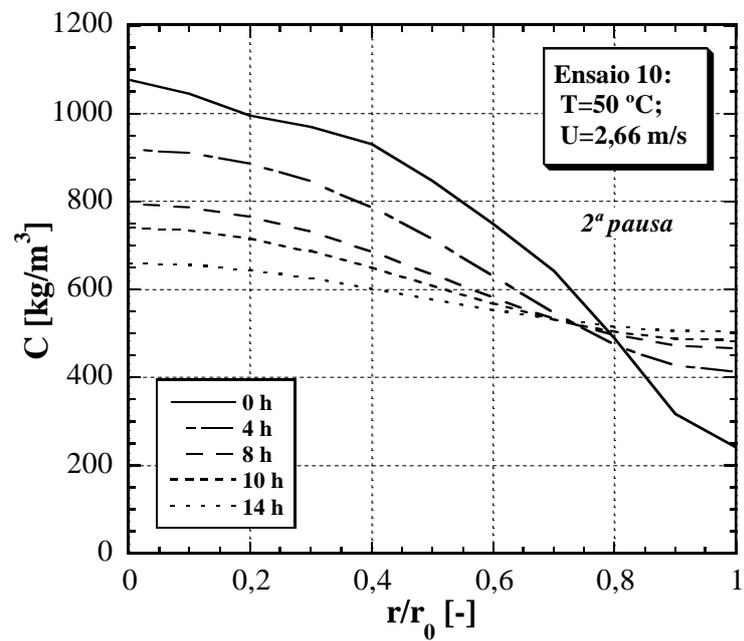


Figura C.28. Distribuição radial prevista pelo modelo matemático de difusão para a 2ª pausa do ensaio 10.

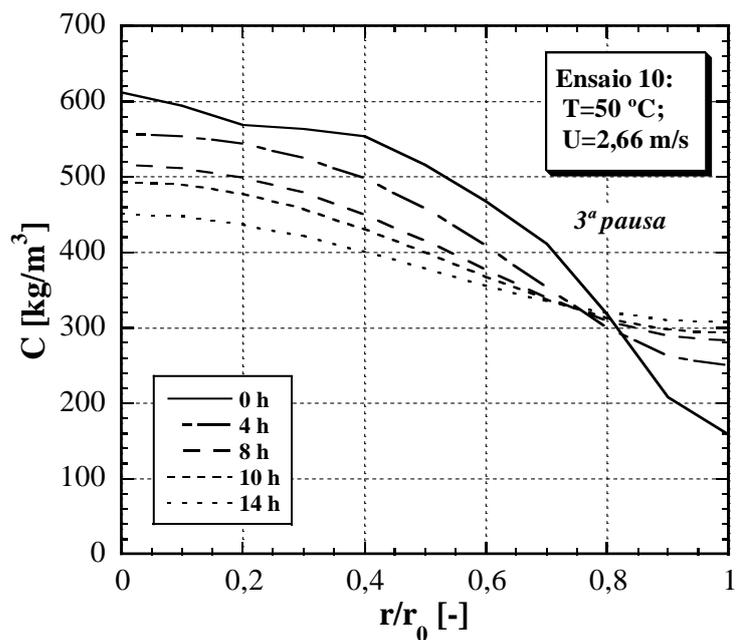


Figura C.29. Distribuição radial prevista pelo modelo matemático de difusão para a 3ª pausa do ensaio 10.

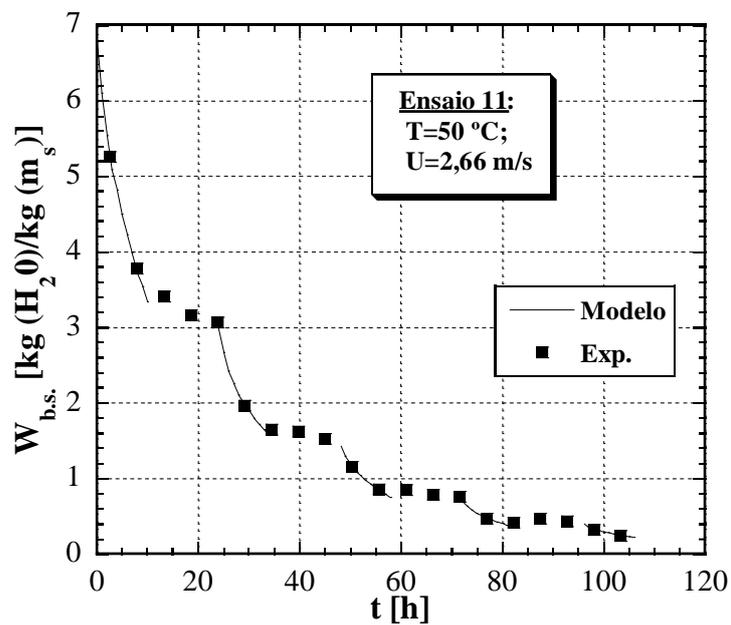


Figura C.30. Aplicação do modelo matemático de difusão ao ensaio 11.

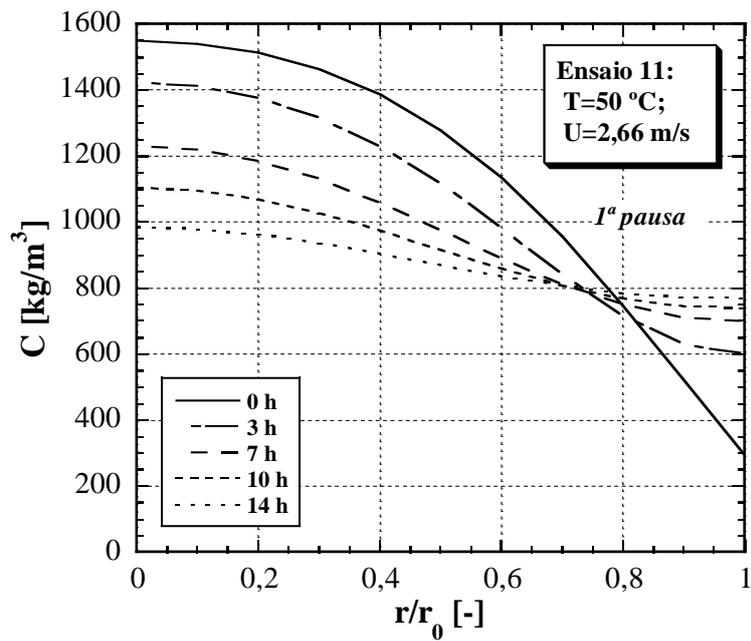


Figura C.31. Distribuição radial prevista pelo modelo matemático de difusão para a 1ª pausa do ensaio 11.

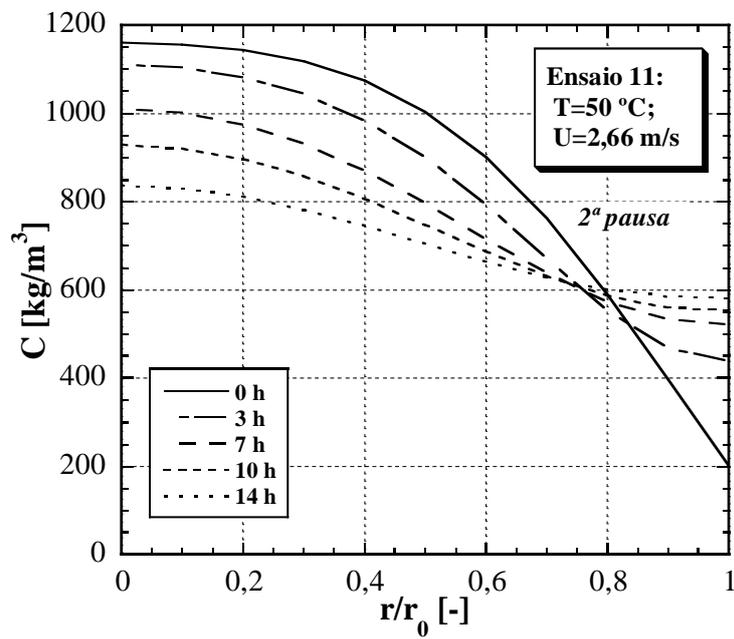


Figura C.32. Distribuição radial prevista pelo modelo matemático de difusão para a 2ª pausa do ensaio 11.

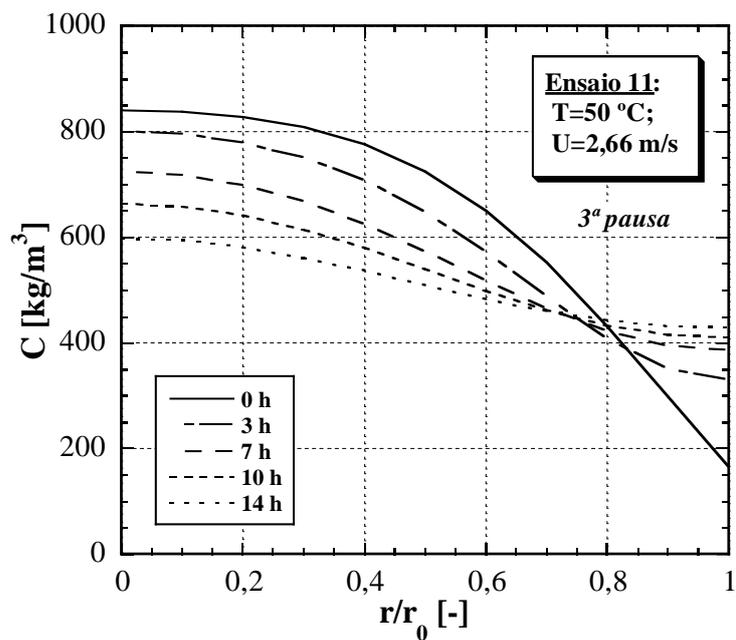


Figura C.33. Distribuição radial prevista pelo modelo matemático de difusão para a 3ª pausa do ensaio 11.

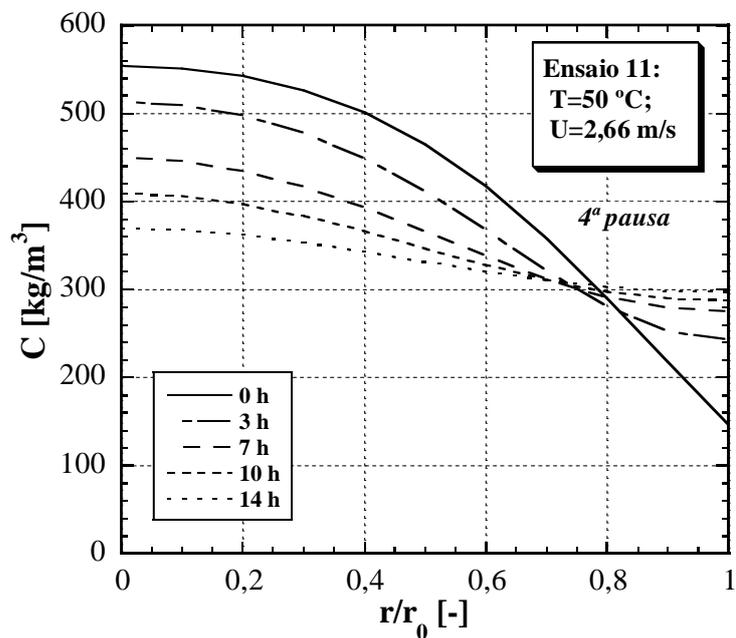


Figura C.34. Distribuição radial prevista pelo modelo matemático de difusão para a 4ª pausa do ensaio 11.

