

## **ESTUDO DAS CINÉTICAS EM DIFERENTES SISTEMAS DE SECAGEM DA PÊRA S. BARTOLOMEU**

Raquel Guiné, Maria João Barroca

### **RESUMO**

As peras de S. Bartolomeu foram secadas em diferentes estados de maturação, em diferentes anos e por diferentes sistemas de secagem. Os dados experimentais de variação da humidade ao longo do tempo de secagem foram expressados na forma da variável adimensional "razão de humidade" e foram depois ajustados a diferentes modelos cinéticos empíricos frequentemente descritos na literatura como apropriados para descrever as curvas de secagem de variados alimentos.

Dos resultados obtidos foi possível verificar que de uma forma geral todos os cinco modelos testados se revelaram adequados para descrever a cinética de secagem das peras de S. Bartolomeu nas condições ensaiadas, muito embora uns se tenham revelado ligeiramente melhores que outros em determinadas situações.

### **1. INTRODUÇÃO**

A secagem é um processo bastante complexo, onde ocorrem simultaneamente fenómenos de transferência de massa e de calor por vezes difíceis, senão impossíveis, de descrever na sua totalidade (Guiné *et al*, 2009). Estes fenómenos produzem alterações estruturais e ao nível físico-químico nos produtos durante a secagem (Sacilik, 2007).

A análise dos processos de secagem permite a sua compreensão e eventualmente o estabelecimento de condições operatórias adequadas a cada processo e cada produto alimentar (Baini & Langrish, 2007; Fadhel *et al*, 2005). Em termos de engenharia isto é conseguido através da modelização matemática (Chong *et al*, 2008; Lahsasni *et al*, 2004; Roberts *et al*, 2008). Muitos têm sido os modelos matemáticos propostos para descrever processos de secagem, desde modelos muito complexos baseados na difusão até modelos de

camada-limite, os quais podem ser agrupados em teóricos, semi-teóricos e empíricos (Doymaz, 2007).

Os modelos de simulação ajudam no projecto de novos sistemas de secagem, bem como no melhoramento dos existentes. Por outro lado, são também importantes para o controlo das operações de secagem. Na cinética de secagem de produtos alimentares, a constante cinética (K) é normalmente usada. Este parâmetro combina todas as propriedades de transferência e pode ser definido pela equação da camada-limite (Togrul & Pehlivan, 2003).

As equações do tipo camada-limite descrevem os fenómenos de secagem de uma forma unificada, independentemente do mecanismo que controla o processo, e têm sido usados para estimar os tempos de secagem e determinar as curvas de secagem para muitos produtos agrícolas e alimentares. Uma grande variedade destes modelos está disponível na literatura, variando grandemente em natureza, mas tendo em comum a capacidade de descrever com sucesso muitos processos de secagem (Boudhrioua et al, 2008; Togrul & Pehlivan, 2003).

No presente trabalho, as cinéticas de secagem para a pêra de S. Bartolomeu, quando secada em diferentes sistemas de secagem, foram ajustadas a diferentes modelos matemáticos empíricos, no sentido de seleccionar os mais adequados às situações em causa.

## **2. EXPERIMENTAL**

No ano de 2007, as peras foram colhidas em três estágios de maturação, seguindo-se portanto três ensaios de secagem. Nos anos seguintes procedeu-se a uma colheita única. Foram efectuadas secagens em três sistemas diferentes: a estufa solar com ventilação na Escola Superior Agrária de Viseu (ESAV), o secador solar desenvolvido pela Escola Superior de Tecnologia de Viseu (ESTV) e o túnel de secagem desenvolvido pela Universidade de Coimbra (UC), onde o ar de secagem é aquecido através de um colector solar. Os diferentes sistemas de secagem encontram-se pormenorizadamente descritos em outros capítulos deste livro.

Nos sistemas de secagem da ESAV e da ESTV a temperatura e a humidade relativa eram variáveis, de acordo com as condições atmosféricas e com a hora do dia considerada. Contrariamente, no sistema da UC a temperatura era mantida constante em cerca de 41 °C e a velocidade do ar era de 1,1 m/s.

A secagem prosseguiu até que as peras alcançassem um conteúdo de humidade desejado de cerca de 20 % (base húmida). Porém, em certos casos, a humidade final das peras situava-se abaixo desse valor, visto que quando as amostras eram retiradas para análise, a secagem já havia decorrido até uma humidade inferior ao valor considerado óptimo.

Ao longo da secagem a humidade das peras era determinada por amostragem nos sistemas ESAV e ESTV, sendo para as análises utilizada uma balança de halogénio (Halogen Moisture Analyser HG53, Mettler Toledo). No sistema da UC a humidade era determinada por perda de peso, determinada por pesagem contínua do conjunto das peras dentro do secador ao longo da secagem.

### 3. MODELIZAÇÃO MATEMÁTICA

A cinética de secagem foi monitorizada através da variação da humidade das peras ao longo da secagem, e os dados foram seguidamente expressos sob a forma da variável adimensional "razão de humidade"<sup>1</sup>, definida como:

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

onde:

MR = razão de humidade

W = conteúdo de humidade no instante t, em base seca,

W<sub>0</sub> = conteúdo de humidade inicial, em base seca,

W<sub>e</sub> = conteúdo de humidade no equilíbrio, em base seca.

Para modelizar a cinética de secagem, os pontos experimentais (MT,t) foram ajustados a diferentes modelos empíricos encontrados na literatura, e citados por vários autores, como por exemplo Bainsi & Langrish (2007) ou Togrul & Pehlivan (2003), os quais são apresentados na Tabela 1.

---

<sup>1</sup> Em Inglês Moisture Ratio (MR)

Tabela 1 – Modelos cinéticos usados para descrever a cinética de secagem das peras.

<b>Model name</b>	<b>Equation</b>
Newton	$MR = \exp(- k t)$
Page	$MR = \exp(- k t^n)$
Henderson & Pabis	$MR = a \exp(- k t)$
Logarithmic	$MR = a \exp(- k t) + c$
Aproximação difusional	$MR = a \exp(- k t) + (1 - a) \exp(- k b t)$

Os ajustes foram obtidos usando o software de computação gráfica SigmaPlot V8.0 (SPSS, Inc.). A qualidade dos ajustes foi avaliada em função do coeficiente de correlação do ajuste (R), o qual indica que o ajuste é tanto melhor, quanto mais próximo de 1 for o valor de R.

## **4. RESULTADOS E DISCUSSÃO**

### **4.1. Estudo da variação em função do estado de maturação**

Na Figura 1 é apresentada a evolução da humidade nas peras, em base húmida (kg água/100 kg material) e em base seca (kg água/kg sólidos secos), ao longo da secagem feita na estufa solar da ESAV no ano de 2007, para as três datas de colheita. Verifica-se que a velocidade de secagem para a primeira colheita foi consideravelmente maior do que nos outros dois ensaios. Apesar da semelhança entres os ensaios da segunda e da terceira colheitas, verifica-se que o ensaio da segunda colheita foi o mais lento. Naturalmente que estas variações estão associadas às circunstâncias climatéricas verificadas durante cada um dos ensaios, que originaram condições de temperatura e humidade relativa no interior da estufa mais ou menos favoráveis à secagem. O gráfico da Figura 1 (esquerda) mostra que existe uma relação aproximadamente linear entre a humidade das peras (em base húmida) e o tempo de secagem. No que respeita aos ajustes, verifica-se que a segunda colheita apresenta uma maior dispersão dos pontos experimentais, resultando num pior ajuste, traduzido pelo valor mais baixo do coeficiente de correlação, R.

Na Figura 2 é apresentada a evolução da razão de humidade calculada segundo a Equação (1), para os três ensaios feitos na estufa solar da ESAV, correspondentes às três colheitas do ano de 2007. No mesmo gráfico são ainda apresentados os ajustes feitos com o modelo

de Newton (Tabela 1), obtidos, como se disse, com o software SigmaPlot. Também neste gráfico se evidencia a diferença entre a velocidade de secagem do primeiro ensaio, relativamente aos outros dois. No que respeita ao desempenho do modelo testado, verifica-se que o mesmo se adequa aos dados experimentais dos três ensaios de secagem, como se pode também verificar pelos valores de R apresentados na Tabela 2.

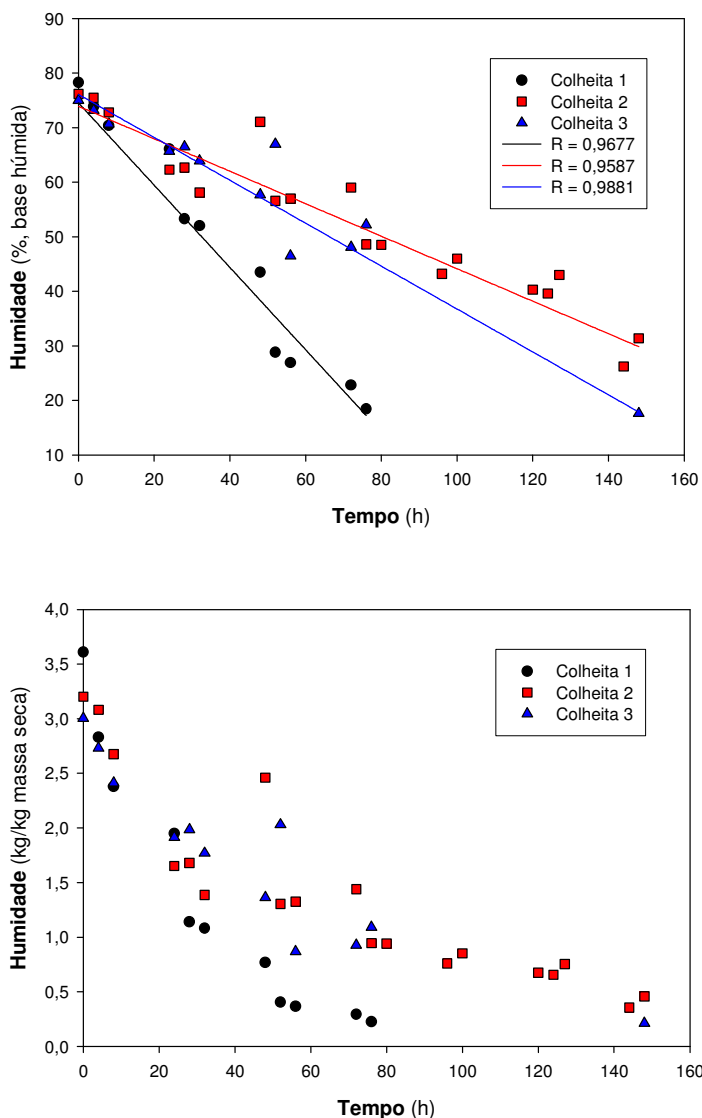


Figura 1 – Variação do conteúdo de humidade das peras (base húmida e base seca) ao longo da secagem feita na Estufa da ESAV em 2007, para as três datas de colheita.

A Tabela 2 resume toda a informação obtida dos ajustes feitos aos diferentes dados experimentais das secagens na ESAV em 2007, quer no que respeita aos valores estimados dos parâmetros de cada modelo, bem como o respectivo desvio padrão e ainda o coeficiente de correlação correspondente, indicador da qualidade de cada ajuste.

Tabela 2 – Ajustes feitos aos dados cinéticos das secagens na ESAV em 2007 com as três colheitas de peras.

<b>Modelo</b>	<b>Parâmetros</b>	<b>Colheita 1</b>	<b>Colheita 2</b>	<b>Colheita 3</b>
Newton	k(±dp)	0.0425(±0.0033)	0.0185(±0.0013)	0.0192(±0.0011)
	R	0.9818	0.9617	0.9840
Page	k(±dp)	0.0534(±0.0217)	0.0539(±0.0154)	0.0228(±0.0095)
	n(±dp)	0.9334(±0.1184)	0.7416(±0.0628)	0.9554(±0.1079)
	R	0.9823	0.9789	0.9843
Henderson & Pabis	a(±dp)	0.9605(±0.0486)	0.9320(±0.0453)	0.9758(±0.0360)
	k(±dp)	0.0407(±0.0040)	0.0170(±0.0015)	0.0186(±0.0015)
	R	0.9830	0.9662	0.9847
Logarítmico	a(±dp)	-0.0813(±0.0865)	0.1302(±0.0368)	-0.0712(±0.1015)
	k(±dp)	1.0241(±0.0825)	0.8610(±0.0508)	1.0378(±0.0958)
	c(±dp)	0.0330(±0.0075)	0.0272(±0.0045)	0.0162(±0.0033)
	R	0.9852	0.9750	0.9857
Aproximação difusional	a(±dp)	1.0000(±0.0000)	1.0000(±0.0000)	1.0000(±0.0000)
	k(±dp)	0.0425(±0.0037)	0.0185(±0.0013)	0.0190(±0.0013)
	b(±dp)	1.0000(±0.0000)	1.0000(±0.0000)	1.0000(±0.0000)
	R	0.9818	0.9617	0.9841

dp = desvio padrão

Da observação da Tabela 2 verifica-se que o modelo Henderson & Pabis é muito semelhante ao modelo de Newton, com os valores de a muito próximos de 1 e os valores da constante cinética, k, muito parecidos com os do modelo de Newton. No que respeita à aproximação difusional, também esta vai de encontro ao modelo de Newton, com os parâmetros a e b iguais à unidade e constantes cinéticas iguais ao modelo de Newton. Ao comparar a performance dos diferentes modelos, verifica-se que qualquer dos modelos: Newton, Page, Henderson & Pabis ou Logarítmico, pode ser usado para representar a cinética de secagem das peras de S. Bartolomeu nas condições destes ensaios, atendendo aos valores relativamente elevados dos coeficientes de correlação. Contudo, para os ensaios 1 e 3 o melhor modelo é o Logarítmico, com valores de R de 0.9852 e

0,9857, respectivamente, enquanto que para o segundo ensaio, o modelo que se revelou melhor foi o Page, com  $R = 0.9789$ .

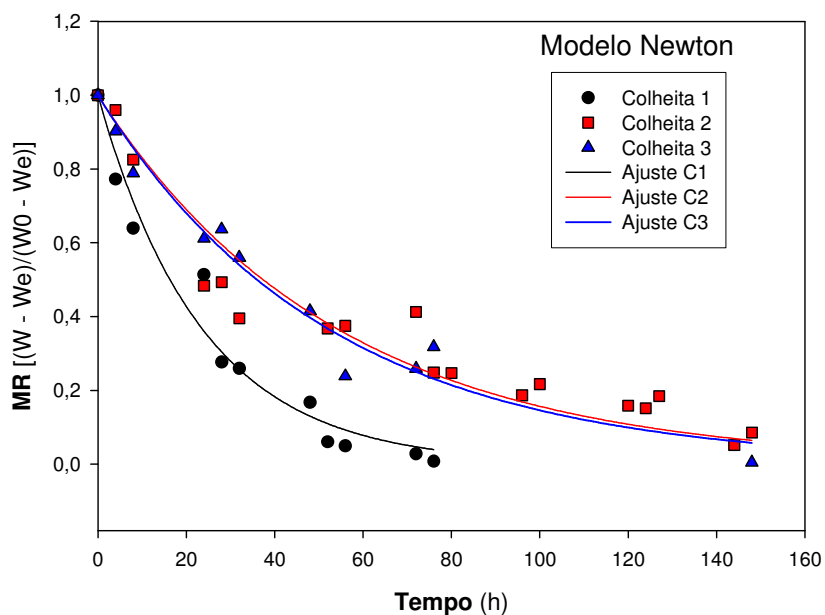


Figura 2 – Variação da razão de umidade ao longo do tempo para os três ensaios de secagem de 2007 na ESAV, e ajuste com o modelo de Newton.

Verificou-se então do anteriormente exposto que os melhores modelos são o Page e o Logarítmico. A Figura 3 mostra assim os dados experimentais das três colheitas conjuntamente com os ajustes feitos com os dois modelos mencionados.

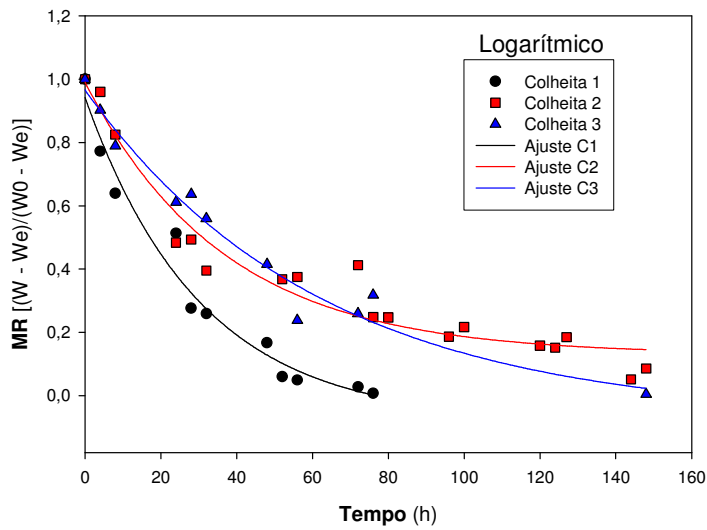
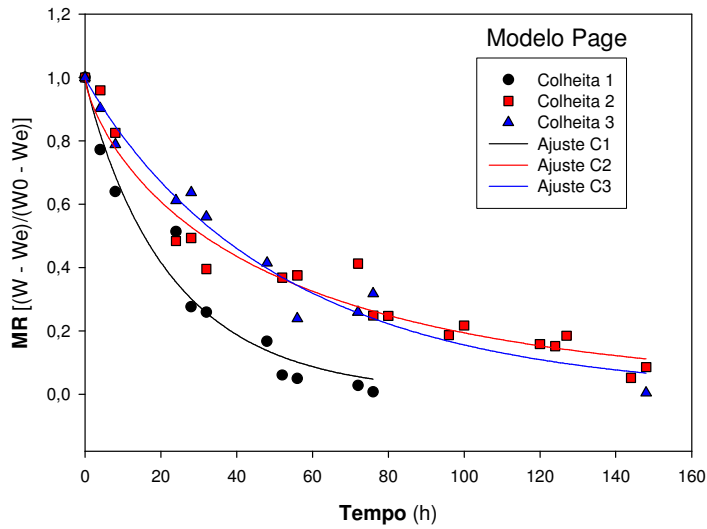


Figura 3 – Variação da razão de humidade ao longo do tempo para os três ensaios de secagem de 2007 na ESAV, e ajustes com os modelos de Page e Logarítmico.

A Figura 4 mostra para os dados da secagem referente à segunda colheita, os ajustes feitos com os cinco modelos. É possível observar que, embora com configurações ligeiramente, todos os modelos revelam claramente qual o tipo de evolução que se verificou neste ensaio de secagem.

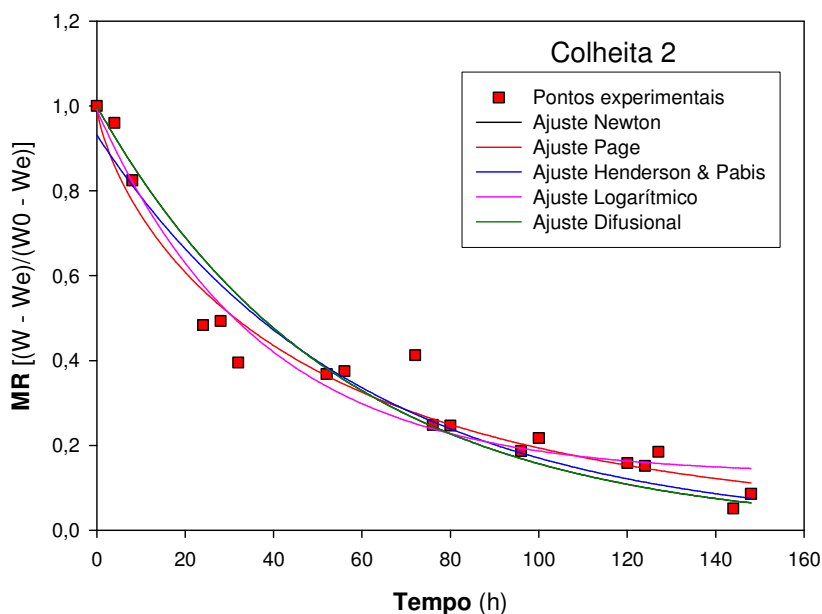


Figura 4 – Ajuste com vários modelos aos dados do segundo ensaio de secagem de 2007 na ESAV.

#### 4.2. Estudo da variação ao longo dos 3 anos de estudo

Na Figura 5 apresentam-se os dados cinéticos das secagens efectuadas na estufa solar da ESAV, ao longo de três anos consecutivos (2007 a 2009). Conjuntamente com os dados experimentais são ainda apresentadas as curvas de secagem resultantes dos ajustes feitos com os modelos de Newton e Henderson & Pabis, cujos resultados são apresentados na Tabela 3. Verifica-se que nos diferentes ensaios a velocidade de secagem é diferente, resultando em tempos de secagem também diferentes, sendo o ano de 2008 o que apresenta o tempo de secagem mais longo. Estas diferenças devem-se ao facto de ser uma secagem feita pela acção do sol, o que a torna muito dependente das condições climáticas na altura da realização do ensaio, e naturalmente que essas condições variam de ensaio para ensaio. No que respeita ao desempenho dos

dois modelos testados, verifica-se que são muito semelhantes, sendo, contudo, o modelo de Henderson & Pabis apenas ligeiramente melhor, como se pode verificar pelos valores de r apresentados na Tabela 3.

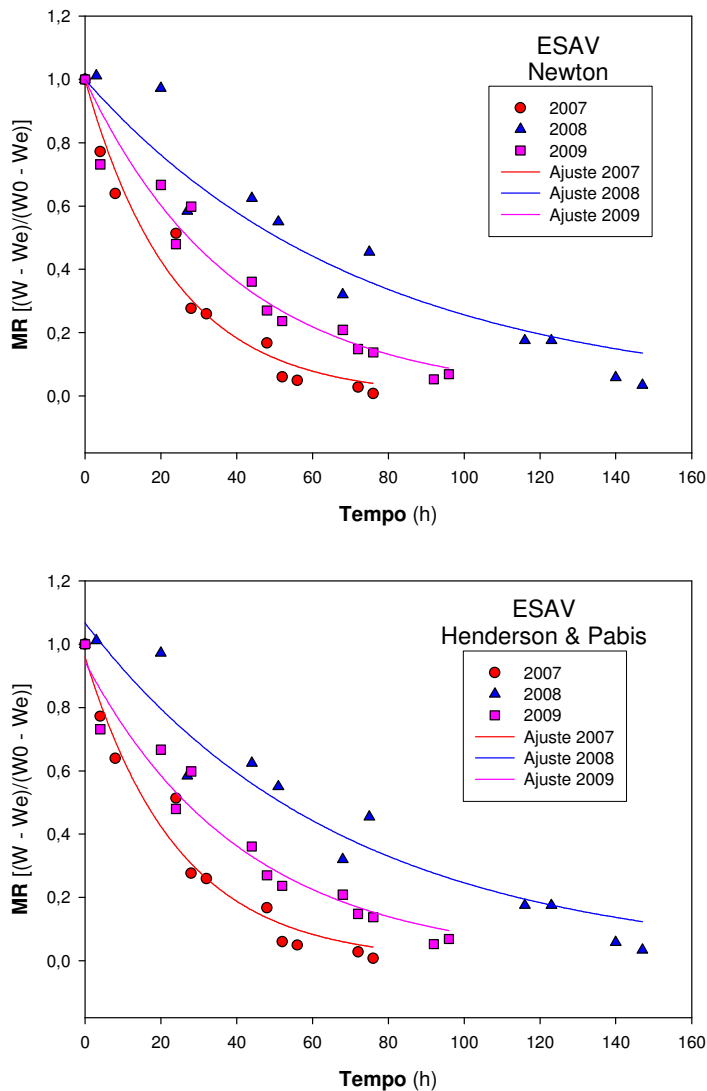


Figura 5 – Ajuste aos dados cinéticos das secagens na ESAV ao longo de três anos, com os modelos de Newton e Henderson & Pabis.

Os gráficos da Figura 6 representam os dados cinéticos das secagens efectuadas no túnel de secagem da UC, ao longo do mesmo período de três anos. Também neste caso os dados foram ajustados com os modelos de Newton e Henderson & Pabis, sendo os resultados apresentados na Tabela 3. Nos gráficos da Figura 6 observa-se que os

ensaios de secagem nos anos de 2007 e 2008 revelaram um comportamento cinético muito semelhante, enquanto os dados relativos ao ano de 2009 são ligeiramente diferentes, tendo o ensaio demorado mais tempo. Também neste caso os dois modelos testados apresentam uma boa capacidade preditiva do comportamento cinético das peras nas condições ensaiadas. No entanto, neste caso não se consegue identificar qual dos modelos será o melhor, em virtude de o Newton ser ligeiramente melhor no ano de 2007, mas ligeiramente pior no ano de 2009, sendo ainda que em 2008 eles são equivalentes, atendendo aos valores do coeficiente de correlação, R, apresentado na Tabela 3.

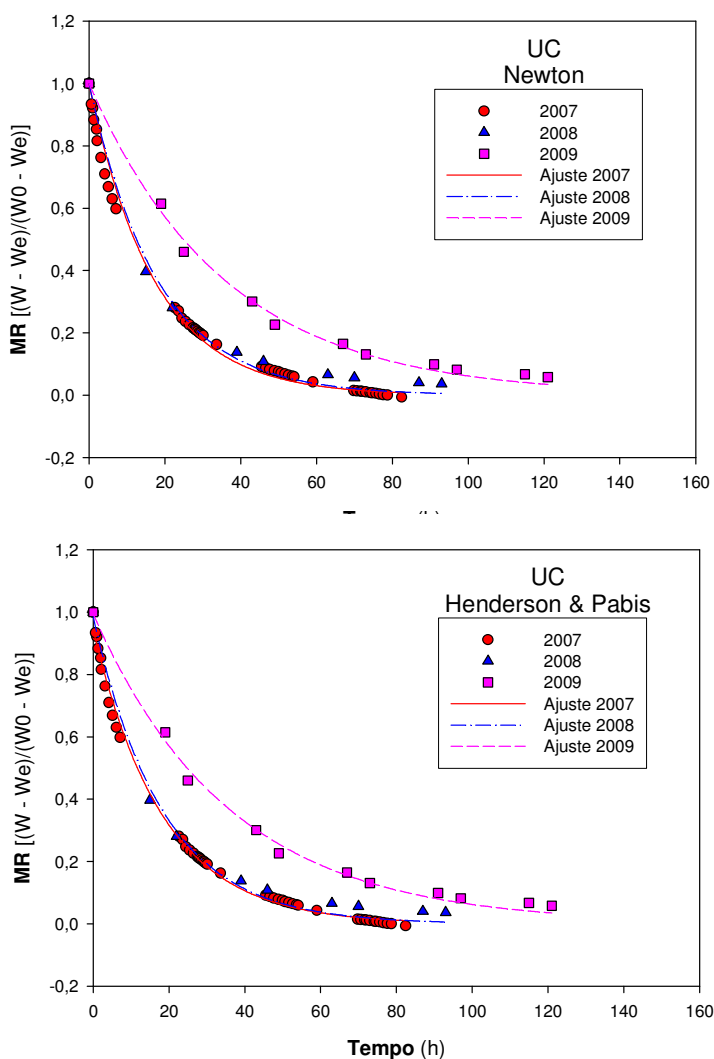


Figura 6 – Ajuste aos dados cinéticos das secagens na UC ao longo de três anos, com os modelos de Newton e Henderson & Pabis.

Tabela 3 – Ajustes feitos aos dados cinéticos das secagens na ESAV e na UC em três anos de estudo.

<b>ESAV</b>				
<b>Modelo</b>	<b>Parâmetros</b>	<b>2007</b>	<b>2008</b>	<b>2009</b>
Newton	k(±dp)	0.0425(±0.0033)	0.0136(±0.0013)	0.0253(±0.0017)
	R	0.9818	0.9637	0.9726
Henderson & Pabis	a(±dp)	0.9605(±0.0486)	1.0677(±0.0617)	0.9443(±0.0480)
	k(±dp)	0.0407(±0.0040)	0.0147(±0.0017)	0.0239(±0.0021)
	R	0.9830	0.9679	0.9756
<b>ESTV</b>				
<b>Modelo</b>	<b>Parâmetros</b>	<b>2007</b>	<b>2008</b>	<b>2009</b>
Newton	k(±dp)	0.0580(±0.0012)	0.0551(±0.0027)	0.0278(±0.0007)
	R	0.9958	0.9951	0.9971
Henderson & Pabis	a(±dp)	0.9455(±0.0075)	0.9851(±0.0318)	0.9950(±0.0216)
	k(±dp)	0.0546(±0.0009)	0.0544(±0.0032)	0.0277(±0.0009)
	R	0.9980	0.9952	0.9841

dp = desvio padrão

### 4.3. Estudo da variação em função do sistema de secagem

As figuras 7 e 8 apresentam os dados experimentais obtidos para os ensaios de secagem realizados durante o verão de 2009 nos três sistemas de secagem testados: a estufa solar da Escola Superior Agrária de Viseu, o secador solar da Escola Superior de Tecnologia de Viseu e o túnel de secagem da Universidade de Coimbra. Conjuntamente com os dados experimentais são também apresentados os ajustes feitos com os modelos Henderson & Pabis e Logarítmico, sendo os resultados dos ajustes apresentados na Tabela 4. Pode ser verificado que o modelo que melhor se adequa a descrever o comportamento cinético das peras é o Logarítmico, apresentando maiores valores de R para os ajustes feitos a todos os ensaios. Porém, a diferença para o modelo Henderson & Pabis não é significativa.

No que respeita à comparação entre os dados cinéticos dos três sistemas de secagem, verifica-se que a secagem na UC foi a mais

lenta enquanto a secagem na ESTV foi a mais rápida. Contudo, a regularidade dos dados é pior na ESTV, apresentando variações maiores e uma dispersão dos dados maior. Uma vez mais se verifica que a secagem na UC se apresenta em termos cinéticos como a mais regular, o que se traduz em melhores ajustes, com valores de R de 0.9971 e 0.9983, que são os mais elevados.

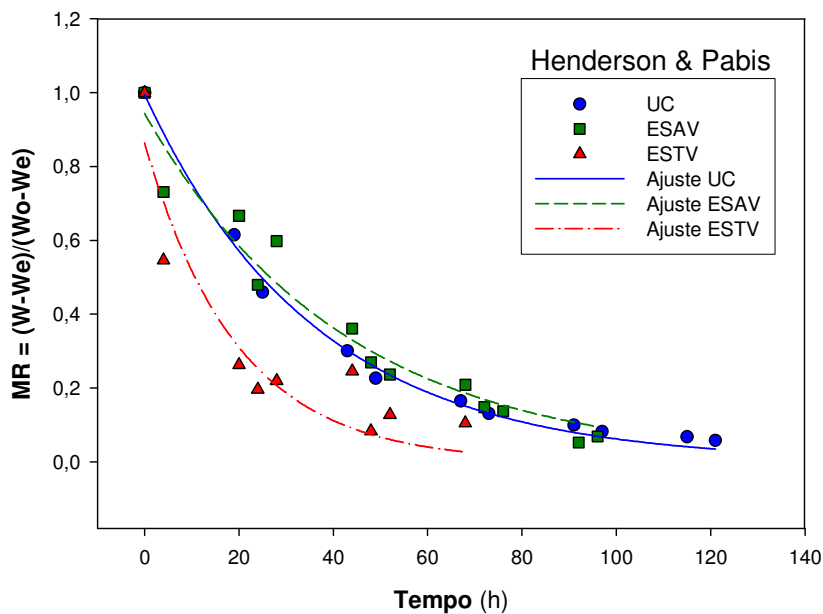


Figura 7 – Ajuste com o modelo Henderson & Pabis aos dados dos vários sistemas de secagem em 2009.

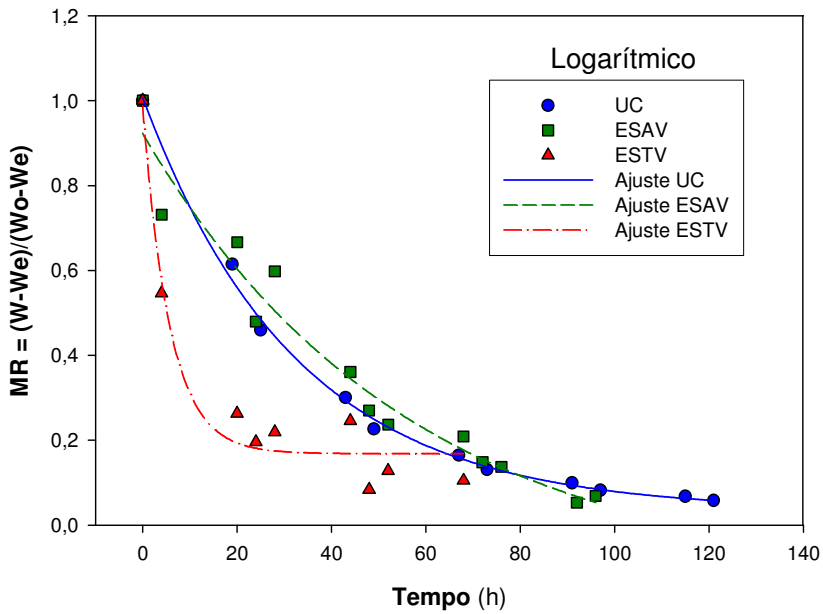


Figura 8 – Ajuste com o modelo Logarítmico aos dados dos vários sistemas de secagem em 2009.

Tabela 4 – Ajustes feitos aos dados cinéticos das secagens nos três sistemas em 2009.

Modelo	Parâmetros	H&P	Log
ESAV	a ( $\pm dp$ )	0.9443( $\pm 0.0480$ )	1.0592( $\pm 0.1347$ )
	k ( $\pm dp$ )	0.0239( $\pm 0.0021$ )	0.0179( $\pm 0.0053$ )
	c ( $\pm dp$ )	--	-0.1364( $\pm 0.0492$ )
	R	0.9756	0.9786
ESTV	a ( $\pm dp$ )	0.8645( $\pm 0.0897$ )	0.8195( $\pm 0.0698$ )
	k ( $\pm dp$ )	0.0511( $\pm 0.0099$ )	0.1745( $\pm 0.0458$ )
	c ( $\pm dp$ )	--	0.1685( $\pm 0.0273$ )
	R	0.9369	0.9802
UC	a ( $\pm dp$ )	0.9950( $\pm 0.0216$ )	0.9725( $\pm 0.0200$ )
	k ( $\pm dp$ )	0.0277( $\pm 0.0009$ )	0.0308( $\pm 0.0016$ )
	c ( $\pm dp$ )	--	0.0347( $\pm 0.0136$ )
	R	0.9971	0.9983

dp = desvio padrão

## 5. CONCLUSÃO

Do trabalho realizado foi possível concluir que todos os modelos testados se adequam a descrever a cinética de secagem das peras S. Bartolomeu nas diferentes condições testadas. Ainda assim, verifica-se que em determinadas circunstâncias alguns modelos se apresentam melhores que outros.

Foi possível ainda concluir que o comportamento cinético das peras não varia grandemente ao longo dos anos, quando a secagem é efectuada sob condições controladas, como no caso do túnel de secagem, mas que variam consideravelmente quando a secagem é feita sob a influência directa do sol, e portanto dependente das condições climatéricas.

## Referências

- Baini R & Langrish TAG (2007) Choosing an appropriate drying model for intermittent and continuous drying of bananas. *Journal of Food Engineering*, 79, 330-343.
- Boudhrioua N, Kouhila M & Kechaou N (2008) Experimental and mathematical investigations of convective solar drying of four varieties of olive leaves. *Food and Bioproducts Processing*, 86(3), 176-184.
- Chong CH, Law CL, Cloke M, Hii CL, Abdullah LC & Daud WRW (2008) Drying kinetics and product quality of dried chempedak. *Journal of Food Engineering*, 88, 522-527.
- Doymaz I (2007) The kinetics of forced convective air-drying of pumpkin slices. *Journal of Food Engineering*, 79, 243-248.
- Fadhel A, Kooli S, Farhat A & Bellghith A (2005) Study of the solar drying of grapes by three different processes. *Desalination*, 185, 535-541.
- 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.
- Lahsasni S, Kouhila M, Mahrouz M & Jaouhari JT (2004) Drying Kinetics of Prickly Pear Peel (*Opuntia ficus indica*). *Journal of Food Engineering*, 61, 173-179.
- Roberts JS, Kidd DR & Padilla-Zakour O (2008) Drying kinetics of grape seeds. *Journal of Food Engineering*, 89(4), 460-465.
- Sacilik K (2007) Effect of drying methods on thin-layer drying characteristics of hull-less seed pumpkin (*Cucurbita pepo* L.). *Journal of Food Engineering*, 79, 23-30.
- Togrul I & Pehlivan D (2003) Modelling of drying kinetics of single apricot. *Journal of Food Engineering*, 58(3), 23-32.