



Sérgio Miguel Gomes Lopes

# MODELOS DE PREVISÃO DO TEOR DE HUMIDADE DE COMBUSTÍVEIS FLORESTAIS

Tese de Doutoramento na área científica de Engenharia Mecânica, especialidade de Riscos Naturais e Tecnológicos, orientada pelo Professor Doutor Domingos Xavier Filomeno Carlos Viegas e coorientada pelo Professor Doutor Luís Eugénio Pinto Teixeira de Lemos e apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra.

Julho de 2013



UNIVERSIDADE DE COIMBRA

**Faculdade de Ciências e Tecnologia  
da Universidade de Coimbra**

**MODELOS DE PREVISÃO DO TEOR DE  
HUMIDADE DE COMBUSTÍVEIS  
FLORESTAIS**

**Ficha Técnica:**

<b>Tipo de trabalho</b>	Dissertação de Doutoramento
<b>Título</b>	Modelos de Previsão do Teor de Humidade de Combustíveis Florestais
<b>Autor</b>	Sérgio Miguel Gomes Lopes
<b>Orientador</b>	Professor Doutor Domingos Xavier Filomeno Carlos Viegas
<b>Coorientador</b>	Professor Doutor Luís Eugénio Pinto Teixeira de Lemos
<b>Área Científica</b>	Engenharia Mecânica
<b>Especialidade</b>	Riscos Naturais e Tecnológicos
<b>Data</b>	2013



## **AGRADECIMENTOS**

A realização da presente dissertação não teria sido possível sem o contributo inestimável de natureza diversa de um conjunto de pessoas e instituições.

Desejo desta forma expressar os meus sinceros agradecimentos ao orientador e coorientador da presente dissertação, respetivamente o Professor Doutor Domingos Xavier Viegas e o Professor Doutor Luís Teixeira de Lemos.

Agradeço ao Departamento de Engenharia Mecânica da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, nomeadamente ao Centro de Estudos sobre Incêndios Florestais da Associação para o Desenvolvimento da Aerodinâmica Industrial, na pessoa do seu presidente, Professor Doutor Domingos Xavier Viegas. Agradeço ao Instituto Politécnico de Viseu, nomeadamente ao Departamento de Ambiente da Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Viseu, na pessoa do seu Diretor, Professor Doutor Luís Teixeira de Lemos. Agradeço à Fundação para a Ciência e a Tecnologia pela atribuição da bolsa individual SFRH/BD/37104/2007, na pessoa do seu presidente, Professor Doutor João Sentieiro.

Agradeço ao Nuno Luís, à Telma Domingues, à Susana Rita, à Lídia Pedrosa e ao Nuno Miguel pela realização de ensaios de determinação do teor de humidade em Coimbra e em Viseu.

Agradeço o apoio e companheirismo dos colegas e amigos do Centro de Estudos sobre Incêndios Florestais da ADAI e do Departamento de Ambiente da ESTGV.

Por fim, agradeço aos que me enriquecem e protegem com a sua amizade e com o seu amor, os meus amigos e a minha família, a minha mulher Gabriela, os meus filhos Martim e Rita e os meus pais João Lopes e Maria José.

**Para a minha família**

## RESUMO

O teor de humidade de um combustível florestal reveste-se de enorme importância na problemática dos incêndios florestais devido à sua influência em vários aspetos, nomeadamente no risco, na ignição, na ocorrência, na propagação, na intensidade e na extinção de um incêndio florestal.

No presente estudo apresentam-se resultados provenientes do programa de monitorização do teor de humidade de combustíveis florestais que se tem vindo a realizar, no centro de Portugal, desde 1986. Foi analisada a representatividade espacial e temporal do teor de humidade das espécies caracterizadas assim como a relação entre elas. Foi igualmente analisado o número de amostras necessárias para a sua correta caracterização assim como a comparação do teor de humidade determinado por secagem em estufa e do teor de humidade determinado pelo analisador rápido de humidade. Foi verificado que, quando o teor de humidade é reduzido, os resultados obtidos através do analisador rápido de humidade são bem correlacionáveis com o teor de humidade obtido por secagem em estufa. Devido à sua representatividade, os resultados obtidos no programa de monitorização da Lousã podem ser utilizados como indicadores do teor de humidade e do risco de incêndio de uma região mais vasta do território Português

A modelação dos processos de adsorção e de dessorção e do teor de humidade de equilíbrio abaixo do ponto de saturação das fibras dos combustíveis florestais finos pode resultar em previsões mais precisas dos processos de secagem e humedificação. Com base em resultados laboratoriais e de campo realizados com agulhas mortas da espécie *Pinus pinaster* foram testados modelos de previsão das curvas de sorção e das isotérmicas do teor de humidade de equilíbrio. Os modelos apresentaram uma capacidade de previsão média a elevada para todos os casos testados. O melhor ajuste das curvas de sorção foi obtido através da aplicação dos modelos normalmente aplicados a produtos alimentares e agrícolas e para o teor de humidade de equilíbrio, o melhor ajuste foi obtido pela aplicação dos modelos normalmente aplicados a combustíveis florestais.

## ABSTRACT

Forest fuel moisture content is a fundamental parameter in forest fire research and management given its implication in many aspects of fire risk, ignition, occurrence, spread regime, intensity and extinction. Direct field measurement is a necessary step to have better knowledge of FMC and to assess the applicability of modelling tools. In the present research program, a long term experience with direct field forest fuel moisture content measurement in Central Portugal, performed since 1986, was used to improve FMC modelling.

Spatial and temporal representativity and relations between species are assessed. The number of required samples, the use of a rapid moisture analyser or the use of an oven drying method and associated test time and temperature are compared. It was found that, when FMC is low moisture content values obtained from rapid moisture analysers correlate well with those obtained from oven drying method. Due to its representativity, Lousã monitoring program can be used as an indicator of fuel moisture content and consequently as an indicator of fire risk in a large area of Portuguese territory.

Modelling the adsorption and desorption processes and equilibrium moisture content below fibre saturation of dead fine fuels, for which flammability increases rapidly with decreasing moisture content, can provide an accurate prediction of their drying and wetting processes. Based on laboratory tests on sorption processes and equilibrium moisture content isotherms of *Pinus pinaster* dead needles several models available in the literature applicable to fine forest fuels and agricultural and food products to predict these processes were tested. Laboratorial and field data were used to assess model accuracy in predicting sorption curves and equilibrium moisture content isotherms showing a medium to high predictive ability for almost all cases. The best fitting combinations were obtained with the application of agricultural and food products models for curve sorption and fine forest fuels models for determination of equilibrium moisture.

## ÍNDICE GERAL

<b>1</b>	<b>Introdução .....</b>	<b>14</b>
1.1	Objetivos e organização do estudo .....	14
1.2	Revisão bibliográfica .....	19
<b>2</b>	<b>Análise da variação da humidade dos combustíveis .....</b>	<b>25</b>
2.1	Características dos combustíveis .....	25
2.2	Processos de variação de humidade .....	31
2.3	Modelação da variação de humidade .....	42
2.3.1	Modelação das curvas de sorção.....	42
2.3.2	Modelação matemática do teor de humidade de equilíbrio.....	44
2.4	Aspetos a considerar num plano de amostragem do teor de humidade de combustíveis florestais.....	48
<b>3</b>	<b>Metodologia experimental.....</b>	<b>53</b>
3.1	Amostragem e determinação do teor de humidade.....	53
3.2	Determinação das curvas de sorção e teor de humidade de equilíbrio do <i>Pinus pinaster</i> .....	58
3.3	Parâmetros estatísticos utilizados .....	61
<b>4</b>	<b>Resultados e discussão.....</b>	<b>63</b>
4.1	Análise da metodologia de amostragem e determinação do teor de humidade .....	63
4.1.1	Número de amostras.....	63
4.1.2	Comparação do teor de humidade determinado por secagem em estufa e do teor de humidade determinado pelo analisador rápido de humidade .....	66
4.2	Representatividade das medições efetuadas .....	71
4.2.1	Representatividade territorial em termos de espécies caracterizadas .....	71
4.2.2	Relações entre espécies .....	75
4.2.3	Representatividade espacial em termos de teor de humidade.....	76
4.2.4	Representatividade temporal do teor de humidade medido.....	81
4.3	Modelação das curvas de sorção e do teor de humidade de equilíbrio da espécie <i>Pinus pinaster</i> .....	88
4.3.1	Curvas de dessorção e adsorção das agulhas mortas de <i>Pinus pinaster</i> .....	91
4.3.2	Teor de humidade de equilíbrio das agulhas mortas de <i>Pinus pinaster</i> .....	99

<b>4.4</b>	<b>Efeito da precipitação na variação do teor de humidade .....</b>	<b>107</b>
<b>4.5</b>	<b>Validação dos modelos.....</b>	<b>112</b>
4.5.1	Modelação da variação horária do teor de humidade abaixo do ponto de saturação das fibras do <i>Pinus pinaster</i> .....	112
4.5.2	Modelação da variação diária do teor de humidade abaixo do ponto de saturação das fibras do <i>Pinus Pinaster</i> com base em valores médios diários das condições meteorológicas .....	117
4.5.3	Modelação do efeito da precipitação na variação do teor de humidade.....	120
4.5.4	Modelação da variação horária do teor de humidade abaixo do ponto de saturação das fibras do <i>Pinus Pinaster</i> com base nos dados medidos numa diferente localização.....	122
<b>5</b>	<b>Conclusão .....</b>	<b>130</b>
5.1	conclusão .....	130
5.2	Trabalho Futuro.....	137
<b>6</b>	<b>Bibliografia.....</b>	<b>138</b>



## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 – Características físicas e de vegetação dos locais de medição .....	54
Tabela 2 – Coeficientes “a” e “b” e o respetivo desvio padrão, número de dados “n” e o coeficiente de determinação ajustado ( $R^2$ ) para as relações entre o teor de humidade determinado pelo analisador rápido e o teor de humidade determinado por secagem em estufa .....	68
Tabela 3 – Áreas dos povoamentos florestais por espécie dominante em Portugal (ICNF 2010) .....	72
Tabela 4 – Arbustos presentes nos povoamentos florestais portugueses (ICNF 2001) .....	73
Tabela 5 – Representatividade das espécies arbóreas em Portugal .....	73
Tabela 6 – Representatividade das espécies arbustivas nos povoamentos florestais .....	74
Tabela 7 – Coeficiente de correlação de Pearson entre o teor de humidade das diferentes espécies amostradas na Lousã entre os anos de 1996 e 2012 .....	75
Tabela 8 – Coeficientes “a” e “b” e o respetivo desvio padrão, número de dados “n” e o coeficiente de determinação ajustado ( $R^2$ ) para as relações entre o teor de humidade determinado pelo analisador rápido e o teor de humidade determinado por secagem em estufa .....	76
Tabela 9 – Representatividade espacial das medições do teor de humidade de combustíveis florestais finos na Lousã .....	78
Tabela 10 – Coeficiente de correlação de Pearson entre o teor de humidade medido na Lousã com os restantes três locais (Silvares, Olho Marinho e Viseu) .....	81
Tabela 11 – Coeficientes “a” e “b” e o respetivo desvio padrão, número de dados “n” e o coeficiente de determinação ajustado ( $R^2$ ) para as relações entre locais .....	81
Tabela 12 – Coeficiente de correlação de Pearson entre o teor de humidade de agulhas mortas de <i>Pinus pinaster</i> medido no tempo t e os parâmetros meteorológicos medidos no tempo t e no tempo t menos duas horas (t-2h) .....	86
Tabela 13 – Resultados dos testes executados na câmara climática para o processo de dessorção .....	89
Tabela 14 – Resultados dos testes executados na câmara climática para o processo de adsorção .....	90
Tabela 15 – Tempos de resposta médios ( $\tau$ ) das agulhas mortas de <i>Pinus pinaster</i> , para as temperaturas de 20 °C, 25 °C, 30 °C e 35 °C, variando a humidade relativa do ar na gama entre 10% a 90% .....	92
Tabela 16 – Parâmetros dos modelos para o processo de dessorção .....	94
Tabela 17 – Parâmetros dos modelos para o processo de adsorção .....	94
Tabela 18 – Coeficiente de correlação de Spearman entre os tempos de resposta ( $\tau$ ) das agulhas mortas de <i>Pinus pinaster</i> e parâmetros caracterizadores dos ensaios para o processo de dessorção .....	97
Tabela 19 – Coeficiente de correlação de Spearman entre os tempos de resposta médios ( $\tau$ ) das agulhas mortas de <i>Pinus pinaster</i> e parâmetros caracterizadores dos ensaios para o processo de adsorção .....	97

Tabela 20 – Coeficientes “a” e “b” e o respectivo desvio padrão, número de dados “n” e o coeficiente de determinação ajustado ( $R^2$ ) para a relação entre os tempos de resposta e a temperatura do ensaio para o processo de dessorção.....	98
Tabela 21 – EMC de agulhas mortas de <i>Pinus pinaster</i> determinado para as temperaturas de 20 °C, 25 °C, 30 °C e 35 °C, variando a humidade relativa do ar na gama entre 10% a 90% nos processos de adsorção e dessorção.....	99
Tabela 22 – Parâmetros dos modelos para o processo de dessorção .....	103
Tabela 23 – Parâmetros dos modelos para o processo de adsorção .....	104
Tabela 24 – Coeficiente de correlação de Spearman entre o aumento do teor de humidade e os parâmetros precipitação, variação da precipitação e teor de humidade inicial.....	108
Tabela 25 – Coeficientes “a” e “b” e o respectivo desvio padrão, número de dados “n” e o coeficiente de determinação ajustado ( $R^2$ ) para o modelo 1 de contabilização do efeito da precipitação na variação do teor de humidade.....	110
Tabela 26 – Coeficientes “a” e “b” e o respectivo desvio padrão, número de dados “n” e o coeficiente de determinação ajustado ( $R^2$ ) para o modelo 2 de contabilização do efeito da precipitação na variação do teor de humidade.....	110
Tabela 27 – Coeficientes “a” e “b” e o respectivo desvio padrão, número de dados “n” e o coeficiente de determinação ajustado ( $R^2$ ) para o modelo 3 de contabilização do efeito da precipitação na variação do teor de humidade.....	111
Tabela 28 – Resultados da validação dos modelos da variação horária do teor de humidade abaixo do ponto de saturação das fibras – PSF do <i>Pinus Pinaster</i> .....	114
Tabela 29 – Resultados da validação do modelo da exponencial combinada com correção da temperatura no primeiro tempo de resposta ( $\tau_1$ ) .....	116
Tabela 30 – Resultados da validação dos modelos da variação diária do teor de humidade abaixo do ponto de saturação das fibras – PSF do <i>Pinus Pinaster</i> .....	120
Tabela 31 – Resultados da validação dos modelos da contabilização do efeito da precipitação na variação do teor de humidade.....	122
Tabela 32 – Resultados da validação para o teste 3 e 4 com uma plantação antiga com tratamento silvícola (PIN1).....	124
Tabela 33 – Resultados da validação para o teste 3 e 4 com uma plantação de regeneração natural sem tratamento silvícola (PIN4) .....	125
Tabela 34 – Resultados da validação para o teste 5 com uma plantação antiga com tratamento silvícola (PIN7) .....	126
Tabela 35 – Resultados da validação para o teste 5 com uma zona com corte de árvores (PIN8).....	128

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 – Processos envolvidos na entrada e saída de água de um combustível florestal .....	32
Figura 2 – Representação dos vários tempos de resposta até ser atingido o teor de humidade de equilíbrio – EMC. Os quatro tempos de resposta correspondem a $E = 0.368, 0.135, 0.050,$ e $0.018,$ respetivamente (Fonte: Nelson <i>et al.</i> 2008). .....	39
Figura 3 – Representação esquemática da combinação de diferentes equações exponenciais na evolução da humidade evaporável num combustível florestal .....	42
Figura 4 – Localização e fotografias dos locais de medição do teor de humidade.....	54
Figura 5 – Fotografias dos procedimentos de recolha e determinação do teor de humidade de combustíveis florestais desenvolvidos na Lousã e em Viseu. ....	57
Figura 6 – Câmara climática, balança de precisão e sistema de aquisição de dados .....	59
Figura 7 – Exemplo de um teste de dessorção e de um teste de adsorção com cerca de 72 horas, a uma temperatura constante de 25 °C e humidade relativa de 50%. ....	60
Figura 8 – Erro do procedimento de amostragem realizado na Lousã e número de amostras que seriam necessárias para obter um erro de 1%, 5% e 10% e um nível de confiança de 95% para algumas das espécies estudadas no ano de 2011. A linha horizontal tracejada refere-se à localização das 4 amostras. As linhas a preto, vermelho e verde referem-se às linhas de tendência para os erros de 1%, 5% e 10%, respetivamente. ....	65
Figura 9 – Erro entre a determinação do teor de humidade por secagem em estufa e pelo analisador rápido de humidade e a sua relação com o teor de humidade determinado por secagem em estufa .....	66
Figura 10 – Relação entre o teor de humidade determinado por secagem em estufa e pelo analisador rápido, baseada na totalidade dos dados entre 2004 e 2011. As rectas representadas correspondem à equação (28). ....	67
Figura 11 – Relação entre o teor de humidade determinado por secagem em estufa e pelo analisador rápido, baseada nas medições do teor de humidade com resultados inferiores a 30%. . As rectas representadas correspondem à equação (28). ....	67
Figura 12 – Evolução do erro em ordem ao tempo de análise para uma temperatura de secagem no analisador rápido de 105°C e de 145°C. Os segmentos verticais indicam o intervalo de confiança de 95%.....	70
Figura 13 – Zonas do território português.....	71
Figura 14 – Localização das estações meteorológicas no território nacional.....	77
Figura 15 – Representatividade espacial das medições do teor de humidade de combustíveis florestais finos mortos e vivos na Lousã .....	79
Figura 16 – Média mensal do teor de humidade das espécies arbóreas mortas e vivas ( <i>Pinus pinaster</i> e <i>Eucalyptus globulus</i> ) e arbustivas ( <i>Calluna vulgaris</i> e <i>Chamaespartium tridentatum</i> ), medidos na	

Lousã considerando o período total de análise (1996 – 2012). As linhas verticais indicam o intervalo de confiança de 95% .....	82
Figura 17 – Variação diária (entre as 7h00 e as 24h00) do teor de humidade de agulhas mortas de <i>Pinus pinaster</i> e dos parâmetros meteorológicos medidos na estação meteorológica mais próxima .....	86
Figura 18 – Média horária (1961-1990) da temperatura e da humidade relativa do ar entre as 5h00 e as 24h00 para a estação meteorológica da Lousã.....	87
Figura 19 – Curvas de dessorção de agulhas mortas de <i>Pinus Pinaster</i> da fração de água dessorvível, E, versus tempo, para as temperaturas de 20 °C, 25 °C, 30 °C e 35 °C, variando a humidade relativa do ar na gama entre 10% a 90% .....	91
Figura 20 – Curvas de adsorção de agulhas mortas de <i>Pinus Pinaster</i> da fração de água adsorvível, E, versus tempo, para as temperaturas de 20 °C, 25 °C, 30 °C e 35 °C, variando a humidade relativa do ar na gama entre 10% a 90% .....	92
Figura 21 – Curvas de adsorção e dessorção de agulhas mortas de <i>Pinus Pinaster</i> obtidas através da aplicação do modelo da Exponencial combinada e comparação com o modelo de Byram (exponencial pura) e modelo Dois-Termos.....	95
Figura 22 – Representação gráfica da relação entre o primeiro tempo de resposta ( $\tau_1$ ) e a temperatura do ensaio para o processo de dessorção e adsorção.....	98
Figura 23 – Teor de humidade de equilíbrio – EMC de agulhas mortas de <i>Pinus Pinaster</i> determinado para as temperaturas de 20 °C, 25 °C, 30 °C e 35 °C, variando a humidade relativa do ar na gama entre 10% a 90% nos processos de adsorção e dessorção. Estimativas obtidas pelos modelos de Van Wagner e Halsey modificado. ....	100
Figura 24 – Comparação dos dados do teor de humidade de equilíbrio – EMC de agulhas mortas de <i>Pinus Pinaster</i> medido, modelado e previsto por estudos anteriores para o processo de dessorção. Valores modelados obtidos pelo modelo de Van Wagner.....	102
Figura 25 – Comparação dos dados do teor de humidade de equilíbrio – EMC de agulhas mortas de <i>Pinus Pinaster</i> medido, modelado e previsto por estudos anteriores para o processo de adsorção. Valores modelados obtidos pelo modelo de Van Wagner.....	102
Figura 26 – Distribuição aleatória dos valores residuais resultante da aplicação do modelo de Van Wagner e distribuição sistemática dos valores residuais resultante da aplicação do modelo de Zuritz ajustados aos valores medidos do teor de humidade de equilíbrio – EMC para os processos de dessorção e adsorção de agulhas mortas de <i>Pinus pinaster</i> para as temperaturas de 20 °C, 25 °C, 30 °C e 35 °C e para a humidade relativa entre 10% e 90%.....	105
Figura 27 – Representação gráfica dos modelos de contabilização do efeito da precipitação na variação do teor de humidade .....	110
Figura 28 – Valores horários de temperatura e humidade relativa do ar verificados na estação meteorológica de Viseu do Instituto Português do Mar e Atmosfera durante o período de amostragem .....	113

Figura 29 – Comparação entre os valores de humidade dos combustíveis medidos e os valores modelados.....	113
Figura 30 – Comportamento genérico dos modelos de sorção avaliados no presente estudo.....	118
Figura 31 – Valores médios diários da temperatura e humidade relativa do ar verificados na estação meteorológica da Lousã do Instituto Português do Mar e Atmosfera durante o período de amostragem .....	118
Figura 32 – Comparação entre os valores de humidade medidos e os valores modelados. Os valores modelados foram obtidos através da aplicação da curva de sorção baseada no modelo de Byram (exponencial pura) e a determinação do teor de humidade de equilíbrio – EMC através do modelo de Van Wagner.....	119
Figura 33 – Comparação entre os valores de humidade medidos e os valores modelados de acordo com o efeito da precipitação na variação do teor de humidade. ....	121
Figura 34 – Comparação entre os valores de humidade medidos e os valores modelados para o teste 3 e 4 com uma plantação antiga com tratamento silvícola (PIN1). Os valores modelados foram obtidos através da aplicação da curva de sorção baseada no modelo da exponencial combinada e a determinação do teor de humidade de equilíbrio – EMC através do modelo de Van Wagner. ....	123
Figura 35 – Comparação entre os valores de humidade medidos e os valores modelados para o teste 3 e 4 com uma plantação de regeneração natural sem tratamento silvícola (PIN4). Os valores modelados foram obtidos através da aplicação da curva de sorção baseada no modelo da exponencial combinada e a determinação do EMC através do modelo de Van Wagner. ....	125
Figura 36 – Comparação entre os valores de humidade medidos e os valores modelados para o teste 5 com uma plantação antiga com tratamento silvícola (PIN7). Os valores modelados foram obtidos através da aplicação da curva de sorção baseada no modelo da exponencial combinada e a determinação do teor de humidade de equilíbrio – EMC através do modelo de Van Wagner. ....	126
Figura 37 – Comparação entre os valores de humidade medidos e os valores modelados para o teste 5 com uma zona com corte de árvores (PIN8). Os valores modelados foram obtidos através da aplicação da curva de sorção baseada no modelo da exponencial combinada e a determinação do teor de humidade de equilíbrio – EMC através do modelo de Van Wagner. ....	127

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 OBJETIVOS E ORGANIZAÇÃO DO ESTUDO

O teor de humidade dos combustíveis florestais constitui um dos parâmetros de maior relevância para a investigação e gestão dos incêndios florestais, em particular no que diz respeito aos combustíveis finos mortos, dada a sua influência em praticamente todos os aspetos relacionados com a possibilidade de ignição de um leito combustível, o atraso à ignição, o regime e intensidade de propagação, a possibilidade de extinção e os consequentes danos.

A capacidade de determinar o teor de humidade dos diversos estratos e componentes da vegetação, que pode participar na propagação de um incêndio florestal, reveste-se por isso de grande importância prática e interesse científico. Embora o método de determinação mais preciso seja o da medição direta, por amostragem no terreno, tal nem sempre é viável ou assume interesse, especialmente quando se pretende estimar o teor de humidade da vegetação em locais remotos ou em tempos passados ou futuros. A importância deste assunto tem justificado o desenvolvimento de um grande número de estudos, de que se dá conta parcialmente mais adiante neste capítulo.

O presente trabalho tem como objetivos fundamentais:

1º) A melhoria do conhecimento relativo ao teor de humidade de combustíveis florestais essencialmente com base na recolha de dados de longa duração do Centro de Estudos sobre Incêndios Florestais (CEIF) da Associação para o Desenvolvimento da Aerodinâmica Industrial (ADAI) do Departamento de Engenharia Mecânica da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra (DEM – FCTUC) que possui, desde 1986, um programa de medição do teor de humidade de um conjunto de combustíveis florestais finos, representativos da floresta da Região Centro de Portugal.

2º) A melhoria das ferramentas de previsão do teor de humidade dos combustíveis florestais finos mortos, através da aplicação quer de modelos de cálculo já utilizados na área dos incêndios florestais quer de modelos utilizados noutras áreas científicas e o seu desenvolvimento e adaptação para a previsão do teor de humidade

de uma das espécies mais representativas da floresta portuguesa, o pinheiro bravo (*Pinus pinaster*).

Com vista ao cumprimento do primeiro objetivo, foram utilizados os resultados das medições realizadas na proximidade do aeródromo da Lousã no concelho da Lousã (local designado como Lousã), no período entre 1996 e 2012 e os resultados das medições realizadas na proximidade das povoações de Silvares e de Olho Marinho ambas no concelho da Lousã (locais designados como Silvares e Olho Marinho, respetivamente), no período entre 1996 e 1999, também realizadas pelo CEIF. Foram também utilizados os resultados das medições realizadas na proximidade do aeródromo de Viseu no concelho de Viseu (local designado como Viseu) no período entre 2007 e 2010, no âmbito do Projeto “Caracterização das Propriedades Físico-químicas dos Combustíveis Finos”, financiado pelo Fundo Florestal Permanente, em que intervieram nomeadamente a ADAI e o Departamento de Ambiente da Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Viseu do Instituto Politécnico de Viseu (ESTGV – IPV).

Os combustíveis florestais finos amostrados nos diferentes locais de medição foram a folhagem viva (agulhas verdes) e morta (agulhas caídas à superfície do solo) da espécie *Pinus pinaster* (pinheiro bravo) da família *Pinaceae*, a folhagem viva (folhas verdes) e morta (folhas caídas à superfície do solo) da espécie *Eucalyptus globulus* (eucalipto) da família *Myrtaceae* e as extremidades de folhagem viva das espécies arbustivas *Calluna vulgaris* (urze) da família *Ericaceae*, *Chamaespartium tridentatum* (carqueja) da família *Fabaceae* (estas apenas nos locais de amostragem da Lousã) e *Ulex europeus* (tojo) da família *Leguminosae/Fabaceae* (estas apenas no local de amostragem de Viseu). As folhas mortas de *Pinus pinaster* e de *Eucalyptus globulus* são representativas dos combustíveis arbóreos finos mortos; as folhas vivas de *Pinus pinaster* e de *Eucalyptus globulus* são representativas dos combustíveis arbóreos finos vivos; as folhas e extremidades vivas de *Calluna vulgaris*, de *Chamaespartium tridentatum* e de *Ulex europeus* representam os combustíveis arbustivos finos vivos.

No âmbito do primeiro objetivo, estudou-se a metodologia de amostragem e determinação do teor de humidade e analisou-se a representatividade das medições efetuadas na Lousã em relação ao território nacional português.

No que se refere à análise da metodologia de amostragem e determinação do teor de humidade foram abordados: a determinação do número de amostras necessárias para a caracterização do teor de humidade das espécies numa determinada região assim como o erro que se verifica no procedimento de amostragem já implementado, tendo em conta dados de 2011 do local de amostragem da Lousã; a comparação do teor de humidade determinado por secagem em estufa e do teor de humidade determinado pelo analisador rápido de humidade com base nas medições realizadas entre 2004 e 2011 no local de amostragem da Lousã e com base numa série de testes realizados no local de amostragem de Viseu em 2012.

No que se refere à análise da representatividade das medições efetuadas na Lousã, o objetivo é o de conhecer até que ponto os resultados obtidos no âmbito do programa de medição do teor de humidade do CEIF poderão ser utilizados para representar, em termos de valor, evolução e tendência, parte ou a totalidade da restante floresta portuguesa. Para isso é analisada a representatividade territorial em termos de espécies caracterizadas, no sentido de saber se, através dos dados publicados nos Inventários Florestais Nacionais, as espécies caracterizadas na Lousã são representativas do restante território nacional.

É igualmente analisada a representatividade espacial em termos de teor de humidade, pretendendo-se saber se o teor de humidade dos combustíveis florestais finos medido no local de amostragem da Lousã pode ser usado como um indicador de perigo de incêndio de uma área mais vasta, recorrendo aos dados do teor de humidade medidos entre 1999 e 2008 e aos subíndices do Sistema Canadano de Indexação de perigo de incêndio estimadores do teor de humidade de combustíveis florestais, obtidos em várias estações meteorológicas do território nacional no mesmo período.

Ainda no que se refere à análise da representatividade das medições efetuadas na Lousã, são estudadas as relações que podem ser estabelecidas entre o teor de humidade de diferentes espécies amostradas, nomeadamente, entre o teor de humidade das espécies arbóreas (*Pinus pinaster* e *Eucalyptus globulus*) mortas e vivas e das espécies arbustivas vivas (*Calluna vulgaris* e *Chamaespartium tridentatum*),



entre 1996 e 2012, as quais permitem estimar o teor de humidade de uma espécie, partindo do conhecimento do teor de humidade de outra espécie.

Com base nos dados do teor de humidade medidos no local de amostragem da Lousã e de Viseu, é realizada a análise da representatividade temporal do teor de humidade. Assim é calculado o valor mensal médio do teor de humidade com base em todos os valores registados entre 1996 e 2012 no local de amostragem da Lousã para o mês em questão. Com base nalgumas medições realizadas no local de amostragem de Viseu, é igualmente analisada a variação diária do teor de humidade.

Para o cumprimento do segundo objetivo, foi dada especial atenção às agulhas mortas de *Pinus pinaster*, recaindo sobre este combustível florestal fino o esforço de modelação do teor de humidade. Desta forma, no presente estudo, com base nos resultados laboratoriais desenvolvidos para descrever os processos de adsorção e dessorção, o teor de humidade de equilíbrio e o efeito da precipitação na variação do seu teor de humidade, é obtida uma descrição matemática dos processos de secagem e humidificação que possa ser comparado com dados experimentais.

Os modelos desenvolvidos para a descrição matemática dos processos de secagem e de humidificação das agulhas de *Pinus pinaster* foram validados com base em valores medidos em campo. Para este efeito, no que se refere ao teor de humidade abaixo do ponto de saturação das fibras, foram comparados os valores horários resultantes dos diversos modelos testados, obtidos com base nos valores meteorológicos horários da temperatura e da humidade relativa do ar verificados na estação meteorológica de Viseu, com os valores do teor de humidade de agulhas mortas de *Pinus pinaster* recolhidas durante o mesmo período de primavera em Viseu. Também, no que se refere ao teor de humidade abaixo do ponto de saturação das fibras, foram comparados os valores diários resultantes dos diversos modelos testados, obtidos com base nos valores meteorológicos médios diários (às 12h00) da temperatura e da humidade relativa do ar verificados na estação meteorológica da Lousã, entre os anos de 1999 e 2009, com os valores diários medidos às 12h00 no local de amostragem da Lousã, nos períodos correspondentes ao verão, em que não se verificou a ocorrência de precipitação.

Relativamente à validação dos modelos desenvolvidos para contabilização do efeito da precipitação na variação do teor de humidade, os valores resultantes dos

diversos modelos testados, obtidos com base nos valores meteorológicos registados na estação meteorológica de Viseu, entre 2007 e 2010, foram comparados com os dados do teor de humidade das espécies arbóreas (*Pinus pinaster* e *Eucalyptus globulus*) e arbustivas (*Calluna vulgaris*) medidos em Viseu no mesmo período.

Por fim, no sentido da validação dos valores do teor de humidade modelados abaixo do ponto de saturação das fibras, os dados resultantes dos diversos modelos testados são comparados com valores do teor de humidade de agulhas mortas de *Pinus pinaster* recolhidos por outros autores, nomeadamente, os medidos entre 2001 e 2002 numa zona próxima da cidade de Lugo (Galiza – Espanha).

Apresentam-se depois as principais conclusões assim como a indicação de possíveis trabalhos futuros que podem vir a ser desenvolvidos no âmbito da investigação sobre o teor de humidade de combustíveis florestais.

## 1.2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O teor de humidade de um combustível florestal reveste-se de enorme importância na problemática dos incêndios florestais devido à sua influência em vários aspetos, nomeadamente, no risco de incêndio, no potencial, probabilidade e tempo de ignição de um combustível, na ocorrência de incêndios, na sua propagação, na sua intensidade e extinção (e.g. Blackmarr 1972, Rothermel 1972, Van Wagner 1987, Viegas *et al.* 1992, Dimitrakopoulos and Papaioannou 2001, Chuvieco *et al.* 2004b).

A possibilidade de previsão da evolução do teor de humidade de combustíveis florestais finos reveste-se de elevada importância, principalmente em condições de risco de incêndio elevado, no entanto a obtenção de resultados precisos continua a ser uma tarefa complexa devido à sua interação com os fatores meteorológicos, topográficos e relacionados com a vegetação (Matthews 2013). Tal previsão poderá ser realizada através do recurso a modelos empíricos (e.g. Ruiz 2009), a modelos semi-empíricos, por exemplo baseados na teoria da difusão (e.g. Catchpole *et al.* 2001) ou a modelos físicos (e.g. Nelson 2000; Matthews 2006). Podem ainda ser utilizados outros modelos simplificados (Matthews *et al.* 2010; Sharples e McRae 2011). Além dos referidos anteriormente, podem referir-se outros modelos de previsão do teor de humidade de combustíveis florestais, nomeadamente os desenvolvidos por Rothermel *et al.* (1986), Castro *et al.* (2003), Beck e Armitage (2004), Ruiz (2005), Matthews *et al.* (2006), Slijepcevic e Anderson (2006), Carlson *et al.* (2007), Anderson e Anderson (2009) e Ruiz *et al.* (2010).

Abaixo do ponto de saturação das fibras (PSF) do combustível, na ausência de precipitação, os processos de troca de vapor por adsorção e dessorção (genericamente denominados como processos de sorção) dominam os mecanismos de transferência de água num combustível florestal morto. Estes processos são normalmente caracterizados por um teor de humidade de equilíbrio (*equilibrium moisture content* – EMC ou isotérmica de equilíbrio) e pelo seu tempo de resposta (*timelag*) (Viney e Catchpole 1991). Assim, o teor de humidade de uma partícula de combustível introduzida num ambiente a temperatura e humidade constantes, aumenta ou diminui até atingir um valor constante, o teor de humidade de equilíbrio – EMC, função da temperatura da partícula, da humidade relativa do ar, das

características da partícula de combustível e do facto da partícula se encontrar em fase de adsorção ou de dessorção. Devido ao efeito de histerese, para as mesmas condições ambientais de temperatura e humidade relativa, o teor de humidade de equilíbrio – EMC para o processo de adsorção é, normalmente, inferior ao relativo ao processo de dessorção (Simard 1968a).

Os processos de sorção dos combustíveis florestais mortos têm sido objeto de vários estudos. Foi mostrado existir uma relação entre o tempo de resposta e o teor de humidade dos combustíveis, a temperatura, a espessura do combustível e a velocidade do vento (King e Linton 1962). Estes autores mediram o tempo de resposta de vários combustíveis típicos da Austrália para diversas combinações de temperatura, de humidade e de vento. A utilização de uma curva exponencial de decaimento pressupondo um tempo de resposta constante foi originalmente desenvolvida por Byram (1963), através da utilização da teoria da difusão de Fick.

Para além de uma abordagem geral aos conceitos envolvidos no teor de humidade de combustíveis florestais, em Simard (1968a, 1968b, 1968c) foi abordada mais especificamente a evolução do teor de humidade acima e abaixo do ponto de saturação das fibras – PSF do combustível. Foram assim desenvolvidos modelos de regressão simples para estimar o teor de humidade de equilíbrio – EMC em Simard (1968a) através de valores tabelados. Foram obtidas as equações para o teor de humidade: (i) inferior a 10%, (ii) entre 10% e 50% e (iii) superior a 50%.

Baseando-se na teoria da difusão e na descrição de Byram (1963), Nelson (1969) estudou o efeito da espessura do combustível, da temperatura e da humidade relativa do ar nos tempos de resposta nos processos de secagem de vários combustíveis florestais. Van Wagner (1969) estudou as taxas de secagem de alguns combustíveis florestais finos, sugerindo que variações no tempo de resposta podem resultar da presença de resinas. Este verificou que a remoção de resinas e a meteorização aumentam a taxa de secagem das agulhas de pinheiro.

Blackmarr (1971) determinou o teor de humidade de equilíbrio – EMC para nove tipos de combustíveis mortos da zona Sudeste do Estados Unidos da América submetidos a uma temperatura de 26,7°C (80°F) sob várias combinações de humidade relativa do ar.

Britton *et al.* (1973) utilizaram uma câmara climática para estudar os efeitos da humidade relativa do ar, da temperatura e da velocidade do vento no teor de humidade em gramíneas (*Hilaria mutica*). Estes desenvolveram equações que descrevem as alterações no teor de humidade e no teor de humidade de equilíbrio – EMC para os processos de adsorção e dessorção de acordo com os parâmetros ambientais.

Nos primeiros passos da versão atual do Sistema Canadano de Indexação de perigo de incêndio (*Canadian Forest Fire Weather Index – CFFWI*), Van Wagner (1972) determinou equações separadas para calcular o teor de humidade de equilíbrio – EMC dos processos de dessorção e de adsorção para uma gama variada de combustíveis florestais, concluindo que existiam diferenças entre o teor de humidade de equilíbrio – EMC de diferentes tipos de combustível sendo, no entanto, tais diferenças de pouca importância em termos práticos na definição de modelos de previsão do teor de humidade. Nas equações para a previsão do teor de humidade de equilíbrio – EMC no âmbito do CFFWI desenvolvidas em Van Wagner (1974, 1975, 1977), foi adicionado um termo de correção garantindo que o teor de humidade de equilíbrio – EMC é zero quando a humidade relativa do ar é zero, independentemente da temperatura. Estas equações foram mantidas nas versões do CFFWI em Van Wagner e Picket (1985) e Van Wagner (1987).

Anderson *et al.* (1978) realizaram estudos de sorção para agulhas da espécie *Pinus ponderosa* para determinar o teor de humidade de equilíbrio – EMC e o tempo de resposta. No estudo do tempo de resposta, Anderson *et al.* (1978) e Anderson *et al.* (1985) dividiram a curva de sorção em diferentes tempos de resposta, permitindo, desta forma, ajustes nos modelos de modo a refletir melhor os tempos de resposta reais.

A influência de variáveis ambientais nas taxas de secagem das agulhas mortas de *Pinus banksiana*, nomeadamente da temperatura, humidade relativa do ar, velocidade do vento, teor de humidade inicial e presença de resinas foi analisada em Van Wagner (1979). A influência do teor de humidade inicial no processo exponencial de secagem foi abordada em detalhe em Van Wagner (1982). A influência de outras características do combustível na sua taxa de secagem, nomeadamente da carga e do

arranjo do combustível foram analisadas em Nelson (2008) e da fracturação das partículas e da compactação do leito combustível em Kreye *et al.* (2012).

Através da utilização dos conceitos termodinâmicos associados aos fenómenos de sorção e em relações empíricas entre o teor de humidade de equilíbrio – EMC e a mudança na função da energia livre de Gibbs da água de sorção, Nelson (1984) desenvolveu um modelo semi-físico para determinação do teor de humidade de equilíbrio – EMC. Os parâmetros da equação foram determinados de acordo com os dados de Blackmarr (1971), de Van Wagner (1972) e de Anderson *et al.* (1978). Anderson (1990) determinou os mesmos parâmetros mas para outros combustíveis.

Viney e Catchpole (1991) desenvolveram um modelo para estimar o tempo de resposta de combustíveis florestais através da utilização de dados medidos de folhas mortas de eucalipto. Catchpole *et al.* (2001) propuseram um método para a previsão do teor de humidade de combustíveis florestais a partir de dados de campo, com base na equação de Byram (1963) e no teor de humidade de equilíbrio – EMC previsto em Nelson (1984). Weise (2007), utilizando uma câmara climática, realizou testes de sorção com espécies típicas do Havai sujeitas as diferentes condições de humidade relativa do ar.

Nieto *et al.* (2010) propuseram técnicas de deteção remota para determinação do teor de humidade de equilíbrio – EMC através da utilização do sensor SEVIRI – *Spinning Enhanced Visible and Infrared Imager* para determinação da temperatura e humidade relativa do ar, parâmetros de entrada estes que são utilizados nas equações de Simard (1968), Van Wagner e Pickett (1985) e Nelson (1984).

A utilização de um modelo com duas fases distintas, divididas pelo ponto de saturação das fibras – PSF do combustível, em que cada fase possui um diferente tempo de resposta, sendo que uma fase é controlada pela evaporação e a outra pela difusão foi proposta por Sen Jin (2012).

A medição e posterior modelação do teor de humidade de equilíbrio – EMC de combustíveis florestais finos mortos de quatro das principais espécies da Europa Central, nomeadamente *Picea abies L.*, *Pinus sylvestris L.*, *Fagus sylvatica L.* e *Quercus robur L.* com recurso a diferentes métodos, nomeadamente, uma câmara climática, um dispositivo especial de sorção e um exsiccador foi realizada em Schunk *et al.* (2013). Os resultados obtidos enquadram-se nos valores expectáveis para este tipo de

combustíveis. Schunk *et al.* (2013) refere ainda que, para os testes de determinação do teor de humidade de equilíbrio – EMC, é aconselhável a utilização de uma câmara climática, em detrimento de outro tipo de testes.

Apesar do exposto, os estudos publicados relativos à determinação do teor de humidade de equilíbrio – EMC de combustíveis florestais não são numerosos. No entanto, foram identificados vários trabalhos com objetivos similares sobre produtos agrícolas e alimentares. Em termos de teor de humidade de equilíbrio – EMC, existem na literatura várias equações para correlacionar o teor de humidade de equilíbrio – EMC de produtos agrícolas e alimentares com a humidade relativa do ar e com a temperatura do material. Relativamente a estas equações, existem abordagens teóricas tais como as apresentadas em Dabrowski (2001) e abordagens empíricas ou semi-empíricas, com necessidade de determinar alguns parâmetros com base em dados experimentais, tais como as adotadas como normas pela Sociedade de Agricultura e Engenharia Biológica (*American Society of Agricultural and Biological Engineers – ASABE*).

Também os estudos publicados relativamente aos processos de sorção de combustíveis florestais não são numerosos. No entanto, mais uma vez, foram identificados vários trabalhos com objetivos similares relativos a produtos agrícolas e alimentares, nomeadamente na aplicação das equações de secagem e humidificação de camada fina (*thin-layer*). De uma forma geral, a secagem ou humidificação de camada fina significa que as partículas secam ou humidificam como uma fina camada pelo que, devido à sua estrutura, a distribuição de temperatura pode ser assumida como sendo uniforme (Erbay *et al.* 2009). Assim, os processos de sorção de combustíveis florestais poderão ser avaliados de acordo com alguns modelos de secagem e humidificação de camada fina, nomeadamente os modelos semi-teóricos identificados em Jayas *et al.* (1991) e Erbay *et al.* (2009). A utilização destes modelos para materiais lenhinocelulósicos está descrita em Phanphanich *et al.* (2010).

No âmbito das metodologias para a determinação do teor de humidade, Countryman e Dean (1979), Norum e Miller (1984), Rice (1989) Brenner (2002), Pollet e Brown 2007 e Zahn e Henson (2011) desenvolveram manuais de campo com a síntese dos procedimentos de recolha e determinação do teor de humidade de combustíveis florestais.

A análise do período de tempo necessário para o ensaio gravimétrico de determinação do teor de humidade com secagem em estufa foi realizada em Viegas *et al.* (1992) e Matthews (2010). Neste último foi analisada a temperatura adequada de secagem em estufa para o ensaio pelo método gravimétrico. As medições mostraram que a temperatura de secagem possui um efeito significativo no valor final do teor de humidade das espécies analisadas tendo sido verificadas diferenças de 3.5% entre a secagem a 60 °C e a 105 °C.

A comparação do teor de humidade de espécies vivas determinado por secagem em estufa e do teor de humidade determinado por um analisador rápido de humidade foi realizada em Jolly (2011).



## 2 ANÁLISE DA VARIAÇÃO DA HUMIDADE DOS COMBUSTÍVEIS

### 2.1 CARACTERÍSTICAS DOS COMBUSTÍVEIS

Pode definir-se combustível florestal como o material orgânico, vivo ou morto, que pode ser consumido num incêndio florestal. Trata-se de um dos principais fatores do ambiente do fogo, sendo o único passível de modificação por parte do homem.

A energia libertada pela combustão de um combustível florestal tem grande influência na velocidade de propagação, no nível de intensidade de um incêndio e na dificuldade em combatê-lo, sendo até, muitas vezes, o fator principal que determina a possibilidade de ocorrerem comportamentos extremos.

De uma forma geral, as espécies de combustíveis florestais não existem isoladamente mas sim associadas entre si, em formações combustíveis, como por exemplo, pinhal com coberto arbustivo, eucaliptal sem coberto arbustivo, entre outros. Cada formação combustível tem características distintas que, sob determinadas condições ambientais, originarão comportamentos do fogo específicos.

Os combustíveis florestais, de uma forma geral, podem classificar-se segundo as classes de vivos e de mortos. Esta diferenciação é muito importante, sendo os combustíveis florestais mortos, principalmente os finos, responsáveis por alimentar os incêndios florestais, determinando em larga escala a velocidade e a intensidade de propagação do incêndio (Norum e Miller 1984).

Os combustíveis florestais vivos têm também um papel importante na ignição e propagação dos incêndios, influenciando a dificuldade da sua supressão, em função do teor de humidade e da inflamabilidade dos compostos químicos neles incorporados.

Outro critério de classificação dos combustíveis florestais é o tamanho e a forma das partículas pois influenciam diretamente o comportamento dos incêndios, uma vez que determinam a razão superfície/volume. Quanto maior for a razão superfície/volume, mais rápida será a ignição e a combustão do combustível. A razão entre superfície e volume possui valores de cerca de  $46.4 \text{ cm}^{-1}$  para o *Pinus pinaster*,  $56.9 \text{ cm}^{-1}$  para o *Eucalyptus globulus*, entre  $47.1 \text{ cm}^{-1}$  (diâmetro inferior a 0.25 cm) e  $9.6 \text{ cm}^{-1}$  (diâmetro entre 0.25 cm e 0.60 cm) para a espécie arbustiva *Chamaespartium tridentatum* e entre  $95.6 \text{ cm}^{-1}$  (diâmetro inferior a 0.25 cm) e  $10.0 \text{ cm}^{-1}$  (diâmetro

entre 0,25 cm e 0,60 cm) para a espécie arbustiva *Calluna vulgaris* (Fernandes e Rego 1998).

Relativamente ao tamanho, os combustíveis são divididos em combustíveis finos ou ligeiros (diâmetro inferior a 0.6 cm), combustíveis regulares (diâmetro inferior a 2.5 cm e superior a 0.6 cm), combustíveis médios (diâmetro inferior a 7,5 cm e superior a 2.5 cm) e combustíveis grossos ou pesados (diâmetro superior a 7,5 cm) (e.g. Ribeiro 2011). No presente estudo iremos considerar exclusivamente os combustíveis finos, por serem os que têm um papel mais importante nas fases de ignição e de propagação de um incêndio.

Dado que a dimensão dos combustíveis está igualmente relacionada com a rapidez de resposta às alterações das condições ambientais, isto é, com o tempo de resposta, os combustíveis florestais mortos podem igualmente ser divididos em combustíveis de 1 hora, 10 horas, 100 horas e 1000 horas (e.g. Ribeiro 2011).

Uma abordagem possível de classificação de uma formação combustível é a sua divisão em três estratos ou grupos, consoante a sua localização no espaço: combustíveis do solo, combustíveis superficiais e combustíveis das copas (e.g. Nelson 2001).

Enquanto combustíveis do solo, poderão referir-se o húmus, as raízes e os troncos podres sob a camada mais fresca de manta morta. Normalmente estes combustíveis encontram-se compactados e parcialmente decompostos, podendo a profundidade desta camada variar consoante as espécies presentes, a idade da formação combustível e as condições climáticas, entre outras.

Os combustíveis superficiais englobam a vegetação herbácea, a vegetação arbustiva e a manta morta. As herbáceas caracterizam-se por um aumento gradual da sua disponibilidade para combustão com o desenrolar da época estival. Os ciclos vegetativos destes combustíveis fazem com que o seu teor de humidade passe de valores muito elevados, para valores muito reduzidos após a sua morte. Estes combustíveis apresentam relações superfície/volume bastante elevadas, originando velocidades de propagação de incêndios elevadas. A sua altura, a sua carga combustível e percentagem de partes mortas correlacionam-se bem com os indices de risco de incêndio e com a área ardida numa determinada região (Viegas *et al.* 2002)

As espécies arbustivas encontradas em Portugal apresentam características marcadamente pirófitas, ou seja, as suas propriedades químicas, físicas e ecológicas mostram-se perfeitamente adaptadas a um ambiente marcado pela ocorrência periódica de incêndios. Algumas destas características são: elevado teor em compostos voláteis, elevadas razões superfície/volume, elevada acumulação de combustíveis mortos nas copas das plantas, originando um estrato combustível pouco compacto e muito arejado, e estratégias regenerativas após incêndio, possuindo estruturas regenerativas contendo gomos em estado latente mesmo debaixo do colo da planta. Após a passagem do fogo, as reservas nutritivas armazenadas nessas estruturas são rapidamente mobilizadas e os gomos latentes são libertados do seu estado de dormência, possibilitando a reprodução assexuada da planta e recolonização após fogo. O elevado teor de voláteis permite a combustão destas espécies com grande intensidade mesmo quando o seu teor de humidade ultrapassa os 100%. A manta morta (agulhas, folhas, ramos, cascas e outros) aqui referida é aquela suficientemente recente para não se encontrar muito decomposta e compactada e onde a forma primitiva das partículas de combustível ainda é reconhecível. Estes combustíveis assumem particular importância devido ao facto de os incêndios se propagarem principalmente por este estrato. Normalmente a folhada de espécies folhosas apresenta-se mais compactada do que a resultante de pinheiro bravo ou manso. Em contrapartida algumas espécies resinosas como os cedros e o pinheiro-silvestre originam folhadas compactas devido à reduzida dimensão e forma das suas agulhas.

Os combustíveis das copas consistem nas folhas e ramos finos (vivos ou mortos) existentes nas copas das árvores e que podem ser consumidos num fogo de copas.

Por forma a caracterizar corretamente um combustível florestal existem alguns aspetos que devem ser tidos em consideração, nomeadamente: a carga, o tamanho e forma, o estado de compactação, a continuidade horizontal e vertical, as propriedades químicas que definem a inflamabilidade e a sua combustibilidade e teor de humidade.

A carga de um combustível florestal pode ser dividida em fitomassa, carga potencial e carga disponível. A fitomassa é toda a matéria vegetal, viva ou morta, que se encontra acima do solo mineral, constituindo a carga total, diferindo da biomassa

na medida em que as raízes e a matéria animal não estão incluídas e o material vegetal morto está. A carga potencial é a quantidade de combustível que poderia ser consumida no incêndio mais intenso que se poderia esperar num determinado local. A carga disponível é a quantidade de combustível que se espera que seja consumida sob determinadas condições ambientais (e.g. Ribeiro 2011). Por exemplo, numa plantação de *Pinus pinaster* com cerca de 15 anos de idade, a carga de combustível existente nas copas é de cerca de 5.3 ton.ha<sup>-1</sup> enquanto que na superfície do solo da plantação a carga é de cerca de 21.4 ton.ha<sup>-1</sup> para combustíveis finos, 2.6 ton.ha<sup>-1</sup> de combustíveis médios e 3.6 ton.ha<sup>-1</sup> de combustíveis medianamente grossos. Numa plantação de *Eucalyptus globulus* com cerca de 7 anos de idade, a carga de combustível existente nas copas é de cerca de 7.7 ton.ha<sup>-1</sup> enquanto que na superfície do solo da plantação a carga é de cerca de 7.6 ton.ha<sup>-1</sup> para combustíveis finos, 5.6 ton.ha<sup>-1</sup> de combustíveis médios e 3.8 ton.ha<sup>-1</sup> de combustíveis medianamente grossos (e.g. Ribeiro 2011). A carga da folhada superior da superfície de uma plantação de *Pinus pinaster* possui valores entre 1.5 ton.ha<sup>-1</sup> e 8.6 ton.ha<sup>-1</sup> com média de 5.7 ton.ha<sup>-1</sup> para a carga da folhada superior e entre 2.0 ton.ha<sup>-1</sup> e 25.2 ton.ha<sup>-1</sup> com média de 10.6 ton.ha<sup>-1</sup> para a carga da folhada inferior. Em termos totais, a carga da folhada da superfície de uma plantação de *Pinus pinaster* possui uma média de 16.3 ton.ha<sup>-1</sup> com valores entre 5.1 ton.ha<sup>-1</sup> e 32.1 ton.ha<sup>-1</sup> (Fernandes *et al.* 2002).

A compactação influencia a quantidade de oxigénio que chega às partículas em combustão e a facilidade de transferência de calor para as partículas situadas à frente da frente de chama. Quanto menor for a compactação, menor será o teor de humidade das partículas do combustível e maior a quantidade de oxigénio disponível para a combustão e, conseqüentemente, maior será a velocidade de propagação.

A continuidade diz respeito à distribuição espacial dos combustíveis e divide-se em continuidade horizontal, decisiva na evolução de um incêndio, influenciando a dimensão da área ardida, e em continuidade vertical, que traduz de forma direta o arranjo vertical dos combustíveis e a distância a que estes se encontram uns dos outros, condicionando a propagação do fogo em altura, nomeadamente a eventual transição do fogo de superfície para fogo de copas. A interrupção da continuidade horizontal, através da construção de faixas corta/fogo (aceiros) é uma das técnicas de gestão de combustíveis mais utilizada, principalmente nas áreas montanhosas

(Xanthopoulos *et al.* 2006). A sua eficácia é no entanto limitada e está dependente da aplicação de outras estratégias de gestão florestal (Pita *et al.* 2010). O aspeto de continuidade vertical, é abordado em Fernandes (2009), onde a partir dos dados do Inventário Florestal Nacional Português, combinando os tipo de coberto arbustivo e a estrutura dos povoamentos florestais, nomeadamente a sua densidade e altura, e traduzindo estes dados em modelos de combustível.

Em Cohen *et al.* 2003 são mencionados, em Portugal, para as agulhas mortas de *Pinus pinaster*, valores da razão superfície/volume de  $41.7 \text{ cm}^{-1}$  a  $49.9 \text{ cm}^{-1}$ , da massa específica de  $690 \text{ kg.m}^{-3}$  e do poder calorífico superior de  $21.4 \text{ kJ.kg}^{-1}$ . Para as folhas mortas de *Eucalyptus globulus* são mencionados valores da razão superfície/volume de  $56.9 \text{ cm}^{-1}$  e da massa específica de  $650 \text{ kg.m}^{-3}$ . Para a *Calluna vulgaris* são mencionados valores da razão superfície/volume de  $10.0 \text{ cm}^{-1}$  (diâmetro entre 0.2 cm e 0.6 cm) a  $95.6 \text{ cm}^{-1}$  (diâmetro menor que 0.2 cm) e da massa específica de  $227 \text{ kg.m}^{-3}$  (diâmetro menor que 0.2 cm) a  $440 \text{ kg.m}^{-3}$  (diâmetro menor que 0.6 cm). Para a *Chamaespartium tridentatum* são mencionados valores da razão superfície/volume de  $42.6 \text{ cm}^{-1}$  (diâmetro menor que 0.6 cm) a  $96.0 \text{ cm}^{-1}$  (diâmetro entre 0.2 cm e 0.6 cm) e da massa específica de  $489 \text{ kg.m}^{-3}$  (diâmetro menor que 0.2 cm) a  $765 \text{ kg.m}^{-3}$  (diâmetro entre 0.2 cm e 0.6 cm). Para o *Ulex europeus* são mencionados valores da massa específica de  $356 \text{ kg.m}^{-3}$  a  $652 \text{ kg.m}^{-3}$  ambos para diâmetros menores que 0.2 cm. Adicionando ao referido anteriormente, de acordo com os dados proveniente de Espanha, são mencionados valores do poder calorífico superior para a *Calluna vulgaris* entre  $21.8 \text{ kJ.kg}^{-1}$  (diâmetro menor que 0.2 cm) e  $22.9 \text{ kJ.kg}^{-1}$  (diâmetro menor que 0.6 cm), para a *Chamaespartium tridentatum* entre  $21.8 \text{ kJ.kg}^{-1}$  e  $23.4 \text{ kJ.kg}^{-1}$  ambos para diâmetros menores que 0.2 cm e para o *Ulex europeus* de  $20.3 \text{ kJ.kg}^{-1}$  (Cohen *et al.* 2003).

A composição química dos combustíveis condiciona a sua inflamabilidade e combustibilidade, afetando assim a intensidade do fogo e a sua velocidade de propagação. A inflamabilidade de um combustível caracteriza a maior ou menor facilidade com que este entra em combustão na presença de uma fonte energética. O tempo de inflamação de espécies vegetais varia com o teor de humidade e dos extrativos voláteis. Quanto mais elevado for o teor de humidade, maior é o tempo de inflamação, havendo, para cada espécie, valores do teor de humidade a partir dos

quais passa a ser muito difícil ocorrer inflamação. Outra das características fundamentais de um incêndio florestal e dos respetivos combustíveis é a combustibilidade que é a propriedade que caracteriza a maior ou menor facilidade com que a frente de chama se propaga no meio combustível (e.g. Ribeiro 2011). Relativamente à inflamabilidade e à combustibilidade, existem vários estudos que apresentam valores para os combustíveis florestais aqui abordados, Viegas e Viegas (1997), Viegas *et al.* (1998) Núñez-Regueira *et al.* (1996), Dimitrakopoulos e Papaioannou (2001), Guijarro *et al.* (2002) , Trindade e Viegas (2002), Ormeno *et al.* (2009) ou Davies e Legg (2011).

## 2.2 PROCESSOS DE VARIAÇÃO DE HUMIDADE

A humidade exerce uma influência considerável sobre os processos de ignição e de combustão dos combustíveis florestais (Nelson 2001). O seu efeito sobre a ignição deve-se ao facto de que, inicialmente, a água necessita de ser aquecida até ao ponto de ebulição e, em seguida, vaporizada antes do combustível atingir a sua temperatura de ignição. Se o teor de humidade do combustível for suficiente, a energia necessária para a ignição poderá ser superior à energia disponível na fonte de calor pelo que esta não ocorrerá. Uma vez iniciada a combustão e por forma a manter o processo, a água presente nos combustíveis adjacentes necessita ser removida, absorvendo parte da energia libertada pela combustão e, eventualmente, reduzindo a taxa de libertação de calor. A presença de água vaporizada influencia igualmente a taxa de combustão devido à diminuição da concentração de oxigénio no ar (em resultado da presença de elevadas quantidades de vapor de água) assim como o tempo de residência da chama sobre o combustível.

Num combustível florestal, a água pode encontrar-se sob diferentes formas, nomeadamente água de adesão, água livre e água de constituição (Reeb 1995).

A água de adesão (também denominada por água ligada) é a água contida na parede celular de um combustível florestal. Quando as paredes das células se encontram saturadas de água de adesão, sem que ainda haja água nos vazios capilares, diz-se que o combustível florestal atingiu o ponto de saturação das fibras – PSF. Para a maioria dos combustíveis florestais, o ponto de saturação das fibras – PSF situa-se entre 30% e 35% (e.g. Viney 1991), sendo que nem todas as células atingem o ponto de saturação das fibras – PSF simultaneamente. Após atingido o ponto de saturação das fibras – PSF, a água começa a ocupar os vazios capilares (lúmens), sendo esta a água livre (também denominada por água capilar).

A água de constituição, encontra-se combinada quimicamente com os principais constituintes do material lenhoso, nomeadamente na parede celular, resultando de ligações químicas fortes, tais como pontes de hidrogénio, não sendo removida em processos de secagem natural.

Em qualquer processo de secagem, a água removida em primeiro lugar é a água livre, retida por forças capilares (inferiores às forças relativas à água de adesão).

De uma forma geral, *vide* Figura 1, os processos físicos que controlam a variação de humidade nos combustíveis florestais finos mortos podem envolver calor latente (evaporação e condensação), troca de vapor de água (adsorção e dessorção), a ocorrência de precipitação e nevoeiro e a possível inundação do combustível por água proveniente do solo ou de outro corpo adjacente (Viney 1991).

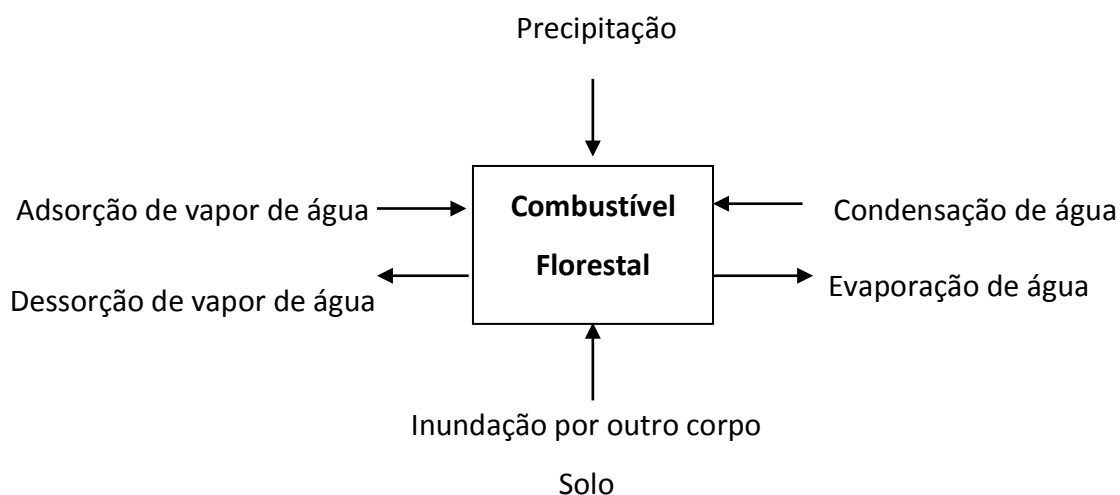


Figura 1 – Processos envolvidos na entrada e saída de água de um combustível florestal

Relativamente à entrada de água, os dois principais processos que causam um aumento da quantidade de água presente num combustível florestal são a precipitação e a condensação do vapor de água presente no ar ou libertado do solo.

A precipitação aumenta, na maioria das vezes significativamente, o teor de humidade dos combustíveis florestais mortos. A contabilização do seu efeito poderá, no entanto, não se basear num simples aumento proporcional à precipitação ocorrida. A ocorrência de uma quantidade reduzida de precipitação poderá, na maioria das situações, saturar a superfície dos combustíveis e, desta forma, a precipitação seguinte terá menos capacidade de humidificar o combustível (Viney 1991).

Alguns aspetos que devem ser considerados em termos da precipitação e da sua influência nos combustíveis florestais são: a orientação do combustível, a existência de escorrência superficial ou de percolação e o efeito das copas na interceção da precipitação e na possibilidade de gotejamento.

A taxa de difusão da água no combustível pode também ser um fator limitante à quantidade de água que entra num combustível, facto que leva nalguns casos a



considerar-se a duração do evento de precipitação em vez da quantidade de precipitação ocorrida (Simard 1968a).

O aumento do teor de humidade por unidade de precipitação diminui com o aumento da quantidade de precipitação e com o aumento do teor de humidade inicial. Assim, à medida que a precipitação aumenta, uma menor proporção desta é armazenada pelos combustíveis florestais; quanto maior for o teor de humidade inicial, menor será a quantidade de água absorvida pelos mesmos (Van Wagner 1987).

Em situações de ausência de precipitação foram reportados valores elevados do teor de humidade de combustíveis florestais finos mortos, excedendo o valor máximo teórico previsto pelos fenómenos de troca de vapor, sendo atribuído tal facto aos efeitos da condensação (Viney e Hatton 1990).

Nalgumas circunstâncias, como por exemplo na variação do teor de humidade dos combustíveis florestais verificado no período noturno, a condensação poderá ter mesmo uma influência mais significativa do que a precipitação (Viney 1991).

Devido, possivelmente, à dificuldade de quantificação, é reduzido o número de trabalhos sobre o efeito da condensação no teor de humidade dos combustíveis florestais. Existem, no entanto, modelos físicos simples, baseados em princípios meteorológicos que quantificam os efeitos da condensação noturna no teor de humidade de combustíveis mortos (e.g. Viney e Hatton 1990).

Num processo de secagem, após a ocorrência de episódios de precipitação ou devido aos efeitos de condensação, verifica-se que o teor de humidade dos combustíveis mortos que se encontrem completamente humedecidos, com água livre dentro e à superfície do combustível, diminui em três etapas envolvendo diferentes mecanismos em cada uma delas (e.g. Schroeder *et al.* 1970; Van Wagner 1979; Nelson 2001):

*i)* a primeira etapa é caracterizada por uma taxa de secagem constante, independente do teor de humidade assim como da natureza higroscópica do combustível. Esta etapa, em que é removida a humidade à superfície do combustível, termina quando o estado da superfície se encontra imediatamente abaixo do ponto de saturação das fibras – PSF. Neste período, a secagem ocorre por evaporação e decorre enquanto que a pressão de vapor no ar envolvente seja inferior à pressão de saturação, seguindo uma taxa proporcional ao gradiente de pressão de vapor. A

ocorrência de vento durante este período não altera o estado final embora altere o tempo que demora a atingi-lo. Quando ocorre evaporação, forma-se na interface entre a água e o ar uma fina camada de ar saturado. Esta camada reduz a taxa de evaporação e apenas permite a saída de água através de uma lenta difusão molecular no ar. O vento quebra esta fina camada, acelerando desta forma o processo de evaporação.

*ii)* a segunda etapa é caracterizada por uma taxa de secagem decrescente e inicia-se quando parte da superfície do combustível não se mantiver no estado saturado. Nesta etapa, ocorre uma diminuição da superfície do combustível em condições de saturação e perda de humidade através de uma lenta remoção de água ligada. Esta etapa termina quando todo o combustível atingir o ponto de saturação das fibras – PSF. O período de secagem a taxa decrescente pode ser descrito como uma etapa de transição pois ocorre variação da taxa de secagem do combustível, entre o valor constante do período anterior e o valor do período seguinte. Em alguns casos e quando o erro envolvido não é significativo, este período poderá ser englobado no período a uma taxa de secagem em queda. Neste período, o vento ainda desempenha um papel significativo no processo de secagem.

*iii)* a terceira etapa é caracterizada por uma taxa de secagem em queda. Nesta etapa são as propriedades higroscópicas dos combustíveis florestais mortos que controlam o processo de secagem. Esta etapa termina quando for atingido o teor de humidade de equilíbrio – EMC. Para esta etapa, podem ser definidas duas fases: a fase de evaporação, na qual a taxa de secagem é controlada pelas variáveis ambientais temperatura, humidade relativa e velocidade do vento; e a fase de difusão, na qual a taxa de secagem é unicamente controlada pela temperatura que por sua vez afeta a pressão de saturação interna e assim o coeficiente de difusão. A etapa à taxa de secagem em queda depende do gradiente entre a pressão de vapor da água de adesão e a pressão do vapor na atmosfera envolvente. À medida que ocorre remoção da humidade abaixo do ponto de saturação das fibras – PSF do combustível, a pressão de vapor da água de adesão vai diminuindo e, conseqüentemente, também o gradiente de pressões.

Uma das seguintes condições deverá ocorrer para que o processo de secagem se mantenha: a pressão do vapor na atmosfera envolvente deve estar

significativamente abaixo da pressão de vapor da água de adesão ou adicionar calor ao combustível por forma a aumentar a temperatura deste e, conseqüentemente, aumentar a pressão de vapor da água de adesão. Ambos os processos ocorrem na natureza, por vezes em consonância, por vezes em sentidos opostos.

À medida que o processo de secagem conduz a um teor de humidade mais reduzido, estabelece-se um gradiente de pressão no combustível e, por forma a manter este gradiente, a pressão do vapor na atmosfera deverá ser significativamente mais baixa. Nestas condições, a difusão molecular na atmosfera envolvente é mais rápida que no combustível, resultando numa cada vez menor tendência de formação de camadas finas de vapor saturado na superfície do combustível. Por esta razão, o efeito da velocidade do vento no processo de secagem diminui gradualmente à medida que o teor de humidade situado abaixo do ponto de saturação das fibras – PSF se afasta deste. Em termos práticos, o efeito nunca desaparece, mas para um teor de humidade reduzido, possui uma importância muito baixa. Se não houver um gradiente de pressão no combustível, não ocorre troca de humidade e estabelece-se um estado de equilíbrio.

A redução da humidade do ar a valores próximos de zero não reduz a humidade do combustível a tal valor. A troca de vapor envolvendo água de adesão não é tão facilmente alcançada como é na água livre ou no vapor presente na atmosfera. Para gradientes de pressão de vapor reduzidos, envolvendo água de adesão, em condições normais de temperatura e pressão, não há em geral energia suficiente para eliminar estes pequenos gradientes.

Como referido anteriormente, é na etapa que ocorre à taxa de secagem em queda que o conceito de teor de humidade de equilíbrio – EMC possui uma aplicação prática mais relevante, isto é na gama de teor de humidade abaixo do ponto de saturação das fibras – PSF dos combustíveis florestais mortos.

O teor de humidade de equilíbrio – EMC pode ser definido como sendo o valor para o qual tende o teor de humidade de um combustível florestal morto, sob condições atmosféricas constantes de temperatura e humidade, durante um período de tempo infinito. A pressão de vapor da atmosfera depende da temperatura e da humidade relativa do ar. A pressão de vapor da água de adesão do combustível depende da temperatura e da humidade do combustível. Desta forma, assumindo que

o combustível e o ar estão à mesma temperatura, para qualquer combinação de temperatura e de humidade relativa do ar, existe um teor de humidade de equilíbrio – EMC. Neste ponto, a pressão de vapor na atmosfera e a pressão de vapor da água de adesão estão em equilíbrio.

Possivelmente, embora este ponto de equilíbrio não ocorra na natureza, podem existir pequenas diferenças de pressão de vapor que não possibilitem a troca de humidade entre atmosfera e combustível.

O teor de humidade de equilíbrio – EMC é principalmente controlado pela humidade relativa do ar envolvente. A temperatura também influencia o teor de humidade de equilíbrio – EMC, no entanto com uma magnitude inferior (Blackmarr 1971; Simard 1968a). Anderson et al. (1978), de acordo com dados previamente medidos, referem que as diferenças do teor de humidade de equilíbrio – EMC resultantes do efeito da temperatura apenas se fazem notar para humidades relativas do ar entre 20% e 80%. Fora desta gama, os valores do teor de humidade de equilíbrio – EMC são iguais. Referem ainda que para a gama entre os 20% e 80%, o efeito da temperatura varia aproximadamente entre  $0.1\%.\text{°C}^{-1}$  e  $0.2\%.\text{°C}^{-1}$ .

O teor de humidade de equilíbrio – EMC pode ser influenciado pela alteração física dos combustíveis mortos devido à sua exposição prolongada às condições ambientais existentes e que possivelmente conduzem à lixiviação de resinas das agulhas (Blackmarr 1971, Van Wagner 1972).

O teor de humidade de equilíbrio – EMC em condições de humedificação (adsorção) é inferior ao teor de humidade de equilíbrio – EMC em condições de secagem (dessorção), facto conhecido como histerese dos fenómenos de sorção. Quando ocorre adsorção, as forças de adesão entre a água e a superfície dos combustíveis e a tensão superficial da água provocam uma “ponte” sobre os pequenos orifícios das fibras deixando-os vazios. As forças que mantêm esta “ponte” são suficientes para equilibrar as forças de adsorção. Quando ocorre dessorção, o mesmo mecanismo provoca a retenção da água na cavidade onde as forças de adesão nos pequenos orifícios compensam a evaporação potencial (Simard 1968a).

Com o aumento da temperatura ocorre uma diminuição da magnitude da histerese (Van Wagner 1972), tendo sido verificadas diferenças entre o teor de

humidade de equilíbrio – EMC dos processos de dessecção e adsorção entre 1.5% e 3.2% (Anderson *et al.* 1978)

O procedimento habitual de determinação laboratorial do teor de humidade de equilíbrio – EMC de materiais higroscópicos, incluindo combustíveis florestais, envolve a colocação do combustível num ambiente com temperatura e humidade constantes, assim permanecendo até que o teor em humidade se aproxime de um valor constante. O processo é então repetido ao longo das gamas comuns de humidade e temperatura encontradas na natureza. Poderá ser efetuado um processo contínuo ou periódico de pesagem por forma a representar a taxa de variação da humidade do combustível ao aproximar-se do teor de humidade de equilíbrio – EMC quer num processo de secagem quer num processo de humidificação.

A taxa de variação da humidade do combustível, ao aproximar-se do teor de humidade de equilíbrio – EMC poderá variar de acordo com o tipo de combustível, o seu tamanho e forma e a compactação do mesmo. Em condições ambientais fixas, para um determinado combustível com um teor de humidade abaixo do ponto de saturação das fibras – PSF, a taxa de secagem ou de humidificação resultante da troca de vapor é, teoricamente, proporcional à diferença entre o seu teor de humidade atual e o teor de humidade de equilíbrio – EMC, seguindo uma trajetória exponencial.

Desta forma, na equação (1),  $E$  é definido como a fração de água evaporável que permanece no combustível no tempo  $t$  (horas),  $m$  é o teor de humidade médio do combustível no tempo  $t$ ,  $m_0$  é o valor de  $m$  para  $t = 0$ ,  $m_e$  é o valor de  $m$  à medida que  $t$  se aproxima do infinito ( $m_e$  é o teor de humidade de equilíbrio – EMC).

$$E_1 = \frac{m - m_e}{m_0 - m_e} \quad (1)$$

A utilização do conceito de teor de humidade de equilíbrio – EMC torna possível estimar, para uma determinada situação ambiental, se a humidade do combustível irá aumentar ou diminuir no sentido do equilíbrio. No entanto, para quantificar a taxa de variação da humidade, deve acrescentar-se o efeito das características do combustível florestal em questão, nomeadamente do seu tempo de resposta às modificações das condições ambientais.

O tempo de resposta de um combustível,  $\tau$ , é um parâmetro característico de todos os processos físicos e químicos que ocorrem a uma taxa exponencial. Assim, partindo da primeira lei de difusão de Fick, os processos de sorção de um combustível florestal em condições ambientais constantes podem ser descritos pela seguinte equação exponencial (Byram 1963):

$$E_1 = e^{\left(\frac{-t}{\tau}\right)} = e^{(-k_1 t)} \quad (2)$$

Onde  $E$  é a fração evaporável de água que permanece no combustível no tempo  $t$  (horas),  $m$  é o teor de humidade médio do combustível florestal no tempo  $t$ ,  $m_0$  é o valor de  $m$  quando  $t = 0$ ,  $m_e$  é o valor de  $m$  à medida que  $t$  se aproxima do infinito ( $m_e$  é aproximadamente o teor de humidade de equilíbrio – EMC),  $\tau$  (horas) é o tempo de resposta e  $k_1$  é a taxa de secagem ou de humidificação ( $k_1 = \tau^{-1}$ ), teoricamente constante em todo o processo de adsorção e dessorção. Assim, em condições laboratoriais, quando um combustível florestal seca (ou humidifica) entre  $m_0$  e  $m_e$ , o tempo necessário para que  $E$  diminua de 1 até  $e^{-1}$  é referido como tempo de resposta ou *timelag*.

Os fatores que influenciam a secagem dos combustíveis florestais e consequentemente o seu tempo de resposta são: a espessura do combustível, a temperatura do ar, o peso específico do combustível, a humidade relativa do ar, a velocidade do vento e o teor de humidade inicial (Nelson 1969). No entanto, partindo da primeira lei de difusão de Fick, teoricamente, as variáveis humidade relativa do ar, velocidade do vento e teor de humidade inicial não possuem qualquer efeito no tempo de resposta em (Byram 1963). Saliencia-se o facto do declive da linearização da equação exponencial (equação (2)) ser independente do ponto de partida, portanto do teor de humidade inicial, sendo esta condição essencial para a sua validade (Van Wagner 1982).

Experimentalmente, com dados do teor de humidade inicial que se estendem desde muito acima do ponto de saturação das fibras – PSF do combustível até abaixo deste valor verifica-se que estes não afetam o processo de secagem (Nelson 1969; Van Wagner 1979; Van Wagner 1982).

A remoção de resinas e a alteração física dos combustíveis diminuí significativamente os tempos de resposta de agulhas de pinheiro (Van Wagner 1969).

O conceito de tempo de resposta poderá igualmente ser aplicado às camadas da manta morta presente no solo, pois estas poderão ter o mesmo tempo de resposta de um combustível com um determinado diâmetro pois ambos perdem humidade à mesma taxa.

Embora a utilização do tempo de resposta seja um método útil para a descrição do processo de secagem de um combustível, existem dificuldades aquando da sua aplicação à humedificação, particularmente para valores acima do teor de humidade de equilíbrio – EMC. Esta situação ocorre pela existência de precipitação ou formação de orvalho, sendo controlada por um conjunto de outros fatores além da dimensão da partícula, das condições ambientais, nomeadamente, o teor de humidade inicial, a duração da precipitação ou da ocorrência de orvalho ou o arranjo físico do combustível (Simard 1968a).

Desta forma, o tempo de resposta é definido como uma medida da aproximação do teor de humidade ao teor de humidade de equilíbrio – EMC. Assim, se um combustível for exposto a condições constantes, o tempo necessário para que se atinja o equilíbrio pode ser dividido em períodos em que a variação do teor de humidade do combustível seja  $1-e^{-1}$ , isto é, aproximadamente 63.2% do valor de partida, configurando assim vários tempos de resposta até ser atingido o teor de humidade de equilíbrio – EMC, tal como apresentado na Figura 2.

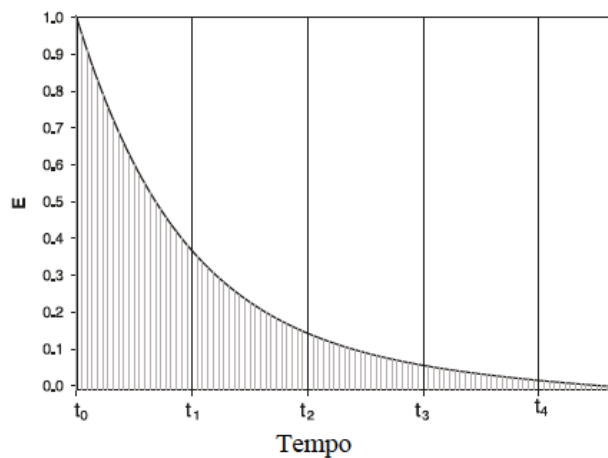


Figura 2 – Representação dos vários tempos de resposta até ser atingido o teor de humidade de equilíbrio – EMC. Os quatro tempos de resposta correspondem a  $E = 0.368, 0.135, 0.050,$  e  $0.018$ , respetivamente (Fonte: Nelson *et al.* 2008).

As curvas de sorção podem seguir outras funções além das puramente exponenciais, podendo estas ser uma combinação de diferentes equações exponenciais ou outro tipo de função (e.g. Anderson *et al.* 1978; Anderson *et al.* 1985).

Assim, as curvas de sorção podem ser partidas em vários tempos de resposta, com  $E$  igual  $e^{-1}$  (0.368),  $e^{-2}$  (0.135),  $e^{-3}$  (0.050) e outras. O primeiro tempo de resposta é definido na figura 2 pelos pontos (0, 1) e  $(t_1, e^{-1})$ , com  $\tau_1 = t_1$ . O segundo tempo de resposta é definido pelos pontos  $(t_1, e^{-1})$  e  $(t_2, e^{-2})$ , com  $\tau_2 = (t_2 - t_1)$ . O terceiro tempo de resposta, é definido pelos pontos  $(t_2, e^{-2})$  e  $(t_3, e^{-3})$ , com  $\tau_3 = (t_3 - t_2)$ .

Apesar de Anderson *et al.* (1978) referir que os tempos de resposta são praticamente iguais entre o processo de dessorção e adsorção, Simard (1968b), refere que os tempos de resposta medidos são superiores para o processo de adsorção.

Os combustíveis vivos, tanto podem contribuir ativamente para a energia produzida na frente de chamas, como podem atuar como um sorvedouro dessa energia, produzindo uma diminuição da velocidade e da intensidade de propagação (Burgan 1979). O teor de humidade da folhagem e dos pequenos ramos é regido pela entrada de água através das raízes e pela perda de água por transpiração. Como as respetivas taxas são controladas por múltiplas variáveis físicas e biológicas, a estimativa do teor de humidade de combustíveis vivos é muito mais complexa que dos combustíveis mortos (Viegas *et al.* 2001). A estrutura das raízes e a fisiologia das folhas são fatores genéticos que afetam a resposta às condições ambientais e meteorológicas (Rice 1989, Pollet e Brown 2007).

O processo de transpiração é controlado por fatores atmosféricos (radiação solar, temperatura, humidade relativa e vento) assim como por fatores específicos da planta (estrutura da folha e a abertura e fecho dos estómatos). Durante a fase de crescimento das folhas estas podem manter um nível adequado de humidade, graças à sua capacidade de abrir ou fechar os estómatos e regular a sua taxa de transpiração.

A absorção pelas raízes é controlada por fatores exteriores à planta tais como o arejamento do solo, a temperatura, a pressão da água e a concentração de solutos, bem como por fatores específicos da planta tais como a dimensão e a distribuição do sistema radicular.

Quando a precipitação é reduzida, é produzida menos biomassa e o teor de humidade máximo nos combustíveis vivos poderá ser menor que nos anos húmidos.



Da mesma forma, se persistirem níveis reduzidos de humidade no solo durante o verão, o teor de humidade dos combustíveis vivos pode decrescer rapidamente. Também o tipo de solo e as condições meteorológicas afetam a época em que recomeça o crescimento das espécies e, conseqüentemente, o aumento da humidade retida pela vegetação. Em situações em que o teor de humidade do solo não é limitante, o novo crescimento começa mais cedo e normalmente atinge níveis de humidade elevados quando o final do inverno e primavera são quentes. Outros fatores que afetam a temperatura do solo e a temperatura do ar, tais como a inclinação, a exposição e a altitude também afetam a quantidade de biomassa resultante do crescimento das espécies, a altura do crescimento das espécies e o teor de humidade dos combustíveis vivos (Pollet e Brown 2007).

Espécies arbustivas esclerofilas apresentam um teor de humidade durante o verão que varia significativamente consoante a espécie e a severidade do período estival. O teor de humidade das folhas das espécies arbóreas é um parâmetro da formação combustível com grande influência na possibilidade de um incêndio de superfície passar para as copas. Normalmente as espécies arbóreas possuem um teor de humidade superior às espécies arbustivas já que o seu sistema radicular se apresenta bastante mais desenvolvido, conseguindo captar água a profundidades superiores relativamente às espécies existentes no sub-bosque.

Com base num estudo realizado em conjunto no centro de Portugal e na Catalunha e que incidiu sobre a vegetação típica da zona Mediterrânica, foi desenvolvida uma classificação de acordo com a variabilidade sazonal do seu teor de humidade (alta, média ou baixa). As espécies do primeiro grupo (*Cistus monpeiliensis*, *C. albidus*, *Rosmarinus officinalis*, *Ulex parviflorus*, *Genista scorpius*, *Erica arborea* e *E. multiflora*) apresentaram a maior variabilidade, com um aumento significativo da humidade na primavera, um declínio acentuado no verão e uma clara recuperação da humidade durante o outono. As espécies do segundo grupo, todas pertencentes ao género *Quercus* (*Q. ilex*, *Q. coccifera* e *Q. suber*) caracterizaram-se por teor de humidade constante ao longo do ano, exceto na primavera em que mostraram um aumento significativo. As espécies do terceiro grupo (*Pistacea lentiscus* e *Pinus halepensis*) mostraram reduzida variação sazonal (Viegas *et al.* 2001).

## 2.3 MODELAÇÃO DA VARIAÇÃO DE HUMIDADE

### 2.3.1 Modelação das curvas de sorção

Para a modelação matemática das curvas de sorção das agulhas mortas de *Pinus pinaster* serão utilizados modelos descritos na bibliografia, nomeadamente o modelo definido pela equação (2), um modelo resultante da combinação de equações exponenciais diferentes assim como modelos de camada fina.

De acordo com a equação de Byram (1963) mas assumindo que as curvas de dessorção e adsorção seguem uma combinação de equações exponenciais diferente, assim é definida a exponencial combinada. Desta forma, no processo de dessorção, a fração de água evaporável ( $E$ ) que permanece no combustível, no tempo  $t$  pode ser descrita pelas equações (3) a (6) e esquematicamente na Figura 3.

$$E_{21} = e^{-k_1 t} \text{ em que } k_1 = \tau_1^{-1} \quad t < \tau_1 \quad (3)$$

$$E_{22} = a \cdot e^{-k_2 t} \text{ em que } a = e^{\frac{\tau_1 - \tau_2}{\tau_2}}; k_2 = \tau_2^{-1} \quad \tau_1 < t < \tau_1 + \tau_2 \quad (4)$$

$$E_{23} = b \cdot e^{-k_3 t} \text{ em que } b = e^{\frac{\tau_1 + \tau_2 - 2\tau_3}{\tau_3}}; k_3 = \tau_3^{-1} \quad \tau_1 + \tau_2 < t < \tau_1 + \tau_2 + \tau_3 \quad (5)$$

$$E_{24} = c \cdot e^{-k_4 t} \text{ em que } c = e^{\frac{\tau_1 + \tau_2 + \tau_3 - 3\tau_4}{\tau_4}}; k_4 = \tau_4^{-1} \quad \tau_1 + \tau_2 + \tau_3 < t < \tau_1 + \tau_2 + \tau_3 + \tau_4 \quad (6)$$

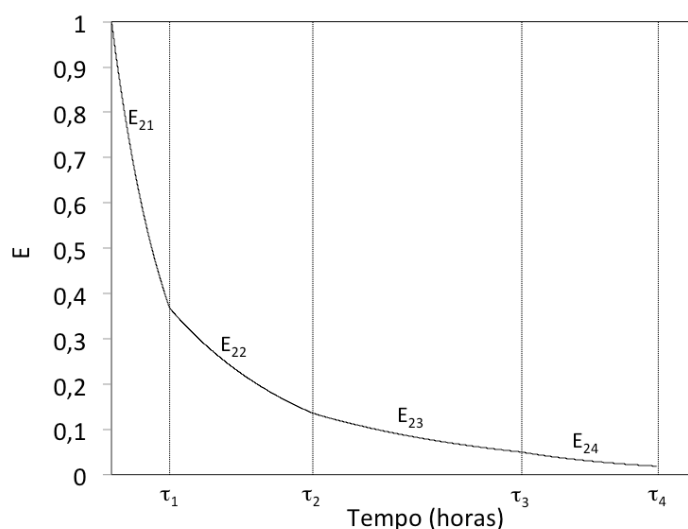


Figura 3 – Representação esquemática da combinação de diferentes equações exponenciais na evolução da humidade evaporável num combustível florestal

Como anteriormente referido, os trabalhos publicados relativamente ao estudo dos processos de sorção de combustíveis florestais não são numerosos. Foram contudo identificados vários estudos sobre produtos agrícolas e alimentares, nomeadamente na aplicação das equações de secagem e humidificação de camada fina, os quais podem ser adequados aos objetivos do presente trabalho, nomeadamente no que se refere à modelação dos processos de sorção.

A teoria da camada fina pressupõe que a secagem ou a humidificação ocorrem numa estrutura de camada fina ou seja numa estrutura tipo fatia (Erbay *et al.* 2009) na qual a distribuição de temperaturas pode ser assumida como sendo uniforme. Pela sua simplicidade e pela necessidade de poucos dados de entrada, as equações de secagem e humidificação de camada fina têm vindo a ser aplicadas a vários tipos de situações (Erbay *et al.* 2009).

Os modelos de camada fina podem ser teóricos, semi-teóricos e empíricos. Os modelos semi-teóricos e empíricos consideram apenas a resistência externa à transferência de humidade entre os elementos em causa e o ar, enquanto os modelos teóricos consideram apenas a resistência interna à transferência de humidade (e.g. Erbay *et al.* 2009). Os modelos semi-teóricos podem ser classificados de acordo com a sua origem, nomeadamente como provenientes da lei de arrefecimento de Newton (e.g. Incropera 2011) (modelo de Lewis e modelo de Page e as suas formas modificadas) ou da 2ª lei da difusão de Fick (e.g. Carslaw and Jaeger 1959) (modelo exponencial de um termo e as suas formas modificadas, modelo exponencial de dois termos e as suas formas modificadas e modelo exponencial de três termos).

Assim, tendo em conta o exposto, foram avaliados alguns modelos semi-teóricos de secagem e humidificação identificados em Jayas *et al.* (1991) e Erbay *et al.* (2009), nomeadamente, o modelo de Page da equação (7) (Page 1949), o modelo de Henderson e Pabis da equação (8) (Henderson e Pabis 1961), o modelo Logarítmico (assimptótico) da equação (9) (Chandra e Singh 1995), o modelo de Midilli da equação (10) (Midilli *et al.* 2002), o modelo de dois termos da equação (11) (Henderson 1974 e Glenn 1978), o modelo de dois termos exponencial da equação (12) (Sharaf-Eldeen *et al.* 1980) e o modelo de Henderson e Pabis modificado da equação (13) (Karathanos 1999). O conceito de processo de sorção puramente exponencial de Byram (1963)

representado pela equação (2) está aplicado em termos de produtos agrícolas e alimentares em Lewis (1921) sendo conhecido como modelo de Lewis (Newton).

$$E_3 = e^{-k_1 t^n} \quad (7)$$

$$E_4 = a e^{-k_1 t} \quad (8)$$

$$E_5 = a e^{-k_1 t} + b \quad (9)$$

$$E_6 = a e^{-k_1 t} + b t \quad (10)$$

$$E_7 = a e^{(-k_1 t)} + b e^{(-k_2 t)} \quad (11)$$

$$E_8 = a e^{(-kt)} + (1 - a) e^{(-kat)} \quad (12)$$

$$E_9 = a e^{(-k_1 t)} + b e^{(-k_2 t)} + c e^{(-k_3 t)} \quad (13)$$

### 2.3.2 Modelação matemática do teor de humidade de equilíbrio

A relação entre o teor de humidade de equilíbrio – EMC das agulhas mortas de *Pinus pinaster* e a temperatura e a humidade relativa do ar será avaliada de acordo com modelos descritos na bibliografia, nomeadamente o modelo de Simard (1968a) (equação (14)), Van Wagner (1975) (equação (15)) e Nelson (1984) (equação (16)). Serão igualmente avaliados alguns modelos utilizados em produtos agrícolas e alimentares.

Simard (1968a), estimou as equações de regressão para a determinação do teor de humidade de equilíbrio – EMC (base seca) de acordo com valores tabelados. As equações de regressão apresentadas em Simard (1968a) são do tipo da equação (14) e encontram-se divididas em patamares de acordo com a humidade relativa do ar (maior que 50%, entre 10% e 50% e menor que 10%). Para o presente estudo apenas é apresentada aquela que obteve o melhor desempenho em Simard (1968a). Embora

nesse trabalho estas equações negligenciem a histerese de sorção, apresentando apenas uma equação para a determinação do teor de humidade de equilíbrio – EMC, no presente estudo, os coeficientes “ $a_i$ ”, “ $b_i$ ”, “ $c_i$ ” e “ $d_i$ ” foram calculados experimentalmente, variando consoante se trate de adsorção ou de dessorção.

$$EMC_1 = \begin{cases} a_1 + b_1(\log RH) + c_1(T), & RH \leq 10\% \\ a_2 + b_2(RH) + c_2(T), & 10 < RH < 50 \\ a_3 + b_3(RH^2) + c_3(RH.T) + d_3(RH), & RH \geq 50 \end{cases} \quad (14)$$

Van Wagner (1972) inicialmente utilizou uma equação semi-empírica para calcular o teor de humidade de equilíbrio – EMC em que os coeficientes variavam de acordo com o processo de adsorção ou dessorção e que correspondia a uma versão reduzida da equação (15), nomeadamente sem o último termo de contabilização do efeito da temperatura.

Van Wagner *et al.* (1975), aquando da apresentação das equações do Sistema Canadano de Indexação de perigo de Incêndio que iria ser utilizado na versão de 1976 do sistema métrico, incluiu na equação (15) um termo para correção do valor do teor de humidade de equilíbrio – EMC de acordo com o efeito da temperatura e assegurando que o teor de humidade de equilíbrio – EMC é aproximadamente zero para qualquer temperatura quando a humidade relativa do ar for zero. Os coeficientes “ $a$ ”, “ $b$ ”, “ $c$ ”, “ $d$ ”, “ $e$ ” e “ $f$ ” foram calculados experimentalmente, variando consoante se trate de adsorção ou de dessorção.

$$EMC_2 = \frac{1}{100} \left[ a(100RH)^b + ce^{(100RH-100)/d} + e(21, 1 - T)(1 - e^{100fRH}) \right] \quad (15)$$

Nelson (1984) desenvolveu um modelo para descrever o teor de humidade de equilíbrio – EMC para os processos de dessorção e adsorção representado pela equação (16). O modelo é baseado na relação exponencial da energia livre de Gibbs da adsorção de água e o teor de humidade de equilíbrio – EMC. A variação da função de Gibbs é uma relação termodinâmica que representa a variação da energia livre quando uma unidade de massa de água é adsorvida por uma quantidade significativa de material celulósico sendo que, devido à sua dimensão, o seu teor de humidade se

mantém inalterado. Geralmente a equação (16) aplica-se a uma gama de humidade relativa do ar entre 10% e 90%, pressupondo que o vapor de água se comporta como um gás perfeito. Os coeficientes “a” e “b” foram calculados experimentalmente, variando consoante se trate de adsorção ou de dessorção.

$$EMC_3 = \frac{1}{a} \ln \left( -\frac{R \cdot T_K}{M \cdot e^b} \ln \left( \frac{RH}{100} \right) \right) \quad (16)$$

Nas equações (14), (15) e (16), o EMC é o teor de humidade de equilíbrio; RH é a humidade relativa do ar; T e T<sub>K</sub> são a temperatura em °C e K, respetivamente; R é a constante universal dos gases perfeitos (1.987 cal.mol<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup>); M é a massa molecular da água (18 g.mol<sup>-1</sup>); “a”, “b”, “c”, “d”, “e” e “f”, são coeficientes específicos das equações.

Tal como anteriormente, foram avaliados alguns modelos utilizados em produtos agrícolas e alimentares. Foram propostas várias equações para correlacionar o teor de humidade de equilíbrio – EMC de produtos agrícolas e alimentares com a humidade relativa do ar e com a temperatura do material. Entre estas equações, existem algumas abordagens teóricas tais como as apresentadas em Dabrowski (2001) e algumas empíricas ou semi-empíricas com necessidade de determinar alguns parâmetros com base em dados experimentais tais como as que são adoptadas como normas pela Sociedade de Agricultura e Engenharia Biológica (*American Society of Agricultural and Biological Engineers – ASABE*), nomeadamente o modelo Oswin modificado da equação (17) (Chen 1990), o modelo Henderson modificado da equação (18) (Thompson *et al.* 1968), o modelo Halsey modificado da equação (19) (Iglesias *et al.* 1976), o modelo Chung-Pfost modificado da equação (20) (Pfost *et al.* 1976). Para materiais lenhinocelulósicos foi também avaliado o modelo de Zuritz da equação (21) (Zuritz 1979), referido nos trabalhos de Avramidis (1989) e Phanphanich *et al.* (2010).

$$EMC_4 = (a - bT) \left[ \frac{RH}{(1 - RH)} \right]^c \quad (17)$$

$$\text{EMC}_5 = \left[ \frac{\ln(1 - \text{RH})}{-a(T + c)} \right]^{1/b} \quad (18)$$

$$\text{EMC}_6 = \left[ \frac{e^{(a-bT)}}{-\ln(\text{RH})} \right]^{1/c} \quad (19)$$

$$\text{EMC}_7 = -\frac{1}{a} \ln \left[ -\frac{(T + b)}{c} \ln(\text{RH}) \right] \quad (20)$$

$$\text{EMC}_8 = \left[ \frac{-T_K \ln(1 - \text{RH})}{a \left(1 - \frac{T_K}{T_C}\right)^b} \right]^{\frac{1}{c T_K^d}} \quad (21)$$

Onde o EMC é o teor de humidade de equilíbrio; RH é a humidade relativa do ar; T e  $T_K$  são a temperatura em °C e K, respetivamente;  $T_C$  é a temperatura crítica da água (647.1K); “a”, “b”, “c” e “d”, são coeficientes específicos das equações.

## **2.4 ASPETOS A CONSIDERAR NUM PLANO DE AMOSTRAGEM DO TEOR DE HUMIDADE DE COMBUSTÍVEIS FLORESTAIS**

Existem vários métodos para estimar o teor de humidade de combustíveis florestais, nomeadamente: a amostragem e determinação direta em campo dos combustíveis florestais (Lopes *et al.* 2006), a utilização de ramos calibrados (Viegas *et al.* 1992 e Nelson 2000), a utilização de índices meteorológicos (Viegas *et al.* 2001) ou a aplicação de técnicas de deteção remota. A amostragem e determinação direta em campo dos combustíveis florestais é uma metodologia onerosa e exaustiva se tiver como objetivo uma boa representatividade espacial e temporal. Por sua vez, a utilização de ramos calibrados produz resultados satisfatórios para a caracterização de combustíveis florestais finos mortos, não sendo no entanto tão aplicável aos combustíveis vivos. A utilização de índices meteorológicos é vantajosa no que respeita à integração de variáveis inerentes ao risco de incêndio, nomeadamente a temperatura e humidade relativa do ar, a velocidade do vento ou a radiação solar, no entanto esta metodologia não mede diretamente o estado da vegetação, sendo também aplicável principalmente a combustíveis florestais mortos. A aplicação de técnicas de deteção remota é uma metodologia adequada para uma representatividade espacial e temporal mais extensa. A maioria dos estudos tem-se baseado em imagens NOAA-AVHRR e atualmente em sensores tais como SPOT-Vegetation e Terra-MODIS (Chuvieco *et al.* 2002; Chuvieco *et al.* 2003, Chuvieco *et al.* 2004a; Chuvieco *et al.* 2004b; Yebra *et al.* 2008). Neste estudo iremos analisar apenas as seguintes duas metodologias que foram utilizadas: a medição direta no terreno e a estimativa por modelos baseados em parâmetros meteorológicos.

Relativamente à amostragem e determinação direta em campo, a qualidade do procedimento e a representatividade da zona em estudo são aspetos essenciais para o sucesso de um plano de amostragem do teor de humidade de combustíveis florestais (Norum e Miller 1984). O plano de amostragem do teor de humidade de combustíveis florestais envolve, em primeiro lugar, a correta escolha da área espacial a caracterizar. A variação espacial das condições meteorológicas é dos principais parâmetros a ter em conta no estabelecimento das fronteiras da zona em estudo. O local de amostragem deve ser representativo da totalidade do combustível florestal a caracterizar. Deve ser



pouco perturbado por acções que produzam alterações da estrutura da vegetação, a menos que as mesmas sejam representativas do combustível florestal (Countryman e Dean 1979, Brenner 2002, Pollet e Brown 2007, Zahn e Henson 2011).

Na selecção dos locais de amostragem devem ser considerados alguns aspetos, nomeadamente: o declive, a exposição, a qualidade do solo, a quantidade e o tamanho dos combustíveis florestais e a presença de espécies recentes ou antigas (Norum e Miller 1984; Rice 1989; Pollet e Brown 2007; Zahn e Henson 2011).

Adicionalmente deverá existir homogeneidade na composição das espécies e da cobertura das copas bem como a proximidade a estações meteorológicas para correlações com parâmetros meteorológicos (Brenner 2002; Pollet e Brown 2007).

A utilização de transectos lineares no procedimento de amostragem, permitem resultados reprodutíveis e representam diferenças em termos de elevação, declive e exposição. As espécies caracterizadas podem incluir combustíveis florestais vivos e/ou mortos ou combustíveis presentes no solo e/ou superficiais e/ou combustíveis das copas (Zahn e Henson 2011).

Dependendo do objectivo do procedimento de amostragem, poder-se-ão amostrar as espécies envolvidas na propagação dos incêndios ou as espécies representativas de toda a zona a caracterizar. Para a compreensão dos efeitos dos incêndios florestais, as espécies a amostrar poderão ser as mais susceptíveis de serem afectadas (Brenner 2002, Norum e Miller 1984).

A variabilidade do teor de humidade em conjunto com a precisão necessária, determinam o número de amostras a obter (Norum e Miller 1984). Countryman e Dean (1979) e Rice (1989) sugerem pelo menos 3 amostras para plantas jovens e 3 amostras para plantas adultas da mesma espécie para cada período de amostragem. Norum e Miller (1984) referem também que, quando ocorrer homogeneidade dos combustíveis num local com pouco declive, possivelmente 3 amostras serão suficientes. Brenner (2002) sugere que sejam recolhidas entre 15 a 20 amostras aleatoriamente em cada período de amostragem. No caso de espécies perenes, Brenner (2002) sugere que sejam recolhidas 6 a 7 amostras das partes novas e antigas da planta. Em Dimitrakopoulos e em Bemmerzouk (1998) e Dimitrakopoulos e Bemmerzouk (2003), foram recolhidas 3 amostras para cada espécie caracterizada e o teor de humidade diário resultou da média das 3 amostras. Em Agee *et al.* (2002)

foram recolhidas numa zona exposta a sul, 5 a 6 amostras para cada combustível, com aproximadamente 30 gramas de peso.

Os combustíveis florestais deverão ser caracterizados pelo menos durante o período de incêndios florestais, permitindo assim a monitorização no período de maior risco de incêndio (Pollet e Brown 2007).

A amostragem deverá ser realizada sempre no mesmo período do dia ou no mesmo dia da semana (se o programa for realizado numa base semanal) por forma a obter consistência nos valores obtidos (Brenner 2002).

Os combustíveis florestais finos mortos devem ser amostrados numa base diária devido à sua rápida resposta às condições meteorológicas. Para as espécies herbáceas, arbustivas e arbóreas vivas, uma amostragem com 10 a 15 dias de intervalo será suficiente devido à sua lenta resposta às condições meteorológicas (Norum e Miller 1984).

O horário da amostragem deverá coincidir com o período do dia de maior risco de incêndio, isto é, próximo do valor de temperatura máxima e de humidade relativa mínima, normalmente entre as 11h00 e as 15h00 na primavera e no verão e entre as 11h00 e as 14h00 no outono (Norum e Miller 1984, Zahn e Henson 2011).

Na determinação do teor de humidade de arbustos em Castro *et al.* (2003), as amostras foram recolhidas às 12h00, duas vezes por semana durante o período de verão e uma vez por mês durante o resto do ano.

Em Dimitrakopoulos e Bemmerzouk (1998) e em Dimitrakopoulos e Bemmerzouk (2003), foram recolhidas amostras, diariamente, às 14h00m locais. Em Ruiz *et al.* (2002), as amostras foram recolhidas entre as 14h00m e as 16h00m locais. Para a determinação do teor de humidade de espécies arbóreas em Agee *et al.* (2002), as amostras foram recolhidas entre as 12h00m e as 18h00m locais. Em Pook e Gill (1993) as amostras foram recolhidas entre as 14h00 e as 15h00.

Os recipientes recomendados para a recolha de amostras podem ser de folha de alumínio (Dimitrakopoulos e Bemmerzouk 1998), de vidro (Ruiz *et al.* 2002) ou de plástico (Agee *et al.* 2002; Castro *et al.* 2003; Pook e Gill 1993), desde que consigam suportar temperaturas elevadas (Norum e Miller 1984, Brenner 2002, Pollet e Brown 2007).

No local de amostragem, o recipiente utilizado para o transporte das amostras deve manter-se resguardado da exposição solar. As amostras deverão ser colocadas no recipiente sem serem comprimidas (Norum e Miller 1984, Brenner 2002, Pollet e Brown 2007).

Como a presença de água livre à superfície das amostras pode causar erros significativos de determinação do teor de humidade, nos dias em que ocorra precipitação poderá não haver recolha de amostras, para evitar tais erros (Norum e Miller 1984).

Na determinação do teor de humidade de combustíveis florestais, o método gravimétrico com secagem em estufa é o mais comum, embora com diferentes procedimentos relativamente à temperatura e duração do ensaio (e.g. Viegas *et al.* 1992; Matthews 2010). Refiram-se os seguintes exemplos: 24 horas a 105°C (Dimitrakopoulos e Bemmerzouk 1998), pelo menos 48 horas a 70°C (Agee *et al.* 2002), 48 horas a 105°C (Dimitrakopoulos e Bemmerzouk 2003), 48 horas a 85°C (Fernandes 2001) e 24 horas a 95°C (Pook e Gill 1993).

A temperatura de secagem possui um efeito significativo na determinação do teor de humidade, tendo sido verificadas diferenças de 3.5% entre a secagem a 60°C e a 105°C. Relativamente à humidade relativa do ar do ambiente exterior, a sua variação afeta a humidade relativa do ar interior da estufa, diminuindo este efeito à medida que aumenta a temperatura do ensaio. No que respeita à duração do ensaio, verifica-se que após as 24h de ensaio não ocorre variação da massa em pesagens seguintes (48h, 72h e 96h), concluindo assim que as 24 horas são suficientes na determinação de um teor de humidade não muito elevado, pois nestes casos, deverá ser realizada uma pesagem ao final de 48h de ensaio por forma a verificar se existe estabilização da massa (Matthews 2010).

Apesar de ser um método simples e economicamente acessível para determinação do teor de humidade, o método gravimétrico com secagem em estufa requer um intervalo de tempo significativo entre a recolha das amostras e a obtenção final do teor de humidade, o que o torna em muitos casos impraticável para efeitos de definição de risco diário de incêndio assim como em situações de combate a incêndios. Acresce o facto que este poderá não produzir uma medida verdadeira do

teor de humidade devido à perda de compostos orgânicos voláteis durante o processo de secagem (Simard 1968a, Matthews 2010).

Por forma a diminuir o tempo de ensaio, foram desenvolvidos métodos portáteis de medição do teor de humidade, como por exemplo os analisadores rápidos do teor de humidade, sendo que o teor de humidade de espécies vivas determinado por secagem em estufa e do teor de humidade de espécies vivas determinado pelo analisador rápido de humidade é praticamente igual, apesar de realizados a diferentes temperaturas (Jolly 2011).

### 3 METODOLOGIA EXPERIMENTAL

#### 3.1 AMOSTRAGEM E DETERMINAÇÃO DO TEOR DE HUMIDADE

O Centro de Estudos sobre Incêndios Florestais da Associação para o Desenvolvimento da Aerodinâmica Industrial do Departamento de Mecânica da Faculdade de Ciência e Tecnologia da Universidade de Coimbra tem, desde 1986, um programa de medição do teor de humidade de um conjunto de combustíveis florestais finos representativos da floresta da Região Centro de Portugal, monitorização esta abordada em Viegas *et al.* (1992), Viegas *et al.* (2001), Lopes (2005), Lopes *et al.* (2006), Gonçalves *et al.* (2006), Lopes *et al.* (2009), Lopes *et al.* (2010a) e Lopes *et al.* (2010c).

No presente estudo serão apresentados os resultados das medições realizadas na proximidade do aeródromo da Lousã no concelho da Lousã (local designado como Lousã), no período entre 1996 e 2012, na proximidade das povoações de Silvares e de Olho Marinho ambas no concelho da Lousã (locais designados como Silvares e Olho Marinho, respetivamente), no período entre 1996 e 1999. Foram também utilizados os resultados das medições realizadas na proximidade do aeródromo de Viseu no concelho de Viseu (local designado como Viseu) no período entre 2007 e 2010. Todos os locais se situam na zona Centro de Portugal Continental (*vide* Figura 4), os primeiros três no distrito de Coimbra e o último no distrito de Viseu. As características físicas e de vegetação dos locais em estudo são referidas na Tabela 1.

O local de amostragem de Silvares dista do ponto de amostragem da Lousã 5.5 km (linha reta). O local de amostragem denominado Olho Marinho dista do ponto de amostragem da Lousã 7.7 km (linha reta). O local de amostragem de Viseu dista dos pontos de amostragem da Lousã cerca de 70 km (linha reta).

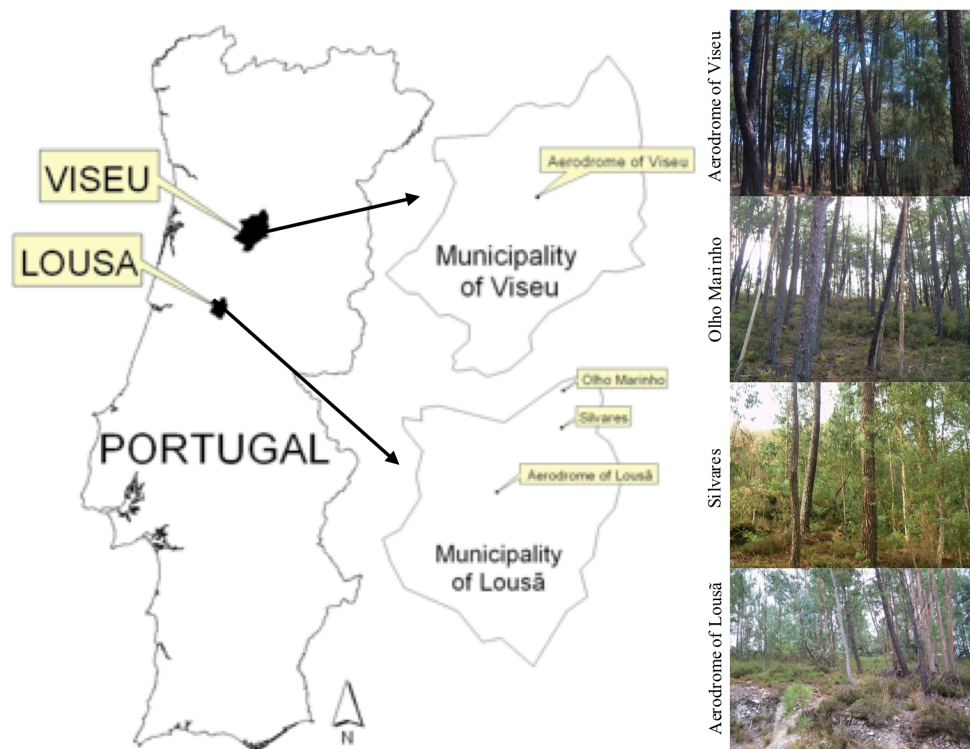


Figura 4 – Localização e fotografias dos locais de medição do teor de humidade

Tabela 1 – Características físicas e de vegetação dos locais de medição

Local	Coordenadas	Altitude(m)	Exposição	Declive (%)	Litologia	Altura das árvores (m)	Densidade de copas	Espécies caracterizadas
Lousã	40°8'30"N 8°14'30"W	200	Sul	30	Xisto	10	Média	<i>Pinus pinaster</i> <i>Eucalyptus globulus</i>
Silvares	40°10'27"N 8°11'50"W	200	Este	20	Xisto	10	Elevada	<i>Calluna vulgaris</i> <i>Chamaespartium tridentatum</i>
Olho Marinho	40°11'35"N 8°11'46"W	250	Este	30	Xisto	10	Média	<i>Pinus pinaster</i>
Viseu	40°42'22"N 7°54'13"W	580	Sul	10	Granítico	10	Média	<i>Eucalyptus globulus</i> <i>Calluna vulgaris</i> <i>Ulex europaeus</i>

Em todos os locais de medição, as amostras dos combustíveis foram recolhidas em povoamentos mistos de *Pinus pinaster* e *Eucalyptus globulus* que são muito comuns no Centro de Portugal. Os combustíveis florestais finos amostrados nos dois locais foram a folhagem viva (agulhas verdes) e morta (agulhas à superfície do solo) da espécie *Pinus pinaster* e a folhagem viva (folhas verdes) e morta (folhas á superfície do

solo) da espécie *Eucalyptus globulus* e extremidades de folhagem viva da espécie *Calluna vulgaris*. No local de amostragem da Lousã foram também amostradas as extremidades de folhagem viva da espécie *Chamaespartium tridentatum* e no local de amostragem de Viseu foram amostradas as extremidades de folhagem viva da espécie *Ulex europeus*.

A folhagem morta de *Pinus pinaster* e de *Eucalyptus globulus* é representativa dos combustíveis arbóreos finos mortos, a folhagem viva de *Pinus pinaster* e de *Eucalyptus globulus* é representativa dos combustíveis arbóreos finos vivos e as extremidades de folhagem viva das espécies *Calluna vulgaris*, *Chamaespartium tridentatum* e *Ulex europeus* representa os combustíveis arbustivos finos vivos.

A folhagem fina viva consiste nas folhas e extremidades verdes que ainda se encontram acopladas ao *Eucalyptus globulus*, *Pinus pinaster*, *Calluna vulgaris*, *Chamaespartium tridentatum* e *Ulex europeus*. A folhagem fina morta corresponde às folhas que se encontram no solo e que fazem parte da camada orgânica.

A amostragem das espécies referidas anteriormente foi realizada com uma periodicidade maioritariamente diária no período de maior ocorrência de incêndios (Junho a Setembro) e com uma periodicidade maioritariamente semanal, sendo por vezes quinzenal, no período de menor ocorrência de incêndios (Outubro a Maio), sempre entre as 12 horas e as 14 horas locais.

No laboratório, foi utilizada uma balança analítica (Mettler PM 600) com uma precisão de 0.01 gramas e com capacidade de 1000 gramas para pesagem das amostras, uma estufa termorregulada (Mettler 600) para secagem das amostras e um analisador rápido do teor de humidade (AND MX-50) com uma capacidade máxima de 51 gramas, com uma precisão de 0.1% para amostras com peso entre 1 e 5 gramas e com uma precisão de 0.02% para amostras com peso superior a 5 gramas.

Para cada tipo de combustível fino vivo procedeu-se à amostragem direta de folhas e extremidades de *Pinus pinaster*, de *Eucalyptus globulus*, de *Calluna vulgaris*, *Chamaespartium tridentatum* e *Ulex europeus*, tendo o cuidado de não se efetuar a amostragem em *Pinus pinaster* e *Eucalyptus globulus* demasiadamente novos. Relativamente aos combustíveis finos mortos recolheram-se, da camada orgânica do solo, as folhas de *Pinus pinaster* e as folhas de *Eucalyptus globulus*, intactas e de cor acastanhada.

Após a amostragem de cerca de 50 gramas de cada tipo de combustível, procedeu-se ao respetivo acondicionamento numa mala térmica para evitar a perda de humidade por evaporação. Seguidamente, as amostras foram transportadas para o laboratório, sempre ao abrigo do sol, e preparadas para a realização de testes. O período de tempo decorrido entre a recolha das amostras e o início da sua preparação no laboratório não ultrapassou os 30 minutos.

Nos dias em que ocorreram episódios de precipitação não se recolheram amostras de combustíveis com água livre à superfície, para evitar erros no cálculo do teor de humidade.

No laboratório, para as espécies arbóreas mortas (*Pinus pinaster* e *Eucalyptus globulus*), preparam-se cerca de 3 gramas de amostra os quais se colocam no analisador rápido do teor de humidade, obtendo-se o teor de humidade das espécies *Pinus pinaster* morto e *Eucalyptus globulus* morto num período de tempo reduzido (aproximadamente 10 minutos).

Para cada tipo de combustível preparam-se 4 réplicas com cerca de 5 gramas de peso fresco ( $M_i$ ). A preparação das amostras consiste no corte das folhas de forma a serem colocadas nas caixas de alumínio que são previamente pesadas. O peso fresco ( $M_i$ ) é obtido após a subtração do peso das caixas de alumínio.

Após a preparação das amostras, estas são colocadas durante 24 horas numa estufa termorregulada a 105°C.

Após o período de secagem, as réplicas são retiradas da estufa e pesadas. O peso seco ( $M_f$ ) é obtido após a subtração do peso das caixas de alumínio. O teor de humidade médio diário de uma espécie é a média dos valores das quatro réplicas.

O teor de humidade (TH) dos combustíveis finos é expresso em percentagem de peso seco (base seca) e calculado de acordo com a Equação (22).

$$\text{TH} = \frac{M_i - M_f}{M_f} \quad (22)$$





Figura 5 – Fotografias dos procedimentos de recolha e determinação do teor de humidade de combustíveis florestais desenvolvidos na Lousã e em Viseu.

### **3.2 DETERMINAÇÃO DAS CURVAS DE SORÇÃO E TEOR DE HUMIDADE DE EQUILÍBRIO DO *PINUS PINASTER***

Na determinação das curvas de sorção e do teor de humidade de equilíbrio – EMC das agulhas de *Pinus pinaster* foi utilizada uma câmara climática (Aralab Fitoclima 300) em que a temperatura e a humidade do ar foram controladas, variando entre 20°C e 35°C e entre 10% e 90%, respetivamente, tal como já apresentado em Lopes *et al.* (2010b). A metodologia vai ao encontro do sugerido em Schunk *et al.* (2013).

O teor de humidade de equilíbrio – EMC das agulhas de *Pinus pinaster* para as temperaturas e humidades relativas referidas foram determinadas para o processo de adsorção e dessorção. Foi igualmente analisado o tempo de resposta das agulhas.

A recolha das amostras de agulhas de *Pinus pinaster* ocorreu entre 2008 e 2010 num local plano, com um povoamento maioritariamente de *Pinus pinaster* com altura média de 10 metros, previamente ao seu transporte para laboratório para realização dos testes de sorção. As amostras foram recolhidas durante todo o ano, com exceção dos dias em que à superfície dos combustíveis existia água líquida, desta forma garantindo que para as mesmas condições de exposição, o teor de humidade inicial era semelhante.

Após a recolha da agulhas de *Pinus pinaster* e imediatamente antes de se iniciarem os testes de sorção, foram pesadas 4 amostras com 5 gramas cada, as quais foram colocadas na estufa a 105 °C durante 24 horas. Depois de secas, as amostras foram novamente pesadas para se obter o seu peso seco e conseqüentemente, através da média das 4 amostras, o teor inicial de humidade de base seca.

Simultaneamente, uma amostra de agulhas de *Pinus pinaster* com aproximadamente 10 gramas foi preparada para os testes de sorção e conseqüente determinação do teor de humidade de equilíbrio – EMC e tempo de resposta. A amostra foi colocada na câmara climática a temperatura e a humidade relativa constantes, aí permanecendo entre de 25 horas a 70 horas. A câmara climática estava equipada com uma balança analítica posicionada no seu exterior cujo prato de pesagem estava dentro da câmara. Foi realizada a pesagem da amostra de minuto a minuto até que esta atingisse peso constante, determinando assim a evolução do teor de humidade e a sua taxa de alteração no sentido do equilíbrio. Os valores das

pesagens e das condições ambientais no interior da câmara climática foram registados informaticamente. Os registos de cada minuto foram utilizados para o cálculo de médias de 10 minutos durante as primeiras 10 horas de teste e em médias de 1 hora no restante período do teste (*vide* Figura 6).



Figura 6 – Câmara climática, balança de precisão e sistema de aquisição de dados

Para cada amostra foram efetuados entre 5 a 10 testes de sorção, sendo que, para cada teste, apenas variou um dos fatores, ou a temperatura ou a humidade relativa do ar no interior da câmara.

Nalguns testes, devido a problemas de comunicação entre a balança e o sistema de aquisição de dados ou a cortes de corrente elétrica, não foi possível determinar parte ou a totalidade da curva de sorção e, conseqüentemente, o tempo de resposta. Contudo, por entretanto ter sido retomado o teste, nalguns deles, foi registado o valor do teor de humidade de equilíbrio – EMC.

Devido à elevada duração de cada teste, foi considerado que o teor de humidade de equilíbrio – EMC era a média do teor de humidade medido nas últimas 8 horas de teste.

O teor de humidade foi representado graficamente em ordem ao tempo, apresentando a sua taxa de alteração no sentido do equilíbrio. Um exemplo de registo de um teste de adsorção e de dessorção, ambos para temperatura constante de 25°C e humidade relativa de 50% é apresentado na Figura 7. Como se pode observar, o teor

de humidade de equilíbrio – EMC num teste de adsorção é inferior ao teor de humidade de equilíbrio – EMC num teste de dessorção. O teste de dessorção resultou num teor de humidade de equilíbrio – EMC de 16.9% e um tempo de resposta de 3.7 horas. O teste de adsorção resultou num teor de humidade de equilíbrio – EMC de 15.5% e um tempo de resposta de 1.5 horas.

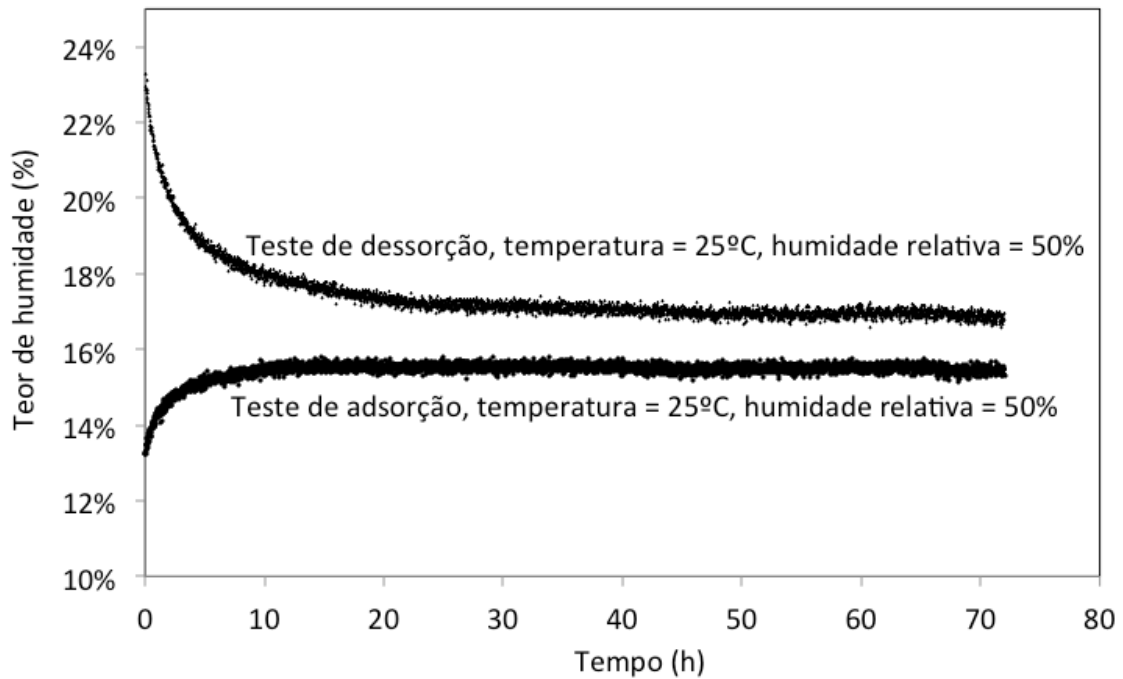


Figura 7 – Exemplo de um teste de dessorção e de um teste de adsorção com cerca de 72 horas, a uma temperatura constante de 25 °C e humidade relativa de 50%.

### 3.3 PARÂMETROS ESTATÍSTICOS UTILIZADOS

A avaliação e validação estatística do presente estudo foi, maioritariamente realizada através da utilização do software de estatística SPSS v.20.

Quando se dispõe de uma coleção de dados ou amostra referente a um par de variáveis quantitativas  $[(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots (x_n, y_n)]$ . A análise da coleção começa geralmente pelo estudo das variáveis por si só. Após esta primeira fase, inicia-se então o estudo das possíveis relações existentes entre as variáveis. Para tal, constrói-se um diagrama de dispersão onde se representam, num referencial cartesiano, os diferentes pontos da coleção. A observação deste diagrama permite, desde logo, formar uma ideia grosseira do tipo de associação que pode existir entre as variáveis.

Assim, na avaliação do grau de associação linear entre duas variáveis define-se o coeficiente de correlação de Pearson (usualmente definido apenas como coeficiente de correlação) através da Equação (23).

$$r = \frac{s_{xy}}{s_x s_y} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\left[ \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \right]^{\frac{1}{2}}} \quad (23)$$

Onde facilmente se conclui que  $-1 \leq r \leq 1$ . Em que -1 representa a melhor correlação negativa possível e 1 a melhor correlação positiva possível.

O coeficiente de Pearson, como já foi referido, mede o grau de associação linear entre duas variáveis quantitativas. Assim, quando a associação entre as variáveis não é linear ou quando pelo menos uma das variáveis não é do tipo quantitativo utiliza-se o coeficiente de correlação de Spearman,  $r_s$ . Esta medida consiste em calcular o coeficiente de correlação de Pearson, não entre as observações originais mas sim, entre as respetivas ordens. Assim, cada par de  $(x_i, y_i)$  é substituído pelo par  $[\text{ordem}(x_i), \text{ordem}(y_i)]$ , onde, por exemplo,  $\text{ordem}(x_i)$  representa a ordem de  $x_i$  na coleção. Uma vez feita a substituição, procede-se ao cálculo do coeficiente de Pearson, tal como definido na Equação 9.

No que respeita ao ajustamento das equações do teor de humidade de equilíbrio – EMC e da fração evaporável de água que permanece no combustível ( $E$ ) do

*Pinus pinaster* é utilizada uma regressão não linear para determinar os parâmetros dos modelos e para comparar os valores medidos com os valores modelados. Os parâmetros estatísticos utilizados para avaliar a qualidade do ajustamento das equações são a análise da distribuição dos valores residuais, o erro absoluto médio (*mean absolute error* – MAE), a raiz do erro médio quadrático (*root mean squared error* – RMSE) e o coeficiente de determinação ( $R^2$ ), definidos como:

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - \hat{y}_i| \quad (24)$$

$$RMSE = \left[ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \right]^{1/2} \quad (25)$$

$$R^2 = 1 - \frac{SS_{res}}{SS_{corr}} \quad (26)$$

Onde  $y_i$  e  $\hat{y}_i$  são os valores observados e modelados respetivamente,  $n$  é o número de observações,  $SS_{res}$  é a soma dos quadrados dos resíduos e  $SS_{corr}$  é a soma dos quadrados dos resíduos corrigida. O  $R^2$  fornece uma medida de quanto bem as observações são replicadas pelo modelo, o RMSE indica a precisão do ajustamento do modelo e o MAE mede o erro médio do. Valores elevados de  $R^2$  e valores reduzidos de MAE e RMSE, associados a uma distribuição aleatória dos valores residuais indicam um bom ajustamento.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 ANÁLISE DA METODOLOGIA DE AMOSTRAGEM E DETERMINAÇÃO DO TEOR DE HUMIDADE

#### 4.1.1 Número de amostras

No âmbito da metodologia de amostragem desenvolvida na Lousã, e no que respeita ao número de amostras necessário para obter uma boa representatividade do teor de humidade dos combustíveis florestais, foi aplicada a metodologia descrita em Norum e Miller (1984), nomeadamente a aplicação da equação (27).

$$m = t^2 \cdot s^2 / \epsilon^2 \quad (27)$$

Onde,  $m$  é o número de amostras necessário,  $s$  é o desvio padrão da série de valores do teor de humidade medidos anteriormente e  $\epsilon$  é o erro aceitável na determinação do teor de humidade. Desta forma, com base nas séries de dados recolhidos na Lousã, pode determinar-se o erro para um determinado nível de confiança, ou por outro lado, quantas amostras são necessárias para que os valores obtidos estejam dentro de um erro conhecido, para um determinado nível de confiança.

Na Figura 8, na amostragem realizada na Lousã, considerando a determinação prévia do teor de humidade de 4 amostras recolhidas, é apresentado o erro obtido para as agulhas mortas e vivas de *Pinus pinaster* e *Calluna vulgaris* para um nível de confiança de 95% (gráficos da esquerda) e o número de amostras que seriam necessárias para obter um erro de 1%, 5% e 10% a um nível de confiança de 95% (gráficos da direita). Esta análise do erro não tem em conta alguns aspetos importantes tais como o tamanho da amostra, a precisão da balança utilizada para a pesagem das amostras e a metodologia de amostragem.

Os resultados apresentados na Figura 8 mostram que, com um nível de confiança de 95%, para as agulhas mortas de *Pinus pinaster* (o mesmo ocorre para as folhas mortas de *Eucalyptus globulus*), o erro cometido na recolha e análise de 4

amostras é proporcional ao teor de humidade obtido no final, resultante da média das 4 amostras: quando o teor de humidade é inferior a 20%, o erro é predominantemente inferior a 2% e quando é superior a 20%, o erro é predominantemente inferior a 5%, embora tenham sido obtidos valores de 8%. Quanto ao número de amostras necessárias para se obter um erro de 1%, 5% e 10% com um nível de confiança de 95%, verifica-se que, admitindo um erro de 10% e mesmo de 5%, o número de amostras necessárias é sempre inferior a 4. Admitindo apenas um erro de 1%, para valores reduzidos do teor de humidade (inferiores a 20%), o número de amostras necessárias é inferior a 10, mas para valores do teor de humidade superior a 20%, o número de amostras poderia ser superior a 100.

Para as espécies arbóreas vivas, nomeadamente *Pinus pinaster*, o erro cometido na recolha e análise de 4 amostras e o número de amostras que seriam necessárias para obter um erro de 1%, 5% e 10% e um nível de confiança de 95% não são proporcionais ao teor de humidade obtido no final, resultante da média das 4 amostras. Em determinados casos, o erro cometido pode atingir valores máximos de 30% e uma média de cerca de 10%. Para um erro tolerado de 1% com um nível de confiança de 95%, o número de amostras é particularmente elevado, no entanto para erros de 5% e 10% o número de amostras necessárias é significativamente inferior.

Para as espécies arbustivas, nomeadamente para a *Calluna vulgaris*, o erro cometido na recolha e análise de 4 amostras é proporcional ao teor de humidade obtido no final, resultante da média das 4 amostras e é inferior a 10% para um teor de humidade abaixo dos 90%. Tal como para as espécies arbóreas vivas, para um erro tolerado de 1% com um nível de confiança de 95%, o número de amostras é particularmente elevado, mas a Figura 8 mostra existir alguma proporcionalidade entre o teor de humidade e o número de amostras necessárias. Para erros tolerados de 5% e 10% o número de amostras necessárias é significativamente inferior.



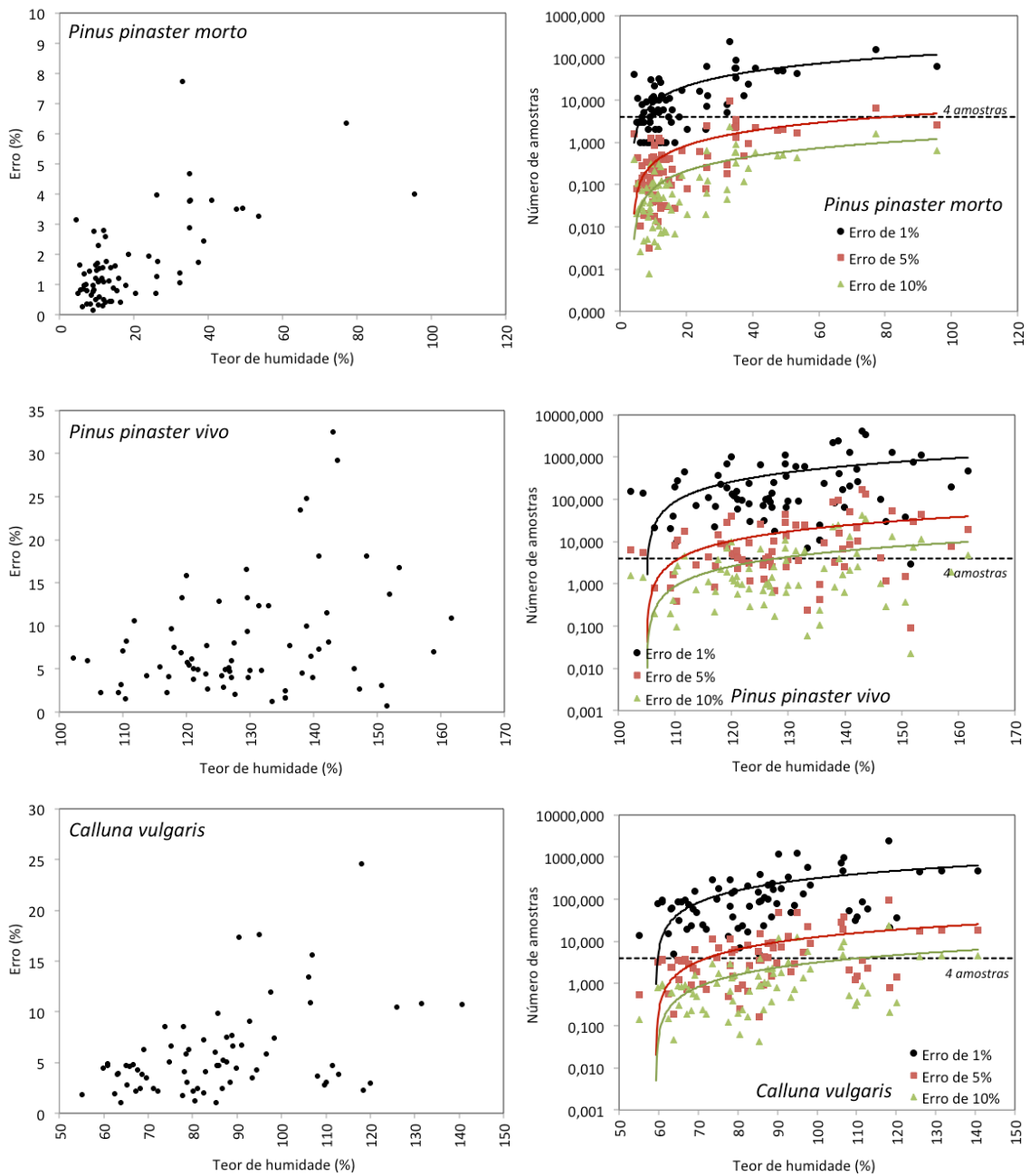


Figura 8 – Erro do procedimento de amostragem realizado na Lousã e número de amostras que seriam necessárias para obter um erro de 1%, 5% e 10% e um nível de confiança de 95% para algumas das espécies estudadas no ano de 2011. A linha horizontal tracejada refere-se à localização das 4 amostras. As linhas a preto, vermelho e verde referem-se às linhas de tendência para os erros de 1%, 5% e 10%, respetivamente.

#### 4.1.2 Comparação do teor de humidade determinado por secagem em estufa e do teor de humidade determinado pelo analisador rápido de humidade

Tal como referido anteriormente, no laboratório, para as espécies arbóreas mortas (*Pinus pinaster* e *Eucalyptus globulus*), preparam-se cerca de 3 gramas de amostra os quais se colocaram no analisador rápido do teor de humidade (AND MX-50), obtendo-se o teor de humidade das espécies *Pinus pinaster* morto e *Eucalyptus globulus* morto num período de tempo reduzido (aproximadamente 10 minutos). A tecnologia de aquecimento baseia-se numa lâmpada de halogénio originando uma temperatura de secagem entre 50°C e 200°C (com 1°C de incremento). Nas amostragens realizadas na Lousã, os testes duravam aproximadamente 10 minutos a uma temperatura de 105°C.

As medições do teor de humidade das espécies arbóreas mortas que decorreram entre 2004 e 2011 foram utilizadas para comparar a determinação por secagem em estufa com o do analisador rápido de humidade nas condições dos testes da Lousã, considerando a secagem em estufa a 105°C durante 24h00, o método de referência. Foram igualmente realizados testes adicionais para verificar qual a evolução do erro cometido com a utilização do analisador rápido em ordem ao tempo de análise para temperaturas de secagem no analisador rápido de 105°C e de 145°C.

Na Figura 9 está representado o erro entre a determinação do teor de humidade por secagem em estufa e pelo analisador rápido de humidade e a sua relação com o teor de humidade determinado por secagem em estufa.

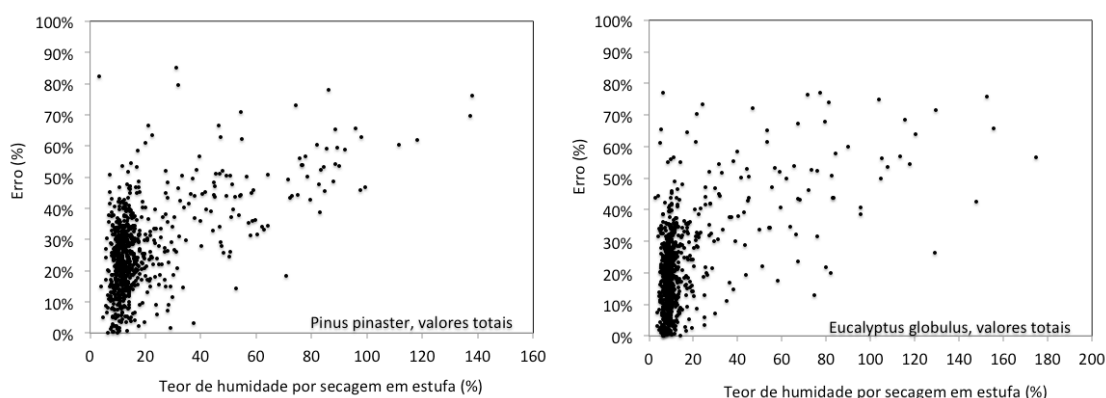


Figura 9 – Erro entre a determinação do teor de humidade por secagem em estufa e pelo analisador rápido de humidade e a sua relação com o teor de humidade determinado por secagem em estufa

Como pode ser observado na Figura 9, para um teor de humidade inferior a 30%, visualmente, o erro não possui uma tendência, variando entre 0 e 70%. No entanto, aquando da utilização do analisador rápido de humidade, para um teor de humidade superior a 30%, o erro aumenta com o aumento do teor de humidade. Salienta-se o facto de existir uma dispersão significativa dos valores dos erros verificados.

Para as condições dos testes realizados na Lousã, nomeadamente duração de 10 minutos a 105 °C, na Figura 10 e na Figura 11 é apresentada a relação entre o teor de humidade determinado por secagem em estufa e o determinado pelo analisador rápido, baseada na totalidade dos dados entre 2004 e 2011 e nas medições do teor de humidade com resultados inferiores a 30%, respetivamente.

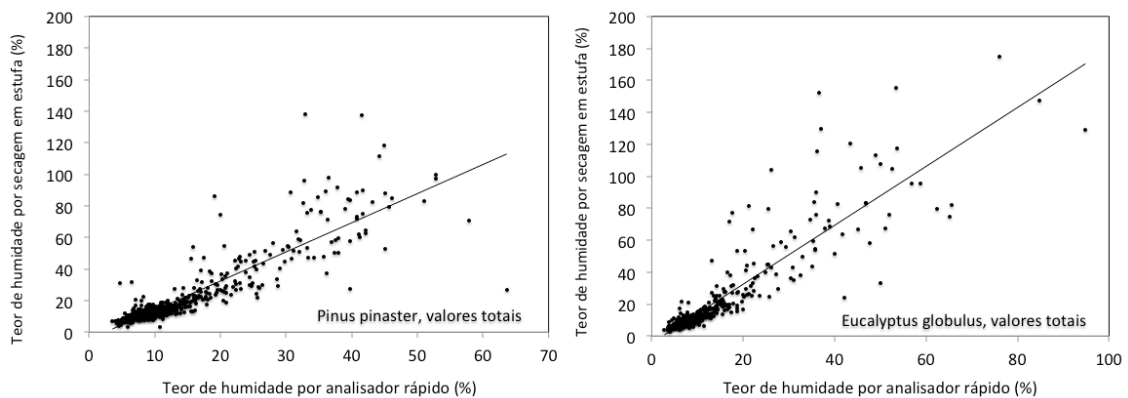


Figura 10 – Relação entre o teor de humidade determinado por secagem em estufa e pelo analisador rápido, baseada na totalidade dos dados entre 2004 e 2011. As rectas representadas correspondem à equação (28).

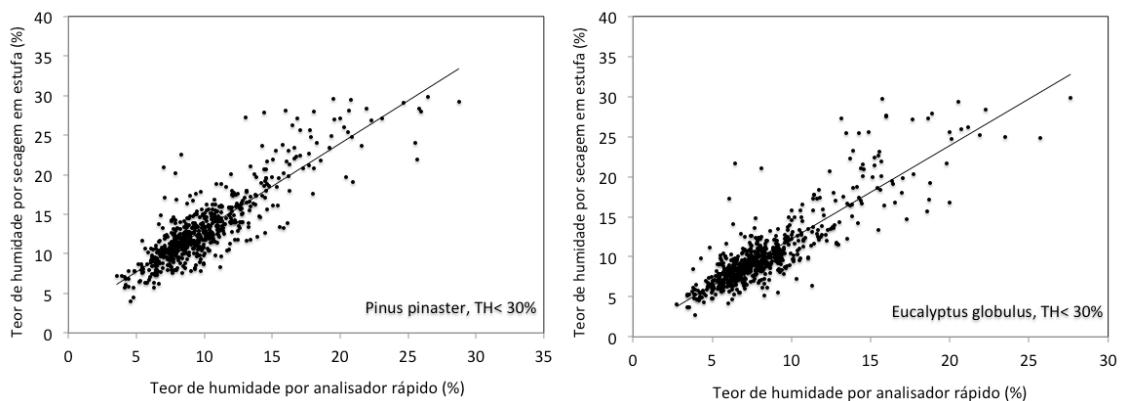


Figura 11 – Relação entre o teor de humidade determinado por secagem em estufa e pelo analisador rápido, baseada nas medições do teor de humidade com resultados inferiores a 30%. . As rectas representadas correspondem à equação (28).

Através da Figura 10 e da Figura 11 pode verificar-se que o teor de humidade determinado pelo analisador rápido possui uma relação linear com o teor de humidade determinado por secagem em estufa quer para as agulhas mortas de *Pinus pinaster* quer para as folhas mortas de *Eucalyptus globulus*. A equação (28) corresponde à referida relação linear.

$$\text{Teor Humidade}_{\text{secagem estufa, 24h, 105}^\circ\text{C}} = a \cdot \text{Teor de Humidade}_{\text{analisador rápido, 10 min, 105}^\circ\text{C}} + b \quad (28)$$

Os parâmetros da equação (28) para a totalidade dos dados entre 2004 e 2011 e para as medições do teor de humidade com resultados inferiores a 30% foram calculados através do método dos mínimos quadrados. Os coeficientes “a” e “b” e o respetivo desvio padrão, o número de dados “n” e o coeficiente de determinação ajustado ( $R^2$ ) são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 – Coeficientes “a” e “b” e o respetivo desvio padrão, número de dados “n” e o coeficiente de determinação ajustado ( $R^2$ ) para as relações entre o teor de humidade determinado pelo analisador rápido e o teor de humidade determinado por secagem em estufa

Espécie	Relação	a	Desv. pad.	b	Desv. pad.	n	$R^2$ ajustado
<i>Pinus pinaster</i>	Totalidade dos valores	1.844 <sup>(**)</sup>	0.036	-4.460 <sup>(**)</sup>	0.583	710	0.786
<i>morto</i>	Teor de humidade <30%	1.081 <sup>(**)</sup>	0.025	2.320 <sup>(**)</sup>	0.274	603	0.751
<i>Eucalyptus</i>	Totalidade dos valores	1.842 <sup>(**)</sup>	0.033	-4.312 <sup>(**)</sup>	0.523	710	0.811
<i>globulus morto</i>	Teor de humidade <30%	1.165 <sup>(**)</sup>	0.026	0.583 <sup>(*)</sup>	0.239	634	0.758

(\*\*) Nível de significância de 0.01; (\*) Nível de significância de 0.05;

Como se pode verificar na Tabela 2, os coeficientes de determinação ajustados ( $R^2_{\text{ajust}}$ ) das relações apresentadas são relativamente elevados, aproximadamente 0.79 e 0.81 para as agulhas mortas de *Pinus pinaster* e folhas mortas de *Eucalyptus globulus* respectivamente, considerando todos os dados entre 2004 e 2011 e de aproximadamente 0.75 e 0.76 para as agulhas mortas de *Pinus pinaster* e para as folhas mortas de *Eucalyptus globulus* respectivamente, considerando apenas os valores do teor de humidade inferior a 30%.

Apesar dos dados apresentados indicarem que os métodos produzem resultados correlacionáveis ao longo de uma vasta gama de valores do teor de

humidade, a dispersão significativa dos valores dos erros verificados no presente estudo assim como os coeficientes de determinação apresentados em Jolly (2011), nomeadamente de 0.99 para espécies vivas, indicam que as metodologias de determinação do teor de humidade através do analisador rápido de humidade, nomeadamente no que se refere ao tempo do teste e à temperatura utilizada deverá ser avaliada mais pormenorizadamente.

Assim, para verificar a relação do erro obtido na utilização do analisador rápido, quando comparado o resultado com o procedimento de secagem em estufa a 105 °C durante 24h, com o tempo e temperatura do teste, na Figura 12 são apresentados os resultados de testes adicionais realizados no local de amostragem de Viseu, em que foi registada a evolução do erro em ordem ao tempo de análise para temperaturas de secagem no analisador rápido de 105°C e de 145°C. Na figura estão representadas os valores médios das medições. Os segmentos verticais indicam o intervalo de confiança de 95%.

Como se pode verificar na Figura 12, a utilização do analisador rápido do teor de humidade a uma temperatura de 105 °C para a determinação do teor de humidade das agulhas mortas e vivas de *Pinus pinaster* e folhas mortas de *Eucalyptus globulus*, não permite, num teste com duração de até 30 minutos, atingir o valor obtido por secagem em estufa a 105°C durante 24h. Este facto não se verifica para as folhas vivas de *Eucalyptus globulus* e extremidades vivas de *Calluna vulgaris* e *Ulex europeus*, para as quais um teste com cerca de 20 minutos é suficiente para através do analisador rápido atingir o sensivelmente o mesmo valor que se obtém através da secagem em estufa a 105°C durante 24h.

Com exceção das agulhas mortas de *Pinus pinaster* e da *Calluna vulgaris*, utilizando a temperatura de ensaio de 145°C, o teor de humidade determinado pelo analisador rápido é sensivelmente o mesmo que se obtém através da secagem em estufa a 105 °C durante 24h, a partir de sensivelmente 10 minutos de teste. Para as agulhas mortas de *Pinus pinaster*, utilizando a temperatura de ensaio de 145°C, são necessários pelo menos 20 minutos de ensaio. Para a *Calluna vulgaris*, verifica-se que, entre 5 a 10 minutos de ensaio a 145°C são suficientes para obter o mesmo valor do teor de humidade obtido através da secagem em estufa a 105°C durante 24h, sendo que a partir deste tempo, existe uma sobre-estimativa do teor de humidade,

possivelmente devido à eliminação de compostos orgânicos voláteis presentes em quantidades significativas nesta espécie.

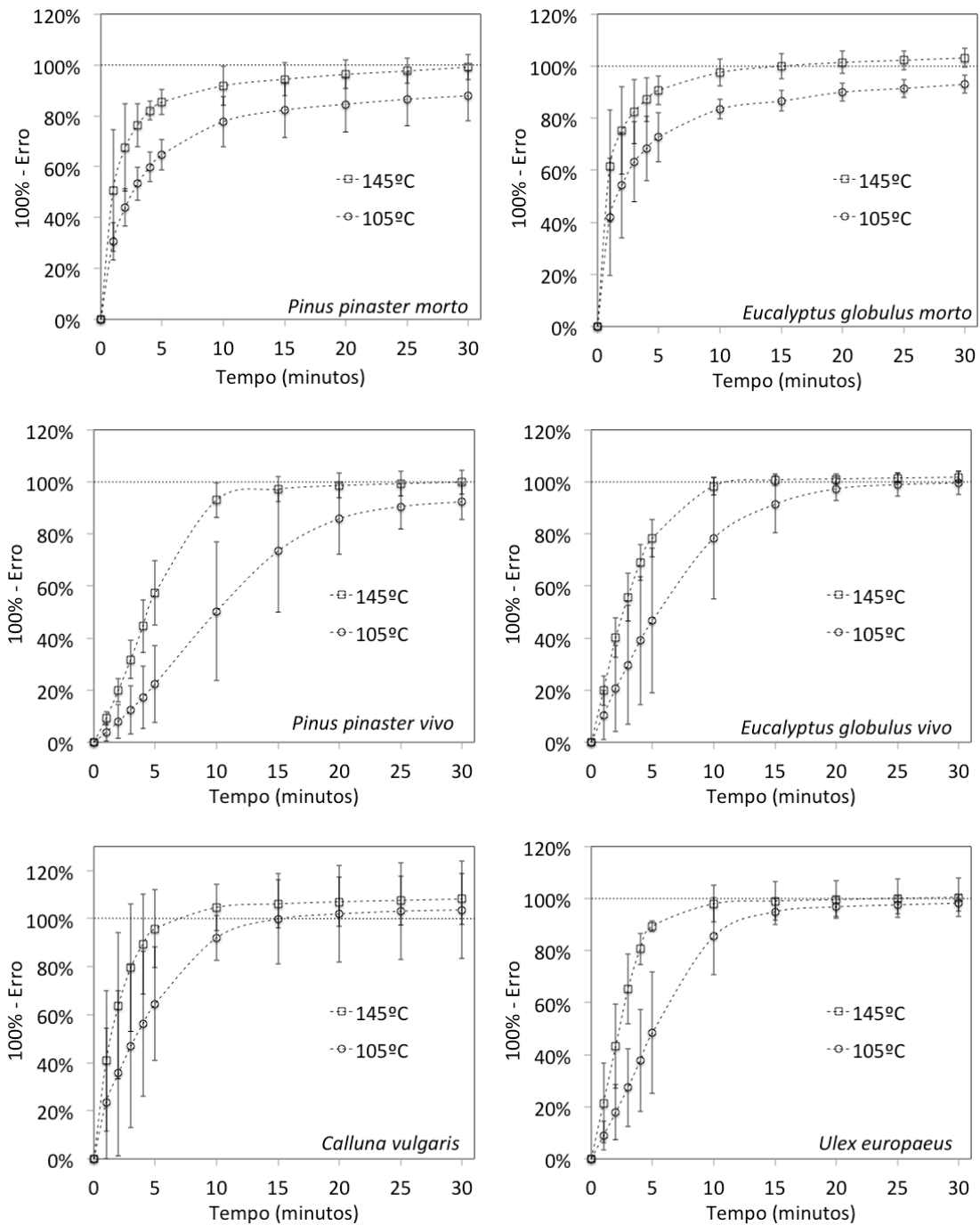


Figura 12 – Evolução do erro em ordem ao tempo de análise para uma temperatura de secagem no analisador rápido de 105°C e de 145°C. Os segmentos verticais indicam o intervalo de confiança de 95%

## 4.2 REPRESENTATIVIDADE DAS MEDIÇÕES EFETUADAS

### 4.2.1 Representatividade territorial em termos de espécies caracterizadas

Para analisar a representatividade territorial das espécies caracterizadas considera-se o território português dividido nas zonas apresentadas na Figura 13: Norte, Centro, Lisboa e Vale do Tejo, Alentejo e Algarve.

Da Tabela 3 à Tabela 6 é apresentada a presença das espécies caracterizadas no local de amostragem da Lousã no território de Portugal Continental. Os dados da Tabela 3 resultam do último Inventário Florestal Nacional (ICNF 2010) e os dados da Tabela 4 resultam do Inventário anterior (ICNF 2001).



Figura 13 – Zonas do território português

Tabela 3 – Áreas dos povoamentos florestais por espécie dominante em Portugal (ICNF 2010)

Espécies	Portugal		Norte		Centro		Lisboa e Tejo		Alentejo		Algarve	
	Área (10 <sup>3</sup> ha)	% Área	Área (10 <sup>3</sup> ha)	% Área	Área (10 <sup>3</sup> ha)	% Área	Área (10 <sup>3</sup> ha)	% Área	Área (10 <sup>3</sup> ha)	% Área	Área (10 <sup>3</sup> ha)	% Área
<i>P. pinaster</i>	885019	27.9%	259275	44.9%	544585	51.4%	15924	23.2%	59262	4.4%	5973	4.9%
<i>E. globulus</i>	739514	23.3%	128209	22.2%	357805	33.8%	15551	22.6%	212900	15.8%	25049	20.6%
<i>Q. suber</i>	715922	22.5%	11935	2.1%	45221	4.3%	23610	34.3%	601906	44.6%	33250	27.3%
<i>Q. rotundifolia</i>	412879	13.0%	7013	1.2%	22408	2.1%	51	0.1%	370192	27.4%	13215	10.9%
<i>Q. spp.</i>	150018	4.7%	91601	15.9%	52585	5.0%	249	0.4%	5501	0.4%	82	0.1%
<i>P. pinea</i>	130387	4.1%	276	0.0%	3029	0.3%	9730	14.2%	87308	6.5%	30044	24.7%
<i>C. sativa</i>	30029	0.9%	26233	4.5%	3246	0.3%	0	0.0%	550	0.0%	0	0.0%
Acacia	4098	0.1%	401	0.1%	2676	0.3%	946	1.4%	50	0.0%	25	0.0%
Outras res.	82384	2.6%	33235	5.8%	22682	2.1%	2380	3.5%	11165	0.8%	12922	10.6%
Outras folh.	25098	0.8%	19034	3.3%	4296	0.4%	300	0.4%	350	0.0%	1118	0.9%
Total	3175348		577212		1058533		68741		1349184		121678	

Como se pode observar na Tabela 3, as principais espécies presentes nos povoamentos das florestas portuguesas são o *Pinus pinaster*, o *Eucalyptus globulus* e o *Quercus suber* ocupando 27.9%, 23.3% e 22.5%, respetivamente da área total de floresta do território português. Com menos importância, a *Quercus rotundifolia* ocupa 13.0% da área total de floresta do território português.

No norte e centro de Portugal, os povoamentos florestais são compostos maioritariamente por *Pinus pinaster* e *Eucalyptus globulus*. A zona de Lisboa e Vale do Tejo é composta maioritariamente por *Quercus suber*, embora as espécies *Pinus pinaster* e *Eucalyptus globulus* ainda possuam alguma representatividade. Na parte sul do território português, o *Pinus pinaster* tem uma presença residual, sendo as espécies mais representativas, o *Quercus suber* seguido pelo *Quercus rotundifolia* no Alentejo e pelo *Eucalyptus globulus* no Algarve.

No tocante às espécies arbustivas (vide Tabela 4), as mais frequentes nos povoamentos de *Pinus pinaster* e de *Eucalyptus globulus* são a *Calluna vulgaris* e o *Ulex europaeus*. O *Chamaespartium tridentatum* também é comum nos povoamentos de *Pinus pinaster*, mas com menos importância. Nos povoamentos da zona sul do território, os arbustos *Cistus ladanifer* e *Cistus monspeliensis* L são os mais frequentes.



Tabela 4 – Arbustos presentes nos povoamentos florestais portugueses (ICNF 2001)

Povoamento	<i>Ulex</i> <i>europaeus</i>	<i>Calluna</i> <i>vulgaris</i>	<i>Cytisus</i> <i>striatus</i>	<i>Cistus</i> <i>ladanifer</i>	<i>Cistaceae</i>	<i>Rubus</i> <i>sp.</i>	<i>Lavandula</i> <i>L.</i>	<i>C.</i> <i>tridentatum</i>
<i>P. pinaster</i>	39%	47%	18%	11%	5%	8%	6%	21%
<i>E. globulus</i>	35%	30%	9%	19%	6%	10%	11%	11%
<i>Q. suber</i>	36%	11%	12%	34%	39%	5%	27%	3%
<i>Q. rotundifolia</i>	7%	0%	11%	31%	30%	3%	17%	1%
<i>Q. spp.</i>	19%	15%	48%	10%	3%	27%	3%	4%
<i>P. pinea</i>	48%	10%	5%	22%	31%	5%	22%	2%
<i>C. sativa</i>	11%	5%	36%	9%	7%	25%	0%	0%
Outras res.	21%	21%	16%	5%	9%	35%	2%	7%
Outras folh.	27%	50%	32%	9%	0%	9%	5%	41%

Considera-se que uma espécie possui uma representatividade: *elevada* numa determinada zona quando a sua ocupação é superior a 30% da área total florestal dessa zona, *média* quando a sua ocupação é superior a 10% e inferior a 30% da área total florestal dessa zona e *reduzida* quando a sua ocupação é inferior a 10%. Na Tabela 5 figura a representatividade das espécies arbóreas nas zonas do território português consideradas. Na Tabela 6 figura a representatividade das espécies arbustivas nos povoamentos florestais do território português.

Tabela 5 – Representatividade das espécies arbóreas em Portugal

Espécies	Norte	Centro	Lisboa e Tejo	Alentejo	Algarve
<i>P. pinaster</i>	Elevada	Elevada	Média	Reduzida	Reduzida
<i>E. globulus</i>	Média	Elevada	Média	Média	Média
<i>Q. suber</i>	Reduzida	Reduzida	Elevada	Elevada	Média
<i>Q. rotundifolia</i>	Reduzida	Reduzida	Reduzida	Média	Média
<i>Q. spp.</i>	Média	Reduzida	Reduzida	Reduzida	Reduzida
<i>P. pinea</i>	Reduzida	Reduzida	Média	Reduzida	Média
<i>C. sativa</i>	Reduzida	Reduzida	Reduzida	Reduzida	Reduzida
Outras res.	Reduzida	Reduzida	Reduzida	Reduzida	Reduzida
Outras folh.	Reduzida	Reduzida	Reduzida	Reduzida	Reduzida
Outras folhosas	Reduzida	Reduzida	Reduzida	Reduzida	Reduzida

Representatividade elevada: % Área >30%; Representatividade média: 10%<% Área< 30%; Representatividade reduzida: % Área <10%

Tabela 6 – Representatividade das espécies arbustivas nos povoamentos florestais

Povoamento	<i>Ulex europaeus</i>	<i>Calluna vulgaris</i>	<i>Cytisus striatus</i>	<i>Cistus ladanifer</i>	<i>Cistaceae</i>	<i>Rubus sp.</i>	<i>Lavandula L.</i>	<i>C. tridentatum</i>
<i>P. pinaster</i>	Elevada	Elevada	Média	Média	Reduzida	Reduzida	Reduzida	Elevada
<i>E. globulus</i>	Elevada	Elevada	Reduzida	Média	Reduzida	Média	Média	Média
<i>Q. suber</i>	Elevada	Média	Média	Elevada	Elevada	Reduzida	Média	Reduzida
<i>Q. rotundifolia</i>	Reduzida	Reduzida	Média	Elevada	Elevada	Reduzida	Média	Reduzida
<i>Q. spp.</i>	Média	Média	Elevada	Média	Reduzida	Média	Reduzida	Reduzida
<i>P. pinea</i>	Elevada	Média	Reduzida	Média	Elevada	Reduzida	Média	Reduzida
<i>C. sativa</i>	Média	Reduzida	Elevada	Reduzida	Reduzida	Média	Reduzida	Reduzida
Outras res.	Média	Média	Média	Reduzida	Reduzida	Elevada	Reduzida	Reduzida
Outras folh.	Média	Elevada	Elevada	Reduzida	Reduzida	Reduzida	Reduzida	Elevada

Representatividade elevada: % verificada >30%; Representatividade média: 10% < % verificada < 30%; Representatividade reduzida: % verificada <10%

Em função do exposto, pode concluir-se que, no presente estudo do teor de humidade desenvolvido na Lousã, as espécies caracterizadas são de representatividade elevada das espécies presentes na zona centro e norte de Portugal e de representatividade média das espécies presentes na zona de Lisboa e Vale do Tejo e de representatividade reduzida na zona do Alentejo e Algarve.

Em termos de espécies arbustivas, as espécies caracterizadas na Lousã (*Calluna vulgaris* e *Chamaespartium tridentatum*) são de representatividade elevada nos povoamentos de *Pinus pinaster*. Nos povoamentos de *Eucalyptus globulus*, a *Calluna vulgaris* também possui uma representatividade elevada, mas a espécie *Chamaespartium tridentatum* possui uma representatividade média. Assim, pode considerar-se que estas possuem uma representatividade média a elevada na zona centro e norte de Portugal.

Concluimos assim que o local de amostragem da Lousã é adequado em termos de representatividade das espécies mais representativas nas zonas de Portugal com maior incidência de incêndios florestais.

#### 4.2.2 Relações entre espécies

As relações que podem ser estabelecidas entre o teor de humidade de diferentes espécies amostradas, nomeadamente, entre o teor de humidade das espécies arbóreas (*Pinus pinaster* e *Eucalyptus globulus*) mortas e vivas e das espécies arbustivas vivas (*Calluna vulgaris* e *Chamaespartium tridentatum*), medidos na Lousã, entre os anos de 1996 e 2012, permitem estimar o teor de humidade de uma espécie, partindo do conhecimento do teor de humidade de outra espécie.

Na Tabela 7 apresentam-se os correspondentes coeficientes de correlação de Pearson entre os valores relativos às diferentes espécies. No caso de se verificar uma boa correlação, determinam-se as equações de regressão correspondentes.

Tabela 7 – Coeficiente de correlação de Pearson entre o teor de humidade das diferentes espécies amostradas na Lousã entre os anos de 1996 e 2012

Relação	<i>Pinus pinaster</i> morto	<i>Pinus pinaster</i> vivo.	<i>Eucalyptus globulus</i> morto	<i>Eucalyptus globulus</i> vivo	<i>Calluna vulgaris</i>	<i>Chamaespartium tridentatum</i>
<i>Pinus pinaster</i> morto	1	0.183 <sup>(**)</sup>	0.909 <sup>(**)</sup>	0.098 <sup>(**)</sup>	0.467 <sup>(**)</sup>	0.417 <sup>(**)</sup>
<i>Pinus pinaster</i> vivo	-	1	0.200 <sup>(**)</sup>	0.090 <sup>(**)</sup>	0.093 <sup>(**)</sup>	0.088 <sup>(**)</sup>
<i>Eucalyptus globulus</i> morto	-	-	1	0.107 <sup>(**)</sup>	0.486 <sup>(**)</sup>	0.443 <sup>(**)</sup>
<i>Eucalyptus globulus</i> vivo	-	-	-	1	0.095 <sup>(**)</sup>	0.051 <sup>(*)</sup>
<i>Calluna vulgaris</i>	-	-	-	-	1	0.734 <sup>(**)</sup>
<i>Chamaespartium tridentatum</i>	-	-	-	-	-	1

(\*\*) Nível de significância de 0.01; (\*) Nível de significância de 0.05

Pode verificar-se (vide Tabela 7) que para as espécies *Pinus pinaster* morto e *Eucalyptus globulus* morto existe um elevado grau de associação linear - coeficiente de correlação de Pearson de 0.909. Pode igualmente concluir-se que também para as espécies arbustivas vivas, *Calluna vulgaris* e *Chamaespartium tridentatum*, ocorre um grau de associação linear considerável - coeficiente de correlação de Pearson de 0.734. Relativamente à relação entre as espécies arbóreas mortas (*Pinus pinaster* e *Eucalyptus globulus*) e as espécies arbustivas vivas (*Calluna vulgaris* e *Chamaespartium tridentatum*), existe um grau de associação menos significativo embora com algum interesse - entre 0.417 e 0.486. As espécies arbóreas vivas (*Pinus pinaster* e *Eucalyptus*

*globulus*) não apresentaram graus de associação relevantes entre si ou com as restantes espécies.

Consequentemente, foi calculada a relação linear (*vide* equação (28)), entre o teor de humidade da espécie “A” e o teor de humidade da espécie “B” para as espécies que mostraram correlações significativas.

$$FMC_{Espécie A} = aFMC_{Espécie B} + b \quad (29)$$

Os parâmetros da equação (28) para cada relação foram calculados através do método dos mínimos quadrados. Os coeficientes “a” e “b” e o respetivo desvio padrão, assim como o número de dados “n” e o coeficiente de determinação ajustado ( $R^2$ ) são apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 – Coeficientes “a” e “b” e o respetivo desvio padrão, número de dados “n” e o coeficiente de determinação ajustado ( $R^2$ ) para as relações entre o teor de humidade determinado pelo analisador rápido e o teor de humidade determinado por secagem em estufa

<i>Espécie A</i>	<i>Espécie B</i>	<i>a</i>	<i>Desv. pad.</i>	<i>b</i>	<i>Desv. pad.</i>	<i>n</i>	$R^2$ ajustado
<i>Eucalyptus globulus</i> morto	<i>Pinus pinaster</i> morto	1.001 <sup>(**)</sup>	0.011	-2.395 <sup>(**)</sup>	0.337	1692	0.826
<i>Calluna vulgaris</i>	<i>Pinus pinaster</i> morto	0.456 <sup>(**)</sup>	0.021	79.372 <sup>(**)</sup>	0.635	1692	0.218
<i>Chamaespartium tridentatum</i>	<i>Pinus pinaster</i> morto	0.330 <sup>(**)</sup>	0.017	72.554 <sup>(**)</sup>	0.528	1692	0.174
<i>Chamaespartium tridentatum</i>	<i>Calluna vulgaris</i>	0.594 <sup>(**)</sup>	0.013	26.695 <sup>(**)</sup>	1.223	1692	0.539

(\*\*) Nível de significância de 0.01; (\*) Nível de significância de 0.05;

#### 4.2.3 Representatividade espacial em termos de teor de humidade

Foi mostrado que o teor de humidade dos combustíveis florestais finos mortos medido na Lousã pode ser usado como um indicador da ocorrência de incêndios na zona centro de Portugal (Viegas *et al.* 1992). Assim, importa saber qual a representatividade espacial das medições realizadas na Lousã por forma a poderem utilizar-se estas medições como um indicador de perigo de incêndio de uma área mais vasta.

O CFFWI, nomeadamente o sub-índice de humidade dos combustíveis finos (*Fine Fuel Moisture Code* – FFMC), o sub-índice de humidade da camada orgânica (*Duff*

*Moisture Code* – DMC) e o sub-índice de secura (*Drought Code* – DC), representam o teor de humidade dos combustíveis finos, da camada orgânica ligeiramente compactada e da camada orgânica mais profunda e compactada, respectivamente (Van Wagner 1987). No caso específico do DC, este poderá ser igualmente um indicador dos teor de humidade dos combustíveis finos vivos (Viegas *et al.* 2001).

Assim, para o período entre 1999 e 2008, as medições do teor de humidade realizadas na Lousã foram correlacionadas com os o sub-índices do CFFWI obtidos em várias estações meteorológicas do território nacional apresentadas no mapa da Figura 14, por forma a verificar a existência de relações estatísticas entre o teor de humidade medido e o teor de humidade previsto pelos sub-índices do CFFWI e, desta forma, conhecer a representatividade espacial do teor de humidade das espécies estudadas.



Figura 14 – Localização das estações meteorológicas no território nacional

Com este objectivo, a Tabela 9 apresenta o coeficiente de correlação não linear de Spearman entre o sub-índice FFMC e o teor de humidade das agulhas mortas de *Pinus pinaster* e o sub-índice DC e o teor de humidade da espécie arbustiva *Chamaespartium tridentatum*.

A representatividade espacial das medições do teor de humidade realizadas na Lousã é considerada *elevada* se o coeficiente de Spearman for superior a 0.70, *média* se o coeficiente de Spearman for superior a 0.55 e inferior a 0.70 e *reduzida* se o coeficiente de Spearman for inferior a 0.55, tal como esquematizado na Figura 15.

Tabela 9 – Representatividade espacial das medições do teor de humidade de combustíveis florestais finos na Lousã

Estação meteorológica	<i>Agulhas mortas de Pinus pinaster / FMC</i>		<i>Chamaespartium tridentatum / DC</i>	
	Coefficiente de Spearman	Representatividade	Coefficiente de Spearman	Representatividade
Aveiro	-0.609	Média	-0.581	Média
Beja	-0.693	Média	-0.535	Reduzida
Braga	-0.721	Elevada	-0.598	Média
Bragança	-0.708	Elevada	-0.557	Média
Castelo Branco	-0.728	Elevada	-0.540	Reduzida
Coimbra	-0.798	Elevada	-0.619	Média
Évora	-0.701	Elevada	-0.540	Reduzida
Faro	-0.512	Reduzida	-0.430	Reduzida
Leiria	-0.698	Média	-0.502	Reduzida
Lisboa	-0.710	Elevada	-0.502	Reduzida
Portalegre	-0.740	Elevada	-0.586	Média
Porto	-0.656	Média	-0.569	Média
Santarém	-0.706	Elevada	-0.516	Reduzida
Setúbal	-0.650	Média	-0.445	Reduzida
Viana do Castelo	-0.668	Média	-0.580	Média
Vila Real	-0.762	Elevada	-0.545	Reduzida
Viseu	-0.745	Elevada	-0.595	Média

Representatividade elevada: Coeficiente de Spearman >0.70; Representatividade média: 0.55< Coeficiente de Spearman <0.70;

Representatividade reduzida: Coeficiente de Spearman <0.55

Todas as correlações possuem um nível de significância de 0.01

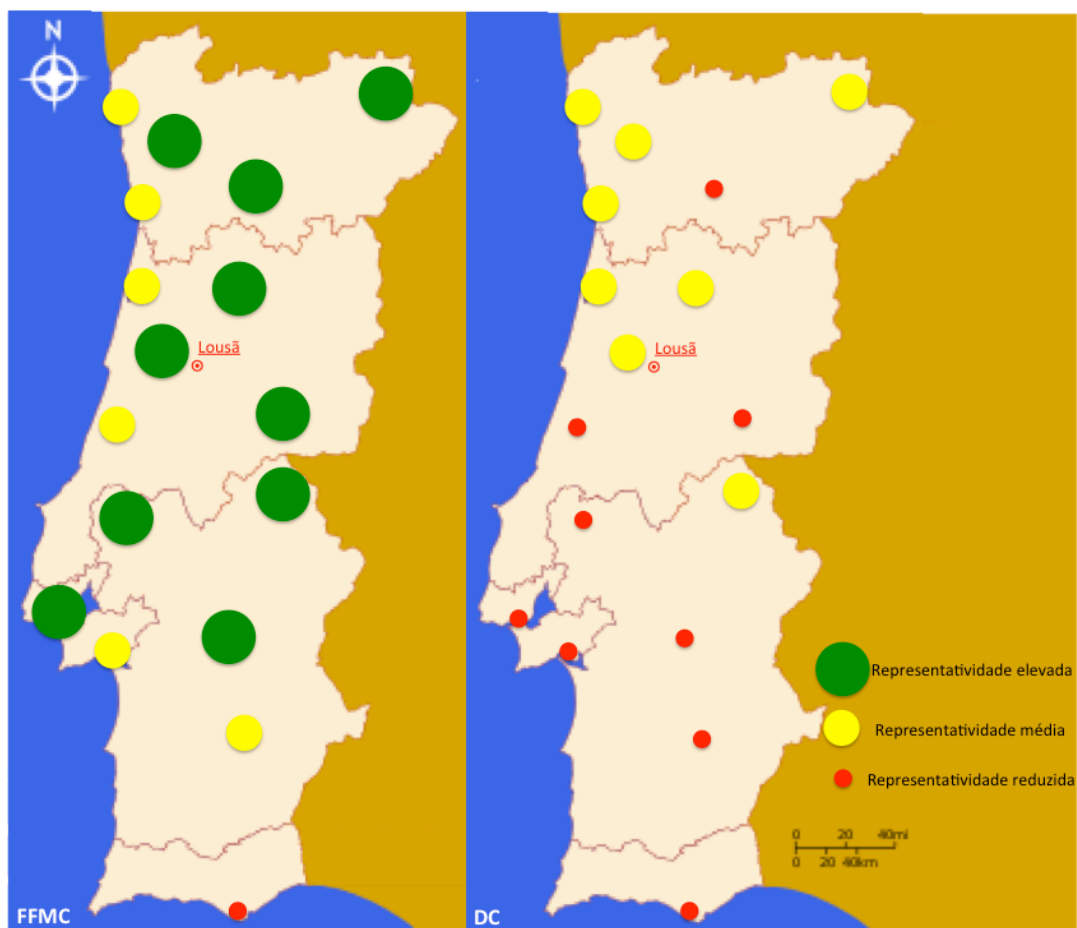


Figura 15 – Representatividade espacial das medições do teor de humidade de combustíveis florestais finos mortos e vivos na Lousã

Em termos gerais, pode verificar-se (*vide* Tabela 9 e Figura 15) que as medições do teor de humidade dos combustíveis florestais finos mortos realizadas na Lousã possuem uma elevada representatividade na zona centro e nordeste e uma representatividade média na zona litoral e sul do território português podendo assim ser utilizadas como um indicador de risco de incêndio destas regiões. No que respeita às espécies vivas, nomeadamente as espécies arbustivas, de uma forma geral, a sua representatividade é média no centro e norte e reduzida no restante território português.

Por forma a estimar as relações espaciais do teor de humidade das espécies estudadas, nomeadamente *Pinus pinaster*, *Eucalyptus globulus*, *Calluna vulgaris* e *Chamaespartium tridentatum*, foram correlacionados os dados do teor de humidade medido na Lousã com os restantes 3 locais de amostragem previamente apresentados

(Silvares, Olho Marinho e Viseu). Esta análise permitirá verificar a viabilidade de estimar o teor de humidade de uma determinada localização com base no teor de humidade medido na Lousã.

Na Tabela 10 é apresentado o coeficiente de correlação de Pearson entre o teor de humidade medido na Lousã com o dos restantes três locais. O teor de humidade das espécies arbóreas mortas e espécies arbustivas exibe uma boa correlação entre a Lousã e os restantes locais de medição, ao passo que o teor de humidade das espécies vivas não apresenta uma correlação significativa.

Possivelmente devido à proximidade entre os locais, as melhores correlações são estabelecidas entre a Lousã e Silvares, nomeadamente para as espécies arbóreas mortas, com um coeficiente de correlação de 0.917 para o *Eucalyptus globulus* e de 0.884 para o *Pinus pinaster*. As correlações entre o teor de humidade medido na Lousã e o teor de humidade medido nos restantes locais diminui com o aumento da distância.

Desta forma, foi calculada a relação linear, apresentada na equação (30), entre o teor de humidade medido na Lousã da espécie "A" no local "X" e o teor de humidade da mesma espécie no local "Y" para as espécies que apresentaram correlações significativas.

$$FMC_{Espécie A no local X} = a.FMC_{Espécie A no local Y} + b \quad (30)$$

Os parâmetros da equação (30) para cada relação foram calculados através do método dos mínimos quadrados. Os coeficientes "a" e "b" e o respetivo desvio padrão, assim como o número de dados "n" e o coeficiente de determinação ajustado ( $R^2$ ) são apresentados na Tabela 11.

A presente análise mostra que, na falta de outros dados, é possível estimar o teor de humidade de algumas espécies num dado local com base em medições efetuadas noutra local próximo, utilizando as relações lineares propostas. Os erros cometidos e a sua falta de generalidade recomendam no entanto que se utilizem outros métodos ou modelos de estimação, como os que são desenvolvidos mais adiante neste estudo.



Tabela 10 – Coeficiente de correlação de Pearson entre o teor de humidade medido na Lousã com os restantes três locais (Silvares, Olho Marinho e Viseu)

	<i>Pinus pinaster</i> morto	<i>Eucalyptus globulus</i> morto
Lousã e Silvares	0.884 <sup>(**)</sup>	0.917 <sup>(**)</sup>
Lousã e Olho Marinho	0.855 <sup>(**)</sup>	0.844 <sup>(**)</sup>
Lousã e Viseu	0.836 <sup>(**)</sup>	0.807 <sup>(**)</sup>
	<i>Pinus pinaster</i> vivo	<i>Eucalyptus globulus</i> vivo
Lousã e Silvares	0.092 <sup>(ns)</sup>	0.017 <sup>(ns)</sup>
Lousã e Olho Marinho	0.168 <sup>(**)</sup>	0.086 <sup>(ns)</sup>
Lousã e Viseu	0.137 <sup>(**)</sup>	0.108 <sup>(*)</sup>
	<i>Calluna vulgaris</i>	<i>Chamaespartium tridentatum</i>
Lousã e Silvares	0.654 <sup>(**)</sup>	0.676 <sup>(**)</sup>
Lousã e Olho Marinho	0.569 <sup>(**)</sup>	0.606 <sup>(**)</sup>
Lousã e Viseu	0.452 <sup>(**)</sup>	-

(\*\*) Nível de significância de 0.01; (\*) Nível de significância de 0.05; (ns) Não significativo

Tabela 11 – Coeficientes “a” e “b” e o respetivo desvio padrão, número de dados “n” e o coeficiente de determinação ajustado (R<sup>2</sup>) para as relações entre locais

Espécie	Relação	a	Desv. pad.	b	Desv. pad.	n	R <sup>2</sup> ajustado
<i>Pinus pinaster</i> morto	Lousã (X) e Silvares (Y)	0.678 <sup>(**)</sup>	0.023	5.295 <sup>(**)</sup>	0.651	239	0.781
	Lousã (X) e Olho Marinho (Y)	0.799 <sup>(**)</sup>	0.031	3.570 <sup>(**)</sup>	0.881	239	0.730
	Lousã (X) e Viseu (Y)	1.001 <sup>(**)</sup>	0.033	2.049 <sup>(*)</sup>	0.924	407	0.699
<i>Eucalyptus globulus</i> morto	Lousã (X) e Silvares (Y)	0.943 <sup>(**)</sup>	0.027	1.644 <sup>(**)</sup>	0.631	239	0.841
	Lousã (X) e Olho Marinho (Y)	0.972 <sup>(**)</sup>	0.040	2.628 <sup>(**)</sup>	0.951	239	0.712
	Lousã (X) e Viseu (Y)	0.969 <sup>(**)</sup>	0.035	4.886 <sup>(**)</sup>	1.021	407	0.650
<i>Calluna vulgaris</i>	Lousã (X) e Silvares (Y)	0.646 <sup>(**)</sup>	0.041	27.615 <sup>(**)</sup>	3.573	329	0.426
	Lousã (X) e Olho Marinho (Y)	0.649 <sup>(**)</sup>	0.052	37.866 <sup>(**)</sup>	4.490	329	0.321
	Lousã (X) e Viseu (Y)	0.808 <sup>(**)</sup>	0.079	37.213 <sup>(**)</sup>	7.675	406	0.202
<i>Chamaespartium tridentatum</i>	Lousã (X) e Silvares (Y)	0.782 <sup>(**)</sup>	0.782	25.716 <sup>(**)</sup>	3.526	329	0.456
	Lousã (X) e Olho Marinho (Y)	0.682 <sup>(**)</sup>	0.050	31.458 <sup>(**)</sup>	3.705	329	0.365

(\*\*) Nível de significância de 0.01; (\*) Nível de significância de 0.05; (ns) Não significativo

#### 4.2.4 Representatividade temporal do teor de humidade medido

##### Variação Anual

Em termos de variação temporal, na Figura 16 são apresentados a média e o desvio padrão mensal do teor de humidade de espécies arbóreas mortas e vivas (*Pinus pinaster* e *Eucalyptus globulus*) e arbustivas (*Calluna vulgaris* e *Chamaespartium tridentatum*) considerando os dados relativos a todo o período em estudo (1996 –

2012). Os segmentos verticais indicam o intervalo de variação com um nível de confiança de 95%.

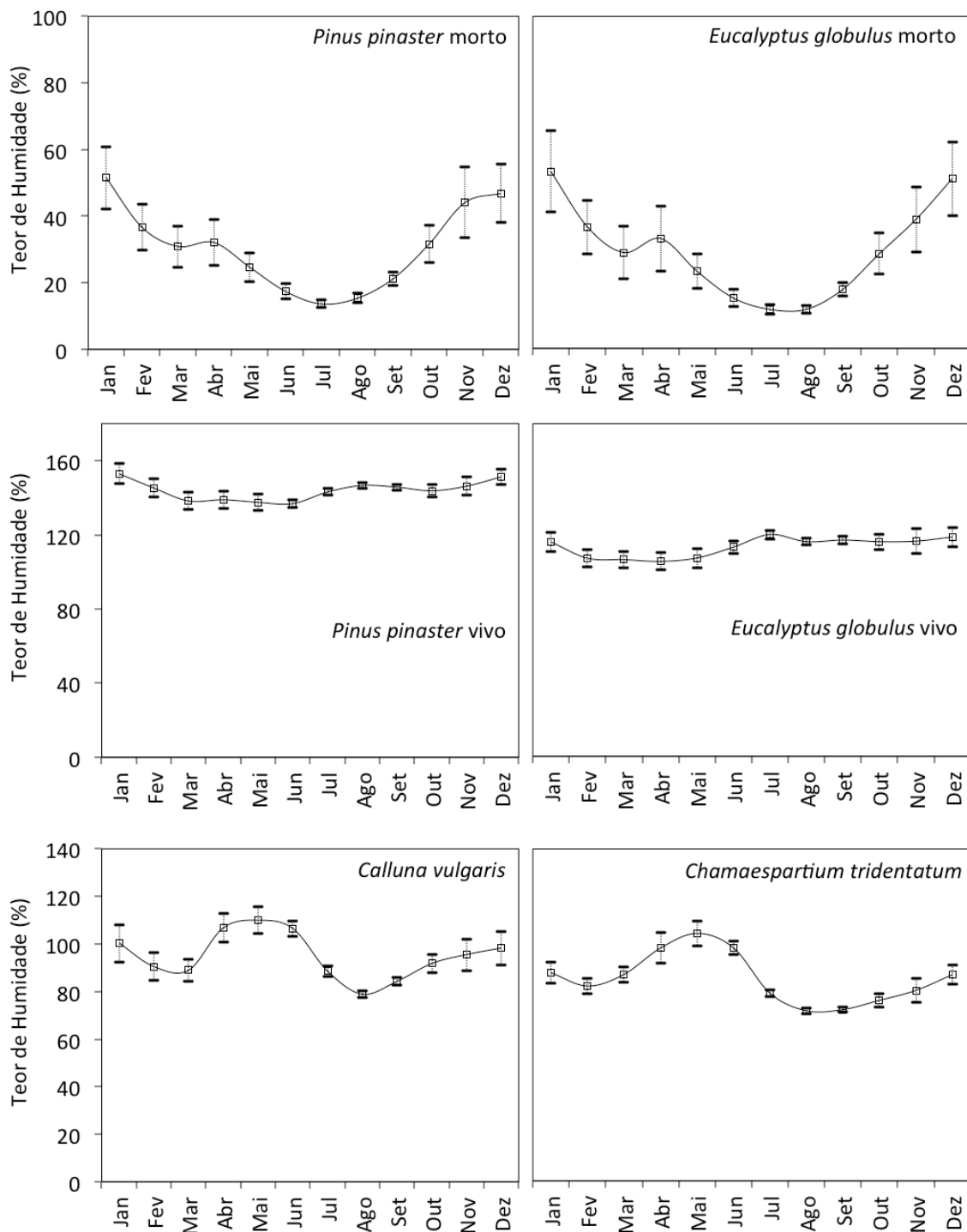


Figura 16 – Média mensal do teor de humidade das espécies arbóreas mortas e vivas (*Pinus pinaster* e *Eucalyptus globulus*) e arbustivas (*Calluna vulgaris* e *Chamaespartium tridentatum*), medidos na Lousã considerando o período total de análise (1996 – 2012). As linhas verticais indicam o intervalo de confiança de 95%.

Como se pode observar na Figura 16, utilizando os valores médios entre 1996 e 2012, o perfil de variação anual do teor de humidade é análogo nas espécies arbóreas mortas (*Pinus pinaster* e *Eucalyptus globulus*), iniciando o ano (Janeiro) com um teor de humidade médio próximo dos 50%, o qual se vai reduzindo gradualmente até atingir um mínimo nos meses de Verão (Julho e Agosto), com valores próximos de 10% a 15%, voltando novamente a aumentar até aos 50% no final do ano (Dezembro).

De acordo com os resultados apresentados na Figura 16, como esperado, em Portugal, o período em que o risco de incêndio é mais elevado (Junho, Julho, Agosto e Setembro) coincide com os valores mais reduzidos do teor de humidade. Assim, neste período, os combustíveis florestais, nomeadamente os combustíveis mortos deverão ser caracterizados numa base diária. Durante o restante período será suficiente uma amostragem com 8 a 15 dias de intervalo, apenas para estabelecer uma variação sazonal. Pode ainda concluir-se que o teor de humidade das espécies arbóreas mortas (*Pinus pinaster* e *Eucalyptus globulus*) possui uma elevada variabilidade diária nos meses de Novembro a Abril, sendo que o intervalo de confiança de 95%, quando comparado com o teor de humidade médio, é significativo nestes meses.

Em média, o teor de humidade da espécie *Pinus pinaster* vivo é praticamente constante ao longo do ano, variando em média entre 135% e 155%. A espécie *Pinus pinaster* vivo inicia o ano, em Janeiro, com um teor de humidade médio próximo dos 155%, o qual se reduz até atingir, em Junho, cerca de 135%, voltando novamente a recuperar para um valor médio de 150% em Dezembro. De Junho a Dezembro (período que engloba uma parte da época de incêndios em Portugal), existe um aumento do teor de humidade médio de *Pinus pinaster* vivo de 135% para 150%, sendo que a recuperação é mais notória nos meses de Junho para Julho e Agosto.

Em média, o teor de humidade da espécie *Eucalyptus globulus* vivo é também praticamente constante ao longo do ano tal como no caso do *Pinus pinaster* vivo, situando-se, no entanto, o intervalo de variação agora em média entre os 105% e os 120%.

A espécie *Eucalyptus globulus* vivo inicia o ano, em Janeiro, com um teor de humidade médio próximo dos 115%, reduzindo-se gradualmente até atingir, em Abril, um valor próximo de 105%, valor este que é o mais reduzido em todo o ano. De Abril a

Julho, o *Eucalyptus globulus* vivo volta novamente a recuperar para um teor de humidade médio de 120%, valor que se reduz ligeiramente até Dezembro.

O teor de humidade das espécies arbóreas vivas (*Pinus pinaster* e *Eucalyptus globulus*) possui uma reduzida variabilidade diária mensal, pois o intervalo de confiança de 95%, quando comparado com o teor de humidade médio, é relativamente reduzido em todo o ano.

Como se pode observar na Figura 16, de uma forma geral, o perfil de variação anual do teor de humidade é análogo nas espécies arbustivas vivas (*Calluna vulgaris* e *Chamaespartium tridentatum*).

A espécie *Calluna vulgaris* inicia o ano, em Janeiro, com um teor de humidade médio próximo dos 100%, valor que se reduz gradualmente este valor até atingir, em Março, um teor de humidade médio ligeiramente abaixo dos 90%, voltando novamente a aumentar para um valor médio próximo de 110%, em Maio. De Maio a Agosto ocorre novamente um decréscimo do teor de humidade médio da espécie *Calluna vulgaris*, atingindo valores, no mês de Agosto, ligeiramente abaixo de 80%. De Agosto a Dezembro existe um novo aumento do teor de humidade médio da *Calluna vulgaris* de 80% para cerca de 100%.

A espécie *Chamaespartium tridentatum* inicia o ano, em Janeiro, com um teor de humidade médio próximo dos 90%, valor que se reduz para um teor de humidade médio ligeiramente acima dos 80% em Fevereiro, voltando novamente a aumentar para um teor de humidade médio próximo de 105%, em Maio. De Maio a Agosto ocorre novamente um decréscimo do teor de humidade médio da espécie *Chamaespartium tridentatum*, atingindo valores, no mês de Agosto de sensivelmente 70%. De Agosto a Dezembro existe um novo aumento do teor de humidade médio da *Chamaespartium tridentatum* de 70% para valores acima dos 85%.

O teor de humidade das espécies arbustivas vivas (*Calluna vulgaris* e *Chamaespartium tridentatum*) possui uma reduzida variabilidade diária mensal, pois o intervalo de confiança de 95% quando comparado com o teor de humidade médio, é relativamente reduzido em todo o ano.

### Variação Diária

Como previamente referido, os resultados analisados anteriormente referem-se a amostras colhidas próximo do meio dia solar, ou seja indicativas dos valores mínimos diários do teor de humidade de cada espécie. Este valor é importante para caracterizar o risco diário de incêndio. Sabe-se no entanto que o teor de humidade varia ao longo do dia, em função da temperatura e humidade relativa do ar. Na previsão do comportamento de um incêndio que se desenvolva a uma hora qualquer do dia torna-se necessário conhecer o respetivo valor do teor de humidade, que poderá ser significativamente diferente do valor mínimo diário que se referiu anteriormente.

Em termos de representatividade diária, foram realizados vários testes da variação do teor de humidade ao longo do dia, nomeadamente para as agulhas mortas de *Pinus pinaster* entre as 7h00 e as 24h00 tal como apresentado na Figura 17. Nesta figura são igualmente apresentados os parâmetros meteorológicos (temperatura e humidade relativa do ar) medidos aquando da caracterização do teor de humidade.

De acordo com os dados presentes na Figura 17, na Tabela 12 são apresentados os coeficiente de correlação de Pearson entre o teor de humidade de agulhas mortas de *Pinus pinaster* medido no tempo  $t$  e os parâmetros meteorológicos medidos no tempo  $t$  e no tempo  $t$  menos duas horas ( $t-2h$ ).

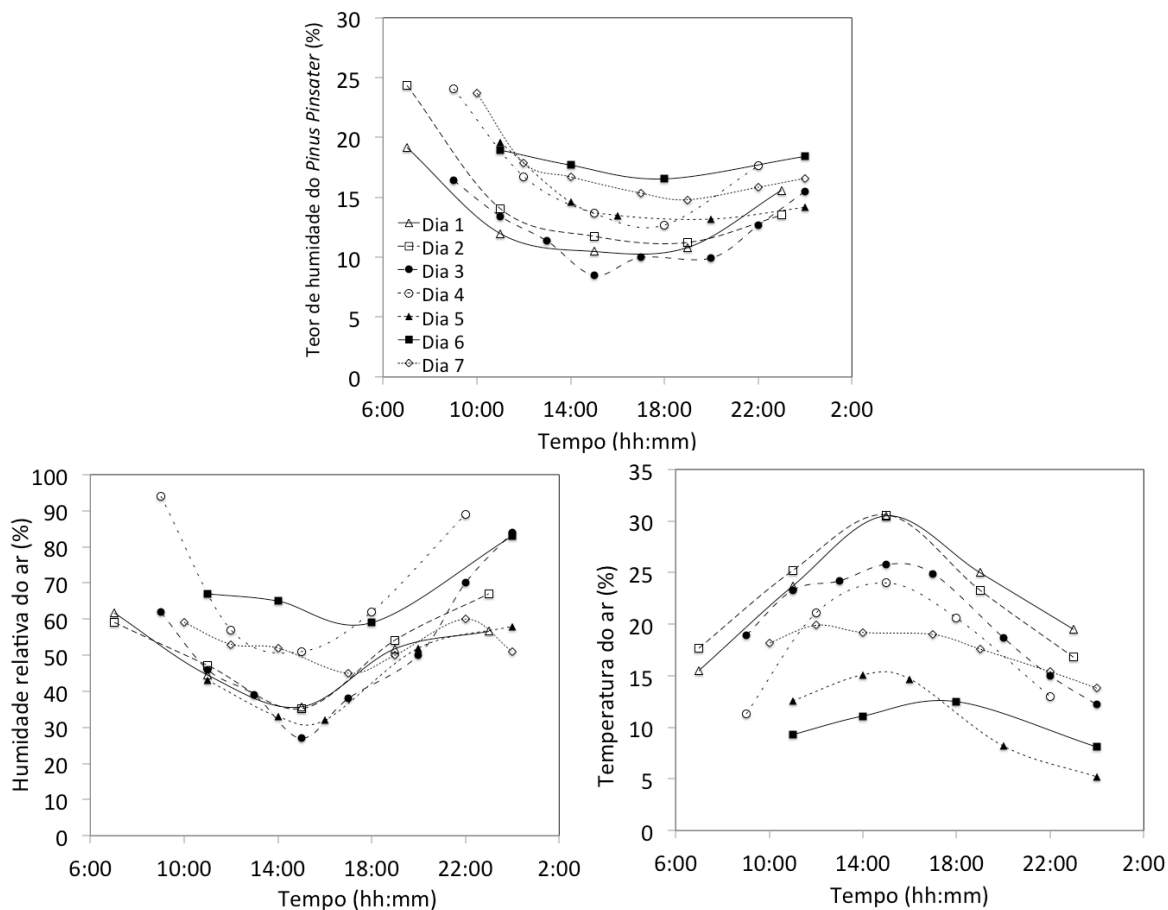


Figura 17 – Variação diária (entre as 7h00 e as 24h00) do teor de humidade de agulhas mortas de *Pinus pinaster* e dos parâmetros meteorológicos medidos na estação meteorológica mais próxima

Tabela 12 – Coeficiente de correlação de Pearson entre o teor de humidade de agulhas mortas de *Pinus pinaster* medido no tempo t e os parâmetros meteorológicos medidos no tempo t e no tempo t menos duas horas (t-2h)

Relação	Tempo t	Tempo t-2h
Teor de humidade e temperatura do ar	-0.527 <sup>(**)</sup>	0.754 <sup>(**)</sup>
Teor de humidade e humidade relativa do ar	0.557 <sup>(**)</sup>	0.632 <sup>(**)</sup>

(\*\*) Nível de significância de 0.01

Como se pode observar na Figura 17, o teor de humidade das agulhas mortas de *Pinus pinaster* responde às variações diárias dos parâmetros meteorológicos, nomeadamente temperatura e humidade relativa do ar mas, tal como esperado, verifica-se uma melhor correlação com os valores meteorológicos registados 2 horas antes da medição do teor de humidade, evidenciado assim o tempo de resposta deste tipo de combustível.

De acordo com os dados anteriores e utilizando os dados de uma série temporal meteorológica de longa duração (1961-1990) das médias horárias da temperatura e da humidade relativa do ar entre as 5h00 e as 24h00 para a estação meteorológica da Lousã para Março, Junho, Setembro e Dezembro (*vide* Figura 18), podemos identificar as 15h00 como a hora do dia em que, em média, ocorre o máximo da temperatura do ar diária e o mínimo da humidade relativa do ar.

Desta forma, para uma elevada representatividade das condições meteorológicas de risco de incêndio mais gravosas, a hora de amostragem deverá ser às 15h00; no entanto, para uma representatividade elevada das condições de secura dos combustíveis finos, a hora de amostragem deverá ser 1 a 2 horas depois das 15h00.

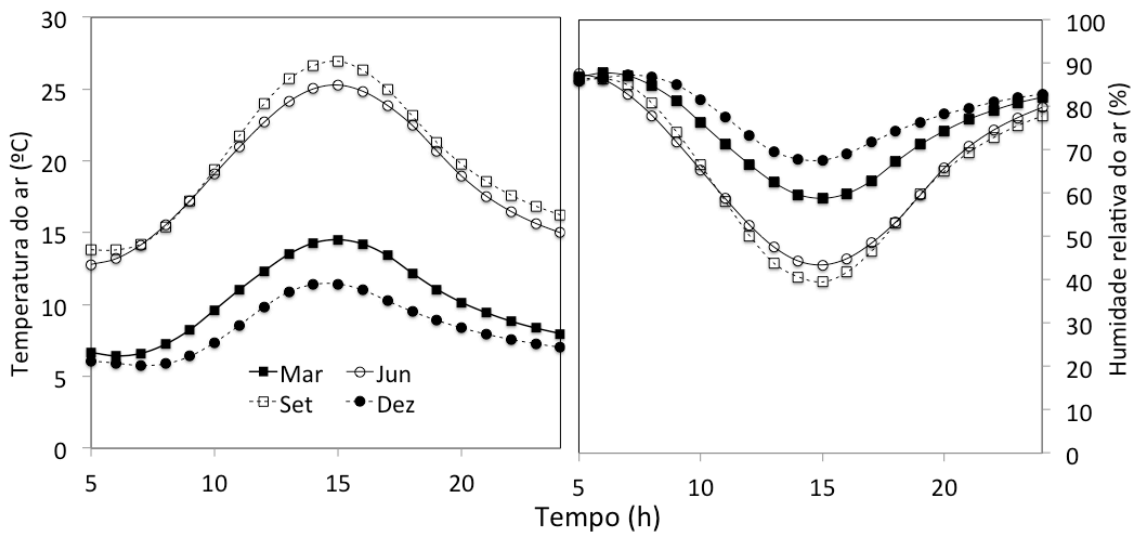


Figura 18 – Média horária (1961-1990) da temperatura e da humidade relativa do ar entre as 5h00 e as 24h00 para a estação meteorológica da Lousã

### 4.3 MODELAÇÃO DAS CURVAS DE SORÇÃO E DO TEOR DE HUMIDADE DE EQUILÍBRIO DA ESPÉCIE *PINUS PINASTER*

Foram determinadas as curvas de sorção e o teor de humidade de equilíbrio – EMC das agulhas de *Pinus pinaster* para posterior modelação do teor de humidade de combustíveis florestais finos. Para este efeito foi utilizada uma câmara climática em que a temperatura e a humidade do ar foram controladas, variando entre 20°C e 35°C e entre 10% e 90%, respetivamente. Na câmara climática foi incorporada uma balança de precisão e um sistema de registo dos valores de pesagem e das condições ambientais do interior da câmara. Os resultados obtidos para o processo de dessorção e adsorção são apresentados na Tabela 13 e na Tabela 14, respetivamente. Nestas tabelas figuram a temperatura a que se realizou o ensaio ( $T_{ar}$  em °C), a humidade relativa a que se realizou o ensaio ( $HR_{ar}$  em %), a duração do ensaio ( $t_{ensaio}$  em horas), a humidade relativa do ar no início do ensaio ( $HR_{ar\ inicial}$  em %), o teor de humidade inicial das agulhas de *Pinus pinaster* ( $TH_{inicial}$  em %), o teor de humidade de equilíbrio – EMC resultante do ensaio (EMC em %), o tempo que demorou a amostra a atingir o teor de humidade de equilíbrio – EMC ( $t_{EMC}$  em horas) e os 4 tempos de resposta,  $\tau_1$ ,  $\tau_2$ ,  $\tau_3$ ,  $\tau_4$  (em horas) que correspondem a  $E = 0.368, 0.135, 0.050$  e  $0.018$  no processo de dessorção e a  $E = 0.632, 0.865, 0.950$ , e  $0.982$  no processo de adsorção.



Tabela 13 – Resultados dos testes executados na câmara climática para o processo de dessorção

T <sub>ar</sub> (°C)	HR <sub>ar</sub> (%)	t <sub>ensaio</sub> (h)	HR <sub>ar</sub> inicial (%)	TH <sub>inicial</sub> (%)	EMC (%)	t <sub>EMC</sub> (h)	τ <sub>1</sub> (h)	τ <sub>2</sub> (h)	τ <sub>3</sub> (h)	τ <sub>4</sub> (h)
20	10	36.0	70	18.43	8.98	17.7	2.59	3.53	6.22	3.60
20	20	34.6	40	13.62	10.46	11.1	2.32	6.81	4.82	0.51
20	40	22.6	60	16.78	13.83	7.9	2.39	2.62	2.79	1.81
20	60	34.9	80	22.41	17.31	11.7	1.82	4.03	5.42	1.31
20	80	36.0	90	26.37	22.23	26.9	1.94	6.03	16.80	1.76
25	10	49.5	-	12.81	8.21	17.8	2.77	6.17	6.07	3.30
25	10	70.3	70	18.24	7.46	9.8	2.41	3.93	2.33	0.90
25	10	70.8	90	25.13	8.47	26.5	2.02	3.81	9.13	9.68
25	20	34.1	70	15.87	9.31	11.1	2.44	6.47	2.42	0.70
25	30	72.0	90	32.30	13.29	50.7	2.66	5.24	11.01	21.00
25	40	72.1	60	16.99	13.19	29.9	3.25	14.28	24.01	6.00
25	50	71.9	90	23.27	16.91	32.9	3.57	9.42	10.19	19.67
25	60	72.1	80	22.17	17.03	46.7	2.47	16.35	26.69	5.14
25	70	36.0	80	21.90	20.74	-	-	-	-	-
25	80	35.1	90	29.85	23.98	-	3.13	8.11	10.91	9.43
30	10	58.3	-	32.24	7.88	41.8	2.25	4.27	7.51	8.14
30	20	36.1	70	18.00	9.87	29.3	1.23	2.74	3.55	3.91
30	30	-	50	-	10.56	-	-	-	-	-
30	40	36.1	80	21.68	12.88	13.1	1.06	2.21	2.72	7.24
30	50	37.3	70	17.77	13.95	19.7	3.13	6.66	11.40	6.10
30	60	47.9	70	22.00	19.45	22.1	4.47	13.90	10.54	11.88
30	80	31.2	90	33.35	26.16	20.5	3.13	7.58	8.39	2.43
35	10	36.0	70	16.37	6.97	13.9	1.14	2.60	8.40	1.83
35	10	36.1	30	10.15	6.90	13.0	2.20	3.70	8.57	3.38
35	20	36.1	40	11.51	8.28	12.1	1.94	2.96	2.45	1.90
35	30	36.0	50	13.73	10.23	10.4	1.02	0.64	7.05	3.28
35	40	36.0	60	14.52	11.81	14.0	0.71	0.83	2.24	2.61
35	50	36.0	70	17.52	14.04	13.1	0.86	2.01	1.51	3.13
35	60	36.0	80	19.30	14.82	30.3	1.16	2.31	3.43	1.35
35	70	24.7	90	27.05	17.81	7.9	1.13	1.97	3.03	1.73

Tabela 14 – Resultados dos testes executados na câmara climática para o processo de adsorção

$T_{ar}$ (°C)	$HR_{ar}$ (%)	$t_{ensaio}$ (h)	$HR_{ar\ inicial}$ (%)	$TH_{inicial}$ (%)	EMC (%)	$t_{EMC}$ (h)	$\tau_1$ (h)	$\tau_2$ (h)	$\tau_3$ (h)	$\tau_4$ (h)
20	30	36.0	10	8.55	10.49	8.8	1.86	2.15	4.63	3.77
20	40	26.2	20	10.03	12.42	14.8	1.97	3.92	9.24	0.78
20	50	35.4	10	10.46	13.48	25.4	2.24	4.11	4.31	16.90
20	60	36.1	40	12.19	15.43	10.7	2.58	2.93	2.81	2.83
20	70	36.1	10	13.05	16.55	12.0	1.95	5.34	4.81	0.80
20	80	36.0	60	15.61	19.63	16.3	1.71	3.63	10.80	1.33
20	90	36.0	70	16.62	26.49	24.7	3.91	6.08	12.17	2.52
25	10	50.2	0	0.00	7.26	28.7	0.15	7.09	19.15	3.23
25	20	60.1	10	9.27	10.52	12.8	3.98	5.64	7.82	12.63
25	30	73.2	10	8.43	11.11	35.2	-	-	-	-
25	40	60.0	20	10.70	12.99	11.5	3.27	4.67	8.01	6.38
25	50	72.0	30	13.23	15.54	7.6	2.25	3.47	3.93	2.27
25	60	55.4	40	12.97	16.39	18.3	4.06	7.89	15.42	3.73
25	60	23.5	30	10.94	16.62	14.2	2.85	4.35	5.53	2.38
25	70	50.0	20	8.68	17.54	11.9	2.31	2.24	3.02	4.05
25	80	97.1	30	11.15	22.15	15.0	4.68	5.53	6.31	3.48
25	90	60.1	20	10.00	29.91	28.8	4.10	7.61	16.67	12.84
25	90	72.0	50	16.95	32.39	55.1	3.62	4.86	6.64	12.05
30	30	48.1	10	7.95	10.32	20.5	2.67	9.19	8.99	19.66
30	40	36.0	20	9.64	11.94	3.8	1.14	1.67	2.13	0.24
30	50	48.1	30	10.40	13.34	17.0	3.38	7.82	7.11	3.81
30	60	36.1	40	11.90	14.99	4.2	1.24	1.52	1.28	1.90
30	70	36.0	40	12.79	17.84	11.2	1.18	2.94	3.56	3.62
30	90	48.0	60	26.07	34.57	5.1	1.80	2.57	2.73	1.81
35	20	24.4	10	6.87	8.07	5.0	3.11	12.46	2.11	1.18
35	30	36.0	10	7.00	9.55	12.9	1.29	2.23	9.52	3.67
35	40	36.0	20	7.91	10.76	7.8	1.78	2.48	2.33	1.52
35	50	36.1	30	9.60	12.45	6.7	1.31	2.08	3.87	5.23
35	60	36.1	40	10.85	13.63	2.7	0.98	0.88	0.66	0.34
35	70	36.0	30	12.38	16.24	9.9	1.28	2.53	8.54	2.46
35	80	36.0	60	13.58	19.15	8.9	1.63	2.13	2.60	1.84
35	90	36.1	70	16.11	27.18	9.3	2.24	3.66	3.15	2.20

### 4.3.1 Curvas de dessorção e adsorção das agulhas mortas de *Pinus pinaster*

Na Figura 19 e na Figura 20 estão representadas as curvas de dessorção e de adsorção para as agulhas mortas de *Pinus pinaster*, nomeadamente a fracção evaporável de água que permanece no combustível ( $E$ ) em função do tempo (horas), determinadas para uma temperatura do ar de 20 °C, 25 °C, 30 °C e 35 °C, variando a humidade relativa do ar na gama entre 10% a 90%. Tal como referido anteriormente, para alguns valores da humidade relativa do ar, devido a problemas de comunicação entre a balança e o sistema de aquisição de dados ou a cortes de corrente eléctrica, não foi possível determinar a curva de sorção e, conseqüentemente, o tempo de resposta. Para confirmação de resultados, alguns testes foram repetidos.

As curvas de dessorção e de adsorção apresentam uma configuração exponencial. Assim, de um estado seco ou húmido, as agulhas mortas de *Pinus pinaster* perdem ou ganham humidade mais rapidamente no início e depois cada vez mais lentamente à medida que se aproxima o teor de humidade de equilíbrio – EMC. Pode no entanto também verificar-se que as curvas não são exponenciais puras.

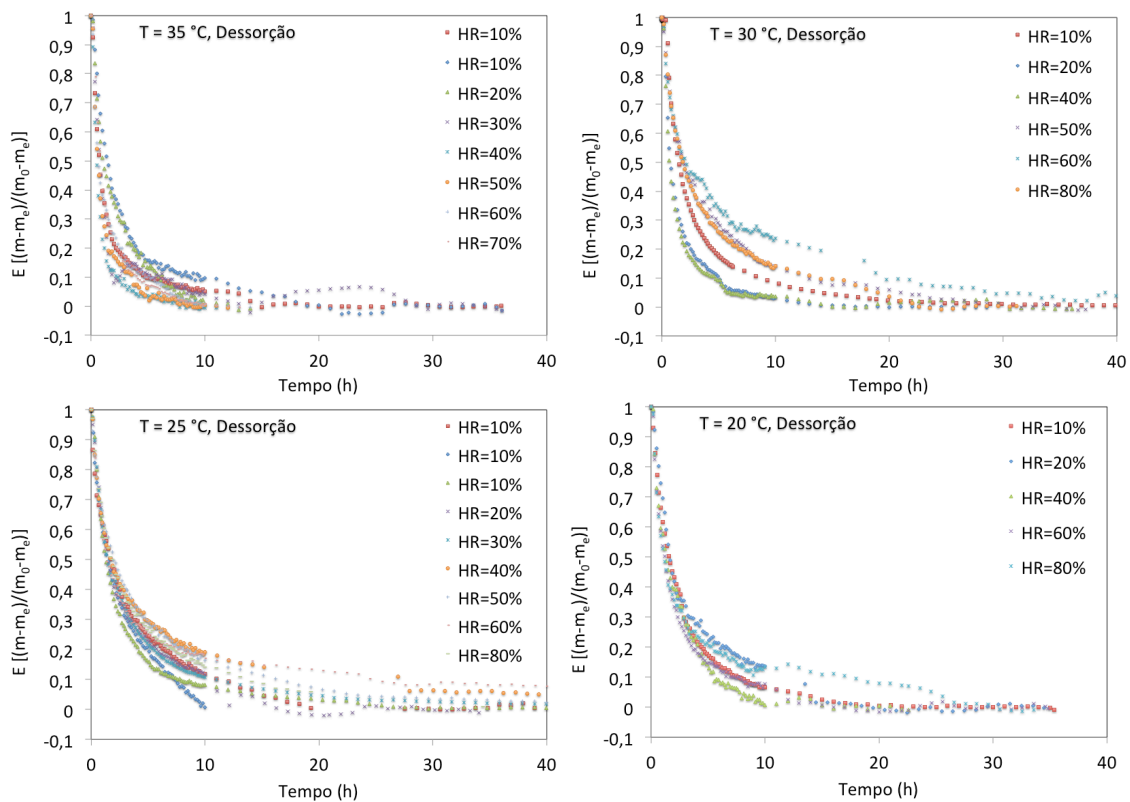


Figura 19 – Curvas de dessorção de agulhas mortas de *Pinus Pinaster* da fracção de água dessorvível,  $E$ , versus tempo, para as temperaturas de 20 °C, 25 °C, 30 °C e 35 °C, variando a humidade relativa do ar na gama entre 10% a 90%

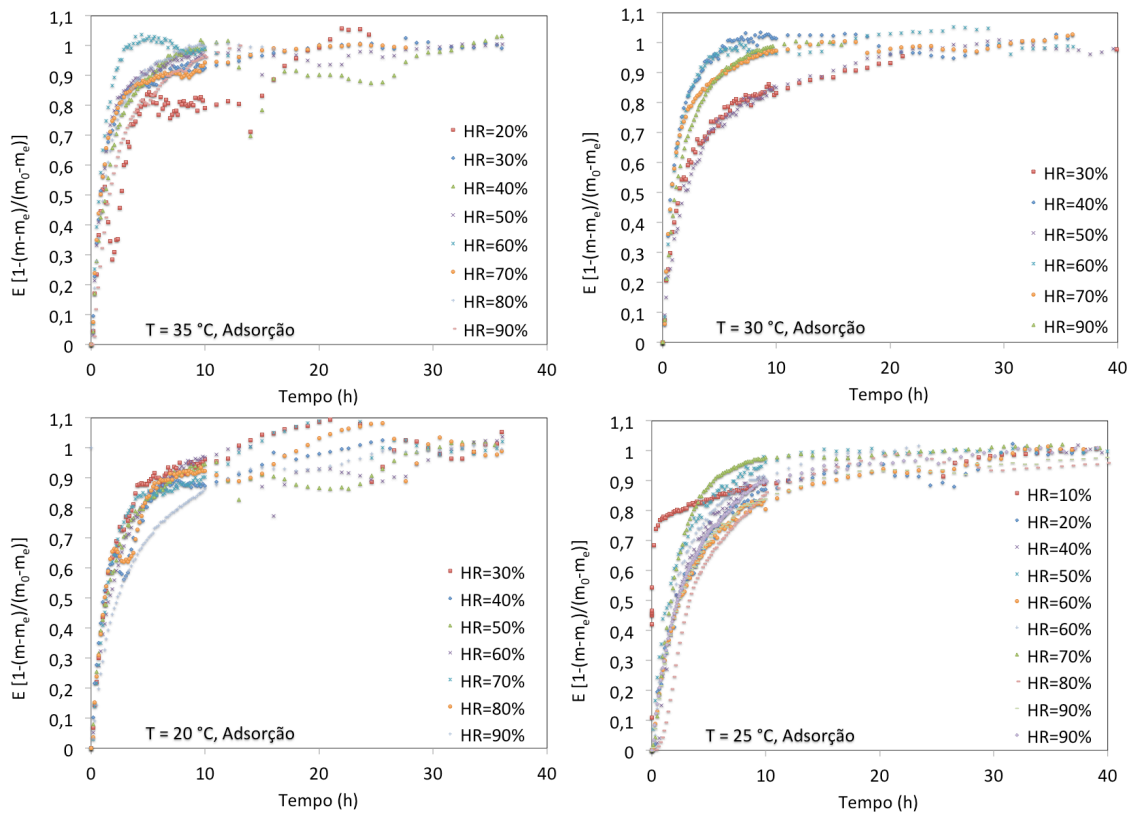


Figura 20 – Curvas de adsorção de agulhas mortas de *Pinus Pinaster* da fração de água adsorvível,  $E$ , versus tempo, para as temperaturas de 20 °C, 25 °C, 30 °C e 35 °C, variando a humidade relativa do ar na gama entre 10% a 90%

Partindo as curvas de sorção em 4 períodos de secagem ou de humidificação, onde  $E$  corresponde a 0.368, 0.135, 0.050 e 0.018 para a dessorção e a 0.632; 0.865; 0.950; 0.982 para a adsorção, permite-se o cálculo de 4 tempos de resposta ( $\tau_i$ ), caracterizando assim a rapidez com que o teor de humidade se aproxima do teor de humidade de equilíbrio – EMC. Na Tabela 15 é apresentado o tempo de resposta médio das agulhas mortas de *Pinus pinaster* considerando todos os testes realizados.

Tabela 15 – Tempos de resposta médios ( $\tau$ ) das agulhas mortas de *Pinus pinaster*, para as temperaturas de 20 °C, 25 °C, 30 °C e 35 °C, variando a humidade relativa do ar na gama entre 10% a 90%.

Processo	N.º Testes	$\tau_1$ (h)		$\tau_2$ (h)		$\tau_3$ (h)		$\tau_4$ (h)	
		Média	Desv. pad.	Média	Desv. pad.	Média	Desv. pad.	Média	Desv. pad.
Dessorção	28	2.18	0.91	5.40	3.94	7.84	6.09	5.13	5.13
Adsorção	31	2.34	1.10	4.38	2.58	6.45	4.55	4.56	4.84

Como se pode verificar, as agulhas mortas de *Pinus pinaster* necessitam de 20.56 horas para atingir 1.8% da fração evaporável de água remanescente num combustível no processo de dessorção e 17.73 horas para adsorver 98.2% do total de água adsorvível no processo de adsorção, no entanto em 2.18 horas, a fracção evaporável de água já foi reduzida em 36.8% no processo de dessorção e em 2.34 horas a fracção evaporável de água aumentou para 63.2% no processo de adsorção. Salienta-se que, em situações em que as condições ambientais permitem que os combustíveis florestais tenham tempo suficiente para estabilizar num valor constante de teor de humidade de equilíbrio – EMC, então o 4º período de tempo de resposta (98.2% da fração evaporável de água que permanece num combustível) poderá ser necessário. Esta observação é verdadeira se forem utilizados valores médios diários dos parâmetros meteorológicos para estimar a variação do teor de humidade de um combustível florestal.

Como pode ser verificado,  $\tau_1 < \tau_2 < \tau_3$ , como em Anderson (1985). Os tempos de resposta  $\tau_3$  e  $\tau_4$  apresentam um elevado desvio padrão devido à elevada flutuação dos valores do teor de humidade próximo do teor de humidade de equilíbrio – EMC. Em termos médios, com excepção do  $\tau_1$ , os tempos de resposta do processo de dessorção são superiores aos tempos de resposta do processo de adsorção.

Considerando os modelos apresentados e caracterizados através da equação **(3)** à equação (13), na Tabela 16 e na Tabela 17 está apresentada a estimativa dos parâmetros dos modelos de dessorção e de adsorção, respetivamente para uma gama de temperaturas de 20 °C, 25 °C, 30 °C e 35 °C, variando a humidade relativa do ar na gama entre 10% a 90%. A estimativa dos parâmetros foi realizada através de uma regressão não linear baseada nos resultados das medições apresentadas na Figura 19 e na Figura 20.

Tabela 16 – Parâmetros dos modelos para o processo de dessorção

Modelo	$k_1$	a	n	$k_2$	b	$k_3$	c	$k_4$	$R^2$	MAE	RMSE
Byram (exponencial pura)	0.410	-	-	-	-	-	-	-	0.831	0.0669	0.0960
Exponencial combinada	0.458	0.551	-	0.185	0.356	0.128	1.005	0.195	0.886	0.0588	0.0827
Page	0.596	-	0.653	-	-	-	-	-	0.885	0.0591	0.0790
Henderson e Pabis	0.341	0.864	-	-	-	-	-	-	0.848	0.0655	0.0910
Logarítmico (assimptótico)	0.463	0.868	-	-	0.060	-	-	-	0.870	0.0662	0.0842
Midilli	0.351	0.872	-	-	$0.843 \times 10^{-3}$	-	-	-	0.853	0.0662	0.0896
Dois-termos	0.133	0.338	-	0.936	0.662	-	-	-	0.894	0.0579	0.0760
Dois-termos exponencial	1.228	0.255	-	-	-	-	-	-	0.865	0.0604	0.0857
Henderson e Pabis modificado	0.190	0.368	-	1.040	0.592	0.025	0.040	-	0.895	0.0579	0.0757

Tabela 17 – Parâmetros dos modelos para o processo de adsorção

Equation	$k_1$	a	n	$k_2$	b	$k_3$	c	$k_4$	$R^2$	MAE	RMSE
Byram (exponencial pura)	0.386	-	-	-	-	-	-	-	0.813	0.0724	0.1003
Exponencial combinada	0.428	0.628	-	0.228	0.384	0.155	0.891	0.219	0.853	0.0669	0.0912
Page	0.548	-	0.694	-	-	-	-	-	0.850	0.0665	0.0897
Henderson e Pabis	0.324	0.862	-	-	-	-	-	-	0.830	0.0711	0.0957
Logarítmico (assimptótico)	0.400	0.860	-	-	0.045	-	-	-	0.843	0.0706	0.0918
Midilli	0.332	0.868	-	-	$0.71 \times 10^{-3}$	-	-	-	0.833	0.0715	0.0947
Dois-termos	0.704	0.729	-	0.112	0.271	-	-	-	0.855	0.0649	0.0884
Dois-termos exponencial	1.143	0.259	-	-	-	-	-	-	0.839	0.0676	0.0932
Henderson e Pabis modificado	0.076	0.166	-	0.441	0.583	1.383	0.251	-	0.856	0.0649	0.0881

Como se pode observar na Tabela 16 e na Tabela 17, para uma gama alargada de valores de temperatura e de humidade relativa do ar, todos os testes de sorção efetuados mostram um bom ajustamento aos resultados laboratoriais, com um MAE com valores entre 5.79% e 6.69%, um RMSE com valores entre 7.57% e 9.60% e um  $R^2$  com valores entre 0.831 e 0.895 no processo de dessorção e com um MAE com valores entre 6.49% e 7.24%, um RMSE com valores entre 8.81% e 10.03% e um  $R^2$  com valores entre 0.813 e 0.856 no processo de adsorção.

Relativamente ao conjunto de parâmetros estatísticos apresentados, as curvas de dessorção e de adsorção determinadas em laboratório possuem um melhor ajustamento ao modelo de Henderson e Pabis modificado e ao modelo de dois-termos. A combinação de 4 equações exponenciais também resulta num ajustamento elevado, com um  $R^2$  de 0.886. A utilização de uma equação puramente exponencial,

considerando que o tempo de resposta é constante em todo o processo de dessorção ou de adsorção resulta num menor ajustamento com um  $R^2$  de 0.831. Para a equação puramente exponencial o tempo de resposta era de 2.44 horas para o processo de dessorção e de 2.59 horas para o processo de adsorção.

A Figura 21 aborda mais detalhadamente a equação exponencial combinada, resultante da aplicação das equações (3) a (6), comparando-a com a equação (2) que define o modelo de Byram (exponencial pura) e com a equação (11) que define o modelo Dois-Termos.

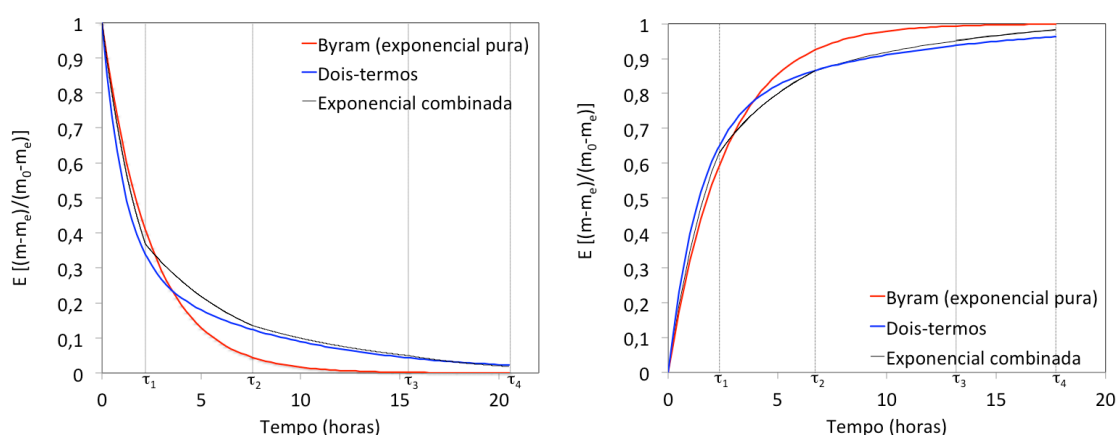


Figura 21 – Curvas de adsorção e dessorção de agulhas mortas de *Pinus Pinaster* obtidas através da aplicação do modelo da Exponencial combinada e comparação com o modelo de Byram (exponencial pura) e modelo Dois-Termos

Como se pode verificar, as equações que definem o modelo da exponencial combinada, o modelo de Byram (exponencial pura) e o modelo Dois-Termos possuem comportamentos semelhantes no primeiro período, correspondente ao primeiro tempo de resposta ( $\tau_1$ ). Este facto pressupõe que a aplicação destes modelos nas situações em que as condições meteorológicas se alteram ou são numericamente atualizadas numa base temporal inferior ou igual a  $\tau_1$ , os resultados dos modelos sejam semelhantes.

A partir de  $\tau_1$ , o modelo de Byram (exponencial pura) diverge significativamente dos dois outros modelos, aproximando-se muito mais rapidamente do teor de humidade de equilíbrio – EMC, atingindo mesmo 99% da diferença entre o teor de humidade inicial e o teor de humidade de equilíbrio – EMC antes de decorridas 12 horas.

Entre  $\tau_1$  e  $\tau_2$ , o modelo da exponencial combinada e o modelo Dois-Termos também diferem ligeiramente, embora, a partir de  $\tau_2$  e até  $\tau_4$ , estes dois modelos voltem praticamente a coincidir de novo.

Nas situações em que é realizada a previsão do teor de humidade com base em médias diárias das condições meteorológicas é importante conhecer o comportamento dos modelos para 24 horas de previsão. Como esperado, devido a tratar-se de combustíveis finos, a rápida resposta das agulhas mortas de *Pinus pinaster* às condições ambientais faz com que, para estas situações, ao fim de 24 horas, o teor de humidade esteja muito próximo do teor de humidade de equilíbrio – EMC.

Pressupondo que, no caso do modelo da exponencial combinada, a última equação se mantém até às 24 horas, daqui resulta que, para a dessorção, no final de 24 horas, o modelo da exponencial combinada atinge 99.1% da diferença entre o teor de humidade inicial e o teor de humidade de equilíbrio – EMC e o modelo Dois-Termos atinge 98.6% da diferença entre o teor de humidade inicial e o teor de humidade de equilíbrio – EMC. Para o modelo de Byram (exponencial pura), como anteriormente referido, este atinge 99% da diferença entre o teor de humidade inicial e o teor de humidade de equilíbrio – EMC, antes de 12 horas, sendo que ao final de 24 horas este valor atinge 99.99%.

Para a adsorção, ao final de 24 horas, o modelo da exponencial combinada atinge 99.5% da diferença entre o teor de humidade inicial e o teor de humidade de equilíbrio – EMC e o modelo Dois-Termos atinge 98.2% da diferença entre o teor de humidade inicial e o teor de humidade de equilíbrio – EMC. Tal como para a dessorção, o modelo de Byram (exponencial pura), ao final de 24 horas tal valor atinge 99.99% da diferença entre o teor de humidade inicial e o teor de humidade de equilíbrio – EMC.

Os tempos de resposta apresentados na Tabela 15 são valores médios calculados com base em todos os testes de sorção realizados. Por forma a verificar quais os parâmetros caracterizadores dos ensaios de sorção que condicionam os tempos de resposta obtidos, são apresentados, na Tabela 18 e na Tabela 19, os coeficientes de correlação de Spearman entre os tempos de resposta e a temperatura do ar, a humidade relativa do ar, a variação da humidade relativa do ar, a variação do



teor de humidade do *Pinus pinaster* e o teor de humidade inicial do *Pinus pinaster* dos ensaios.

Tabela 18 – Coeficiente de correlação de Spearman entre os tempos de resposta ( $\tau$ ) das agulhas mortas de *Pinus pinaster* e parâmetros caracterizadores dos ensaios para o processo de dessecção

	$\tau_1$ (h)	$\tau_2$ (h)	$\tau_3$ (h)	$\tau_4$ (h)
Temperatura do ar (°C)	-0.493 <sup>(**)</sup>	-0.535 <sup>(**)</sup>	-0.273 <sup>(ns)</sup>	0.031 <sup>(ns)</sup>
Humidade relativa do ar (%)	0.098 <sup>(ns)</sup>	0.224 <sup>(ns)</sup>	0.233 <sup>(ns)</sup>	-0.009 <sup>(ns)</sup>
Variação da humidade relativa do ar (%)	-0.121 <sup>(ns)</sup>	-0.242 <sup>(ns)</sup>	-0.214 <sup>(ns)</sup>	0.091 <sup>(ns)</sup>
Variação do teor de humidade do <i>Pinus pinaster</i> (%)	0.044 <sup>(ns)</sup>	-0.005 <sup>(ns)</sup>	0.097 <sup>(ns)</sup>	0.211 <sup>(ns)</sup>
Teor de humidade inicial do <i>Pinus pinaster</i> (%)	0.243 <sup>(ns)</sup>	0.282 <sup>(ns)</sup>	0.389 <sup>(*)</sup>	0.367 <sup>(ns)</sup>

(\*\*) Nível de significância de 0.01; (\*) Nível de significância de 0.05; (ns) Não significativo

Tabela 19 – Coeficiente de correlação de Spearman entre os tempos de resposta médios ( $\tau$ ) das agulhas mortas de *Pinus pinaster* e parâmetros caracterizadores dos ensaios para o processo de adsorção

	$\tau_1$ (h)	$\tau_2$ (h)	$\tau_3$ (h)	$\tau_4$ (h)
Temperatura do ar (°C)	-0.385 <sup>(*)</sup>	-0.323 <sup>(ns)</sup>	-0.431 <sup>(*)</sup>	-0.176 <sup>(ns)</sup>
Humidade relativa do ar (%)	0.173 <sup>(ns)</sup>	-0.063 <sup>(ns)</sup>	-0.028 <sup>(ns)</sup>	-0.094 <sup>(ns)</sup>
Variação da humidade relativa do ar (%)	0.167 <sup>(ns)</sup>	-0.042 <sup>(ns)</sup>	0.035 <sup>(ns)</sup>	0.178 <sup>(ns)</sup>
Variação do teor de humidade do <i>Pinus pinaster</i> (%)	0.150 <sup>(ns)</sup>	0.122 <sup>(ns)</sup>	0.192 <sup>(ns)</sup>	0.075 <sup>(ns)</sup>
Teor de humidade inicial do <i>Pinus pinaster</i> (%)	0.109 <sup>(ns)</sup>	-0.050 <sup>(ns)</sup>	-0.042 <sup>(ns)</sup>	-0.229 <sup>(ns)</sup>

(\*\*) Nível de significância de 0.01; (\*) Nível de significância de 0.05; (ns) Não significativo

Como se pode verificar na Tabela 18 e na Tabela 19, para todos os parâmetros caracterizadores dos ensaios, os coeficientes de correlação de Spearman são reduzidos em ambos os processos. De acordo com os dados obtidos, para as agulhas de *Pinus pinaster* as correlações não são significativas entre os tempos de resposta e a humidade relativa, a variação da humidade relativa, a variação do teor de humidade do *Pinus pinaster* e o teor de humidade inicial do *Pinus pinaster* dos ensaios, este último de acordo com Van Wagner (1982).

Pode ainda verificar-se que existe alguma correlação entre os tempos de resposta e a temperatura do ensaio, nomeadamente para o primeiro e segundo tempo de resposta no processo de dessecção e para o primeiro tempo de resposta no processo de adsorção.

Desta forma, na Figura 22 é apresentada a relação entre o primeiro tempo de resposta ( $\tau_1$ ) e a temperatura do ensaio para o processo de dessorção e de adsorção. Foi calculada a relação polinomial, apresentada na equação (31), que relaciona o tempo de resposta com a temperatura do ar.

$$\tau_i = a_i + b_i T + c_i T^2 \quad (31)$$

Os parâmetros da equação (31), nomeadamente os coeficientes “a”, “b” e “c” e o respetivo desvio padrão, assim como o número de dados “n” e o coeficiente de determinação ajustado ( $R^2$ ) são apresentado na Tabela 20.

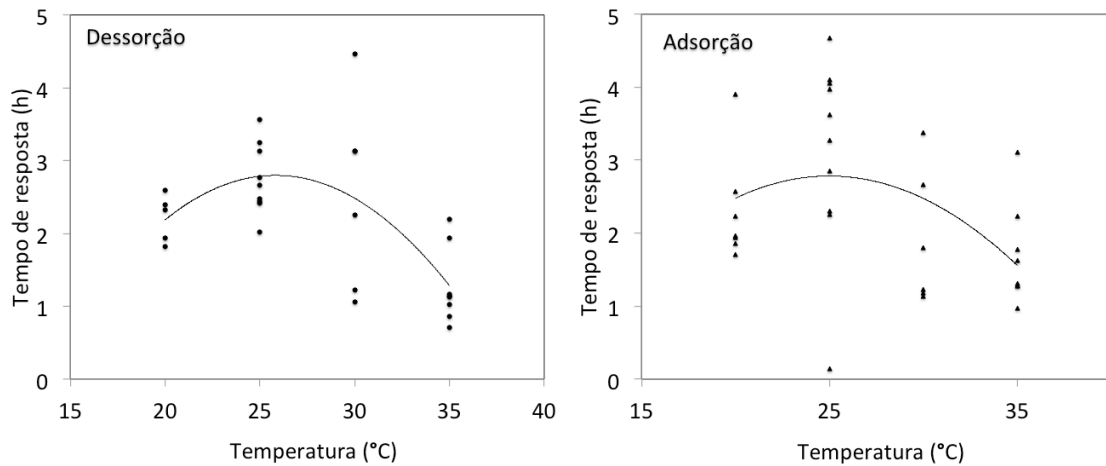


Figura 22 – Representação gráfica da relação entre o primeiro tempo de resposta ( $\tau_1$ ) e a temperatura do ensaio para o processo de dessorção e adsorção

Tabela 20 – Coeficientes “a” e “b” e o respetivo desvio padrão, número de dados “n” e o coeficiente de determinação ajustado ( $R^2$ ) para a relação entre os tempos de resposta e a temperatura do ensaio para o processo de dessorção

<i>Processo</i>	<i>a</i>	<i>Desv. pad.</i>	<i>b</i>	<i>Desv. pad</i>	<i>c</i>	<i>Desv. pad</i>	<i>n</i>	<i>R<sup>2</sup> Ajustado</i>
<b>Dessorção</b>	-9.199	4.215	0.929	0.309	-0.018	0.006	28	0.404
<b>Adsorção</b>	-4.816	5.620	0.608	0.417	-0.012	0.008	31	0.132

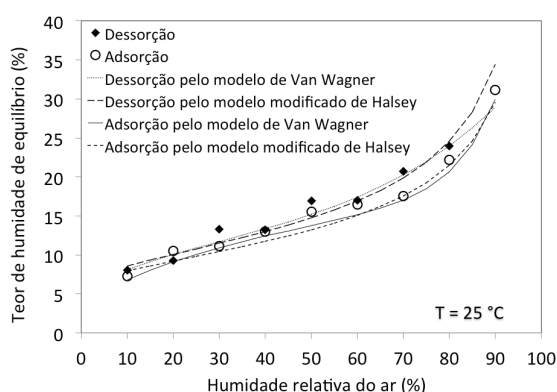
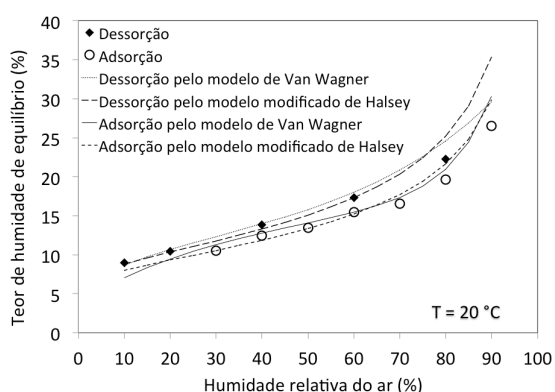
### 4.3.2 Teor de humidade de equilíbrio das agulhas mortas de *Pinus pinaster*

Na Tabela 21 e na Figura 23 são apresentados os valores determinados experimentalmente para o teor de humidade de equilíbrio – EMC dos processos de dessorção e adsorção. Como esperado, os resultados apresentados indicam que tanto a temperatura como a humidade relativa possuem um efeito significativo nos valores de teor de humidade de equilíbrio – EMC determinados experimentalmente. O aumento da temperatura provoca uma redução do teor de humidade de equilíbrio – EMC para os processos de dessorção e de adsorção.

Tabela 21 – EMC de agulhas mortas de *Pinus pinaster* determinado para as temperaturas de 20 °C, 25 °C, 30 °C e 35 °C, variando a humidade relativa do ar na gama entre 10% a 90% nos processos de adsorção e dessorção.

HR (%)	20 °C		25 °C		30 °C		35 °C	
	Adsorção	Dessorção	Adsorção	Dessorção	Adsorção	Dessorção	Adsorção	Dessorção
10	nd	8.98	7.26	8.05	nd	7.88	nd	6.94
20	nd	10.46	10.52	9.31	nd	9.87	8.07	8.28
30	10.49	nd	11.11	13.29	10.32	10.56	9.55	10.23
40	12.42	13.83	12.99	13.19	11.94	12.88	10.76	11.81
50	13.48	nd	15.54	16.91	13.34	13.95	12.45	14.04
60	15.43	17.31	16.50	17.03	14.99	19.45	13.63	14.82
70	16.55	nd	17.54	20.74	17.84	nd	16.24	17.81
80	19.63	22.23	22.15	23.98	nd	26.16	19.15	nd
90	26.49	nd	31.15	nd	34.57	nd	27.18	nd

nd – não determinada



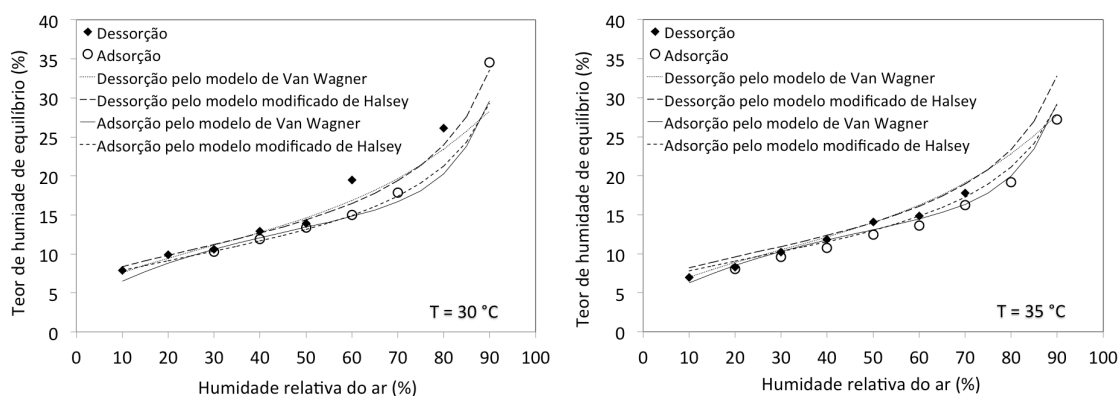


Figura 23 – Teor de humidade de equilíbrio – EMC de agulhas mortas de *Pinus Pinaster* determinado para as temperaturas de 20 °C, 25 °C, 30 °C e 35 °C, variando a humidade relativa do ar na gama entre 10% a 90% nos processos de adsorção e dessorção. Estimativas obtidas pelos modelos de Van Wagner e Halsey modificado.

Tal como em trabalhos anteriores, em todos os testes, os valores do teor de humidade de equilíbrio – EMC apresentam uma curva típica do tipo sigmoidal, em função da humidade relativa do ar. À medida que a humidade relativa do ar se aproxima de zero, o teor de humidade de equilíbrio – EMC também atinge valores próximos de zero. O teor de humidade de equilíbrio – EMC para o processo de dessorção é superior ao teor de humidade de equilíbrio – EMC para o processo de adsorção, apresentando assim o típico efeito de histerese.

Pode verificar-se que os resultados obtidos no presente estudo para o teor de humidade de equilíbrio – EMC das agulhas mortas de *Pinus pinaster* são superiores a valores obtidos para as espécies *de* pinheiro noutros estudos, Blackmarr (1971) e Van Wagner (1972), principalmente no que se refere ao teor de humidade de equilíbrio – EMC do processo de adsorção.

Pode igualmente verificar-se na Figura 24 e na Figura 25 que, quando aplicados os modelos e os respetivos coeficientes determinados em Simard (1968a), nomeadamente as equações (32) e (33), respetivamente, Van Wagner (1972), nomeadamente as equações (34) e (35), Van Wagner e Pickett (1975), nomeadamente as equações (36) e (37), Anderson *et al.* (1978), nomeadamente as equações (38) e (39) e Nelson (1984), nomeadamente as equações (40) e (41), os resultados obtidos no presente estudo são superiores aos valores previstos nos vários modelos, configurando assim a necessidade de determinação de coeficientes específicos para as agulhas mortas de *Pinus pinaster*. Na Figura 24 e na Figura 25 são já apresentados valores

modelados obtidos pela aplicação do modelo de Van Wagner utilizando os coeficientes da Tabela 22 e da Tabela 23.

$$EMC_{Simard\ 1}^{Global} = \begin{cases} 0.003983 + 4.54531(\log H) - 0.018957(T), & H \leq 10\% \\ 3.63954 + 0.157206(H) - 0.029478(T), & 10 < x < 50 \\ 28.2771 + 0.007493(H^2) - 0.000532(H.T) - 0.698061(H), & x \geq 50 \end{cases} \quad (32)$$

$$EMC_{Simard\ 2}^{Global} = \begin{cases} 0.032290 + 0.281073(H) - 0.000578(H.T), & H \leq 10\% \\ 2.22749 + 0.160107(H) - 0.014784(T), & 10 < x < 50 \\ 21.0606 + 0.005565(H^2) - 0.000350(H.T) - 0.483199(H), & x \geq 50 \end{cases} \quad (33)$$

$$EMC_{Van\ Wagner}^{Dessorção} = 1.85H^{0.482} + 21.7e^{(H-100)/10.5} + 0.2034(26.7 - T) \quad (34)$$

$$EMC_{Van\ Wagner}^{Adsorção} = 1.49H^{0.483} + 14.6e^{(H-100)/12.0} + 0.2034(26.7 - T) \quad (35)$$

$$EMC_{Van\ Wagner\ e\ Pickett}^{Dessorção} = 0.942H^{0.679} + 11e^{(H-100)/10} + 0.18(21.1 - T)(1 - e^{-0.115H}) \quad (36)$$

$$EMC_{Van\ Wagner\ e\ Pickett}^{Adsorção} = 0.618H^{0.753} + 10e^{(H-100)/8} + 0.18(21.1 - T)(1 - e^{-0.115H}) \quad (37)$$

$$EMC_{Anderson\ et\ al.}^{dessorção} = 1.651H^{0.493} + 19.35e^{(H-100)/10.88} + 0.101(23.9 - T) \quad (38)$$

$$EMC_{Anderson\ et\ al.}^{Adsorção} = 0.891H^{0.612} + 17.54e^{(H-100)/8.91} + 0.101(23.9 - T) \quad (39)$$

$$EMC_{Nelson}^{Dessorção} = \frac{1}{-18.353} \ln \left( -\frac{1.987.T}{18.e^{5.252}} \ln \left( \frac{H}{100} \right) \right) \quad (40)$$

$$EMC_{Nelson}^{Adsorção} = \frac{1}{-20.697} \ln \left( -\frac{1.987.T}{18.e^{5.130}} \ln \left( \frac{H}{100} \right) \right) \quad (41)$$

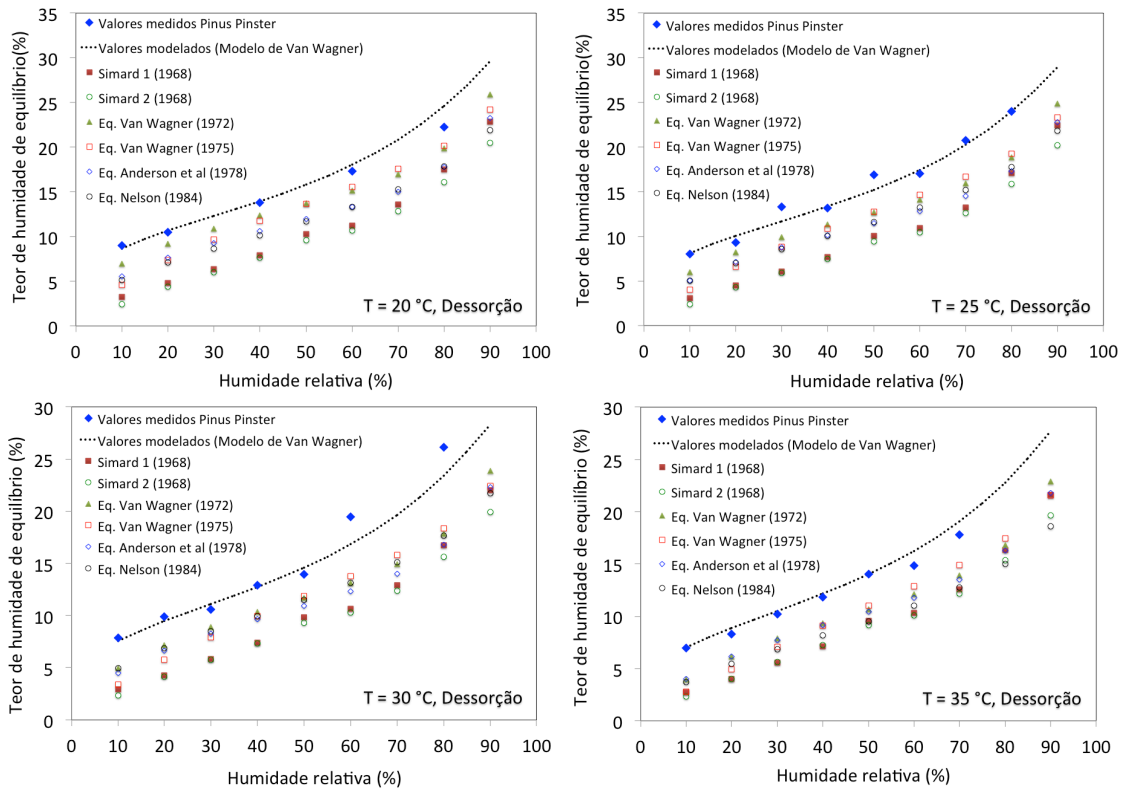


Figura 24 – Comparação dos dados do teor de humidade de equilíbrio – EMC de agulhas mortas de *Pinus Pinaster* medido, modelado e previsto por estudos anteriores para o processo de desorção. Valores modelados obtidos pelo modelo de Van Wagner.

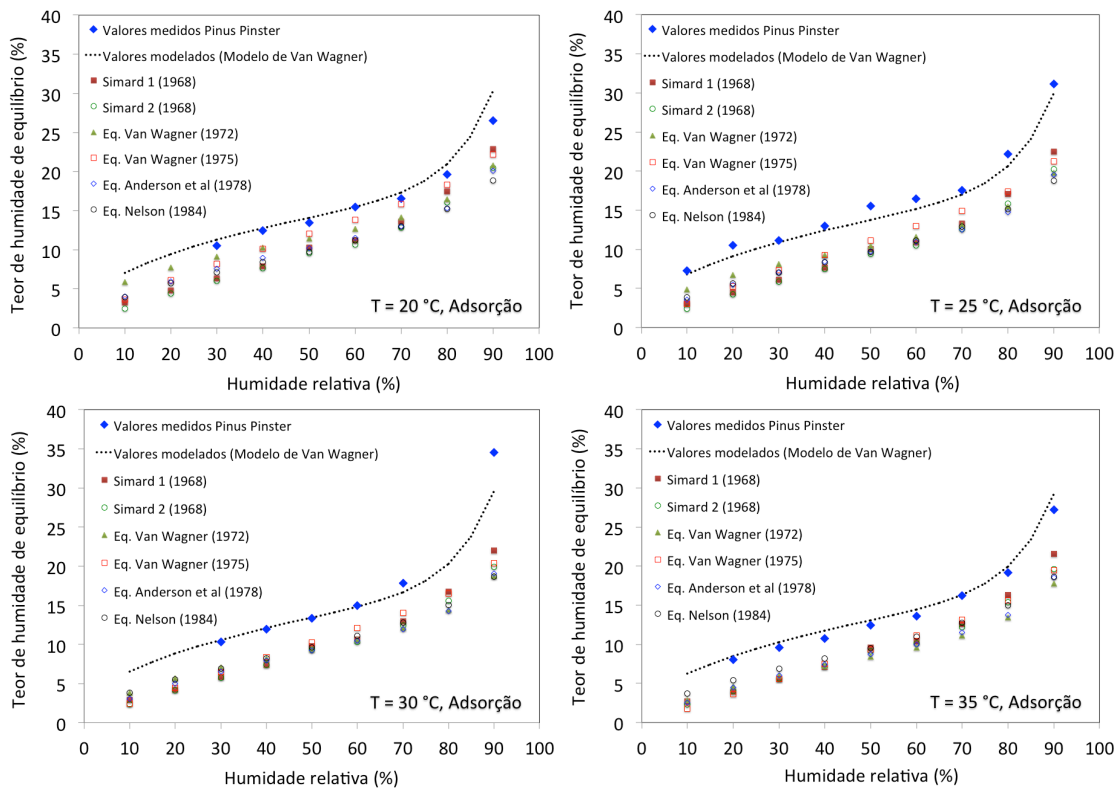


Figura 25 – Comparação dos dados do teor de humidade de equilíbrio – EMC de agulhas mortas de *Pinus Pinaster* medido, modelado e previsto por estudos anteriores para o processo de adsorção. Valores modelados obtidos pelo modelo de Van Wagner.

Desta forma, considerando os modelos apresentados e caracterizados através da equação (14) à equação (21), na Tabela 22 e na Tabela 23 são apresentados, respectivamente, os parâmetros modelados para os processos de dessorção e adsorção para uma gama de temperaturas entre 20°C a 35°C e para uma gama de humidade relativa do ar entre 10% e 90%. Esta estimativa foi realizada através da utilização de uma regressão não linear baseada nos valores medidos e apresentados na Tabela 21. Para exemplificar a estimativa, na Figura 23 são apresentados as estimativas obtidas pela aplicação do modelo de Van Wagner e do modelo Halsey modificado.

Tabela 22 – Parâmetros dos modelos para o processo de dessorção

Parâmetros	Simard	Van Wagner	Nelson	Oswin modificado	Chung-Pfost modificado	Henderson modificado	Zuritz	Halsey modificado
a	a <sub>1</sub> : 4.660							
	a <sub>2</sub> : 0.101	4.018	-14.671	0.179	14.807	0.780	15.848	-4.342
	a <sub>3</sub> : 0.229							
b	b <sub>1</sub> : 4.545							
	b <sub>2</sub> : 0.172	0.275	5.386	0.001	27.955	2.276	-10.964	0.011
	b <sub>3</sub> : 0.554							
c	c <sub>1</sub> : -1.4x10 <sup>3</sup>							
	c <sub>2</sub> : -1.4x10 <sup>3</sup>	22.165	-	0.318	373.009	33.615	0.109	2.219
	c <sub>3</sub> : -0.001							
d	d <sub>3</sub> : -0.404	28.725	-	-	-	-	0.534	-
e	-	0.120	-	-	-	-	-	-
f	-	-0.255	-	-	-	-	-	-
R <sup>2</sup>	0.954	0.954	0.935	0.947	0.947	0.930	0.930	0.942
MAE	0.0075	0.0076	0.0108	0.0089	0.0096	0.0113	0.0110	0.0089
RMSE	0.0109	0.0109	0.0130	0.0117	0.0118	0.0134	0.0134	0.0122
Valores residuais	Aleatória	Aleatória	Aleatória	Aleatória	Aleatória	Aleatória	Aleatória	Aleatória

Tabela 23 – Parâmetros dos modelos para o processo de adsorção

Parâmetros	Simard	Van Wagner	Nelson	Oswin modificado	Chung-Pfost modificado	Henderson modificado	Zuritz	Halsey modificado
a	a <sub>1</sub> : 4.660							
	a <sub>2</sub> : 0.100	2.607	-13.854	0.141	13.873	0.055	9.696	-5.004
	a <sub>3</sub> : 0.506							
b	b <sub>1</sub> : 4.545							
	b <sub>2</sub> : 0.128	0.428	5.062	0.243x10 <sup>-3</sup>	107.100	1.735	-10.505	0.421x10 <sup>-2</sup>
	b <sub>3</sub> : 1.229							
c	c <sub>1</sub> : -1.3x10 <sup>3</sup>							
	c <sub>2</sub> : -1.3x10 <sup>2</sup>	39.461	-	0.347	641.948	368.304	2.463x10 <sup>-5</sup>	2.345
	c <sub>3</sub> : -3x10 <sup>-4</sup>							
d	d <sub>3</sub> : -1.335	8.613	-	-	-	-	1.959	-
e	-	0.067	-	-	-	-	-	-
f	-	-0.165	-	-	-	-	-	-
R <sup>2</sup>	0.941	0.950	0.906	0.934	0.907	0.891	0.882	0.944
MAE	0.0114	0.0101	0.0141	0.0119	0.0138	0.0161	0.0166	0.0109
RMSE	0.0158	0.0145	0.0199	0.0167	0.0199	0.0215	0.0224	0.0155
Valores residuais	Aleatória	Aleatória	Sistemática	Sistemática	Sistemática	Sistemática	Sistemática	Aleatória

Como se pode observar na Tabela 22 e na Tabela 23, tal como nos modelos de sorção, para uma vasta gama de temperaturas e de humidades relativas do ar, todos os modelos testados apresentam um bom ajuste aos resultados laboratoriais obtidos para o teor de humidade de equilíbrio – EMC das agulhas mortas de *Pinus pinaster*, apresentando valores do MAE entre 0.75% e 1.13%, do RMSE entre 1.09% e 1.34% e do R<sup>2</sup> entre 0.930 e 0.954 para o processo de dessorção e valores do MAE entre 1.01% e 1.66%, do RMSE entre 1.45% e 2.24% e do R<sup>2</sup> entre 0.882 e 0.950 no processo de adsorção.

As distribuições dos valores residuais foram analisadas e consideradas aleatórias ou sistemáticas, tal como mostra o exemplo da Figura 26. No processo de dessorção todos os modelos apresentaram uma distribuição aleatória dos valores residuais indicando assim um bom ajustamento. No entanto, para o processo de adsorção, alguns modelos apresentaram uma distribuição dos valores residuais sistemática. Todas as distribuições dos valores residuais mostram que os modelos possuem um erro superior para valores de teor de humidade de equilíbrio – EMC mais elevados.



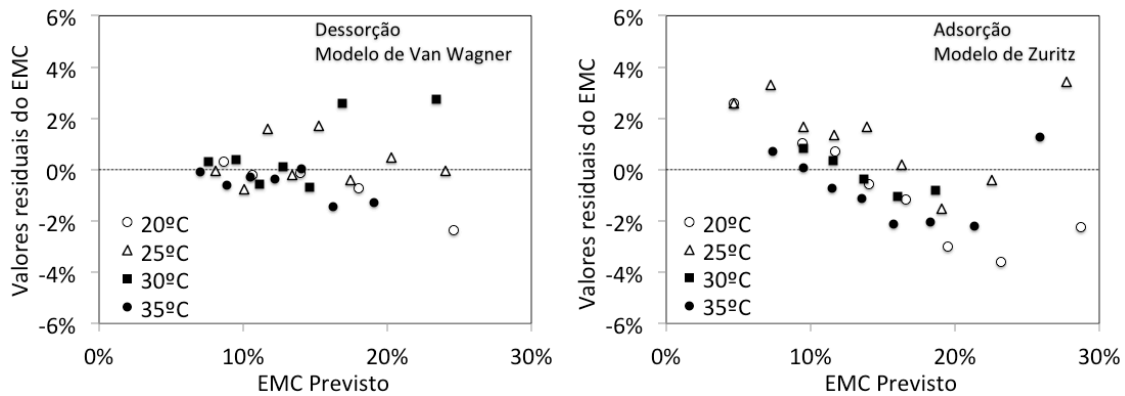


Figura 26 – Distribuição aleatória dos valores residuais resultante da aplicação do modelo de Van Wagner e distribuição sistemática dos valores residuais resultante da aplicação do modelo de Zuritz ajustados aos valores medidos do teor de humidade de equilíbrio – EMC para os processos de dessorção e adsorção de agulhas mortas de *Pinus pinaster* para as temperaturas de 20 °C, 25 °C, 30 °C e 35 °C e para a humidade relativa entre 10% e 90%

Os dados experimentais do teor de humidade de equilíbrio – EMC no processo de dessorção possuem um melhor ajustamento através do modelo de Simard e pelo modelo de Van Wagner, ambos com um MAE próximo de 0.75%, um RMSE de 1.09%, um  $R^2$  de 0.954 e uma distribuição dos valores residuais aleatória. Para o processo de dessorção, os dados experimentais do teor de humidade de equilíbrio – EMC possuem um melhor ajustamento através do modelo de Van Wagner com um MAE de 1.01%, um RMSE de 1.45% e um  $R^2$  de 0.950. O segundo melhor ajuste é conseguido pelo modelo de Halsey modificado com um MAE de 1.09%, um RMSE de 1.55% e um  $R^2$  de 0.944. Ambos os modelos apresentam uma distribuição dos valores residuais aleatória.

Como mencionado, o ajuste dos modelos foi obtido com dados experimentais sujeitos a uma dada gama de condições ambientais de temperatura e de humidade relativa do ar, desta forma, os modelos apresentados deverão ser aplicados apenas na gama referida, pois alguns modelos poderão dar resultados errados quando aplicados fora dessa gama. Também é de referir que alguns dos modelos não permitem o cálculo do teor de humidade de equilíbrio – EMC para condições extremas de humidade relativa do ar, nomeadamente para humidades relativas próximas de 0% ou 100%.

Como se pode observar, os modelos de teor de humidade de equilíbrio – EMC utilizados em produtos agrícolas e alimentares, nomeadamente o modelo de Oswin modificado e o modelo de Chung-Pfost modificado no caso do processo de dessorção e o modelo de Halsey modificado para o caso do processo de adsorção resultam num

bom ajuste com os valores medidos em laboratório para as agulhas mortas de *Pinus pinaster*. Estes modelos têm como vantagem o facto de necessitarem de menos parâmetros empíricos, podendo ser alternativas na aplicação aos combustíveis florestais para além dos modelos típicos na área do incêndios florestais.

#### 4.4 EFEITO DA PRECIPITAÇÃO NA VARIAÇÃO DO TEOR DE HUMIDADE

A precipitação possui um efeito significativo no teor de humidade dos combustíveis e conseqüentemente na ocorrência e extensão dos incêndios florestais. A precipitação ocorrida anualmente pode, a curto prazo, diminuir o risco de incêndio florestal, no entanto devido à potenciação do crescimento da biomassa florestal, esta aumenta o risco de incêndio florestal a longo prazo (Viegas e Viegas 1994).

Com base nos dados relativos ao teor de humidade das espécies arbóreas (*Pinus pinaster* e *Eucalyptus globulus*) e arbustivas (*Calluna vulgaris* e *Chamaespartium tridentatum*) medidos na Lousã entre 1996 e 2010, foi estudado o efeito da precipitação na variação do teor de humidade. O objetivo deste estudo é obter o valor do acréscimo do teor de humidade dos combustíveis florestais finos em relação ao valor do teor de humidade verificado antes da ocorrência do episódio de precipitação.

Tal como referido anteriormente, o aumento do teor de humidade por unidade de precipitação diminui com o aumento da quantidade de precipitação ocorrida e com o aumento do teor de humidade inicial do combustível (Van Wagner 1987). Assim, à medida que aumenta a precipitação, uma menor proporção desta é retida pelos combustíveis florestais; também à medida que aumenta o teor de humidade inicial do combustível, menor será a precipitação absorvida pelos combustíveis florestais.

Serão desenvolvidos modelos que contabilizam o aumento do teor de humidade dos combustíveis florestais finos, com base na quantidade de precipitação ocorrida nas últimas 24h, na variação da precipitação entre o valor ocorrido nas últimas 24h e o valor ocorrido nas 24h anteriores e tendo em conta o teor de humidade inicial. Estes modelos serão posteriormente validados com base nos dados do teor de humidade das espécies arbóreas (*Pinus pinaster* e *Eucalyptus globulus*) e arbustivas (*Calluna vulgaris*) medidos em Viseu entre 2007 e 2010.

Salienta-se que a análise terá como resolução temporal a variação diária do teor de humidade e a precipitação total acumulada das últimas 24h com medições das 12h00 às 12h00. Não será considerado qualquer efeito de interceção das copas, inundação dos combustíveis assim como duração e intensidade da precipitação ao longo do dia.

Para uma análise de significância, de acordo com o exposto na Tabela 24, foram calculados os coeficientes de correlação não lineares de Spearman entre o aumento do teor de humidade e os parâmetros: precipitação ocorrida nas últimas 24h, variação da precipitação entre o valor ocorrido nas últimas 24h e o valor ocorrido nas 24h anteriores; e com o teor de humidade inicial.

Tabela 24 – Coeficiente de correlação de Spearman entre o aumento do teor de humidade e os parâmetros precipitação, variação da precipitação e teor de humidade inicial

			Aumento do teor de humidade	Aumento do teor de humidade / intensidade de precipitação
			$\Delta m$ (%)	$\Delta m / I_d$ (%.mm <sup>-1</sup> )
<i>Pinus pinaster</i> morto	Precipitação	$I_d$ (mm)	0.683 <sup>(**)</sup>	-0.763 <sup>(**)</sup>
	Variação da precipitação	$\Delta I_{d-d-1}$ (mm)	0.692 <sup>(**)</sup>	-0.611 <sup>(**)</sup>
	Teor de humidade inicial	$m_0$	0.059 <sup>(ns)</sup>	-0.380 <sup>(**)</sup>
<i>Eucalyptus globulus</i> morto	Precipitação	$I_d$ (mm)	0.597 <sup>(**)</sup>	-0.750 <sup>(**)</sup>
	Variação da precipitação	$\Delta I_{d-d-1}$ (mm)	0.608 <sup>(**)</sup>	-0.656 <sup>(**)</sup>
	Teor de humidade inicial	$m_0$	0.122 <sup>(ns)</sup>	-0.361 <sup>(**)</sup>
<i>Calluna vulgaris</i>	Precipitação	$I_d$ (mm)	0.316 <sup>(**)</sup>	-0.755 <sup>(**)</sup>
	Variação da precipitação	$\Delta I_{d-d-1}$ (mm)	0.328 <sup>(**)</sup>	-0.651 <sup>(**)</sup>
	Teor de humidade inicial	$m_0$	0.291 <sup>(**)</sup>	0.025 <sup>(ns)</sup>
<i>Chamaespartium tridentatum</i>	Precipitação	$I_d$ (mm)	0.128 <sup>(ns)</sup>	-0.815 <sup>(**)</sup>
	Variação da precipitação	$\Delta I_{d-d-1}$ (mm)	0.060 <sup>(ns)</sup>	0.000 <sup>(ns)</sup>
	Teor de humidade inicial	$m_0$	0.041 <sup>(ns)</sup>	-0.086 <sup>(ns)</sup>

(\*\*) Nível de significância de 0.01; (\*) Nível de significância de 0.05; (ns) Não significativo

Pelos resultados apresentados na Tabela 24 pode verificar-se que existe uma correlação não linear significativa positiva entre o aumento do teor de humidade ( $\Delta m$ ) das espécies arbóreas mortas (*Pinus pinaster* e *Eucalyptus globulus*) e os parâmetros precipitação ocorrida nas últimas 24h ( $I_d$ ) e variação da precipitação entre o valor ocorrido nas últimas 24h e o valor ocorrido nas 24h anteriores ( $\Delta I_{d-d-1}$ ), com coeficientes de Spearman de 0.683 e 0.692 para o *Pinus pinaster* morto e de 0.597 e 0.608 para o *Eucalyptus globulus* morto.

Relativamente ao parâmetro aumento do teor de humidade por intensidade de precipitação ( $\Delta m / I_d$ ) existe também uma correlação não linear significativa negativa para as espécies *Pinus pinaster* morto e *Eucalyptus globulus* morto com os parâmetros precipitação ocorrida nas últimas 24h, variação da precipitação entre o valor ocorrido

nas últimas 24h e o valor ocorrido nas 24h anteriores. Salienta-se alguma correlação não linear negativa do parâmetro aumento do teor de humidade por intensidade de precipitação com o teor de humidade inicial das espécies em causa, com coeficientes de Spearman de -0.380 e -0.361 para o *Pinus pinaster* morto e para o *Eucalyptus globulus* morto, respetivamente.

Relativamente às espécies arbustivas, a espécie *Calluna vulgaris* apresenta alguma correlação com os parâmetros precipitação ocorrida nas últimas 24h, variação da precipitação entre o valor ocorrido nas últimas 24h e o valor ocorrido nas 24h anteriores e o teor de humidade inicial para a espécie *Calluna vulgaris*, sendo que para a espécie *Chamaespartium tridentatum*, de uma forma genérica, estas correlações não são evidentes.

Relativamente às espécies arbóreas vivas (*Pinus pinaster* e *Eucalyptus globulus*), não foram identificadas correlações significativas entre os parâmetros relativos ao aumento do teor de humidade durante os episódios de precipitação e os parâmetros caracterizadores do episódio de precipitação.

Desta forma, foram desenvolvidos 3 modelos de análise do efeito da precipitação na variação do teor de humidade aquando da ocorrência de episódios de precipitação, nomeadamente o modelo 1 da equação (42), o modelo 2 da equação (43), o modelo 3 da equação (44). Apenas no modelo 1 é contabilizado o efeito da precipitação nas espécie arbustiva *Calluna vulgaris*.

A representação gráfica dos modelos é apresentada na Figura 27. Os coeficientes “a” e “b” e o respetivo desvio padrão, assim como o número de dados “n” e o coeficiente de determinação ajustado ( $R^2$ ) são apresentados na Tabela 25, na Tabela 26 e na Tabela 27.

$$\text{Modelo 1} = \text{Variação do Teor Humidade} = a \cdot (\text{Precipitação})^b \quad (42)$$

$$\text{Modelo 2} = \frac{\text{Variação do Teor Humidade}}{\text{Precipitação}} = a \cdot (\text{Teor de humidade inicial})^b \quad (43)$$

$$\text{Modelo 3} = \begin{cases} \text{Aumento do Teor Humidade} = a_1 \cdot (\text{Aumento da Precipitação})^{b_1} \\ \text{Diminuição do Teor Humidade} = a_2 \cdot (\text{Diminuição da Precipitação}) + b_2 \end{cases} \quad (44)$$

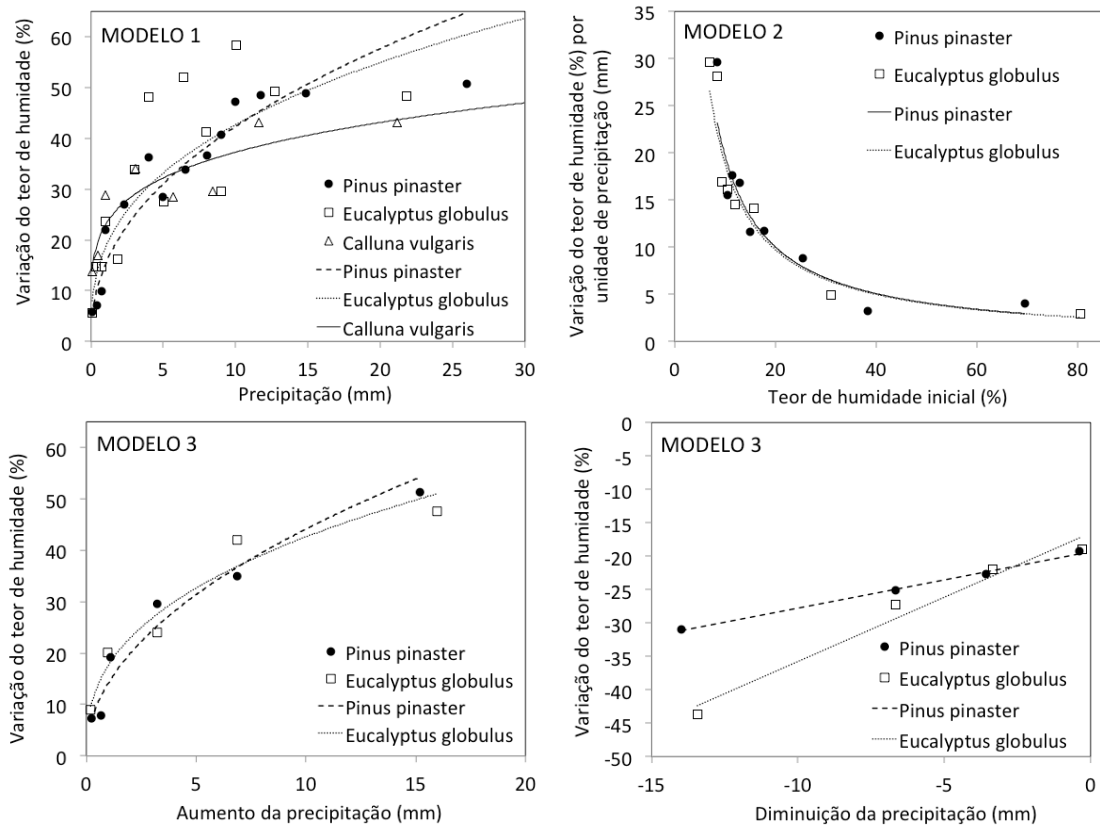


Figura 27 – Representação gráfica dos modelos de contabilização do efeito da precipitação na variação do teor de humidade

Tabela 25 – Coeficientes “a” e “b” e o respetivo desvio padrão, número de dados “n” e o coeficiente de determinação ajustado ( $R^2$ ) para o modelo 1 de contabilização do efeito da precipitação na variação do teor de humidade

Espécie	a	Desv. pad.	b	Desv. pad	n	$R^2$ ajustado
<i>Pinus pinaster</i> morto	15.180 <sup>(**)</sup>	1.100	0.445 <sup>(**)</sup>	0.037	14	0.917
<i>Eucalyptus globulus</i> morto	18.476 <sup>(**)</sup>	1.811	0.364 <sup>(**)</sup>	0.049	15	0.794
<i>Calluna vulgaris</i>	22.961 <sup>(**)</sup>	1.458	0.211 <sup>(**)</sup>	0.029	9	0.794

(\*\*) Nível de significância de 0.01

Tabela 26 – Coeficientes “a” e “b” e o respetivo desvio padrão, número de dados “n” e o coeficiente de determinação ajustado ( $R^2$ ) para o modelo 2 de contabilização do efeito da precipitação na variação do teor de humidade

Espécie	a	Desv. pad.	b	Desv. Pad.	n	$R^2$ ajustado
<i>Pinus pinaster</i> morto	189.453 <sup>(*)</sup>	77.246	-0.981 <sup>(**)</sup>	0.137	9	0.863
<i>Eucalyptus globulus</i> morto	172.720 <sup>(**)</sup>	44.379	-0.960 <sup>(**)</sup>	0.091	8	0.940

(\*\*) Nível de significância de 0.01; (\*) Nível de significância de 0.05;

Tabela 27 – Coeficientes “a” e “b” e o respectivo desvio padrão, número de dados “n” e o coeficiente de determinação ajustado ( $R^2$ ) para o modelo 3 de contabilização do efeito da precipitação na variação do teor de humidade

<i>Espécie</i>	$a_1$	<i>Desv. pad.</i>	$b_1$	<i>Desv. pad</i>	<i>n</i>	$R^2$ ajustado
<i>Pinus pinaster morto</i>	14.146 <sup>(**)</sup>	1.566	0.495 <sup>(*)</sup>	0.070	6	0.906
<i>Eucalyptus globulus morto</i>	17.594 <sup>(**)</sup>	1.338	0.384 <sup>(*)</sup>	0.044	5	0.950
<i>Espécie</i>	$a_2$	<i>Desv. pad.</i>	$b_2$	<i>Desv. pad</i>	<i>n</i>	$R^2$ ajustado
<i>Pinus pinaster morto</i>	0.844 <sup>(*)</sup>	0.320	-19.335 <sup>(**)</sup>	0.320	4	0.995
<i>Eucalyptus globulus morto</i>	1.924 <sup>(*)</sup>	0.237	-16.526 <sup>(*)</sup>	1.819	4	0.971

(\*\*) Nível de significância de 0.01; (\*) Nível de significância de 0.05;

Os parâmetros das equações (42), (43) e (44) para cada relação foram calculados através do método dos mínimos quadrados. Os coeficientes “a” e “b” e o respectivo desvio padrão, assim como o número de dados “n” e o coeficiente de determinação ajustado ( $R^2$ ) são apresentado na Tabela 8.

## 4.5 VALIDAÇÃO DOS MODELOS

### 4.5.1 Modelação da variação horária do teor de humidade abaixo do ponto de saturação das fibras do *Pinus pinaster*

Os modelos da variação horária do teor de humidade abaixo do ponto de saturação das fibras – PSF do *Pinus pinaster* foram testados com uma série de valores medidos no campo, representando condições típicas em que o mecanismo dominante é a troca de vapor não saturado. As amostras de agulhas mortas de *Pinus pinaster* foram recolhidas durante 13 dias de primavera num local plano em Viseu (centro de Portugal), com um povoamento maioritariamente de *Pinus pinaster* com uma altura média de 10 metros e transportadas para laboratório para determinação do teor de humidade.

Na Figura 28 são apresentados, para o período de amostragem, os parâmetros de entrada para os modelos do teor de humidade de equilíbrio – EMC, nomeadamente, os valores horários de temperatura e humidade relativa do ar verificados na estação meteorológica de Viseu do Instituto Português do Mar e Atmosfera, estação próxima do local de amostragem.

Os resultados são apresentados na Figura 29, onde os círculos representam medições de campo do teor de humidade determinado por secagem em estufa. Os segmentos verticais representam o desvio padrão das medições do teor de humidade. É igualmente apresentada, a título de exemplo, a comparação entre os valores de humidade medidos e os valores modelados. Os valores modelados foram obtidos através da aplicação da curva de sorção baseada no modelo de Dois-Termos e a determinação do teor de humidade de equilíbrio – EMC através do modelo de Van Wagner, ambos os modelos utilizando os parâmetros determinados no presente estudo.



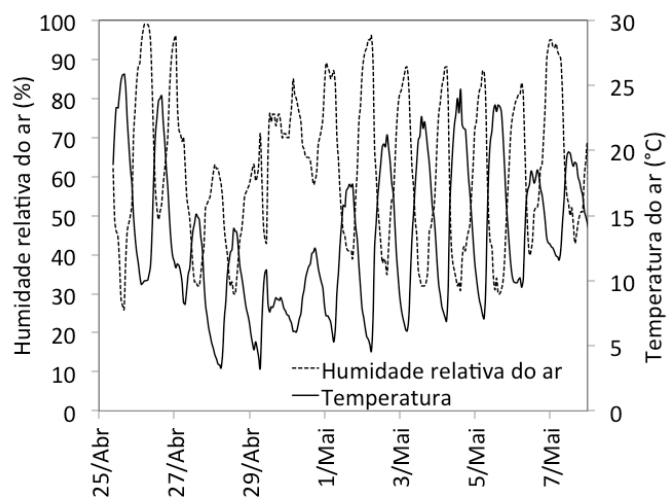


Figura 28 – Valores horários de temperatura e humidade relativa do ar verificados na estação meteorológica de Viseu do Instituto Português do Mar e Atmosfera durante o período de amostragem

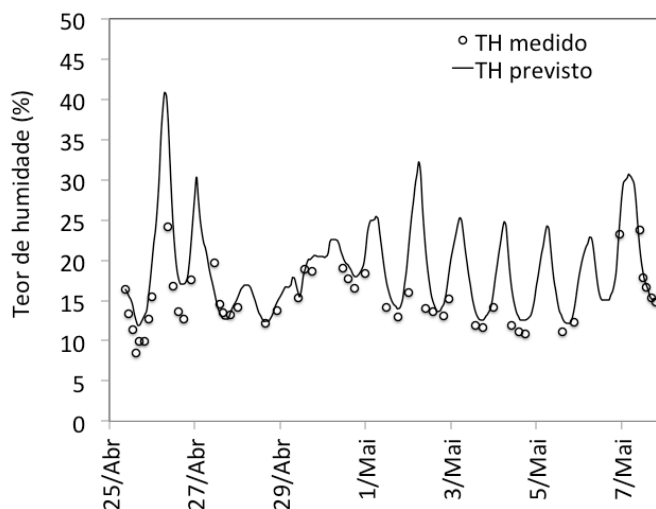


Figura 29 – Comparação entre os valores de humidade dos combustíveis medidos e os valores modelados.

Como se pode verificar, durante o período de amostragem, com exceção do dia 29 de Abril, a humidade do ar e a temperatura apresentaram flutuações típicas, com a temperatura máxima e a humidade relativa mínima entre as 14h00 e as 15h00 e com a temperatura mínima e a humidade relativa máxima entre as 04h00 e as 06h00. Durante o período de amostragem não ocorreu precipitação.

Como se pode observar, apesar de nalguns dias de amostragem ocorrer alguma sobre-previsão, de uma forma geral, os valores medidos ajustam-se bem aos valores modelados tanto para os processos de desorção como para os processos de adsorção, ocorrendo mesmo alguns ajustamentos perfeitos em determinados períodos da medição.

Considerando os diversos modelos apresentados anteriormente (equação (3) à equação (13) para as curvas de sorção e equação (14) à equação (21) para o teor de humidade de equilíbrio – EMC), é importante conhecer qual a combinação de modelo de sorção e modelo de teor de humidade de equilíbrio – EMC que melhor se ajuste aos valores medidos no campo. Os resultados de validação para as várias combinações possíveis são apresentados na Tabela 28.

Tabela 28 – Resultados da validação dos modelos da variação horária do teor de humidade abaixo do ponto de saturação das fibras – PSF do *Pinus Pinaster*

Modelo de sorção	Parâmetros de ajuste	Modelo do EMC							
		Simard	Van Wagner	Nelson	Oswin modificado	Chung-Pfost modificado	Henderson	Zuritz	Halsey modificado
(exponencial pura)	MAE	0.024	0.026	0.024	0.031	0.031	0.029	0.034	0.031
	RMSE	0.032	0.035	0.034	0.052	0.040	0.037	0.044	0.063
	R <sup>2</sup>	0.674	0.684	0.645	0.545	0.683	0.698	0.690	0.476
Exponencial combinada	MAE	0.023	0.026	0.024	0.030	0.030	0.029	0.033	0.030
	RMSE	0.031	0.034	0.033	0.051	0.039	0.037	0.043	0.063
	R <sup>2</sup>	0.684	0.693	0.652	0.556	0.691	0.708	0.700	0.484
Page	MAE	0.022	0.024	0.023	0.028	0.029	0.028	0.032	0.028
	RMSE	0.030	0.032	0.032	0.049	0.037	0.035	0.041	0.061
	R <sup>2</sup>	0.694	0.714	0.657	0.581	0.700	0.720	0.714	0.500
Henderson e Pabis	MAE	0.023	0.026	0.024	0.030	0.030	0.029	0.033	0.029
	RMSE	0.031	0.034	0.033	0.051	0.039	0.037	0.042	0.063
	R <sup>2</sup>	0.688	0.698	0.655	0.563	0.694	0.712	0.709	0.488
Logarítmico (assimptótico)	MAE	0.023	0.025	0.024	0.029	0.030	0.028	0.033	0.029
	RMSE	0.031	0.034	0.033	0.051	0.038	0.036	0.042	0.063
	R <sup>2</sup>	0.689	0.700	0.656	0.566	0.695	0.714	0.711	0.490
Midilli	MAE	0.023	0.026	0.024	0.030	0.030	0.029	0.033	0.029
	RMSE	0.031	0.034	0.033	0.051	0.039	0.037	0.042	0.063
	R <sup>2</sup>	0.688	0.698	0.655	0.563	0.694	0.712	0.709	0.488
Dois-termos	MAE	0.022	0.024	0.023	0.028	0.029	0.027	0.031	0.028
	RMSE	0.030	0.032	0.032	0.048	0.037	0.035	0.040	0.060
	R <sup>2</sup>	0.694	0.713	0.659	0.579	0.702	0.721	0.717	0.499
Dois-termos exponencial	MAE	0.023	0.026	0.024	0.030	0.030	0.029	0.033	0.029
	RMSE	0.031	0.034	0.033	0.051	0.039	0.037	0.043	0.063
	R <sup>2</sup>	0.687	0.697	0.654	0.561	0.693	0.711	0.703	0.487
Henderson e Pabis modificado	MAE	0.022	0.024	0.023	0.028	0.029	0.027	0.032	0.028
	RMSE	0.030	0.032	0.032	0.049	0.037	0.035	0.040	0.061
	R <sup>2</sup>	0.696	0.715	0.658	0.580	0.701	0.721	0.716	0.500

Como se pode verificar na Tabela 28, tal como para os resultados apresentados anteriormente, praticamente todas as combinações apresentam um ajustamento médio a elevado dos dados modelados com os dados medidos, com um MAE entre 2.2% e 3.4%, um RMSE entre 3.0% e 6.3% e um  $R^2$  entre 0.476 e 0.721. Para o conjunto de parâmetros estatísticos apresentados, o MAE mais elevado, e conseqüentemente uma combinação com um ajustamento inferior é obtido através da aplicação da equação da curva de sorção puramente exponencial de Byram e a determinação do teor de humidade de equilíbrio – EMC pelo modelo de Zuritz. O RMSE mais elevado e  $R^2$  mais reduzido e portanto também uma combinação com um ajustamento inferior são obtidos através da aplicação da equação da curva de sorção puramente exponencial de Byram e a determinação do teor de humidade de equilíbrio – EMC pelo modelo de Halsey modificado. O RMSE também apresenta valores elevados na aplicação das equações da curva de sorção de Henderson e Pabis modificado e de Midilli e a determinação do teor de humidade de equilíbrio – EMC pelo modelo de Halsey modificado. O melhor ajustamento, em termos de MAE e de RMSE é obtido com a aplicação dos modelos de Page, Dois-Termos e Henderson e Pabis modificado na curva de sorção e a determinação do teor de humidade de equilíbrio – EMC pelo modelo de Simard. Em termos de  $R^2$ , o melhor ajustamento é conseguido na aplicação do modelo de Dois-Termos e modelo de Henderson e Pabis modificado na curva de sorção e a determinação do teor de humidade de equilíbrio – EMC pelo modelo de Henderson modificado.

Por forma a verificar se a influência da temperatura no primeiro tempo de resposta ( $\tau_1$ ) descrita na Figura 22, na equação (31) e na Tabela 20 melhora o ajustamento do modelo da exponencial combinada foi realizada a sua correção. Assim, os resultados da validação do modelo da exponencial combinada com a correção da temperatura no primeiro tempo de resposta figuram na Tabela 29.

Tabela 29 – Resultados da validação do modelo da exponencial combinada com correção da temperatura no primeiro tempo de resposta ( $\tau_1$ )

Modelo de sorção	Parâmetros de ajuste	Modelo do EMC							
		Simard	Van Wagner	Nelson	Oswin modificado	Chung-Pfost modificado	Henderson	Zuritz	Halsey modificado
Exponencial combinada	MAE	0.024	0.026	0.024	0.030	0.031	0.029	0.034	0.030
	RMSE	0.031	0.034	0.033	0.051	0.039	0.037	0.043	0.062
	R <sup>2</sup>	0.668	0.680	0.637	0.541	0.677	0.692	0.686	0.472

Como se pode verificar, comparando os valores da Tabela 28 com os valores da Tabela 29, para o modelo da exponencial combinada, a correção de temperatura no primeiro tempo de resposta, não introduz melhorias no ajustamento aos valores medidos no campo, sendo que possui um R<sup>2</sup> mais reduzido em todos os modelos de teor de humidade de equilíbrio – EMC.

De uma forma geral, os erros obtidos no presente estudo são da mesma ordem de grandeza dos erros referidos noutros estudos semelhantes. O MAE e o RMSE referido em Matthews (2006), usando um modelo teórico, em tempo seco e portanto representando o teor de humidade em condições de perigo de incêndio foi de 1.3% e 1.5%, respetivamente. No modelo semi-físico de Catchpole *et al.* (2001), para o eucalipto, o MAE variou entre 0.8% e 1.3% e o RMSE entre 0.9% e 1.7%. Para herbáceas o MAE foi de 1.9% e o RMSE foi de 2.5%. No modelo empírico de Ruiz (2009) para o *Pinus radiata* e *Pinus pinaster*, o MAE variou entre 1.2% e 1.3% e o RMSE entre 1.7% a 1.8%. Em Matthews (2010), para um modelo simples de uma única equação o MAE e o RMSE foram 1.1% e 1.5%, respetivamente e para o modelo de tabela, o MAE e o RMSE foram 1.1% e 1.4%.

Estes resultados mostram a boa capacidade do presente modelo para estimar os valores do teor de humidade de combustíveis mortos finos, nomeadamente de *Pinus pinaster*, a diferentes horas do dia, em função de parâmetros meteorológicos, tais como a temperatura e a humidade relativa do ar, que são relativamente fáceis de obter para diversos locais e a diferentes horas, através de medições ou de modelos de previsão.

#### **4.5.2 Modelação da variação diária do teor de humidade abaixo do ponto de saturação das fibras do *Pinus Pinaster* com base em valores médios diários das condições meteorológicas**

Por forma a verificar o ajuste dos modelos anteriores à variação diária do teor de humidade das agulhas mortas de *Pinus pinaster* abaixo do ponto de saturação das fibras – PSF, foram utilizados alguns resultados das medições diárias realizadas na Lousã entre os anos de 1999 e 2009, nomeadamente nos períodos correspondentes ao verão em que não se verificou a ocorrência de precipitação. Estes valores foram comparados com os valores previstos nos modelos de sorção.

Nas medições do teor de humidade de combustíveis florestais finos realizadas na Lousã, a informação meteorológica disponível tem uma base diária, isto é, os dados de entrada dos modelos (temperatura e humidade relativa do ar) resultam de médias de 24 horas (das 12h00 às 12h00) e portanto os modelos consideraram que as agulhas mortas de *Pinus pinaster* permanecem à temperatura e humidade médias diárias durante 24 horas. Tal como anteriormente referido, devido a tratar-se de combustíveis finos, a rápida resposta das agulhas mortas de *Pinus pinaster* às condições ambientais faz com que, para estas situações, ao fim de 24 horas, o teor de humidade esteja muito próximo do teor de humidade de equilíbrio – EMC tal como se pode verificar pela Figura 30. Todos os modelos, para os processos de desorção e adsorção, ao final de 24 horas, atingem mais de 95% da diferença entre o teor de humidade inicial e o teor de humidade de equilíbrio – EMC. Desta forma, para verificar o ajuste dos modelos à variação diária do teor de humidade abaixo do ponto de saturação das fibras – PSF do *Pinus Pinaster* com base em valores médios diários das condições meteorológicas considera-se apenas o modelo de Byram (exponencial pura); isto é, considera-se que ao final de 24 horas, o teor de humidade das agulhas mortas de *Pinus pinaster* é praticamente igual ao teor de humidade de equilíbrio – EMC definido pelas condições meteorológicas, ocorrendo portanto, apenas variações de acordo com o modelo de previsão do teor de humidade de equilíbrio – EMC utilizado.

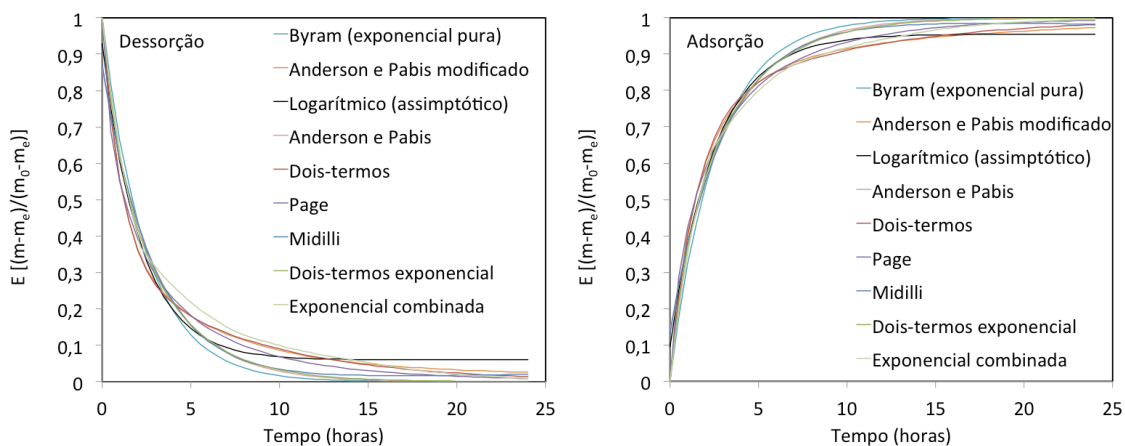


Figura 30 – Comportamento genérico dos modelos de sorção avaliados no presente estudo

Na Figura 31 são apresentados, a título de exemplo, para o período de amostragem compreendido entre 31 de Julho de 2009 e 24 de Setembro de 2009, os parâmetros de entrada para os modelos do teor de humidade de equilíbrio – EMC, nomeadamente, os valores médios diários de temperatura e humidade relativa do ar verificados na estação meteorológica da Lousã do Instituto Português do Mar e Atmosfera.

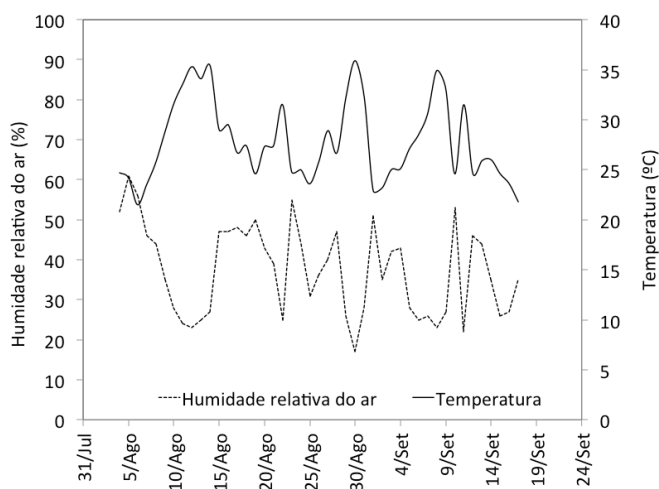


Figura 31 – Valores médios diários da temperatura e humidade relativa do ar verificados na estação meteorológica da Lousã do Instituto Português do Mar e Atmosfera durante o período de amostragem

Na Figura 32 é igualmente apresentada, a título de exemplo, a comparação entre os valores de humidade medidos e os valores modelados. Os valores modelados foram obtidos através da aplicação da curva de sorção baseada no modelo de Byram (exponencial pura) e a determinação do teor de humidade de equilíbrio – EMC através do modelo de Van Wagner.

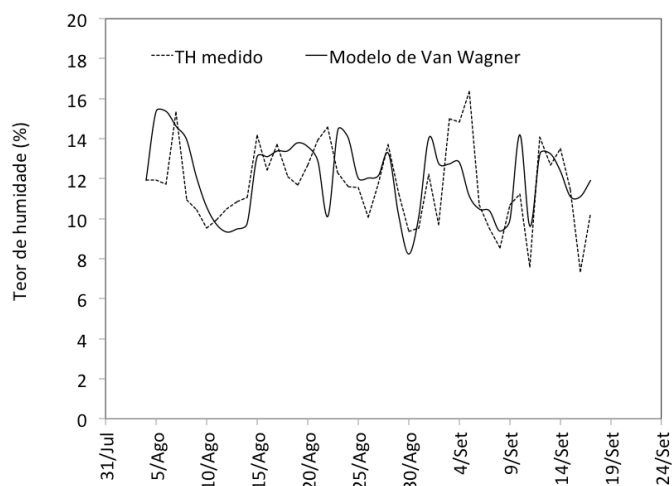


Figura 32 – Comparação entre os valores de humidade medidos e os valores modelados. Os valores modelados foram obtidos através da aplicação da curva de sorção baseada no modelo de Byram (exponencial pura) e a determinação do teor de humidade de equilíbrio – EMC através do modelo de Van Wagner.

Como se pode observar, de uma forma geral, os resultados do modelo acompanham a evolução diária do teor de humidade, não se verificando desvios significativos entre os valores modelados e medidos.

Considerando os modelos de determinação do teor de humidade de equilíbrio – EMC e que ao final de 24 horas, o teor de humidade das agulhas mortas de *Pinus pinaster* é praticamente igual ao teor de humidade de equilíbrio – EMC definido pelas condições meteorológicas, na Tabela 30 são apresentados os resultados de validação variação diária do teor de humidade abaixo do ponto de saturação das fibras – PSF do *Pinus Pinaster*.

Tabela 30 – Resultados da validação dos modelos da variação diária do teor de humidade abaixo do ponto de saturação das fibras – PSF do *Pinus Pinaster*

Modelo de sorção	Parâmetros de ajuste	Modelo do EMC							
		Simard	Van Wagner	Nelson	Oswin modificado	Chung-Pfost modificado	Henderson	Zuritz	Halsey modificado
(exponencial pura)	MAE	0.023	0.024	0.026	0.024	0.026	0.026	0.026	0.023
	RMSE	0.033	0.034	0.036	0.035	0.037	0.037	0.037	0.033
	R <sup>2</sup>	0.168	0.181	0.170	0.171	0.182	0.175	0.176	0.161

Como se pode verificar na Tabela 30, o MAE e o RMSE não são elevados, situando-se entre 2.3% e 2.6%, e entre 3.3% e 3.7%, respetivamente. Verifica-se no entanto que o coeficiente de determinação R<sup>2</sup> é reduzido para todos os modelos de teor de humidade de equilíbrio – EMC aplicados, situando-se entre 0.161 e 0.182. Estes dados mostram que, embora os erros cometidos pela utilização de um valor médio de temperatura e de humidade relativa do ar para previsão do valor diário do teor de humidade não sejam elevados, o ajustamento entre os dados medidos e os dados modelados não é significativo.

#### 4.5.3 Modelação do efeito da precipitação na variação do teor de humidade

Por forma a verificar o ajuste dos modelos de contabilização do efeito da precipitação na variação do teor de humidade, nomeadamente o modelo 1 definido pela equação (42), o modelo 2 definido pela equação (43) e o modelo 3 definido pela equação (44), estes são validados com base nos dados do teor de humidade das espécies arbóreas (*Pinus pinaster* e *Eucalyptus globulus*) e arbustivas (*Calluna vulgaris*) medidos em Viseu entre 2007 e 2010.

Na Figura 33, a título de exemplo, é apresentada a comparação entre os valores de humidade medidos e os valores modelados de acordo com o efeito da precipitação na variação do teor de humidade, entre Julho e Setembro de 2008. Salienta-se que resultados dos modelos apenas são calculados aquando da ocorrência de precipitação.



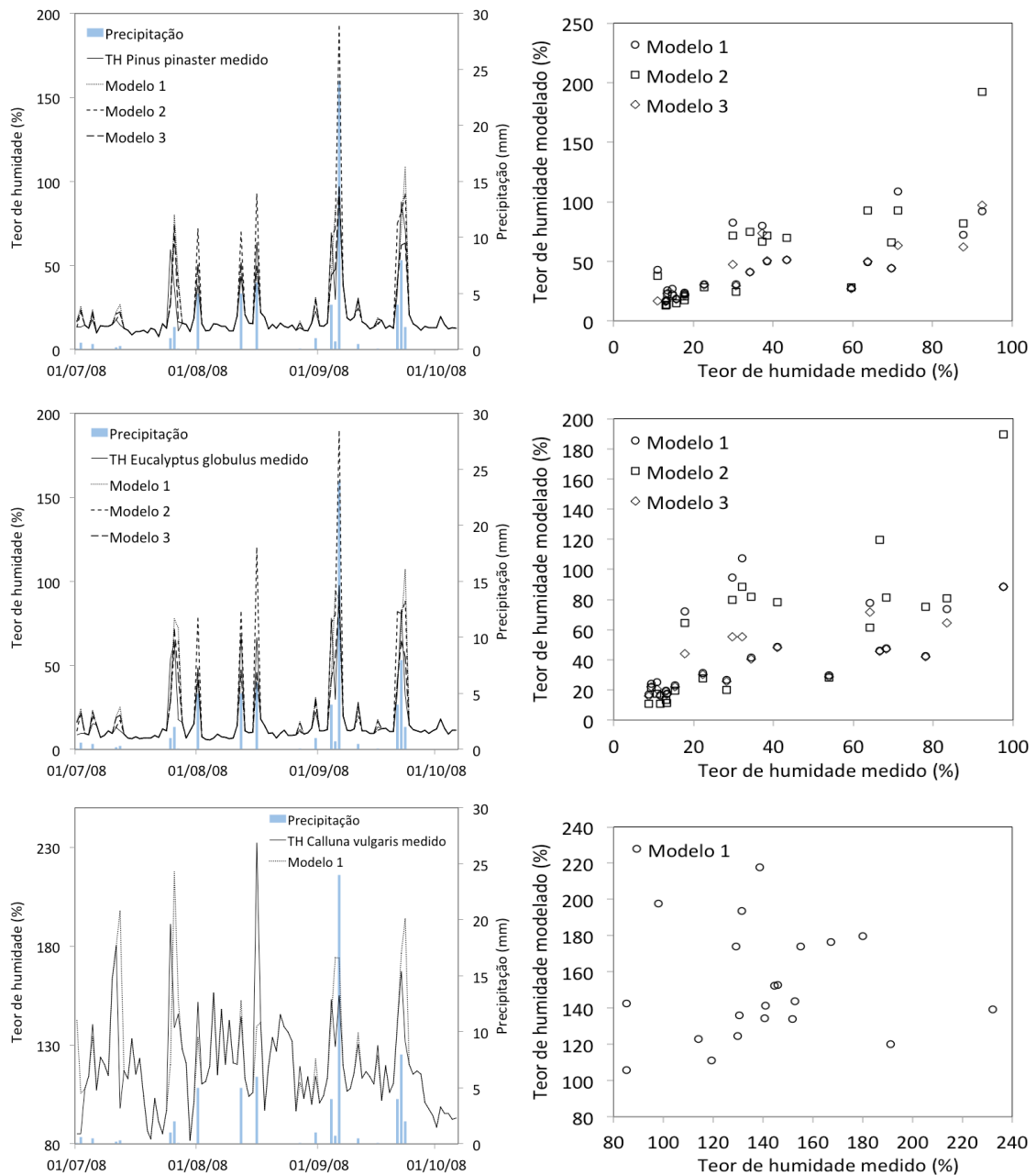


Figura 33 – Comparação entre os valores de humidade medidos e os valores modelados de acordo com o efeito da precipitação na variação do teor de humidade.

Na Tabela 31 são apresentados os resultados de validação dos modelos da contabilização do efeito da precipitação na variação do teor de humidade. Como se pode verificar, para as espécies arbóreas mortas (*Pinus pinaster* e *Eucalyptus globulus*), o modelo 2 apesar de possuir um  $R^2$  não muito reduzido (0.514), possui um MAE muito elevado (46.6%), indicando portanto que a diferença média entre o modelo e os dados medidos é significativa. Desta forma o melhor ajuste é obtido pelo modelo 3 com um MAE de 15.8%, um RMSE de 23.6% e um  $R^2$  de 0.668. Quanto à

espécie arbustivas *Calluna vulgaris*, apenas contabilizada no modelo 1, podemos verificar que quando comparados os dados modelados com os dados medidos, obtém-se um ajuste reduzido com um MAE também muito elevado (44.5%).

Tabela 31 – Resultados da validação dos modelos da contabilização do efeito da precipitação na variação do teor de humidade

Espécies	Parâmetros de ajuste	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3
<i>Pinus pinaster</i>	MAE	0.223	0.466	0.158
	RMSE	0.304	0.794	0.236
	R <sup>2</sup>	0.596	0.514	0.668
<i>Eucalyptus globulus</i>	MAE	0.242	0.498	0.177
	RMSE	0.323	0.848	0.224
	R <sup>2</sup>	0.627	0.529	0.743
<i>Calluna vulgaris</i>	MAE	0.445	-	-
	RMSE	0.642	-	-
	R <sup>2</sup>	0.287	-	-

#### 4.5.4 Modelação da variação horária do teor de humidade abaixo do ponto de saturação das fibras do *Pinus Pinaster* com base nos dados medidos numa diferente localização

Por forma a verificar a aplicabilidade dos modelos de variação do teor de humidade abaixo do ponto de saturação das fibras – PSF do *Pinus pinaster* desenvolvidos no presente trabalho com dados do teor de humidade de agulhas mortas de *Pinus pinaster* recolhidos por outros autores, as combinações de modelos de sorção e modelos de teor de humidade de equilíbrio – EMC foram confrontados com os dados presentes em Ruiz (2006). Este autor estudou a variação do teor de humidade das espécies *Pinus pinaster* e *Pinus radiata* entre 2001 e 2002 numa zona próxima da cidade de Lugo (Galiza – Espanha). Para cada espécie foram estudados cinco tipos de combustível fino morto, com menos de 0,6 cm de espessura, nomeadamente, agulhas e pequenos ramos presentes no solo e agulhas e pequenos ramos presentes em cima das árvores.

Para as agulhas mortas de *Pinus pinaster* foram estudados os seguintes tipos de locais: plantação antiga com tratamento silvícola (PIN1 e P7), plantação de

regeneração natural sem tratamento silvícola (PIN4) e zona com corte de árvores (PIN8).

Para as agulhas mortas de *Pinus pinaster*, os dados utilizados serão os que resultaram do teste 3 que decorreu entre 18 e 26 de Junho de 2002 com 26 amostras, do teste 4 que decorreu entre 6 e 15 de Agosto de 2002 com 36 amostras e do teste 5 decorreu entre 18 e 24 de Agosto de 2002 com 33 amostras .

O teor de humidade foi determinado com base em amostras que estavam localizadas num abrigo e portanto sem possibilidade de entrada de água por precipitação, inundação ou gotejamento, apenas ocorrendo a troca de vapor por adsorção e dessorção. Foi igualmente continuamente registada a temperatura e a humidade relativa do ar durante os testes.

Na Figura 34 e na Tabela 32 figuram os dados de validação dos modelos de sorção e teor de humidade de equilíbrio – EMC de acordo com os dados obtidos em Ruiz (2006) para o teste 3 e 4 com uma plantação antiga com tratamento silvícola (PIN1). Na Figura 35 e na Tabela 33 figuram os dados de validação para o teste 3 e 4 com uma plantação de regeneração natural sem tratamento silvícola (PIN4). Na Figura 36 e na Tabela 34 figuram os dados de validação para o teste 5 com uma plantação antiga com tratamento silvícola (PIN7). Na Figura 37 e na Tabela 35 figuram os dados de validação para o teste 5 com uma zona com corte de árvores (PIN8).

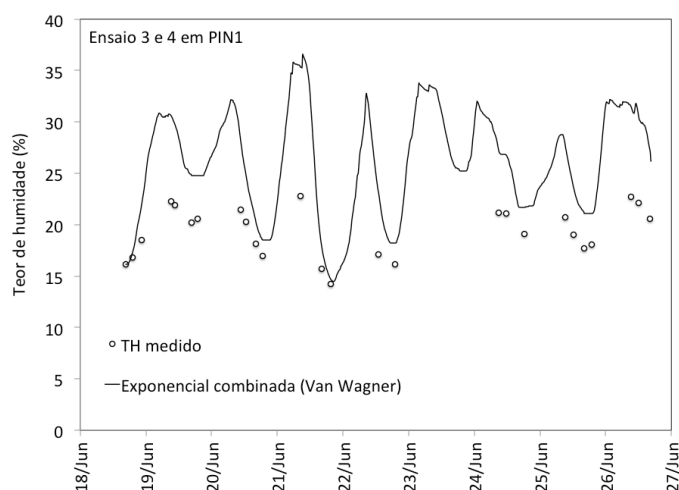


Figura 34 – Comparação entre os valores de humidade medidos e os valores modelados para o teste 3 e 4 com uma plantação antiga com tratamento silvícola (PIN1). Os valores modelados foram obtidos através da aplicação da curva de sorção baseada no modelo da exponencial combinada e a determinação do teor de humidade de equilíbrio – EMC através do modelo de Van Wagner.

Tabela 32 – Resultados da validação para o teste 3 e 4 com uma plantação antiga com tratamento silvícola (PIN1)

Modelo de sorção	Parâmetros de ajuste	Modelo do EMC							
		Simard	Van Wagner	Nelson	Oswin modificado	Chung-Pfost modificado	Henderson	Zuritz	Halsey modificado
Byram (exponencial pura)	MAE	0.050	0.054	0.044	0.058	0.051	0.050	0.058	0.060
	RMSE	0.059	0.064	0.051	0.069	0.057	0.056	0.065	0.076
	R <sup>2</sup>	0.794	0.783	0.788	0.751	0.808	0.823	0.793	0.716
Exponencial combinada	MAE	0.048	0.053	0.043	0.057	0.050	0.049	0.056	0.059
	RMSE	0.058	0.063	0.051	0.069	0.057	0.055	0.064	0.076
	R <sup>2</sup>	0.794	0.784	0.786	0.749	0.806	0.822	0.793	0.714
Page	MAE	0.041	0.044	0.038	0.051	0.045	0.044	0.049	0.053
	RMSE	0.054	0.056	0.048	0.068	0.054	0.053	0.059	0.077
	R <sup>2</sup>	0.774	0.775	0.751	0.714	0.774	0.795	0.777	0.675
Henderson e Pabis	MAE	0.042	0.045	0.039	0.052	0.045	0.045	0.050	0.054
	RMSE	0.054	0.056	0.049	0.069	0.055	0.053	0.060	0.078
	R <sup>2</sup>	0.773	0.775	0.748	0.711	0.771	0.792	0.774	0.672
Logarítmico (assimptótico)	MAE	0.044	0.047	0.040	0.054	0.047	0.047	0.052	0.056
	RMSE	0.056	0.059	0.050	0.070	0.056	0.055	0.061	0.079
	R <sup>2</sup>	0.779	0.778	0.759	0.721	0.781	0.800	0.781	0.683
Midilli	MAE	0.042	0.045	0.039	0.052	0.045	0.045	0.050	0.054
	RMSE	0.054	0.057	0.049	0.069	0.055	0.054	0.060	0.078
	R <sup>2</sup>	0.774	0.776	0.749	0.713	0.772	0.793	0.775	0.673
Dois-termos	MAE	0.044	0.048	0.040	0.053	0.046	0.046	0.052	0.055
	RMSE	0.056	0.059	0.049	0.068	0.055	0.054	0.061	0.076
	R <sup>2</sup>	0.790	0.787	0.778	0.742	0.799	0.816	0.792	0.705
Dois-termos exponencial	MAE	0.047	0.051	0.042	0.056	0.049	0.048	0.055	0.058
	RMSE	0.057	0.061	0.050	0.069	0.056	0.055	0.063	0.077
	R <sup>2</sup>	0.791	0.786	0.781	0.744	0.801	0.818	0.792	0.708
Henderson e Pabis modificado	MAE	0.044	0.048	0.040	0.053	0.047	0.047	0.052	0.055
	RMSE	0.056	0.059	0.049	0.069	0.055	0.054	0.061	0.077
	R <sup>2</sup>	0.787	0.785	0.772	0.736	0.794	0.812	0.789	0.699

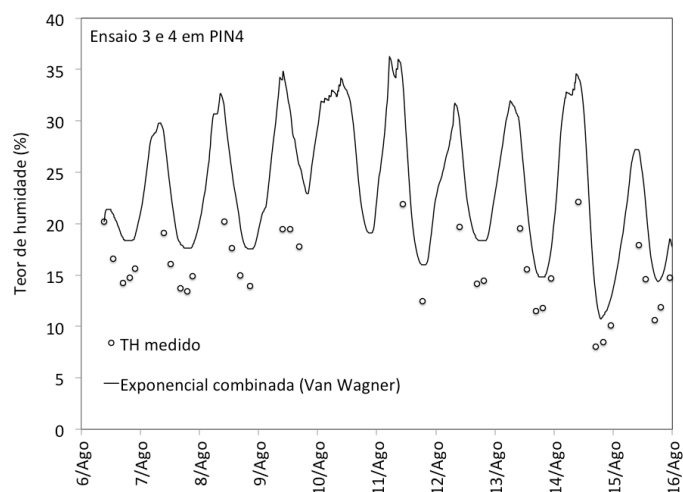


Figura 35 – Comparação entre os valores de umidade medidos e os valores modelados para o teste 3 e 4 com uma plantação de regeneração natural sem tratamento silvícola (PIN4). Os valores modelados foram obtidos através da aplicação da curva de sorção baseada no modelo da exponencial combinada e a determinação do EMC através do modelo de Van Wagner.

Tabela 33 – Resultados da validação para o teste 3 e 4 com uma plantação de regeneração natural sem tratamento silvícola (PIN4)

Modelo de sorção	Parâmetros de ajuste	Modelo do EMC							
		Simard	Van Wagner	Nelson	Oswin modificado	Chung-Pfost modificado	Henderson	Zuritz	Halsey modificado
Byram (exponencial pura)	MAE	0.057	0.062	0.052	0.065	0.058	0.058	0.065	0.067
	RMSE	0.063	0.069	0.056	0.074	0.062	0.061	0.070	0.080
	R <sup>2</sup>	0.861	0.848	0.860	0.818	0.873	0.884	0.860	0.785
Exponencial combinada	MAE	0.056	0.060	0.051	0.064	0.057	0.057	0.064	0.066
	RMSE	0.062	0.067	0.055	0.074	0.062	0.060	0.069	0.080
	R <sup>2</sup>	0.865	0.853	0.861	0.820	0.876	0.888	0.863	0.786
Page	MAE	0.048	0.051	0.045	0.058	0.052	0.052	0.057	0.060
	RMSE	0.057	0.060	0.052	0.072	0.059	0.057	0.064	0.080
	R <sup>2</sup>	0.859	0.858	0.838	0.798	0.859	0.877	0.858	0.759
Henderson e Pabis	MAE	0.049	0.052	0.046	0.059	0.053	0.052	0.057	0.061
	RMSE	0.058	0.060	0.053	0.072	0.059	0.058	0.064	0.081
	R <sup>2</sup>	0.859	0.860	0.835	0.795	0.856	0.875	0.856	0.756
Logarítmico (assimptótico)	MAE	0.051	0.054	0.048	0.061	0.054	0.054	0.059	0.063
	RMSE	0.059	0.063	0.054	0.074	0.060	0.059	0.066	0.082
	R <sup>2</sup>	0.863	0.861	0.845	0.804	0.864	0.881	0.862	0.766
Midilli	MAE	0.049	0.052	0.046	0.059	0.053	0.053	0.058	0.061
	RMSE	0.058	0.061	0.053	0.073	0.059	0.058	0.064	0.081
	R <sup>2</sup>	0.860	0.860	0.837	0.796	0.858	0.876	0.857	0.758

Modelo de sorção	Parâmetros de ajuste	Modelo do EMC							
		Simard	Van Wagner	Nelson	Oswin modificado	Chung-Pfost modificado	Henderson	Zuritz	Halsey modificado
Dois-terminos	MAE	0.051	0.055	0.047	0.060	0.054	0.054	0.059	0.062
	RMSE	0.059	0.063	0.053	0.072	0.060	0.058	0.066	0.079
	R <sup>2</sup>	0.869	0.864	0.860	0.820	0.877	0.891	0.868	0.785
Dois-terminos exponencial	MAE	0.054	0.058	0.050	0.063	0.056	0.056	0.062	0.065
	RMSE	0.061	0.066	0.055	0.074	0.061	0.060	0.068	0.081
	R <sup>2</sup>	0.867	0.859	0.860	0.819	0.876	0.889	0.866	0.784
Henderson e Pabis modificado	MAE	0.051	0.055	0.048	0.061	0.054	0.054	0.059	0.063
	RMSE	0.060	0.063	0.053	0.073	0.060	0.059	0.066	0.080
	R <sup>2</sup>	0.867	0.865	0.856	0.816	0.874	0.889	0.867	0.780

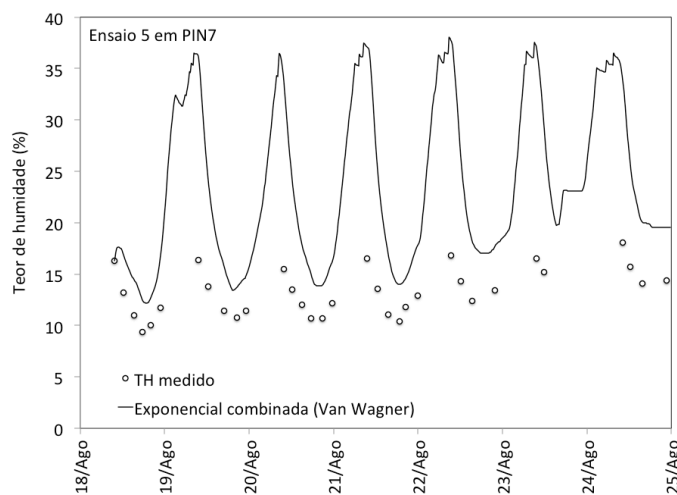


Figura 36 – Comparação entre os valores de umidade medidos e os valores modelados para o teste 5 com uma plantação antiga com tratamento silvícola (PIN7). Os valores modelados foram obtidos através da aplicação da curva de sorção baseada no modelo da exponencial combinada e a determinação do teor de umidade de equilíbrio – EMC através do modelo de Van Wagner.

Tabela 34 – Resultados da validação para o teste 5 com uma plantação antiga com tratamento silvícola (PIN7)

Modelo de sorção	Parâmetros de ajuste	Modelo do EMC							
		Simard	Van Wagner	Nelson	Oswin modificado	Chung-Pfost modificado	Henderson	Zuritz	Halsey modificado
Byram (exponencial pura)	MAE	0.080	0.086	0.082	0.106	0.088	0.085	0.096	0.115
	RMSE	0.097	0.105	0.098	0.136	0.103	0.098	0.116	0.156
	R <sup>2</sup>	0.871	0.864	0.873	0.836	0.882	0.893	0.867	0.817
Exponencial combinada	MAE	0.078	0.084	0.081	0.105	0.086	0.083	0.094	0.113
	RMSE	0.096	0.104	0.098	0.137	0.103	0.098	0.115	0.157
	R <sup>2</sup>	0.870	0.865	0.870	0.831	0.880	0.893	0.865	0.810

Modelo de sorção	Parâmetros de ajuste	Modelo do EMC							
		Simard	Van Wagner	Nelson	Oswin modificado	Chung-Pfost modificado	Henderson	Zuritz	Halsey modificado
Page	MAE	0.067	0.071	0.073	0.095	0.078	0.075	0.083	0.103
	RMSE	0.088	0.093	0.096	0.140	0.101	0.095	0.107	0.165
	R <sup>2</sup>	0.822	0.826	0.787	0.736	0.808	0.833	0.805	0.707
Henderson e Pabis	MAE	0.068	0.073	0.074	0.097	0.080	0.077	0.084	0.106
	RMSE	0.089	0.095	0.097	0.142	0.102	0.096	0.107	0.168
	R <sup>2</sup>	0.822	0.825	0.787	0.736	0.808	0.833	0.809	0.708
Logarítmico (assimptótico)	MAE	0.071	0.076	0.077	0.101	0.083	0.079	0.087	0.110
	RMSE	0.091	0.097	0.098	0.143	0.104	0.097	0.110	0.167
	R <sup>2</sup>	0.847	0.849	0.820	0.772	0.838	0.858	0.834	0.745
Midilli	MAE	0.069	0.073	0.075	0.097	0.080	0.077	0.084	0.106
	RMSE	0.089	0.095	0.097	0.142	0.103	0.096	0.108	0.168
	R <sup>2</sup>	0.826	0.830	0.792	0.741	0.812	0.837	0.811	0.713
Dois-termos	MAE	0.072	0.077	0.076	0.098	0.081	0.078	0.088	0.106
	RMSE	0.092	0.098	0.095	0.135	0.101	0.095	0.110	0.157
	R <sup>2</sup>	0.858	0.858	0.847	0.803	0.862	0.879	0.848	0.778
Dois-termos exponencial	MAE	0.076	0.082	0.079	0.103	0.085	0.082	0.092	0.112
	RMSE	0.094	0.102	0.098	0.138	0.103	0.097	0.114	0.159
	R <sup>2</sup>	0.868	0.863	0.861	0.819	0.873	0.888	0.858	0.796
Henderson e Pabis modificado	MAE	0.072	0.077	0.076	0.099	0.082	0.079	0.088	0.107
	RMSE	0.091	0.098	0.096	0.137	0.102	0.096	0.110	0.160
	R <sup>2</sup>	0.856	0.858	0.840	0.795	0.856	0.874	0.844	0.770

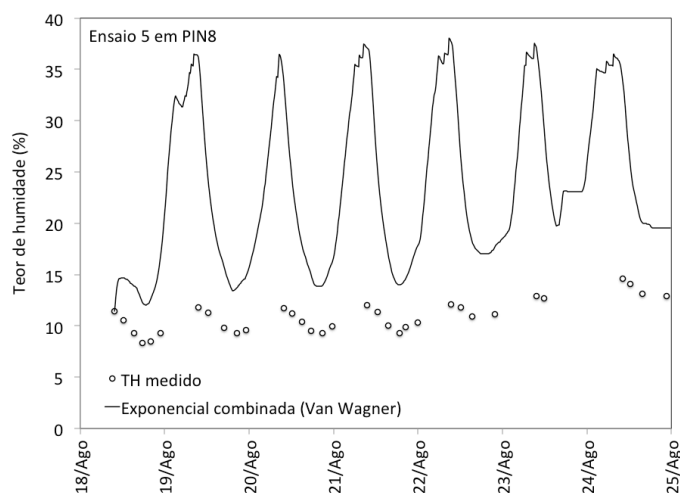


Figura 37 – Comparação entre os valores de umidade medidos e os valores modelados para o teste 5 com uma zona com corte de árvores (PIN8). Os valores modelados foram obtidos através da aplicação da curva de sorção baseada no modelo da exponencial combinada e a determinação do teor de umidade de equilíbrio – EMC através do modelo de Van Wagner.

Tabela 35 – Resultados da validação para o teste 5 com uma zona com corte de árvores (PIN8)

Modelo de sorção	Parâmetros de ajuste	Modelo do EMC							
		Simard	Van Wagner	Nelson	Oswin modificado	Chung-Pfost modificado	Henderson	Zuritz	Halsey modificado
Byram (exponencial pura)	MAE	0.101	0.108	0.104	0.128	0.109	0.106	0.118	0.137
	RMSE	0.120	0.129	0.122	0.159	0.127	0.122	0.139	0.178
	R <sup>2</sup>	0.599	0.586	0.586	0.553	0.608	0.630	0.582	0.528
Exponencial combinada	MAE	0.100	0.106	0.102	0.126	0.108	0.105	0.116	0.135
	RMSE	0.119	0.127	0.121	0.159	0.127	0.121	0.138	0.179
	R <sup>2</sup>	0.584	0.576	0.567	0.532	0.589	0.613	0.565	0.507
Page	MAE	0.089	0.093	0.095	0.117	0.101	0.098	0.105	0.125
	RMSE	0.111	0.117	0.119	0.162	0.125	0.118	0.130	0.186
	R <sup>2</sup>	0.474	0.483	0.431	0.386	0.456	0.487	0.450	0.360
Henderson e Pabis	MAE	0.090	0.095	0.096	0.119	0.102	0.099	0.106	0.128
	RMSE	0.112	0.118	0.121	0.165	0.126	0.120	0.131	0.190
	R <sup>2</sup>	0.474	0.478	0.430	0.386	0.455	0.486	0.455	0.359
Logarítmico (assimptótico)	MAE	0.093	0.098	0.099	0.123	0.105	0.101	0.109	0.132
	RMSE	0.115	0.121	0.122	0.165	0.127	0.121	0.134	0.189
	R <sup>2</sup>	0.511	0.515	0.470	0.427	0.495	0.523	0.486	0.401
Midilli	MAE	0.091	0.095	0.097	0.120	0.102	0.099	0.107	0.128
	RMSE	0.113	0.118	0.121	0.165	0.126	0.120	0.132	0.190
	R <sup>2</sup>	0.478	0.485	0.435	0.391	0.460	0.490	0.456	0.365
Dois-termos	MAE	0.094	0.099	0.098	0.120	0.103	0.100	0.110	0.128
	RMSE	0.115	0.121	0.119	0.158	0.124	0.119	0.134	0.179
	R <sup>2</sup>	0.536	0.535	0.511	0.471	0.535	0.562	0.515	0.444
Dois-termos exponencial	MAE	0.098	0.103	0.101	0.125	0.107	0.103	0.114	0.134
	RMSE	0.118	0.125	0.121	0.161	0.127	0.121	0.137	0.181
	R <sup>2</sup>	0.563	0.558	0.540	0.503	0.563	0.588	0.540	0.477
Henderson e Pabis modificado	MAE	0.094	0.099	0.098	0.121	0.104	0.101	0.110	0.129
	RMSE	0.115	0.121	0.120	0.160	0.125	0.120	0.134	0.182
	R <sup>2</sup>	0.529	0.535	0.501	0.460	0.525	0.552	0.507	0.433

Como se pode verificar, da Tabela 32 à Tabela 35, tal como para os resultados apresentados anteriormente, existe alguma variação no ajustamento entre os dados modelados e os dados medidos em Ruiz (2006). Nos testes 3 e 4 com uma plantação antiga com tratamento silvícola (PIN1) obteve-se um MAE entre 3.8% e 6.0%, um RMSE entre 4.8% e 7.9% e um R<sup>2</sup> entre 0.672 e 0.823. Nos testes 3 e 4 com uma plantação de regeneração natural sem tratamento silvícola (PIN4) obteve-se um MAE



entre 4.5% e 6.7%, um RMSE entre 5.2% e 8.2% e um  $R^2$  entre 0.756 e 0.891. No teste 5 com uma plantação antiga com tratamento silvícola (PIN7) obteve-se um MAE entre 6.7% e 11.5%, um RMSE entre 8.8% e 16.8% e um  $R^2$  entre 0.707 e 0.893. No teste 5 com uma zona com corte de árvores (PIN8) obteve-se um MAE entre 8.9% e 13.7%, um RMSE entre 11.1% e 19.0% e um  $R^2$  entre 0.300 e 0.359.

Em conclusão podem verificar-se que estatisticamente, existe um bom ajustamento entre os dados obtidos pelos modelos de sorção e teor de humidade de equilíbrio – EMC testados e os dados referentes a uma plantação antiga com tratamento silvícola (PIN1) dos testes 3 e 4 de Ruiz (2006), um ajustamento razoável com os dados referentes a uma plantação de regeneração natural sem tratamento silvícola (PIN4) dos testes 3 e 4 e um mau ajustamento aos dados referentes ao teste 5 com uma plantação antiga com tratamento silvícola (PIN7) e uma zona com corte de árvores (PIN8).

Como se pode verificar, da Figura 34 à Figura 37, com exceção do teste 5 com uma plantação antiga com tratamento silvícola (PIN7), os restantes testes possuem um bom coeficiente de correlação entre os dados medidos e os dados modelados indicando que o comportamento do modelo segue o comportamento dos dados medidos no local, verificando-se contudo que, de uma forma geral, existe alguma sobrestimação do modelo em relação aos dados medidos.

## 5 CONCLUSÃO

### 5.1 CONCLUSÃO

Confirmou-se que os dados do teor de humidade de um conjunto de combustíveis florestais finos, representativos da floresta da Região Centro de Portugal que têm vindo a ser recolhidos desde 1986 pelo CEIF da ADAI do DEM – FCTUC, são de importância fundamental no estudo desta propriedade dos combustíveis florestais.

Embora estes dados sejam importantes para o conhecimento da evolução diária do teor de humidade de algumas espécies florestais importantes e para caracterizar o regime de ocorrência de incêndios numa região, concluiu-se que havia necessidade de desenvolver modelos que permitam estimar o teor de humidade destas e outras espécies, em função de parâmetros fáceis de aceder, a fim de prever a evolução deste parâmetro para outros lugares e tempos, como se requer para a previsão do comportamento do fogo. No presente estudo optou-se por recorrer a parâmetros meteorológicos nomeadamente a temperatura e humidade relativa do ar, por serem reconhecidamente importantes na definição dos processos de variação do teor de humidade de combustíveis mortos finos. Estudou-se também o efeito da precipitação na modificação do teor de humidade.

#### i) Análise da metodologia de amostragem e determinação do teor de humidade

Considerando o erro que resulta do procedimento de amostragem já implementado pelo CEIF, concluiu-se que, para as espécies arbóreas mortas (agulhas mortas de *Pinus pinaster* e folhas mortas de *Eucalyptus globulus*), o erro cometido na recolha e análise de 4 amostras é proporcional ao teor de humidade da média das 4 amostras, sendo inferior a 2% quando o teor de humidade é inferior a 20%. Para as espécies arbóreas vivas, nomeadamente para agulhas vivas de *Pinus pinaster*, o erro cometido na recolha e análise de 4 amostras não é proporcional ao teor de humidade da média das 4 amostras. Em determinados casos, o erro cometido atingiu valores de 30% sendo de referir um erro médio de 10%. Para as espécies arbustivas, nomeadamente para a *Calluna vulgaris*, o erro cometido com recurso a 4 amostras é

proporcional ao teor de humidade obtido no final, resultante da média das 4 amostras, sendo menor que 10% para um teor de humidade inferior a 90%.

Da comparação do teor de humidade determinado com recurso ao analisador rápido (temperatura de 105°C durante sensivelmente 10 minutos) com o valor obtido por secagem em estufa (105°C durante 24h), com base nos testes realizados na Lousã para as espécies arbóreas mortas, para um teor de humidade inferior a 30%, concluiu-se que o erro resultante da utilização do analisador rápido de humidade não possuía uma tendência definida, variando entre 0 e 70%. No entanto, quando da utilização do analisador rápido de humidade, para um teor de humidade superior a 30%, o erro aumentou com o aumento do teor de humidade. Salienta-se o facto de existir uma dispersão significativa dos valores dos erros verificados.

No que se refere à temperatura utilizada e à duração do teste, concluiu-se que os valores obtidos com recurso ao analisador rápido do teor de humidade (em testes realizados à temperatura de 105°C com duração até 30 minutos), no caso das espécies arbóreas mortas, são sistematicamente inferiores aos valores obtidos por secagem em estufa a 105°C durante 24h. Este facto não se verificou para as folhas vivas de *Eucalyptus globulus* e extremidades vivas de *Calluna vulgaris* e *Ulex europeus*, para as quais um teste com cerca de 20 minutos foi suficiente para se atingir sensivelmente o mesmo valor que através da secagem em estufa a 105 °C durante 24h. Por outro lado, no analisador rápido, sob uma temperatura de ensaio de 145°C, à exceção das agulhas mortas de *Pinus pinaster* e da *Calluna vulgaris*, o teor de humidade determinado foi sensivelmente o mesmo que o obtido através de secagem em estufa a 105°C durante 24h, a partir de sensivelmente 10 minutos de teste. Para as agulhas mortas de *Pinus pinaster*, foram necessários pelo menos 20 minutos de ensaio e para a *Calluna vulgaris*, entre 5 a 10 minutos foram suficientes para se obter valor do teor de humidade idêntico ao obtido por secagem em estufa a 105°C durante 24h. Para esta espécie, tempos de ensaio superiores geraram valores sobrestimados do teor de humidade, possivelmente devido à eliminação de compostos orgânicos voláteis presentes em quantidades significativas na mesma.

## ii) Análise da representatividade dos valores obtidos do teor de humidade

No que se refere à possibilidade das espécies avaliadas na Lousã, no âmbito do programa de medição do teor de humidade do CEIF, serem representativas, em termos de grandeza, evolução e tendência, do todo ou de parte da restante floresta portuguesa, concluiu-se que as mesmas são de representatividade elevada das espécies presentes na zona centro e norte de Portugal, de representatividade média das espécies presentes na zona de Lisboa e Vale do Tejo e de representatividade reduzida na zona do Alentejo e Algarve. Em termos de espécies arbustivas, as espécies caracterizadas na Lousã são de representatividade elevada nos povoamentos de *Pinus pinaster*. Nos povoamentos de *Eucalyptus globulus*, a *Calluna vulgaris* também possui uma representatividade elevada, mas a espécie *Chamaespartium tridentatum* possui uma representatividade média. Assim, pode considerar-se que as espécies estudadas possuem uma representatividade média a elevada na zona centro e norte de Portugal. A Lousã é pois um local adequado em termos de representatividade das espécies mais representativas nas zonas de Portugal com maior incidência de incêndios florestais.

Em termos de representatividade espacial do teor de humidade obtido nas medições efetuadas na Lousã, nomeadamente, se se tratar de conhecer a representatividade destas medições como sendo um indicador de perigo de incêndio de uma área mais vasta, concluiu-se que as medições do teor de humidade dos combustíveis florestais finos mortos realizadas na Lousã possuem uma elevada representatividade na zona centro e nordeste e uma representatividade média na zona litoral e sul do território português, podendo assim ser utilizadas como um indicador de risco de incêndio destas regiões. No que respeita às espécies vivas, nomeadamente às espécies arbustivas, de uma forma geral, a sua representatividade é média no centro e norte e reduzida no restante território português.

Foram analisadas as relações que podem ser estabelecidas entre o teor de humidade de diferentes espécies amostradas na Lousã, tendo-se concluído que, para as espécies *Pinus pinaster* morto e *Eucalyptus globulus* morto existe um elevado grau de associação linear entre si. Também para as espécies arbustivas vivas, *Calluna vulgaris* e *Chamaespartium tridentatum*, ocorre um grau de associação linear considerável. Relativamente à relação entre as espécies arbóreas mortas e as espécies arbustivas vivas, existe um grau de associação menos significativo embora com algum

interesse. As espécies arbóreas vivas não apresentaram graus de associação relevantes entre si ou com as restantes espécies.

No que diz respeito à representatividade temporal dos teores de humidade das espécies em estudo, nomeadamente em termos da sua variação ao longo do ano, concluiu-se que o teor de humidade médio apresenta, ao longo do ano, comportamento similar para as duas espécies arbóreas mortas, com valores mínimos nos meses mais quentes, particularmente de Junho a Agosto. Tal padrão de comportamento não ocorre para as espécies arbóreas vivas, para as quais se verifica alguma estabilidade de valores ao longo do ano. Para as espécies arbustivas, o valor mínimo do teor de humidade ocorre no mês de Agosto. Relativamente à sua variação ao longo do dia, o teor de humidade das agulhas mortas de *Pinus pinaster* responde às variações diárias dos parâmetros meteorológicos, nomeadamente temperatura e humidade relativa do ar, verificando-se, como esperado, uma melhor correlação com os valores meteorológicos registados 2 horas antes da medição do teor de humidade, evidenciado assim o tempo de resposta deste tipo de combustível. De acordo com os testes realizados e com dados meteorológicos de longa duração, podem identificar-se as 15h00 como sendo a hora em que, em média, diariamente ocorre o máximo da temperatura e o mínimo da humidade relativa do ar. Desta forma, para uma elevada representatividade das condições meteorológicas mais gravosas em termos de risco de incêndio, a amostragem deve ocorrer às 15h00; no entanto, para uma representatividade elevada das condições de secura dos combustíveis finos, a hora de amostragem deverá ser 1 a 2 horas depois das 15h00.

### iii) *Pinus pinaster*- processos de sorção, teor de humidade de equilíbrio e efeito da precipitação

Relativamente à previsão do teor de humidade de uma das espécies mais representativas da floresta portuguesa, o *Pinus pinaster*, foram descritos os processos de adsorção e dessorção, determinados valores do teor de humidade de equilíbrio e avaliado o efeito da precipitação na variação do seu teor de humidade, tendo-se obtido uma descrição matemática dos processos de secagem e de humidificação, posteriormente validada através de dados experimentais. Para a descrição dos processos de adsorção e de dessorção e do teor de humidade de equilíbrio, foram

avaliados modelos normalmente utilizados em combustíveis florestais bem como modelos utilizados em produtos agrícolas e alimentares.

As curvas de dessecção e de adsorção apresentam uma configuração exponencial, pelo que, a partir de um estado seco ou húmido, as agulhas mortas de *Pinus pinaster* perdem ou ganham humidade, mais rapidamente no início e depois de forma cada vez mais lenta à medida que se aproximam do teor de humidade de equilíbrio. Todos os testes de sorção efetuados mostraram um bom ajustamento aos resultados laboratoriais, exibindo no entanto um melhor ajustamento ao modelo de Henderson e Pabis modificado e ao modelo de dois-termos. A combinação de 4 equações exponenciais também resulta num ajustamento elevado comparativamente à utilização de uma equação puramente exponencial, no qual se considera que o tempo de resposta é constante em todo o processo de dessecção ou de adsorção.

Relativamente aos fatores susceptíveis de influenciarem os tempos de resposta, as correlações obtidas entre os tempos de resposta e a humidade relativa, a variação da humidade relativa, a variação do teor de humidade do *Pinus pinaster* e o teor de humidade inicial do *Pinus pinaster* não foram significativas e portanto, segundo os resultados obtidos não se identifica uma influência destes fatores sobre os tempos de resposta das agulhas mortas de *Pinus pinaster*. Pôde ainda verificar-se que existe alguma correlação entre os tempos de resposta e a temperatura do ensaio, nomeadamente para o primeiro e segundo tempo de resposta no processo de dessecção e para o primeiro tempo de resposta no processo de adsorção.

Relativamente ao teor de humidade de equilíbrio das agulhas mortas de *Pinus pinaster*, em função da humidade relativa do ar, os valores encontrados em todos os testes realizados corresponderam a curvas do tipo sigmoidal. À medida que a humidade relativa do ar se aproxima de zero, o teor de humidade de equilíbrio também tende para valores próximos de zero. O teor de humidade de equilíbrio para o processo de dessecção é superior ao teor de humidade de equilíbrio para o processo de adsorção, apresentando assim o típico efeito de histerese. Pôde igualmente verificar-se que, quando aplicados os modelos normalmente utilizados em combustíveis florestais e os respetivos coeficientes determinados, os resultados obtidos no presente estudo foram superiores aos valores previstos nos vários modelos existentes na literatura, configurando assim a necessidade de determinação de

coeficientes específicos para as agulhas mortas de *Pinus pinaster* e para outras espécies.

Tal como nos modelos de sorção, todos os modelos testados apresentaram um bom ajuste aos resultados laboratoriais obtidos para o teor de humidade de equilíbrio das agulhas mortas de *Pinus pinaster*. Os dados experimentais do teor de humidade de equilíbrio no processo de dessorção possuem um melhor ajustamento através do modelo de Simard e pelo modelo de Van Wagner. Para o processo de dessorção, os dados experimentais do teor de humidade de equilíbrio possuem um melhor ajustamento através do modelo de Van Wagner.

Os modelos de teor de humidade de equilíbrio utilizados em produtos agrícolas e alimentares, nomeadamente o modelo de Oswin modificado e o modelo de Chung-Pfost modificado para o processo de dessorção e o modelo de Halsey modificado para o processo de adsorção resultaram num bom ajuste com os valores medidos em laboratório para as agulhas mortas de *Pinus pinaster*. Estes modelos têm a vantagem de necessitarem um menor número de parâmetros empíricos, podendo ser alternativas válidas aos modelos típicos da área dos incêndios florestais na aplicação ao caso dos combustíveis florestais.

Relativamente ao efeito da precipitação na variação do teor de humidade das agulhas mortas de *Pinus pinaster* foram analisadas as correlações entre o aumento do teor de humidade e os seguintes parâmetros: precipitação ocorrida nas últimas 24h, variação da precipitação entre o valor ocorrido nas últimas 24h e o valor ocorrido nas 24h anteriores; e teor de humidade inicial. Concluiu-se existir uma correlação não linear significativa positiva entre o aumento do teor de humidade das espécies arbóreas mortas e a parâmetros precipitação ocorrida nas últimas 24h. Assim como a variação da precipitação entre o valor ocorrido nas últimas 24h e o valor ocorrido nas 24h anteriores. Relativamente ao aumento do teor de humidade versus intensidade de precipitação existe também uma correlação significativa negativa para as espécies arbóreas mortas com a precipitação ocorrida nas últimas 24h e com a variação da precipitação entre o valor ocorrido nas últimas 24h e o valor ocorrido nas 24h anteriores, tendo sido assim desenvolvidos 3 modelos de análise do efeito da precipitação na variação do teor de humidade aquando da ocorrência de episódios de precipitação.

Os modelos desenvolvidos para a descrição matemática dos processos de secagem e de humidificação das agulhas de *Pinus pinaster* foram validados com base em valores medidos em campo. Para este efeito, no que se refere à modelação da variação horária do teor de humidade abaixo do ponto de saturação das fibras, praticamente todas as combinações apresentaram um ajustamento médio a elevado dos dados modelados com os dados medidos, sendo que o melhor ajustamento resulta da aplicação dos modelos de Page, Dois-Termos e Henderson e Pabis modificado na curva de sorção e no caso da determinação do teor de humidade de equilíbrio, da aplicação do modelo de Simard.

No que se refere à modelação da variação diária do teor de humidade abaixo do ponto de saturação das fibras, embora os erros cometidos pela utilização de um valor médio de temperatura e de humidade relativa do ar para previsão do valor diário do teor de humidade não fossem elevados, o ajustamento entre os dados medidos e os dados modelados não foi significativo.

Relativamente à validação dos modelos desenvolvidos para contabilização do efeito da precipitação na variação do teor de humidade das espécies arbóreas mortas e arbustivas, para as espécies arbóreas mortas, o melhor ajuste é obtido pelo modelo 3. Quanto à espécie arbustiva *Calluna vulgaris*, apenas contabilizada no modelo 1, pode verificar-se que quando comparados os dados modelados com os dados medidos, obtém-se um ajuste reduzido.

Relativamente à validação dos modelos desenvolvidos para previsão da variação horária do teor de humidade abaixo do ponto de saturação das fibras do *Pinus pinaster* com base nos dados medidos numa diferente localização, pôde verificar-se que estatisticamente, existe um ajustamento elevado entre os dados obtidos pelos modelos de sorção e teor de humidade de equilíbrio testados e os dados referentes a uma plantação antiga com tratamento silvícola, um ajustamento razoável com os dados referentes a uma plantação de regeneração natural sem tratamento silvícola e um ajustamento reduzido aos dados referentes a uma plantação antiga com tratamento silvícola.



## 5.2 TRABALHO FUTURO

No sentido de reduzir os erros das estimativas realizadas, os trabalhos futuros devem incluir a análise das relações entre os parâmetros caracterizadores dos processos de sorção, o tempo de resposta dos combustíveis e propriedades tais como a temperatura do ar, temperatura do combustível, humidade relativa do ar, teor de humidade inicial e propriedades dos combustíveis.

Volta-se a referir que no presente estudo não foi considerado o efeito da velocidade do vento. Admitiu-se além disso que a temperatura das partículas de combustível eram iguais à do ar ambiente; isto pode não ocorrer, se houver radiação solar a incidir diretamente sobre o leito combustível. Também não foram estudadas outras formas de captação de água líquida sem ser por precipitação direta. Em trabalhos futuros poderá analisar-se a importância relativa e o papel destes vários fatores.

Desta forma deverão ser realizados esforços no sentido de estender a análise do teor de humidade de equilíbrio para outros valores de temperaturas e humidade relativa do ar, a modelação do teor de humidade dos combustíveis para condições acima do ponto de saturação das fibras e após a ocorrência de episódios de precipitação, assim como aplicabilidade dos modelos utilizados para outros combustíveis típicos da floresta mediterrânica.

## 6 BIBLIOGRAFIA

- Agee JK, Wright CS, Williamson N, Huff MH (2002) Foliar moisture content of Pacific Northwest vegetation and its relation to wildland fire behavior. *Forest Ecology and Management* 167: 57 – 66, doi: 10.1016/S0378-1127(01)00690-9
- Anderson HE, Schuette RD, Mutch RW (1978) Timelag and equilibrium moisture content of Ponderosa pine needles. USDA Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station, Research Paper INT-202. (Ogden, UT).
- Anderson HE (1985) Moisture and fine forest fuel response, L.R. Donoghue, R.E. Martin (Eds.), *Proceedings of the 8th Conference on Fire and Forest Meteorology*. Society of American Foresters, 192-199.
- Anderson HE (1990) Predicting equilibrium moisture content of some foliar forest litter in the northern Rocky Mountains. USDA Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station. Research Paper INT-429.
- Anderson SA, Anderson WR (2009) Predicting the elevated dead fine fuel moisture content in gorse (*Ulex europaeus* L.) shrub fuels. *Canadian Journal of Forest Research*, 39(12), 2355-2368.
- Avramidis S (1989) Evaluation of “three-variable” models for the prediction of equilibrium moisture content in wood. *Wood Science and Technology* 23(3), 251-257. doi:10.1007/BF00367738
- Beck JA, Armitage OB (2004) Diurnal fine fuel moisture and FFMC characteristics at northern latitudes. In *‘Proceedings of the 22nd Tall Timbers Fire Ecology Conference: Fire in Temperate, Boreal and Montane Ecosystems’*, 15–18 October 2001, Kanakaskis, AB, Canada. (Eds RT Engstrom,WJ de Groot) pp. 211–221. (TallTimber Research Station: Tallahassee, FL)
- Blackmarr WH (1971) Equilibrium moisture content of common fine fuels found in southeastern forests. United States Department of Agriculture. Forest Service. Research Paper SE-74.
- Blackmarr WH (1972) Moisture content influences, ignitability of slash pine litter. USDA Forest Service. Southeastern Forest Experiment Station. Research Note SE-173. (Asheville, NC).

- Brenner J (2002) Measuring Live Fuel Moisture in Florida: Standard Methods and Procedures. Florida Division of Forestry. Department of Agriculture and Consumer Services.
- Britton CM, Countryman CM, Wright HA, Walvekar AG (1973) The effect of humidity, air temperature, and wind speed on fine fuel moisture content. *Fire Technology* 9, 46–55. doi:10.1007/BF02624840
- Byram GM (1963) An analysis of the drying process in forest fuel material. *International Symposium on Humidity and Moisture*, Washington, D.C, May, 20-23.
- Burgan RE (1979) Estimating live fuel moisture for the 1978 National Fire Danger Rating System. USDA Forest Service Gen. Tech. Rep. INT-226,
- Carlson JD, Bradshaw LS, Nelson RM, Bensch RR, Jabrzemski R (2007) Application of the Nelson model to four timelag fuel classes using Oklahoma field observations: model evaluation and comparison with National Fire Danger Rating System algorithms. *International Journal of Wildland Fire*, 16(2), 204-216. doi: 10.1071/WF06073
- Carlsaw HS, Jaeger JC (1959) Conduction of Heat in Solids (paperback, 2nd Ed.).
- Castro FX, Tudela A, Sebastià MT (2003) Modelling moisture content in shrubs to predict fire risk in Catalonia (Spain). *Agricultural and Forest Meteorology* 116: 49–59. doi: 10.1016/S0168-1923(02)00248-4
- Catchpole EA, Catchpole WR, Viney NR, McCaw WL, Marsden-Smedley JB (2001) Estimating fuel response time and predicting fuel moisture content from field data. *International Journal of Wildland Fire* 10, 215–222. doi:10.1071/WF01011
- Chandra PK, Singh RP (1995) Applied Numerical Methods for Food and Agricultural Engineers. pp. 163–167. CRC PressINC.
- Chen CC (1990) Modification of Oswin EMC/ERH equation. *Chinese agricultural research* 39 (4), 367 – 376
- Chuvieco E, Riaño D, Aguado I, Cocero D (2002) Estimation of fuel moisture content from multitemporal analysis of Landsat Thematic Mapper reflectance data:

- applications in fire danger assessment. *International Journal of Remote Sensing* 23: 2145-2162. doi: 10.1080/01431160110069818
- Chuvieco E, Aguado I, Cocero D, Riaño D (2003) Design of an empirical index to estimate fuel moisture content from NOAA-AVHRR analysis in forest fire danger studies. *International Journal of Remote Sensing*, 24: 1621-1637. doi: 10.1080/01431160210144660b
- Chuvieco E, Cocero D, Riaño D, Martín P, Martínez-Vega J, de la Riva J, Pérez F (2004a) Combining NDVI and surface temperature for the estimation of live fuel moisture content in forest fire danger rating. *Remote Sensing of Environment*, 92(3), 322-331. doi: 10.1016/j.rse.2004.01.019,
- Chuvieco E, Aguado I, Dimitrakopoulos AP (2004b) Conversion of fuel moisture values to ignition potential for integrated fire danger assessment. *Canadian Journal of Forest Research* 34: 2284–2293. doi:10.1139/x04-101
- Cohen M, Cuiñas P, Díez C, Fernandes P, Guijarro M, Moro C (2003) Wildland fuel particles characterisation: database content (Deliverable D6–03–A1). Fire Star: a decision support system for fuel management and fire hazard reduction in Mediterranean wildland–urban interfaces, Project no. EVG1-CT-2001–00041 (European Commission).
- Countryman CM, Dean WA (1979) Measuring moisture content in living chaparral: A field user's guide. Pacific Southwest For. and Rng. Expt. Sta., Berkeley, CA. Gen. Tech. Rep. PSW-36, 27p.
- Dabrowski A (2001) Adsorption – from theory to practice. *Advances in Colloid and Interface Science* 93, 135–224. doi:10.1016/S0001-8686(00)00082-8
- Davies GM, Legg CJ (2011) Fuel moisture thresholds in the flammability of *Calluna vulgaris*. *Fire technology*, 47(2), 421-436. doi: 10.1007/s10694-010-0162-0
- Dimitrakopoulos AP, Bemmerzouk AM (1998) Evaluation of the Canadian forest fire danger rating system (CFFDRS) and the Keetch-Byram Index (KBDI) in the Mediterranean climate of Greece. In Proc. of III International Conference On Forest Fire Research/14th Conference On Fire And Forest Meteorology. Luso, 16/20 November 1998, Volume I: 995-1009.

- Dimitrakopoulos AP, Papaioannou KK (2001) Flammability assessment of Mediterranean forest fuels. *Fire Technology* 37: 143–150. doi:10.1023/A:1011641601076
- Dimitrakopoulos AP, Bemmerzouk AM (2003) Predicting live herbaceous moisture content from seasonal drought index, *International Journal of Biometeorology* 47: 73 -79. doi: 10.1007/s00484-002-0151-1
- Erbay Z, Icier F (2009) A review of thin layer drying of foods: Theory, modeling, and experimental results. *Critical reviews in food science and nutrition* 50(5), 441-464. doi:10.1080/10408390802437063.
- Fernandes PM, Rego FC (1998) A new method to estimate fuel surface area-to-volume ratio using water immersion. *International Journal of Wildland Fire*, 8(2), 59-66. doi:10.1071/WF9980059
- Fernandes PAM (2001) Fire spread prediction in shrub fuels in Portugal. *Forest Ecology Management* 144(1–3): 67–74. doi:10.1016/S0378-1127(00)00363-7
- Fernandes PM, Loureiro C, Botelho H, Ferreira A, Fernandes M (2002), Avaliação Indireta da Carga de Combustível em Pinhal Bravo, *Silva Lusitana* 10(1): 73 - 90
- Fernandes PM, Rigolot E (2007) The fire ecology and management of maritime pine (*Pinus pinaster* Ait.). *Forest Ecology and Management*, 241(1), 1-13. doi: 10.1016/j.foreco.2007.01.010.
- Fernandes PM (2009) Combining forest structure data and fuel modelling to classify fire hazard in Portugal. *Annals of Forest Science*, 66(4), 415-415. doi: 10.1051/forest/2009013
- Glenn TL (1978) Dynamic analysis of grain drying system. Ph.D. Thesis, Ohio State University, Ann Arbor, MI (unpublished).
- Gonçalves DP, Pedrosa LS, Lopes SMG, Viegas DX, de Lemos LT (2006) The relation between the moisture content of fine forest fuels and several forest fire related aspects. *Forest Ecology and Management*. Volume 234, Supplement, 15 November 2006, Pages S244. doi: 10.1016/j.foreco.2006.08.273
- Guijarro M, Hernando C, Díez C, Martínez E, Madrigal J, Lampin C, Blanc L, Colin PY, Gorostiaga PP, Vega JA, Fonturbel, MT (2002) Flammability of some fuel beds common in the South-European ecosystems. In *IV International Conference Forest Fire Research*.

- Henderson SM, Pabis S (1961) Grain drying theory I: Temperature effect on drying coefficient. *Journal of Agricultural Engineering Research* 6, 169–174.
- Henderson SM (1974) Progress in developing the thin layer drying equation. *Trans. ASAE*. 17:1167–1172.
- ICNF. Forest and Nature Conservation Portuguese Institute (2001) 3<sup>o</sup> Revision of the National Forest Inventory. Inventory Study.
- ICNF. Forest and Nature Conservation Portuguese Institute (2010) 5<sup>o</sup> National Forest Inventory. Inventory Study.
- Iglesias HA, Chirife J (1976) Prediction of the effect of temperature on water sorption isotherms of food materials. *Journal of Food Technology* 11, 109–116. doi: 10.1111/j.1365-2621.1976.tb00707.x
- Incropera FP, Lavine AS, DeWitt DP (2011) Fundamentals of heat and mass transfer. John Wiley & Sons Incorporated.
- Jayas DS, Cenkowski S, Pabis S, Muir WE (1991) Review of thin-layer drying and wetting equations. *Drying Technology* 9(3), 551-588. doi:10.1080/07373939108916697
- Jin Sen, Chen Pengyu (2012) Modelling drying processes of fuelbeds of Scots pine needles with initial moisture content above the fibre saturation point by two-phase models. *International Journal of Wildland Fire* 21, 418–427. doi:10.1071/WF10119
- Jolly WM, Ann MH (2011) A comparison of two methods for estimating conifer live foliar moisture content. *International Journal of Wildland Fire* 21.2: 180-185. doi: 10.1071/WF11015
- King AR, Linton M (1963) Moisture variation in forest fuels: the rate of response to climate changes. *Australian Journal of Applied Science* 14, 38–49.
- Karathanos VT (1999) Determination of water content of dried fruits by drying kinetics. *Journal of Food Engineering* 39, 337–344. doi: 10.1016/S0260-8774(98)00132-0
- Kreye Jesse K., Varner J. Morgan, Knapp Eric E. (2012) Moisture desorption in mechanically masticated fuels: effects of particle fracturing and fuelbed compaction. *International Journal of Wildland Fire* 21, 894–904. doi:10.1071/WF11077

- Lewis WK (1921) The rate of drying of solid materials. *I&EC-Symposium of Drying*, 3(5) 42. doi: 10.1021/ie50137a021
- Lopes SMG (2005) Estudo do Teor de Humidade de Combustíveis Florestais Finos na Lousã no Período entre 1996 e 2004. Dissertação apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra para a obtenção do grau de mestre em Engenharia Mecânica (ramo de Termodinâmica e Fluidos); ISBN 972-8954-03-4. Coimbra
- Lopes SMG, Viegas DX, Viegas MT, de Lemos LT (2006) Moisture content of fine forest fuels in the central Portugal (Lousã) for the period 1996–2004. *Forest Ecology and Management*. Volume 234, Supplement, 15 November 2006, Pages S71 doi: 10.1016/j.foreco.2006.08.103
- Lopes SMG, Rosavec R, Silva J, Domingues T, Rita S, Abrantes T, de Lemos L, Viegas DX (2009) Aplicação de índices meteorológicos para estimar o teor de humidade de combustíveis florestais no centro de Portugal. *6.º Simpósio de Meteorologia e Geofísica da APMG*, 10.º Encontro Luso-Espanhol de Meteorologia, Monte da Caparica
- Lopes SMG, de Lemos LT, Viegas MT, Viegas DX (2010a) Moisture content of fine forest fuels in central Portugal and its relation with several forest fire related aspects, *VI International Conference on Forest Fire Research*, Page 48, Nov 2010
- Lopes SMG, de Lemos LT, Viegas DX (2010b) Modeling moisture content of dead fine forest fuels common in Central Portugal, *VI International Conference on Forest Fire Research*, Page 88, Nov 2010
- Lopes SMG, de Lemos LT, Viegas DX (2010c) Dead forest fuels moisture content evolution after a summer rainfall episode, *VI International Conference on Forest Fire Research*, Page 125, Nov 2010
- Matthews S (2006) A process-based model of fine fuel moisture. *International Journal of Wildland Fire* 15, 155–168. doi:10.1071/WF05063
- Matthews S, McCaw WL, Neal JE, Smith RH (2006) Testing a process-based fine fuel moisture model in two forest types. *Canadian Journal of Forest Research*, 37(1), 23-35. doi: 10.1139/x06-207

- Matthews S, Gould J, McCaw L (2010) Simple models for predicting dead fuel moisture in eucalyptus forests. *International Journal of Wildland Fire* 19, 459–467. doi:10.1071/WF09005
- Matthews S (2010) Effect of drying temperature on fuel moisture content measurements. *International Journal of Wildland Fire* 19, 800–802. doi: 10.1071/WF08188
- Matthews S (2013) Dead fuel moisture research: 1991-2012. *International Journal of Wildland Fire*, In Press
- Midilli A, Kucuk H, Yapar Z (2002) A new model for single-layer drying. *Drying Technology* 20, 1503–1513. doi: 10.1081/DRT-120005864
- Nelson RM (1969) Some factors affecting the moisture timelags of woody materials. USDA Forest Service, Southeastern Forest Experiment Station, Research Paper SE-44. (Asheville, NC)
- Nelson RM (1984) A method for describing equilibrium moisture content of forest fuels. *Canadian Journal of Forest Research* 14, 597-600. doi:10.1139/X84-108
- Nelson RM (2000) Prediction of diurnal change in 10-h fuel stick moisture content. *Canadian Journal of Forest Research* 30, 1071–1087. doi:10.1139/X00-032
- Nelson RM (2001) Water relations of forest fuels. In 'Forest Fires: Behavior and Ecological Effects', pp. 79–149. (Academic Press: San Diego, CA)
- Nelson RM, Hiers JK (2008) The influence of fuelbed properties on moisture drying rates and timelags of longleaf pine litter. *Canadian Journal of Forest Research* 38, 2394–2404. doi:10.1139/X08-078
- Nieto H, Aguado I, Chuvieco E, Sandholt I (2010) Dead fuel moisture estimation with MSG–SEVIRI data. Retrieval of meteorological data for the calculation of the equilibrium moisture content. *Agricultural and Forest Meteorology*, 150(7), 861-870. doi: 10.1016/j.agrformet.2010.02.007
- Norum RA, Miller M (1984) Measuring fuel moisture content in Alaska: standard methods and procedures. Gen. Tech. Rep. PNW-171. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Northwest Forest and Range Experiment Station.



- Núñez-Regueira L, Añón JA, Castiñeiras JP (1996) Calorific values and flammability of forest species in Galicia. Coastal and hillside zones. *Bioresource Technology*, 57(3), 283-289. doi: 10.1016/S0960-8524(96)00083-1,
- Ormeno E, Cespedes B, Sanchez IA, Velasco-García A, Moreno JM, Fernandez, C, Baldy V (2009) The relationship between terpenes and flammability of leaf litter. *Forest Ecology and Management*, 257(2), 471-482. doi: 10.1016/j.foreco.2008.09.019
- Page GE (1949) Factors influencing the maximum rate of air drying shelled corn in thin-layers. M.S.Thesis, Purdue University, West Lafayette, Indiana.
- Pfost HB, Maurer SG, Chung DS, Milliken GA (1976) Summarizing and Reporting Equilibrium Moisture Data for Grains, ASAE Paper No 76-3520
- Phanphanich M, Mani S (2010) Drying characteristics of pine forest residues. *Bioresources* 5(1), 108-120
- Pita LP, Viegas DX, Davim D, Henriques S (2010) A Laboratory Study to Evaluate Fuelbreaks Effectiveness. In 'Proceedings of the VI International Conference on Forest Fire Research', 15-18 November 2010, Coimbra, Portugal. Ed. DX Viegas
- Pollet J, Brown A (2007) Fuel Moisture Sampling Guide, Bureau of Land Management Utah State Office
- Pook EW, Gill AM (1993) Variation of live and dead fine fuel moisture in *Pinus radiata* plantations of the Australian Capital Territory. *International Journal of Wildland Fire* 3(3): 155-168. doi:10.1071/WF9930155
- Reeb JE (1995) Wood and Moisture Relationships, Oregon State University Extension Service, EM 8600, June.
- Ribeiro LM (2011) Combustíveis Florestais. Capítulo do Livro "Incêndios Florestais" coordenado por Domingos Xavier Viegas. Verlag Dashöfer
- Rice C (1989) Live fuel moisture sampling methods for Chiricahua National Monument, Cooperative national park resources studies unit, School of renewable natural resources, University of Arizona
- Rothermel RC (1972) A mathematical model for predicting fire spread in wildland fuels. USDA Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station, Research Paper INT-115. (Ogden, UT)

- Rothermel RC, Wilson RA, Morris GA, Sackett SS (1986) Modeling moisture content of fine dead wildland fuels: input to the BEHAVE fire prediction system. US Department of Agriculture, Forest Service, Intermountain Research Station.
- Ruiz González AD, Maseda CM, Lourido C (2002) Possibilities of dead fine fuels moisture prediction in *Pinus pinaster* Ait. stands at “Cordal de Ferreiros” (Lugo, north-western of Spain). In *Proc. of IV International Conference on Forest Fire Research & Wildland Fire Safety Summit*.
- Ruiz AD (2005) La predicción de la humedad en los restos forestales combustibles; aplicación a masas arboladas en Galicia. PhD thesis, Universidad Politécnica de Madrid.
- Ruiz González AD, Vega Hidalgo JA (2006) Moisture content of dead fuels in *Pinus radiata* and *Pinus pinaster* stands; intrinsic factors of variation. En: Viegas D.X. (ed). *V International Conference on Forest Fire Research*, Figueira da Foz, Portugal, 27-30 Novembro.
- Ruiz González AD, Vega Hidalgo JA, Álvarez González JG (2009) Construction of empirical models for predicting *Pinus sp.* dead fine fuel moisture in NW Spain. I. Response to changes in temperature and relative humidity. *International Journal of Wildland Fire* 18, 71–83. doi:10.1071/WF07101
- Ruiz González AD, Vega Hidalgo JA, Álvarez González JG (2010). Modelización de la variabilidad horaria de los contenidos de humedad en hojarasca de *Eucalyptus globulus*. *Forest Systems*, 18(3), 247-263.
- Schunk C, Leutner C, Leuchner M, Wastl C, Menzel A (2013) Equilibrium moisture content of dead fine fuels of selected central European tree species. *International Journal of Wildland Fire*. doi: 10.1071/WF12105.
- Sharaf-Eldeen YI, Blaisdell JL, Hamdy, MY (1980) A model for ear corn drying. *Transaction of the ASAE*. 23:1261–1271.
- Sharples JJ, McRae RHD (2011) Evaluation of a very simple model for predicting the moisture content of eucalypt litter. *International Journal of Wildland Fire* 20(8) 1000-1005 doi:10.1071/WF11006
- Simard AJ (1968a) The moisture content of forest fuels – I: A Review of the Basic Concepts. Canadian Department of Forest and Rural Development, Forest Fire Research Institute, Information Report. FF-X-14, Ottawa, Ontario.

- Simard AJ (1968b) The moisture content of forest fuels – II: Comparison of moisture content variations above the fibre saturation point between a number of fuel types. Canadian Department of Forest and Rural Development, Forest Fire Research Institute, Information Report. FF-X-15, Ottawa, Ontario.
- Simard AJ (1968c) The moisture content of forest fuels – III: Moisture content variations of fast responding fuels below the fibre saturation point. Canadian Department of Forest and Rural Development, Forest Fire Research Institute, Information Report. FF-X-16, Ottawa, Ontario.
- Slijepcevic A, Anderson W (2006) Hourly variation in fine fuel moisture in eucalypt forests in Tasmania. *Forest Ecology and Management* 234(Suppl. 1), S36, doi:10.1016/J.FORECO.2006,08.052
- Thompson TL, Peart RM; Foster GH (1968) Mathematical simulation of corn drying – A new model. *Transactions of the ASAE*, 1(4), 582–586
- Trindade CJ, Viegas DX (2002) Combustibility of Eucalyptus bark chips. In ‘Proceedings of the IV Forest Fire Research & Wildland Fire Safety’, 18–23 November 2002, Luso – Coimbra, Portugal. Ed. DX Viegas,
- Van Wagner CE (1969) Drying rates of some fine forest fuels. *Fire Control Notes* 12.
- Van Wagner CE (1972) Equilibrium moisture contents of some fine forest fuels in eastern Canada. Information Report PS-X-36, Canadian Forestry Service, Petawawa Forest Experimental Station, Chalk River, Ontario.
- Van Wagner CE (1974) Structure of the Canadian Forest Fire Weather Index. Publication 1333. Canadian Forestry Service, Petawawa Forest Experimental Station, Chalk River, Ontario.
- Van Wagner CE, Pickett TL (1975) Equations and fortran IV program for the 1976 metric version of the Forest Fire Weather Index. Information Report PS-X-58. Canadian Forestry Service, Petawawa Forest Experimental Station, Chalk River, Ontario.
- Van Wagner CE (1977) A method of computing fine fuel moisture content throughout the diurnal cycle. Information Report PS-X-69. Canadian Forestry Service, Petawawa Forest Experimental Station, Chalk River, Ontario.

- Van Wagner CE (1979) A laboratory study of weather effects on the drying rate of jack pine litter. *Canadian Journal of Forest Research* 9,267–275. doi:10.1139/X79-044
- Van Wagner CE (1982) Initial moisture content and the exponential drying process. *Canadian Journal of Forest Research* 12(1). doi:10.1139/X82-013
- Van Wagner CE, Pickett TL (1985) Equations and FORTRAN program for the Canadian Forest Fire Weather Index System. Forestry Technical Report 33. Canadian Forestry Service, Petawawa Forest Experimental Station, Chalk River, Ontario.
- Van Wagner CE (1987) Development and Structure of the Canadian Forest Fire Weather Index System. Canadian Forestry Service, Forestry Technical Report 35, Ottawa
- Viegas DX, Viegas MT, Ferreira AD (1992) Moisture content of fine forest fuels and fire occurrence in central Portugal. *International Journal of Wildland Fire* 2: 69–86, doi:10.1071/WF9920069
- Viegas DX, Viegas MT (1994) A relationship between rainfall and burned area for Portugal. *International Journal of Wildland Fire*, 4(1), 11-16. doi:10.1071/WF9940011
- Viegas DX, Viegas MT (1997) Fine fuel and flammability determination. Report on Laboratory Experiments, Annex to ADAI Final Report of Minerve II Project, Coimbra.
- Viegas DX, Ribeiro PR, Cruz MG (1998) Characterization of the Combustibility of Forest Fuels. In 'Proceedings of the III International Conference on Forest Fire Research, 16–20 November 1998, Coimbra, Portugal. Ed. DX Viegas,
- Viegas DX, Pinol J, Viegas MT, Ogaya R (2001) Estimating live fine fuels moisture content using meteorologically-based indices. *International Journal of Wildland Fire* 10, 223–240. doi:10.1071/WF01022
- Viegas DX, Viegas MT, Ribeiro LM, Cruz MG (2002) A pilot study of herbaceous fuels in Central Portugal. In 'Proceedings of the IV International Conference on Forest Fire Research & Wildland Fire Safety', 18–23 November 2002, Luso – Coimbra, Portugal. Ed. DX Viegas,

- Viney NR, Hatton TJ (1990) Modelling the effect of condensation on the moisture content of forest litter. *Agricultural and forest meteorology*, 51(1), 51-62. doi: 10.1016/0168-1923(90)90041-4
- Viney NR, Catchpole EA (1991) Estimating fuel moisture response times from field observations. *International Journal of Wildland Fire* 1,211–214. doi:10.1071/WF9910211
- Viney NR (1991) A review of fine fuel moisture modelling. *International Journal of Wildland Fire* 1, 215–234. doi:10.1071/WF9910215
- Weise DR (2007) Determination of equilibrium moisture content for several fine fuels in Hawaii, USDA Forest Service, Riverside, CA, Seventh Symposium on Fire and Forest Meteorology
- Xanthopoulos G, Caballero D, Galante M, Alexandrian D, Rigolot E, Marzano R (2006) Forest fuels management in Europe. In *Fuels Management-How to Measure Success: Conference Proceedings*. USDA Forest Service, Portland, OR.
- Yebra M, Chuvieco E, Riaño D (2008) Estimation of live fuel moisture content from MODIS images for fire risk assessment. *Agricultural and Forest Meteorology*, 148(4), 523-536. doi: 10.1016/j.agrformet.2007.12.005
- Zahn S, Henson C (2011) A Synthesis of Fuel Moisture Collection Methods and Equipment - A Desk Guide, USDA Forest Service.
- Zuritz C, Singh RP, Moini SM, Henderson SM (1979) Desorption isotherms of rough rice from 10°C to 40°C Trans. ASAE. 22: 433-440

