

Instituto Politécnico de Viseu

Escola Superior Agrária de Viseu

Ana Catarina Pinto Nunes Cruz

DESENVOLVIMENTO E ENSAIO DE UM SECADOR CONVECTIVO DE ALIMENTOS

Dissertação

Mestrado em Qualidade e Tecnologia Alimentar

Março de 2012



Ana Catarina Pinto Nunes Cruz

DESENVOLVIMENTO E ENSAIO DE UM SECADOR CONVECTIVO PARA ALIMENTOS

Dissertação

Mestrado em Qualidade e Tecnologia Alimentar

Trabalho efectuado sob orientação de
Professora Doutora Raquel Guiné

Trabalho co-orientado por
Professor Doutor João Carlos Gonçalves
Mestre Ana Cristina Correia

Março de 2012



As doutrinas expressas neste trabalho são da exclusiva responsabilidade do autor.

AGRADECIMENTOS

As palavras tornam-se sempre insuficientes quando queremos dizer o que nos vai para lá da alma.

Assim, agradeço a todas as pessoas que contribuíram para a realização desta tese, sem elas seria impossível concretizar com sucesso este Mestrado. Foi neles que encontrei a inteira disponibilidade e força para seguir este árduo caminho.

Assim, as minhas palavras de apreço e gratidão vão para:

- A minha família, os meus pais e irmãos, pela dedicação e paciência, por todos os conselhos sábios, por aprovarem todas as minhas decisões e por esta oportunidade.
- A minha orientadora, Doutora Raquel Guiné, docente da Escola Superior Agrária de Viseu, pela orientação, interesse, disponibilidade apresentadas e por toda a partilha de saber e acima de tudo exigência.
- O meu co-orientador, Doutor João Carlos Gonçalves, docente da Escola Superior Agrária de Viseu, por todo o apoio técnico, com o secador, toda a disponibilidade e por todo o conhecimento partilhado.
- A empresa MERCATUS, especializada na produção de móveis para refrigeração comercial, que se propôs a desenvolver uma estrutura, que daria lugar ao secador. Sem eles este projecto não teria sido possível.
- O engenheiro informático, Tiago Moreira, por todo o apoio informático, pelo desenvolvimento de macros necessárias à recolha de dados, e por toda sua disponibilidade.
- O Eng. Nuno Garrido e para o Marcelo Lopes, do departamento de madeiras da Escola superior de Tecnologia de Viseu, por me ajudarem a construir um suporte para as lâmpadas do secador.
- A todos os docentes da Escola Superior Agrária de Viseu, que foram demonstrando o seu apoio e disponibilidade para ajudar neste projecto.

Por fim o meu sentido e eterno agradecimento a todos os meus AMIGOS pelo carinho que por mim demonstraram, pelo apoio incondicional e companheirismo neste percurso e que contribuíram para que a minha vida não passasse em branco.

A todos eles o meu sincero e profundo obrigado.

RESUMO

A presente dissertação versa sobre a concepção e exploração de um secador convectivo de produtos alimentares. Partindo-se do invólucro exterior (secador), neste foi instalado o equipamento para promover o aquecimento e escoamento do ar interior.

Para monitorizar e controlar o processo de secagem, procedeu-se à instrumentação da instalação para monitorização/controlo e registo de cada uma das variáveis, nomeadamente: temperatura e humidade do ar, assim como a pesagem contínua dos produtos durante a secagem.

Com o objectivo de explorar o comportamento do secador, realizaram-se ensaios preliminares, em que se comparou a eficiência de secagem obtida com o secador desenvolvido e uma estufa. Nos ensaios finais comparam-se os resultados para duas variedades de maçã, a *Golden Delicious* e a *Granny Smith*, ambas secadas no secador desenvolvido. Para efeitos de comparação realizaram-se várias análises, que envolveram a determinação da humidade, acidez, sólidos solúveis totais, a cor e a textura das respectivas maçãs, em fresco e depois de secadas, num intervalo de temperaturas de 30°C a 60°C. Além disso estudou-se também a cinética de secagem em termos de modelos de camada fina, e também por meio da equação de difusão de Fick. Assim, avaliaram-se algumas propriedades de transferência de massa, como a humidade de difusividade efectiva e o coeficiente de transferência convectiva de massa.

Os resultados mostram que para ambas as variedades de maçãs estudadas, a secagem reduz a acidez e o teor em açúcares. No que respeita à cor, esta foi significativamente afetada pela secagem, resultando em elevados valores da diferença de cor total, entre 19,43 e 25,04. Quanto à textura, verificou-se que com a secagem as maçãs tornam-se menos duras e menos coesas.

No que respeitou à cinética de secagem, os dados cinéticos foram tratados e ajustados de acordo com diferentes modelos de camada fina que foram: *Page*, *Henderson* e *Pabis*, *logarítmico* e *Vega-Lemus*. Dos modelos testados foi possível verificar que o modelo *Vega-Lemus* foi o pior para descrever a cinética de secagem, sendo o de *Page* o que mostrou melhor adaptação/comportamento. Além disso, verificou-se que a difusividade de massa aumenta com a temperatura, seguindo a função do tipo Arrhenius, onde D_e° foi $5,4621 \times 10^{-4}$ e $1,8401 \times 10^{-4}$ m²/s, e E de 35,3 kJ/mol e 32,8 kJ/mol, respectivamente para as variedades *Golden Delicious* e *Granny Smith*.

Palavras-chave: *secagem; maçãs; convecção; propriedades físico-químicas; cinética.*

ABSTRACT

This dissertation examines the design and operation of a food convective dryer. Starting from the outer casing (dryer), all the equipment has been installed to promote the heating and air flow inside.

To monitor and control the drying process, all the instrumentation for monitoring/control and registration of each variable was installed, in particular, regarding the variables such as temperature and humidity, as well as the continuous weighing of the product during drying.

In order to explore the behaviour of the dryer, preliminary tests were carried out, which compared the efficiency obtained by drying in the developed drier and in an oven dryer. In the definite tests, two varieties of apples, *Golden Delicious* and *Granny Smith*, were both dried in the developed drier and the results were compared. For this several tests were carried out, which involved the determination of humidity, acidity, total soluble solids, colour and texture of the respective apples, either in fresh and after dried at temperatures in the range of 30 °C to 60 °C. In addition it was also studied the drying kinetics in terms of thin layer models, and also by Fick's diffusion equation. Thus, some mass transfer properties were evaluated, such as moisture effective diffusivity and the coefficient of convective mass transfer.

The results show that for both varieties of apple at study, drying reduces the acidity and sugar content. As regards colour, this was significantly affected by drying, resulting in high values of total colour difference between 19.43 and 25.04. As to texture, it was found that drying turned the apples softer and less cohesive.

With respect to drying kinetics, the experimental data were adjusted according to different thin layer models: Page, Henderson and Pabis, logarithmic and Vega-Lemus. From the models tested, it was able to verify that the model Vega-Lemus was the worst to describe the kinetics of drying and the Page showed the best fit/performance. Furthermore, it was found that the mass diffusivity increases with temperature, following an Arrhenius function where D_e^0 was 5.4621×10^{-4} and 1.8401×10^{-4} m²/s, and E was 35.3 kJ/mol e 32.8 kJ/mol, respectively for varieties *Golden Delicious* and *Granny Smith*.

Keywords: *drying; apples; convection; physico-chemical properties; kinetics.*

ÍNDICE

AGRADECIMENTOS	III
RESUMO	IV
ABSTRACT	V
ÍNDICE	VI
ÍNDICE DE FIGURAS	VIII
ÍNDICE DE TABELAS	X
ABREVIATURAS	XI
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1. FACTORES QUE INFLUENCIAM A SECAGEM	4
2.1.1. Condições do Processo	4
2.1.2. Propriedades dos Alimentos	5
2.2. TIPOS DE SECADORES	6
2.2.1. Secador Solar	7
2.2.2. Secadores de contacto	7
2.2.3. Secadores de pulverização	8
2.2.4. Secadores de leite fluidizado	8
2.2.5. Liofilizadores	8
2.2.6. Secadores de dieléctricos	9
2.3. MODELOS MATEMÁTICOS	9
2.3.1. Modelos de camada fina	9
2.3.2. Modelos de difusão	10
2.3.3. Correlação de transferência de massa	13
3. REALIZAÇÃO EXPERIMENTAL	14
3.1. INSTALAÇÃO EXPERIMENTAL	14
3.1.1. Secador	14
3.1.2. Instrumentação para medição da massa	15
3.1.3. Sensores de temperatura	17
3.1.4. Monitorização da humidade do ar	18
3.1.5. Escoamento do ar no interior do secador	18
3.1.6. Mecanismos de aquecimento do ar	19
3.2. ANÁLISES FÍSICAS E QUÍMICAS EFECTUADAS	20
3.2.1. Avaliação da cor	20
3.2.2. Análise do perfil de textura	21
3.2.3. Acidez titulável	23
3.2.4. Sólidos solúveis totais	23
3.2.5. Humidade da amostra	24
3.3. ENSAIOS DE SECAGEM	25
4. ANÁLISE E DISCUSSÃO DE RESULTADOS	28
4.1. ENSAIOS PRELIMINARES	28

4.1.1. Análise das propriedades químicas e físicas	28
4.1.1.1. Humidade	28
4.1.1.2. Acidez	29
4.1.1.3. Sólidos Solúveis Totais	30
4.1.1.4. Cor	31
4.1.1.5. Diferença total de cor	32
4.1.2. Análise da cinética de secagem	33
4.1.2.1. Curvas de secagem	33
4.1.2.2. Ajuste ao modelo cinético de Page	34
4.2. ENSAIOS FINAIS	36
4.2.1. Análise das propriedades químicas e físicas	36
4.2.1.1. Humidade	36
4.2.1.2. Acidez	37
4.2.1.3. Teor de Sólidos Solúveis Totais	38
4.2.1.4. Cor	39
4.2.1.5. Diferença total de cor	40
4.2.1.6. Textura	41
4.2.2. Análise da cinética de secagem	44
4.2.2.1. Curvas de secagem	44
4.2.2.2. Ajuste aos modelos empíricos de secagem	45
4.2.2.3. Propriedades de transferência de massa	52
5. CONCLUSÃO	58
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	60

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. (a) Esquema representativo da instalação experimental (secador) e, (b) localização dos termopares.	15
Figura 2. (a) Balança Modelo KERN 572-55, e (b) Estrutura metálica que liga a balança (no exterior à grelha de teste (no interior)).	15
Figura 3. (a) Esquematização da posição da estrutura metálica (a verde) e da balança, e (b) Foto do interior do secador, onde se evidencia a estrutura metálica e a grelha.	16
Figura 4. Ambiente da Macro para recolha de dados das pesagens durante o processo de secagem.	17
Figura 5. Placa de aquisição de dados da marca PICO (TC-08).	17
Figura 6. (a) Foto do Higrómetro (Testo 174H), e (b) Ambiente do software para registo dos dados recolhidos durante a secagem.	18
Figura 7. (a) Vistas laterais do esquema representativo do secador, com representação da admissão e exaustão do ar, e (b) Ventilador de refrigeração de um computador utilizado para promover o escoamento do ar.	19
Figura 8. (a) Lâmpadas para aquecimento, (b) relé, mecanismo de controlo de temperatura.	20
Figura 9. Espaço de cor Hunter Lab.	21
Figura 10. Colorímetro Konica Minolta.	21
Figura 11. (a) Texturómetro (TA XT Plus), e (b) Análise instrumental do perfil de textura (TPA - Texture Profile Analysis).	22
Figura 12. Perfil de TPA.	23
Figura 13. (a) Titulação para determinação da acidez, (b) Refractómetro de bancada (ATAGO-3T).	24
Figura 14. Balança de Halogéneo.	24
Figura 15. Fluxograma do procedimento experimental.	25
Figura 16. Equipamento que tira a casca, o caroço e corta em semi-círculos a maçã.	26
Figura 17. Maçãs frescas dispostas na rede para secagem.	27
Figura 18. Teor de Humidade das maçãs em diferentes condições: estado fresco e diferentes temperaturas de secagem.	29
Figura 19. Acidez das maçãs em diferentes condições: estado fresco e diferentes secagens.	30
Figura 20. Teor de sólidos solúveis totais das maçãs em diferentes condições: estado fresco e diferentes secagens.	31
Figura 21. Avaliação da luminosidade (L*)	31

Figura 22. (a) Avaliação do parâmetro a^* (de verde (<0) a vermelho(>0)), (b) Avaliação do parâmetro b^* (de azul (<0) a amarelo(>0)).	32
Figura 23. Diferença de cor comparativamente ao estado fresco das maçãs.	33
Figura 24. Decréscimo da humidade das maçãs, com a secagem nos dois equipamentos, e para diferentes temperaturas.	34
Figura 26. Teor de humidade nas diferentes variedades de maçã em diferentes condições: estado fresco e diferentes temperaturas de secagens.	37
Figura 27. Acidez titulável nas diferentes variedades de maçã em diferentes condições: estado fresco e diferentes temperaturas de secagem.	38
Figura 28. Teor de sólidos solúveis totais nas diferentes variedades de maçã em diferentes condições: estado fresco e diferentes temperaturas de secagem.	39
Figura 29. Avaliação da luminosidade (L^*).	39
Figura 30. (a)Avaliação do parâmetro a^* (de verde (<0) a vermelho(>0)), (b) Avaliação do parâmetro b^* (de azul (<0) a amarelo(>0)).	40
Figura 31. Diferença de cor das duas variedades em relação ao estado fresco.	41
Figura 32. Avaliação da dureza duas variedades de maçãs, Golden e Smith em diferentes condições: estado fresco e diferentes secagens.	42
Figura 33. Avaliação da elasticidade das duas variedades de maçãs, Golden e Smith em diferentes condições: estado fresco e diferentes secagens.	43
Figura 34. Avaliação da coesividade das duas variedades de maçãs, Golden e Smith em diferentes condições: estado fresco e diferentes secagens.	43
Figura 35. Avaliação da mastigabilidade das duas variedades de maçãs, Golden e Smith em diferentes condições: estado fresco e diferentes secagens.	44
Figura 36. Variação da humidade ao longo do tempo para cada uma das variedades: Golden e Smith.	45
Figura 37. Variação da humidade ao longo da secagem para as variedades Golden (a) e Smith (b).	50
Figura 38. Ajuste ao modelo Page para os pontos experimentais das variedades Golden (a) e Smith (b).	51
Figura 39. Variação da difusividade mássica da humidade com a temperatura para as maçãs da variedade (a) Golden e (b) Smith.	54
Figura 40. Variação do coeficiente de convecção de transferência de massa com a temperatura.	57

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1. Modelos empíricos para representar a cinética de secagem.....	10
Tabela 2. Resultados do ajuste ao Modelo Page.....	36
Tabela 3. Resultados do ajuste ao modelo de Page.	46
Tabela 4. Resultados do ajuste ao modelo Henderson & Pabis Model.	47
Tabela 5. Resultados do ajuste ao modelo logarítmico.	47
Tabela 6. Resultados do ajuste ao modelo Vega-Lemus.	48
Tabela 7. Resultados dos coeficientes de difusão, de acordo com a equação (10) para as diferentes temperaturas e variedades.	53
Tabela 8. Resultados dos parâmetros para a equação (11).	54
Tabela 9. Resultados das propriedades da transferência de massa.	56

ABREVIATURAS

D_e	Difusividade efectiva da humidade (m^2/s)
D_e^0	Difusividade para uma temperatura infinita (m^2/s)
E	Energia de activação para a difusão da humidade (kJ/mol)
k	Constante de Velocidade
L	Metade da espessura da Lage (m)
MR	Razão da humidade (adimensional)
n	Ordem de reacção
R	Coeficiente de correlação (adimensional)
R	Raio (m)
R_g	Constante do gás (J/(mol K))
t	Tempo (s)
T	Temperatura ($^{\circ}C$).
W	Teor de humidade no tempo t (g água/g matéria seca)
W_0	Teor de humidade inicial (g água/g matéria seca)
W_e	Teor de humidade de equilíbrio (g água/g matéria seca)

1. INTRODUÇÃO

A secagem de alimentos tem sido amplamente utilizada em toda a história do homem, permitindo a disponibilidade destes produtos, independentemente da estação. Actualmente, a indústria de alimentos desidratados ocupa um lugar importante dentro das Indústrias Alimentares (Veja-Gálvez *et al.*, 2012). As vantagens da desidratação são bem conhecidas, como: a redução da humidade no produto, retarda a deterioração microbológica e química e provoca uma redução de volume substancial (Doymaz e Pala, 2003). Contudo, os produtos alimentares são sensíveis às condições de secagem (temperatura, velocidade do ar, e humidade relativa), que podem causar deterioração da qualidade dos produtos através da oxidação, alteração da cor, encolhimento, ou perda de propriedades como a textura e nutricionais-funcional (Vega-Gálvez *et al.*, 2009).

As frutas e os legumes desempenham um papel muito importante na nossa alimentação e nutrição, uma vez que elas são uma fonte de fibra bruta, nutrientes essenciais, vitaminas e minerais. A produção sazonal de muitas frutas e legumes, juntamente com seus altos teores em água que os torna muito perecíveis, tem levado à investigação de novas tecnologias (refrigeração, processos de secagem, entre outros) para preservá-los e permitir-nos a sua disponibilidade a qualquer momento (Quiles *et al.*, 2005). Um dos métodos mais simples para melhorar e aumentar a vida de prateleira de frutas e vegetais é reduzir o seu teor de humidade a tal ponto que os microrganismos não possam crescer (Das *et al.*, 2001).

A secagem representa uma forma viável de aumentar a vida útil dos alimentos, especialmente frutas e vegetais, reduzindo o seu teor de água, de forma a minimizar as reacções de deterioração microbianas. Além disso, a secagem dos géneros alimentícios diminui os custos de transporte (redução do peso) e minimiza as condições de embalagem. (Oliveira *et al.*, 2006).

A secagem solar é muitas vezes utilizada, contudo, tem inerentes alguns problemas, tais como: a lentidão do processo, a exposição à contaminação ambiental, a incerteza do tempo, e a exigência de trabalho manual (Abdelhaq e Labuza, 1987; Kostaropoulos e Saravacos, 1995). Devido a estas dificuldades, são necessários métodos mais rápidos, seguros e controláveis. Contudo, se forem usados secadores de ar quente, podemos obter um produto mais uniforme, com mais higiene e com uma cor mais atraente (Karathanos e Belessiotis, 1997; Doymaz e Pala, 2002a; Doymaz e Pala, 2002b).

O processo de secagem é afetado quer pelas condições externas de secagem (a estrutura física do produto e a distribuição espacial de água no interior dos alimentos), bem como, pela evolução temporal das condições do próprio processo, isto é, de acordo com o

principal mecanismo de transferência de humidade, que pode ser a difusão molecular, capilar de fluxo ou fluxo hidrodinâmico.

Em geral, a secagem é caracterizada por um período inicial em que o principal mecanismo de transferência de massa é o fluxo de capilar de água líquida sendo constante a taxa de secagem, (a taxa de evaporação da água da superfície é igual à taxa de migração de humidade a partir do interior para a superfície do alimento). Nos períodos seguintes, a difusão é o principal mecanismo de transferência de massa, e a taxa de secagem diminui, dando lugar a uma superfície mais seca. A qualidade dos alimentos desidratados é influenciada tanto pelas condições de secagem como pelas alterações físico-químicas que ocorrem dentro dos produtos (Aguilera, 2003).

A modelação matemática tem sido muito utilizada para compreender alguns dos fenómenos que ocorrem durante a secagem. Dependendo da tipologia dos modelos, estes podem ser classificados em teóricas, semi-teóricos e empíricos (Doymaz, 2007). Além disso, a modelação confiável de processos exige um profundo conhecimento do comportamento físico-químico dos alimentos, bem como dos mecanismos de remoção de água, expressa por meio da cinética de secagem (Kiranoudis *et al*, 1997; Salgado *et al*, 1994).

A difusividade da humidade em alimentos sólidos pode ser determinada por diferentes métodos, que variam de acordo com a geometria da amostra (cilindro infinito, laje ou esfera infinita), bem como as condições experimentais (em estado de equilíbrio ou não) (Corzo *et al.*, 2008). Dincer e Dost (1995, 1996) desenvolveram um modelo analítico para caracterizar a transferência de massa na secagem de objectos sólidos de geometria regular. Mais tarde Dincer e Hussain (2004) desenvolveu um novo número de *Biot* e um fator de correlação *lag* que permite determinar o coeficiente de transferência de massa. Para descrever o processo de difusão de humidade nos produtos alimentares, muitos investigadores usam a segunda lei de *Fick* da difusão (Corzo *et al.*, 2008; Fasina *et al.*, 2002;. Kayacier e Singh, 2004). A equação de *Fick* inclui um parâmetro, designado de coeficiente de difusão efectiva, que pode ser obtido a partir dos dados experimentais. É muito comum na literatura a considerar qualquer geometria dos alimentos finito como infinito, como placa plana, esférica ou configuração cilíndrica (Corzo *et al.*, 2008).

A desidratação de maçãs é uma prática frequente, pois as maçãs secas fazem parte de numerosos alimentos preparados, incluindo os lanches, alimentos integrais de pequeno-almoço, entre outros (Akpınar *et al.*, 2003). A maçã é uma fruta de consumo frequente e, na dieta ocidental, constitui uma das principais fontes de polifenóis (Boyer e Liu, 2004). Estes são importantes devido à sua contribuição para a qualidade sensorial dos frutos frescos e transformados. Eles também são conhecidos pelas suas propriedades antioxidantes (Van der Sluis *et al.*, 2002). Esta propriedade antioxidante das maçãs, está entre as maiores entre frutas e hortaliças (Lee *et al.*, 2003).

Os objectivos deste trabalho consistiram, em primeiro lugar, em desenvolver um secador convectivo de alimentos, procedendo à sua instrumentação e monitorização. Em segundo lugar, comparar a eficiência deste com uma estufa, avaliando as propriedades químicas e físicas das maçãs da variedade *Golden Delicious* para as temperaturas de 30, 40, 50 e 60°C. Em terceiro lugar, comparar os efeitos da secagem sobre duas variedades, a *Golden Delicious* e *Granny Smith*, avaliando também as propriedades químicas e físicas, para as mesmas temperaturas, e estudando a cinética de secagem através da equação de *Fick* através dos modelos de camada fina. Por último, pretendeu-se determinar as difusividades e a energia de activação para a difusão, bem como as propriedades de transferência de massa, nomeadamente o coeficiente de transferência convectiva de massa.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo descrevem-se os factores que influenciam a secagem de alimentos, nomeadamente, as condições e as propriedades envolvidas no processo. São também discutidos os diferentes tipos de secadores e as características inerentes a cada um. Apresentam-se ainda, diferentes modelos matemáticos que podem ser utilizados para descrever o processo de secagem, particularmente os modelos de camada fina, os modelos de difusão e a correlação de transferência de massa.

2.1. FACTORES QUE INFLUENCIAM A SECAGEM

Existem muitos factores que influenciam a taxa de secagem. Estes estão relacionados com, o tipo de secador, as condições de funcionamento durante a secagem, e a natureza dos produtos alimentares colocados no secador.

2.1.1. Condições do Processo

As condições do processo durante a secagem, composição do produto e a sua orientação podem influenciar a taxa de secagem. É importante ser capaz de estimar o quão rápido um produto alimentar irá secar dentro do secador.

Temperatura

A operação de secagem é melhorada a altas temperaturas. No período de taxa constante, a taxa de secagem aumenta devido ao aumento do fluxo de calor, que resulta numa maior taxa de vaporização. Além disso, a humidade relativa do ar vai diminuindo com o aumento da temperatura. Isso resulta num aumento da força motriz responsável pela remoção da humidade da superfície do produto. Por outro lado, temperaturas mais altas significam processos de difusão interna mais rápidos, ou seja, as moléculas de água migram mais rapidamente a altas temperaturas, e a secagem interna também é reforçada. Assim, o aumento da temperatura do ar acelera a secagem, afectando tanto os processos internos como os externos. No entanto, as altas temperaturas podem causar reacções químicas e físicas indesejadas no produto alimentar. Assim, e de forma a manter a qualidade do produto alimentar, convém encontrar-se, para cada produto, um limite prático para a temperatura de secagem (Helman e Hartel, 1997).

Velocidade do ar

A velocidade a que o ar de secagem chega à superfície do produto afecta a taxa de migração da humidade da superfície para o ar de secagem. A evaporação na superfície é reforçada por maiores taxas de transferência convectiva de massa como resultado do aumento da velocidade do ar. Assim, o aumento da velocidade do ar diminui o período de velocidade constante. No entanto, o período de secagem em taxa decrescente não é, geralmente, limitado por condições externas, isto é, o aumento da velocidade do ar tem, normalmente, pouco efeito sobre o período de queda (Helman e Hartel, 1997).

Humidade Relativa

A quantidade de humidade no ar, medido pela pressão de vapor ou humidade relativa do ar, afecta a força motriz para a transferência de massa externa. Para um dado produto alimentar, o aumento da humidade relativa do ar diminui a força motriz e assim, reduz a taxa de secagem no período de velocidade constante. Por outro lado, reduzindo a humidade relativa do ar de secagem aumenta o período de velocidade constante. No entanto, a humidade relativa tem, em geral, pouca influência sobre o período de secagem em taxa decrescente, onde a transferência de massa interna limita a taxa de secagem. É de salientar que a humidade relativa do ar também determina a humidade de equilíbrio final, como previsto pela desorção para a secagem. Uma vez que o ar e o produto alimentar alcançam um equilíbrio, a secagem não ocorre (Helman e Hartel, 1997).

Pressão

A pressão influencia a relação de equilíbrio da água e, assim, pode influenciar a secagem. Quando ocorre a secagem sob vácuo, a pressão de vapor do ar é reduzida, e a secagem ocorre mais rapidamente durante o período de taxa constante. No entanto, quando a secagem é limitada pela transferência de massa interna, a operação de vácuo tem pouco efeito sobre a taxa de secagem (Helman e Hartel, 1997).

2.1.2. Propriedades dos Alimentos

Área de superfície

A distância que as moléculas de água devem percorrer dentro de um produto alimentar determina a rapidez na secagem dos alimentos. Quando o alimento é cortado ou picado em pedaços menores, aumentando a sua área de superfície, a distância que as

moléculas de água têm de percorrer para chegar à superfície é diminuída, e a secagem é acelerada (Helman e Hartel, 1997).

Orientação do Constituinte

A orientação da microestrutura dos alimentos afecta a taxa de transporte da humidade dentro do alimento. A migração da água dentro de um produto alimentar pode ser significativamente diferente, e em direcções diferentes, dependendo da orientação dos componentes dos alimentos (Helman e Hartel, 1997).

Estrutura celular

Na maioria dos alimentos, uma parte da água está contida dentro das células, enquanto a restante água está fora das células. A água que existe entre as estruturas celulares é mais fácil de remover do que a água contida dentro das células, uma vez que existe uma resistência à migração da água através da fronteira da célula. Quando estas células são rompidas, a secagem é facilitada. No entanto, os danos devido à ruptura celular podem resultar num produto seco inaceitável (Helman e Hartel, 1997).

Tipo e concentração de solutos

Os componentes que constituem um produto alimentar determinam a mobilidade das moléculas de água durante a secagem, particularmente para um teor de humidade mais reduzido. Os solutos nos alimentos, como açúcares, amidos, sais e proteínas interagem com as moléculas de água e podem inibir a sua mobilidade, especialmente em concentrações mais elevadas (menor teor de humidade). Os solutos também podem influenciar a actividade da água e a viscosidade do produto alimentar. O aumento da viscosidade diminui a actividade da água (Helman e Hartel, 1997).

2.2. TIPOS DE SECADORES

A secagem é um método antigo, prático e eficaz para a conservação de alimentos. A água no alimento é removida durante o processo de secagem. Como os microrganismos necessitam de água para crescer e sobreviver, o teor de água final dos produtos deve ser reduzido a fim de reduzir os microrganismos que provocam a deterioração e degradação, melhorando, desta forma, um armazenamento seguro e prolongando a vida útil dos alimentos. Por outro lado, reduz-se o volume e peso dos produtos, e conseqüentemente reduz os custos de transporte (Hui *et al*, 2008).

A secagem directa ao sol tem sido amplamente utilizada desde os tempos antigos, especialmente em países em desenvolvimento. Uma vez que a energia solar é abundante, renovável, gratuita e ecológica. No entanto, os produtos agrícolas não podem ser secos durante a estação chuvosa, pelo que o desempenho dos secadores solares depende da natureza intermitente da radiação solar. Hoje em dia há diferentes tipos de secadores, todos com o objectivo de melhorar a qualidade de produtos secos obtidos e encurtar o tempo de secagem. Por exemplo, o processo de liofilização é adequado para um elevado número de produtos sensíveis ao calor, ao passo que o spray de contacto, e secadores de leite fluidizado podem ser usados para secar grandes quantidades de alimentos (Hui *et al*, 2008).

A selecção de um secador depende de vários factores, tais como: propriedades do alimento que está a ser seco, facilidade da instalação, qualidade desejada dos alimentos secos a obter, escala de produção, tempo de secagem, considerações de segurança, investimento de capital e custos de operação e manutenção. Os procedimentos de selecção de um sistema de secagem incluem: uma pesquisa dos secadores adequados, a estimativa de custos de diversos secadores, incluindo o custo de capital e de exploração, os custos de ensaios de secagem em unidades laboratoriais ou protótipos e avaliação da qualidade dos alimentos secados (Hui *et al*, 2008).

Existem muitos tipos de secadores disponíveis para secar diferentes alimentos. De um modo geral, os secadores podem dividir-se em seis grupos distintos: secador solar, secador de contacto, secador de pulverização, secador de leite fluidizado, liofilizador e secador de dieléctrico.

2.2.1. Secador Solar

Apesar de secagem solar ter sido utilizada desde os tempos antigos, os modernos secadores solares são bem desenhados para eliminar a contaminação, protecção dos alimentos da chuva, e melhorar a qualidade dos produtos. Os secadores solares podem ser classificados em três grandes categorias, secadores de convecção natural, secadores de convecção forçada, secadores solar assistido.

2.2.2. Secadores de contacto

Nos secadores de contacto, o alimento está em contacto directo com a superfície quente e, portanto, a secagem ocorre principalmente por condução. As vantagens do secador de contacto relativamente aos secadores de transmissão incluem: maior eficiência, maior qualidade, limpeza reduzida, segurança ambiental, nenhuma emissão nociva de gases para a atmosfera, fácil controlo, altamente flexível e secagem sob condições de vácuo/atmosfera. No entanto, os secadores de contacto também têm algumas

desvantagens, incluindo o alto custo de capital, a limitação da taxa de secagem por área de transferência de calor, baixa capacidade de produção devido à operação em modo lote e tem problemas na exaustão de gases (Hui *et al*, 2008).

2.2.3. Secadores de pulverização

O secador de pulverização é higiênico, tem um processo ambientalmente amigável para a produção contínua, e é de alta produção (por exemplo, até 10 000 kg de leite em pó por hora). Os secadores de pulverização são capazes de lidar com uma vasta gama de produtos, incluindo: pegajoso, açúcar e gordura contidos nos alimentos, que são difíceis de secar, e produtos sensíveis ao calor (ou seja, proteínas do leite e enzimas). Embora o teor de humidade inicial seja elevado, os alimentos podem ser secados para um teor de humidade muito baixo (Hui *et al*, 2008).

A qualidade do produto seco e as taxas de secagem são elevadas, enquanto que o custo de manutenção é baixo. No entanto, a secagem por pulverização também tem várias desvantagens, incluindo os elevados custos de investimento, a complexidade do processo, difícil de controlar o tamanho da partícula final, e o risco de explosão de pó (Hui *et al*, 2008).

2.2.4. Secadores de leite fluidizado

Os secadores de leite fluidizado são utilizados para secar partículas e produtos sensíveis ao calor. As vantagens do secador de leite fluidizado são: secagem uniforme, curto tempo de secagem, baixos custos de investimento e manutenção, construção simples e padrão sanitário elevado. Um secador de leite fluidizado contém três componentes principais: uma câmara de admissão, uma distribuidora e uma região da borda livre (Hui *et al*, 2008).

2.2.5. Liofilizadores

Na liofilização o efeito de secagem é obtido através de exposição do alimento húmido a uma baixa pressão parcial de vapor de água e depois deixá-lo evaporar por um processo de sublimação. O vapor parcial a baixa pressão pode ser obtido por vácuo. Os alimentos sensíveis são muitas vezes secos por este método (Hui *et al*, 2008).

As vantagens da liofilização incluem: baixa humidade, alta qualidade do produto, armazenamento a longo prazo, fácil reidratação, a preservação da cor original e forma do produto. No entanto, as desvantagens de liofilização incluem o elevado investimento inicial e custo de energia, intensidade de trabalho devido ao pré-preparo dos produtos e tempo de processo (Hui *et al*, 2008).

A liofilização não é apropriada para alimentos de alto teor de gordura, pois o processo apenas remove água. Os produtos secos por liofilizadores incluem café, chá, condimentos, ovos, produtos de carne crua, especiarias, cogumelos, morangos, vísceras, vegetais moídos, camarão, peixe, produtos de carne fermentados e cozidos (Hui *et al*, 2008).

2.2.6. Secadores de dielétricos

Os sistemas de aquecimento dielétrico podem incluir rádio-frequência (RF) e sistemas de aquecimento por microondas. São técnicas de secagem relativamente novas em comparação com os processos convencionais de secagem e, portanto, têm várias vantagens. Eles oferecem uma secagem uniforme, qualidade do produto, aquecimento volumétrico e variação gradual da humidade. Além disso, o tempo de secagem é curto, reduzindo o custo de produção. No entanto, eles comportam elevados custos de operação e de investimento, porque necessitam de electricidade para o aquecimento. Além disso, não pode ser aplicados a materiais condutores (Hui *et al*, 2008).

2.3. MODELOS MATEMÁTICOS

2.3.1. Modelos de camada fina

Para projetar novos equipamentos de secagem, ou para melhorar os que já existem, ou ainda permitir o controlo das operações de secagem, os modelos de simulação são muito úteis. A cinética de secagem pode ser descrita em termos das propriedades de transporte da substância, bem como o ar de secagem (Guiné *et al.*, 2009). Para descrever os fenómenos de secagem, existem as equações dos modelos de camada fina. Estas também têm sido usadas para determinar o tempo de secagem de vários produtos alimentares e, ao mesmo tempo, para estimar as curvas de secagem. Elas mostram as variações da humidade ao longo da secagem, em termos de parâmetros, tais como a constante de secagem, k (s^{-1}), ou o factor *lag*, k_0 (adimensional), que respondem por efeitos combinados de vários fenómenos de transporte durante a secagem (Tripathy e Kumar, 2009). Na literatura, várias equações de camada fina podem ser encontrados, e que têm sido vastamente utilizadas vários investigadores para explicar, com sucesso, a secagem de vários produtos agrícolas (Togrul e Pehlivan, 2003; Nourhène *et al*, 2008).

Os dados obtidos experimentalmente, para as diferentes temperaturas estudadas, foram estabelecidos na forma da razão de humidade adimensional variável (MR) *versus* tempo, onde (Mota *et al.*, 2010):

$$MR = \frac{W - W_e}{W_0 - W_e} \quad (1)$$

onde, W é o teor de humidade num instante genérico de tempo t , W_e é o teor de humidade de equilíbrio e W_0 o teor de humidade inicial, todos expressos em base seca (g água/g sólidos secos).

Na literatura, podem ser encontrados diferentes modelos empíricos de simulação de secagem, e que se resumem na Tabela 1 citados por Baini e Langrish (2007), abaixo representada. Para a avaliação da qualidade de cada um, utilizou-se o software *Sigma Plot*, v 8.0 (SPSS, Inc.), onde se determinou o coeficiente de correlação (R) e o Erro Padrão da estimativa (na terminologia Inglesa, Standard Error of Estimate - SEE). Além disso, realizou-se também uma análise da variância, resultando o F-teste e o P-valor.

Tabela 1. Modelos empíricos para representar a cinética de secagem.

Nome do Modelo	Equação
<i>Page</i>	$MR = \exp(-k t^n)$
<i>Henderson & Pabis</i>	$MR = a \exp(-k t)$
<i>Logarithmic</i>	$MR = a \exp(-k t) + c$
<i>Vega-Lemus</i>	$MR = (a + k t)^2$

2.3.2. Modelos de difusão

As características físicas da fruta alteram-se muito durante a secagem, podendo-se admitir que a segunda *lei de Fick* pode razoavelmente prever a distribuição da humidade dentro alimentos durante a secagem (Guiné *et al.*, Na). Portanto, a segunda *lei de Fick* foi utilizada para a modelização matemática da cinética de secagem e, também para, a estimativa dos coeficientes de difusão. O modelo usa a relação estabelecida na equação (1) (MR) como variável dependente, que relaciona o gradiente de humidade da amostra em tempo real com a humidade inicial e a humidade de equilíbrio (Vega *et al.*, 2007).

Neste caso os dados de secagem obtidos mostram que as maçãs não apresentam um período de taxa constante, e que a secagem ocorreu principalmente em condições de

queda de velocidade. O mesmo se verificou para outros produtos alimentares, como por exemplo as batatas ou castanhas (Khraisheh *et al*, 1997;. Guiné e Fernandes, 2006). Desta forma, pode-se supor que a secagem é regida pela transferência de massa interna, sendo a difusão da humidade a etapa de controlo.

A transferência de massa unidireccional em estado transiente, assumindo que as amostras podem ser aproximada para camadas, é expressa por (Crank, 1975):

$$\frac{\partial W}{\partial t} = D_e \left(\frac{\partial^2 W}{\partial r^2} \right) \quad (2)$$

onde $W(r, t)$ é o teor de humidade em base seca (kg água / kg de sólidos secos), t é o tempo (s), D_e é difusividade efectiva (m^2 / s) e r é a coordenada espacial, variando de 0 a L , com L sendo a metade da espessura (m).

Considerando que o teor de humidade inicial é uniforme em toda a amostra e apresenta simetria central, as condições iniciais e fronteiras são (Khraisheh *et al*, 1997.):

$$\text{Para } t = 0: \quad W(r,0) = W_0 \quad (3)$$

$$\text{Para } r = 0: \quad \frac{\partial W(0,t)}{\partial r} = 0 \quad (4)$$

$$\text{Para } r = L: \quad W(L,t) = W_e \quad (5)$$

onde W_0 é a humidade inicial do produto e W_e é o teor de humidade de equilíbrio (ambos expressos em base seca).

Para a difusão em estado transiente, assumindo uma distribuição uniforme inicial do teor de humidade, e uma concentração uniforme na superfície para $t > 0$, a solução da Lei de Fick pode ser aproximada por uma série infinita, da forma (Corzo *et al*. 2008; Saravacos, 1986; Vega *et al.*, 2007):

$$MR = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp \left[-D_e \frac{(2n+1)^2 \pi^2}{4L^2} t \right] \quad (6)$$

Além disso, se considerarmos que os números de Fourier são maiores que 0,2 os termos da série a partir do segundo podem ser desprezados, e então a solução da Equação de Fick é dada por:

$$MR = \frac{8}{\pi^2} \exp\left[-D_e \frac{\pi^2}{4L^2} t\right] \quad (7)$$

A equação reorganizada, por aplicação de logaritmos, pode ser expressa como uma linha recta da forma:

$$\ln(MR) = \ln\left(\frac{8}{\pi^2}\right) + \left(-D_e \frac{\pi^2}{4L^2}\right) t \quad (8)$$

com: Ordenada na origem = $\ln\left(\frac{8}{\pi^2}\right)$ (9)

$$\text{Declive} = -D_e \frac{\pi^2}{4L^2} \quad (10)$$

Assim, um gráfico de $\ln(MR)$ versus tempo para cada uma das temperaturas estudadas vai dar uma linha recta, de inclinação D_e .

Considerando que a difusividade efectiva varia com a temperatura de acordo com uma função de tipo Arrhenius:

$$D_e = D_e^0 \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) \quad (11)$$

onde, D_e^0 é a difusividade para uma temperatura infinita (m^2/s), E é a energia de activação para a difusão de humidade (J/mol), R é a constante dos gases ($R = 8.31451 \text{ J}/(\text{mol}\cdot\text{K})$) e T é a temperatura de secagem (expressa em Kelvin) (Konishi *et al.*, 2001; Vega *et al.*, 2007), então:

$$\ln(D_e) = \ln(D_e^0) + \left(-\frac{E}{R}\right) \frac{1}{T} \quad (12)$$

E mais uma vez, traçando $\ln(D_e)$ versus $(1/T)$, é obtida uma linha recta, com:

$$\text{Ordenada na origem} = \ln(D_e^0) \quad (13)$$

$$\text{Declive} = -\frac{E}{R} \quad (14)$$

que permite estimar os valores dos parâmetros na Equação (11): D_e^0 e E .

2.3.3. Correlação de transferência de massa

O coeficiente de transferência convectiva de massa, h_m (m/s), e o coeficiente de difusividade efectiva, estão correlacionadas com o número adimensional de Biot para a transferência de massa (Dincer e Hussain, 2002; Jurendić e Tripalo, 2011):

$$Bi = \frac{h_m L}{D_e} \quad (15)$$

onde L (m) é a dimensão do sistema, que no presente caso é a metade da espessura. A equação (15) é válida para valores do número de Biot superiores a 0,1 (Sahin *et al.*, 2002).

Dincer e Hussein (2004) apresentam uma correlação que permite calcular o número de Biot (Bi) a partir de uma relação entre Bi e o factor lag (parâmetro k_0 nas equações dos modelos de camada fina: Henderson & Pabis ou logaritmo):

$$Bi = 0.057 k_0^{26.7} \quad (16)$$

Além disso, Dincer e Hussain (2002) apresentam a equação que relaciona o número de Biot com o Número de Dincer adimensional:

$$Bi = \frac{24.848}{Di^{0.375}} \quad (17)$$

onde,

$$Di = \frac{u}{kL} \quad (18)$$

Em que u é a velocidade de fluxo de secagem do ar (m/s), k a constante de secagem (s^{-1}) e L a dimensão característica (m).

3. REALIZAÇÃO EXPERIMENTAL

Neste capítulo apresenta-se instalação experimental e a respectiva instrumentação. Descreve também o procedimento experimental seguido para a secagem e respectiva avaliação física e química do produto secado, neste caso, maçãs.

3.1. INSTALAÇÃO EXPERIMENTAL

3.1.1. Secador

Como objectivo de partida, pretendeu-se desenvolver um equipamento (secador) que, por um lado permitisse realizar ensaios de secagem em diferentes condições, e por outro lado assegurasse condições de higiene e segurança para os alimentos tratados. Deste modo, foi explorada a hipótese de adquirir o invólucro do secador a uma empresa dedicada para tal. Nesse sentido, contactou-se a empresa Mercatus (www.mercatus.pt), que após a exposição do pretendido, prontamente se disponibilizou a apoiar o presente projeto através da cedência da estrutura base, sob a forma paralelepípedica, e com as características semelhantes em termos de isolamento aos equipamentos dedicado à conservação de produtos alimentares. Esta estrutura veio sem qualquer instrumentação instalada, estando previsto posteriormente projectar toda a instrumentação bem como a sua colocação.

A geometria do equipamento é assim de forma paralelepípedica, com 1,2 m de comprimento, 0,7 m de largura e 0,8 m de altura. Com um volume interno de 0,20 m³, como representado na Figura 1. É composto por duas portas localizadas na parte frontal, um orifício quadrangular (10 cm de lado) na lateral esquerda para admissão de ar “novo”, e um orifício circular (5 cm de diâmetro) na lateral direita para exaustão do ar de secagem (húmido). Fazem também parte do secador várias grelhas, que podem ser colocadas a diferentes alturas, para disposição dos produtos a secar.

O Isolamento é em poliuretano injectado a alta pressão (com densidade de 41 Kg/m³), envolvido interior e exteriormente por painéis em chapa pré-lacada especialmente concebida para uso alimentar, de cor cinzento claro. As duas portas são reversíveis e auto-sustentáveis a 90° (ou 180°).

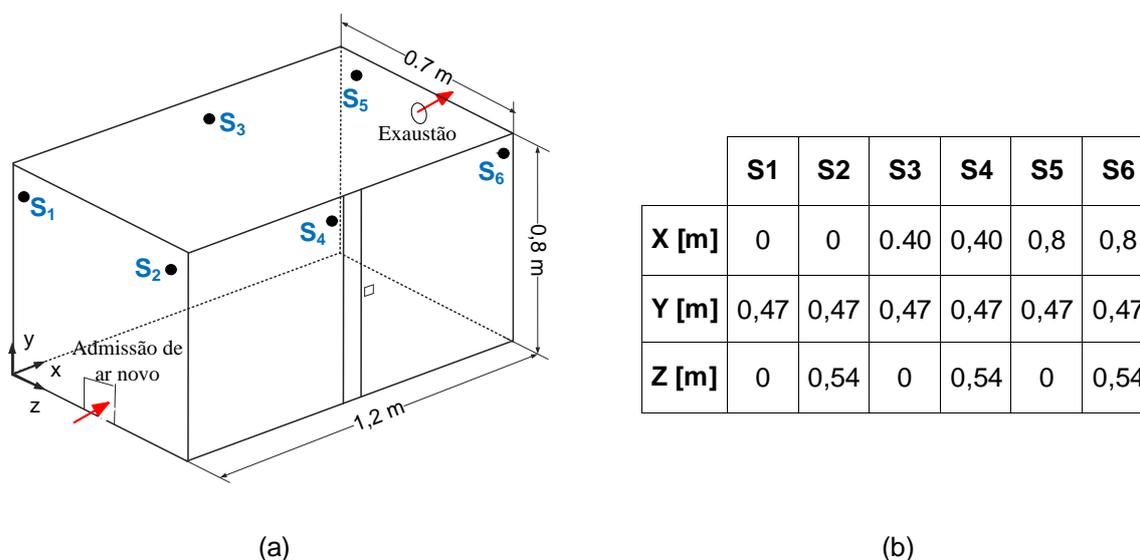


Figura 1. (a) Esquema representativo da instalação experimental (secador) e, (b) localização dos termopares.

3.1.2. Instrumentação para medição da massa

Para a medição da perda da massa decorrente do processo de secagem foi utilizada uma balança (Modelo KERN 572-55), representada na Figura 2(a).

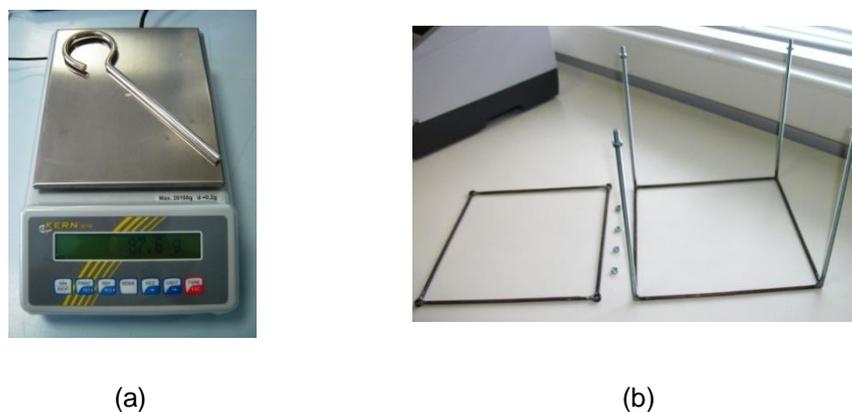


Figura 2. (a) Balança Modelo KERN 572-55, e (b) Estrutura metálica que liga a balança (no exterior à grelha de teste (no interior)).

A gama de medição da balança é de 0 a 20 Kg, com uma resolução de 0.0001 kg. O prato da pesagem tem dimensões 0,16 m de largura por 0,2 m de comprimento. Para que a temperatura de operação não influenciasse a medição da massa, a balança foi colocada no exterior, e na parte inferior do secador (Figura 3). Para tal, construiu-se uma estrutura metálica (Figura 2(b)), que liga a balança à grelha que sustenta as amostras no interior do

secador. Assim, na parte inferior do secador fizeram-se 4 orifícios circulares com diâmetro suficiente para passar a estrutura, sem que tenha contacto directo com as paredes do secador. Desta forma, pesa somente o que for colocado sobre a estrutura que sustenta uma grelha onde são colocadas as amostras em estudo.

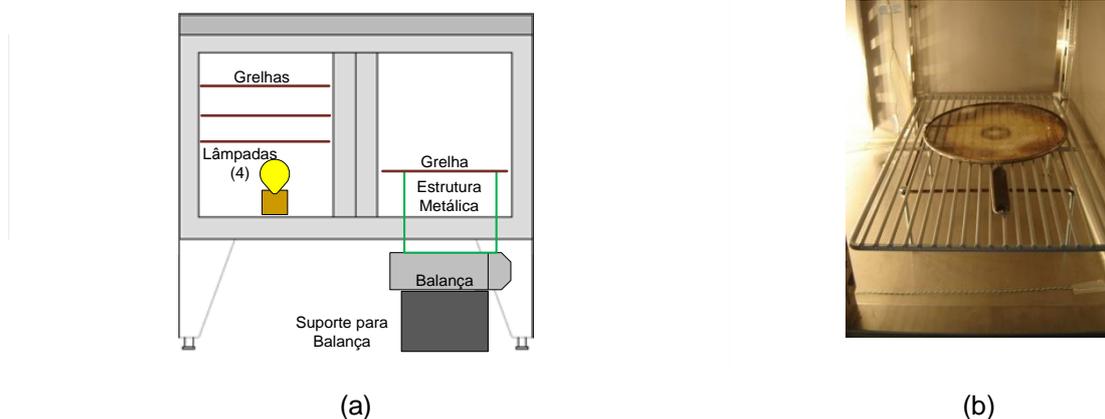


Figura 3. (a) Esquemática da posição da estrutura metálica (a verde) e da balança, e (b) Foto do interior do secador, onde se evidencia a estrutura metálica e a grelha.

Para a monitorização e gravação contínua dos valores da massa durante o processo de secagem, utilizou-se um *software* dedicado que faz a comunicação entre a balança e um computador comum. A monitorização e o controlo dos parâmetros de medição eram feitas através do programa EXCEL da Microsoft, no qual foi implementada uma *macro*. Através desta *macro* é possível controlar vários parâmetros, como: definir o intervalo de tempo de gravação, incremento de tempo de registo, início e fim do registo, etc., (Figura 4).

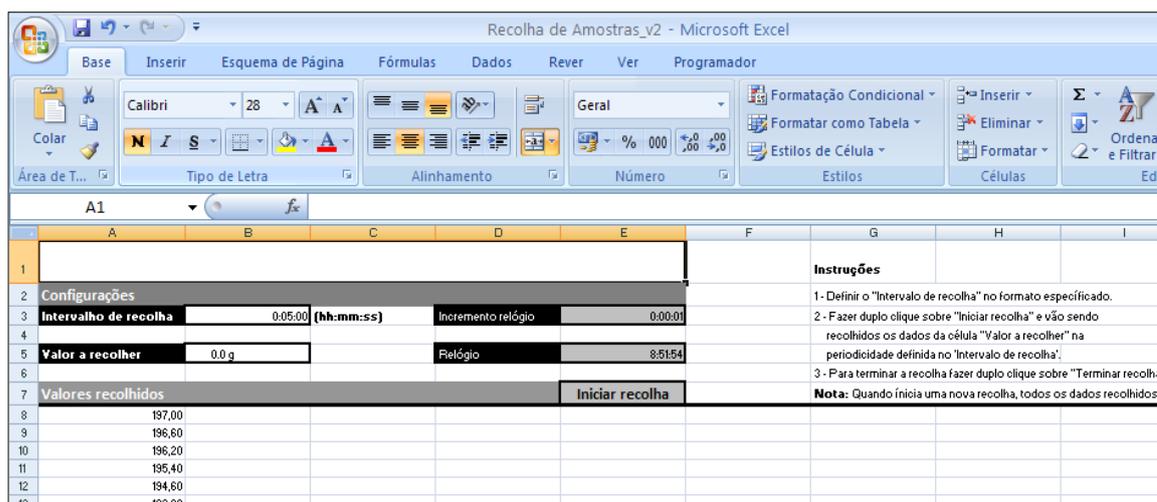


Figura 4. Ambiente da Macro para recolha de dados das pesagens durante o processo de secagem.

3.1.3. Sensores de temperatura

No que respeita à temperatura, é necessário ter atenção a alguns aspectos, nomeadamente no seu controlo durante o processo de secagem, para que este seja uniforme e para que a velocidade de secagem seja constante. Para a medição da temperatura no interior do secador, utilizaram-se seis termopares, *Tipo K*, colocados em seis pontos (assinalados pela letra **S**) como se mostra na Figura 1(a). Na Figura 1(b) mostram-se as localizações desses termopares, tendo em conta o referencial da Figura 1(a).

Os termopares eram ligados a uma placa de aquisição de dados TC-08 (da marca *Pico Technology*), representada na Figura 5. A placa possui 8 canais para leitura da temperatura em tempo real. O sinal em tensão é convertido em temperatura pela placa de aquisição e registado no computador através do *Software Pico Log 5.20.1*.



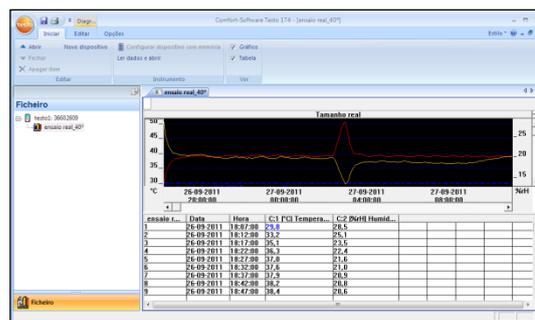
Figura 5. Placa de aquisição de dados da marca PICO (TC-08).

3.1.4. Monitorização da humidade do ar

A humidade do ar no interior do secador durante a secagem não era controlada; no entanto, era monitorizada com recurso a um higrómetro da marca *testo* – modelo 174H, (Figura 6). Este equipamento mede em simultâneo a temperatura e a Humidade do ar. A gama de medida em temperatura é de -30 a +70 °C (exactidão $\pm 0,5$ °C), e para a humidade Relativa de 2 a 98 % (exactidão ± 3 % HR).



(a)



(b)

Figura 6. (a) Foto do Higrómetro (Testo 174H), e (b) Ambiente do software para registo dos dados recolhidos durante a secagem.

3.1.5. Escoamento do ar no interior do secador

A renovação do ar interior era feito pela admissão de ar novo, através de uma abertura quadrangular localizada na parte inferior esquerda, enquanto que a exaustão era feita através de um orifício circular localizado na parte superior da face oposta, como se mostra na Figura 7(a). Ambos os orifícios foram contemplados na fase de construção. Para promover o escoamento do ar no interior do secador, e assim uniformizar a temperatura interior, e também para remover o excesso de humidade, instalou-se, no orifício de admissão, um ventilador de baixa potência que produz velocidades do ar bastante baixas (ventoinha de refrigeração de um computador) como se mostra na Figura 7(b). Dependendo do tipo de ensaio o ventilador pode ou não estar em funcionamento.

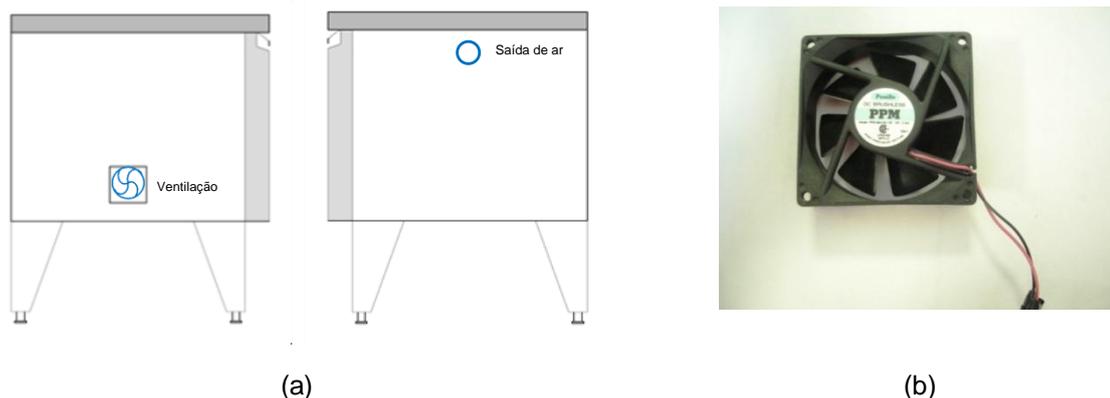


Figura 7. (a) Vistas laterais do esquema representativo do secador, com representação da admissão e exaustão do ar, e (b) Ventilador de refrigeração de um computador utilizado para promover o escoamento do ar.

3.1.6. Mecanismos de aquecimento do ar

Para o aquecimento do ar no interior do secador utilizaram-se 4 lâmpadas de 60 W cada, como mostra a Figura 8(a). Estas estão ligadas a um dispositivo controlador On/Off (relé), representado na Figura 8(b). Este dispositivo, está equipado com uma sonda termopar, e colocada no interior do secador. Dependendo da temperatura no interior este faz ligar ou desligar as lâmpadas. Desta forma, dependendo da temperatura pretendida para uma dada secagem (através da programação do controlador), o controlador mantém a temperatura interna aproximadamente constante. Quando a temperatura ultrapassa a temperatura desejada, as lâmpadas desligam, começando a diminuir a temperatura. Porém, assim que esta atinja sensivelmente 2 °C abaixo da desejada, as lâmpadas ligam novamente.

Este dispositivo possui uma desvantagem inerente, uma vez que ele é concebido para controlar sistemas de refrigeração, e assim ao fim de 8 h este reinicia, ou seja, prepara-se para a descongelação. Neste caso, ao iniciar este processo a temperatura durante um período de aproximadamente 1 h não é controlada, ou seja as lâmpadas não desligam quando a temperatura está acima da desejada. Para evitar este inconveniente, antes de se atingir as 8 h de ensaio reinicia-se o relé e controla-se manualmente a temperatura, ligando e desligando as lâmpadas, de forma a manter a temperatura desejada.



(a)



(b)

Figura 8. (a) Lâmpadas para aquecimento, (b) relé, mecanismo de controlo de temperatura.

3.2. ANÁLISES FÍSICAS E QUÍMICAS EFECTUADAS

3.2.1. Avaliação da cor

Na engenharia alimentar, muitas vezes é necessário analisar a cor da superfície das amostras de alimentos, tanto qualitativa como quantitativamente. A análise qualitativa pode envolver a inspeção visual e a sua comparação das amostras de outros alimentos. A análise quantitativa pode envolver a obtenção e distribuição de cores e as suas médias. Por outro lado, podem também fazer-se correlações da cor com outros dados, como sejam, a temperatura e teor de humidade (Kit e Spyridon, 2004).

A medição da cor padrão dos alimentos pode ser feita usando uma multiplicidade de espaços de cor. Contudo, o *Hunter lab* é o mais recente sistema $L^*a^*b^*$ (CIELab) usado para a quantificação da cor nos alimentos (Mendoza *et al*, 2006). No espaço de cor *Hunter*, evidenciado na Figura 9, a dimensão L representa a luminosidade, variando de preto (0) a branco (100), e a e b representam as dimensões de oposição de cor, com a a variar de verde ($-a$) a vermelho ($+a$) e b a variar de azul ($-b$) a amarelo ($+b$) (Guiné e Barroca, 2011).

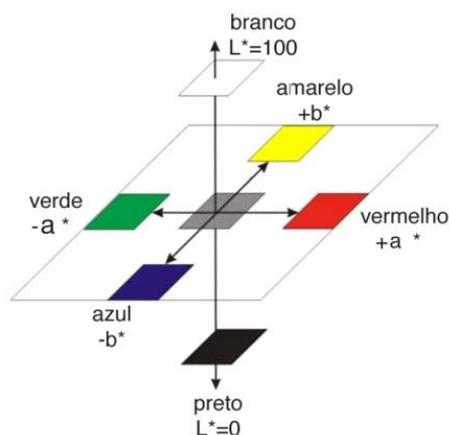


Figura 9. Espaço de cor Hunter Lab.

A cor das amostras frescas e secadas foi avaliada recorrendo a um colorímetro, Chroma Meter - CR-400, Konica Minolta, ilustrado na Figura 10. Para cada secagem, bem como para as amostras frescas, foram analisadas 20 medições em 20 amostras de maçã.

A diferença total de cor (ΔE), foi o parâmetro considerado para a avaliação da variação de cor entre uma amostra secada e a fresca, considerada o referencial, e designado com um índice 0 na equação:

$$\Delta E = \sqrt{(L_0^* - L^*)^2 + (a_0^* - a^*)^2 + (b_0^* - b^*)^2} \quad (19)$$



Figura 10. Colorímetro Konica Minolta.

3.2.2. Análise do perfil de textura

A textura resulta das interações complexas entre os diferentes componentes dos alimentos e as alterações que ocorrem na textura dos alimentos durante o processamento dos alimentos, e questão relacionadas com alterações ao nível micro-estrutural nas células

(Marsilio *et al*, 2000). As propriedades da textura, bem como a aparência e o “flavor”, são as que mais influenciam os atributos organolépticos da qualidade, estabelecendo a aceitabilidade dos alimentos pelos consumidores. Nesta medida, tem havido um grande interesse em desenvolver métodos capazes de prever e controlar a textura dos alimentos, particularmente no que toca aos efeitos do processamento, como a secagem. A análise instrumental do perfil de textura (TPA - *Texture Profile Analysis*) é um dos métodos que permite determinar a textura dos alimentos por simulação ou imitação da mordida repetida ou mastigação do alimento.

Para a determinação deste parâmetro utilizou-se um texturómetro (TA.XT.Plus), como mostra a Figura 11(a). Para determinar os perfis de textura, foram analisados 20 TPA's, como exemplifica a Figura 11(b), para cada variedade, no estado fresco e para as amostras secadas a diferentes temperaturas.

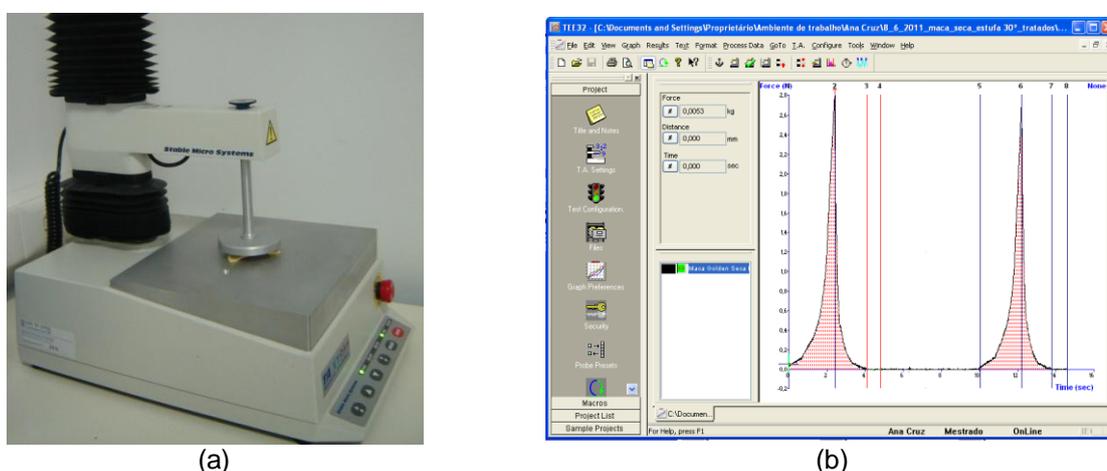


Figura 11. (a) Texturómetro (TA XT Plus), e (b) Análise instrumental do perfil de textura (TPA - *Texture Profile Analysis*).

A análise do perfil de textura (TPA) foi realizada por dois ciclos de compressão entre placas paralelas utilizando uma sonda de compressão de 75 mm de diâmetro, com um intervalo de 5 segundos entre os ciclos. A força de célula de carga usada é de 5 kg a a velocidade de teste de 0,5 mm/s.

Os atributos da textura: dureza, adesividade, elasticidade, coesividade e mastigabilidade foram calculadas através das seguintes equações (Guiné, 2010), cuja nomenclatura se mostra no TPA da Figura 12:

$$\text{Dureza (N)} = F_1 \quad (20)$$

$$\text{Elasticidade (\%)} = \Delta T_2 / \Delta T_1 * 100 \quad (21)$$

$$\text{Coesividade} = A_2 / A_1 \quad (22)$$

$$\text{Adesividade (N.s)} = A_3 \quad (23)$$

$$\text{Mastigabilidade (N)} = F_1 * \Delta T_2 / \Delta T_1 * A_2 / A_1 \quad (24)$$

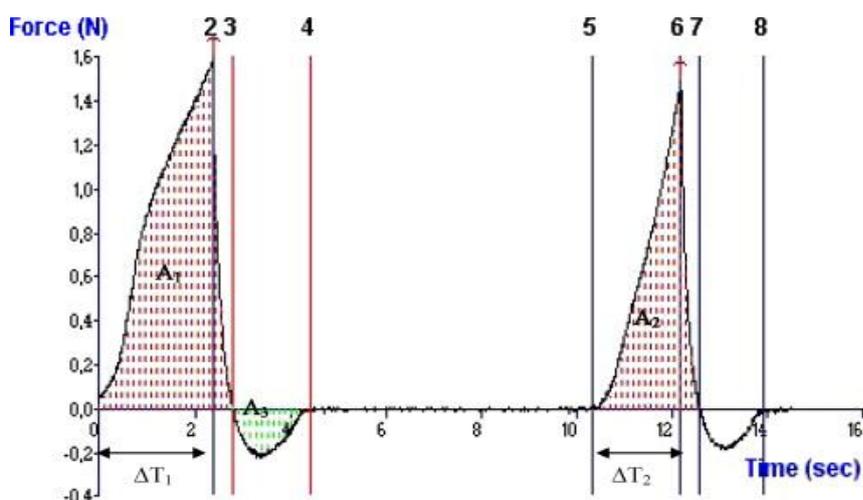


Figura 12. Perfil de TPA.

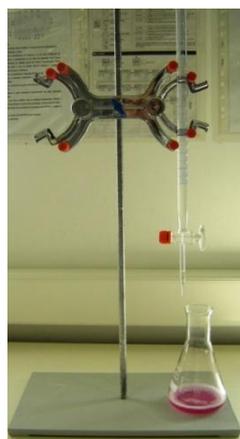
3.2.3. Acidez titulável

A acidez é influenciada pelos processos de secagem, em particular pela temperatura de operação. Sabe-se que uma parte da acidez existente nas maçãs é a acidez volátil (constituída por ácidos gordos de baixo peso molecular, tal como, o ácido acético e propiónico no estado livre ou combinado), sendo esta perdida por vaporização a temperaturas mais elevadas (Anchía, 2000).

A determinação da acidez titulável é realizada segundo a norma portuguesa, NP-1421. Em que é quantificada através de uma titulação com NaOH 0,01 N padronizado, e o resultado é expresso em mg de ácido málico por gramas matéria seca. A Figura 13(a) ilustra o ponto de viragem da titulação.

3.2.4. Sólidos solúveis totais

Para a quantificação dos sólidos solúveis totais, que incluem os açúcares, usou-se leitura do grau °Brix por refractometria. O equipamento utilizando foi um refractómetro de bancada (ATAGO-3T) representado pela Figura 13(b). A preparação da amostra seguiu a norma portuguesa NP-783. O resultado, após conversão, é expresso em gramas de sacarose por gramas de matéria seca.



(a)



(b)

Figura 13. (a) Titulação para determinação da acidez, (b) Refractómetro de bancada (ATAGO-3T).

3.2.5. Humidade da amostra

A determinação da humidade da amostra é importante para indicar a quantidade de água livre presente no alimento. Esta é determinada pela razão entre a massa final e inicial, expressa em percentagem de humidade (%). Para a determinação foi utilizada a balança de halogéneo, modelo HG53 Mettler Toledo, representada na Figura 14. Fizeram-se análises a um total de 4 amostras para as duas variedades, no estado fresco e para as diferentes temperaturas de secagem. As condições de operação do equipamento foram as seguintes:

- Fonte de calor: lâmpada de halogéneo;
- Temperatura de secagem: 120 °C;
- Velocidade de secagem: 3 (intermédia).



Figura 14. Balança de Halogéneo.

3.3. ENSAIOS DE SECAGEM

O procedimento que se seguiu para a realização dos ensaios de secagem das maçãs e avaliação das suas propriedades no estado fresco e secado, está representado no fluxograma que se apresenta de seguida (Figura 16).

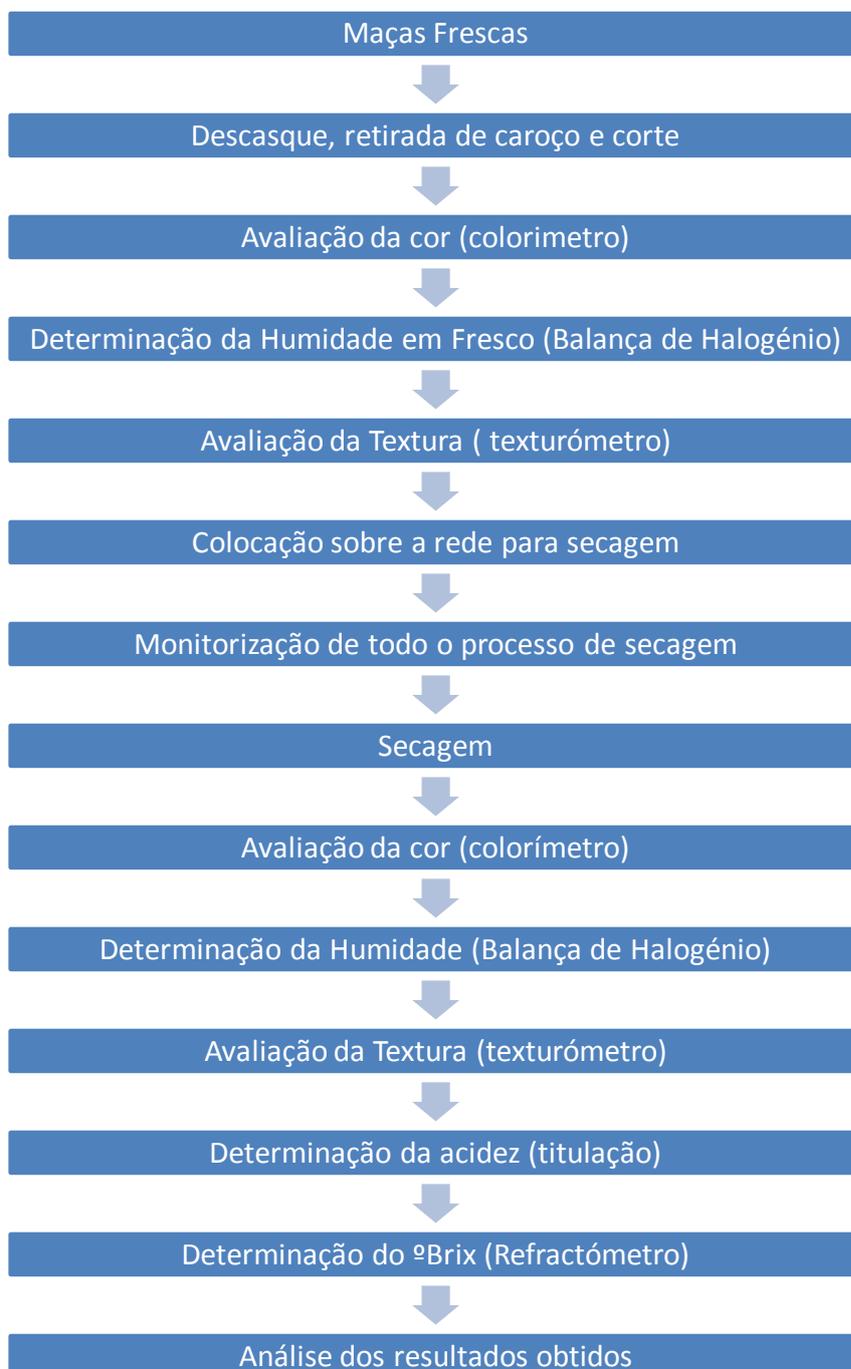


Figura 15. Fluxograma do procedimento experimental.

As maçãs utilizadas nos ensaios, compradas num supermercado local, foram lavadas, descascadas, e finalmente cortadas em semi-círculos de aproximadamente 0,5 cm de espessura, antes de secar. A Figura 16 mostra o processo de descasque e corte.



Figura 16. Equipamento que tira a casca, o caroço e corta em semi-círculos a maçã.

Antes de se iniciar o processo de secagem das maçãs, eram avaliados algumas das suas propriedades, tais como:

- A cor, com o auxílio de um colorímetro, a 20 amostras;
- A humidade, através da balança de Halogénio, a 4 amostras;
- A textura, recorrendo a um texturómetro, tendo sido analisadas 20 amostras.

Após estas avaliações, era preparado o secador para o processo de secagem, incluindo nomeadamente:

- Ligação das Lâmpadas;
- Ligação da ventilação;
- Programação do relé para a temperatura desejada;
- Ligação da balança;
- Programação do ficheiro de recolha e gravação de dados para a temperatura (Pico Log) e massa (Macro em EXCEL);
- Programação do higrómetro (Testo 174H) para a leitura da humidade do ar no interior do secador durante a secagem.

As maçãs frescas eram cortadas em semi-círculos e colocadas numa rede para proceder à sua secagem, como ilustra a Figura 17.



Figura 17. Maçãs frescas dispostas na rede para secagem.

O processo de secagem era dado como concluído quando não se verificasse qualquer decréscimo significativo da sua massa. Terminada a secagem, avaliavam-se as propriedades físicas nas maçãs secadas, repetindo, a avaliação da cor, determinação da humidade e avaliação da textura.

4. ANÁLISE E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

Neste capítulo apresentam-se todos os resultados obtidos nos ensaios de secagem. Na primeira parte apresentam-se os resultados dos ensaios preliminares, que comparam a eficiência do secador construído com uma estufa comercial, avaliando as propriedades físico-químicas das maçãs secadas (variedade *Golden Delicious*). Na segunda parte comparam-se os efeitos da secagem de duas variedades diferentes de maçãs, nomeadamente, a *Golden Delicious* e a *Granny Smith*, em ensaios de secagem efectuados exclusivamente no secador desenvolvido. Esta avaliação é feita através da análise das propriedades químicas e físicas das maçãs em fresco e após a secagem. Foi ainda avaliada a cinética de secagem, através de modelos empíricos e da lei de difusão de Fick.

4.1. ENSAIOS PRELIMINARES

De forma a avaliar as capacidades de secagem do secador montado, realizaram-se ensaios exploratórios de secagem, e em simultâneo com a secagem em estufa, de forma a obter um termo de comparação. Ambos os equipamentos promovem a secagem por convecção de ar quente, tendo sido realizados ensaios às temperaturas de 30°, 40°, 50° e 60°C. A variedade utilizada para este estudo inicial foi a maçã *Golden Delicious*.

Para verificar os efeitos da secagem realizaram-se análises químicas, como: a humidade, a acidez titulável e o teor em sólidos solúveis totais, avaliaram-se também parâmetros físicos, como a cor, e por fim fez-se também uma breve análise da cinética de secagem.

4.1.1. Análise das propriedades químicas e físicas

4.1.1.1. Humidade

A humidade final para as diferentes condições, em estado fresco e diferentes temperaturas de secagem, é ilustrada na Figura 18. Verifica-se que as amostras secadas no secador apresentam menores valores de humidade final. A temperatura para a qual a humidade é maior é os 30 °C, devido ao facto de que a esta temperatura é requerido um longo tempo de secagem. A redução da humidade varia entre 97-99 % para as maçãs secadas no secador e cerca de 96-98 % para as maçãs secadas em estufa, relativamente à humidade inicial, isto é, o decréscimo de humidade a partir da humidade das maçãs frescas, que era de 82,82 % (valor médio).

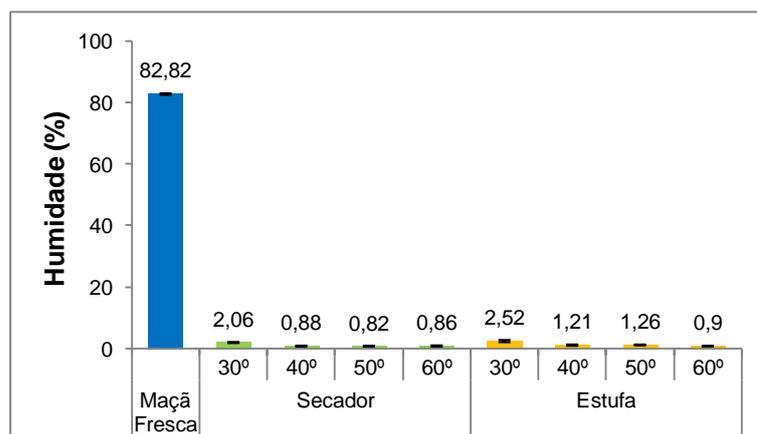


Figura 18. Teor de Humidade das maçãs em diferentes condições: estado fresco e diferentes temperaturas de secagem.

4.1.1.2. Acidez

A Figura 19 mostra a acidez das maçãs no estado fresco, que é de 2,65 mg de ácido málico/g de matéria seca. Considerando que esse valor corresponde à totalidade (100%) da acidez contida nas maçãs, é possível verificar que após a secagem para as diferentes temperaturas, e nos diferentes equipamentos, a acidez diminui consideravelmente. No caso das maçãs secadas no secador o decréscimo da acidez varia entre 39-52 % e para as maçãs secadas na estufa, o decréscimo varia entre 20-62 %. A acidez diminui em relação ao estado fresco por vaporização de alguns ácidos voláteis, como ácidos fenólicos.

Para as maçãs secadas em secador, a diminuição da acidez é feita de forma relativamente uniforme para todas as temperaturas testadas, sendo contudo para a temperatura de 60 °C que a maçã perde menos acidez. No que respeita às maçãs secadas na estufa, a diminuição da acidez é menor para as temperaturas de 30 e 60 °C. A temperaturas mais elevadas (60 °C) pode-se inferir que a diminuição da acidez é menor devido à secagem na superfície da maçã ser mais rápida, formando uma crosta na sua superfície, a qual funciona como barreira à evaporação dos componentes voláteis.

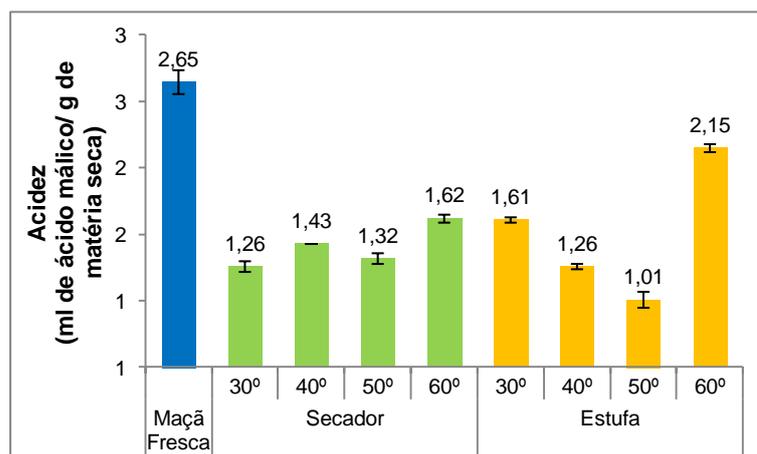


Figura 19. Acidez das maçãs em diferentes condições: estado fresco e diferentes secagens.

4.1.1.3. Sólidos Solúveis Totais

O teor de sólidos solúveis totais está representado na Figura 20, onde é expresso em g de sacarose/g matéria seca. As maçãs no estado fresco apresentam um conteúdo de 0,46 g/g m.s., que diminui com a secagem, sendo mais evidente para as temperaturas de 40 e 50 °C. Em ambos os equipamentos a perda de açúcares nas maçãs secadas é de aproximadamente 23 % (em média), sendo os dois equipamentos muito semelhantes no que respeita ao efeito sobre a degradação dos açúcares. No entanto, as maçãs secadas a 30 e 60 °C apresentam menor perda de açúcares, verificando-se esta situação em ambos os equipamentos. Esta diferença, no caso de baixas temperaturas (30 °C) deve-se ao facto da degradação dos açúcares por caramelização estar mais limitada. Por outro lado, para temperaturas de secagem mais elevadas (60 °C), a degradação dos açúcares também acaba por não ser tão elevada, embora haja possibilidade de ocorrer caramelização, mas neste caso como a secagem se processa muito rapidamente, esses mecanismos acabam por não ter tempo suficiente para ocorrer em grande extensão.

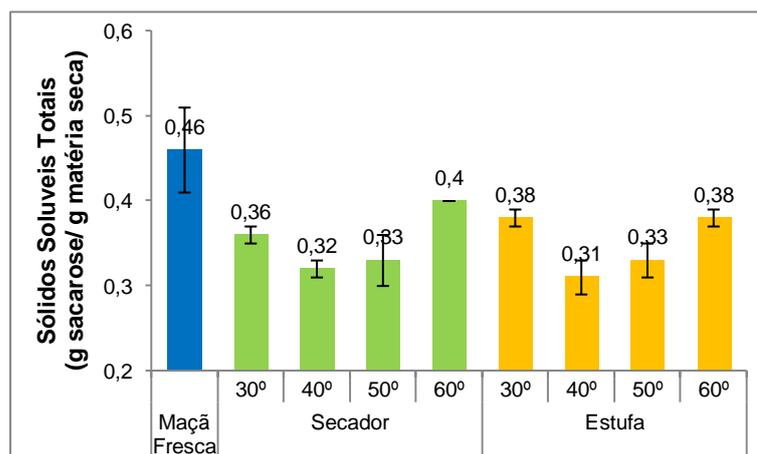


Figura 20. Teor de sólidos solúveis totais das maçãs em diferentes condições: estado fresco e diferentes secagens.

4.1.1.4. Cor

Aquando do processamento dos produtos alimentares, em regra geral, pretende-se que a cor do produto processado seja o mais semelhante possível à do produto fresco. Desta forma, a estabilidade dos compostos corantes nos alimentos durante o processamento e armazenamento é essencial para a atractividade e aceitabilidade do produto. A luminosidade, que varia desde preto (0) ao branco (100), para a polpa das maçãs apresenta-se na Figura 21. Verifica-se que, tanto para as maçãs secadas como no estado fresco, os valores estão compreendidos entre os 70 e os 80, o que indica que as maçãs são bastante claras. Contudo, a secagem provoca um escurecimento, comparativamente com as maçãs frescas, visível através do decréscimo do parâmetro L.

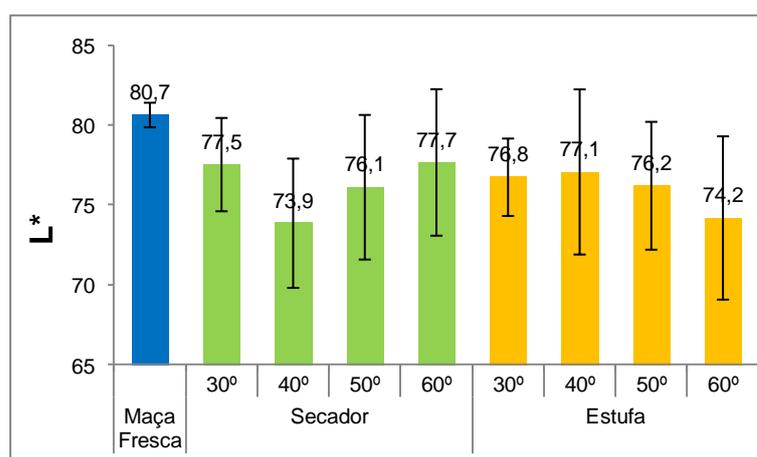


Figura 21. Avaliação da luminosidade (L*).

Os valores do parâmetro de cromaticidade a estão representados na Figura 22(a). Nas maçãs em fresco, os valores negativos de a indicam a predominância da cor verde ($a < 0$). Nas maçãs secadas, os valores de a são positivos, tanto na secagem em estufa como

em secador, indicando a predominância de coloração vermelha ($a > 0$). Ou seja, a secagem induz uma mudança na cor da zona do verde para o vermelho (acastanhamento). Para as maçãs secadas a temperaturas mais baixas a tonalidade vermelha aumenta de intensidade. Quando avaliados os resultados das secagens nos dois equipamentos, verifica-se que os resultados são efetivamente muito semelhantes.

A Figura 22(b) avalia o parâmetro b , em que se $b < 0$ predomina a cor azul e se $b > 0$ predomina a cor amarela. Verifica-se que o decréscimo da temperatura de secagem leva a um aumento da tonalidade amarela. Ainda assim os resultados são muito semelhantes para as diferentes secagens e, não variando também muito de equipamento para equipamento.

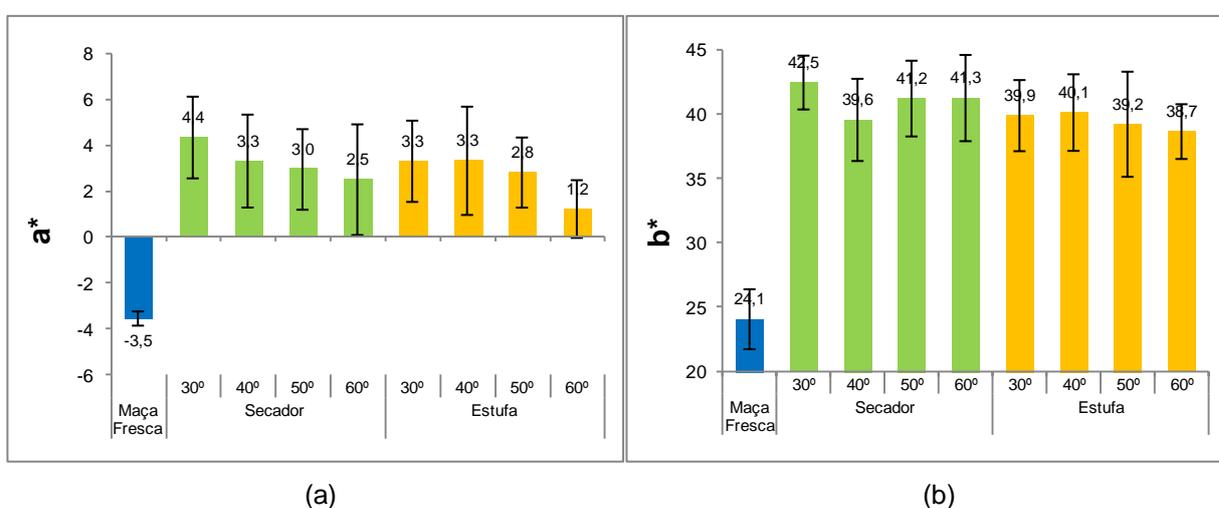


Figura 22. (a) Avaliação do parâmetro a^* (de verde (<0) a vermelho(>0)), (b) Avaliação do parâmetro b^* (de azul (<0) a amarelo(>0)).

4.1.1.5. Diferença total de cor

Na Figura 23, apresentam-se as diferenças de cor, para as maçãs secadas no secador e secadas na estufa, comparativamente ao estado fresco. As maçãs secadas na estufa são as que evidenciam ligeiramente uma menor diferença de cor, embora as variações sejam praticamente iguais nos dois sistemas. Seria de esperar um aumento da diferença de cor das maçãs com o aumento da temperatura de secagem, por intensificação dos fenómenos degradativos, algo que não se verificou. Efectivamente, como se disse anteriormente, o facto de a temperatura aumentar traduz-se simultaneamente por uma diminuição do tempo de secagem, o que leva a uma compensação de forma a obterem-se resultados semelhantes.

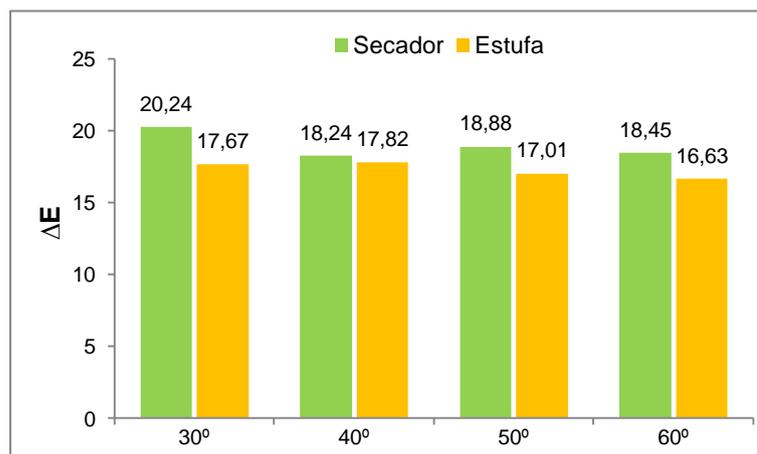


Figura 23. Diferença de cor comparativamente ao estado fresco das maçãs.

4.1.2. Análise da cinética de secagem

4.1.2.1. Curvas de secagem

A Figura 24 representa a evolução da humidade ao longo do tempo, para as maçãs secadas em estufa e para as maçãs secadas no secador. Como seria de esperar, verifica-se que a velocidade de secagem é maior para temperaturas de operação mais altas. Por exemplo, verifica-se que para a temperatura de 30°C, a secagem das maçãs demora cerca de 20 h, enquanto que a 60 °C demora aproximadamente 12 h. Na comparação da secagem das maçãs nos dois equipamentos, a estufa é o que apresenta maior velocidade na redução de humidade das amostras. No entanto a secagem das maçãs no secador é feita de uma forma mais regular, ou seja, demora o mesmo tempo que a secagem na estufa, mas o decréscimo da humidade é mais uniforme, não havendo um decréscimo brusco, como é evidente para as maçãs secadas a 60 °C na estufa.

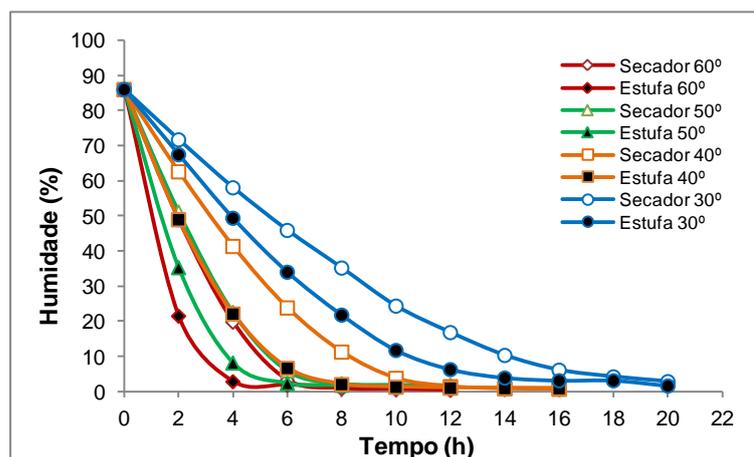


Figura 24. Decréscimo da humidade das maçãs, com a secagem nos dois equipamentos, e para diferentes temperaturas.

4.1.2.2. Ajuste ao modelo cinético de Page

A fim de melhorar o controlo desta operação, é importante dispor de modelos precisos para a previsão das curvas de secagem em diferentes condições. Neste caso para a modelização matemática usou-se apenas um modelo cinético, o de Page. A Figura 25(a) representa a razão da humidade (MR) ao longo do tempo de secagem na estufa, e para cada uma das temperaturas. A Figura 25(b) mostra a razão da humidade, nas maçãs que foram secadas no secador. Como pode ser observado, o aumento da temperatura de secagem causou um aumento importante na taxa de secagem, verificando-se uma diminuição do tempo de secagem. As curvas demonstraram um comportamento de difusão controlado ao longo das secagens.

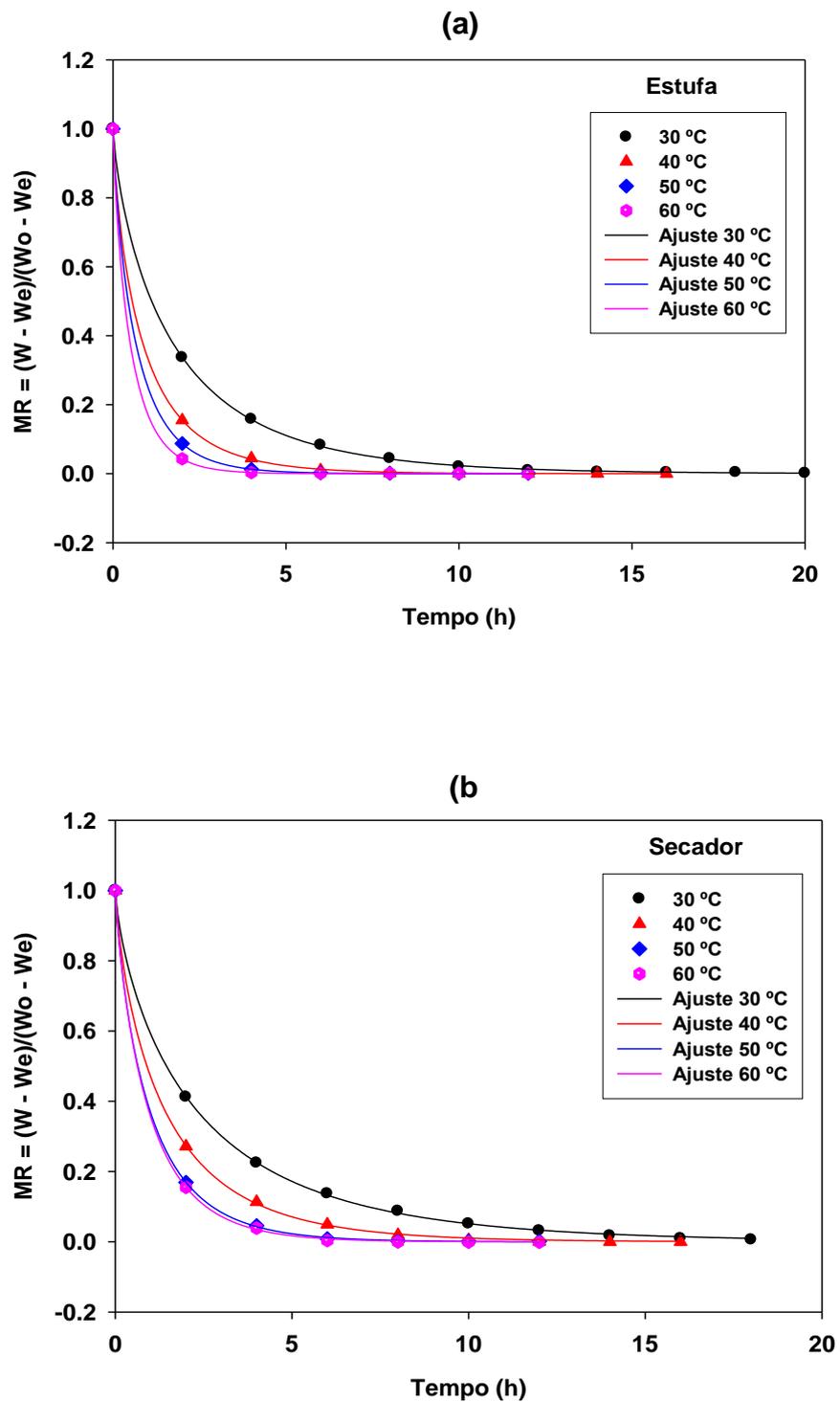


Figura 25. Ajuste ao modelo Page para os pontos experimentais da variedade Golden, seca em Estufa (a) e Secador (b).

Para o referido modelo, os parâmetros k , n e R resultantes do ajuste feito aos dados experimentais com o software sigma Plot são mostrados na Tabela 2, sendo k e n os

parâmetros do modelo e R o coeficiente de correlação. Como se pode verificar, para os ensaios no secador o valor de R varia entre 0,99993 e 0,99997, enquanto que para a estufa o R varia entre 0,99997 e 1,00000. Em todos os casos os ajustes são francamente bons, dado os elevados valores de R . No que respeita o parâmetro n , varia entre 0,7524 e 0,8490 na secagem em secador, e entre 0,7713 e 0,8455 na estufa. O valor de k no secador varia entre 0,5243 e 1,0328 e na estufa varia entre 0,6356 e 1,7493.

Tabela 2. Resultados do ajuste ao Modelo Page.

		k	n	R
Secador	30 °C	0,5243	0,7524	0,99993
	40 °C	0,7550	0,7785	0,99994
	50 °C	1,0017	0,8238	0,99999
	60 °C	1,0328	0,8490	0,99997
Estufa	30 °C	0,6356	0,7713	0,99997
	40 °C	1,0894	0,7723	0,99998
	50 °C	1,3705	0,8302	1,00000
	60 °C	1,7493	0,8455	1,00000

4.2. ENSAIOS FINAIS

Nos ensaios finais faz-se a comparação entre duas variedades de maçãs, nomeadamente *Golden Delicious* e *Granny Smith*. Estes ensaios seguiram essencialmente os mesmos procedimentos dos ensaios preliminares, com realização de análises químicas e a avaliação de parâmetros físicos, para as temperaturas de 30, 40, 50 e 60 °C. Porém, neste caso acresce a avaliação da textura, que não foi realizada nos ensaios preliminares. Importa ainda referir que também no caso do estudo cinético, nestes ensaios finais o mesmo foi mais detalhado do que o feito nos ensaios preliminares.

4.2.1. Análise das propriedades químicas e físicas

4.2.1.1. Humidade

A Figura 26 apresenta os resultados das determinações da humidade, e pode verificar-se que as maçãs *Granny Smith* apresentam maior teor de humidade no estado fresco, 84,30 %, que as maçãs *Golden Delicious*, 81,75 %. Segundo Picouet *et al.* (2009), a humidade das maçãs da variedade *Granny Smith* em fresco é de 88,1 %. Assim, como as usadas neste trabalho têm um valor mais baixo, pode eventualmente isso dever-se a um diferente estado de maturação. Da observação do gráfico verifica-se ainda que para temperaturas de secagem mais elevadas o decréscimo no teor de humidade final das maçãs

é apenas ligeiramente maior para ambas as variedades. A redução da humidade variou entre 97-99 %, dependendo da variedade e da temperatura de secagem. No entanto, é evidente que a variedade que perdeu mais água é a *Granny Smith*, uma vez que apresenta valores de humidade iniciais mais elevados e finais mais baixos.

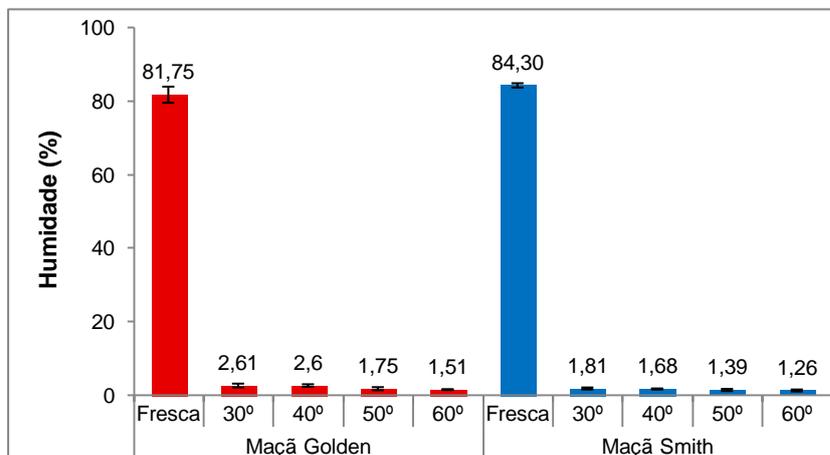


Figura 26. Teor de humidade nas diferentes variedades de maçã em diferentes condições: estado fresco e diferentes temperaturas de secagens.

4.2.1.2. Acidez

A Figura 27 mostra os valores da acidez das maçãs para as diferentes temperaturas de secagem. Como esperado, as maçãs da variedade *Granny Smith* foram as que apresentaram maior teor de acidez. Efectivamente, esta maçã tem um sabor mais ácido, facilmente identificado ao mastigá-la. Para as maçãs no estado fresco a acidez é de 2,65 e 5,37 mg de ácido málico/g de matéria seca, para as maçãs da variedade *Golden* e *Smith* respectivamente. Picouet *et al.* (2009), refere que o puré de maçã da variedade *Smith* apresenta um valor de 8,2 g de ácido málico/Kg. No que respeita à secagem, verifica-se que para as maçãs da variedade *Golden* a acidez diminui mais drasticamente para as temperaturas mais baixas do que para as mais elevadas, o que se pode dever, como já referido aquando dos ensaios preliminares, ao efeito da velocidade de secagem. No caso das maçãs da variedade *Smith*, não se verifica um padrão regular, sendo a acidez menor para as temperaturas de 40 °C e 60 °C, atingindo 2,94 e 2,80 mg de ácido málico/g matéria seca, respectivamente. Assim, pode concluir-se que de uma forma geral a secagem provoca uma diminuição da acidez, devido à vaporização dos ácidos voláteis, que no presente caso foi da ordem dos 30 a 50 %, relativamente ao estado fresco. Por outro lado, não foi possível estabelecer um padrão entre o efeito da temperatura de secagem e a perda de compostos que contribuem para a acidez.

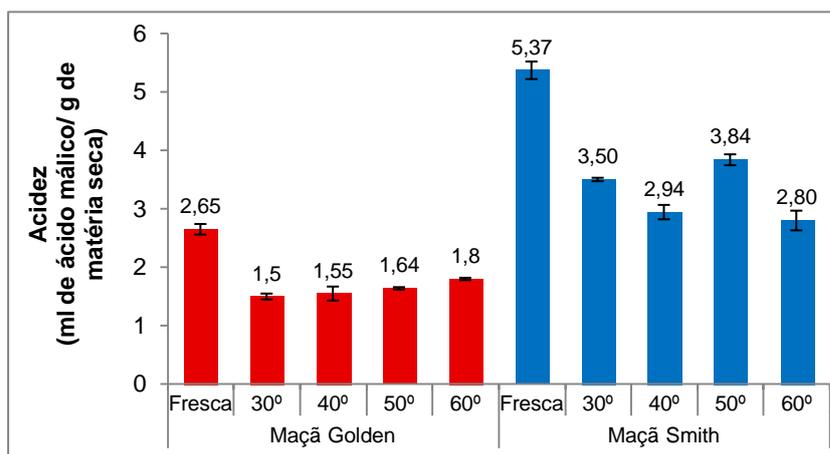


Figura 27. Acidez titulável nas diferentes variedades de maçã em diferentes condições: estado fresco e diferentes temperaturas de secagem.

4.2.1.3. Teor de Sólidos Solúveis Totais

Na Figura 28 está representado o teor de sólidos solúveis totais para ambas as variedades de maçã. Nas maçãs frescas, o teor de sólidos solúveis totais é de 0,55 para a variedade *Golden* e 0,65 para a variedade *Smith*, expresso em g de sacarose/g de matéria seca. Quando se analisam as maçãs secadas, a variedade *Golden Delicious* apresenta um teor de sólidos solúveis totais mais elevado para as temperaturas de 40 e 60 °C, enquanto que para a variedade *Granny Smith* isso se verifica para as temperaturas de 30 e 60 °C. O facto da diminuição dos sólidos solúveis totais ser menor para a temperatura mais elevada, 60 °C, ocorrência verificada para ambas as variedades de maçãs, pode também dever-se à elevada velocidade de secagem, e portanto ao menos tempo disponível para ocorrerem reacções de degradação dos açúcares, como a caramelização. Por outro lado, as reacções de Maillard, em que intervêm os açúcares e os amino-ácidos das proteínas, ficam inibidas para temperaturas elevadas.

A diminuição dos açúcares, tendo por base o conteúdo no estado fresco, variou entre 31-45 % para as maçãs da variedade *Golden Delicious*, e entre 40-50 % para as maçãs da variedade *Granny Smith*.

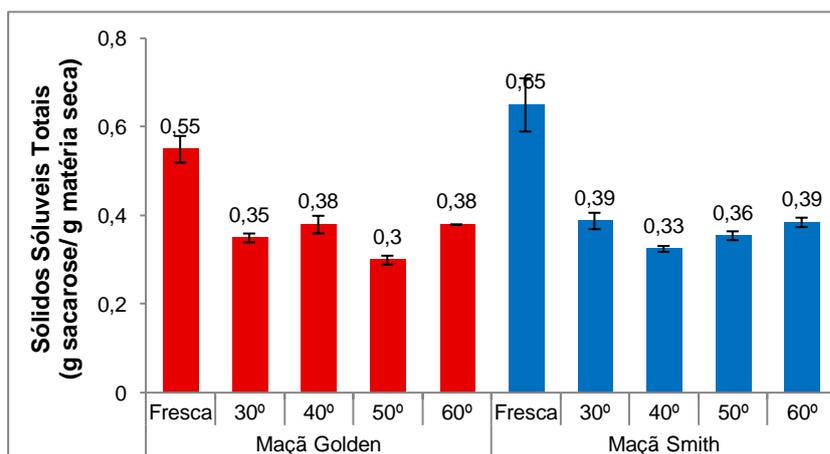


Figura 28. Teor de sólidos solúveis totais nas diferentes variedades de maçã em diferentes condições: estado fresco e diferentes temperaturas de secagem.

4.2.1.4. Cor

Na Figura 29 mostram-se os valores da Luminosidade (L^*) para ambas as variedades de maçã estudadas. Comparando as duas variedades, as maçãs *Granny Smith* são as que evidenciam uma cor mais clara, com $L^* = 79,1$ quando comparado com $L^* = 78,2$, verificado para a variedade *Golden*. Na variedade *Golden*, a perda de luminosidade é evidente ao longo das secagens, sendo as maçãs secadas a 60 °C as que apresentam um menor valor de L^* ($= 68,5$). Na variedade *Smith* a temperatura que apresenta um L^* menor é a de 40 °C, e não se verifica um padrão regular em termos do efeito da temperatura sobre este atributo da cor. A redução de luminosidade para ambas as variedades ronda os 12-13 %, relativamente ao estado fresco, e deve-se ao desenvolvimento de compostos corados durante a secagem, resultando no acastanhamento.

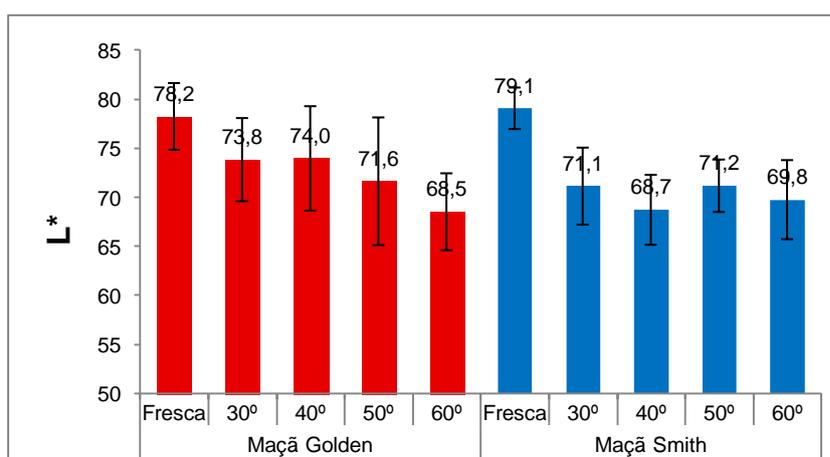


Figura 29. Avaliação da luminosidade (L^*).

Na Figura 30(a) apresentam-se os valores do parâmetro de cromaticidade a . Neste caso, verifica-se que as maçãs no estado fresco, e em ambas as variedades, apresentam

valores negativos desta coordenada de cor, isto é, para a variedade *Golden* $a^* = -4,5$ e para a variedade *Smith*, $a^* = -4,4$, ou seja, predomina a coloração verde ($a < 0$). Para ambas as variedades, e para as diferentes temperaturas de secagem, os valores de a são positivos, o que indica tonalidade próxima do vermelho ($a > 0$), resultante também do desenvolvimento do acastanhamento. Relativamente às duas variedades, as maçãs da variedade *Golden Delicious* são as que evidenciam maior intensidade da tonalidade vermelha, principalmente para as temperaturas de 30 e 60°C, com 5,8 e 8,3 respectivamente. No entanto, as maçãs *Golden* secadas à temperatura de 40 °C são as que apresentam uma menor tonalidade vermelha, com $a^* = 3,5$. Contudo as maçãs da variedade *Granny Smith* são as que apresentam a cor mais uniforme para todas as temperaturas de secagem.

Na Figura 30(b) apresentam-se os valores do parâmetro b , para as duas variedades de maçãs, e em diferentes condições. Este parâmetro apresenta sempre valores positivos ou seja, a tonalidade das maçãs situa-se na zona do amarelo ($b > 0$) e não do azul ($b < 0$). No entanto as maçãs no estado fresco apresentam uma menor tonalidade amarela, com $b^* = 23,0$ e $b^* = 18,0$, para as maçãs da *Golden* e *Smith*, respectivamente. Esta intensificação do amarelo com a secagem é também indicadora do acastanhamento. Em termos comparativos, as maçãs da variedade *Golden Delicious* são as que apresentam maior intensidade da cor amarela, comparativamente a variedade *Granny Smith*, estando os valores de b^* compreendidos entre 40,1 - 42,1 e a variedade *Smith* compreende os valores de b^* entre 34,6 - 37,5.

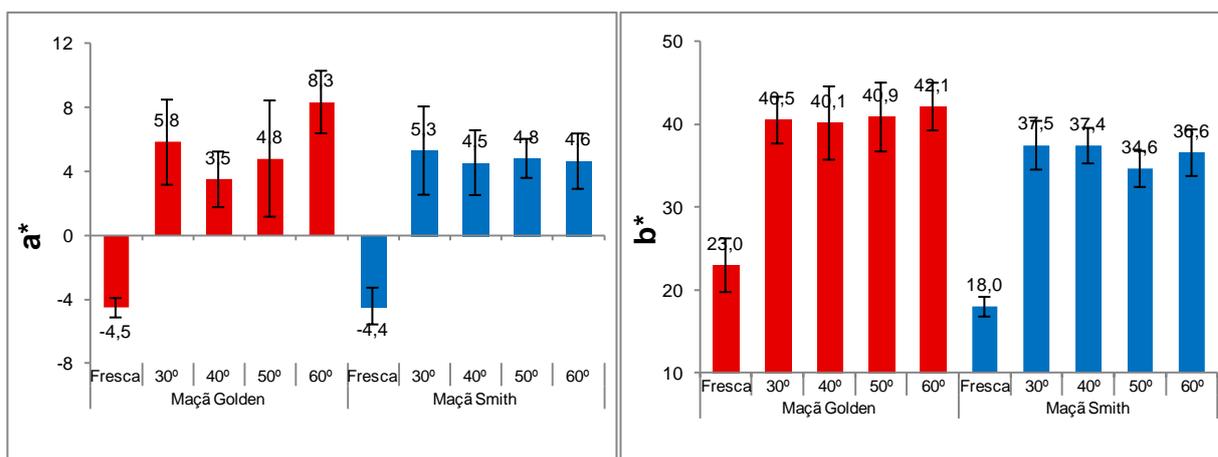


Figura 30. (a) Avaliação do parâmetro a^* (de verde (<0) a vermelho (>0)), (b) Avaliação do parâmetro b^* (de azul (<0) a amarelo (>0)).

4.2.1.5. Diferença total de cor

A diferença de cor, avaliada segundo a Equação (18) é representada na Figura 31. É possível verificar que a diferença de cor das maçãs no final da secagem às diferentes

temperaturas é sempre elevada, resultante do escurecimento e intensificação das tonalidades vermelha e amarela. No entanto, e apesar de à partida se pensar que com o aumento da temperatura aumentasse também a diferença de cor, tal não se veio a verificar, pelo que a temperatura de secagem não influencia o grau de mudança de cor. A explicação para esta constatação pode residir no facto de que com o aumento da temperatura de secagem verifica-se uma consequente diminuição do tempo de processamento, o que leva a que as maçãs estejam expostas ao ar quente durante um período mais curto. Vega-Gálvez *et al.* (na) observou que para a secagem de maçãs *Granny Smith* a 60 °C, a mudança de cor em relação ao produto fresco era menor que no caso de secagem a 40 °C, devendo-se isto ao facto de que a 60 °C o tempo de secagem ter sido menor, muito embora envolvesse mais calor.

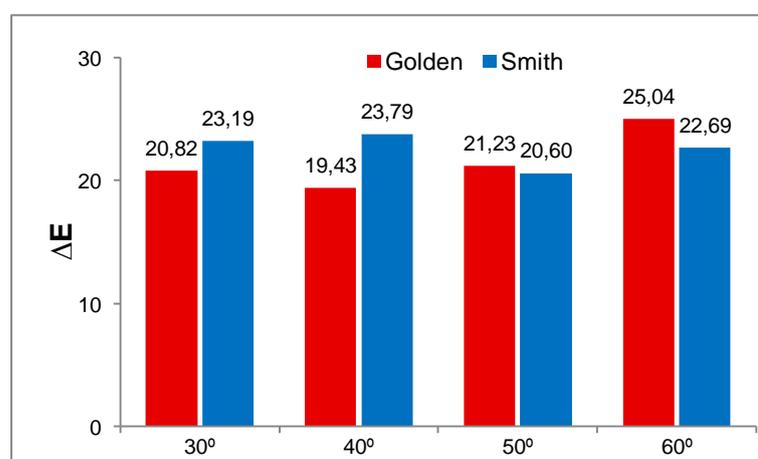


Figura 31. Diferença de cor das duas variedades em relação ao estado fresco.

4.2.1.6. Textura

A textura é um aspecto importante no que respeita à qualidade dos alimentos, e pode ser definida como uma "manifestação sensorial e funcional das propriedades estruturais, mecânicas e da superfície dos alimentos, detectada através dos sentidos da visão, audição, tacto e cinestésico" (Szczeniak, 2002). Os tratamentos térmicos afectam a textura dos alimentos, em atributos tais como, por exemplo, a dureza. O impacto térmico provoca rompimento das membranas celulares, o que leva à perda da água (Greve *et al.*, 1994), resultando num encolhimento. Por outro lado, os açúcares ficam mais concentrados e, conseqüentemente, desenvolve-se uma estrutura mais semelhante à "borracha", isto é mais elástica.

A dureza é um dos atributos de textura e representa a força necessária para comprimir um alimento entre os dentes ou entre a língua e a boca, e em termos de análise corresponde à força necessária para originar uma deformação. Na Figura 32 mostram-se os

valores da dureza das maçãs, em fresco e para as amostras resultantes das diferentes temperaturas de secagem. Verifica-se que as maçãs em fresco apresentam uma maior dureza relativamente ao estado seco. Quer isto dizer que a secagem não foi extrema, isto é não desenvolveu caramelização extensa. No que respeita às maçãs secadas, verifica-se uma maior dureza para a temperatura de 60 °C, muito embora no caso da variedade *Smith* o resultado ser muito idêntico ao de 30 °C. A 40 °C, verifica-se em ambos os casos o menor valor, indicando que as maçãs secadas a esta temperatura, que corresponde a um processo suave e não demasiado longo (como acontece por exemplo a 30 °C) se apresentam mais macias. Por outro lado, caso se deseje um produto mais estaladiço deve aumentar-se a temperatura de secagem, pois dessa forma aumentam-se os fenómenos de caramelização, aumentando a dureza. A redução da dureza com a secagem para ambas as variedades, relativamente ao estado fresco varia entre 75 e 85 %.

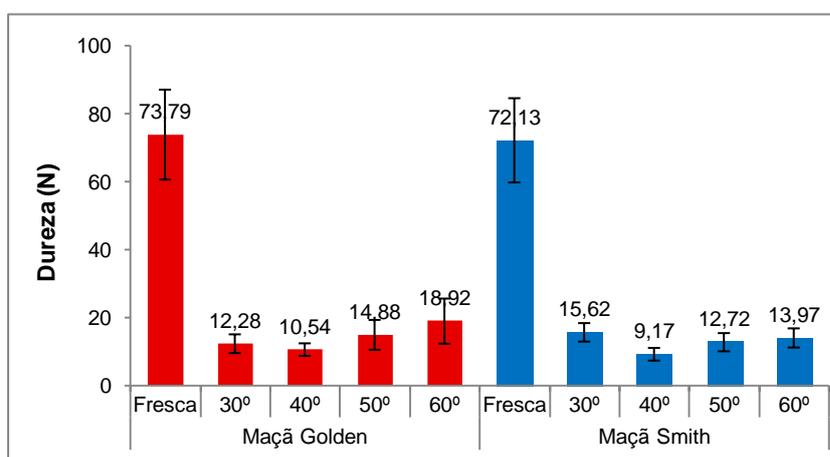


Figura 32. Avaliação da dureza duas variedades de maçãs, Golden e Smith em diferentes condições: estado fresco e diferentes secagens.

A Figura 33 apresenta a elasticidade das maçãs, que é a capacidade de recuperar a forma após uma compressão. Este parâmetro mede a velocidade de retorno ao estado inicial após a remoção da força que originou a deformação. Verifica-se da Figura 33 que a elasticidade das maçãs apresenta alguma variabilidade em ambas as variedades de maçãs, No caso da variedade *Golden*, em termos genéricos, a elasticidade aumenta com a secagem, embora não se encontre um padrão de variação com a temperatura. No caso da variedade *Smith*, só na secagem a 50 °C se verificou um aumento em relação à fresca, sendo que nos restantes casos não parece haver alterações relevantes. Com a secagem, as as maçãs da variedade *Golden* aumentam a sua elasticidade entre 1-9 %. Contrariamente, nas maçãs da variedade *Smith*, a secagem diminui a elasticidade, cerca de 1-2 %, excepto para a temperatura de 50°C, em que a elasticidade, em relação à fresca, aumenta cerca de 4 %.

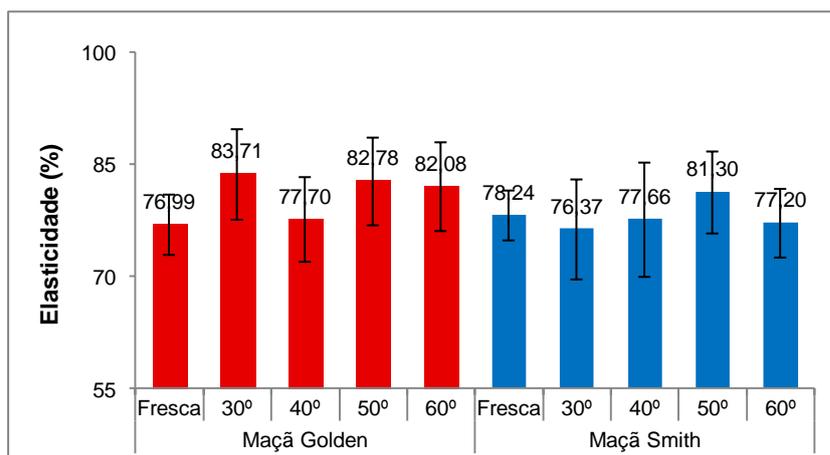


Figura 33. Avaliação da elasticidade das duas variedades de maçãs, Golden e Smith em diferentes condições: estado fresco e diferentes secagens.

No que respeita à coesividade, Figura 34, que representa as forças internas no alimento, e que mantêm a amostra coesa, verifica-se que para ambas as variedades, as maçãs frescas são as que apresentam maior coesão, com 0,81 para as *Golden* e 0,88 para as *Smith*. De um modo geral, a coesividade diminui com a secagem, levando à perda da integridade estrutural, devido à perda de água por evaporação. Comparando as duas variedades de maçãs, as *Golden Delicious* evidenciam maior coesão depois de secadas. Isto pressupõe que as alterações estruturais são mais intensas no caso da variedade *Smith*, levando à perda de integridade dos tecidos.

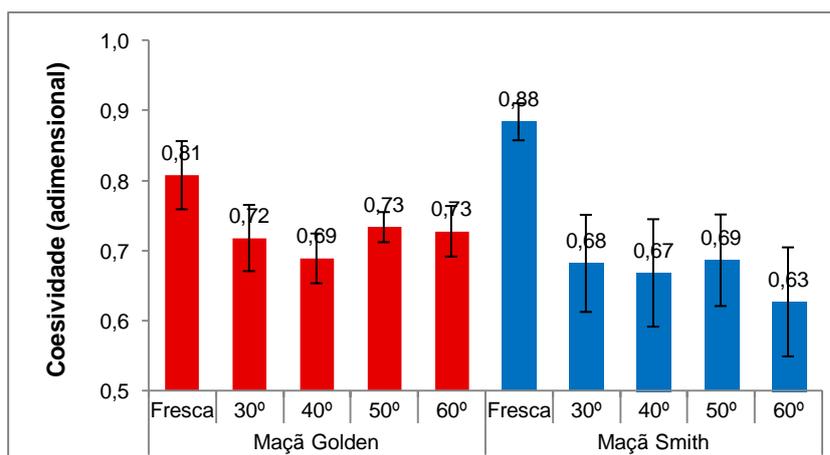


Figura 34. Avaliação da coesividade das duas variedades de maçãs, Golden e Smith em diferentes condições: estado fresco e diferentes secagens.

A mastigabilidade mede a energia necessária para desintegrar um alimento ao ponto de ser engolido. Na Figura 35, as maçãs no estado fresco apresentam uma maior

mastigabilidade, ou seja, é necessário fornecer mais energia para as desintegrar. Nas maçãs secadas, as maçãs da variedade *Golden Delicious* são as que necessitam de maior energia para se desintegrarem. Com a secagem, a força que é preciso aplicar para as desintegrar é menor, pois há um decréscimo entre 75 – 90 %, relativamente ao estado fresco. Isto acontece porque com a secagem há alterações ao nível das paredes celulares e saída de uma grande quantidade de água, o que altera profundamente a estrutura e portanto a intensidade das forças internas é bastante diminuída.

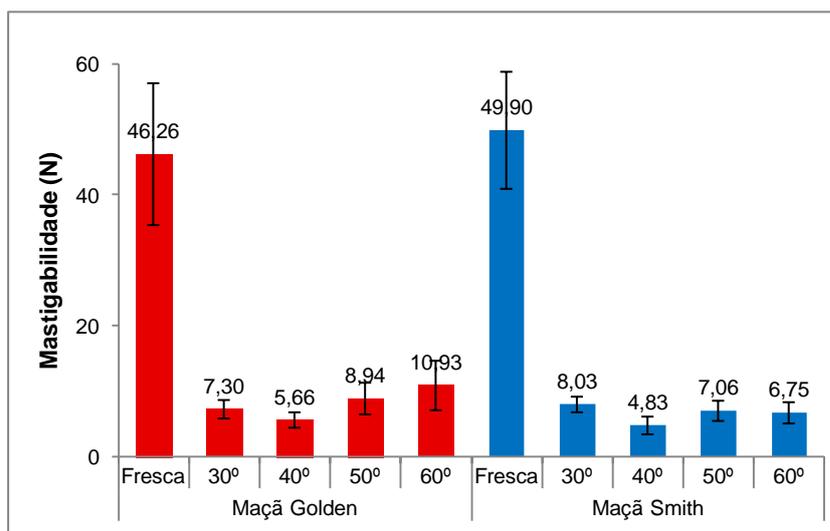


Figura 35. Avaliação da mastigabilidade das duas variedades de maçãs, Golden e Smith em diferentes condições: estado fresco e diferentes secagens.

Os resultados que se obtiveram relativamente à adesividade revelaram que este produto alimentar não apresenta adesividade mensurável, uma vez que os valores obtidos em todos os casos foram muito próximos de zero.

4.2.2. Análise da cinética de secagem

4.2.2.1. Curvas de secagem

A Figura 36 apresenta o decréscimo da humidade ao longo dos ensaios de secagem, para cada uma das variedades, e às diferentes temperaturas. Verifica-se que o tempo de secagem aumenta com o decréscimo da temperatura de secagem, como esperado. Ao comparar a secagem das duas variedades, verifica-se que para as temperaturas de 40 e 50 °C, a variedade *Golden Delicious* apresenta uma maior velocidade de secagem, comparativamente com a variedade *Granny Smith*. Já para as restantes temperaturas, o comportamento de ambas as variedades é similar. As maçãs da variedade *Smith* apresentam um tempo de secagem de 21, 15, 13 e 8 h para as temperaturas de 30,

40, 50 e 60 °C, respectivamente, enquanto as maçãs da variedade *Golden*, para as temperaturas de 30, 40, 50 e 60 °C, têm tempos de secagem de 17, 13, 9 e 7 h, respectivamente.

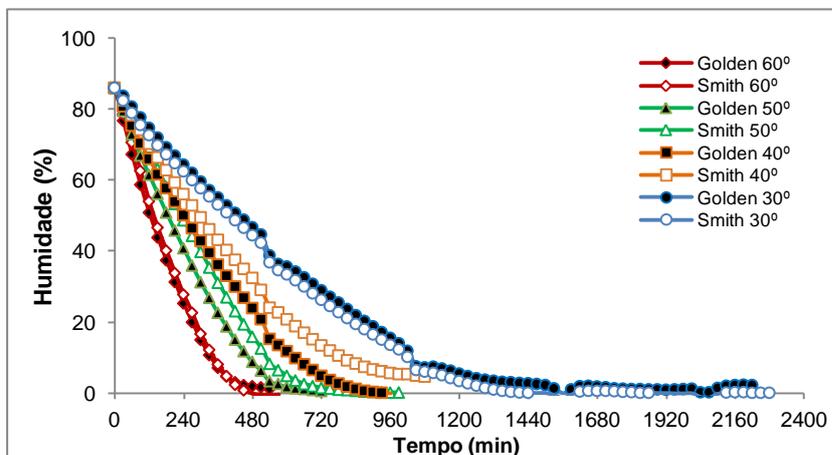


Figura 36. Variação da umidade ao longo do tempo para cada uma das variedades: Golden e Smith.

4.2.2.2. Ajuste aos modelos empíricos de secagem

Os dados da cinética de secagem foram obtidos para as quatro temperaturas em estudo (30, 40, 50 e 60°C) e os resultados ajustados aos quatro modelos de camada fina, cujas equações estão representadas na Tabela 1. Este ajustamento foi feito usando o software Sigma Plot V8.0 (SPSS, inc), sendo que os resultados se apresentam nas Tabelas 3, 4, 5 e 6. Nas Tabelas 3 a 6 são apresentados os valores dos parâmetros de cada modelo com o respectivo desvio-padrão, sendo apresentado também o número de observações (N), o coeficiente de correlação (R), o erro padrão de estimativa (EPE), bem como o F-teste, e o P-valor.

As Tabelas 3, 4 e 5 correspondem aos modelos Page, Henderson & Pabis e logarítmico, respectivamente. Em todos estes casos se verificam valores dos parâmetros que indicam a qualidade do ajuste. Na , constam valores de R a variar entre 0,9989-0,9997 para a variedade *Golden* e 0,9989-0,9998 para a variedade *Smith*, e o EPE varia entre 0,0058-0,0090 para a variedade *Golden* e entre 0,0057-0,0085 para a variedade *Smith*. Os valores do F-teste para este modelo foram bastante elevados, entre 19457-37951, que indicam que o ajuste foi bom para descrever o perfil da razão de umidade ao longo do tempo para a secagem destas maçãs para a faixa de temperatura estudada.

Tabela 3. Resultados do ajuste ao modelo de Page.

Variedade Golden				
	30 °C	40 °C	50 °C	60 °C
Parâmetros				
<i>k</i> (\pm std. error)	0,0006 (\pm 0,0001)	0,0017 (\pm 0,0002)	0,0016 (\pm 0,0002)	0,0023 (\pm 0,0002)
<i>n</i> (\pm std. error)	0,7872 (\pm 0,0082)	0,7305 (\pm 0,0104)	0,7552 (\pm 0,0104)	0,7486 (\pm 0,0103)
Estatística*				
<i>N</i>	75	33	25	19
<i>R</i>	0,9989	0,9992	0,9995	0,9997
<i>EPE</i>	0,0090	0,0090	0,0075	0,0058
ANOVA**				
<i>F-test</i>	34606	19457	24307	33063
<i>P-value</i>	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001
Variedade Smith				
	30 °C	40 °C	50 °C	60 °C
Parâmetros				
<i>k</i> (\pm std. error)	0,0014 (\pm 0,0001)	0,0009 (\pm 0,0085)	0,0002 (\pm 0,0000)	0,0011 (\pm 0,0001)
<i>n</i> (\pm std. error)	0,7184 (\pm 0,0073)	0,7745 (\pm 0,0087)	0,9600 (\pm 0,0128)	0,8211 (\pm 0,0101)
Estatística*				
<i>N</i>	77	37	33	20
<i>R</i>	0,9989	0,9994	0,9994	0,9998
<i>EPE</i>	0,0085	0,0081	0,0084	0,0057
ANOVA				
<i>F-test</i>	34397	28367	27275	37951
<i>P-value</i>	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001

*N = número de observações, R = coeficiente de correlação, ESE = Erro Standard da Estimativa

A Tabela 4, que apresenta os valores do ajustamento ao modelo Henderson & Pabis, e verifica-se que o R para a variedade *Golden* varia entre 0,9900-0,9939, e para a variedade *Smith* varia entre 0,9909-0,9992. Os valores de EPE variam entre 0,0216-0,0318 e entre 0,0096-0,0269 para a variedade *Golden* e *Smith* respectivamente. Os valores de F-teste variam entre 1350-21192, sendo também elevados.

A Tabela 5, que apresenta o ajustamento ao modelo logarítmico, apresenta valores de R entre 0,9920-0,9954 e entre 0,9907-0,9993 para as variedades *Golden* e *Smith* respectivamente. Os valores de ESPE variam entre 0,0205-0,0289 e entre 0,0095-0,0251 e os valores de F-teste variam entre 860-10731.

Tabela 4. Resultados do ajuste ao modelo Henderson & Pabis Model.

	Variedade Golden			
	30 °C	40 °C	50 °C	60 °C
Parâmetros				
<i>a</i> (\pm std. error)	0,9164 (\pm 0,0139)	0,9118 (\pm 0,0250)	0,9351 (\pm 0,0248)	0,9599 (\pm 0,0264)
<i>k</i> (\pm std. error)	0,0001 (\pm 0,0000)	0,0001 (\pm 0,0000)	0,0002 (\pm 0,0000)	0,0003 (\pm 0,0000)
Estatística*				
<i>N</i>	75	33	25	19
<i>R</i>	0,9939	0,9900	0,9927	0,9938
<i>EPE</i>	0,0216	0,0318	0,0293	0,0287
ANOVA				
<i>F-test</i>	5961	1529	1550	1350
<i>P-value</i>	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001
	Variedade Smith			
	30 °C	40 °C	50 °C	60 °C
Parâmetros				
<i>a</i> (\pm std. error)	0,8700 (\pm 0,0168)	0,9243 (\pm 0,0197)	0,9958 (\pm 0,0075)	0,9664 (\pm 0,0187)
<i>k</i> (\pm std. error)	0,0001 (\pm 0,0000)	0,0001 (\pm 0,0000)	0,0001 (\pm 0,0000)	0,0002 (\pm 0,0000)
Estatística*				
<i>N</i>	77	37	33	20
<i>R</i>	0,9901	0,9931	0,9992	0,9968
<i>EPE</i>	0,0256	0,0269	0,0096	0,0207
ANOVA				
<i>F-test</i>	3746	2502	21192	2837
<i>P-value</i>	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001

*N = número de observações, R = coeficiente de correlação, ESE = Erro Standard da Estimativa

Tabela 5. Resultados do ajuste ao modelo logarítmico.

	Variedade Golden			
	30 °C	40 °C	50 °C	60 °C
Parâmetros				
<i>a</i> (\pm std. error)	0,9171 (\pm 0,0135)	0,9105 (\pm 0,0235)	0,9309 (\pm 0,0236)	0,9517 (\pm 0,0243)
<i>c</i> (\pm std. error)	0,0094 (\pm 0,0030)	0,0202 (\pm 0,0068)	0,0179 (\pm 0,0074)	0,0189 (\pm 0,0076)
<i>k</i> (\pm std. error)	0,0001 (\pm 0,0000)	0,0001 (\pm 0,0000)	0,0002 (\pm 0,0000)	0,0003 (\pm 0,0000)
Estatística*				
<i>N</i>	75	33	25	19
<i>R</i>	0,9946	0,9920	0,9941	0,9954
<i>EPE</i>	0,0205	0,0289	0,0270	0,0255
ANOVA				
<i>F-test</i>	3311	931	918	860
<i>P-value</i>	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001
	Variedade Smith			
	30 °C	40 °C	50 °C	60 °C
Parâmetros				
<i>a</i> (\pm std. error)	0,8711 (\pm 0,0167)	0,9224 (\pm 0,0169)	0,9949 (\pm 0,0076)	0,9616 (\pm 0,0181)
<i>c</i> (\pm std. error)	0,0076 (\pm 0,0036)	0,0234 (\pm 0,0051)	0,0027 (\pm 0,0023)	0,0111 (\pm 0,0060)
<i>k</i> (\pm std. error)	0,0001 (\pm 0,0000)	0,0001 (\pm 0,0000)	0,0001 (\pm 0,0000)	0,0002 (\pm 0,0000)
Estatística*				
<i>N</i>	77	37	33	20
<i>R</i>	0,9907	0,9955	0,9993	0,9973
<i>EPE</i>	0,0251	0,0221	0,0095	0,0196
ANOVA				
<i>F-test</i>	1953	1871	10731	1594
<i>P-value</i>	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001

*N = número de observações, R = coeficiente de correlação, ESE = Erro Standard da Estimativa

A Tabela 6, mostra o ajuste ao modelo Vega-Lemus, mas neste caso os valores de R são relativamente inferiores aos dos modelos anteriormente apresentados, variando entre 0,8745-0,9132 para a variedade *Golden* e entre 0,8584-0,9276 para a variedade *Smith*. O EPE varia entre 0,0936-0,1152 e entre 0,0857-0,1085 para as variedades *Golden* e *Smith* respectivamente. Verifica-se, assim, que este modelo não é o mais adequado para descrever a cinética de secagem.

Tabela 6. Resultados do ajuste ao modelo Vega-Lemus.

		Variedade Golden			
		30 °C	40 °C	50 °C	60 °C
Parâmetros					
a (±std. error)		0,7241 (±0,0206)	0,7863 (±0,0275)	0,8052 (±0,0319)	0,8040 (±0,0418)
k (±std. error)		0,0000 (±0,0000)	0,0000 (±0,0000)	0,0000 (±0,0000)	0,0000 (±0,0000)
Estatística*					
N		75	33	25	19
R		0,8745	0,9099	0,9132	0,8941
EPE		0,0954	0,0936	0,0988	0,1152
ANOVA					
F-test		237	149	115	68
P-value		<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001
		Variedade Smith			
		30 °C	40 °C	50 °C	60 °C
Parâmetros					
a (±std. error)		0,6888 (±0,0209)	0,8109 (±0,0231)	0,8150 (±0,0280)	0,8182 (±0,0379)
k (±std. error)		0,0000 (±0,0000)	0,0000 (±0,0000)	0,0000 (±0,0000)	0,0000 (±0,0000)
Estatística*					
N		77	37	33	20
R		0,8584	0,9276	0,9130	0,9095
EPE		0,0938	0,0857	0,1007	0,1085
ANOVA					
F-test		210	216	160	86
P-value		<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001

*N = número de observações, R = coeficiente de correlação, ESE = Erro Standard da Estimativa

Como se pode verificar, através da análise das Tabelas 3 a 6, o modelo de Page é o que descreve melhor a cinética de secagem, muito embora o modelo de Henderson & Pabis e o modelo logarítmico também sejam aceitáveis. Considerando então o modelo de Page, a Figura 37 representa a variação da humidade (em base seca) ao longo do tempo, para as diferentes temperaturas, e para ambas as variedades. A Figura 37(a) mostra a variação da humidade para a variedade *Golden Delicious*, sendo evidente que o aumento da temperatura diminui o tempo de secagem. Assim, a secagem a 30 °C demora cerca de 17 h, a secagem a 40 °C necessita de 13 h, a 50 °C a secagem decorre em 9 h e demora 7 h se a secagem for a 60 °C. A Figura 37(b) representa a variação da humidade ao longo da

secagem para a variedade *Granny Smith*. Para esta variedade, a secagem demora 21 h para a temperatura de 30 °C, 15 h para 40 °C, 13 h para 50 °C e cerca de 8 h para a temperatura de 60 °C. Pelas formas das curvas nos gráficos da Figura 37, fica evidente como decorre o processo de secagem, vendo-se que a taxa de secagem diminuir ao longo do tempo, o que pode ser confirmado pela obtenção das curvas de secagem em que forma de uma curva dW/dt versus tempo (curvas não representadas).

A ausência de um período de taxa de secagem constante tem sido citada em muitos casos, em que só se vê o período de velocidade decrescente (Efremov, 2002; Guiné *et al.*, 2007; Togrul e Pehilvan, 2003). Este período de velocidade decrescente apresenta duas fases, a primeira que corresponde ao período em que existe uma maior remoção de água, durante a secagem, originando uma superfície continuamente mais seca. A segunda fase é quando a transferência de calor e humidade é mais demorada, e nesta fase a taxa de secagem tende a zero no final do processo, uma vez que a remoção da água vai-se tornando-se insignificante.

Pode referir-se ainda que há uma economia de tempo de 35 % para a variedade *Golden* e uma economia de tempo de 38 % para a variedade *Smith*, quando se aumenta a temperatura de 30 °C para 60 °C, podendo este factor ser de grande importância para a secagem industrial.

A Figura 38 apresenta os pontos experimentais (MR, t) obtidos para as diferentes temperaturas, 30, 40, 50 e 60°C, e para as diferentes variedades de maçãs, *Golden Delicious* e *Granny Smith*. Ambos os gráficos, (a) e (b), evidenciam um bom desempenho do modelo, descrevendo bem o processo ao longo da secagem, para todas as temperaturas em estudo.

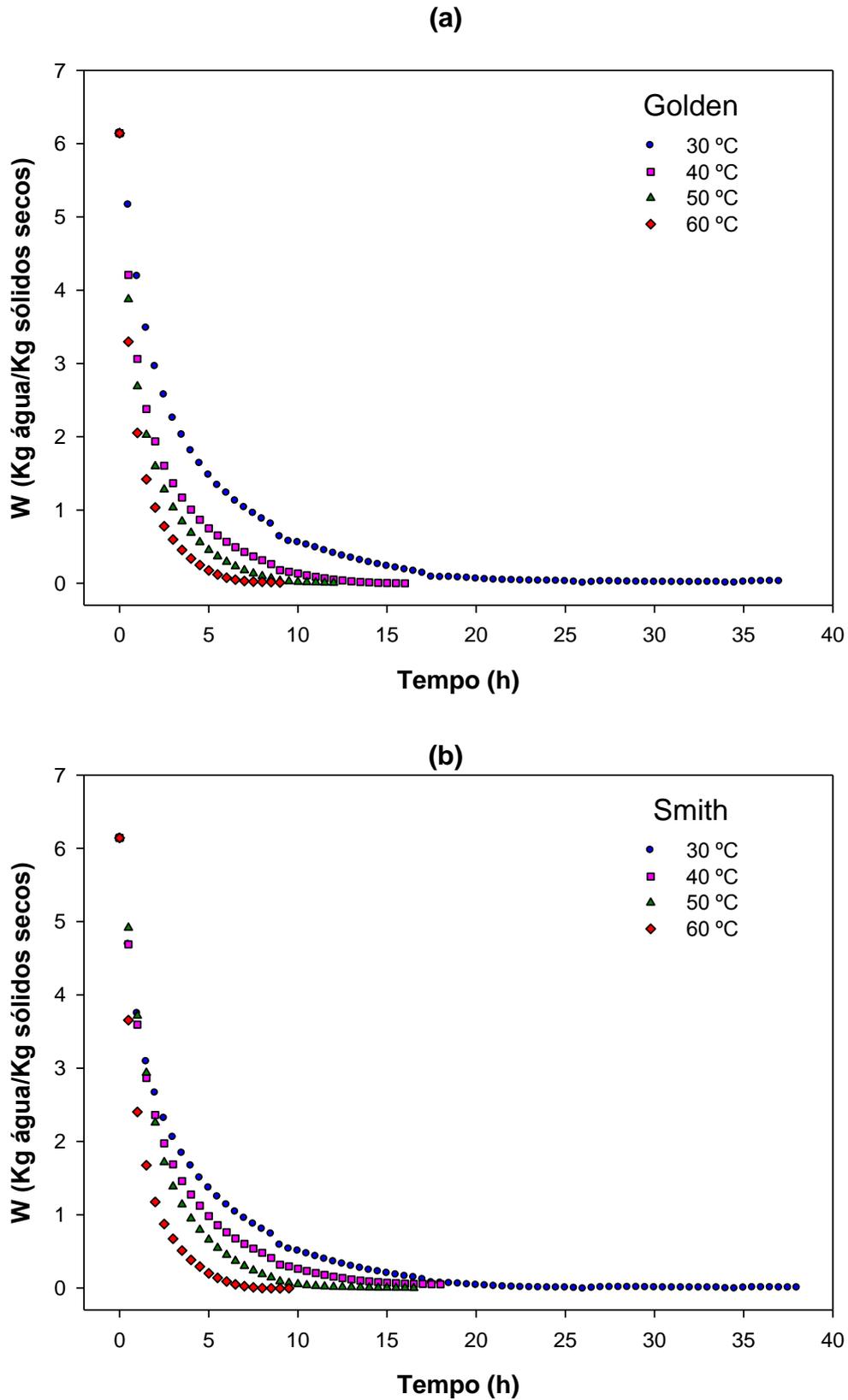


Figura 37. Variação da humidade ao longo da secagem para as variedades Golden (a) e Smith (b).

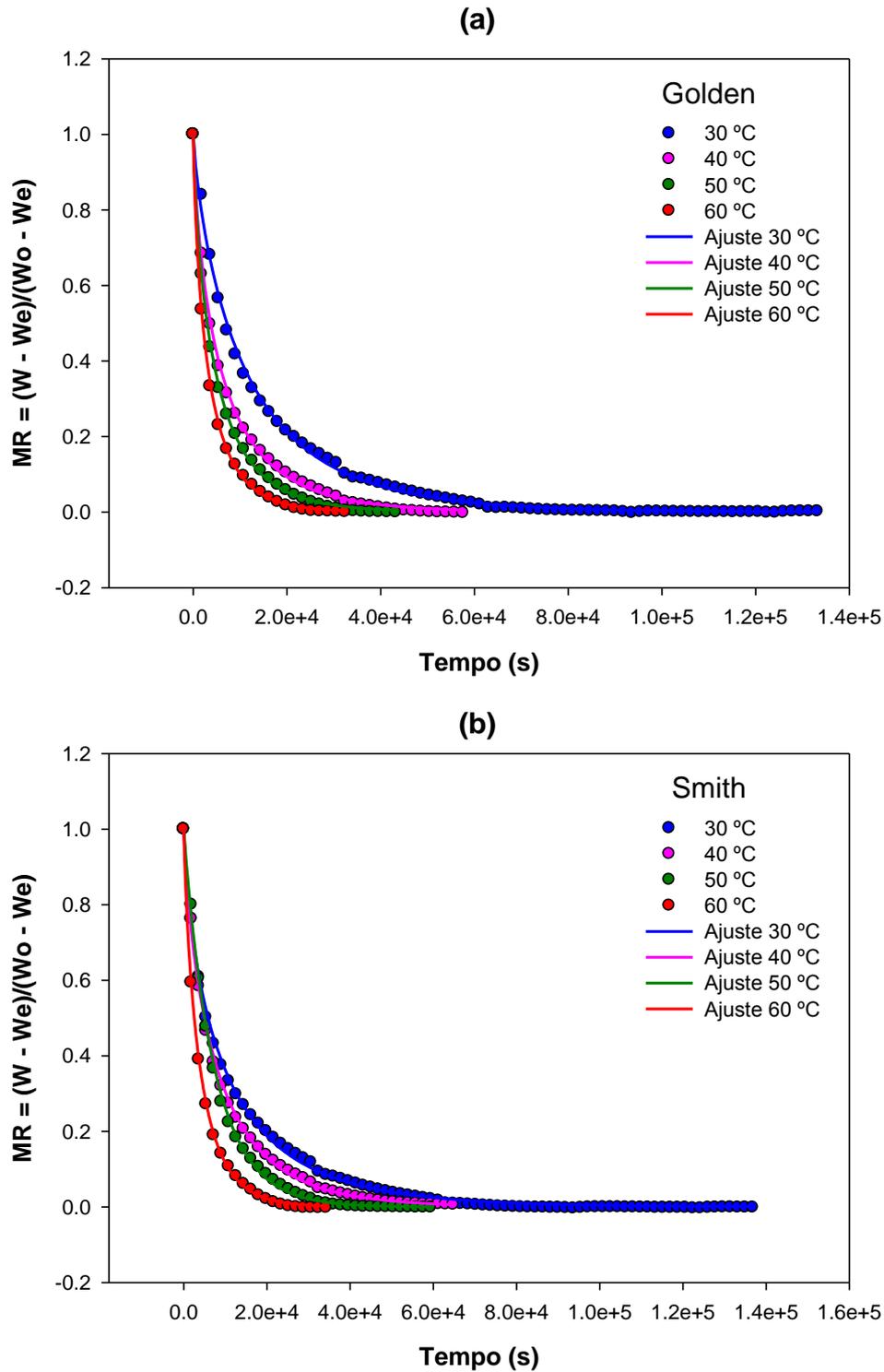


Figura 38. Ajuste ao modelo Page para os pontos experimentais das variedades Golden (a) e Smith (b).

4.2.2.3. Propriedades de transferência de massa

A Tabela 7 apresenta os resultados dos ajustes, determinados de acordo com a equação (8), para as diferentes temperaturas e variedades, permitindo calcular os valores dos coeficientes de difusão de humidade efectiva, D_e , através da Equação (10) para ambas as variedades de maçã, para as temperaturas de 30, 40, 50 e 60 °C. Os valores de R^2 , em todas as temperaturas e em ambas as variedades, apresentam valores altos, variando entre 0,9328-0,9906 para a variedade *Golden* e variando entre 0,9522-0,9936 para a variedade *Smith*. Os resultados mostram o aumento da difusividade com a temperatura, variando de $4.2232 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ a $1.4924 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ para a variedade *Golden* e de $4.6485 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ a $1.3570 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ para a variedade *Smith*. Estes valores de difusividade da humidade são muito semelhantes para ambas as variedades de maçãs, pois ambos os produtos são muito parecidos. O cálculo dos coeficientes de difusão foi feito com base nos dados experimentais da cinética e, portanto, os valores obtidos são válidos para as condições de secagem do presente estudo, não sendo necessariamente válido para diferentes condições de secagem, uma vez que estes influenciam fortemente os mecanismos de remoção de água.

Vega *et al.* (2007) para a secagem convectiva de aloé vera na faixa de temperaturas de 50-90 °C apresenta valores de difusividade variando de $5.30 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ a $1.77 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$, que estão na mesma ordem de grandeza do que aqueles encontrados no presente trabalho. Vega-Galvez *et al.* (na) refere que para a secagem de maçãs da variedade *Granny Smith* as difusividades variam de $3.22 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ para 40 °C e 0,5 m/s e até $1.53 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ para 80 °C e 1,5 m/s. Velic *et al.* (2004) estudaram a secagem convectiva das maçãs *Jonagold* e descobriram que a difusividade da humidade aumentou com o aumento da taxa de fluxo de ar, variando de 1.7×10^{-9} a $3.0 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ para o primeiro período de velocidade decrescente e de 2.9×10^{-9} a $4.4 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ para o segundo período. Jurendic e Tripalo (2011) analisaram a secagem de comida de bebé num secador de túnel para temperaturas de 60, 80 e 100 °C com velocidades do ar de 0,5, 1,0 e 1,4 m/s, e os valores encontrados para a difusividade da humidade situaram-se entre $1,51 \times 10^{-8}$ e $52,7 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$.

Tabela 7. Resultados dos coeficientes de difusão, de acordo com a equação (10) para as diferentes temperaturas e variedades.

Variedade Golden				
	30 °C	40 °C	50 °C	60 °C
R²	0,9906	0,9328	0,9394	0,9691
Declive	-6,5127x10 ⁻⁵	-1,2173x10 ⁻⁴	-1,7992x10 ⁻⁴	-2,3015x10 ⁻⁴
D_e (m²/s)	4,2232x10 ⁻¹⁰	7,8936x10 ⁻¹⁰	1,1667x10 ⁻⁹	1,4924x10 ⁻⁹
Variedade Smith				
	30 °C	40 °C	50 °C	60 °C
R²	0,9522	0,9936	0,9583	0,9713
Declive	-7,1686x10 ⁻⁵	-7,6765x10 ⁻⁵	-1,5578x10 ⁻⁴	-2,0926x10 ⁻⁴
D_e (m²/s)	4,6485x10 ⁻¹⁰	4,9779x10 ⁻¹⁰	1,0102x10 ⁻⁹	1,3570x10 ⁻⁹

Os valores da difusividade calculados para as diferentes temperaturas foram então usados para se ajustar a Equação (12), o que permite calcular os valores da difusividade para uma temperatura infinita, D_e^0 , e a energia de activação para a difusão de humidade, E , pelas equações (13) e (14), respectivamente. A Tabela 8 mostra os resultados obtidos, através da equação (11), para as duas variedades de maçãs em estudo, em que apresenta os valores dos coeficientes de regressão (R^2), sendo 0,9109 para a variedade *Smith* e 0,9702 para a variedade *Golden*. Os valores de D_e^0 encontrados foram 5.4621×10^{-4} e 1.8401×10^{-4} m²/s, para as variedades *Golden* e *Smith*, respectivamente. A energia de activação para a difusão de humidade, E , foi de 35,3 e 32,8 kJ/mol para a variedade *Golden* e *Smith*, respectivamente. Corzo *et al.* (2008) reporta que para a secagem convectiva de fatias de manga numa faixa de temperatura de 50-80 °C a energia de activação foi de 9,3 kJ/mol para uma velocidade do ar de 1,80 m/s e 8,7 kJ/mol para uma velocidade do ar de 1,91 m/s. Estes valores, comparados com os encontrados no presente estudo, para a secagem de maçãs foram consideravelmente mais elevados, o que mostra que as maçãs são mais sensíveis à temperatura, quando comparadas com as fatias de manga desidratada por Corzo *et al.* (2007).

A Figura 39 mostra a variação da difusividade efectiva das maçãs de ambas as variedades com a temperatura. Os pontos experimentais foram obtidos para cada temperatura, aplicando regressão linear para os dados na forma de $\ln(MR)$ versus tempo, e são apresentados na Tabela 7. Os pontos previsionais foram obtidos a partir da equação (11) fazendo uso dos parâmetros estimados que são mostrados na Tabela 8.

Tabela 8. Resultados dos parâmetros para a equação (11).

	Var. Golden	Var. Smith
R^2	0,9702	0,9109
Intercepção	-7,5125	-8,6005
Declive	-4241	-3943
D_e^0 (m^2/s)	$5,4621 \times 10^{-4}$	$1,8401 \times 10^{-4}$
E (J/mol)	35262	32784

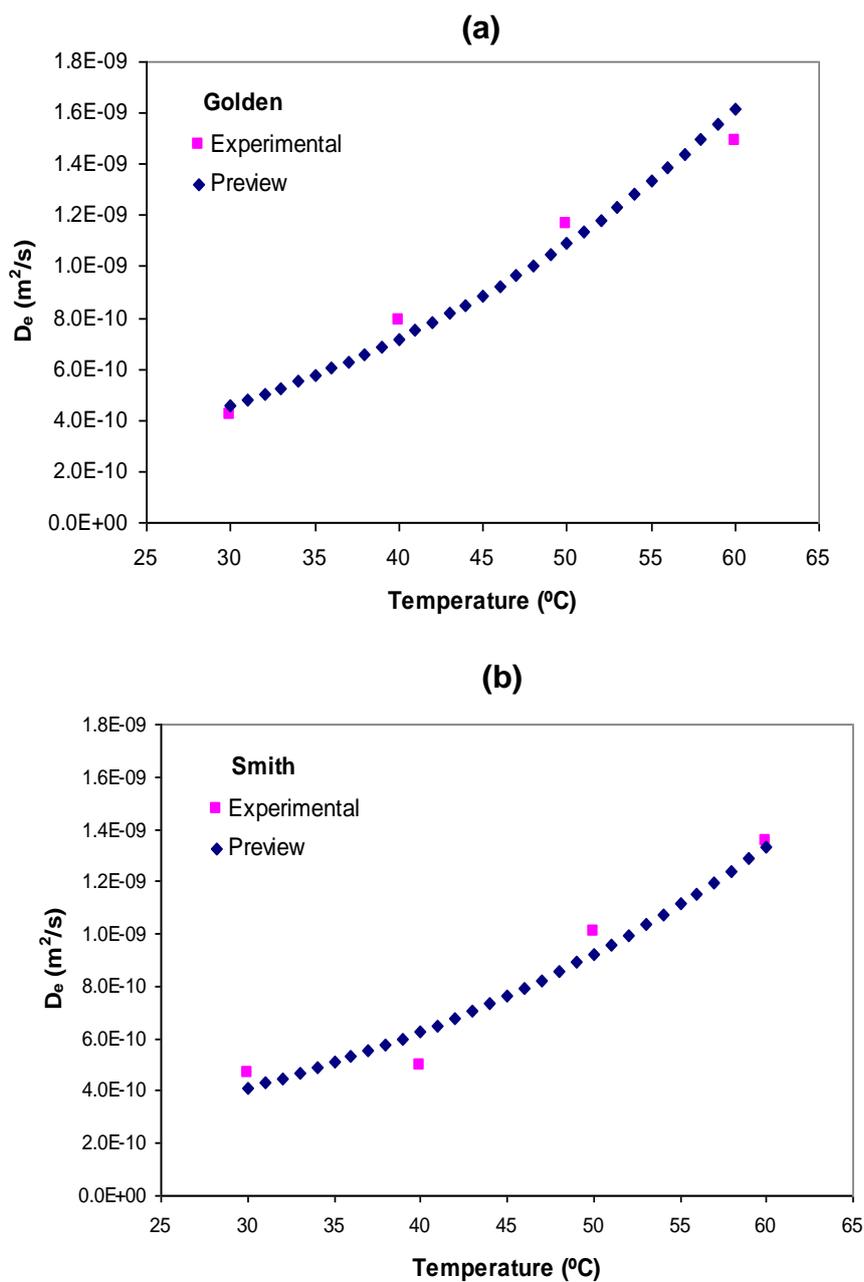


Figura 39. Variação da difusividade mássica da humidade com a temperatura para as maçãs da variedade (a) Golden e (b) Smith.

Os gráficos da Figura 40(a) e (b) apresentam um aumento exponencial da difusividade com o aumento da temperatura, de 30 a 60°C. Através da análise destes gráficos, é possível verificar que a difusividade é semelhante em ambas as variedades, *Golden* e *Smith*., ainda que seja ligeiramente superior no caso da variedade *Golden*.

A Tabela 9 mostra os valores calculados para o número de Biot, Bi , o número de Dincer, Di , e o coeficiente de transferência de massa, h_m , calculados, respectivamente, através das equações (16), (17) e (15), para as diferentes temperaturas e para ambas as variedades de maçãs. Os valores do número de Biot encontrados são mais elevados para as maçãs da variedade *Granny Smith*, excepto para a temperatura de 30 °C. O número de Biot aumenta com o aumento da temperatura, como se pode verificar a partir dos resultados obtidos. O número de Biot varia de 0,0055-0,0191 para a variedade *Golden* e varia de 0,0014-0,0509 para a variedade *Smith*. Jurendic e Tripalo (2011) relatam que para a secagem convectiva de comidas de bebé num túnel de secagem na gama de temperaturas de 60-100 °C, e com velocidades do ar de 0,5, 1,0 e 1,5 m/s apresentaram valores do número de Biot entre 0,0064 e 0,9261, que estão na mesma gama do que os encontrados no presente estudo, embora para diferentes produtos e diferentes condições de secagem. Mrkic *et al.* (2007) para a secagem convectiva de bróculos encontraram valores de Bi entre 0,2060 para a temperatura mais baixa e a velocidade máxima do ar testadas (50 °C e 2,25 m/s) e 0,3228 para a temperatura mais alta e a mais baixa velocidade (75 °C e 1,2 m/s).

Os valores do número Dincer variam de $2,0135 \times 10^8$ a $7,8270 \times 10^9$, para a variedade *Golden*, enquanto para a variedade *Smith* variam de $1,2453 \times 10^8$ a $2,2114 \times 10^1$. Mrkic *et al.* (2007) encontraram valores de Di entre 126.984 e 365.854, respectivamente, para a secagem convectiva de brócolos a 75 °C com ar de 1,2 m/s e 50 °C com ar a 2,25 m/s. Dincer e Hussain (2002) mostraram um valor de Di igual a 1.2356×10^4 para o ar de secagem de batata a 40 °C com uma velocidade do ar de 1 m/s.

Os coeficientes de transferência de humidade, h_m , encontrados variam entre $9,5589 \times 10^{-10}$ e $2,7713 \times 10^{-9}$ m/s para a variedade *Golden* e entre 1.6080×10^{-10} e 7.7640×10^{-9} m/s para as maçãs da variedade *Smith*. Estes valores são bastante inferiores aos de alguns valores encontrados na literatura, embora para outros produtos e condições de operação. Jurendic e Tripalo (2011) para a secagem convectiva de comida de bebé encontraram valores de h_m entre 2.7×10^{-8} e 4.2×10^{-5} m/s, dentro de uma gama de temperaturas dos 60 e 100 °C e velocidades do ar entre 0,5 e 1,5 m/s. Para a secagem convectiva de brócolos Mrkic *et al.* (2007) relataram valores de h_m entre 1.9215×10^{-4} m/s para 50 °C com ar de 1,2 m/s e 8.725×10^{-4} para 75 °C com ar a 2,25 m/s, e Dincer e Hussain (2002) para a secagem convectiva de batatas descobriram que o coeficiente de transferência de massa foi 3.2665×10^{-5} m/s. Tripathy e Kumar (2009) determinaram os coeficientes de convecção de transferência de massa da batata, e obtiveram valores de h_m que variam entre 1.61×10^{-7} e

4.17×10^{-7} m/s. Com base nos resultados apresentados na Tabela 9, verificou-se que o coeficiente de transferência de massa, h_m , varia com a temperatura de uma forma exponencial, conforme expresso pelas seguintes equações:

$$\text{Golden: } h_m = 1.7219 \times 10^{-10} + 1.6013 \times 10^{-11} e^{0.1013T} \quad (25)$$

$$\text{Smith: } h_m = 4.1027 \times 10^{-10} + 3.4187 \times 10^{-14} e^{0.2046T} \quad (26)$$

onde T é a temperatura em °C. A Figura 40 mostra para ambas as variedades de maçãs em estudo os valores encontrados para h_m para cada temperatura, em conjunto com as funções resultantes de ajustamento, como dado pelas equações (25) e (26), usando o software SigmaPlot V8.0, (SPSS, Inc.).

Tabela 9. Resultados das propriedades da transferência de massa.

Variedade Golden				
	30 °C	40 °C	50 °C	60 °C
Bi	0,0055	0,0048	0,0095	0,0191
Di	$5,700 \times 10^9$	$7,8270 \times 10^9$	$1,2982 \times 10^9$	$2,0135 \times 10^8$
h_m (m/s)	$5,8496 \times 10^{-10}$	$9,5589 \times 10^{-10}$	$2,7713 \times 10^{-9}$	$7,1307 \times 10^{-9}$
Variedade Smith				
	30 °C	40 °C	50 °C	60 °C
Bi	0,0014	0,0070	0,0509	0,0229
Di	$2,2114 \times 10^{11}$	$2,9687 \times 10^9$	$1,4743 \times 10^8$	$1,2453 \times 10^8$
h_m (m/s)	$1,6080 \times 10^{-10}$	$8,6710 \times 10^{-10}$	$1,2865 \times 10^{-9}$	$7,7640 \times 10^{-9}$

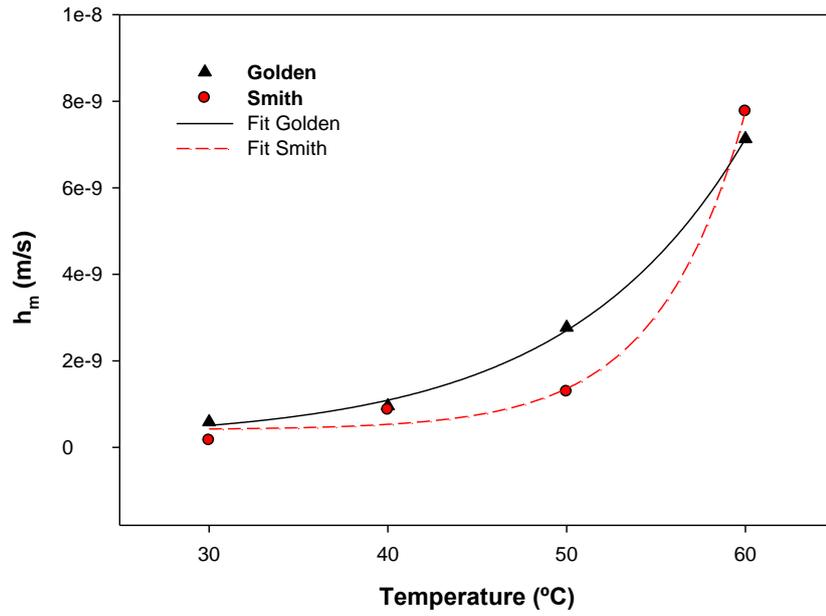


Figura 40. Variação do coeficiente de convecção de transferência de massa com a temperatura.

5. CONCLUSÃO

Os resultados obtidos após a construção do secador e em comparação com a estufa, mostram que o equipamento desenvolvido apresenta boa capacidade de secagem por convecção de ar quente. Além disso o número de amostras que permite secar é mais elevado, para além de todas as vantagens associadas à monitorização em contínuo.

Para o presente estudo, em que se avaliou o efeito da secagem a diferentes temperaturas sobre as propriedades físicas e químicas de maçãs, bem como a sua cinética de secagem, foi possível concluir que a acidez e o teor de sólidos solúveis totais das maçãs diminui com o aumento da temperatura de secagem, o que o caso da acidez, se deve à acidez volátil que está presente nas maçãs, sendo que a redução dos açúcares é devida às reacções de degradação.

No que respeita à coloração, ambas as variedades, *Golden* e *Smith*, em fresco apresentam aproximadamente a mesma cor. Após a secagem, ficam mais escuras devido ao decréscimo do parâmetro L^* , e verifica-se a intensificação da coloração vermelha e amarela, respectivamente, a^* e b^* . As maçãs secadas relativamente às maçãs frescas apresentam valores relativamente elevados para as diferenças de cor, visíveis para todas as temperaturas e em ambas as variedades.

Quanto à textura, os resultados obtidos a partir dos TPAs permitem verificar que a secagem afectou as propriedades de textura das maçãs, principalmente em relação à dureza, coesão e mastigabilidade, que diminuem com a secagem. Só a elasticidade das maçãs é que não alterou muito com a secagem, ou aumentou ligeiramente.

Em termos de cinética de secagem descrita por modelos de camada fina, diferentes modelos foram testados, sendo que apenas o modelo Vega-Lemus não se apresentou adequado para descrever a cinética de secagem das maçãs. Todos os outros apresentaram bons resultados, e particularmente o modelo de Page.

Sobre a estimativa das propriedades de transferência de massa, verificou-se que a difusividade de massa aumentou com a temperatura para ambas as variedades de maçãs, seguindo uma função do tipo Arrhenius, tendo sido possível estimar os valores de D_e^0 e da energia de activação. Para as maçãs da variedade *Golden*, D_e^0 foi de $5.4621 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ e E foi de 35,3 kJ/mol, enquanto que para as maçãs da variedade *Smith*, D_e^0 foi de $1.8401 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ e E foi de 32,8 kJ/mol. Além disso, para a variedade *Golden* o coeficiente de transferência de humidade variou de $5.8496 \times 10^{-10} \text{ m/s}$ para $7.1307 \times 10^{-9} \text{ m/s}$, e para a variedade de *Smith* $1.6080 \times 10^{-10} \text{ m/s}$ para $7.7640 \times 10^{-9} \text{ m/s}$.

Desta forma, os resultados permitem concluir que a secagem por convecção pode ser usada para obtermos produtos na forma de fatias de maçã secadas, melhorando as

características organolépticas do produto final ao escolhermos adequadamente as condições de secagem.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abdelhaq EH & Labuza TP (1987) Air drying characteristics of apricots. *Journal of Food Science*, 52 (2), 342–345.
- Aguilera JM (2003). Drying and dried products under the microscope. *Food Science and Technology International*, 9, 137-143.
- Akpinar EK, Bicer Y & Yildiz C (2003) Thin layer drying of red pepper. *Journal of Food Engineering*, 59, 99–104.
- Anchia IA & Hernandez JAM (2000) *Alimentos, Composición y propiedades*. (2ª ED.), Madrid: McGraw-Hill-Interamerica de España, S. A. U.
- Baini R & Langrish TAG (2007) Choosing an appropriate drying model for intermittent and continuous drying of bananas. *Journal of Food Engineering*, 79, 330-343.
- Boyer J & Liu RH (2004) Review: Apple phytochemicals and their health benefits. *Nutrition Journal*, 3, 1–15.
- Corzo O, Bracho N & Alvarez C (2008) Water effective diffusion coefficient of mango slices at different maturity stages during air drying. *Journal of Food Engineering*, 87(4), 479-484.
- Crank J (1975) *The mathematics of diffusion*, 2nd Ed. Oxford University Press, London.
- Das S, Das T, Rao PS & Jain RK (2001) Development of an air recirculating tray dryer for high moisture biological materials. *Journal of Food Engineering*, 50 (4), 223 – 227.
- Dincer I & Dost S (1995). An analytical model for moisture diffusion in solid objects during drying. *Drying Technology*, 13(1&2), 425-435.
- Dincer I & Dost S (1996). A modeling study for moisture diffusivities and moisture transfer coefficients in drying of solid objects. *International Journal of Energy Research*, 20, 531-539.
- Dincer I & Hussain MM (2002) Development of a new Bi-Di correlation for solids drying. *Internacional Journal of Heat and Mass Transfer*, 45, 3065-3069.
- Dincer I & Hussain MM (2004) Development of a new Biot number and lag factor correlation for drying applications. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 47, 635-658.
- Doymaz I (2007) The kinetics of forced convective air-drying of pumpkin slices. *Journal of Food Engineering*, 79, 243-248.
- Doymaz I & Pala M (2002a) Hot-air drying characteristics of red pepper. *Journal of Food Engineering*, 55 (4), 331–335.
- Doymaz I & Pala M (2002b) The effects of dipping pretreatments on air-drying rates of the seedless grapes. *Journal of Food Engineering*, 52 (4), 413–417.

- Doymaz I & Pala M (2003) The thin-layer drying characteristics of corn. *Journal of Food Engineering*, 60, 125–130.
- Efremov GI (2002) Drying kinetics derived from diffusion equation with flux-type boundary conditions. *Drying Technology*, 20(1), 55-66.
- Fasina O, Fleming H & Thompson R (2002) Mass transfer and solute diffusion in brined cucumbers. *Journal of Food Science*, 67(1), 181-187.
- Greve LC, Shackel KA, Ahmadi H, McArdle RN, Gohlke JR & Labavitch JM (1994) Impact of heating on carrot firmness: contribution of cellular turgor. *Journal Agriculture and Food Chemistry*, 42, 2896–2899.
- Guiné R (Ed.) (2010) Secagem de pêras, Da tradição à ciência. CI&DETS - IPV, Viseu ,1ª Edição, 101-117; 173-188.
- Guiné R, Lopes P, Barroca MJ & Ferreira DMS (2009) Effect of ripening stage on the solar drying kinetics and properties of S. Bartolomeu pears (*Pyrus communis* L.). *International Journal of Academic Research*, 1(1), 46-52.
- Guiné RPF (n.a.) Variation of textural attributes of S. Bartolomeu pears at maturation, storage and drying. *International Journal of food Properties* (in press).
- Guiné RPF & Fernandes RMC (2006) Analysis of the drying kinetics of chestnuts. *Journal of Food Engineering*, 76, 460-467.
- Guiné RPF, Barroca MJ & Lima MJR (2011) Comparative study of the drying of pears using different drying systems. *International Journal of Fruit Science*, 11(1), 55-73.
- Guiné RPF, Barroca MJ & Silva V (n.a.) Mass transfer properties of pears for different drying methods. *International Journal of Food Properties* (in press).
- Guiné RPF, Ferreira DMS, Barroca MJ & Gonçalves FM (2007) Study of the drying kinetics of solar-dried pears. *Biosystems Engineering*, 98, 422-429.
- Helman DR & Hartel R W, (1997). *Principles of Food Processing*. In Chapman & Hall, 191-194; 182.
- Hui YH *et al.* (2008). *Food Drying, Science and Technology: Microbiology, Chemistry, applications*. In Destech Publications, 359-401; 510
- Jurendić T & Tripalo B (2011) Biot number - lag factor (Bi-G) correlation for tunnel drying of baby food. *African Journal of Biotechnology*, 10(59), 12706-12713.
- Karathanos VT & Belessiotis VG (1997) Sun and artificial air drying kinetics of some agricultural products. *Journal of Food Engineering*, 31, 35–46.
- Kayacier A & Singh RK (2004) Application of effective diffusivity approach for the moisture content prediction of tortilla chips during baking. *Lebensmittel-Wissenschaft und Technologie*, 37(2), 275-281.
- Khraisheh MAM, Cooper TJR & Magee TRA (1997) Transport mechanisms of moisture during air drying processes. *Food and Bioproducts Processing*, 75(1), 34-40.

- Kiranoudis CT, Maroulis ZB, Tsami E & Marinos-Kouris D (1997) Drying kinetics of some fruits. *Drying Technology*, 15(5), 1399-1418.
- Kit LY & Spyridon EP (2004) A simple digital imaging method for measuring and analyzing color of food surfaces. *Journal of Food Engineering*, 61, 137-142.
- Konishi Y, Oriuchi JI & Kobayashi M (2001) Dynamic evaluation of the dehydration response curves of food characterized by a poultry-up process using a fish-paste sausage. II. A new tank model for computer simulation. *Drying Technology*, 19(7), 1271-1285.
- Lee KW, Kim YJ, Kim DO, Lee HJ & Lee CY (2003) Major phenolics in apple and their contribution to the total antioxidant capacity. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 51, 6516–6520.
- Lemus R, Lara E, Betoret N & Veja A (2008) Dehydration characteristics of papaya (*Carica pubescens*): Determination of equilibrium moisture content and diffusion coefficient. *Journal of Food Process Engineering*, 32, 645–663.
- Mendoza F, Dejmek P & Aguilera JM (2006) Calibrated color measurements of agricultural foods using image analysis. *Postharvest Biology and Technology* 41, 285–295.
- Mota CL, Luciano C, Dias A, Barroca MJ & Guiné RPF (2010) Convective drying of onion: Kinetics and nutritional evaluation. *Food and Bioproducts Processing*, 88(2-3), 115-123.
- Mrkić V, Ukrainczyk M & Tripalo B (2007) Applicability of moisture transfer Bi–Di correlation for convective drying of broccoli. *Journal of Food Engineering*, 79(2), 640-646.
- Nourhène B, Mohammed K & Nabil K (2008) Experimental and mathematical investigations of convective solar drying of four varieties of olive leaves. *Food and Bioproducts Processing*, 86, 176-184.
- Oliveira IM, Fernandez FAN, Rodrigues S, Sousa PHM, Maia GA & Figueiredo W (2006) Modeling and optimization of osmotic dehydration of banana followed by air drying. *Journal of Food Process Engineering*, 29, 400–413.
- Picouet PA, Landl A, Abadias M, Castellari M & Viñas I (2009) Minimal processing of a Granny Smith apple purée by microwave heating. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 10, 545-550.
- Quiles A, Hernando I, Pérez-Munuera I, Larrea V, Llorca E & Lluch MÁ (2005) Polyphenoloxidase (PPO) activity and osmotic dehydration in Granny Smith apple. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 85 (6), 1017–1020.
- Sahin AZ, Dincer I, Yilbas BS & Hussain MM (2002) Determination of drying times for regular multi-dimensional objects. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 45, 1757–1766.
- Saravacos GD (1986) *Mass Transfer Properties of Foods in Engineering Properties of Foods*. Marcel Dekker, New York.

- Szczesniak AS (2002) Texture is a sensory property. *Food Quality and Preference*, 13 ,215–225.
- Togrul I & Pehlivan D (2003) Modelling of drying kinetics of single apricot. *Journal of Food Engineering*, 58(3), 23-32.
- Togrul I & Pehlivan D (2003) Modelling of drying kinetics of single apricot. *Journal of Food Engineering*, 58(3), 23-32.
- Tripathy PP & Kumar S (2009) A methodology for determination of temperature dependent mass transfer coefficients from drying kinetics: Application to solar drying. *Journal of Food Engineering*, 90(2), 212-218.
- Van der Sluis AA, Dekker M, Skrede G & Jongen WMF (2002) Activity and concentration of polyphenolic antioxidants in apple juice. 1 Effect of existing production methods. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 50, 7211–7219.
- Vega A, Uribe E, Lemus R & Miranda M (2007) Hot-air drying characteristics of Aloe vera (*Aloe barbadensis* Miller) and influence of temperature on kinetic parameters. *LWT – Food Science and Technology*, 40, 1698-1707.
- Vega-Gálvez A, Ah-Hen K, Chacana M, Vergara J, Martínez-Monzó J, García-Segovia P, Lemus-Mondaca R & Di Scala K (n.a) Effect of temperature and air velocity on drying kinetics, antioxidant capacity, total phenolic content, colour, texture and microstructure of apple (var. *Granny Smith*) slices. *Food Chemistry* (in press).
- Vega-Gálvez A, Ah-Hen K, Chacana M, Vergara J, Martínez-Monzó J, García-Segovia P, Lemus-Mondaca R & Scala K (2012) Effect of temperature and air velocity on drying kinetics, antioxidant capacity, total phenolic content, colour, texture and microstructure of apple (var. *Granny Smith*) slices. *Food Chemistry*, 132, 51-59.
- Vega-Gálvez A, Di Scala K, Rodríguez K, Lemus-Mondaca R, Miranda M, López J *et al.* (2009) Effects of air-drying temperature on physico-chemical properties, antioxidant capacity and total phenolic content of red pepper (*Capsicum annum*, L. var. *Hungarian*). *Food Chemistry*, 117 (4), 647–653.
- Velic D, Planinic M, Tomas S & Bilic M (2004) Influence of airflow velocity on kinetics of convection apple drying. *Journal of Food Engineering*, 64, 97-102.