

Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro

## **SECAGEM DE MADEIRAS ARQUEOLÓGICAS:**

ANÁLISE DOS COMPORTAMENTOS FÍSICOS E APLICAÇÃO DO MODELO DE  
SECAGEM BINÁRIO

Tese de Doutoramento em  
Quaternário, Materiais e Culturas

CLÁUDIO INÁCIO MONTEIRO

Prof. Doutor José Luís Louzada  
Prof. Doutor João Paulo Pereira de Freitas  
Coroado



Vila Real, 2015



Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro

**SECAGEM DE MADEIRAS ARQUEOLÓGICAS:**

ANÁLISE DOS COMPORTAMENTOS FÍSICOS E APLICAÇÃO DO MODELO DE  
SECAGEM BINÁRIO

Tese de Doutoramento em

Quaternário, Materiais e Culturas

CLÁUDIO INÁCIO MONTEIRO

Prof. Doutor José Luís Louzada

Prof. Doutor João Paulo Pereira de Freitas

Coroado

Composição do júri:

---

---

---

---

**Vila Real, 2015**





Este trabalho foi expressamente elaborado com vista à obtenção do grau de Doutor em Quaternário, Materiais e Culturas, sob o domínio científico da Conservação de Madeiras Arqueológicas Provenientes de Meio Húmido de acordo com o disposto no Decreto-Lei 216/92, de 13 de Outubro.



À minha esposa e filha

DEDICO



## **Agradecimentos**

A dissertação de doutoramento que agora apresentamos foi concebida sob a influência de dois fatores: a falta de metodologias eficientes e económicas no tratamento de madeiras arqueológicas de grande porte provenientes de meios subaquáticos e o fator determinante de o realizar num tempo muito curto, quase impossível, tendo em conta que os tratamentos de laboratório realizados necessitam, normalmente, de muito tempo para produzirem resultados.

Este trabalho iniciou-se em meados de 2010, tendo-se esboçado o tema de tese que viria a ser apresentada à Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, orientada pelo Professor Doutor João Coroado, docente do Instituto Politécnico de Tomar e pelo Professor Doutor José Luís Louzada, docente da Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro.

Foi no ímpeto de encontrar novas soluções para o tratamento de conservação de objetos arqueológicos subaquáticos lenhosos que orientamos a nossa pesquisa, despendendo a maior parte do tempo em aplicações laboratoriais, no sentido de encontrar modelos metodológicos de tratamentos mais sustentáveis e ecológicos.

A opção de conservação que aqui apresentamos foi o resultado de quatro longos anos de investigação, onde a interajuda, o apoio incondicional, a orientação e sabedoria de algumas pessoas e instituições foram fundamentais.

Só desta forma foi possível contornar algumas das dificuldades inerentes à falta de equipamentos e apoio financeiro, que sendo condições fundamentais ao desenvolvimento da investigação, muito limitaram o trabalho.

Deste modo começo por agradecer aos meus orientadores, ao Professor Doutor João Coroado pela sua disponibilidade, boa disposição e orientação preciosa e ao Professor Doutor José Louzada pelo apoio imprescindível à realização da minha tese e mão sempre pronta para acudir atenciosamente às minhas necessidades.

Quero também agradecer aos Engenheiros Pedro Neves, técnico do Laboratório de Engenharia Eletrónica do Instituto Politécnico de Tomar e Pedro Granchinho, docente da Unidade Departamental de Engenharias do Instituto Politécnico de Tomar, pela ajuda na construção dos equipamentos do laboratório, fundamentais para a realização da pesquisa. À

Engenheira Isabel Silva, técnica do Laboratório de Química e Ambiente do Instituto Politécnico de Tomar, pela extrema simpatia e incansável disponibilidade para a realização das análises químicas. À Doutora Cecília Batista, docente da Unidade Departamental de Engenharia do Instituto Politécnico de Tomar, pela troca de conhecimentos e ideias, e à Unidade de Microscopia Eletrónica da Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, pelo apoio e realização das análises de SEM.

Os alicerces deste trabalho centram-se nos resultados das análises e aplicações laboratoriais, sendo de destacar que só foram possíveis pelos meios logísticos e técnicos colocados ao nosso dispor. Neste sentido, não posso deixar de mencionar o apoio do Instituto Politécnico de Tomar, bem como a Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, cabendo também a esta última um agradecimento pela receção do tema que nos propusemos a tratar e ao auxílio no desenvolvimento da investigação, que agora remeto à sua aprovação, nesta tese.

Um último apontamento vai para todos os amigos e colegas que me acompanharam durante esta jornada, pelo seu carinho e amizade e um obrigado muito especial à minha mulher e filha pelo contínuo apoio e compreensão. A todos o meu bem-haja pelo apoio e palavras entusiasmantes, que nunca me deixaram desanimar com tal árdua tarefa.

## Resumo

A presente tese tem como objetivo desenvolver o estudo sobre o comportamento físico de madeiras arqueológicas alagadas durante o seu processo de secagem.

O trabalho foi realizado através do ensaio de diversos provetes de madeira, provenientes de vários sítios arqueológicos subaquáticos e húmidos (Ria de Aveiro A, Ria de Aveiro F, Museu da Levada e Troia I). Os exemplares não possuíam qualquer tipo de tratamento de conservação e foram seleccionados segundo as características que melhor se enquadravam para os fins propostos, tendo-se optado por objetos com diferentes atributos no que diz respeito à espécie, tamanho, teor de humidade e estado de conservação do lenho.

As taxas de teor de humidade dos provetes variam entre 98% e 684% (cálculo realizado sobre a base seca), compreendendo uma grande **variedade de estados de deterioração**.

Os provetes foram divididos em três grupos e desidratados em diferentes ambientes, segundo os parâmetros de temperatura e humidade relativa, por forma a permitir a monitorização do processo e as reações associadas, nomeadamente de natureza dimensional, decorrente da imposição de novas condições higrotérmicas. Assim o primeiro grupo foi seco ao ar, de forma natural e sem tratamento; o segundo grupo foi seco em estufa climática equipada com sistema de secagem por infravermelhos num sistema experimental a que designamos de **Secagem Binária**; e o terceiro grupo foi seco na estufa climática com um programa de secagem baseado no aumento gradual da temperatura e com uma elevada humidade relativa.

Foram também realizados testes específicos, nomeadamente a secagem de uma madeira por diferencial de pressão, com a finalidade de despistar o comportamento da lenhina.

Por fim foi testado o método de secagem binária em objetos arqueológicos de madeira, provenientes do sítio arqueológico do Museu da Levada, combinando a consolidação com a Sacarose e a desidratação em estufa, segundo o novo modelo de secagem.

Neste sentido as investigações permitiram:

- Verificar que a lenhina tem um papel fundamental na deformação das madeiras durante a secagem, uma vez que as suas características físicas e químicas estão

relacionadas com o colapso da estrutura da madeira, evidente, especialmente, no ensaio experimental realizado através da secagem por diferencial de pressão;

- A secagem binária apresenta melhores resultados no que concerne à deformação anisotrópica das madeiras, revelando a capacidade de anular os empenos e as deformações das madeiras relacionadas com as tensões criadas pelas variações do teor de humidade dos tecidos lenhosos;
- A secagem binária revelou ser um tratamento eficaz na secagem de madeiras arqueológicas bem preservadas, nomeadamente em madeiras de nível 1 e 2 da escala de TRP, podendo ser também uma opção válida, quando combinada com um consolidante como a Sacarose, tendo apresentado excelentes resultados nesta matéria.

Neste sentido, **o modelo de secagem binário** mostrou-se eficiente na redução dos impactos das tensões criadas durante a secagem, podendo ser implementado na secagem de vestígios arqueológicos húmidos, em madeiras densas e bem preservadas, sem qualquer outra adição de consolidantes, **sendo até ao momento, o método mais sustentável e ecológico no tratamento destes materiais**. No que diz respeito aos materiais lenhosos com níveis de humidade muito elevados e mal preservados, os resultados não se apresentam totalmente conclusivos. No entanto, apontam para que possa ser combinada com consolidantes adequados como a Sacarose, ou eventualmente, no futuro, com outro tipo de materiais compatíveis.

**Palavra-Chave:** conservação; secagem de madeiras; arqueologia subaquática; degradação da madeira; metodologias de conservação; física-química da madeira; secagem binária; secagem em estufa



## **Abstract**

This dissertation aims to develop the study of the physical and chemical behavior of waterlogged archaeological woods during its drying process.

The work was performed by testing different samples of wood from archaeological intervened sites (Ria de Aveiro, Aveiro Ria F, Museu da Levada and Troia I), with samples that we think that have the conditions for being analyzed to the expected end, being chosen objects with different characteristics of species, size and condition.

The exchange moisture content of the samples varies between 98% and 684% comprising a range of levels of deterioration.

The samples were divided into three groups of different environments and dried according to the parameters of temperature and relative humidity so as to allow monitoring of the process and related reactions, namely dimensional nature, resulting from the imposition of new hygrothermal conditions. Thus, the first group was air dried in a natural way and no treatment, the second group was oven dried climate system equipped with infrared drying in an experimental system which we call the binary drying and the third group was oven dried climate with a drying program, based on a gradual increase of temperature and high relative humidity.

Special tests were also conducted in order to screen the behavior of lignin through a drying pressure differential of 1 bar.

Finally a treatment has been tested in actual wood objects, combining consolidation with sucrose supplemented with a model of binary drying.

This study allowed:

- Checking that lignin has a key role in the destruction of the wood during drying, since their degradation is related to the breakdown of the wood structure, clear, especially in the samples dried in the drying binary model;
- Drying binary performs better with respect to the anisotropic deformation of the woods;

- The binary drying proved to be a valid option either in conservation and drying of waterlogged archaeological wood well preserved, or when combined with a consolidants such as sucrose, presenting excellent results in this area.

In this sense, the model torque drying proved to be effective in reducing the impacts of the stresses created during drying and may be implemented in the drying of wet archaeological remains, in dense and well preserved woods, without any consolidants of addiction, and to the currently the most sustainable and environmentally friendly method for treating these materials. With respect to the timber and with very high levels of humidity poorly preserved materials, the results have not fully conclusive. However, pointed out that can be combined with suitable consolidants as sucrose or, eventually, in the future with other compatible materials.

**Keyword:** conservation; drying wood; underwater archeology; degradation of wood; conservation techniques; physical-chemical wood; binary drying, kiln drying

# Índice

|                                                                  |            |
|------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>Agradecimentos .....</b>                                      | <b>i</b>   |
| <b>Resumo .....</b>                                              | <b>iii</b> |
| <b>Abstract .....</b>                                            | <b>v</b>   |
| <b>1. Introdução .....</b>                                       | <b>1</b>   |
| <b>2. Estado da técnica .....</b>                                | <b>5</b>   |
| <b>3. Anatomia, química e física da madeira.....</b>             | <b>11</b>  |
| 3.1 CONSTITUIÇÃO ANATÓMICA DA MADEIRA .....                      | 11         |
| 3.1.1 CONÍFERAS (GIMNOSPERMAS) .....                             | 15         |
| 3.1.2 FOLHOSAS (ANGIOSPERMAS) .....                              | 18         |
| 3.2. DEFEITOS NATURAIS .....                                     | 20         |
| 3.2.1 ANOMALIAS DO FIO DA MADEIRA .....                          | 21         |
| 3.2.2 Os Nós.....                                                | 23         |
| 3.2.3 FENDAS .....                                               | 24         |
| 3.2.4 BOLSAS DE RESINA.....                                      | 25         |
| 3.2.5 ANÉIS DE GELO.....                                         | 25         |
| 3.2.6 LENHOS DE COMPRESSÃO E TRAÇÃO.....                         | 26         |
| 3.3 ARRANJO DO TECIDO LENHOSO.....                               | 28         |
| 3.4 TILOSES .....                                                | 36         |
| 3.5 ULTRA-ESTRUTURA DA PAREDE CELULAR .....                      | 38         |
| 3.6 CONSTITUIÇÃO QUÍMICA DA MADEIRA .....                        | 40         |
| <b>4. Processos de degradação em meios saturados .....</b>       | <b>43</b>  |
| 4.1 A RELAÇÃO DO MEIO AMBIENTE COM A DEGRADAÇÃO DA MADEIRA ..... | 43         |
| 4.2 DEGRADAÇÃO DA CELULOSE.....                                  | 46         |
| 4.3 DEGRADAÇÃO DAS HEMICELULOSES .....                           | 46         |
| 4.4 DEGRADAÇÃO DA LENHINA.....                                   | 47         |
| 4.5 BIODEGRADAÇÃO .....                                          | 47         |
| 4.5.1 BACTÉRIAS .....                                            | 47         |
| 4.5.1.1 <i>Bactéria Erosiva</i> .....                            | 49         |
| 4.5.1.2 <i>Bactéria Tuneladora</i> .....                         | 50         |
| 4.5.1.3 <i>Bactéria Cavitadora</i> .....                         | 51         |
| 4.5.1.4 <i>Bactéria Escavadora</i> .....                         | 51         |
| 4.5.2 MICROALGAS .....                                           | 52         |

|                                                                                                         |           |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 4.5.3 FUNGOS .....                                                                                      | 53        |
| 4.5.3.1 Podridão Mole .....                                                                             | 54        |
| 4.5.3.2 Podridão Branca .....                                                                           | 55        |
| 4.5.3.3 Podridão Parda .....                                                                            | 56        |
| 4.5.4 MOLUSCOS .....                                                                                    | 57        |
| 4.5.5 CRUSTÁCEOS .....                                                                                  | 58        |
| 4.6 DEGRADAÇÃO FÍSICA.....                                                                              | 59        |
| 4.7 DEGRADAÇÃO QUÍMICA.....                                                                             | 60        |
| <b>5. Processos de conservação de madeiras arqueológicas saturadas.....</b>                             | <b>61</b> |
| 5.1 MÉTODO DE POLIETILENOGLICOL SIMPLES (PEG).....                                                      | 61        |
| 5.2 PROCESSO MISTO DE PEG + LIOFILIZAÇÃO .....                                                          | 64        |
| 5.3 MÉTODO DE SECAGEM COM DIÓXIDO DE CARBONO ( <b>CO<sub>2</sub></b> ) SUPERCRÍTICO .....               | 66        |
| 5.4 MÉTODO DE CONSOLIDAÇÃO COM ÓLEO DE SILICONE .....                                                   | 68        |
| 5.5 MÉTODO DA ACETONA/COLOFÓNIA .....                                                                   | 68        |
| 5.6 MÉTODO DA SACAROSE.....                                                                             | 70        |
| 5.7 MÉTODO ÁLCOOL/CÂNFORA .....                                                                         | 71        |
| 5.8 OUTROS TRATAMENTOS .....                                                                            | 72        |
| <b>6. A relação da água com a madeira .....</b>                                                         | <b>73</b> |
| 6.1 DIVISÃO DA ÁGUA NA MADEIRA .....                                                                    | 73        |
| 6.2 FORÇAS CAPILARES E TENSÃO CAPILAR .....                                                             | 75        |
| 6.3 FLUXO E PERMEABILIDADE.....                                                                         | 76        |
| 6.4 PROCESSO DE DIFUSÃO DA ÁGUA ABAIXO DO PSF.....                                                      | 79        |
| 6.5 HUMIDADE DE EQUILÍBRIO .....                                                                        | 82        |
| 6.6 TEOR DE HUMIDADE .....                                                                              | 82        |
| 6.7 CONDICIONANTES ENVOLVIDAS NO PROCESSO DE SECAGEM .....                                              | 85        |
| 6.8 A TEMPERATURA .....                                                                                 | 86        |
| 6.9 A HUMIDADE RELATIVA DO AR.....                                                                      | 89        |
| 6.10 VELOCIDADE DO AR .....                                                                             | 90        |
| 6.11 HUMIDADE NA MADEIRA DURANTE O PROCESSO DE SECAGEM .....                                            | 91        |
| <b>7. Estudo das causas de deformação durante a secagem das madeiras arqueológicas degradadas .....</b> | <b>93</b> |
| 7.1 BREVE DESCRIÇÃO DOS LOCAIS DE ORIGEM DAS MADEIRAS ANALISADAS .....                                  | 94        |
| 7.1.1 RIA DE AVEIRO A .....                                                                             | 94        |

|                                                                                                                                         |            |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 7.1.2 RIA DE AVEIRO F.....                                                                                                              | 95         |
| 7.1.3 MUSEU DA LEVADA .....                                                                                                             | 96         |
| 7.1.4 TROIA I.....                                                                                                                      | 97         |
| 7.2 INFLUÊNCIA DOS NÍVEIS DE DEGRADAÇÃO DO TECIDO LENHOSO NA SECAGEM DAS MADEIRAS - ENSAIOS EM LABORATÓRIO ....                         | 98         |
| 7.2.1 METODOLOGIA .....                                                                                                                 | 98         |
| 7.2.2 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....                                                                                                       | 105        |
| 7.3 COLAPSO DAS CÉLULAS: DINÂMICA DA SECAGEM DAS CÉLULAS DA MADEIRA.....                                                                | 113        |
| <b>8. Processo experimental: ensaios de programas de secagem.....</b>                                                                   | <b>119</b> |
| 8.1 SECAGEM BINÁRIA: DEFINIÇÃO E PLANO TEÓRICO DO PROCESSO .....                                                                        | 119        |
| 8.2 METODOLOGIA .....                                                                                                                   | 127        |
| 8.3 EQUIPAMENTOS E INSTRUMENTOS UTILIZADOS .....                                                                                        | 129        |
| 8.4 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....                                                                                                        | 131        |
| <b>9. Secagem por aumento gradual da temperatura em ambiente de elevada humidade do ar: Definição e modelo teórico do processo.....</b> | <b>137</b> |
| 9.1 METODOLOGIA .....                                                                                                                   | 138        |
| 9.2 EQUIPAMENTOS E INSTRUMENTOS UTILIZADOS .....                                                                                        | 139        |
| 9.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....                                                                                                        | 140        |
| <b>10. Aplicação da secagem binária na conservação de dois fragmentos de madeira arqueológicos. ....</b>                                | <b>145</b> |
| 10.1 METODOLOGIA .....                                                                                                                  | 148        |
| 10.2 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....                                                                                                        | 152        |
| <b>11. Considerações finais .....</b>                                                                                                   | <b>157</b> |
| <b>Referências Bibliográficas .....</b>                                                                                                 | <b>161</b> |

## Índice de imagens

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Imagem 1 Modelo geral de constituição do tronco das Folhosas (Angiospermas) e resinosas (Gimnospermas) (adaptado de Fengel & Wengener, (1989). ....                                                                                                                                                                                                                   | 12 |
| Imagem 2 Esquema geral pormenorizado do tronco de uma Conífera (Pinho vermelho) e de uma Folhosa (Carvalho vermelho) (adaptado de Hoadley, 1997).....                                                                                                                                                                                                                 | 15 |
| Imagem 3 Aspeto microscópico de uma Gimnosperma (adaptado de Panshin & Zeeuw, 1980, p. 128). ....                                                                                                                                                                                                                                                                     | 17 |
| Imagem 4 Aspeto microscópico de uma Angiosperma (Panshin & Zeeuw, 1980, p. 162)....                                                                                                                                                                                                                                                                                   | 19 |
| Imagem 5 Fio entrelaçado (Hoadley, 1998).....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | 22 |
| Imagem 6 Veio em espiral (Hoadley, 1998).....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | 22 |
| Imagem 7 Fio helicoidal provocado pela junção de dois veios espiralados (Hoadley, 1998). ....                                                                                                                                                                                                                                                                         | 22 |
| Imagem 8 Fio ondulado (Hoadley, 1998).....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | 22 |
| Imagem 9 Dois nós apiciformes confluindo na medula do tronco. ....                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | 23 |
| Imagem 10 Fotografia de um nó a destacar-se da madeira, originando um buraco de nó...24                                                                                                                                                                                                                                                                               |    |
| Imagem 11 Fotografia da superfície de uma madeira com fendas causadas pelas reações físicas de compressão.....                                                                                                                                                                                                                                                        | 24 |
| Imagem 12 Bolsa de resina de uma resinosa.....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | 25 |
| Imagem 13 À esquerda vista transversal do <i>Pinus Banksiana</i> e à direita o corte transversal <i>Fraxinus Americana</i> L. onde se podem observar identificados, os anéis de gelo, sobressaindo no primeiro caso, como uma alteração anelar e no segundo caso, como um terceiro anel entre o lenho tardio e o lenho inicial. (Panshin & Zeeuw, 1980, p. 322). .... | 26 |
| Imagem 14 Aspeto das células de compressão do Abeto ( <i>Picea Abies</i> ) onde observamos as cavidades helicoidais na parede secundária (Fengel & Wengener, 1989).....                                                                                                                                                                                               | 27 |
| Imagem 15 Aspeto das células de tensão do Choupo ( <i>Populus Spec.</i> ), onde se observa a camada gelatinosa GL no interior das células e que se destaca da parede celular (Fengel & Wengener, 1989).....                                                                                                                                                           | 28 |
| Imagem 16 Fotografia microscópica dos traqueídos com pontuações aureoladas da <i>Abies Alba</i> Mil (Casquinha). ....                                                                                                                                                                                                                                                 | 29 |
| Imagem 17 À esquerda os elementos típicos das Coníferas A- Traqueídos B- Parênquima dos raios C- Traqueídos dos raios D- Parênquima epitelial e E- Canais resinosos. À direita os elementos típicos das Folhosas (Hoadley, 1997).....                                                                                                                                 | 31 |

|                                                                                                                                                                                                        |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Imagem 18 Fotografia microscópica de uma folhosa com porosidade difusa, podendo observar-se os vasos e a parênquima que rodeia os vasos conferindo a área de tom melado. ....                          | 32  |
| Imagem 19 Tipos de pontuações das células (Panshin & Zeeuw, 1980, p. 150). ....                                                                                                                        | 35  |
| Imagem 20 Foto de pontuações aureoladas de uma Conífera (Panshin & Zeeuw, 1980, p. 111). ....                                                                                                          | 36  |
| Imagem 21 Aspeto microscópico da tilose num vaso de madeira de Nogueira Americana – <i>Carya sp.</i> (Panshin & Zeeuw, 1980). ....                                                                     | 37  |
| Imagem 22 Aspeto microscópico da tilose num vaso de madeira de Carvalho Branco (Hoadley, 1997). ....                                                                                                   | 37  |
| Imagem 23 Esquema da construção da parede celular (Panshin & Zeeuw, 1980, p. 101). ....                                                                                                                | 39  |
| Imagem 24 Esquema ilustrativo do processo de impregnação com PEG simples. ....                                                                                                                         | 63  |
| Imagem 25 Diagrama de fases da água. A sublimação é realizada quando temperatura e pressão se situam na linha vermelha abaixo dos 0.0098°C e 0.006 atm. ....                                           | 65  |
| Imagem 26 Diagrama de fases do onde a secagem da madeira é realizada a temperatura superior a 31°C e pressão acima de 73 atm (Carrilho, et al., 2001). ....                                            | 67  |
| Imagem 27 Ilustração do processo de acetona/Colofónia ....                                                                                                                                             | 69  |
| Imagem 28 Esquema ilustrativo do processo de Sacarose. ....                                                                                                                                            | 71  |
| Imagem 29 Esquema ilustrativo do teste de resistência à penetração. ....                                                                                                                               | 103 |
| Imagem 30 Grupo dos provetes secos ao ar. ....                                                                                                                                                         | 109 |
| Imagem 31 Fendas superficiais derivadas da secagem do provete PM9. ....                                                                                                                                | 110 |
| Imagem 32 A) Ilustração da deformação do tipo 1 numa madeira do grupo das Gimnospermas. B) Imagem de SEM das células colapsadas e deformadas de uma <i>Gimnosperma</i> . ....                          | 111 |
| Imagem 33 A) Ilustração da deformação do tipo 2 numa madeira do grupo das Angiospermas. B) Imagem de SEM dos vasos espalmados e das células colapsadas de uma Angiosperma. ....                        | 111 |
| Imagem 34 A) Ilustração da deformação do tipo 3 numa madeira do grupo das Angiospermas. B) Imagem de SEM dos vasos espalmados e do colapso das células num padrão orientado pelas células radiais .... | 112 |
| Imagem 35 Esquema da câmara de secagem por diferencial de pressão. ....                                                                                                                                | 114 |
| Imagem 36 Esquema geral 3D de uma célula e madeira, onde se verifica a fragilização da parede secundária, diminuindo consideravelmente a sua resistência mecânica, culminando no colapso total. ....   | 116 |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Imagem 37 Imagem de microscopia eletrónica (amp. 500x) do provete húmido (A) e imagem do provete (amp. 500x) seco onde se verifica o colapso total das células menores e o achatamento dos vasos.....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | 116 |
| Imagem 38 Esquema representativo das forças presentes no interior da célula durante a secagem, a resistência ao colapso aumenta quanto menor for a degradação da parede secundária.....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | 117 |
| Imagem 39 Modelo da evolução da taxa de secagem e aumento da temperatura da madeira na fase de secagem absoluta. À medida que a temperatura da madeira aumenta da superfície para o interior, também a taxa de secagem vai aumentando. Neste sentido as regiões mais avermelhadas (mais quentes) do gráfico terão uma taxa de secagem superior às regiões mais alaranjadas (menos quentes).....                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | 120 |
| Imagem 40 Modelo 3D da evolução da taxa de secagem no interior da madeira durante a fase de secagem de equilíbrio. O diferencial de humidade aumenta do interior para o exterior proporcionalmente ao aumento da taxa de secagem. Enquanto houver um diferencial de temperatura dilatado o processo de equilíbrio é mais rápido, tendo tendência a diminuir à medida que a temperatura do provete se torna mais homogénea. Nessa altura quanto maior for o degradé da cor azul (mais escuro, maior teor de humidade) maior será a taxa de secagem, sendo que o teor de humidade da madeira é maior quanto mais próximo estiver o interior e menor quanto mais próximo estiver da superfície. .... | 122 |
| Imagem 41 Modelo do desenvolvimento do teor de humidade da madeira durante a secagem binária.....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | 122 |
| Imagem 42 Programa 1 - Modelo de secagem binário 1 elaborado para o provete PM28.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | 124 |
| Imagem 43 Gráfico geral do ambiente da estufa climática do programa 1 de secagem binária longo.....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 124 |
| Imagem 44 Pormenor do padrão obtido na estufa climática do programa 1 de secagem binária longo.....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 125 |
| Imagem 45 Programa 2 - Modelo da secagem binário elaborado para os provetes PM6, PM7, PM24, PM25, PM26. ....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 125 |
| Imagem 46 Gráfico geral do ambiente do ambiente da estufa climática do programa 2 de secagem binária curto .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 126 |
| Imagem 47 Pormenor do padrão do programa obtido na estufa climática do programa 2 de secagem binária. ....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | 126 |
| Imagem 48 Esquema de montagem da estufa climática.....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | 130 |
| Imagem 49 Imagem de microscopia eletrónica (amp. 50x) onde se verifica do lado esquerdo (A) o estado do tecido lenhoso do provete PM28, com os vasos abertos e do lado direito (B) o provete PM27, onde é visível o colapso de todas as células, inclusive o achatamento dos vasos.....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | 133 |



|                                                                                                                                                                                                                                                                                              |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Imagem 50 Grupo dos provetes submetidos ao programa de secagem binário.....                                                                                                                                                                                                                  | 135 |
| Imagem 51 Esquema da secagem por fluxo de massa no interior da célula.....                                                                                                                                                                                                                   | 138 |
| Imagem 52 Grupo dos provetes submetidos à secagem a temperaturas e humidades elevadas.....                                                                                                                                                                                                   | 143 |
| Imagem 53 Madeira ML-T 14 antes (em cima) e após o tratamento (em baixo) .....                                                                                                                                                                                                               | 154 |
| Imagem 54 (esquerda) Aspeto da madeira tratada com PEG à saturação onde se observa uma superfície enegrecida e pouco natural. (direita) Aspeto da madeira após o tratamento de Sacarose mais secagem binária, onde é notório o melhoramento da cor e do aspeto mais natural da madeira. .... | 155 |
| Imagem 55 Em cima a madeira ML-T 27 encharcada e em baixo após a secagem. ....                                                                                                                                                                                                               | 156 |

## Índice de tabelas

|                                                                                                                        |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tabela 1 Tabela de conversão do TRP para níveis de degradação.....                                                     | 103 |
| Tabela 2 - Teor de humidade total dos provetes testados e estados de conservação. ....                                 | 104 |
| Tabela 3 Inventário dos provetes utilizados.....                                                                       | 128 |
| Tabela 4 Diferencial de teores de humidade entre a saída da estufa e depois de estabilizarem ao ambiente natural. .... | 128 |
| Tabela 5 Tabela da taxa de contração dos provetes no sentido radial (R) e tangencial (T). ....                         | 129 |
| Tabela 6 Inventário dos provetes secos com temperatura crescente. ....                                                 | 139 |
| Tabela 7 Programa de secagem binária.....                                                                              | 150 |
| Tabela 8 Índice de contração das madeiras. ....                                                                        | 153 |



## **1. Introdução**

A conservação de madeiras arqueológicas provenientes de meios saturados em água é uma área de investigação muito recente comparativamente com as demais disciplinas da conservação do património.

Com o progresso dos mecanismos de mergulho e o seu aperfeiçoamento no âmbito da aplicação técnica da arqueologia subaquática foi possível estudar e garantir o resgate de património há muito perdido e encoberto pelas águas (Pomey, 1984, p. 9).

No que diz respeito às técnicas de conservação verificou-se, desde muito cedo, que este património possuía características singulares, bem como a necessidade de técnicas específicas para a sua preservação. Esta situação originou o desenvolvimento de investigação orientada especialmente para o património subaquático (Christensen, 1970a).

Quando foram descobertos em 1904, o barco túmulo de Oseberg, datado de 815 a 820, (Rosenqvist, 1959; Braovac, 2001; Braovac & Kutzke, 2012; Child, 2002; Christensen, et al., 2011) e mais tarde, em 1950, o navio de guerra Vasa de 1628 (Hafors, 1998; Sandstrom, et al., 2001a; Sandstrom, et al., 2001b; Baglioni & Poggi, 2006) a vontade de conservar e expor estes bens em museus promoveu o “desenvolvimento apressado” de técnicas que, naquele momento, permitissem preservar as madeiras num contexto seco. A falta de conhecimento dos mecanismos de degradação e dos comportamentos dos materiais foram os principais fatores que condicionaram as metodologias para a preservação do património subaquático, especialmente o de natureza orgânica (Sandstrom, et al., 2001a; Garner, et al., 2011; Braovac & Kutzke, 2012). O uso de metodologias e produtos aparentemente eficazes, mas ausentes de qualquer tipo de testes de qualidade prévios, veio a revelar-se ineficiente ao fim de alguns anos. As tentativas de salvaguarda e preservação deste património, para além de não terem sido eficazes, a maior parte das vezes aceleraram os mecanismos de degradação (Braovac & Kutzke, 2012; Hamilton, 2001).

Neste contexto, os tratamentos tem exigido uma maior atenção, uma vez que os resultados das investigações não têm garantido a eficiência necessária no tratamento de preservação nem o consenso nos métodos a aplicar. Entre as várias propostas de conservação destaca-

se a aplicação do Polietilenoglicol (PEG), que possui a capacidade de consolidar a madeira, mas contém uma série de efeitos colaterais que podem ditar o insucesso do tratamento, como o escurecimento dos objetos, o aumento da acidificação e a higroscopicidade. Porém ainda é a mais utilizada em conservação de materiais lenhosos provenientes de meios aquáticos.

Atualmente, grande parte dos projetos de investigação têm-se centrando no estudo do conhecimento e desenvolvimento de produtos (Koefoed, et al., 1998; Lorin & Lemetayer, 1998; Lan, 1998; Chaumat, et al., 2011) ou na formulação e aplicação de novos produtos de consolidação (Imazu & Morgos, 1998; Chaumat, et al., 1998; Strigazzi & Preuss, 1998; Pornou, et al., 1998; Chaumat, et al., 2001b; Teshirogi, et al., 2001; Smith, 2002; Lumia, et al., 2003; Cristensen, et al., 2012; Baglione, et al., 2011), relegando para segundo plano o estudo comportamental e os efeitos da secagem sobre a madeira arqueológica húmida, que é de fulcral importância no resultado final de qualquer intervenção orientada para a preservação em meio seco.

O grande objetivo deste trabalho centra-se em dar resposta a um dos problemas mais complexos da conservação das madeiras arqueológicas, que por inúmeras razões têm constituído uma lacuna técnica. A dificuldade de preservação, manuseamento e acondicionamento deste tipo de artefactos tem impossibilitado o seu estudo por parte da comunidade arqueológica, bem como, criado grandes obstáculos à musealização e exposição deste património.

Neste sentido a pesquisa desenvolveu-se em dois ramos, teórico e prático, sendo aqui a componente laboratorial de enorme importância para dar resposta aos objetivos desta tese. O trabalho laboratorial foi longo e demorado, sendo a pesquisa dividida em duas linhas distintas: O desenvolvimento e construção de equipamentos para a realização dos testes laboratoriais, nomeadamente a conceção da estufa climática, única do género, e indispensável para a investigação e a realização dos testes nos provetes de madeira oriundos de sítios arqueológicos subaquáticos, com o intuito de compreender os seus comportamentos e causas, bem como desenvolver uma metodologia que permita resolver a lacuna técnica relativamente à secagem das madeiras.

Assim, o presente trabalho estrutura-se em 11 capítulos onde se estabelece o contexto atual da técnica, bem como se aborda as questões técnicas que conduziram ao desenvolvimento desta investigação.

Deste modo, para além da presente introdução, aborda-se no segundo capítulo o estado da técnica, onde se enquadra a situação atual da conservação do património subaquático, com especial atenção para as madeiras.

No terceiro capítulo é confinado o conhecimento da madeira enquanto matéria-prima, compreendendo as suas características morfológicas a nível macroscópico e microscópico.

O quarto capítulo insere-se a temática relativa à degradação das madeiras em ambientes húmidos saturados, compreendendo os agentes químicos, físicos e biológicos.

As técnicas e metodologias atualmente disponíveis são abordadas no quinto capítulo, onde são descritas de forma a dar a conhecer de uma forma mais concreta as suas aplicações, bem como as suas vantagens e desvantagens no tratamento de madeiras alagadas.

O capítulo seis é reservado ao entendimento da relação da água com a madeira e aos mecanismos físico-químicos inerentes. Trata-se de um capítulo essencial para o fundamento teórico da metodologia desenvolvida nesta dissertação.

A partir deste capítulo desenvolve-se a descrição metodológica dos trabalhos laboratoriais, bem como a interpretação dos dados recolhidos. Neste sentido o capítulo sétimo diz respeito ao estudo e aos ensaios laboratoriais que permitiram identificar patologias, associar causas e compreender o funcionamento e a reação à secagem de diversas madeiras arqueológicas de diferentes espécies e com diferentes estados de conservação.

No capítulo oitavo, **ponto nuclear desta tese**, insere-se o tratamento dos dados recolhidos dos ensaios da secagem dos provetes com o novo método de secagem, sendo o nono capítulo complementar no sentido de estabelecer paralelos de comparação e aferir as reais capacidades do método de secagem binário.

Já o capítulo décimo centra-se na descrição do tratamento combinado, Sacarose + secagem binária, levado a cabo em dois fragmentos de madeira do sítio arqueológico do Museu da

Levada, bem como a análise científica dos dados recolhidos, reservando para o ultimo capítulo, o décimo primeiro, as conclusões do trabalho.

Relativamente aos objetivos da tese, foram praticamente conseguidos na íntegra, resultando no desenvolvimento de uma nova metodologia aplicável à conservação de madeiras arqueológicas alagadas difíceis de tratar, bem como resolve uma lacuna técnica existente, contribuindo significativamente para conservação do património subaquático.

## **2. Estado da técnica**

As primeiras abordagens relativas à conservação de madeiras encharcadas foram realizadas nos inícios do século XIX, aquando da descoberta de sítios arqueológicos de Bulverket, Karingsjon e Arly, situados em lagos e pântanos da Escandinávia (Lindahz, et al., 2006). Nessa altura percebeu-se que as técnicas e metodologias tradicionais não poderiam ser aplicadas nos artefactos exumados e que a falta de cuidados específicos resultaria na destruição total ou parcial desse património (Barbour, 1984; Lindahz, et al., 2006). Deste modo, a especialidade da conservação de madeiras alagadas começa a desenhar-se através do desenvolvimento de algumas soluções para evitar o colapso e a deformação das madeiras durante a secagem (Herbst, 1861; Christensen, 1970b). O processo que vigorou e se tornou prática comum foi o método de Alúmen de Potássio (um sulfato duplo de alumínio e potássio -  $KAl(SO_4)_2$  – normalmente dodecahidratado) e Óleo de Linhaça, desenvolvido pelo arqueólogo dinamarquês C. F. Herbst (Herbst, 1861; Lindahz, et al., 2006), que na época, pareceu ter as características necessárias à preservação das madeiras saturadas de água. Mais tarde, o conservador do Museu Nacional da Dinamarca, George Roseberg, desenvolveu o processo, acrescentando glicerol ( $C_3H_8O_3$ ) à solução (Lindahz, et al., 2006). Volvidos alguns anos, os materiais tratados com este processo desenvolveram graves patologias de degradação, resultando em alguns casos, na destruição extrema, nomeadamente, a pulverização da madeira das estruturas conservadas (Smith, 2005; Lindahz, et al., 2006; Braovac & Kutzke, 2012).

Atualmente, este processo não só foi completamente posto de parte, como apresenta um enorme desafio aos conservadores para preservar os artefactos tratados na altura (Lindahz, et al., 2006; Braovac & Kutzke, 2012; Christensen, et al., 2011). Um dos casos mais dramáticos é o espólio do barco túmulo Viking de Oseberg (Rosenqvist, 1959; Lindahz, et al., 2006), onde decorre um enorme projeto de investigação na tentativa de evitar a perda deste tesouro histórico. Segundo Ellen Semb (2012), numa notícia no *síte* do Museu de História Cultural da Noruega consultado em Setembro de 2012, a extrema acidez provocada pelos tratamentos empreendidos na conservação e manutenção das madeiras culminou na

degradação acelerada e devastadora, até ao momento sem solução (Braovac & Kutzke, 2012).

Em meados do século XX, a descoberta do navio de guerra sueco Vasa datado de 1628, pelo arqueólogo amador Anders Franzén e o seu projeto de conservação, permitiu pela primeira vez, a aplicação de um novo material conhecido como Polietilenoglicol (PEG -  $C_{2n}H_{4n+2}O_{n+1}$ ) (Hafors, 1998; Sandstrom, et al., 2001b; Garner, et al., 2011), que conduziu a uma nova era na evolução da conservação de madeiras húmidas. Rapidamente tornou-se o processo mais usado até aos dias de hoje (Brown, 1991; Watson, 1996; Hiron, et al., 1998; Hafors, 1998; Morel-Deledalle, 1998; Koefoed, et al., 1998; Lan, 1998; Hamilton, 1999; Hoffmann, 2001; Saerterhaug & Turner-Walker, 2001; Chaumat, et al., 2001a; Chaumat, et al., 2001b; Teshirogi, et al., 2001; Chaumat, et al., 2011; Giachi, et al., 2011). No entanto, à semelhança do tratamento de alúmen, a falta de tempo necessário para verificar a qualidade e despistar alguns efeitos secundários não foram tidos em conta, e hoje, 50 anos depois do início do tratamento do navio Vasa, os conservadores-restauradores começam a constatar alguns sinais alarmantes de degradação das madeiras. Para além do navio Vasa, também em objetos provenientes do navio Holandês Batavia, do século XVII, pertencente à Companhia Oriental das Índias e recuperado nos anos setenta, foram tratados com o mesmo método. Também neste caso foram registadas reações químicas de deterioração (Ghisalberti, et al., 2001), resultantes, tal como no processo de alúmen, da acidificação da madeira e a degradação do PEG, formando ácido sulfúrico que, por sua vez, promove a hidrólise dos polímeros da madeira, decompondo-a (Ghisalberti, et al., 2001; Garner, et al., 2011).

No último quartel do século XX, o processo foi evoluindo, ajustado e integrado em processos mais complexos. Registou-se um desenvolvimento do processo de aplicação de PEG que pressupõe a secagem por liofilização (Hug, 1984; Watson, 1996; Meyer, 1996; Morel-Deledalle, 1998; Saerterhaug & Turner-Walker, 2001; Chaumat, et al., 2001a; Chaumat, et al., 2011) e mais tarde, a secagem por  $CO_2$  supercrítico (Schindelholz, et al., 2007; Teshirogi, et al., 2001; Lumia, et al., 2003). Este último método, ainda que numa fase embrionária, apresentou resultados bastante promissores. Porém, a sua complexidade e dificuldade de execução, sobretudo em grandes objetos, torna-o impraticável e bastante



limitado. A secagem por liofilização é o melhor processo considerado até ao momento para madeiras de menor porte (Schindelholz, et al., 2007).

Paralelamente desenvolveram-se outros processos de impregnação e consolidação de madeiras, utilizando a Sacarose ou a Colofónia (Giachi, et al., 2011) que, se no caso da Sacarose apresenta o problema da vulnerabilidade ao ataque biológico, no processo da Colofónia o método e os materiais envolvidos dificultam os tratamentos, relegando-os para segundo plano, em detrimento do tratamento com PEG (Smith, 2005).

Em 1978, na conferência em Zagreb, na Croácia, no Committee for Conservation do International Council of Museums (ICOM-CC), foram delineadas oito diretrizes orientadoras que C. Wayne Smith reporta (Smith, 2005) e que compreendem o uso de detergentes na conservação de madeiras saturadas em água; o uso de tetraetil orto-silicato; recuperação e salvaguarda de objetos em madeira saturada em água, secagem a frio; métodos de análise de PEG em madeiras saturadas em água; uso de Sacarose; uso de polímeros; e técnicas de irradiação. Segundo o mesmo autor foram acrescentados, depois da conferência, mais seis tópicos pelo grupo de trabalho do ICOM “Waterlogged Wood Working Group” que abrange a análise e investigação; tratamento de barcos em madeira de grande dimensão; processos de acetona/resina; secagem controlada; impregnação com PEG; e questões de interesse geral relacionadas com a preservação de objetos em madeira saturada em água.

Desde então, muita investigação tem sido realizada, quer no âmbito de aplicação de novas técnicas, quer no desenvolvimento de novas formulações baseadas em procedimentos antigos (Smith, 2005). Os estudos, através da aplicação de tecnologias avançadas, têm sido efetuados em madeiras conservadas, de forma a avaliar a qualidade dos tratamentos, recolhendo informações importantíssimas para o melhoramento desses mesmos processos. O investigador Per Hofmann (Hoffmann & Kuhn, 1998; Hoffmann, 2001), sobre este assunto, tem tido um papel ímpar no desenvolvimento e aplicação do PEG, bem como David Grattan e Cook Clifford principalmente no âmbito do estudo da qualidade deste produto, na medida em que os resultados da sua investigação permitem perceber as debilidades e virtudes deste material (Cook & Grattan, 1984; Smith, 2005).

Como alternativas destacam-se as aplicações de novos tipos de sacarídeos, como o lactitol, desenvolvido por Setsuo Imazu e Andras Morgos (1998; 2001) e os óleos de silicone (MTMS), desenvolvido por Wayne Smith, na Universidade do Texas (Smith, 2002). Também o ARC-Nucléart experimentou recentemente, com resultados interessantes, um tratamento de três fases, onde utiliza em simultâneo a impregnação por PEG, liofilização e resinas polimerizadas com Raios Gama (Chaumat, et al., 2011). Contudo, devido às lições do passado, às novas perspetivas e à luz dos estudos desenvolvidos, a comunidade científica tem consciência que a conservação de madeiras arqueológicas encharcadas é uma matéria complexa e que os tratamentos devem ser muito bem ponderados e analisados do ponto de vista da qualidade (Brown, 1991; Hamilton, 1999; Smith, 2005; Walsh, et al., 2011). Por estas razões não é possível, atualmente, afirmar a existência de um tratamento como 100% viável, sendo que a abordagem é normalmente específica para cada caso. No entanto, o caminho está a ser desbravado e novas soluções estão a ser apresentadas para um futuro mais sustentável da conservação das madeiras alagadas.

Actualmente as preocupações têm dominado os estudos no âmbito da conservação de madeiras alagadas, onde podemos mencionar pelo menos três linhas diretoras:

1. Criação de meios para solucionar e reverter os processos de conservação que põem em causa a sobrevivência do património, como os casos do Oseberg e Vasa;
2. Desenvolvimento e melhoramento do método de impregnação por PEG;
3. Estabelecimento de novas metodologias e produtos para a conservação das madeiras arqueológicas provenientes de meios húmidos.

Numa outra vertente, a par da conservação efetuada em laboratório, alguns investigadores começaram a desenvolver soluções que permitem preservar os espólios nos seus locais de origem, tendo ficado designada como preservação “*in situ*”, no sentido de dar resposta às problemáticas do armazenamento e à falta de confiança nos tratamentos atuais (Pomey, 1998; Bergstrand, 2001; Bugani, et al., 2008; Lillie & Smith, 2009; Palma, et al., 2011). O acondicionamento em reservas de museus ou laboratórios é outra das preocupações no que diz respeito às madeiras arqueológicas. A natureza higroscópica da maior parte dos tratamentos condiciona os locais e a forma de arrumação ou a sua exposição, o que se

repercute nos elevados custos que as instituições dedicadas a este espólio específico têm, tornando estes objetos muito difíceis de manter (Jespersen, 1984; Barbour, 1984; Bugani, et al., 2008). É igualmente dispendioso manter os objetos estabilizados em laboratório, enquanto aguardam os tratamentos finais. Esta situação é bem visível no caso de Billingsgate, em Londres, onde milhares de peças de madeira estão armazenadas e só quatro se encontram em tratamento (Brown, 1991) ou, ainda, o laboratório do Centro Nacional de Arqueologia Náutica e Subaquática (CNANS), da Direção Geral do Património Cultural, em Lisboa, onde apenas existe um conservador com a responsabilidade de preservar milhares de artefactos, obrigando estes organismos a desenvolver estratégias que passam pela recolocação das madeiras novamente nos seus locais de origem ou em reservas submersas. No campo da preservação *“in situ”* a contribuição da biologia e da química tem sido muito importante (Bjordal & Nilsson, 2001; Bjordal, et al., 2006), no sentido de se perceber os processos de degradação das madeiras, contribuindo dessa forma para o desenvolvimento de soluções de preservação, que permitam guardar os espólios nos locais originais ou armazenados em depósitos especiais subaquáticos.

## **Secagem de Madeiras Arqueológicas**

### **Análise dos comportamentos físicos e aplicação do modelo de secagem binário**

---

### **3. Anatomia, química e física da madeira.**

#### **3.1 Constituição anatómica da madeira**

A madeira corresponde ao *lenho* do tronco das árvores e resulta do conjunto de tecidos formados pela atividade do Câmbio, constituído por uma complexa rede de células, organizadas e dispostas de diferentes formas no tecido lenhoso.

Neste sentido este capítulo pretende debruçar-se apenas na descrição e identificação dos componentes e elementos do tecido morto e que corresponde à madeira enquanto matéria-prima.

Assim sendo, são dois, os grandes grupos naturais de árvores, as Gimnospermas (também designadas por Coníferas ou Resinosas) e as Angiospermas (ou Folhosas), sendo que, atualmente, ainda existe um terceiro grupo muito reduzido semelhante ao das Gimnospermas, denominado *Ginkgoales*, do qual temos como único exemplar, a árvore oriunda do Japão e da China, *Ginko Biloba* (Panshin & Zeeuw, 1980; Fengel & Wengener, 1989; Hoadley, 1998; Unger, et al., 2001).

Os dois primeiros grupos são especialmente relevantes, por constituírem a base do património subaquático em madeira conhecido.

As propriedades físicas da madeira estão intimamente relacionadas com a sua estrutura e ultra-estrutura e varia de espécie para espécie, sendo, neste campo, as Coníferas (Imagem 1), o grupo mais antigo e mais simples na sua ordenação micro-estrutural, bem como na variedade dos elementos constituintes do seu lenho (Hoadley, 1997; Unger, et al., 2001).

Genericamente, a parte da árvore usada na construção é o tronco, que também é a parte mais uniforme e com as melhores propriedades físicas para esse fim. O tronco é formado, primeiramente, por um caule que vai engrossando e alongando durante o seu período de vida, criando posteriormente o Xilema, através de uma camada fina de células vivas (Câmbio Vascular), que se encontram na periferia do tronco. Esta estrutura é protegida por

## Secagem de Madeiras Arqueológicas

### Análise dos comportamentos físicos e aplicação do modelo de secagem binário

uma casca exterior que se divide em dois níveis: casca interna ou Floema e casca externa ou Ritidoma. Quando a árvore atinge uma certa idade, o Alburno (ou Borne), por sua vez, dá origem ao Cerne, a parte mais resistente da árvore. Estes componentes são os aspetos macroscópicos que podemos identificar facilmente num corte transversal do tronco e que contribuem para o crescimento e para as características que as madeiras apresentam.

Deste modo o tronco da árvore constitui-se por:

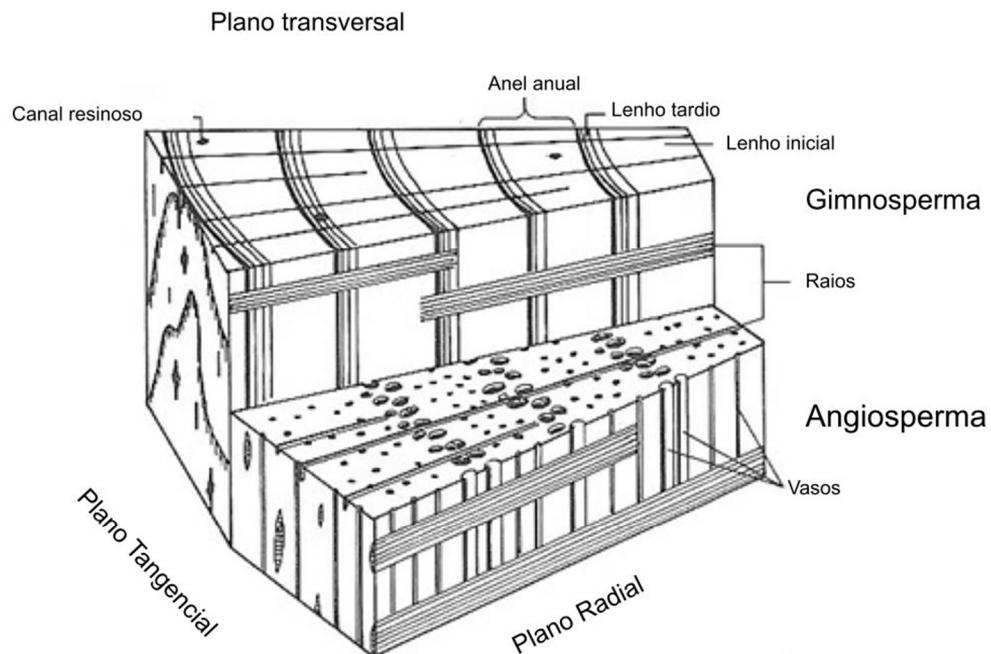


Imagem 1 Modelo geral de constituição do tronco das Folhosas (Angiospermas) e resinosas (Gimnospermas) (adaptado de Fengel & Wengener, (1989).

- A Medula é a parte central do tronco que marca o início do crescimento da árvore através das células meristemáticas, cujo nome deriva de *meristos* que significa divisível e que são equivalentes às células estaminais dos animais cuja principal característica é a de conseguir assimilar as características das células vizinhas. Deste modo são responsáveis pela criação de novas células, e proporciona o desenvolvimento do tronco, sendo a partir desse ponto que se desenvolvem as células, que darão origem ao Borne e ao Cerne (Fahn, 1974, pp. 58-59);
  
- O Xilema é parte dura e interna do tronco e que dá origem à madeira por ser a parte mais duradoura do tecido vegetal. Nele encontra-se o Alburno caracterizado pela parte mais clara e externa do tronco, e o Cerne, a parte mais escura e interna do tronco. Dependendo da sua origem pode ser classificado como Xilema primário, cujo sua origem se deve ao Procâmbio localizado nos tecidos meristemáticos da Medula (centro do tronco) e que dão origem ao Câmbio vascular, tecido meristemático que por sua vez dá origem ao Xilema secundário. No caso da madeira manufaturada o que observamos na maior parte dos casos é o Xilema secundário uma vez que, o método de extração das tábuas do tronco elimina à partida essa parte do tecido. Contudo quando visível compreende um espaço com poucos milímetros de diâmetro que se localiza exatamente no centro do tronco, sendo responsável pelo crescimento em altura da árvore (Esau, 1972, p. 150; Fahn, 1974, p. 126).
  - O Borne (ou Alburno) faz parte do Xilema secundário, constituído por células vivas que tem como função o transporte da seiva bruta, ou seja, os nutrientes e a água. Estes darão origem, através de processos químicos e fotossintéticos, à seiva elaborada constituída por monossacarídeos como a Glicose, que, por sua vez, dão origem à Celulose, constituinte maioritário do tecido lenhoso (Esau, 1972, p. 150; Fahn, 1974, p. 126). Trata-se da região da madeira mais jovem e mais próxima ao Câmbio Vascular, sendo a região de tecido vivo durante o ciclo de vida da árvore.

- O Cerne (Imagem 2), que já mencionamos, é a parte mais resistente do tronco e também faz parte do Xilema secundário. É constituído essencialmente por células mortas, com função de sustentação da árvore e criado pelo envelhecimento do alburno através da perda da água e dos nutrientes armazenados, sendo substituídos por compostos orgânicos, perdendo assim as suas funções de transporte. É mais denso e escuro que o alburno devido à acumulação dos compostos orgânicos colorantes, pela oxidação dos compostos fenólicos e pelo desaparecimento do amido, (Esau, 1972, p. 274). A sua resistência mecânica relativamente ao Borne advém do preenchimento do interior das células com materiais extraíveis engrossando as paredes das células após a sua morte. Esse incremento de material confere ao tecido lenhoso uma maior resistência e dureza.
- O Câmbio vascular (Imagem 2) é a região periférica localizada entre o Floema e o Alburno, constituída apenas por células meristemáticas que tem a função de criar as novas células do Xilema e do Floema. Esta região do tecido vegetal é responsável pelo crescimento em largura do tronco da árvore.

O Floema constitui a casca da árvore, a zona periférica mais externa do tronco e divide-se em dois tipos: a casca interna (Floema) responsável pelo transporte da seiva elaborada; e a casca externa (Ritidoma) que atua como um escudo protetor, resguardando o tronco de ataques exteriores. Tal como o Xilema, à medida que o Floema se vai formando junto ao câmbio vascular o Floema mais externo envelhece e morre, tornando-se mais resistente e formando a casca dura ou seja o Ritidoma. A principal característica do Floema são a presença das células crivadas ou tubos crivados que se identificam desta forma devido às suas extremidades estarem crivadas de buracos por onde passa seiva elaborada (Esau, 1972, pp. 296-297; Fahn, 1974, p. 145).



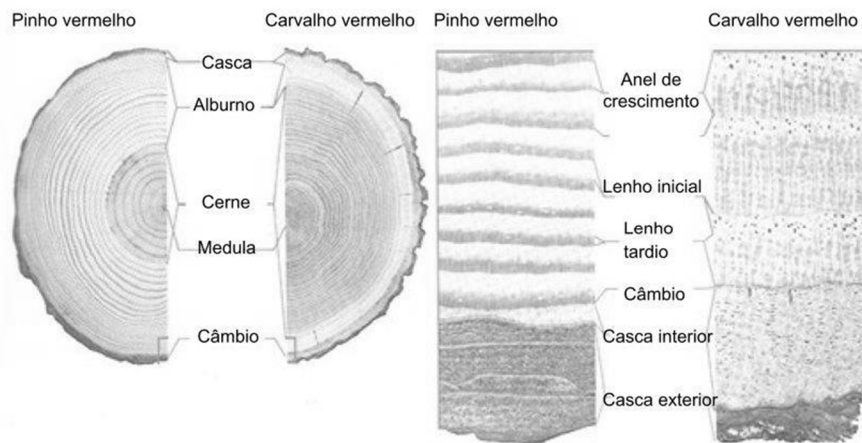


Imagem 2 Esquema geral pormenorizado do tronco de uma Conífera (Pinho vermelho) e de uma Folhosa (Carvalho vermelho) (adaptado de Hoadley, 1997)

O conjunto destes elementos forma o tecido fibroso da madeira, perfeitamente orientado e organizado por células de diferentes tipos e com diferentes funções dentro deste complicado tecido vegetal. (Fengel & Wengener, 1989, pp. 6-9; Hoadley, 1997, pp. 1-7; Melo, 1999, pp. 14-19; Unger, et al., 2001, pp. 9-10; Klock, et al., 2005, pp. 5-9).

### 3.1.1 Coníferas (Gimnospermas)

O termo Coníferas deriva do fato da maior parte destas plantas produzirem folhas cónicas. São mais simples que as Angiospermas e no que diz respeito ao seu arranjo micro-estrutural possuem também menor diversidade de elementos (Antunes & Pinto, 2006, p. 68). O seu lenho é constituído por cerca de 90% a 95% de traqueídeos (ver ponto 3.4) axiais aglomerados paralelamente entre si, no sentido axial do tronco (Fahn, 1974, pp. 275-277). O seu tamanho varia de espécie para espécie e mesmo dentro do próprio tronco, sendo

geralmente o seu comprimento cerca de 100 vezes maior que a sua largura. Atingem cerca de 3,5 mm a 7 mm de comprimento, tendo uma forma de fibra fechada nas extremidades, mais ou menos pontiagudas. São menores junto à medula e maiores quanto mais perto se encontram da casca.

Existem dois tipos de traqueídeos, os do lenho inicial e os do lenho tardio (ou lenho final), os primeiros distinguem-se pelo diâmetro do lúmen maior e paredes menos espessas (com a função de transporte de nutrientes) e os segundos por uma parede mais espessa, um lúmen de diâmetro inferior e pontuações com bordos reduzidos, formando os fibrotraqueídeos (ver ponto 3.4) (com função de sustentação).

Os traqueídeos interligam-se por meio de pares de pontuações aureladas (ver ponto 3.4) circulares ou ovais que podem variar entre 50 a 300 pontuações por traqueído (Fahn, 1974, p. 277).

Desta assimilação desenvolvem-se os chamados anéis de crescimento que se caracterizam, pela sua observação a olho nu, por linhas circulares, intercalando tons escuros com claros. O anel mais claro corresponde ao lenho inicial, com traqueídeos de lúmen mais amplo e paredes mais finas que se formam durante a primavera e estão associados ao calor e disponibilidade de água. O anel mais escuro corresponde ao anel de lenho tardio ou outonal, com traqueídeos de lúmen fino e paredes muito mais espessas, sendo mais compactas e resistentes (Zimmerman & Brown, 1971; Fahn, 1974). No tronco, estes dispõem-se essencialmente no sentido longitudinal, no entanto podem existir traqueídeos no sentido radial, da medula para a casca, associados aos raios. São os componentes especializados que proporcionam o transporte de nutrientes e a sustentação da árvore.

Outra das características das Gimnospermas é que os traqueídeos encontram-se interligados por pares de pontuações aureladas circulares ou ovais.

Para além dos traqueídeos, fazem parte as células parênquimatosas que nas Coníferas se dispõem essencialmente no sentido radial. Estas são as células que se identificam macroscopicamente no tecido como raios e que dão nome à secção radial. Estas células são especializadas no transporte de produtos arrastados em conjunto com os nutrientes e a água.

Dentro da tipologia das células parenquimatosas existem as células epiteliais. Estas encontram-se junto às paredes dos canais resiníferos e são de armazenamento e secreção, transferindo o seu conteúdo para os canais resiníferos. São semelhantes aos traqueídeos, mas com um diâmetro do lúmen muito maior e paredes muito mais finas (Esau, 1972, pp. 280-281; Fengel & Wengener, 1989, p. 19; Hoadley, 1997, p. 7; Melo, 1999, pp. 19-35; Unger, et al., 2001, pp. 9-10; Klock, et al., 2005, p. 13).

Os canais resiníferos (Imagem 3) identificam-se como cavidades longitudinais ou radiais de grande diâmetro quando comparado com as restantes células e servem aparentemente para proteção das árvores contra ataques mecânicos, usando a resina como selante. Um exemplo disso é quando desferimos um corte num pinheiro, ele começa a verter a resina desses canais como forma de combate a essa anomalia provocada por uma força exterior (Hoadley, 1998, p. 20).

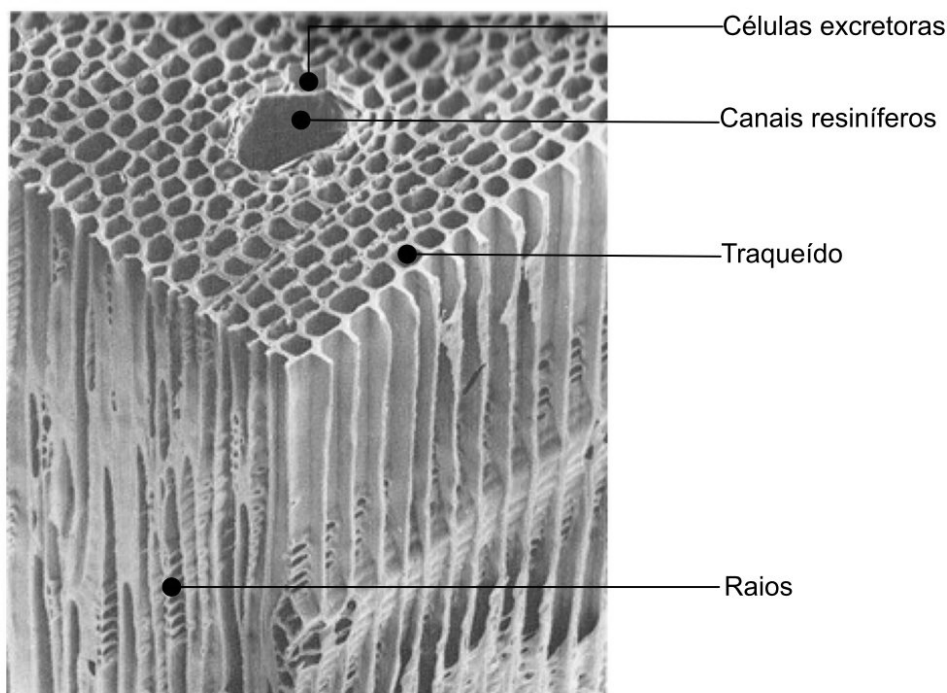


Imagem 3 Aspeto microscópico de uma Gimnosperma (adaptado de Panshin & Zeeuw, 1980, p. 128).

### **3.1.2 Folhosas (Angiospermas)**

As Folhosas pertencem ao outro grande grupo de árvores e o seu tecido lenhoso é mais complexo que o das Coníferas.

Dentro deste grupo distinguem-se as Dicotiletóneas e as Monodicotiletóneas. Em termos de lenho apenas as Dicotiletóneas apresentam um Xilema secundário homogéneo e coeso para produzir madeira (Esau, 1972, p. 280; Fahn, 1974, p. 140; Cutler, et al., 2008, p. 31), sendo deste grupo de espécies que se obtêm a matéria prima para as construções de madeira e portanto é neste grupo que iremos incidir.

O seu arranjo estrutural baseia-se em fibras-libriformes (fibras sem pontuações) e fibrotraqueídeos no sentido axial, semelhantes aos traqueídeos das Coníferas, mas com paredes muito espessas e lumens muito mais estreitos. Estas células são responsáveis pela sustentação do tronco (Fengel & Wengener, 1989, p. 19; Hoadley, 1998, p. 6; Melo, 1999, pp. 31-34; Klock, et al., 2005, p. 13).

As fibras das Folhosas, em relação às Coníferas, estão presentes em muito menor quantidade e localizam-se, sobretudo, entre os vasos e as fibras misturados com parênquima axial. Esta sua particularidade leva alguns autores a chamar-lhes traqueídeos vasicêntricos ou paratraqueais (Hoadley, 1998, p. 38; Melo, 1999, p. 21).

No meio do tecido de sustentação encontram-se os poros, que são os vasos, podendo ter diversas formas, mas distinguem-se pelos grandes diâmetros de lúmen e pelo seu reduzido comprimento ( $\leq 1\text{mm}$ ) (Klock, et al., 2005, p. 9). Depois de mortos estes vasos dão origem a estruturas celulares tubulares com extremidades totalmente abertas ou perfuradas e que podem ter um comprimento de alguns centímetros até alguns metros.

A sua disposição no Xilema pode ser analisada como:

- Porosidade difusa (poros dispersos pelo lenho inicial e tardio);
- Porosidade em anel (poros dispostos ordenadamente e distintamente entre o lenho inicial - vasos de grande diâmetro - e tardio - vasos de reduzido diâmetro);

- Porosidade semicircular (quando o diâmetro dos vasos vai diminuindo gradualmente do lenho inicial para o lenho tardio).

Dentro destes vasos podem desenvolver-se outras estruturas designadas de tilos ou tiloses (ver ponto 3.5), constituindo bolsas de armazenamento de vários tipos de materiais extraíveis (ver ponto 3.7), que dependendo da espécie podem ser resinas, gomas, bálsamos entre outros produtos (Fengel & Wengener, 1989, pp. 6-8; Hoadley, 1998, p. 6; Melo, 1999, pp. 31-34; Klock, et al., 2005, p. 9).

O parênquima das Folhosas pode dispor-se tanto no sentido axial, como no sentido radial e está muito mais presente no tecido lenhoso. Os raios compostos por parênquima são muito maiores e mais numerosos que nas Coníferas, existindo também as células especiais de parênquima epitelial adjacente aos elementos de vaso. A distribuição destes elementos e a quantidade existente nas várias espécies de Angiospermas é muito mais heterogênea e variada do que nas Gimnospermas.

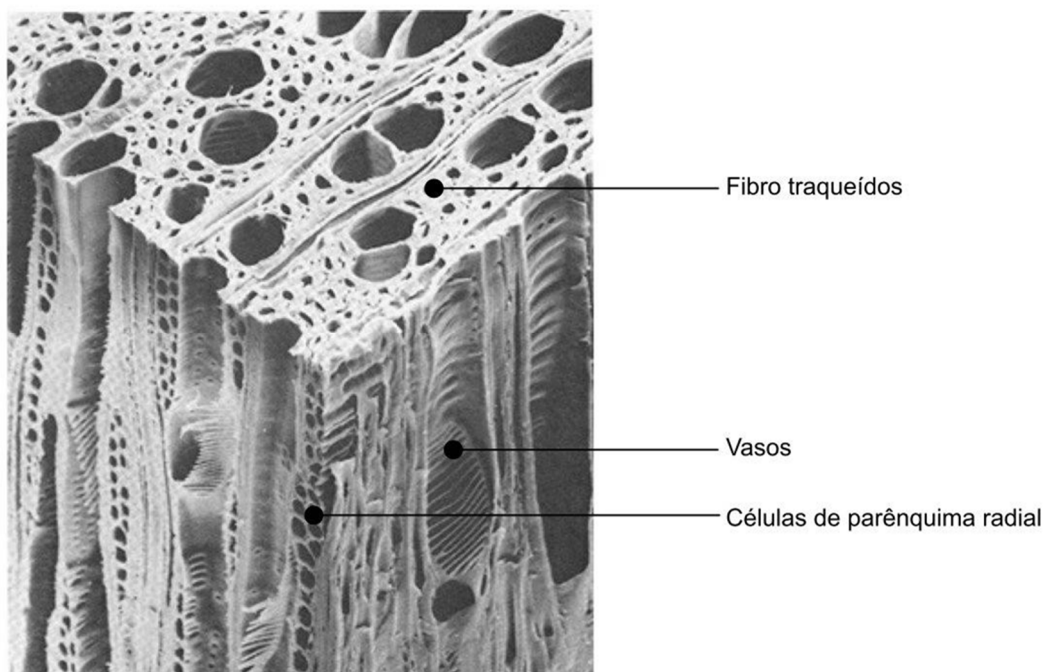


Imagem 4 Aspeto microscópico de uma Angiosperma (Panshin & Zeeuw, 1980, p. 162).

### **3.2. Defeitos naturais**

Define-se como defeito natural todo o tipo de anomalia criada por causas naturais durante o seu período de vida e que ponha em causa as características normais consideradas para uma árvore saudável, não comprometendo a laboração ou os fins a que se propõe depois de abatida (Panshin & Zeeuw, 1980, p. 286; Melo, 1999, p. 113).

Durante o desenvolvimento natural da madeira existem variantes que influenciam a anatomia da madeira. Essas variações são visíveis a olho nu e caracterizam-se por criarem descontinuidades ou irregularidades no tecido lenhoso. A sua importância na qualidade da madeira é determinante devido às implicações que tem durante o processo de secagem e de uso, podendo em muitos casos inviabilizar a sua utilização. Neste sentido, a necessidade de conhecermos estes defeitos é crucial para prever o comportamento e selecionar com antecedência as madeiras ideais para o uso pretendido.

A influência de anomalias na estrutura e resistência das madeiras implica que o trabalho de identificação, seleção e tratamento das anomalias seja uma das mais importantes tarefas na obtenção de madeiras de boa qualidade.

Estas anomalias dependem da espécie da madeira, da localização geográfica, da silvicultura e do ambiente onde se inseriu durante o seu crescimento. Madeiras de climas tropicais de grande porte são mais fáceis de tratar devido às suas características e dimensões, pois permitem a obtenção de troncos altos e largos, podendo eliminar-se possíveis defeitos e ainda obter bons tabuados (Melo, 1999, p. 113). Por outro lado, em casos muito específicos os operadores podem ainda utilizar essas anomalias como uma mais-valia como é o caso da construção naval, em que a seleção de troncos curvos contribuía para uma otimização da construção dos Cavernães, aumentando a dinâmica do material para aquela função, bem como para reduzir os tempos de laboração desses elementos (Panshin & Zeeuw, 1980, p. 286).

Para além dos defeitos naturais existem ainda aqueles que são causados pelo manuseamento da madeira, mais concretamente, durante o corte e a secagem.

### **3.2.1 Anomalias do fio da madeira**

Fio da madeira é a inclinação com que as células se dispõem no tronco, relativamente ao eixo da árvore. Assim a disposição do fio pode classificar-se em vários tipos consoante a sua disposição no tronco:

- Pode dispor-se em forma helicoidal (Imagem 7), denominando-se fio espiralado ou helicoidal (Panshin & Zeeuw, 1980, p. 287; Hoadley, 1998, p. 22; Melo, 1999, p. 123) desenvolvimento desta anomalia pode ser mais ou menos intensa, podendo acentuar os ângulos de deformação durante o período de crescimento. Os investigadores J. Panshin e Carl De Zeeuw (1980, p. 287) relataram que as Coníferas podem ter um ângulo acentuado nos primeiros anéis de formação da árvore, sendo depois desanuviados durante o crescimento, com tendência para formarem fios de ângulo nulo no ponto onde se inicia o cerne do tronco, podendo desta forma, reverter o ângulo à medida que o tronco engrossa. Por outro lado, referem também que, noutros casos, podem apresentar um acréscimo do ângulo de deformação, no sentido da medula para o câmbio. Nas Folhosas o processo tende a ser o inverso. Primeiramente, o fio inicia, junto à medula, com uma tendência mais reta e à medida que se desenvolve a árvore tem tendência a aumentar os ângulos de declive (Panshin & Zeeuw, 1980, p. 287). Num terceiro momento, o fio espiralado (Imagem 6) pode ainda evoluir para o fio entrelaçado (Imagem 5). Este caracteriza-se pelo emaranhamento das fibras, criando grandes dificuldades na laboração. O seu fio muito irregular cria zonas de clivagem extremamente heteróclitas (Panshin & Zeeuw, 1980, p. 288; Hoadley, 1998, p. 22). Este tipo de anomalia é comum em Folhosas de clima tropical e em alguns de clima temperado do norte da Europa;
- O fio diagonal apresenta um ângulo de inclinação num determinado sentido em relação à linha axial do tronco e pode ser mais ou menos acentuado. Quando o fio diagonal se posiciona alternadamente para um lado e para o outro, denomina-se de fio cruzado ou reverso (Panshin & Zeeuw, 1980, p. 289; Melo, 1999, p. 124);

## Secagem de Madeiras Arqueológicas

### Análise dos comportamentos físicos e aplicação do modelo de secagem binário

---

- Bruce Hoadley (1998, p. 22) e Joaquim Melo (1999, p. 124) referem também o fio ondulado ou encaracolado (Imagem 8), quando os elementos celulares se posicionam em curva e contra curva.

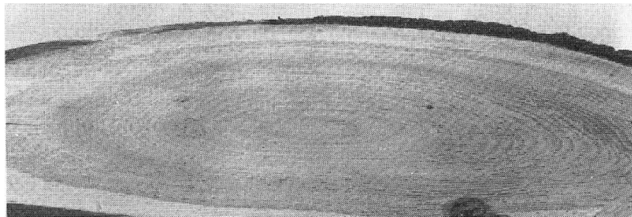


Imagem 6 Veio em espiral (Hoadley, 1998).

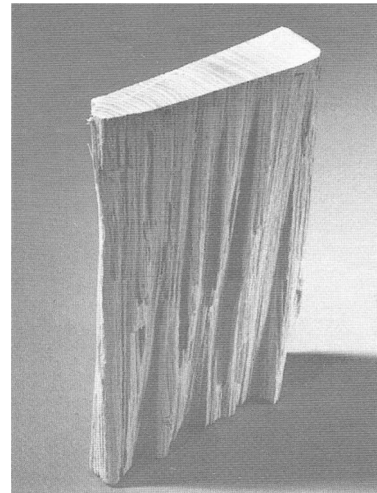


Imagem 5 Fio entrelaçado (Hoadley, 1998).

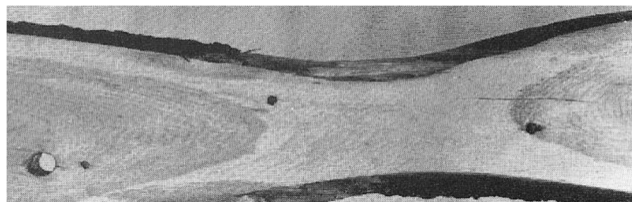


Imagem 7 Fio helicoidal provocado pela junção de dois veios espiralados (Hoadley, 1998).

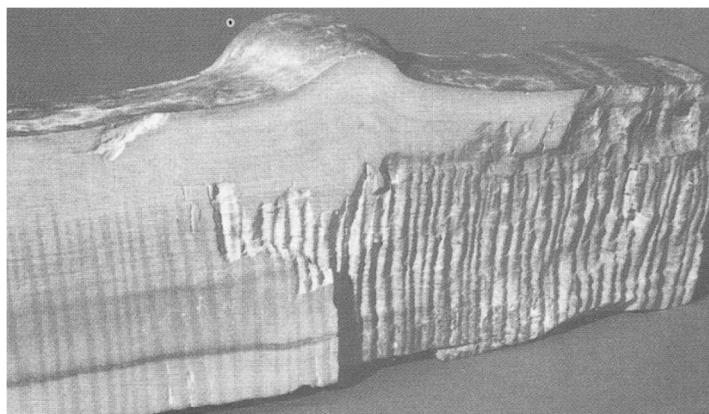


Imagem 8 Fio ondulado (Hoadley, 1998).



### **3.2.2 Os Nós**

Os Nós são uma das anomalias mais fáceis de detetar a olho nu, devido ao seu tamanho e à radical alteração do aspeto, em relação ao restante tecido lenhoso.

Em termos de implicações na utilização da madeira são particularmente graves quando se trata de aplicações estruturais, pois reduzem significativamente a resistência do elemento de madeira (Melo, 1999, p. 117). Noutros casos podem ser benéficos como padrão decorativo. A sua forma varia entre o prisma ovalizado, para as Folhosas e cónica, para as Coníferas, resultando em corte numa secção oval ou circular, respeitante a cada uma das espécies, sendo o seu vértice apontado à medula. São classificados como nó apiciforme (Imagem 9) – de forma cónica vista em perfil – nó redondo (Imagem 10) ou oval – vista em secção – e nó alfinete – quando o seu diâmetro é de 1 mm a 5 mm (Hoadley, 1998, p. 27).

A sua presença no tronco causa vários distúrbios no crescimento do fio, originando as anomalias já referidas. (Panshin & Zeeuw, 1980, p. 290; Hoadley, 1998, pp. 26-28).

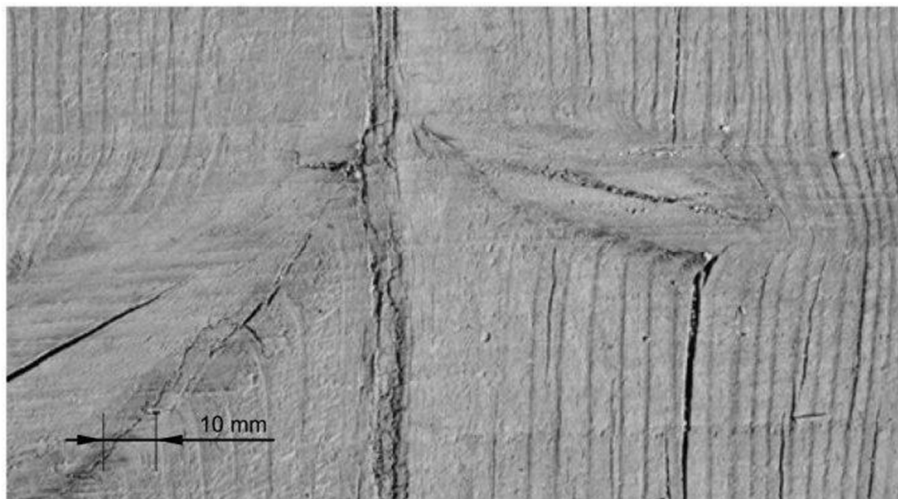


Imagem 9 Dois nós apiciformes confluindo na medula do tronco.

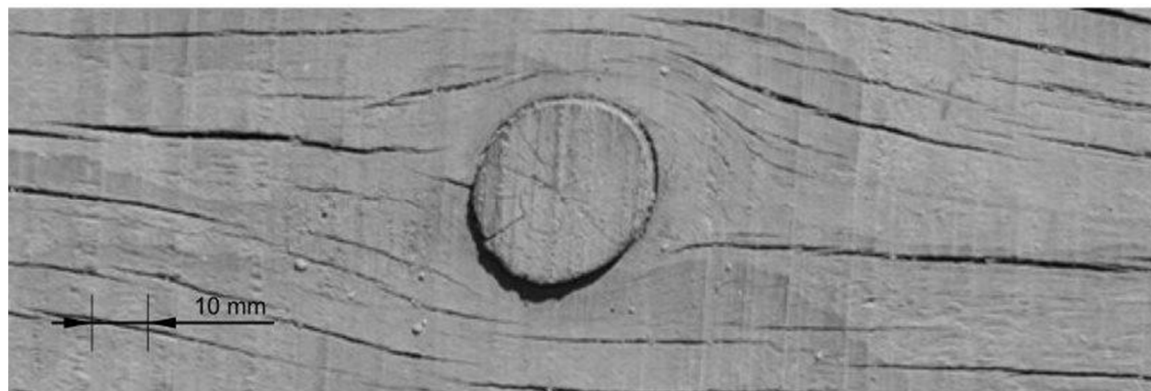


Imagem 10 Fotografia de um nó a destacar-se da madeira, originando um buraco de nó.

### **3.2.3 Fendas**

As fendas são o resultado de tensões perpendiculares ao sentido das fibras da madeira, provocando a sua separação, podendo ser observadas pela presença de cavidades de secção alongada (Imagem 11) no sentido das fibras e em qualquer parte do elemento de madeira (Melo, 1999, p. 126).

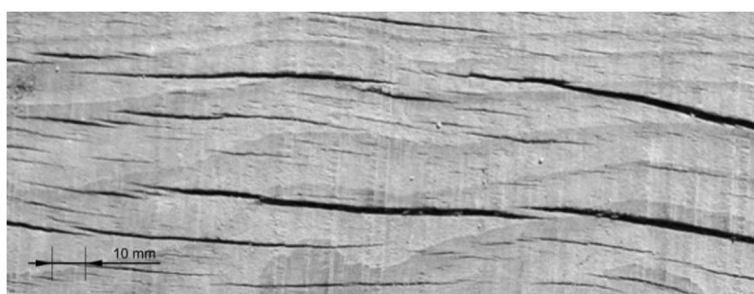


Imagem 11 Fotografia da superfície de uma madeira com fendas causadas pelas reações físicas de compressão.

### **3.2.4 Bolsas de resina**

Apresentam-se como espaços lenticulares (Imagem 12), contendo resina no seu interior e são causadas geralmente por forças externas de impacto, tais como: a torção provocada pela ação do vento; os embates de elementos externos, como as feridas provocadas pelo choque com outra árvore; ou até mesmo os ataques de insetos, sendo, este último, uma característica particular das espécies resinosas (Panshin & Zeeuw, 1980, p. 324; Melo, 1999, p. 134).



Imagem 12 Bolsa de resina de uma resinosa.

### **3.2.5 Anéis de Gelo**

Trata-se de certo modo de um anel (Imagem 13), considerado por alguns autores como um falso anel, resultado de períodos de congelamento da árvore. Quando acontece, deixa a sua marca através de um fino anel entre o anel inicial e o anel tardio.

Analísado ao microscópio apresenta-se como um anel descolorado, com células distorcidas e colapsadas e com um aumento considerável da espessura dos raios (Panshin & Zeeuw, 1980, p. 321).

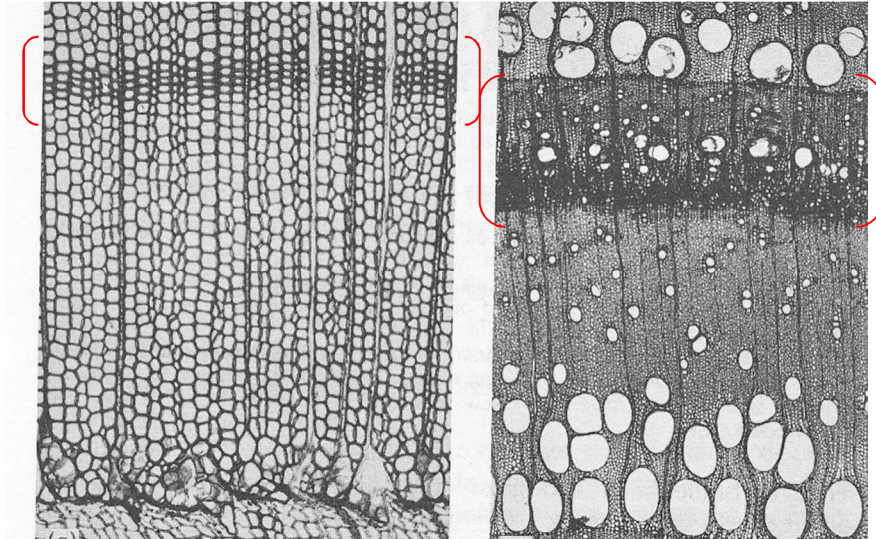


Imagem 13 À esquerda vista transversal do *Pinus Banksiana* e à direita o corte transversal *Fraxinus Americana L.* onde se podem observar identificados, os anéis de gelo, sobressaindo no primeiro caso, como uma alteração anelar e no segundo caso, como um terceiro anel entre o lenho tardio e o lenho inicial. (Panshin & Zeeuw, 1980, p. 322).

### **3.2.6 Lenhos de compressão e tração**

A madeira sendo um ser vivo, durante o seu período de vida, está sujeita a forças externas, devido à ação de ventos e confronto com outros elementos externos à sua constituição e internas, inerentes ao seu próprio peso, formação e estrutura. Estes fatores obrigam o tecido lenhoso a adaptar-se e a combater estas condições adversas através da criação do lenho de reação (Panshin & Zeeuw, 1980, pp. 300-309; Hoadley, 1998, pp. 46-54).

Nas Coníferas desenvolve-se o lenho de reação nas zonas onde sofrem forças de compressão. No que diz respeito às Folhosas, estas desenvolvem tecido lenhoso de reação, reforçando as zonas onde sofrem forças de tração. Em termos macroscópicos, o lenho de tração pode ser observado pelos seguintes aspectos: apresentação de uma excentricidade da medula; escurecimento maior que o normal na área de compressão; presença de fibras gelatinosas (Imagem 15); redução do número de vasos; e diminuição do diâmetro dos mesmos. Microscopicamente, a nível celular as paredes podem ter três tipos de arranjos nas

camadas da parede secundária: S1+S2+S3 +G<sup>1</sup>; S1+S2+G; S1+G. A camada gelatinosa é formada por lamelas de fibrilas de celulose orientadas num grau de 45° em relação ao eixo axial da fibra. O lenho de compressão identifica-se pela presença da excentricidade da medula, traqueídos arredondados, transição do lenho inicial para lenho tardio modificado, sendo mais gradual e diluído.

Os traqueídos apresentam fendas helicoidais (Imagem 14) ou cavidades na camada S2 e ausência da camada S3, com aumento em algumas situações da camada S1 (Fengel & Wengener, 1989, pp. 13-16; Panshin & Zeeuw, 1980, pp. 96-104; Unger, et al., 2001, pp. 14-15; Klock, et al., 2005, p. 17).

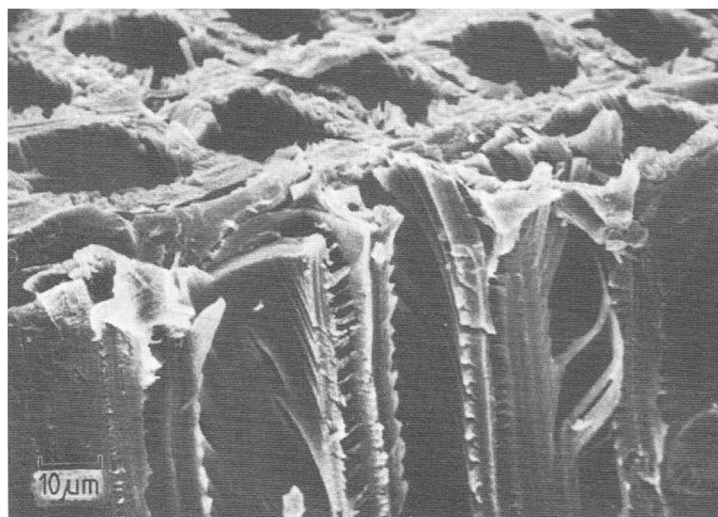


Imagem 14 Aspeto das células de compressão do Abeto (*Picea Abies*) onde observamos as cavidades helicoidais na parede secundária (Fengel & Wengener, 1989).

---

<sup>1</sup> Camada gelatinosa

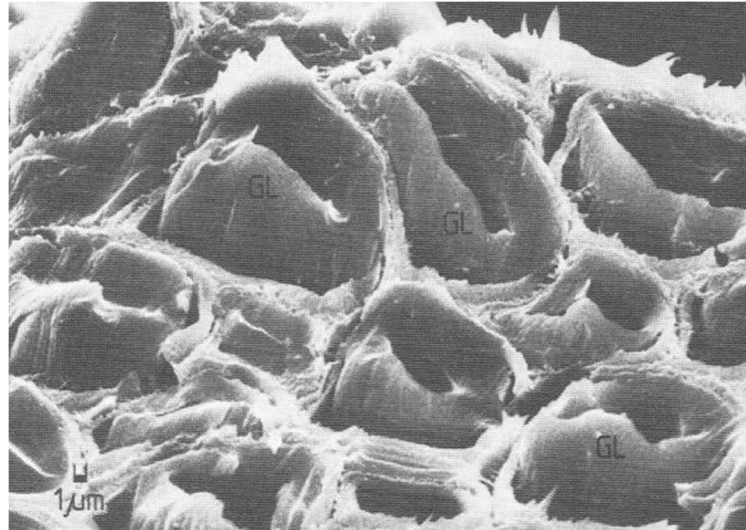


Imagem 15 Aspeto das células de tensão do Choupo (*Populus Spec.*), onde se observa a camada gelatinosa GL no interior das células e que se destaca da parede celular (Fengel & Wengener, 1989).

### **3.3 Arranjo do tecido lenhoso**

As células de madeira estão dispostas entre si, quer paralelamente (sentido axial), quer transversalmente (sentido radial). Encontram-se unidas pela lenhina, que constitui a lamela média. Esta caracteriza-se por ser um composto amorfo, que se situa entre as paredes dos vários elementos celulares, conferindo resistência mecânica à madeira, pela sua especialidade de ligante e consolidante estrutural (Klock, et al., 2005, p. 13).

Neste arranjo podemos encontrar todo o tipo de células, dependendo do tipo de espécie e de grupo. Estas células podem classificar-se segundo o seu tipo e a disposição dentro do lenho.

- Células Prosenquimatosas:

São células alongadas inativas que se identificam pela maior espessura da parede celular e um lúmen com diâmetros menores. Incluem-se, neste grupo, os traqueídeos, fibrotraqueídeos e elementos vasculares (Melo, 1999, pp. 21-22).

- Traqueídeos:

Existem quatro tipos de traqueídeos: os das Coníferas (Imagem 16 e 17), que se dividem, em traqueídeos do lenho inicial e traqueídeos (podem ser axiais ou radiais) do lenho tardio e os traqueídeos das Folhosas, que se denominam por traqueídeos paratraqueais e traqueídeos vasculares.

- Traqueído do lenho inicial:

Identificam-se pelas suas paredes finas, e diâmetro do lúmen grande, têm função de sustentação, mas principalmente de transporte, fazendo a comunicação pelas pontuações entre si.

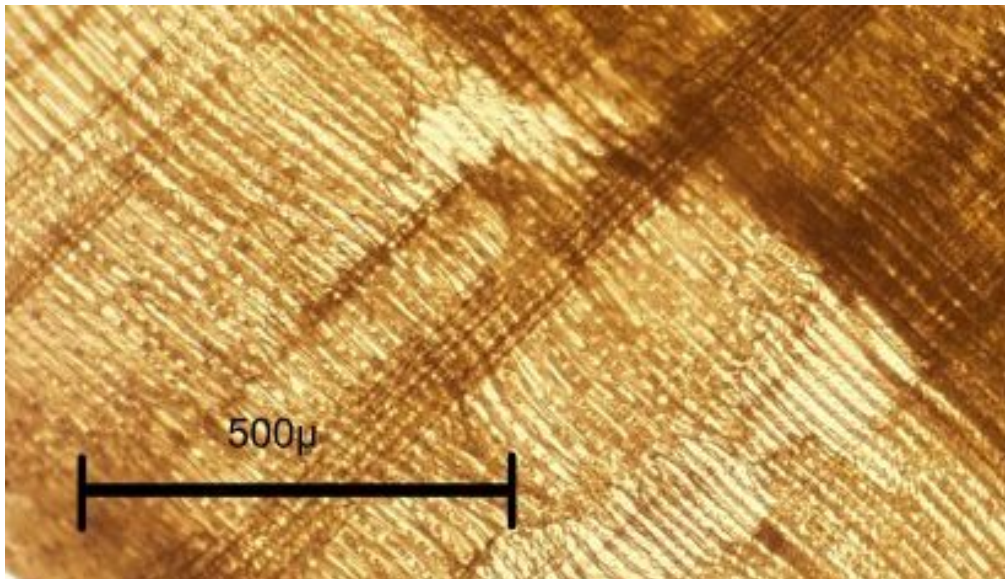


Imagem 16 Fotografia microscópica dos traqueídeos com pontuações aureoladas da *Abies Alba* Mil (Casquinha).

- Traqueído do lenho tardio:

Apresentam uma parede muito mais espessa que os traqueídos do lenho inicial e com um diâmetro do lúmen mais curto, a sua função é de sustentação (Fengel & Wengener, 1989, pp. 7-8; Hoadley, 1997, pp. 12-13; Melo, 1999, p. 21).

- Traqueído paratraqueal ou vasicêntrico:

São traqueídos que se localizam junto aos vasos misturados entre as células de parênquima (IAWA Committee, 1989, p. 262; Hoadley, 1997, pp. 12-13; Melo, 1999, p. 21).

- Traqueído vascular:

Apresentam formas semelhantes aos vasos que são elementos vasculares, daí serem denominados por traqueído vascular (IAWA Committee, 1989, p. 262; Melo, 1999, p. 21).

- Fibrotraqueído:

São fibras de forma irregular com pontuações aureoladas, mas não tantas como os traqueídos, são maiores que os traqueídos e menores que as fibras (Hoadley, 1997; Melo, 1999).



**Secagem de Madeiras Arqueológicas:**  
**Análise dos comportamentos físicos e aplicação do modelo de secagem binário**

---

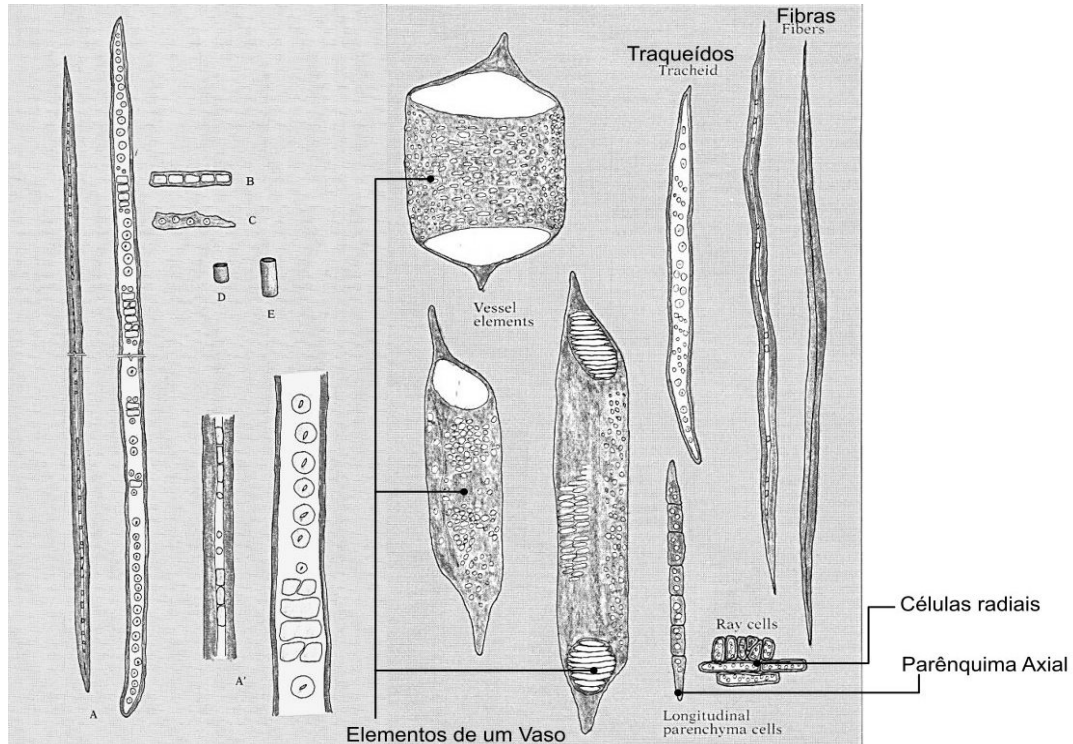


Imagem 17 À esquerda os elementos típicos das Coníferas A- Traqueídeos B- Parênquima dos raios C- Traqueídeos dos raios D- Parênquima epitelial e E- Canais resinosos. À direita os elementos típicos das Folhosas (Hoadley, 1997).

- Vasos: (elementos vasculares)

São células típicas apenas das Folhosas e identificam-se pelos seus grandes diâmetros dos lúmens (Imagem 17 e 18). A sua disposição faz-se topo a topo, no sentido axial, pelas aberturas dos topos e pelas pontuações das paredes laterais, que comunicam com as demais células do tecido lenhoso (Fengel & Wengener, 1989, p. 7; Melo, 1999, p. 21).

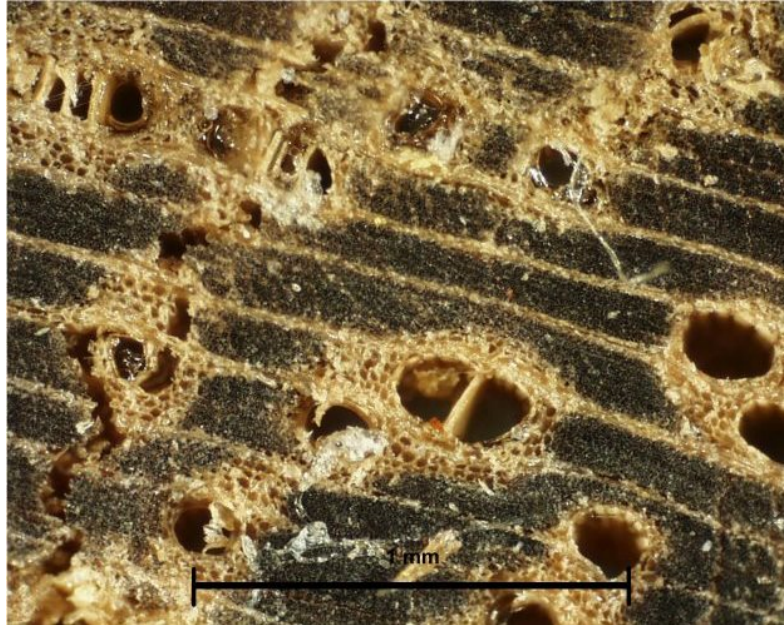


Imagem 18 Fotografia microscópica de uma folhosa com porosidade difusa, podendo observar-se os vasos e a parênquima que rodeia os vasos conferindo a área de tom melado.

- Células parenquimatosas:

São células vivas com exceção das localizadas no cerne (região de células mortas) e são identificadas por terem membranas poliédricas, paredes mais finas e lúmens maiores que as Prosenquimatosas. Constituem o tecido do parênquima que é considerado o tecido funcional da planta. Nele estão incluídas todas as células com função de reprodução, secreção, alimentação, transporte e transformação de nutrientes (Esau, 1972). Dentro deste grupo incluem-se a parênquima longitudinal, parênquima radial e parênquima epitelial (Fengel & Wengener, 1989, p. 11; Melo, 1999, p. 23).

- Parênquima longitudinal ou axial:

São células essencialmente de armazenamento, que quando muito, no cerne, podem possuir função de sustentação. Existem em muito maior número nas Folhosas do que nas Coníferas. Contêm uma forma prismática ou fusiforme. Identificam-se

também pelas suas pontuações simples ao contrário das pontuações aureoladas dos traqueídos (Esau, 1972; Fengel & Wengener, 1989, p. 11; Klock, et al., 2005, p. 13).

- Parênquima radial:

Possuem características funcionais idênticas às células parenquimáticas axiais, mas apresentam uma morfologia diferente. Podem ser consideradas como (Melo, 1999, p. 24).

- Células prostradas – quando o eixo radial é maior que o eixo axial.
- Células eretas – quando o eixo radial é menor que o eixo axial.
- Células quadradas – quando os eixos são do mesmo tamanho.

- Parênquima epitelial ou vasicêntrica:

Constituem o grupo das células secretoras de resinas das resinosas e gomas das Folhosas. Localizam-se sempre junto aos canais resiníferos ou aos vasos, tendo como função despejar para os vasos as resinas ou gomas, dependendo dos casos (Panshin & Zeeuw, 1980, p. 36; Klock, et al., 2005, p. 6).

A ligação entre as células é realizada por meio das pontuações que se encontram nas paredes laterais e nos topos das células.

Durante a formação da parede primária da célula formam-se depressões localizadas que se denominam de pontuações primárias que não são cobertas durante o depósito de microfibrilas de celulose que formam as paredes secundárias. Deste modo as paredes secundárias vão engrossando, formando a pontuação definitiva (Esau, 1972; Fahn, 1974; Guerreiro & Glória, 2006; Kerbauy, 2008; Raven, et al., 2001). Depois de concluídas as paredes secundárias podem formar-se pontuações simples ou aureoladas (Imagem 19). As pontuações simples apresentam-se como orifícios simples na parede secundária e primária e as pontuações aureoladas definem-se pela presença de um bordo elevado na parede secundária, criando uma câmara interna na pontuação, podendo ter ou não um inchamento especial da parede primária designado de torus. Esta membrana insuflada no centro da

pontuação funciona como uma válvula que controla o fluxo e a passagem de líquidos e fluídos (Guerreiro & Glória, 2006; Kerbauy, 2008; Raven, et al., 2001).

Nos traqueídos, essas pontuações só se encontram nas paredes laterais e são do tipo “pontuações aureoladas” (imagem 25), fazendo com que os fluídos se desloquem através da transferência das paredes adjacentes. O mesmo acontece com as células de parênquima. No entanto, as pontuações neste tipo de células são do tipo simples.

Assim, podem ocorrer, no sentido tangencial, cinco tipos de pontuações, sendo que a maioria identifica somente os três primeiros casos que a seguir se apresentam:

- Pontuações aureoladas - traqueído com traqueído ou traqueído com vaso ou fibra (Imagem 20).
- Pontuações semiaureoladas - traqueído com parênquima ou vaso com parênquima ou parênquima com fibra.
- Pontuações simples - parênquima com parênquima.
- Pontuação cega caracterizada por uma parede da célula com pontuação junto a outra sem pontuação (Butterfield & Meylan, 1980, p. 10).
- Pontuação tipo pontuação com bordo, mas sem ser aureolada (Butterfield & Meylan, 1980, p. 10).

No que diz respeito às pontuações de cruzamento entre traqueídos axiais e parênquima radial existem cinco tipos de pontuações (imagem24): Fenistriforme (a); Pinóide (b) e (c); Piceóide (d); Taxodióide (e); Cupressóide (f)) (Fengel & Wengener, 1989, pp. 19-23; Melo, 1999, pp. 25-28; Klock, et al., 2005, p. 13).

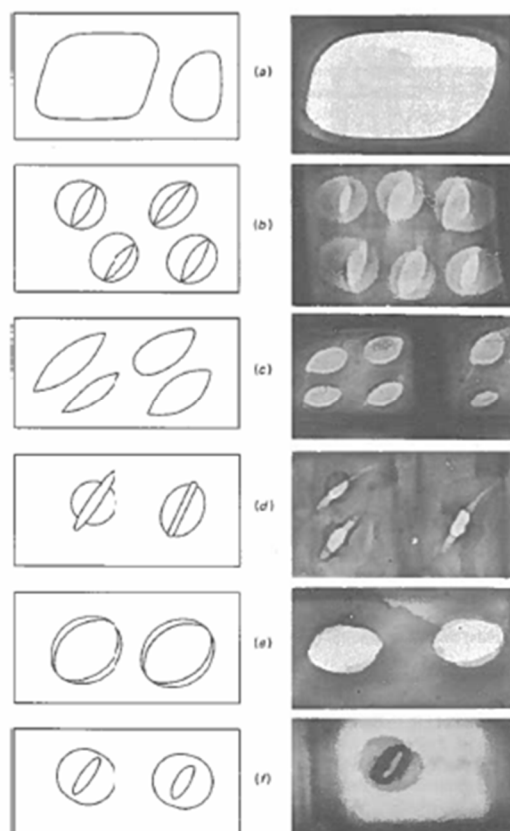


Imagem 19 Tipos de pontuações das células (Panshin & Zeeuw, 1980, p. 150).

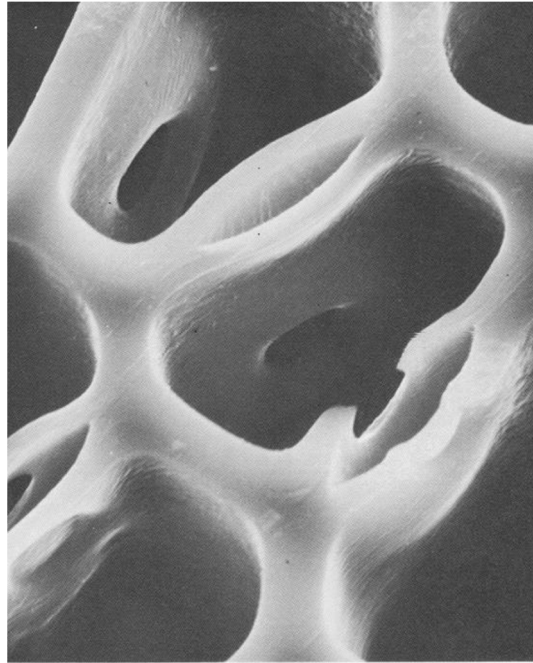


Imagem 20 Foto de pontuações aureoladas de uma Conífera (Panshin & Zeeuw, 1980, p. 111).

### **3.4 Tiloses**

As tiloses (Imagem 20 e 21) são expansões vesiculares das células de parênquima axial contíguas aos vasos ou aos fibrotraqueídeos, que encerram no seu interior substâncias extrativas (gomas, resinas, óleos, cerasm cristais, etc.).

Estas estruturas (imagem 26 e 27) são observadas tanto nos vasos, como nas fibrotraqueídeos e identificam-se pelo aparecimento de lâminas. Estas podem conter uma ou mais camadas dispostas obliquamente no lúmen das células, normalmente muito finas e compostas por celulose, polioses e lenhina (ver ponto 5.5), preenchendo, desta forma o lúmen. Este fenómeno dá-se quando se forma o cerne do tronco, após a cessação da atividade da célula, fazendo com que a esta morra e passando, assim, a exercer a função de armazenamento de extrativos. Pode ainda dar-se o caso de este processo se iniciar

devido a ataques externos, como por exemplo, um ataque de fungos ou viroses (Panshin & Zeeuw, 1980, p. 121; Hoadley, 1997, p. 17; Klock, et al., 2005, p. 15).

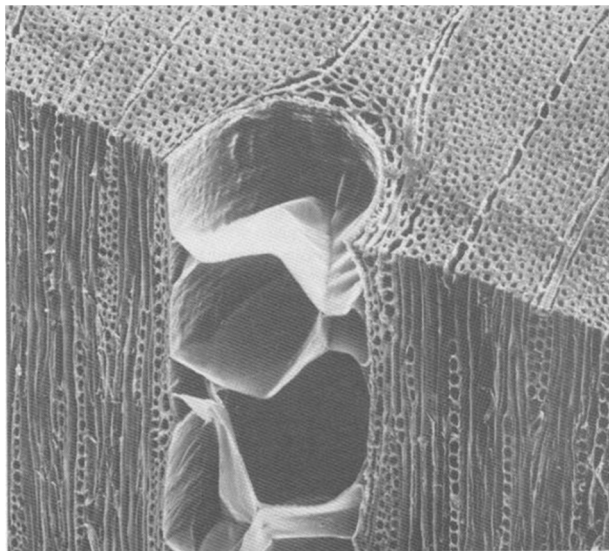


Imagem 21 Aspeto microscópico da tilose num vaso de madeira de Nogueira Americana – *Carya* sp. (Panshin & Zeeuw, 1980).

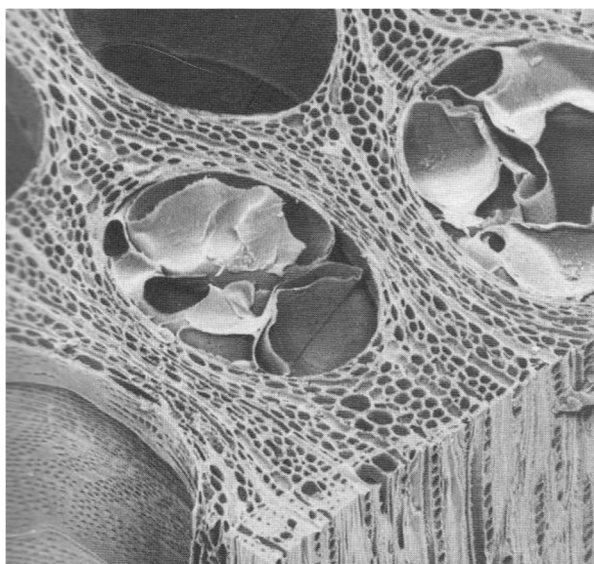


Imagem 22 Aspeto microscópico da tilose num vaso de madeira de Carvalho Branco (Hoadley, 1997).

### **3.5 Ultra-estrutura da parede celular**

No que diz respeito às células, existem dois estádios de transformação celular: a célula viva, com o seu interior preenchido e cheio de citoplasma que envolve o núcleo da célula, e a célula morta, com o seu interior vazio ou cheio de matéria denominada de extraíveis.

Tanto a célula viva como a célula morta compõe-se de uma parede primária, formada por microfibrilas de celulose e polioses (hemicelulose) que se cruzam e uma matriz de lenhina, onde, no seu interior, se encontra o núcleo envolvido de citoplasma (matéria coloidal semifluida). Quando a célula morre, o seu interior é substituído por uma nova parede, chamada parede secundária e que se subdivide em três camadas designadas de S1, S2 e S3 (imagem 23), também nomeadas de camada exterior, camada média e camada interior (Fengel & Wengener, 1989, pp. 13-16; Panshin & Zeeuw, 1980, pp. 96-104; Unger, et al., 2001, pp. 14-15; Klock, et al., 2005, p. 17). Estas camadas são constituídas por microfibrilas de celulose, hemiceluloses e lenhina e distinguem-se pelo ângulo dos arranjos estruturais.

Na camada mais exterior S1, estão dispostas helicoidalmente, formando uma espiral formada por microfibrilas dispostas num ângulo de 45°. No entanto, existem dois casos de exceção onde isso não ocorre, no *Taxus Baccata* (Teixo) e no *Abies Alba* (Abeto), onde as microfibrilas se dispõem quase perpendiculares ao sentido axial da célula, sendo este, um excelente agente identificador destas madeiras (Hoadley, 1998, p. 18; Guerreiro & Glória, 2006, pp. 32-36).

A camada mediana S2 é mais espessa que a S1 e a S3. Nesta camada as fibrilas estão dispostas praticamente paralelas em relação ao sentido longitudinal da célula.

Por fim na última, a camada S3 ou camada terciária verifica-se que as fibrilas se dispõem praticamente paralelas ao sentido longitudinal da célula. De acordo com Umberto Klock, Graciela Muniz, José Hernandez e Alan Andrade (2005, p. 19) “ o sistema de arranjo e disposição das fibrilas de celulose, em combinação com as substâncias solidificantes não estruturais conferem às células da madeira uma sólida mas não inflexível constituição, a



*qual resiste uma grande gama de forças que nela atuam*". Este enredo de fibrilas permite às células usufruírem de uma grande resistência mecânica que se repercute no tecido lenhoso.

Por fim, existe ainda uma camada verrugosa na parte interna da parede S3, descrita como uma membrana muito fina e amorfa (Fengel & Wengener, 1989, p. 15; Panshin & Zeeuw, 1980, p. 100; Unger, et al., 2001, p. 14; Klock, et al., 2005, p. 17).

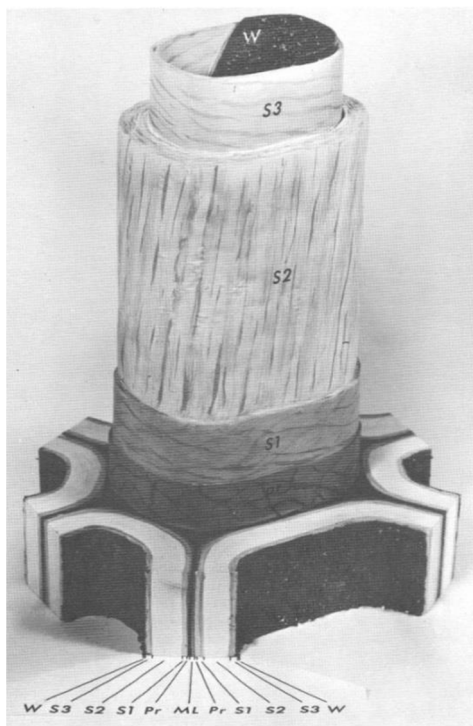


Imagem 23 Esquema da construção da parede celular (Panshin & Zeeuw, 1980, p. 101).

### **3.6 Constituição química da madeira**

Em termos químicos, na sua formação básica, a madeira não assume grandes diferenças entre as várias espécies existentes. A sua constituição elementar é organizada por elementos químicos de Carbono (C), Hidrogénio (H), Oxigénio (O) e pequenas percentagens de Azoto (N), bem como por pequenas percentagens de minerais como o Potássio (K), Cálcio (Ca), Magnésio (Mg) e outros, em menor percentagem, que dependem de espécie para espécie e da região de origem (Fengel & Wengener, 1989, p. 26; Klock, et al., 2005, pp. 20-22).

Da junção e composição destes elementos nascem as moléculas e macromoléculas que formam um primeiro grupo de elementos, cuja concentração varia consoante a espécie, formando a composição principal da madeira.

Estas são os compostos principais do tecido lenhoso, de grande peso molecular, que podem ser constituídas por mais do que um monómero (Ex: glicose, manose etc.), dando origem aos polímeros como é o caso da celulose, polioses, lenhina e substâncias poliméricas secundárias.

- Celulose - É um dos componentes que a natureza produz em maior quantidade, sendo também o principal elemento da madeira. Forma-se a partir dos monómeros de  $\beta$ -D-Glicose ( $C_6H_{12}O_6$ ) que se unem entre si pelas pontes de hidrogénio, formando assim um polímero com um grande número de monómeros de  $\beta$ -D-Glicose repetidos, representado com a fórmula química ( $C_6H_{10}O_5$ ). Constitui entre 42% a 47% da composição do tecido lenhoso, quer das Folhosas, quer das Coníferas e é o principal constituinte das paredes celulares (Fengel & Wengener, 1989, p. 26; Melo, 1999, pp. 43-48; Klock, et al., 2005, p. 22);

- Polioses ou hemiceluloses - É o grupo de monossacarídeos, denominados de açúcares neutros que se dividem, em dois grupos: as hexoses (manose, galactose) e as pentoses (xilose e arabinose). Estão intimamente ligadas às cadeias de celulose, mas distinguem-se da celulose por serem polissacarídeos compostos por monómeros diferentes, enquanto, a celulose é apenas composta por monómeros  $\beta$ -D-Glicose. Constituem o segundo grupo mais importante de macromoléculas do tecido lenhoso (Fengel e Wegener 1989:26; Melo 1999:48-49; Klock *et al.* 2005:22);
- Lenhina - Embora formada também por C, H e O (como a celulose e as hemiceluloses) este composto não tem estrutura de sacarídeo. É constituída por macromoléculas mais complexas que as polioses e apresentam uma forma completamente diferente. A sua base é constituída por unidades de fenilpropano. Morfologicamente a lenhina é um material amorfo e é o constituinte principal de ligação das células, conferindo-lhe um reforço da resistência mecânica do tecido lenhoso (Fengel & Wengener, 1989, p. 26; Melo, 1999, p. 50; Klock, et al., 2005, p. 22). Outro aspeto é a composição química da lenhina e das polioses que também diferem entre as Coníferas e as Folhosas (Fengel & Wengener, 1989, pp. 26-27; Melo, 1999, pp. 52-53; Klock, et al., 2005, p. 22);
- Substâncias poliméricas secundárias - Correspondem às proteínas existentes na madeira compostas por amido e substâncias pécticas. Ocorrem principalmente na parte viva do lenho: Câmbio e Floema (Klock, et al., 2005, p. 22).

Um segundo grupo de substâncias que compõem a madeira são os minerais e produtos orgânicos. Estes são elementos contaminantes externos à sua constituição básica.

Ambos caracterizam-se por elementos de baixo peso molecular e compõem uma pequena percentagem da massa do tecido lenhoso. Por esse mesmo motivo, não possuem uma grande influência no peso real da madeira, no entanto estão intimamente ligadas às características físicas da madeira, sendo estas que determinam a cor, o cheiro, a resistência e a capacidade de serem trabalhadas. Para além disso, sendo muitas destas substâncias extremamente tóxicas para muitos microrganismos, a sua quantidade condiciona a maior ou

menor resistência natural à biodegradação das madeiras. Atualmente estas substâncias, por serem muito variadas e não possuírem, pelo menos para já, uma definição clara do sistema, têm-se optado por dividi-las em matéria orgânica e matéria inorgânica (Klock, et al., 2005, p. 26).

Os denominados de matéria inorgânica dão origem às cinzas quando a madeira é incinerada e a substâncias orgânicas, também designadas de matérias extraíveis, resultam em hidrocarbonetos aromáticos fenólicos, terpenos, ácidos alifáticos e álcoois.

Outra distinção pode ser feita de acordo com a sua solubilidade: matéria solúvel em água ou matéria solúvel em solventes orgânicos (Fengel & Wengener, 1989, p. 27; Klock, et al., 2005, p. 22).

Nesses compostos inserem-se os grupos:

- Hidrocarbonetos aromáticos fenólicos - principalmente constituídos por compostos tanínicos (polifenóis), que se dividem, em taninos hidrolisáveis e flobafenos condensados não hidrolisáveis. Apresentam-se na árvore sobre a forma de ácidos fenólicos: ácido gálico; ácido hexahidroxidifênico que podem ser hidrolisados por ácidos ou enzimas;
- Terpenos – são polímeros do isopreno ( $C_5H_8$ ) geralmente responsáveis pelo odor, encontram-se principalmente nas madeiras em forma de resinas ou óleos;
- Ácidos alifáticos – correspondem ao grupo dos ácidos gordos saturados e insaturados, identificam-se quimicamente pela presença do grupo carboxila ( $COOH$ ) e dão origem às gorduras, óleos, ceras e sais de cálcio no caso do ácido dihidroxicarboxílico e hidroxicarboxílico;
- Álcoois – correspondem às essências vegetais sob a forma de ésteres, quimicamente, derivam dos hidrocarbonetos pela substituição de um átomo de hidrogénio pelo grupo hidróxilo ( $OH$ ) (Fengel & Wengener, 1989, p. 27; Klock, et al., 2005, p. 22).

## **4. Processos de degradação em meios saturados**

### **4.1 A relação do meio ambiente com a degradação da madeira**

A degradação em meios saturados ou submersos é diferente da degradação em meio seco. Tendo em conta que este ambiente é completamente húmido, grande parte dos seres vivos potenciais Destruidores da madeira é anulada (Berducou, 1990, pp. 235-241; Blanchete, 2000, p. 189). Os ambientes húmidos são pouco oxigenados e reduzem substancialmente a capacidade de degradação dos agentes xilófagos (Berducou, 1990, p. 241; Blanchete, 2000, p. 189; Kim & Adya, 2000, p. 146; Fortes & Travieso, 2008, p. 97).

Durante muito tempo pensou-se que a degradação da madeira poderia ser de foro químico. No entanto, estudos recentes revelaram que a madeira sofre essencialmente uma degradação biológica, através da ação de bactérias, fungos e algas, sendo que, mesmo em ambientes praticamente anaeróbicos, estes microrganismos são capazes de produzir danos importantes (Bjordal, et al., 1999). Através da microscopia eletrónica foi possível analisar de uma forma concreta a atuação das bactérias e a morfologia da madeira após o ataque (ver ponto 4.5). (Bjordal, et al., 1999). Estes estudos têm sido uma preocupação constante na comunidade científica, no sentido de compreender e identificar estes microrganismos, reconhecendo que existem lacunas na perceção do seu comportamento, capacidade e divisão (Highley, 1999; Bjordal, et al., 1999; Kim & Adya, 2000; Jurgens & Blanchete, 2005; Nilsson & Klaassen, 2008; Blanchete, 2000).

O entendimento da ação dos agentes biológicos têm ajudado os conservadores a mitigar a degradação da madeira, principalmente na vertente da preservação *in situ* (Highley, 1999; Bjordal, et al., 1999; Kim & Adya, 2000; Jurgens & Blanchete, 2005; Nilsson & Klaassen, 2008). Pelas dificuldades da preservação destes materiais, a conservação de artefactos neste tipo de ambiente é uma opção cada vez mais válida, à medida que a compreensão dos mecanismos envolvidos na degradação da madeira é maior. Até ao momento é clara a influência do meio na capacidade de degradação dos microrganismos e começam a ser conhecidos os seus limites (Curci, 2006, pp. 1-5). Porém, alguns seres vivos, tais como a

bactéria Erosiva parece ser difícil de eliminar, mesmo em ambientes com níveis muito baixos de oxigênio, ou mesmo anaeróbico, embora, neste último, os resultados ainda não sejam conclusivos (Nilsson & Bjordal, 1998, pp. 68-69; Bjordal, et al., 1999, p. 63; Kim & Adya, 2000, pp. 139-140; Curci, 2006, pp. 1-5). Sobre este assunto, os biólogos G. Caneva, M.P. Nueari e O. Salvador (1994, p. 64). acrescentam a importância vital do azoto na vida das bactérias, defendendo que se o eliminarmos do ambiente a degradação bacteriológica aparentemente cessa .

Tal como ao oxigênio, os estudos têm apontado uma extraordinária resistência das bactérias ao pH (Bjordal, et al., 1999, p. 69; Curci, 2006, p. 5). Exemplo disso é o caso do famoso navio de guerra VASA, que atualmente sofre de degradação por bactéria Erosiva. Em certas tábuas da embarcação verificou-se pH igual a 2. Esta acidificação parece não interferir na ação desta bactéria (Jurgens & Blanchete, 2005, p. 4; Nilsson & Klaassen, 2008, pp. 55-58). A única forma que tem demonstrado surtir um considerável abrandamento da degradação das madeiras é quando estas estão completamente soterradas em sedimentos finos, que filtram o oxigênio e reduzem a sua presença a níveis muito baixos. Na prática, as análises realizadas por Charlotte Bjordal e Thomas Nilsson (Bjordal, et al., 1999) demonstraram que eliminam todos os agentes Destruidores com exceção da bactéria Erosiva, impondo, no entanto, um abrandamento da sua atividade. Com efeito, foi também analisado que o enterramento só produz efeito quando executado a uma profundidade superior a 50 cm (Caneva, et al., 1994, p. 77; Bjordal, et al., 1999, p. 75; Curci, 2006).

Outra exceção é quando a madeira sofre infiltrações de produtos tóxicos provenientes da oxidação de metais, tais como: o cobre, o ferro ou o chumbo. Estes elementos tornam a madeira venenosa para a maior parte dos seres vivos (Jurgens & Blanchete, 2005, p. 2).

A investigadora Jessica Curci (2006, pp. 4-5), regista ainda a profundidade como limitador para alguns organismos, como é o caso dos crustáceos, não detetados a mais de 530 metros de profundidade; ou os moluscos, sendo que os estes conseguem sobreviver em profundidades superiores, só se extinguindo após aproximadamente os 2000 metros.

Outro fator determinante é a salinidade do meio, pois alguns dos animais Destruidores são exclusivos do meio marinho e comportam níveis de salinidade específicos (Curci, 2006). Um

exemplo de incompatibilidade da concentração salina com a vida é o ambiente proporcionado pelo mar Morto, em que as concentrações de sal de 33% ultrapassam os níveis que a maior parte dos seres marinhos pode comportar que é de 32% para os moluscos e 36% para os crustáceos (Becker, 1958; Turner, 1974), ao contrário do Atlântico ou do Índico, onde possuem extraordinárias condições para a emergência de habitats. De qualquer das formas parece não existir nenhum ambiente em que a degradação não ocorra, muito por ação da bactéria Erosiva, sendo considerada como a principal causa de degradação das madeiras arqueológicas húmidas (Highley, 1999; Bjordal, et al., 1999; Kim & Adya, 2000; Jurgens & Blanchete, 2005; Nilsson & Klaassen, 2008; Blanchete, 2000).

A qualidade e espécie da madeira ditam a capacidade de resistência ao ataque. Sobre este assunto imperam dois princípios:

- Quanto maior for a densidade e a quantidade de produtos extraíveis nos seus poros, maior será a obstrução à entrada da água e consequentemente dos microrganismos (Berducou, 1990, p. 235; Kim & Adya, 2000, pp. 144-146);
- Quanto maior for a quantidade de amido, de glucose, de fontes de nitrogénio e de substâncias minerais, maior será a tendência ao ataque da madeira (Caneva, et al., 1994, p. 64; Valgánón, 2008, p. 125).

Para além destes processos naturais de degradação, outro fator a ser considerado é a ação antrópica nomeadamente, pelas atividades arqueológicas. A escavação das diferentes camadas de sedimentos depositados sobre os artefactos de madeiras oxigena as estruturas e o ambiente em seu redor, promovendo a formação de um ambiente oxidante e consequentemente um aumento da atividade biológica degradativa (Blanchete, 2000, p. 200). Este fato tem causado a perda de objetos, detetados inicialmente em boas condições e que, após a intervenção arqueológica, sofrem uma rápida degradação, e perda dos artefactos em poucos anos ou até mesmo meses (Blanchete, 2000, p. 200). A compreensão desta dinâmica tem sido um objetivo primordial da conservação, principalmente no que diz respeito à preservação *in situ*, na busca de aumentar a longevidade do património submerso.

## **4.2 Degradação da celulose**

A madeira é constituída essencialmente por celulose, lenhina, hemiceluloses e extraíveis, sendo uns mais resistentes à degradação do que outros.

A celulose é um dos elementos mais atacados e, na maior parte dos casos, o primeiro a ser destruído. A forma morfológica da degradação depende dos fatores mais influentes. No entanto, o sistema de deterioração é idêntico. A celulose é caracterizada por ser uma molécula cristalina com algumas zonas amorfas. Essas zonas amorfas são mais suscetíveis a ser atacadas, favorecendo a hidrólise enzimática (Berducou, 1990, pp. 237-238; Caneva, et al., 1994, p. 63; Fortes & Travieso, 2008, p. 96). Os microrganismos que degradam a madeira possuem a capacidade de produzir enzimas que quebram, numa primeira fase, as ligações da molécula da celulose, através das zonas amorfas. Após a quebra da molécula da celulose, os microrganismos produzem a enzima 1,4  $\beta$  gluconase, que promove a hidrólise da celulose em glicose, um monossacarídeo solúvel em água (Berducou, 1990, pp. 237-238; Caneva, et al., 1994, pp. 63-64; Valgánón, 2008, p. 125). Este processo pode ser efetuado por um só agente ou em conjunto, sendo que nem todos possuem a capacidade para dissolver totalmente os compostos lenhosos.

A degradação biológica e química da celulose e dos outros compostos da madeira será abordada no ponto 4.5 de forma mais pormenorizada.

## **4.3 Degradação das hemiceluloses**

A degradação das hemiceluloses processa-se da mesma forma que a celulose, mas mais facilitada por ser menos resistente ao ataque biológico (Caneva, et al., 1994, p. 64; Kim & Adya, 2000, p. 148). Pode ser facilmente hidrolisável pela maior parte das bactérias e fungos, utilizando a enzima hemicelulase no processo de hidrólise das hemiceluloses (Caneva, et al., 1994, p. 64; Valgánón, 2008, p. 125).



#### **4.4 Degradação da Lenhina**

A lenhina é um polímero tridimensional muito complexo composto por álcoois aromáticos. Embora seja um material amorfo, as suas complexas ligações de carbono tornam-na um material difícil de decompor (Caneva, et al., 1994, pp. 64-71). Quimicamente é composta por ligações de unidade de Carbono C9 de p-hidroxilfenila, guaiacila e siringila, sendo que nas Folhosas é constituída principalmente por guaiacila e siringila (tipo G-S), e as Coníferas por guaiacila e p-hidroxilfenila (tipo G-H) (Piló-Veloso, et al., 1993, p. 435; Colombini, et al., 2009, p. 64). Os estudos mais recentes indicam que não existe uma degradação da lenhina, mas sim, uma alteração da sua estrutura química. A sua modificação química dá-se pela oxidação dos grupos funcionais, originando nas Gimnospermas a Vanilina e nas Angiospermas a Vanilina e o Siringilaldeído (Piló-Veloso, et al., 1993, p. 435; Colombini, et al., 2009, pp. 61-64). Apenas os fungos da Podridão Branca, como são exemplo o *Xilaria hypoxylon* e o *Xilaria polymorpha* do grupo dos Ascomicóticos (ver ponto 4.5.3), conseguem deteriorar a lenhina, mas felizmente o seu ataque em ambientes submersos é quase nulo.

#### **4.5 Biodegradação**

##### **4.5.1 Bactérias**

O estudo das bactérias é do ponto de vista científico ainda muito recente, pelo que ainda se apresenta disparidade entre autores e investigadores. Embora a maioria se mantenha por três tipologias de bactérias, existem outros que alargaram o número de divisões, denominando-as, em alguns casos, com designações diferentes. Não sendo objeto principal do estudo da nossa tese cabe-nos expor os diferentes pontos de vista, até porque não possuímos meios para produzir experimentos de forma a construir uma opinião fundamentada. De qualquer das formas é ponto assente que as bactérias são o inimigo número um das madeiras submersas e saturadas (Highley, 1999; Bjordal, et al., 1999; Kim &

Adya, 2000; Blanchete, 2000; Jurgens & Blanchete, 2005; Nilsson & Klaassen, 2008; Bjordal, et al., 2006).

A maior parte dos investigadores considera que as madeiras são degradadas por três tipos de bactérias: bactéria Erosiva, bactéria Tuneladora, e bactéria Cavitadora; divididas segundo a morfologia da sua degradação (Nilsson & Bjordal, 1998, pp. 68-69; Bjordal, et al., 1999, pp. 64-69; Kim & Adya, 2000, p. 136; Blanchete, 2000, pp. 191-194; Unger, et al., 2001, pp. 132-134; Jurgens & Blanchete, 2005, pp. 1-5; Curci, 2006, pp. 1-5). Outros, no entanto, acrescentam um quarto tipo, denominada Escavadora (Bjordal, et al., 1999, pp. 64-69; Blanchete, 2000, p. 191; Jurgens & Blanchete, 2005, pp. 1-5). Os investigadores Yoon Soo Kim e P. Adya (2000, p. 136) distinguem ainda uma tipologia de bactérias, como bactéria não xilófaga, devido a ser esta a primeira a atacar a madeira e só se alimentar das membranas não lignificadas das pontuações das células, sendo que Joel Jurgens e Robert Blanchete (2005) optaram pela designação de bactéria Destruidora de pontuações, acrescentando terem apenas apetite por zonas ricas em pectina, não lenhificadas – o *Margo* e o *Torus* da pontuação.

Do ponto de vista biológico, as bactérias mais comuns são as do grupo *Cytophaga*, sendo que também já foram identificadas, embora em menor quantidade, bactérias dos grupos *Cellvibrio*, *Brevundimonas* e *Pseudomonas* (Nilsson & Bjordal, 2005, p. 123). Por ser mais comum o grupo das *Cytophagas* é o mais Destruidor e compreende bactérias com inúmeras formas. No entanto, a espécie mais representativa deste grupo é a *Cytophaga-Flavobacterium-Bacteroides* (Nilsson & Bjordal, 2005, p. 124).

Já o grupo das *Pseudomonas* apresenta um tipo metabolicamente diverso, existindo espécies aeróbias e anaeróbias, podendo ser encontradas em ambientes extremos, havendo relatos da presença deste tipo de bactérias em ambientes sulfurosos e ferrosos (Nilsson & Bjordal, 2005, p. 123).

Dentro dos ambientes extremos as bactérias também podem ser classificadas segundo o seu habitat: Acidofílicas, Neutrofílicas e Alcalinofílicas (Eaton, 2005, p. 127). Ainda dentro dos vários sistemas de classificação podem ser documentadas segundo a sua tolerância ao oxigénio: Aeróbias, Anaeróbia facultativa, Aerotolerante e Anaeróbias (*Idem*, 2005). Neste

sistema, as bactérias aerotolerantes não dependem do oxigénio, nem este composto causa interferência no seu desempenho, significando que podem existir em ambientes radicais como os anaeróbicos, ácidos ou básicos (Eaton, 2005, p. 127). As bactérias do grupo das aeróbias vivem em ambientes oxigenados. Ao contrário, o grupo das anaeróbias só se encontra em locais sem oxigénio. Podemos encontrar ainda bactérias que podem viver em ambientes oxigenados ou não e enquadram-se no grupo da anaeróbia facultativa. Estas diferem das aerotolerantes por poderem utilizar o oxigénio (Eaton, 2005, p. 127). É ainda de destaque a conclusão de Hans Huisman (2005, pp. 198-201) de que as bactérias presentes em ambientes sulfúricos são no mínimo anaeróbias facultativas.

Sobre os tipos de bactérias optamos, para um melhor discernimento, descrever, em seguida, o que caracteriza os quatro tipos principais:

#### **4.5.1.1 Bactéria Erosiva**

Tal como o nome indica trata-se de um microrganismo que degrada a madeira através da erosão das paredes celulares (Nilsson & Bjordal, 1998; Bjordal, et al., 1999; Kim & Adya, 2000; Blanchete, 2000; Unger, et al., 2001; Jurgens & Blanchete, 2005; Curci, 2006). A bactéria segue em geral o sentido das fibras da camada S2, conferindo, muitas das vezes, uma forma estriada à parede celular, sendo a secção da estria cónica e no sentido axial da célula (Kim & Adya, 2000, pp. 139-140; Jurgens & Blanchete, 2005, p. 5).

A bactéria inicia a sua invasão pelo lúmen, perfurando a camada S3 da parede secundária até atingir a camada S2 da mesma parede (ver o ponto 5.4, imagem 28). Depois de consumir a camada S2, começa a alimentar-se da camada S1, seguindo para a parede primária, parando na lamela média que geralmente pouco sofre (Bjordal, et al., 1999, p. 64; Jurgens & Blanchete, 2005, p. 3). À semelhança dos insetos xilófagos terrestres, esta bactéria deixa um rasto de uma espécie de “lodo bacterial” e lenhina residual (Bjordal, et al., 1999, p. 64). É a mais resistente de todas

as bactérias e foi encontrada em todo o tipo de ambientes, até nos mais severos e em condições praticamente anaeróbicas (Nilsson & Bjordal, 1998, pp. 68-69; Bjordal, et al., 1999, p. 69). Da mesma forma parece ser a bactéria que mais fundo penetra na madeira, provavelmente derivado à sua condição para tolerar ambientes com pouca concentração de oxigénio, sabendo que a quantidade deste gás é mais escasso à medida que se avança para o interior da madeira. (Bjordal, et al., 1999, p. 69; Bjordal & Nilsson, 2001, pp. 236-240; Jurgens & Blanchete, 2005, p. 4).

Até ao momento só a fasquia dos 60 metros de profundidade parece conseguir anular esta bactéria (Caneva, et al., 1994).

#### **4.5.1.2 Bactéria Tuneladora**

Este tipo de bactéria deixa um rasto de túneis na camada S2 e S1 da parede secundária da célula, podendo por vezes degradar muito superficialmente a lenhina (Blanchete, 2000, p. 194; Jurgens & Blanchete, 2005, p. 3). Iniciam o seu ataque entrando pelas pontuações das células diretamente na parede secundária, crivando-a de túneis numa fase avançada, podendo dar origem ao colapso da parede secundária (Jurgens & Blanchete, 2005, p. 3). Têm a particularidade de atacar todas as camadas da parede secundária e a lamela média, embora esta última não seja muito afetada (Kim & Adya, 2000, p. 138; Jurgens & Blanchete, 2005, p. 3). Ainda assim, a lenhina parece sofrer modificações químicas que alteram as características e a resistência da lamela média (Kim & Adya, 2000, p. 149). Tal como a bactéria Erosiva deixa um rasto de “lodo bacterial” durante o seu processo de hidrólise enzimática da madeira (Kim & Adya, 2000, p. 149). Não tolera ambientes pouco oxigenados e devido a essa razão a sua área de atuação situa-se na superfície da madeira (Bjordal, et al., 1999, p. 68; Jurgens & Blanchete, 2005, p. 5; Curci, 2006, p. 5).

#### **4.5.1.3 Bactéria Cavitadora**

É caracterizada por produzir cavidades na camada S2 da parede secundária, e à semelhança da bactéria Erosiva acede à camada S2, furando a camada S3 ou como a bactéria Tuneladora pode entrar pelas pontuações (Jurgens & Blanchete, 2005, p. 3).

Numa fase avançada a camada S3 pode colapsar sobre a S2, infligindo graves danos nas paredes estruturais. Ainda que não aparente ter a capacidade de degradar a lamela média, ataca também a camada S1 da parede secundária (Jurgens & Blanchete, 2005, p. 3). As cavidades caracterizam-se por possuir uma forma de diamante posicionado sobre o eixo longitudinal, podendo dispor-se paralelamente ou transversalmente ao sentido longitudinal da célula (Jurgens & Blanchete, 2005, p. 3). Segundo Joel Jurgens e Robert Blanchete (2005) não existem ainda provas concretas quanto à capacidade de estas bactérias tolerarem ambientes anaeróbicos, no entanto ainda não foram detetadas em ambientes com estas características.

#### **4.5.1.4 Bactéria Escavadora**

A bactéria Escavadora, ao contrário das restantes, trabalha em simbiose com as demais, uma vez que se alimenta dos resíduos de matéria deixados pela bactéria Erosiva e Tuneladora (Jurgens & Blanchete, 2005, p. 4). Ao limpar esses resíduos aumenta as dimensões dos vazios, tomando a parede celular ainda mais instável e frágil (Jurgens & Blanchete, 2005, p. 4; Bjordal, et al., 1999, p. 69).

Outra característica é que consegue acompanhar a bactéria Erosiva em locais com níveis de oxigénio muito baixos, conseguindo também ela, tolerar esse ambiente inóspito.

#### **4.5.2 Microalgas**

As microalgas pertencem ao grupo de espécies *Algae* e são seres vivos unicelulares microscópicos que se caracterizam por serem autotróficos, isto é, que produzem energia para viver através da fotossíntese.

Dentro deste grupo encontram-se também as cianobactérias conhecidas por algas verdeazuladas e, também elas, fotossintéticas (Tomaselli & Richmond, 2004, p. 3). No entanto são seres procariotas, isto é, não possuem um núcleo celular definido em que o material genético se mistura com o citoplasma, ao contrário das microalgas que são eucariotas, em que o seu núcleo está perfeitamente organizado e dividido por membranas (Valgánón, 2008, p. 156). Esta diferença tem levado alguns autores a não considerar a cianobactérias como algas do Reino Protistas mas sim como bactérias do Reino Moneras.

As microalgas identificam-se por terem um talo sem raiz, folhas ou caule e contêm clorofilas e pigmentos fotossintéticos (Miao & Wu, 2006; Derner, et al., 2006; Holanda, et al., 2011; Cardoso, et al., 2011). Podem encontrar-se tanto em água doce (ambiente hiposalino) como em água salgada (ambiente hipersalino), ou no solo húmido (Holanda et al 2011).

No entanto, no que diz respeito às madeiras arqueológicas subaquáticas, as espécies de microalgas que se encontram na superfície destes materiais são do grupo (termo botânico divisão) *Bacillariophyta*, também conhecidas por Diatomáceas (Valgánón, 2008). Estas são seres unicelulares, coloniais que se destiguem das restantes espécies de algas por terem paredes celulares compostas de sílica, designadas de frústulo e por serem constituídas por duas metades, que se justapõem uma à outra, chamadas de valvas (Smith, 1955, p. 186; Valgánón, 2008).

Na madeira submersa, as microalgas produzem uma patina biológica de diversas cores, agregando-se à superfície da madeira. Contudo os danos na madeira parecem ser mínimos (Valgánón, 2008, p. 127).

#### **4.5.3 Fungos**

Os fungos pertencem ao Reino *Fungi* e têm a particularidade de pertencerem a um grupo diferente dos animais, plantas e bactérias. Podem parecer plantas à primeira vista, porém não possuem clorofila, elemento indispensável para pertencer ao reino das plantas, e contêm quitina nas suas células, elemento constituinte das células animais. São um dos principais destruidores dos artefactos de madeira, no que diz respeito ao ambiente terrestre (Caneva, et al., 1994; Fortes & Travieso, 2008).

Todavia, no ambiente alagado e submerso a sua atividade e capacidade destrutiva é muito limitada, devido à fraca compatibilidade com este tipo de ambientes (Caneva, et al., 1994; Blanchete, 2000; Fortes & Travieso, 2008; Valgánón, 2008). Das duas classes de fungos conhecidos, os grupos dos Ascomycota e Deuteromycetes são os mais perigosos para as madeiras arqueológicas húmidas, provocando a Podridão Mole (Bjordal, et al., 1999, p. 64; Kim & Adya, 2000, pp. 141-143). Embora os fungos do grupo Basidiomycetes não tenham uma expressão significativa na degradação em ambientes submersos, pode aparecer nas madeiras provenientes destes meios, através da degradação por Podridão Branca e Podridão Parda, características deste tipo de fungos (Blanchete, 2000, pp. 135-136; Unger, et al., 2001, p. 117; Jurgens & Blanchete, 2005, p. 5). Devido à intolerância do fungo da Podridão Parda ao meio saturado e submerso, este tipo de degradação não acontece nestes locais, contudo a sua presença pode indicar que o objeto já se encontrava em processo de deterioração antes de ter sido submerso (Nilsson & Bjordal, 1998, p. 67; Kim & Adya, 2000, p. 147).

No caso dos fungos de Podridão Branca, existem alguns relatos da presença de atividade e degradação de madeira submersa por este tipo de fungo, embora esta situação seja muito rara. Geralmente este tipo de degradação dá-se à semelhança da Podridão Parda, antes do objeto ser afundado (Nilsson & Bjordal, 1998, p. 66).

#### **4.5.3.1 Podridão Mole**

É o tipo de podridão característica das madeiras saturadas. Na maior parte dos casos é causada pelas bactérias, ainda assim em algumas situações os fungos podem ser os principais responsáveis (Caneva, et al., 1994, p. 72; Bjordal, et al., 1999, p. 64; Blanchete, 2000, p. 191; Jurgens & Blanchete, 2005, p. 5; Valgãón, 2008, p. 155).

São fungos heterotrófos, caracterizam-se pela fixação local e pertencem ao grupo dos Ascomycota e Deuteromycetes, entres os quais, se encontram as espécies, *Xilaria*, *Chetomium* e *Cephalosporium* (Valgãón, 2008, p. 155). Produzem a deterioração através de hidrólise enzimática e podem desenvolver-se dois tipos de degradação (Nilsson & Bjordal, 1998, pp. 67-68; Blanchete, 2000, p. 191; Unger, et al., 2001, pp. 104-105; Jurgens & Blanchete, 2005, p. 5):

Tipo I (formação cavítica) – caracterizado por cavidades angulares de secção cónica na camada S2 da parede secundária da célula, seguindo a orientação das microfibrilas na secção longitudinal. Estes fungos penetram nas paredes pelo Lúmen, perfurando posteriormente a camada S3 com furos de diâmetro pequeno até à camada S2 (Jurgens & Blanchete, 2005, p. 5). O processo é feito por ciclos interrompidos. As Hifas penetram na parede, alinhando-se com as microfibrilas, parando o processo de crescimento e em seguida iniciam a cavitação. Quando a cavidade se alonga demasiado, a Hifa interrompe a escavação e inicia o crescimento da *Probóscide Hifa*. Seguidamente volta a interromper o crescimento da “tromba” e retoma a escavação de uma nova cavidade, reproduzindo este ciclo enquanto crava a camada S2 e S1 de cavidades ligadas entre si por terminais angulados em forma de bico (Nilsson & Bjordal, 1998, pp. 67-68; Kim & Adya, 2000, p. 143; Jurgens & Blanchete, 2005, p. 5). A camada S3 sofre apenas danos mínimos causados pela perfuração inicial (Jurgens & Blanchete, 2005, p. 5);



Tipo II (formação Erosiva) – apresenta-se com a parede secundária completamente destruída por forças de erosão e alguma destruição da lamela média, quando atinge um estado muito avançado de deterioração (Nilsson & Bjordal, 1998, pp. 67-68; Jurgens & Blanchete, 2005, p. 5). Sofre ainda uma variante consoante a espécie da madeira. Nas Coníferas toma um aspeto canelado, envolvendo a destruição de toda a parede secundária desde o lúmen até à lamela média (Jurgens & Blanchete, 2005, p. 5). Nas Folhosas degrada apenas a camada S2 com alguma perturbação da camada S1, não afetando a lamela média (Jurgens & Blanchete, 2005, p. 5).

Em qualquer dos casos, este tipo de degradação só é possível em águas muito oxigenadas, tratando-se de um organismo aeróbico (Caneva, et al., 1994; Bjordal, et al., 1999; Blanchete, 2000; Jurgens & Blanchete, 2005; Fortes & Travieso, 2008; Valgãón, 2008).

O seu nome deriva das transformações físicas na madeira, tornando-se frágil e esponjosa, com alto nível de elasticidade.

#### **4.5.3.2 Podridão Branca**

Ao contrário da Podridão Mole, os fungos da Podridão Branca conseguem degradar todos os componentes da madeira, incluindo a lenhina (Blanchete, 2000, p. 191; Kim & Adya, 2000, p. 136). Estes fungos pertencem ao grupo dos *Basidiomycetes* que é formado por numerosas espécies heterogenias (Nilsson & Bjordal, 1998, p. 65; Blanchete, 2000, p. 191). A sua degradação é muito mais devastadora quando se trata de espécies que degradam preferencialmente a lenhina, destruindo o pilar estrutural do tecido lenhoso. Outras espécies preferem degradar a celulose e a lenhina em simultâneo (Blanchete, 2000, p. 191; Kim & Adya, 2000, p. 143). O seu comportamento produz estragos em profundidade através das Hifas colonizando o

lúmen da célula (Nilsson & Bjordal, 1998, p. 65; Blanchete, 2000, p. 191). São capazes de produzir enzimas lenhínicas que hidrolisam as paredes das células, segundo dois tipos patológicos distintos:

- Por erosão generalizada das paredes da célula, seguindo numa fase final para a lamela média, acabando por decompor totalmente a madeira;
- Por difusão, iniciando a destruição da lamela média, seguindo para hemicelulose e finalmente decompõe a celulose, destruindo totalmente o tecido lenhoso (Nilsson & Bjordal, 1998, p. 65; Unger, et al., 2001, pp. 102-104).

Robert Blanchete (2000, p. 191) denomina-as de erosão progressiva das células e degradação difusa e, Yoon Soo Kim e P. Adya (2000, p. 143) caracterizam a primeira por erosão em calha, criando uma aspeto canelado e a segunda por cavidades difusas.

No mundo subaquático o seu ataque é muito raro, sendo geralmente a sua presença associada a degradação anterior à submersão (Nilsson & Bjordal, 1998, p. 66; Kim & Adya, 2000, p. 147).

#### **4.5.3.3 Podridão Parda**

É causada por fungos muito agressivos, que despolimerizam rapidamente a celulose (Blanchete, 2000, p. 192; Kim & Adya, 2000, p. 143; Unger, et al., 2001, p. 102). Estes também pertencem ao grupo dos *Basidiomycetes*. O seu comportamento, de difícil perceção, contribui para uma deteção tardia das madeiras atacadas e de um tratamento preventivo eficaz (Nilsson & Bjordal, 1998, pp. 66-67; Kim & Adya, 2000, p. 143; Unger, et al., 2001, p. 102).

Ao contrário da Podridão Branca, este fungo não degrada a lenhina, mas sim a modifica quimicamente e produz uma degradação do tipo difuso (Nilsson & Bjordal,

1998, pp. 66-67; Kim & Adya, 2000, p. 143). A sua destruição é tal, que quando muito avançada, a madeira pode desintegra-se completamente (Nilsson & Bjordal, 1998, pp. 66-67). A cor parda vem do resíduo deixado pelo fungo durante a degradação da madeira (Blanchete, 2000, p. 192; Bjordal, et al., 1999, p. 69). Este tipo de podridão e fungo não existe nos meios aquáticos, no entanto, à semelhança da Podridão Branca também podem ser encontrado nas madeiras arqueológicas saturadas, devido a ataque anterior à submersão do artefacto (Nilsson & Bjordal, 1998, p. 67).

#### **4.5.4 Moluscos**

Os moluscos são seres vivos invertebrados, que podem viver em águas marinhas, fluviais ou em terra. Tendo em conta o tema da tese insidiremos apenas nos aquáticos. Caraterizam-se por ter um corpo mole, que em muitas espécies é protegido por uma proteção composta por um material rico em carbonato de cálcio, como é o caso das conchas (Maitland, 1978, p. 49).

Existem vários grupos de moluscos, dentro dos quais se destacam: os *Teredinidae* - *Teredo Navalis* e *Bankia* - e os *Pholodaceae* – *Martesia* e *Xylóphaga* (Caneva, et al., 1994, p. 78; Highley, 1999, p. 13; Curci, 2006, p. 3; Valgánón, 2008, pp. 189-196). O seu processo de degradação é extremamente danoso para as madeiras. Crivam a superfície de orifícios que escavam da periferia para o interior (Caneva, et al., 1994, p. 78).

O *Teredo Navalis* e a *Bankia* nascem e crescem em ambientes aquáticos, instalando-se em madeiras submersas (Highley, 1999, p. 13; Unger, et al., 2001, p. 134; Gonzaga, 2006, pp. 50-51). Nestas, evoluem e desenvolvem um par de conchas na cabeça, enquanto a cauda se mantém agarrada à madeira, crescendo em comprimento e diâmetro (Highley, 1999, p. 13; Unger, et al., 2001, p. 134; Gonzaga, 2006, pp. 50-51). Quando a comunidade destas espécies se aglomera numa superfície deixa a madeira completamente crivada de cavidades, com interiores alveolares e com uma camada calcária a revestir as paredes das depressões (Highley, 1999, p. 13; Valgánón, 2008, p. 130). Estas espécies podem crescer

entre 30 a 120 cm dependendo do género (Highley, 1999, p. 13; Valgãón, 2008, p. 130). São organismos que necessitam de determinados parâmetros de salinidade e podem existir em profundidades de 200 metros (Curci, 2006, p. 4).

A *Martesia* e a *Xylóphaga*, ao contrário dos *Teredinidae*, vivem dentro da sua concha. A *Martesia* entra na madeira ainda numa fase embrionária, deixando um orifício de entrada na superfície, ampliando a cavidade interior à medida que cresce (Highley, 1999, p. 14). O seu tamanho máximo é de 64 mm de comprimento e 25 mm de diâmetro e podem sobreviver até aos 2000 metros de profundidade (Highley, 1999, p. 4; Curci, 2006, p. 4).

#### **4.5.5 Crustáceos**

Os crustáceos são também seres vivos invertebrados, no sentido em que não possuem um esqueleto interno, no entanto têm um exoesqueleto rígido composto por quitina, o que lhes confere articulação e proteção (Maitland, 1978, p. 53).

Neste grupo inserem-se as espécies *Limnória*, *Sphaeroma* e *Chelura* que ao contrário dos moluscos não se fixam permanentemente num só lugar (Valgãón, 2008, p. 196). O seu ataque só se dá em regiões de interface ar/água, sendo que a madeira deve estar apenas parcialmente submersa (Caneva, et al., 1994, p. 78; Highley, 1999, p. 13; Jurgens & Blanchete, 2005, p. 5; Curci, 2006, p. 3; Gonzaga, 2006, p. 50; Fortes & Travieso, 2008, p. 97; Valgãón, 2008, pp. 196-198). A *Limnória* e a *Sphaeroma* constroem galerias muito curtas na superfície da madeira, não mais do que 1 cm de profundidade e 2 mm de diâmetro. Num estado avançado do ataque as paredes entre as galerias ficam de tal maneira finas que a força da ação da água é suficiente para colapsar toda a superfície (Caneva, et al., 1994, p. 78; Highley, 1999, p. 13; Valgãón, 2008, pp. 197-198). A *Limnória* pode atingir 3 a 4 mm de comprimento e a *Sphaeroma* 13 mm de comprimento e 6 mm de largura (Highley, 1999, p. 13).

A *Chelura* é tão nociva como as anteriores, com a diferença de produzir galerias de maior diâmetro, com cerca de 2,5 mm (Valgãón, 2008, pp. 196-197).

#### **4.6 Degradação física**

Outra forma de degradação é a de contacto físico dos objetos com outros objetos ou animais. Neste ponto apenas se considera degradação física toda a deterioração causada por impacto, provocando deformação ou quebra do artefacto. Esta degradação pode ser causada antes ou durante o período de submersão e abandono e, portanto, as causas podem ser variadíssimas (Berducou, 1990, p. 235).

Com vista ao seu melhor reconhecimento enumeramos, de seguida, a morfologia da degradação e os vários tipos de causas possíveis (Berducou, 1990, p. 235).

Quebras:

- Podem ser causados pelos impactos acidentais (naufrágios)
- Pela utilização enquanto objeto útil e posterior abandono
- Hidrodinâmica do meio, provocando oscilação e contacto entre dois ou mais objetos.

Deformação:

- Deformação por contacto
  - Embate entre objetos
  - Desgaste por contacto com partículas suspensas, provocando um efeito abrasivo, ou por contacto com outro objeto em movimento, que produzam fricção nas suas superfícies.
  - Empenos devido a forças físicas que provoquem a alteração da forma original do objeto. Pode acontecer quando uma tábua sofre uma torção durante um impacto, obrigando-a a permanecer na nova forma durante um longo período.

- Deformação por expansão
  - Saturação das fibras, que provocam um aumento de volume. Em objetos compósitos pode levar também a quebra de elementos mais fracos, devido às tensões criadas pela expansão das dimensões.

#### **4.7 Degradação química**

A degradação química da madeira baseia-se no mesmo princípio da degradação enzimática e é designada por degradação hidrolítica (Klock, et al., 2005, p. 51). Esta reação é despoletada por uma base ou um ácido, que promove a hidrólise da celulose. O tipo de degradação e intensidade depende do ambiente em que se insere. Por exemplo, na presença de ácido Sulfúrico, a hidrólise da celulose é heterogénea, enquanto, na presença de ácido Fosfórico a degradação é homogénea (Klock, et al., 2005, p. 52). Contudo, este tipo de degradação é desprezado pelos conservadores, uma vez que é suplantada pela deterioração biológica que, ocorrendo de forma mais rápida inibe a possível de ação química, bem como são raros os ambientes naturais com níveis de pH tão extremos, sendo mesmo defendido por alguns autores, que no contexto arqueológico não existe degradação química (Bjordal, et al., 1999; Blanchete, 2000; Jurgens & Blanchete, 2005).

## **5. Processos de conservação de madeiras arqueológicas saturadas**

A conservação de madeiras arqueológicas saturadas em água, como já foi referenciado, não é consensual e há várias metodologias que têm sido sedos disponíveis permitem também nas diferentes situações ter há disposição várias possibilidades, umas mais conhecidas do que outras mas que importa especificar. Assim a apresentação das metodologias mais relevantes é feita por ordem de maior utilização para aquelas que estão agora a ser desenvolvidas e forma a perceber sustentadamente a proposta que é avançada neste trabalho.

### **5.1 Método de Polietilenoglicol simples (PEG)**

O método do polietilenoglicol simples é o processo mais empregue na conservação de madeiras arqueológicas húmidas, pela relativa facilidade de tratamento, por ser fácil de adquirir e por ser, entre todos, o método mais estudado e aceite pela comunidade (Hamilton, 1999, pp. 25-26).

Trata-se de um processo de impregnação de uma resina sintética, de fórmula química ( $C_{2n}H_{4n+2}O_{n+1}$ ) no tecido lenhoso.

Existem no mercado PEGs com vários pesos moleculares, sendo os mais usados em conservação o PEG 200, 400, 1500, 3000 e 4000. A sua referência numérica refere-se ao seu peso molecular. Isto significa que quanto maior for a sua massa molecular maiores são o número de monómeros nas cadeias poliméricas, influenciando o aumento da viscosidade e consequentemente a capacidade de penetração na madeira. O PEG pode ser utilizado a partir de misturas mais ou menos complexas, e que normalmente são desenhadas para cada situação específica, dependente da diversidade de espécies de madeiras e a heterogeneidade de comportamentos e reações, de utilização de PEG. Neste âmbito o trabalho de Per Hofmann (2001) foi muito importante na normalização dos procedimentos.

Os conservadores têm efetuado várias experiências, usando soluções de PEGs em concentrações diferentes e com processos diferentes (Hiron, et al., 1998; Vere, et al., 1998; Lan, 1998; Cohen, 1998; Tran, et al., 1998; Hamilton, 1999; Hamilton, 2001). No que diz respeito a este assunto é consensual a utilização de pelo menos dois tipos de PEG, um de baixo peso molecular e outro de maior peso, com o intuito de o primeiro, mais fluido, penetrar em profundidade no material lenhoso e o segundo, mais viscoso, conferir maior estabilidade mecânica e resistência à higroscopicidade (Watson, 1996; Meyer, 1996; Hiron, et al., 1998; Hafors, 1998; Koefoed, et al., 1998; Hamilton, 1999; Hamilton, 2001; Saerterhaug & Turner-Walker, 2001; Saerterhaug & Turner-Walker, 2001; Chaumat, et al., 2001b).

Os métodos de aplicação podem diferenciar em quatro formas:

- **Imersão em solução:** o objeto é colocado num contentor com a solução de PEG de menor densidade, que vai sendo aumentada ao longo do tempo até à saturação ou situação previamente definida, sendo este o método mais utilizado em pequenos objetos (imagem1) (Brown, 1991; Hiron, et al., 1998; Hamilton, 1999; Hamilton, 2001; Chaumat, et al., 2011);
- **Consolidação por desidratação da solução:** o objeto é imerso numa solução de PEG, de baixa concentração, mas em quantidade suficiente para impregnar todo o objeto, sendo o aumento da concentração de PEG conseguido através da evaporação lenta da água por aumento da temperatura (Hamilton, 1999);
- **Aspersão:** muito utilizado no tratamento de objetos em grande escala, onde não é viável a imersão (Lan, 1998; Hafors, 1998);
- **Por atomização do PEG:** é um método derivado do processo de aspersão e desenvolvido pelo ARC-Nucléart, em que a solução de PEG é colocada num atomizador e é lançada em forma de vapor, que, segundo os autores, é mais eficiente que a aspersão, pois permite aplicar maiores concentrações de PEG (Chaumat, et al., 2001a).



## Secagem de Madeiras Arqueológicas: Análise dos comportamentos físicos e aplicação do modelo de secagem binário

O processo termina com a retirada dos objetos da solução ou a paragem da injeção de PEG, dependendo da técnica envolvida e são posteriormente deixados a secar ao ar ou em ambiente controlado.

Processos mais complexos também têm sido realizados no âmbito de inibir algumas reações químicas do PEG, nomeadamente com o Fe (III) que promove a acidificação da madeira e consequente destruição por hidrólise ácida (Walsh, et al., 2011). Neste sentido, têm sido testado a adição de hidroxianisol às soluções de PEG como inibidor de corrosão, na tentativa de impedir reações químicas do PEG com os metais (Cohen, 1998).

Do ponto de vista da atividade biológica, o PEG também apresenta debilidades, pois cria um excelente ambiente para a proliferação de ações bacteriológicas causadoras do escurecimento da madeira durante os tratamentos de PEG (Bjoldal, et al., 2006). Neste âmbito, a adição de alguns biocidas tais como o Ácido Bórico (Hafors, 1998) ou os iões de metais de transição, nomeadamente de Cobre e Prata (Vere, et al., 1998) têm sido testados em alguns tratamentos, com alguns resultados positivos.

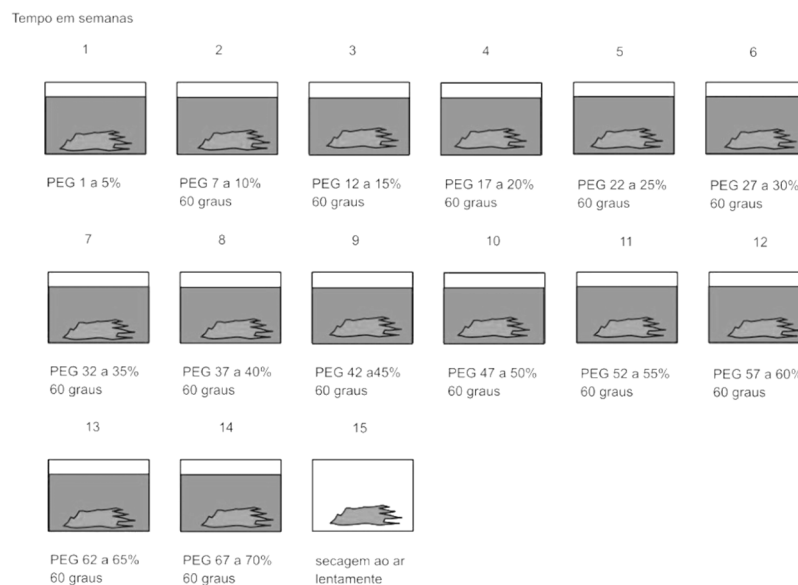


Imagem 24 Esquema ilustrativo do processo de impregnação com PEG simples.

## **5.2 Processo misto de PEG + Liofilização**

O processo misto de PEG + liofilização é uma evolução do processo de PEG descrito, permitindo baixar as concentrações de PEG impregnado, bem como obter melhores resultados nos tratamentos. É um processo mais complexo e que necessita de equipamento mais sofisticado, como uma câmara de liofilização. Geralmente é aplicado em objetos de pequena e média dimensão, uma vez que as câmaras de liofilização são normalmente de pequeno volume. Existem muito poucos laboratórios no mundo equipados com este mecanismo, sendo as maiores as câmaras tubulares de diâmetro a rondar os 2 metros e com comprimentos na ordem dos 5 metros como é exemplo o equipamento do novo laboratório de conservação do ARQUA, do Museu Nacional de Arqueologia Subaquática de Cartagena.

O processo baseia-se na sublimação da água (imagem 25), suprimindo a tensão capilar da água na fase líquida. Normalmente as condições termicas são da ordem dos  $-30^{\circ}\text{C}$  e pressão baixa (Hug, 1984; Watson, 1996; Meyer, 1996; Morel-Deledalle, 1998; Saerterhaug & Turner-Walker, 2001; Chaumat, et al., 2001b; Chaumat, et al., 2011).

São inúmeros os estudos que têm como fim último otimizar este processo, no sentido de perceber quais as melhores temperaturas e soluções de PEG a utilizar durante o tratamento. A equipa de conservadores da ARC-Nucléart, onde integra G. Chaumat, J. Barthez, N. Dubois, P. Lacand e G. Bessen (2001a) evidenciam a influência da temperatura na distribuição do PEG, no interior da madeira, sendo que Jacqui Watson (1996) considera importante que a congelação deve ser executada o mais rapidamente possível, no sentido de evitar a formação de grandes cristais e permitir a congelação homogénea da água no interior da madeira, apontando para a temperatura entre os  $-28^{\circ}\text{C}$  a  $-32^{\circ}\text{C}$ . Já Inger Koefoed (1998) percebeu que a utilização do PEG de baixo peso molecular, nestes contextos, enfraquece a resistência da madeira após o tratamento, não oferecendo qualidade à conservação.

Testes mais recentes têm sido realizados em madeiras liofilizadas com soluções de PEG misturados com outras resinas, na tentativa de melhorar as características finais dos

materiais lenhosos. O objetivo destes ensaios é o de diminuir a higroscopicidade das resinas depois de curadas e também a diminuição dos defeitos de secagem, permitindo um acondicionamento da peça em condições ambientais menos rigorosas. Gilles Chaumat e a sua equipa (Chaumat, et al., 2011) relataram ter tido sucesso ao efetuar um tratamento composto por 3 etapas, impregnação com PEG a 30% seguido de liofilização e posterior consolidação com resina de poliéster polimerizada com Raios-Gama, referindo algumas melhorias no âmbito da estabilidade final do objeto. Gianna Giachi (2011) afirma, ter também tido bons resultados na mistura de PEG com resina de Colofónia.

A versatilidade do PEG na possibilidade da sua conjugação com outros materiais e combinado com a liofilização abrem um vasto leque de possibilidades a explorar no futuro.

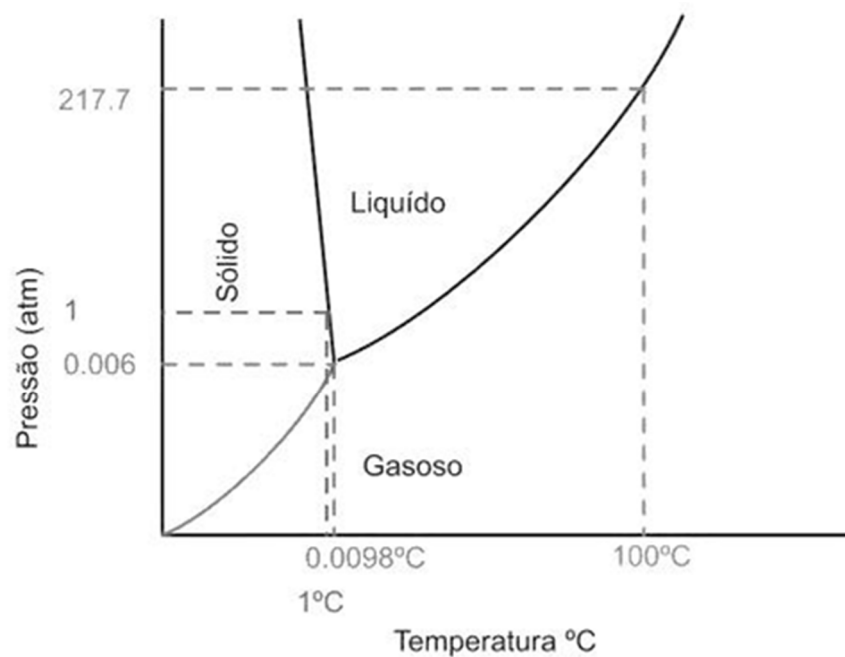


Diagrama de fases da água

Imagem 25 Diagrama de fases da água. A sublimação é realizada quando temperatura e pressão se situam na linha vermelha abaixo dos 0.0098°C e 0.006 atm.

### **5.3 Método de secagem com dióxido de carbono ( $CO_2$ ) Supercrítico**

O processo de secagem com fluídos supercríticos é outro processo complementar, geralmente associado ao tratamento com PEG, substituindo o processo de liofilização.

Uma das grandes vantagens deste processo é a rapidez de tratamento, que é muito superior aos restantes. O método baseia-se, tal como na liofilização, na extração da água com dióxido de carbono supercrítico (imagem 26), sendo que um material no seu estado supercrítico compreende características simultâneas de um líquido e de um gás, com viscosidade similar à dos gases e capacidade de difusão intermédia entre os dois estados, com a vantagem de não possuir tensão capilar (Lumia, et al., 2003; Schindelholz, et al., 2007; Stéphanie, et al., 2013). Uma vez que, para se atingir o estado supercrítico da água, seria necessário, uma temperatura e pressão acima do que as madeiras arqueológicas saturadas poderiam suportar (374,2°C e 220,48 bar), tomou-se como opção o Dióxido de Carbono que atinge os pontos supercríticos à temperatura de 31°C à pressão de 73 bar, ambiente que é mais tolerado pela madeira (Teshirogi, et al., 2001). O processo inicia-se pela troca de água por etanol, onde posteriormente é adicionado PEG, solúvel em etanol, como consolidante. O objeto é colocado numa câmara especial onde é injetado o  $CO_2$ , substituindo o etanol e promovendo a secagem do artefacto. Este processo tem como grande vantagem realizar secagens muito rápidas, de poucas horas, ao contrário das demais aplicações. Ainda assim, a necessidade de um equipamento complexo e a utilização do PEG e de solventes dificultam a sua aplicação prática (Schindelholz, et al., 2007).

A introdução do PEG nestes tratamentos deve-se, sobretudo, à observação de colapsos da madeira durante os ensaios com secagem com  $CO_2$  Supercrítico. Esta situação, ainda não compreendida, é descrita por Eric Schindelholz e a sua equipa no relatório dos testes de avaliação dos métodos de liofilização e  $CO_2$  Supercrítico (Teshirogi, et al., 2001; Schindelholz, et al., 2007).

*“As amostras de madeira MG-B secas ao ar e por CO<sub>2</sub> supercrítico exibiram áreas de colapso extenso e variado”... “A condição extremamente fraca e frágil da parede celular é claramente evidente, embora seja difícil de explicar a causa deste colapso. É possível que possa ser causado pela pressão osmótica nas paredes das células, durante o processo de troca de metanol-água.” (Schindelholz, et al., 2007, p. 26).*

É por isso uma técnica ainda em desenvolvimento, aplicada não só à secagem de madeiras, mas também como opção para melhorar e acelerar o processo de impregnação do PEG nas madeiras (Lumia, et al., 2003). Esta solução é ainda considerada como escolha preferencial para reverter algumas deformações pós-tratamento, embora neste último caso, os tratamentos com sucesso só tenham sido relatados em madeiras com o tecido lenhoso bem conservado (Chaumat, et al., 1998).

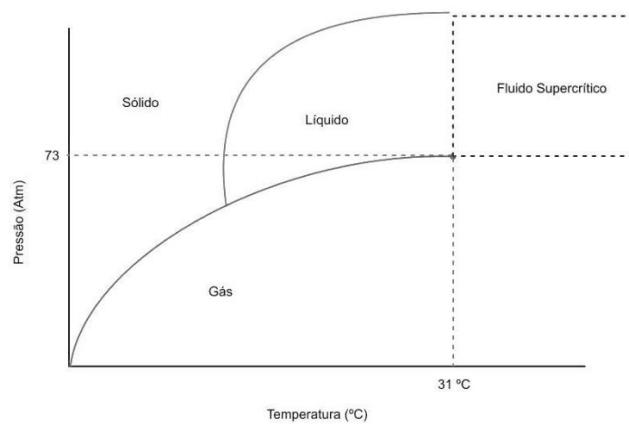


Diagrama de fases do Dióxido de Carbono

Imagem 26 Diagrama de fases do onde a secagem da madeira é realizada a temperatura superior a 31°C e pressão acima de 73 atm (Carrilho, et al., 2001).

#### **5.4 Método de consolidação com Óleo de silicone**

É um dos métodos mais recentes, desenvolvido nos laboratórios da Universidade do Texas, por Wayne Smith (Smith, 2002; Smith, 2003), consistindo na utilização de óleos de silicone.

Segundo a descrição de Wayne Smith (Smith, 2002; Smith, 2003) o processo inicia-se com a desidratação da madeira em vários banhos de solventes, metanol ou acetona, precedidos de banhos de álcool, no sentido de remover toda a água da madeira, pois esta não é miscível com o óleo de silicone. Depois de desidratada a madeira é colocada em banho na solução de 97% de metiltrimetoxissilano, 2% de metil álcool e 1% de dimetildimetoxissilano (MTMS), que quando condensa forma uma resina com um peso molecular de 226g. No final da impregnação, o artefacto é colocado numa câmara hermética juntamente com um catalisador, CT-32 Catalyst, a uma temperatura de 34°C, durante um período de 24 horas, de forma a acelerar o processo de cura do óleo de silicone, conferindo-lhe a resistência mecânica.

Outra versão pode ser elaborada a partir da solução Q9-1315 (composto por 49% metiltrimetoxissilano, 50% de metil álcool e 1% de dimetildimetoxissilano), que difere da solução do MTMS pela concentração do álcool, promovendo uma evaporação mais rápida e reduzindo a capacidade de formação da resina (Smith, 2002; Smith, 2003).

Contudo, a necessidade de utilização de solventes limita este tratamento a objetos de pequena escala.

#### **5.5 Método da acetona/Colofónia**

O processo de tratamento com resina de Colofónia baseia-se na impregnação do produto natural no interior da madeira. Como é uma resina hidrófuga possui uma boa estabilidade no pós-tratamento, não sendo afetado pelas alterações de humidade. No entanto, à semelhança da aplicação com o óleo de silicone, a necessidade da utilização da

**Secagem de Madeiras Arqueológicas:**  
**Análise dos comportamentos físicos e aplicação do modelo de secagem binário**

---

desidratação da madeira com solventes é um fator muito limitativo no que diz respeito à dimensão dos objetos a preservar (Brown, 1991; Hamilton, 2001).

O processo baseia-se na substituição da água pelo álcool em banhos sucessivos (imagem27) e posteriormente na substituição do álcool pela acetona, também em vários banhos sucessivos. A função intermédia do álcool prende-se com a miscibilidade deste com a água e com a acetona, característica que não é partilhada por estes dois últimos, que não se misturam. Assim, o álcool serve como ponte para a substituição da água pela acetona.

Numa segunda fase, o objeto é mergulhado numa solução saturada de Colofónia aquecida a 60°C, onde repousa até estar totalmente impregnado. O tratamento é finalizado com a remoção dos excessos com um pano embebido em acetona e deixando a secar ao ar (Brown, 1991; Hamilton, 2001).

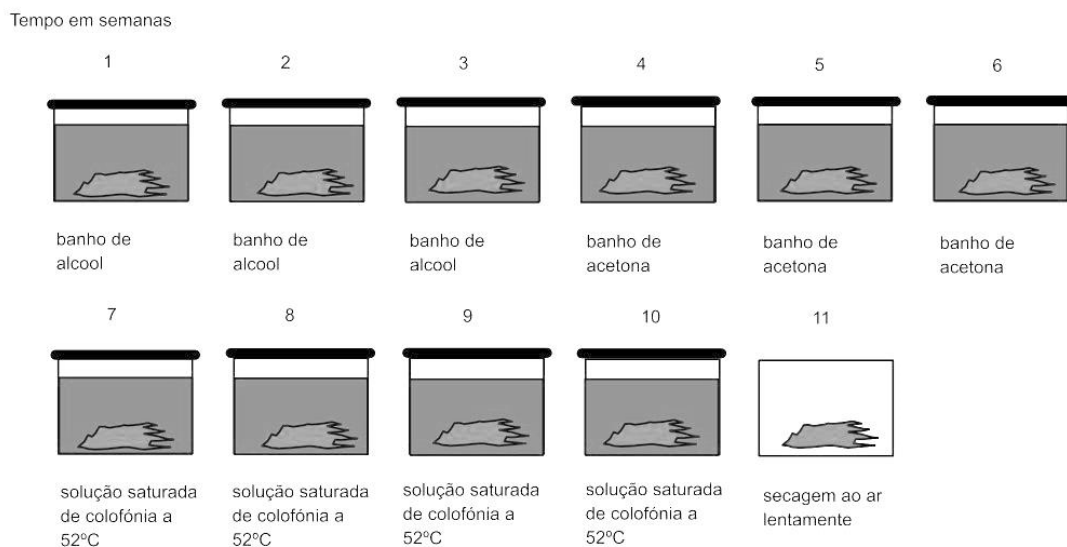


Imagem 27 Ilustração do processo de acetona/Colofónia

## **5.6 Método da Sacarose**

É um processo idêntico ao PEG simplificado, alterando-se apenas o soluto. Neste caso os objetos são imersos (imagem28) ou borrifados com uma solução de Sacarose que se inicia com pequenas percentagens até saturação. É um dos processos mais económicos na conservação de madeiras saturadas e tem a vantagem de não reagir com os metais, bem como, não ser necessário aquecer a solução (Brown, 1991; Hoffmann & Kuhn, 1998; Hamilton, 2001).

Atualmente este processo tem sido alvo de mais experiências, no sentido de se tornar uma alternativa válida ao PEG. Versões mais complexas, compostas por vários tipos de sacarídeos têm sido testadas. Giancarlo Strigazzi e Helmut Preuss (1998) apresentaram uma solução para conservar madeiras saturadas composta por 30% de Glicose, 40% Maltose, 5% Maltotriose e 25% de açúcares maiores. Já Setsuo Imazu e Andras Morgos (1998) aplicaram o lactitol, um dissacarídeo composto por galactose e sorbitol, como alternativa por ser mais estável que a Sacarose, tendo em 2001, apresentado uma evolução do método, acrescentando 10% de Trealose à solução e conferindo, segundo os autores, uma secagem mais segura e uma maior estabilidade, mesmo em ambiente com 95% de humidade relativa. Embora os autores não refiram qual a base da concentração deduz-se que as concentrações sejam realizadas em p/p.

Ainda assim, a vulnerabilidade ao ataque biológico tem sido o maior entrave a este processo. Testes realizados em laboratório demonstraram que o tratamento simples com Sacarose possui características mais vantajosas do que o PEG, quer no resultado final, quer na redução de custos ou de estruturas logísticas necessárias à sua aplicação. As reações químicas parecem ser muito menos intensas, bem como, não foi verificado grandes alterações da coloração ou do aspeto original da madeira.



**Secagem de Madeiras Arqueológicas:**

**Análise dos comportamentos físicos e aplicação do modelo de secagem binário**

---

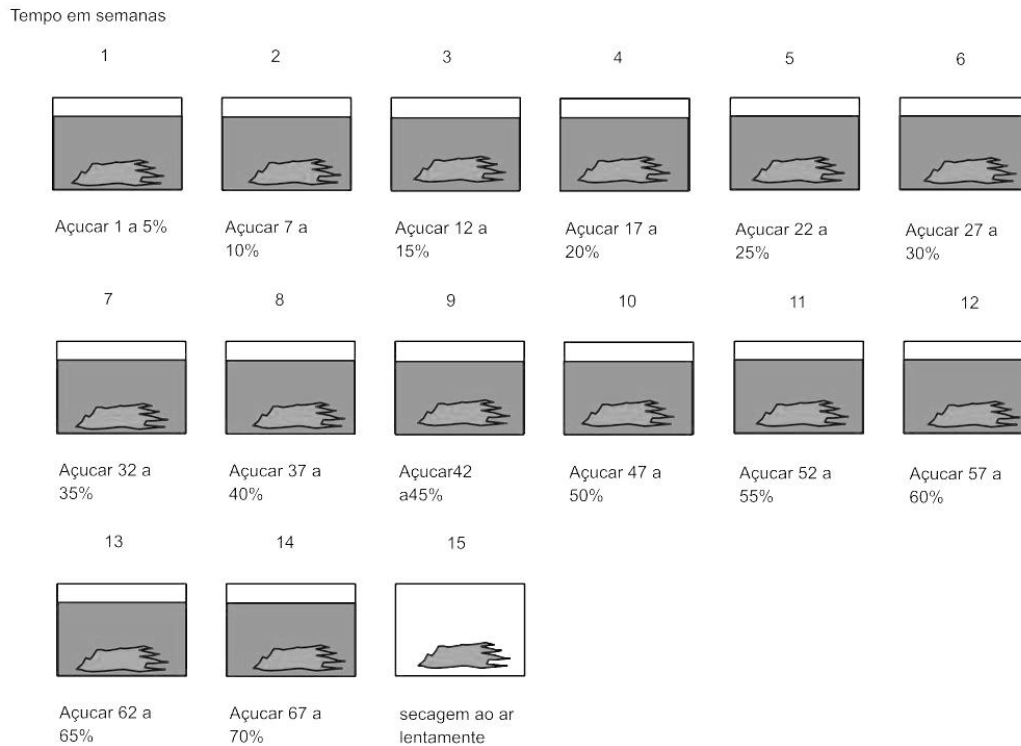


Imagem 28 Esquema ilustrativo do processo de Sacarose.

## 5.7 Método Álcool/Cânfora

Este método é, à semelhança do processo acetona/Colofónia, um método que utiliza resinas naturais.

A água do artefacto é substituída por álcool através de banhos sucessivos, e posteriormente imersa numa solução saturada, aquecida a 52 °C, de álcool e cânfora. Depois de impregnada a madeira, o excesso superficial é removido com trapos humedecidos em álcool, colocando-se seguidamente a madeira em repouso ao ar. A cânfora sublima-se à temperatura e pressão ambiente, acabando por libertar-se da madeira em apenas alguns meses (Brown, 1991; Hamilton, 1999; Hamilton, 2001).

É um método pouco estudado e divulgado não havendo referências seguras relativamente aos resultados que este método permite.

## **5.8 Outros tratamentos**

Cada vez mais a importância do uso de polímeros naturais tem-se evidenciado pela positiva (Christensen, et al., 2011), quer pela sua estabilidade e compatibilidade com a madeira, quer por ser um processo ecológico. Atualmente estão a decorrer ensaios e análises utilizando a celulose (proveniente das plantas e da madeira) e a quitosana (um polissacarídeo encontrado nos exosqueletos dos crustáceos) (Christensen, et al., 2011).

A celulose, por ser um material de que é constituída a madeira, tem óbvias vantagens e compatibilidades, para além de não possuir nenhuma das reações químicas conhecidas no uso do PEG, é obtida através da hidrólise ácida em ácido sulfúrico a 60°C, onde é posteriormente, através do processo de centrifugação, separada das impurezas e neutralizada para o tratamento da madeira.

A quitosana dispersa em ácido acético aumenta a resistência da madeira, sem danificar a estrutura lenhosa (Christensen, et al., 2011).

No âmbito da nanotecnologia existem também alguns avanços, quer na sua utilização para formular nanopolímeros, quer na utilização de nanopartículas de agentes neutralizadores, no sentido de reverter ou estabilizar efeitos secundários adversos. Exemplo desta situação são as nanopartículas de hidróxido de cálcio e hidróxido de magnésio, utilizadas para desacidificar a madeira tratada com PEG (Baglioni & Poggi, 2006; Christensen, et al., 2012).

## **6. A relação da água com a madeira**

A madeira é um material higroscópico e poroso, e como tal, absorve água do meio que a rodeia. Estas características permitem que a água circule no seu interior, o que promove uma série de fenómenos físicos e químicos que interferem em vários níveis no material.

Do ponto de vista da secagem é de elevada importância compreender a relação entre a água e a madeira. Este conhecimento permite entender de uma forma mais clara os fenómenos associados à secagem, sendo que, como se irá verificar neste capítulo, existem vários níveis de interação da água com a madeira e que cada um deles altera de forma diferente as características e o comportamento da madeira.

### **6.1 Divisão da água na madeira**

A madeira é um material orgânico com características higroscópicas. Durante o seu período de vida, o tecido lenhoso e os seus tubos capilares, enchem-se de água e substâncias que se deslocam pelo tronco da madeira, numa dinâmica natural de transporte e transformação das substâncias e água em nutrientes para a árvore.

Depois de cortada, a madeira inicia um processo de secagem natural, obedecendo a um equilíbrio entre a sua humidade e a humidade do meio (Hoadley, 1997, p. 68). Esse processo é desencadeado por forças físicas e químicas complexas e são de extrema importância no que diz respeito à secagem da madeira, pois a remoção dessa água influi diretamente nas características físicas da madeira (Santini, 1996, p. 4).

As características anatómicas implicam particular relevância na dispersão da humidade na madeira, podendo variar os níveis dentro de um bloco de madeira. Em muitas espécies, o alburno contém mais humidade que o cerne, sendo que, mesmo dentro de cada uma dessas regiões do tronco, dependendo do tipo de tecido lenhoso, podem conter teores de humidade desiguais (Santini, 1996, p. 4). Como já vimos, a dimensão dos lúmens varia de tamanho,

comportando alterações de volume nas diversas regiões da madeira, dando origem a essas assimetrias nos níveis de humidade.

Os teores de humidade nas madeiras verdes acabadas de serrar podem ser elevados, na ordem dos 300% nas Coníferas, embora nas Folhosas a percentagem seja substancialmente menor, rondando os 70% a 80% (Melo, 1999, p. 57).

A água presente na madeira pode ser classificada em dois tipos: água livre ou capilar, localizada nos lúmens das células e nos espaços intercelulares, e a água de impregnação, localizada nas estruturas ultramicroscópicas das paredes celulares (Santini, 1996; Mellado, 2007; Andrade, 2000; Melo, 1999; Hoadley, 1997). Dentro da água de impregnação, divide-se em três tipos: água de sorção química ou constituição (correspondente à água da parede celular agregada por ligações de hidrogénio e que corresponde ao teor de humidade entre 0 e 7%); água de adsorção superficial (varia entre 7% e 15% e identifica-se como a água contida na superfície das paredes celulares superficiais e a sua ligação é feita por forças Van der Waals) e água de condensação capilar (sendo atribuída a humidade entre 15% e os 30% e é localizada nas paredes celulares por condensação capilar devido às forças da tensão capilar) (Melo, 1999, pp. 57-60). No caso de água em impregnação, Emanuel Mellado (2007, p. 4) divide-a em duas fases: do 0% aos 6% como a água adsorvida por forças físico-químicas Van Der Waals e pontes de Hidrogénio, situada nos intervalos entre as moléculas de celulose e hemicelulose; e dos 6% aos 28% (considerando os 28% como a percentagem média pelo autor para o ponto de saturação da fibra - PSF) como a água de adsorção em camadas polimoleculares ligadas por forças elétricas polares (ligações por Pontes de Hidrogénio).

A fronteira entre a água livre e de impregnação faz-se pelo ponto de saturação das fibras (PSF), sendo que, a água livre corresponde à humidade acima do PSF e as restantes abaixo deste ponto (Santini, 1996; Melo, 1999; Mellado, 2007; Andrade, 2000).

Embora não se encontre valores unânimes nos autores para o PSF, podemos, no entanto, aferir que o seu intervalo situa-se entre os 25% e os 35% de humidade, dependendo da espécie da madeira, nomeadamente da quantidade e tipo de extrativos. Neste sentido, o PSF é o ponto de grande importância na secagem deste material, uma vez que a influência

da água, na madeira, acima e abaixo deste ponto, é distinta (Santini, 1996, p. 5; Melo, 1999, p. 57). A água livre não tem influência dimensional na madeira, a sua deslocação é feita por forças capilares, sendo que, a água de impregnação se desloca pelas paredes das células pelas diferenças de humidade e diferenças de gradientes de pressão de vapor (Santini, 1996; Mellado, 2007; Andrade, 2000; Melo, 1999; Hoadley, 1997).

## **6.2 Forças capilares e tensão capilar**

O movimento capilar que ocorre sempre acima do ponto de saturação das fibras é provocado por forças capilares, promovendo desta forma a deslocação da água. Este movimento cria um fluxo de água que está relacionado com as dimensões dos canais de escoamento, através das células e das suas pontuações. Neste sentido, quanto maior for o raio do tubo capilar, menor será a tensão e a força capilar, ao contrário do fluxo que aumenta. Esta situação pode ser calculada pela *lei de Poiseuille* que considera o fluxo, através dos capilares, como uma função do raio capilar elevado à quarta potência (Santini 1996:5), que se traduz segundo Emanuel Mellado (2007, p. 4) no seguinte fórmula:

$$TC = H \times \rho = \frac{2\sigma}{\rho \times r} \rho = \frac{2\sigma}{r}$$

Onde:

$TC$  = Tensão capilar  
 $H$  = Altura a que o líquido sobe no capilar (cm)  
 $\rho$  = Densidade do líquido (g/cm<sup>3</sup>)  
 $\sigma$  = Tensão superficial do líquido (g/cm)  
 $r$  = Raio do capilar (cm)

Contudo, Ariel Andrade (2000:6) aponta a *lei de Jurin* para calcular a tensão capilar:

$$\Delta P = \frac{2 \cdot \gamma \cdot \cos \theta}{r}$$

Onde:

$\Delta P$  = Diferença de pressão (tensão capilar)

$\gamma$  = Tensão superficial do líquido

$\theta$  = Ângulo de humedecimento

$r$  = Raio do capilar

Desta forma estabelece-se que, a tensão capilar é proporcional à tensão capilar da fronteira ar/água e inversamente proporcional ao raio da curvatura, sendo que, quanto mais próximo se estiver do PSF menor serão as forças capilares (Santini, 1996, p. 5).

Esta força atua a partir do centro da madeira onde a pressão é maior e diminui à medida que se aproxima da periferia.

Segundo Stamm, mencionado por (Santini, 1996), o movimento da água acima do PSF está intimamente relacionado com a temperatura, uma vez que, a pressão de ar mais a pressão de vapor de água, provocada pelo aumento da temperatura, origina uma bolha de ar, desencadeando o deslocamento da água. Esse movimento é sempre orientado da zona de maior pressão para uma região de menor pressão.

### **6.3 Fluxo e permeabilidade**

O fluxo capilar é muito maior no sentido axial do que no radial, podendo ter uma taxa de fluxo 50 vezes superior. Esta diferença prende-se essencialmente com o número de

obstáculos que é menor no sentido longitudinal, uma vez que, no sentido transversal o número de paredes celulares é muito superior (Santini, 1996, p. 7).

No mesmo sentido, o fluxo está também relacionado com a permeabilidade, que pode ser calculada pela lei de Darcy assumindo-se como a razão entre o fluxo e o gradiente. A permeabilidade, para os líquidos, pode ser calculada pela fórmula aplicada de Darcy (Melo, 1999, pp. 60-64).

$$k = \frac{VL}{tA\Delta P}$$

E para os gases pela fórmula derivada:

$$k = -\frac{V}{tA\frac{dP}{dL}}$$

Onde:

|                     |                                            |
|---------------------|--------------------------------------------|
| $K=$                | Permeabilidade                             |
| $t=$                | Tempo, (s)                                 |
| $L=$                | Comprimento da amostra, (cm)               |
| $\Delta P$ ou $dP=$ | Diferença de pressão, (g/cm <sup>3</sup> ) |
| $dL=$               | Diferença de comprimento (cm)              |

Da mesma forma, Elio Santini (1996) usa a primeira *lei de Fick* para estabelecer a permeabilidade ao vapor de água da madeira:

$$D = \frac{w/tA}{\Delta c/L}$$

Onde:

$D$ = Coeficiente de difusão água-vapor na madeira, (cm<sup>2</sup>/s)

$W$ = Massa de vapor de água transferido através da madeira no tempo (t), g

$A$ = Área de secção transversal do corpo da amostra, (cm<sup>2</sup>)

$L$ = Comprimento da amostra, (cm)

$\Delta c$ = Diferença de concentração, (g/cm<sup>3</sup>)

Segundo Siau, citado pelo mesmo autor (Santini, 1996, p. 8) defende que a relação da permeabilidade das madeiras Coníferas é de 1: 20000, e que nas Folhosas, os resultados não deveriam ser muito diferentes. No entanto, devido ao maior escoamento dos vasos das Folhosas, faz com que haja uma maior relação entre o fluxo longitudinal e transversal do que nas Coníferas.

Torna-se ainda notório, a definição de (Andrade, 2000, p. 6), a partir da *lei de Darcy e Poiseuille*, da fórmula de cálculo da permeabilidade, demonstrando a relação da permeabilidade com os raios dos capilares:

$$k = \frac{N \cdot \pi \cdot r^4}{8 \cdot \mu \cdot A}$$

Onde:

$K$  = Permeabilidade

$N$  = Número de capilares

$r$  = Raio dos capilares

$\mu$  = Viscosidade do líquido

$A$  = Área da amostra, perpendicular ao sentido do fluxo (cm<sup>2</sup>)



Considera também, que a tensão capilar influencia diretamente na permeabilidade, afirmando que quanto maior for a tensão superficial, menor será a permeabilidade. Assim sendo, a velocidade de secagem de uma madeira está estritamente relacionada com a sua permeabilidade e é diretamente proporcional a esta, uma vez que, quanto mais permeável for a madeira, mais rápida é a sua secagem acima do PSF, sobretudo devido ao fluxo de massa (Santini, 1996, p. 10).

#### **6.4 Processo de difusão da água abaixo do PSF**

Abaixo do PSF as diferentes águas existentes deslocam-se faseadamente e através de diferentes forças (Melo, 1999, pp. 57-60), tendo influência nas suas propriedades físicas e mecânicas, como a diminuição do volume e aparecimento de tensões provocadas pelas forças de compressão (Santini, 1996, p. 5).

As moléculas de água movem-se através das paredes celulares das suas cavidades, por gradientes de humidade e gradientes de pressão de vapor de água, ou seja, difundem-se pelas paredes celulares, por gradientes de humidade e pelas cavidades, por gradientes de pressão de vapor (Santini, 1996, p. 8; Mellado, 2007, p. 7). Estes gradientes são proporcionais ao teor de humidade. Isto é, quanto maior for a humidade, maior é a pressão do vapor (Andrade, 2000, p. 7). Este processo é contínuo até a atingir a superfície da madeira.

O mecanismo de transporte da água pelo tecido lenhoso só se inicia quando a água livre tiver saído totalmente, estabelecendo assim os gradientes de pressão, que dão origem ao processo de difusão. Este processo é complexo, uma vez que as difusões por gradiente de pressão e gradiente de humidade são feitas em simultâneo (Santini, 1996, p. 8; Andrade, 2000, p. 7). Já Ariel Andrade (Andrade, 2000, p. 6) define o fenómeno de difusão como “*o transporte de uma massa resultante do movimento casual das moléculas e da diferença de concentração*”, que de acordo com Oliveira (1981), citado por Ariel Andrade (2000, p. 6), refere que as moléculas de água têm tendência a movimentar-se das regiões mais

concentradas para as regiões de menor concentração, provocando a diminuição dos diferenciais de gradiente de humidade.

O facto de a madeira ser um material higroscópico faz com que as células mais secas absorvam a humidade das células mais húmidas, promovendo a deslocação interna da água pelos tecidos lenhosos (Santini, 1996, p. 9).

Emanuel Mellado (2007, p. 2) define a *Lei de Fick* para determinar o coeficiente de difusão efetivo e calcular os gradientes de humidade, ao mesmo tempo, que constrói a curva de perda de humidade. No entanto, pela razão do fluxo não ser constante, Elio Santini (1996) assegura que os valores calculados não coincidem com os valores reais, uma vez que estes chegam a apresentar o dobro dos valores experimentais, no sentido longitudinal e trinta vezes no sentido tangencial. Estes dados permitiram-lhe concluir que a difusão da água no tecido lenhoso é consequência do coeficiente de difusão e do gradiente de concentração (Santini, 1996).

O coeficiente de difusão depende da temperatura e do teor de humidade. Este quando sofre um aumento de temperatura o coeficiente de difusão aumenta até ao PSF. Este aumento não é proporcional, tendo uma alteração drástica do valor de difusão entre os teores de humidade dos 5% aos 10%, e aumentando de uma forma mais suave até ao teor de humidade de 35% (Mellado, 2007, p. 9).

Desta forma, Emanuel Mellado (Mellado, 2007, p. 10), fazendo referência a Chen (1996), apresenta a equação de *Arrhenius* para calcular o coeficiente de difusão dependente do teor de humidade da seguinte forma:

$$D = D_0 \exp\left(-\frac{E}{RT_K}\right)$$

Onde:

$D$  = Coeficiente de difusão ( $\text{cm}^2/\text{s}$ ), à temperatura absoluta  $T_K$

$D_0$  = Coeficiente de difusão calculado desde o logaritmo de  $D$  em  $1/T = 0$

$R$  = Constante dos gases

$E$  = Energia de ativação

Ele defende que desta forma pode calcular de uma forma mais precisa a remoção da humidade durante a secagem, sendo que os coeficientes de difusão podem ser obtidos de três formas experimentais: determinar os gradientes de humidade formados na madeira sob condições controladas; medir a taxa de passagem de água através da madeira sem recurso a forças de aceleração; e determinar da taxa de secagem (Mellado, 2007, p. 11).

Por outro lado, Emanuel Mellado (2007) refere que o coeficiente de difusão da madeira é cerca de 10% maior na desorção, do que na absorção. Enquanto a superfície estiver húmida a secagem é efetuada pela transferência de calor do ar para a madeira. Este fenómeno está também relacionado com a velocidade do ar, que é diretamente proporcional à taxa de transferência de calor. Quanto maior for a velocidade maior será a transferência de calor para a madeira. Da mesma forma a taxa de evaporação aumenta, quanto maiores forem os valores da velocidade do ar e da transferência de calor (Santini, 1996, p. 10).

No entanto, o tempo de secagem de uma madeira está intimamente relacionado com a quantidade de água existente no espécime, pois este depende da densidade e espessura da madeira, uma vez que uma madeira mais densa terá um teor de humidade menor que uma madeira menos densa. Desta forma, o tempo de secagem da água livre é proporcional à quantidade de água existente e inversamente proporcional à taxa de evaporação.

No caso da água de impregnação, o tempo de secagem é proporcional à densidade, à espessura e à pressão de saturação de vapor, uma vez que, a sua secagem é feita por difusão (Santini, 1996, p. 10). Neste sentido, a secagem da madeira é feita em duas fases: secagem da superfície da madeira para atmosfera e secagem interna do centro para a periferia.

## **6.5 Humidade de equilíbrio**

A humidade de equilíbrio da madeira está relacionada com a humidade relativa do ar. Este fator indica que a madeira tem tendência a conter uma percentagem de humidade que encontra o seu equilíbrio numa determinada taxa de humidade relativa da atmosfera. Desta forma, as flutuações de humidade do ar criam também oscilações de humidade na madeira.

Quando uma madeira estabelece o seu ponto de equilíbrio com o ambiente e este aumenta os seus níveis de humidade, a madeira tem tendência a acompanhar, subindo os seus valores de humidade até a atingir um novo equilíbrio e vice-versa.

Dentro desta perspetiva, ao colocar-se uma madeira dentro de uma câmara a 0% de humidade relativa, a madeira tem tendência a perder toda a humidade, mas se a humidade rondar os 50%, a madeira poderá manter uma percentagem de humidade permanente à volta dos 12% (Hoadley, 1997, pp. 68-69). Outro comportamento que devemos ter em conta nestas condições é o fenómeno de histerese, que faz com que a humidade de equilíbrio seja diferente durante a humidificação e durante a desumidificação. A capacidade da madeira em reter a água condiciona que a humidade de equilíbrio seja ligeiramente maior na desumidificação (Hoadley, 1997, pp. 68-69).

## **6.6 Teor de humidade**

O teor de humidade é o termo designado para expressarmos o nível de humidificação da madeira e geralmente é calculado em percentagem. É concebido através da relação entre a massa da madeira húmida e a massa da madeira totalmente seca a 0% de humidade (Melo, 1999, p. 91; Santini, 1996, p. 50; Hoadley, 1997, p. 67).

Existem várias formas de cálculo, embora nem todas sejam possíveis de aplicar em determinadas situações. Pela norma portuguesa, sendo também a mais usada nos países internacionais, podemos obter o teor de humidade com base num processo de pesagem e

secagem de provetes de madeira, fornecendo resultados para se aplicarem na seguinte fórmula (Melo, 1999, p. 91; Unger, et al., 2001, p. 23).

$$H = \frac{m1 - m2}{m2} \times 100$$

Onde:

*m1* – a massa do provete húmido, expressa em (g)

*m2* – a massa do provete seco, expressa em (g)

Elio Santini (1996), no entanto, aponta outra fórmula de cálculo:

$$THa = \frac{Pa(THi + 100)}{Pu} - 100$$

Onde:

*THa* – Teor de humidade atual

*THi* – Teor de humidade inicial

*Pu* – Peso húmido da amostra

*Pa* – Peso atual

Como já foi referido, a madeira possui na sua constituição vários tipos de água, ou seja, vários tipos de ligação química da água à madeira, sendo que o teor de humidade é constituído por todos eles (Melo, 1999, p. 91; Santini, 1996, p. 50). No entanto é possível calcular o ponto o PSF numa relação de cálculo do teor de humidade com a o fenómeno físico de contração da madeira, sabendo nós, que acima do PSF as dimensões da madeira variam muito pouco.

Como ficou perceptível, quer acima, quer abaixo do PSF, as condições de secagem são diferentes. Assim, a deteção do teor de humidade é importante para percebermos o estado e a fase em que se encontra a madeira durante um processo de secagem.

O método de pesagens é o método mais rigoroso, embora sejam necessários alguns cuidados para se garantir um resultado fidedigno (Melo, 1999, p. 93; Santini, 1996, p. 50). Deve-se ter em conta a zona da amostra e a quantidade de amostras, para que se possa calcular uma média. Geralmente, no mínimo, são analisadas três amostras, no qual se fará o processo de pesagem, para a obtenção do teor médio de humidade. Será esse o valor que servirá de base para calcular os teores das madeiras durante a secagem.

Desta forma, no seguimento da fórmula acima descrita, podemos calcular o peso da madeira que pretendemos secar, quando esta estiver a 0% de humidade, da seguinte maneira:

$$Mf = \frac{Mi}{1 + \frac{THm}{100}} =$$

Onde:

*Mf* = Massa final

*Mi* = Massa inicial

*THm* = Teor de humidade médio

Com base nesses dados podemos, assim, calcular o teor de humidade da madeira durante a sua secagem:

$$TH = \frac{M1}{Mf} \times 100 = \%$$

Onde:

*M1* = Massa da madeira na altura em que é pesada

*Mf* = Massa final calculada pela fórmula anterior

## **6.7 Condicionantes envolvidas no processo de secagem**

A madeira, como qualquer outro material poroso, reage às mudanças do ambiente em que se insere (Mellado, 2007). Assim sendo, o controlo dos parâmetros ambientais, bem como, o conhecimento da influência que esses parâmetros ambientais exercem na madeira são de extrema importância, no sentido de se elaborar planos de secagem, bem como, prever e prevenir situações indesejadas.

Por estas razões, os indicadores a ter em conta são: a temperatura, a humidade relativa do ar, a velocidade do ar e a evolução do teor de humidade da madeira durante a secagem, sendo que, durante as várias fases, cada um deles desempenha funções diferentes, que vão variando ao longo do desenvolvimento da secagem (Melo, 1999, p. 285). Ao controlar estes quatro indicadores pode-se realizar uma secagem conduzida, anulando ou atenuando o aparecimento de defeitos indesejados.

## **6.8 A temperatura**

A temperatura é o um dos parâmetros mais importantes na secagem, pois confere uma certa dinâmica ao interior da madeira. À medida que o teor de humidade vai descendo torna-se premente um controlo mais efetivo (Jankowsky & Henriquez, 1983, pp. 27-32). A sua influência está intimamente ligada à condutividade térmica inerente à própria madeira. As reações dependem de espécie para espécie, obtendo-se comportamentos diferentes durante a secagem.

Uma temperatura elevada provoca a deslocação da água no sentido da superfície mais rápida, no interior da madeira, fazendo com que esta seque mais rapidamente mas de forma não uniforme. No entanto, a distribuição dos horizontes de humidade pode atingir um diferencial tão elevado, que as tensões provocadas por esses desníveis criam oportunidades para desencadear anomalias, como é o caso de fissuras ou dos colapsos das células (Jankowsky & Henriquez, 1983, pp. 27-32; Melo, 1999; Wengert, 2006, p. 25). Deste modo, um bom domínio da temperatura permite-nos controlar a difusão da humidade.

Como referido atrás, um aspeto importante que deve ser relacionado com a temperatura ambiente é a condutividade térmica (Hoadley, 1997; Santini, 1996; Mellado, 2007; Moreschi, 2012). Esta é calculada pelo tempo que uma quantidade de energia (calor) leva a percorrer um certo material num determinado volume. Assim Santini (1996) assume a seguinte fórmula para determinar a condutividade térmica:

$$K = \frac{H/tA}{\Delta T/L} = \frac{HL}{tA\Delta T}$$



Onde

$K$ = Condutividade térmica (Cal/cm.°C.s)

$H$ = Quantidade de calor transferido (Cal)

$T$ = Intervalo de tempo (s)

$A$ = Área de secção perpendicular à direção do fluxo (cm<sup>2</sup>)

$L$ = Comprimento do fluxo no meio da transferência (cm)

$\Delta T$ = Diferencial de temperatura entre as duas superfícies ( $T_2-T_1$ ) (°C)

Para madeiras entre -50°C e 100°C, João Moreschi (2012) acrescenta que o cálculo deve ser equacionado por:

$$\gamma_2 = \gamma_1 [1 - (1.1 - 0.98 r_0) \cdot (T_1 - T_2)] \cdot 100$$

Onde:

$\gamma_1$ = Coeficiente de condutividade térmica inicial (na temperatura  $T_1$ )

$\gamma_2$ = Coeficiente de condutividade térmica após o aumento da temperatura (de  $T_1$  para  $T_2$ )

$r_0$  = Massa específica da madeira a 0% de teor de humidade

$T_1$  e  $T_2$ = Temperaturas consideradas

A madeira é por natureza pouco condutora. A sua condutividade térmica é influenciada por outros fatores como o teor de humidade, as características anatómicas (densidade e tipo de produtos extrativos inerentes às espécies) (Santini, 1996; Hoadley, 1997; Mellado, 2007) e o sentido do fluxo. Como resultado, a condutividade térmica é cerca de 5% a 10% superior no sentido radial, do que no sentido tangencial e 2.25 a 2.75 vezes maior, no sentido axial, do que no sentido radial e tangencial (Moreschi, 2012).

Durante a secagem este parâmetro vai-se alterando, sendo que, à medida que a humidade decresce menor é a condutividade da madeira.

Analogamente, outro parâmetro relacionado com a temperatura é o calor específico da madeira, que determina a quantidade de energia necessária para alterar a temperatura desta em Kcal/kg.°C (Moreschi, 2012). Isto significa que quanto menor for a condutividade térmica, maior será a quantidade necessária para aquecê-la.

O calor específico para a madeira húmida segundo Moreschi é calculado com a seguinte fórmula:

$$calor\ especifico = U + C_o + A/1 + U$$

Onde:

$U$ = Teor de humidade da madeira

$C_o$  = Calor específico da madeira seca (32 kcal/kg.°C)

$A$ = Calor específico adicional, devido à energia de ligação madeira/água

Já Emanuel Mellado (2007), citando Kollmann e Cotê (1968), apresenta a seguinte fórmula para calcular o calor específico da madeira:

$$C_{mad} = 4.186,8 \left( \frac{0,01x tu_i + 0.324}{1 + 0,01x tu_i} \right) =$$

Onde:

$C_{mad}$  = Calor específico da madeira (J/Kg.°C)

$tu_i$  = Teor de humidade inicial (%)

Outro fator a ter em conta é que quanto maior for a temperatura, menor é a resistência da madeira, sendo que, este parâmetro parece ter grande impacto no comportamento das madeiras numa temperatura dos 0 ao 100°C. Acima dos 100°C o comportamento da madeira é diferente devido à lenhina e ao seu ponto de transição vítrea, que se situa entre os 135°C e os 190°C, dependendo do teor de humidade (Klock, et al., 2005; Wengert, 2006).

Assim, a temperatura desempenha uma função importante quer no desenvolvimento da secagem, quer nos mecanismos inerentes à mesma, sendo que, segundo Elio Santini e Clovis Haselein (2002), uma temperatura baixa promove a secagem por difusão e uma temperatura alta desenvolve uma secagem por fluxo de massa. Tendo em conta esta ideia, parece ser consensual que a secagem a temperaturas mais baixas, pelo menos na primeira fase de secagem, é a que apresenta melhores resultados (Jankowsky & Henriquez, 1983; Melo, 1999; Wengert, 2006).

## **6.9 A humidade relativa do ar**

A humidade do ar é um campo essencial para uma secagem em boas condições. A aplicação adequada deste parâmetro é fundamental para suprimir grande parte dos defeitos neste processo (Melo, 1999).

Uma humidade baixa promove a movimentação mais rápida da humidade do interior para o exterior da madeira, bem como uma secagem mais desuniforme e propícia a deformações (Wengert, 2006).

A madeira é muito sensível à humidade do ar, uma vez que ela liberta ou recebe humidade em função do estado higrométrico do ar. Neste sentido, num ambiente a 100% de humidade relativa não existe secagem, pois não há troca de água preferencialmente para o ar, porque este se encontra saturado. Atendendo a este fator é importante controlar este parâmetro durante a secagem e principalmente no seu final. Uma diferença de humidades relativas muito acentuadas entre o interior da estufa e o ambiente natural contribui para a criação de tensões na madeira, resultando em danos. Neste sentido, o ideal é que a humidade relativa do ar seja mais baixa ou igual à do ambiente aquando da saída da estufa (Hoadley, 1997). É em função da humidade relativa do ar que a madeira encontra os seus gradientes de equilíbrio com o ambiente que a rodeia. À medida que a humidade do ar decresce, a madeira liberta água para o exterior, baixando os gradientes de humidade das áreas periféricas. Este fenómeno faz com que a haja uma deslocação da água, por difusão, das áreas internas com gradientes mais elevados, para as áreas periféricas com gradientes menores. Esta passagem resulta da necessidade da madeira manter o equilíbrio, sendo um fator crucial, a ser considerado, sempre que registamos valores abaixo do PSF (Jankowsky & Henriquez, 1983; Melo, 1999; Santini, 2000; Wengert, 2006).

### **6.10 Velocidade do ar**

Este parâmetro é, apenas, importante ser considerado nos secadores que utilizam a circulação do ar. Este processo é designado de secagem por convecção. Nestes casos, o calor é transportado para a madeira através do ar, que, tendo humidade relativa (H.R.) baixa, absorve a humidade e a retira da superfície da mesma. Assim, quanto maior for a velocidade do ar, maior volume de água é retirado e, consequentemente maior é a taxa de secagem superficial. Na indústria madeireira as velocidades de ar para secagem mais utilizada são de 1 a 10 m/s.

Geralmente para madeiras mais densas e difíceis de secar utiliza-se uma velocidade mais moderada, para evitar a formação de horizontes de humidade no interior da madeira que potencia a ocorrência de deformações. Já as madeiras mais porosas e leves suportam

velocidades superiores (Santini, 1996; Melo, 1999). Como este parâmetro está intimamente ligado à temperatura e H.R., o ajustamento destes dois fatores atendendo deve ser gerido de forma a evitar a formação de horizontes de humidade na madeira e a obter os materiais com os teores de água que se procura no menos intervalo de tempo possível.

Não menos importante é a regularidade da velocidade, fundamental para manter uma secagem equilibrada com taxas estabilizadas (Santini, 1996), bem como a sua adaptação ao volume de madeira. Também aqui existe uma regra, no sentido em que quando maior for o volume, menor deve ser velocidade empregue. No caso de grandes quantidades de madeira pode ser aplicada a inversão sistemática do fluxo de ar, no sentido de manter uma circulação de ar mais homogénea. Este sistema de inversão do fluxo de ar tem resolvido alguns dos problemas relacionados com secagens em que a velocidade do ar não era homogénea (Santini, 1996; Melo, 1999).

### **6.11 Humidade na madeira durante o processo de secagem**

Durante o processo de secagem deve-se ter em atenção a dinâmica do movimento da água dentro da madeira, no sentido de a manter dentro dos limites de equilíbrio dos gradientes de humidade (Jankowsky & Silva, 1985; Melo, 1999, pp. 185-189).

A partir do momento em que uma tábua começa o processo de secagem, os diferenciais de gradientes de humidade vão aumentar, impondo *stress* e tensões no tecido lenhoso. Essas tensões são tanto maiores, quanto maior for o diferencial de concentração da água. Se esses limites não forem controlados e respeitados, a madeira sofre deformações e colapsos (Jankowsky & Henriquez, 1983; Hoadley, 1997, pp. 94-95).

O aparecimento de fendas internas e externas são um dos danos típicos quando a margem de diferença dos gradientes de humidade ultrapassa os seus limites.

Neste sentido, um programa de secagem que tenha em conta esta situação terá mais hipóteses de produzir uma secagem equilibrada e de boa qualidade. A região periférica da

madeira é uma zona dinâmica em que as trocas de humidade com o ambiente são constantes, sendo que a madeira absorve ou liberta humidade, no sentido de se manter em equilíbrio com este. Assim, quando a temperatura sobe, a madeira tem tendência a liberar água da periferia para o ar, fazendo com que a humidade do interior comece a migrar para a superfície. Quando a temperatura desce, há adsorção da água na madeira que é novamente absorvida regulando os gradientes de humidade. Esta dinâmica só termina quando a madeira estabiliza e atinge a humidade de equilíbrio (Jankowsky & Silva, 1985; Melo, 1999).

Se o ambiente for estável em temperatura e a humidade relativa, a madeira mantém-se estável, caso contrário, está constantemente em *stress* (Melo, 1999). Ainda assim, os gradientes de humidade só começam a ser preocupantes abaixo do ponto de saturação da fibra (PSF), por ser neste momento, que a dinâmica de contração e dilatação se inicia, promovendo deformações e fendas da madeira (Melo, 1999; Louzada, et al., 2002).

Contudo a madeira não consegue suportar diferenciais de gradientes de humidade elevados, sendo que, muitas das vezes as madeiras saem dos secadores com diferenças de 24% a 25%. No entanto, depois da saída da estufa, a madeira deve calibrar os seus teores de humidade, no sentido de se estabilizar com ambiente em redor. Só depois de esta fase estar concluída é que se pode considerar uma madeira como seca (Hoadley, 1997; Melo, 1999).

## **7. Estudo das causas de deformação durante a secagem das madeiras arqueológicas degradadas**

O conhecimento sobre a madeira e o seu comportamento durante uma secagem artificial ou natural são já bastante conhecidos e estudados. No entanto tem-se feito pouca pesquisa no que diz respeito às madeiras arqueológicas provenientes de meios húmidos. Este facto não se deve à falta de investigação na área, mas sim devido à opção dos conservadores em dedicar mais atenção à análise de tratamentos com consolidantes, que permitam retirar a água da madeira, impedindo a sua deformação e colapso.

Cada vez mais, a comunidade científica tem concluído que o uso de consolidantes, sem atender às especificações da madeira, tem originado alguns problemas, influenciando a qualidade dos tratamentos. Entre eles destacamos o aparecimento de colapsos durante a secagem com  $CO_2$  Supercrítico (Schindelholz, et al., 2007, pp. 23-24), ou, até mesmo, durante a secagem por liofilização, onde microfissuras e colapsos têm sido relatados quando não tratados com PEG (Hamilton, 1999, p. 28).

A importância de perceber a dinâmica da secagem de uma madeira degradada torna-se assim vital para compreender os fenómenos físicos que ocorrem durante um tratamento de secagem, mesmo que a madeira esteja preenchida com consolidantes. Não sendo possível comparar as dinâmicas da secagem das madeiras degradadas com as madeiras verdes, devido às variáveis implícitas na sua degradação, é imperativo conhecer as reações e comportamentos das madeiras degradadas durante a secagem, no sentido de criar programas de secagem mais rápidos e seguros para as madeiras arqueológicas.

Este conhecimento, não só permitirá baixar os tempos de tratamento de um artefacto, como poderá permitir a redução da quantidade do consolidante necessário à sua estabilização.

## **7.1 Breve descrição dos locais de origem das madeiras analisadas**

Durante os ensaios de secagem em laboratório foram utilizadas amostras de diferentes espécies e com distintos estados de degradação. Estas amostras foram tiradas de quatro sítios arqueológicos, também eles, com características de contexto ambiental diferentes.

A opção por estes quatro sítios prendeu-se pela oportunidade de acesso a materiais que não implicavam um grande valor do ponto de vista arqueológico ou artístico.

As madeiras em análise são provenientes dos sítios das embarcações designadas por Ria de Aveiro A e Ria de Aveiro F (Aveiro), cedidos pelo laboratório do atual Centro Nacional de Arqueologia Náutica (CNAS), da Direção Geral do Património Arqueológico, de uma zona alagada que pertence ao futuro Museu da Levada (Tomar) e da estação arqueológica marítima Troia I (Troia), cedidos pelo laboratório de Arqueologia e Conservação do Património Subaquático, do Instituto Politécnico de Tomar.

### **7.1.1 Ria de Aveiro A**

Trata-se de um navio do século XV, com cerca de 17 metros de comprimento integrado na tradição construtiva Ibero/Atlântica do período da expansão Portuguesa.

O local do naufrágio deu-se na praia de Biarritz, no canal da Mira, a cerca de 400 metros a sul da ponte da Barra, no concelho de Ílhavo. É um sítio caracterizado pela baixa profundidade, chegando mesmo em períodos de baixa-mar intensa estar parcialmente descoberto (Alves, et al., 2002, pp. 7-8).

É fortemente afetado pelas marés, que podem atingir correntes da ordem dos 4 nós de velocidade. Este facto promove o constante assoreamento do local, tendo mantido parte do espólio soterrado até à sua descoberta.



O fundo onde se encontra a embarcação é composto por uma primeira camada sedimentar recente, arenosa e de cor cinzenta, que cobre todo o local arqueológico e por uma segunda camada, onde se encontram os vestígios, formada por lodo e areia de cor negra.

Em 1999, a estrutura do navio foi retirada do sítio arqueológico e transportada para o laboratório de conservação do CNANS, pertencente à atual Direção Geral do Património Cultural (DGPC), antigo Instituto Português de Arqueológica (IPA), para conservação e salvaguarda.

Até ao momento este espólio foi alvo de dessalinização e encontra-se estabilizado em tanques de água doce, com biocidas, para inibição da atividade biológica durante o armazenamento.

Na época foram recolhidas 23 cavernas, alguns fragmentos de braços, parte da quilha e sobrequilha, duas escoas e o cadaste, para além de 25 tábuas do lado estibordo e 7 do lado bombordo (Alves, et al., 2002, pp. 7-8).

De todos estes elementos foram utilizados três fragmentos de madeira de *Pinus Pinaster*, pertencentes à carga do navio e que foram posteriormente divididos e cortados em provetes mais pequenos para os ensaios laboratoriais.

### **7.1.2 Ria de Aveiro F**

Situado na região da ria de Aveiro, a embarcação foi descoberto durante um acompanhamento arqueológico das obras de alargamento do Porto de Aveiro, em 2002. Posteriormente, foi alvo de escavação arqueológica, tendo-se revelado um local de grande importância, por se pensar tratar de um antigo canal de navegação do século XIII a século XV.

No local foram detetados vários núcleos isolados ao longo de um quilómetro de extensão. Ao ser notório que se tratava de um local complexo em termos de dispersão dos achados, não foi possível perceber se se tratava somente de uma única embarcação ou de várias

relativamente contemporâneas. As datações por radiocarbono dos vários núcleos foram, segundo Ricardo Rodrigo (2002), muito confluentes, situando a morte das madeiras em dois períodos 1320 a 1350 e 1390 a 1450, permitindo colocar a hipótese dos vários núcleos pertencerem a uma só embarcação.

Os núcleos foram exumados e transportados para o laboratório do CNANS do antigo IPA, atual DGPC, para tratamento e posterior estudo, onde estiveram em processo de dessalinização e armazenamento em tanques com água doce e biocida (Rodrigo, 2002, pp. 1-10). Deste local foram usados dois fragmentos de madeira do grupo das Folhosas em que, se identificou apenas umas das madeiras como *Bétula alba* L..

### **7.1.3 Museu da Levada**

O sítio arqueológico do Museu da Levada, ao contrário dos locais atrás referidos, não é um local submerso, mas sim, alagado. Encontra-se localizado na parte baixa da cidade de Tomar, numa parcela de terra no meio do rio Nabão e foi descoberto em contexto de obra, em 2011, durante os trabalhos de requalificação futuro do Complexo Cultural do Museu da Levada. Os trabalhos de escavação permitiram exumar vestígios de uma antiga entrosga e outros elementos estruturais, identificados como pertencentes a um antigo lagar de azeite do século XVIII (João Leitão; António Cheney, 2011).

As madeiras registadas foram posteriormente enviadas para o Laboratório de Arqueologia e Conservação do Património Subaquático, do Instituto Politécnico de Tomar, para serem conservadas e posteriormente expostas no futuro museu.

Destas, foram utilizadas 4 pequenos fragmentos, sem contexto, representantes de duas espécies, uma do grupo das Coníferas (*Pinus pinaster* Ait) e outras do grupo das Folhosas, não identificada.

#### **7.1.4 Troia I**

O local arqueológico de Troia I localiza-se junto à foz do rio Sado, a uma profundidade média de 4 metros. Trata-se aparentemente de uma embarcação do século XIX, provavelmente de mercadorias, afundada aproximadamente a 1 milha e meia da marina, junto ao banco de areia, à entrada do Sado.

Os trabalhos arqueológicos efetuados são ainda muito preliminares, no entanto, já foi observada a existência de vários núcleos dispersos, todos eles pertencentes à mesma embarcação. Entre os vestígios registam-se uma grande parte da estrutura do navio, em madeira, onde foram identificadas duas espécies, *Ulmus minor* Mill e *Abies alba* Mill.

O local é fortemente atingido pelas correntes de maré, que promovem um assoreamento periódico do local, correspondendo ao Inverno a altura em que o local se encontra desenterrado.

No que diz respeito à conservação das madeiras, a madeira principal da estrutura da embarcação encontra-se em excelente estado de conservação, no que diz respeito ao tecido lenhoso. Facto que deriva da anatomia da própria espécie da madeira, que sendo muito densa e pouco permeável dificulta o ataque bacteriológico. Ao mesmo tempo, a camada de areia que cobre o local é uma barreira à atividade biológica de maior porte, tal como os moluscos e os crustáceos marinhos. Ainda assim, no período em que o local se encontra desassoreado, as madeiras são fortemente atacadas pelo *Teredo Navalis* e algumas espécies de crustáceos, provocando uma grande e rápida destruição dos elementos de madeira da estrutura do barco à medida que esta se vai destapando.

Relativamente à madeira *Abies alba*, onde até ao momento só foi encontrado um exemplar, esta encontra-se bastante debilitada pelo ataque bacteriológico, que por ser mais porosa torna-se mais vulnerável ao seu ataque. Foram recolhidos três pequenos fragmentos de madeira, durante os trabalhos de intervenção arqueológica, para identificação e análise do estado de conservação.

## **7.2 Influência dos níveis de degradação do tecido lenhoso na secagem das madeiras - Ensaio em laboratório**

### **7.2.1 Metodologia**

Os ensaios de laboratório foram realizados com o objetivo de compreender e detectar a reação de várias madeiras à secagem natural, isto é, uma secagem simples ao ar em local arejado e coberto, sem incidência direta do sol.

O conjunto dos provetes foi selecionado segundo o seu estado de conservação, tentando abranger um grupo que compreendesse o maior número possível de níveis de degradação.

Nesse sentido, foi inicialmente planeado a seleção dos provetes segundo a avaliação do seu estado de conservação pelo método proposto por (Jong, 1977) para a classificação do estado de conservação das madeiras arqueológicas encharcadas (Schindelholz, et al., 2007, p. 17). Este método consiste em calcular o teor de humidade de uma madeira arqueológica através da secagem em estufa a 102 °C de uma ou várias amostras da madeira e calculando a diferença entre o peso do provete húmido e o peso do provete totalmente seco, conforme demonstra a seguinte fórmula.

$$Th = \frac{mh - ms}{ms} \times 100$$

Onde :

*Th*= Teor de humidade (%)

*mh*= Massa húmida (g)

*ms*= Massa seca (g)

Entenda-se que o provete só se encontra seco quando o seu peso estabiliza e se mantém constante durante um período de tempo. Nesse sentido o provete é colocado na estufa durante um período de 24 horas e arrefecido num excicador até à temperatura ambiente. A amostra é pesada após esse período e novamente colocada por mais uma hora no excicador, sendo novamente verificado o seu peso. Caso este se mantenha constante considera-se a madeira totalmente seca.

Segundo o mesmo autor as madeiras classificam-se em três níveis:

- Classe I – Acima dos 400% de teor de humidade;
- Classe II – Entre 185% a 400% e;
- Classe III – Abaixo de 185%.

Deste modo, este método indica resumidamente a relação entre o teor de humidade da madeira no seu estado saturado e o estado de degradação do tecido lenhoso.

No entanto os ensaios levados a cabo no laboratório permitiram perceber que este método não é o mais indicado e rigoroso. Verificou-se que a relação não é linear nem representa o verdadeiro estado de conservação do tecido lenhoso. A heterogeneidade das madeiras entre as diferentes espécies é enorme, o que inviabiliza uma relação entre o teor de humidade e o estado de conservação da madeira. Isto porque madeiras muito porosas, portanto, pouco densas, podem conter níveis elevados de teores de humidade sem que isso signifique degradação do tecido lenhoso. Esta conclusão é comprovada pela análise dos provetes onde, por exemplo, o provete PM30 possuía um teor de humidade de 360% considerado na escala de De Jong como classe II, muito perto da classe I, onde se considera uma madeira muito degradada, e na verdade, verificou-se que a madeira do provete PM30 estava em muito boas condições de conservação.

Por este motivo, o método proposto por De Jong (1977) não permitiu classificar o estado de conservação dos provetes, acrescentando a impossibilidade de relacionar os resultados das experiências da secagem binária com o verdadeiro estado de conservação das madeiras.

Deste modo era importante encontrar um método científico que permitisse calcular de uma forma mais rigorosa e precisa o real estado de degradação do tecido lenhoso. Entenda-se que o fato de referir muitas vezes o estado de conservação do tecido lenhoso deve-se ao facto de que este é o parâmetro mais importante na apreciação das madeiras enquanto degradação do material em si. Desta forma deve ficar claro que os parâmetros de avaliação da degradação são exclusivamente relativos ao material, excluindo qualquer outro tipo de patologia como quebras, ou outros danos causados por fatores físicos e que dizem respeito ao artefacto e não ao material de que é composto.

Assim sendo foi criado um novo processo de avaliação das madeiras que pudesse fornecer dados mais precisos no que diz respeito ao verdadeiro estado de degradação da madeira.

O método é baseado no teste do pico que é comum ser realizado por conservadores numa avaliação rápida e qualitativa do estado de conservação das madeiras quer debaixo de água ou no laboratório. Este teste consiste é espetar uma agulha na madeira e verificar a resistência desta à entrada da agulha. Como a degradação das madeiras é realizada sempre do exterior para o interior, o que se verifica é que a resistência à entrada da agulha na madeira vai aumentando à medida que esta penetra na madeira. Este teste permite de uma forma bastante rápida e aferir qual a extensão de madeira que está afetada ou degradada.

Como já foi referido o método ao qual designamos, a partir deste momento, de teste de resistência à penetração (TRP) foi baseado no princípio acima descrito.

De forma a tornar este processo viável e mais rigoroso foi necessário calibrar a pressão exercida na madeira de forma que se pudesse relacionar os dados recolhidos, e deste modo, transforma-los em valores concretos que permitisse elaborar uma escala de avaliação.

A calibração foi realizada com uma amostra padrão de madeira de Balsa (*Ochroma pyramidale* Var.), em bom estado de conservação e em estado natural, ou seja tal como é comercializada. A escolha desta espécie deve-se ao fato de ser a madeira menos densa e com menor resistência à penetração do mercado. Deste modo a Balsa representa o ponto zero da resistência da madeira à penetração. Neste sentido foi calculada a pressão

necessária para que a madeira de Balsa seja penetrada. Os testes foram realizados com recurso a um equipamento desenvolvido para o efeito (imagem 29).

O ensaio foi produzido através da construção de um mecanismo em formato, tipo agraphador, que possui um braço, onde, na extremidade do braço foi colocado um tubo metálico maciço com 2 mm de diâmetro e com secção plana. Sobre a extremidade do braço, onde se encontra o tubo metálico foram colocados gradualmente pesos, iniciando-se a experiência com 100 g, tendo sido aumentada gradualmente de 100 em 100 até às 1000 g, verificando-se neste ponto o início da cedência muito ligeira da superfície da amostra padrão. Este teste foi realizado nas faces tangencial e radial da madeira, pois nos topos, a informação obtida não permite recolher dados concretos uma vez que o comportamento da madeira à penetração da agulha nesta secção é completamente diferente devido ao sentido das fibras.

Deste modo calculou-se a pressão exata pela seguinte fórmula:

$$P = \frac{f}{A}$$

Onde:

$P$  = Pressão (kgf/m<sup>2</sup>)

$f$  = Força (Kgf)

$A$  = Área (m<sup>2</sup>)

Ou seja:

$$P = \frac{9,8}{0,00314} = 3121 \text{ kgf/m}^2$$

Deste modo o valor padrão da pressão para se realizar o TRP é de 3121 kgf/m<sup>2</sup>.

Foram selecionados sete provetes (tabela 1) de madeiras de diferentes espécies e com diferentes níveis de degradação e teor de humidade.

O provetes foram todos analisados pelo método de análise TRP onde posteriormente foi realizado uma tabela e convertidos os dados obtidos em níveis de degradação.

A escala escolhida foi a de 1 a 10, sendo que o nível 1 é o menos degradado.

A conversão dos dados na escala realizou-se pela diferença entre a profundidade de penetração e a distância entre o centro do objeto de madeira e a sua superfície. Esse diferencial é convertido em percentagem e posteriormente convertido em nível de degradação. Assim sendo, e título de exemplo se observarmos uma penetração de 0,5 numa madeira cuja espessura é de 4, significa que o seu nível de degradação é de 25%, o que corresponde ao nível 3 da escala. A conversão é realizada do seguinte modo:

$$\text{Conversão para nível} = \frac{Pn}{\frac{h}{2}} \times 100$$

Onde:

$Pn$  = Profundidade da penetração

$h$  = Espessura total do objeto

Através deste modelo de conversão foi elaborado uma tabela (ver Tabela 1) onde podemos estabelecer vários patamares de conservação.



**Secagem de Madeiras Arqueológicas:**  
**Análise dos comportamentos físicos e aplicação do modelo de secagem binário**

---

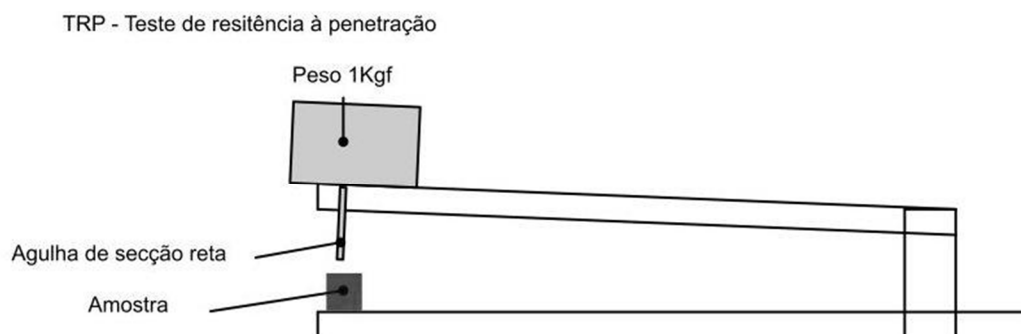


Imagem 29 Esquema ilustrativo do teste de resistência à penetração.

**Tabela 1** Tabela de conversão do TRP para níveis de degradação.

| Percentagem calculada entre | Conversão para nível de degradação | Condição do tecido lenhoso | Do ponto de vista do tratamento |
|-----------------------------|------------------------------------|----------------------------|---------------------------------|
| 0%-10%                      | 1                                  | Muito bom                  | Não necessita de consolidantes  |
| 11%-20%                     | 2                                  | Bom                        |                                 |
| 21%-30%                     | 3                                  | Razoável                   | Necessita de avaliação          |
| 31%-40%                     | 4                                  | Severo 1                   | Deformação parcial              |
| 41%-50%                     | 5                                  | Severo 2                   |                                 |
| 51%-60%                     | 6                                  | Severo 3                   |                                 |
| 61%-70%                     | 7                                  | Destruído 1                | Deformação total                |
| 71%-80%                     | 8                                  | Destruído 2                |                                 |
| 81%-90%                     | 9                                  | Destruído 3                |                                 |
| 91%-100%                    | 10                                 | Destruído 4                |                                 |

## Secagem de Madeiras Arqueológicas

### Análise dos comportamentos físicos e aplicação do modelo de secagem binário

---

Desta forma os sete provetes foram diagnosticados segundo a nova tabela de TRP e cujos resultados se apresentam na tabela 2.

Os sete provetes foram colocados a secar ao ar, sem qualquer tratamento ou cuidado. A intenção foi verificar e identificar os fenómenos que ocorrem durante este processo e relaciona-los com os seus patamares de degradação e morfologia do tecido lenhoso.

**Tabela 2 - Teor de humidade total dos provetes testados e estados de conservação.**

| Ref.        | T.H.          | Espécie                      | Proveniência          | Nível de deterioração do TL <sup>2</sup> |
|-------------|---------------|------------------------------|-----------------------|------------------------------------------|
| <b>PM8</b>  | <b>98.1%</b>  | <i>Ulmus Minor</i> (folhosa) | Troia I               | 1                                        |
| <b>PM9</b>  | <b>107.6%</b> | Folhosa                      | Ria de Aveiro F (14)  | 1                                        |
| <b>PM10</b> | <b>617.4%</b> | Pinus Pinaster               | Museu da Levada       | 5                                        |
| <b>PM11</b> | <b>118.2%</b> | Folhosa                      | Museu da levada       | 3                                        |
| <b>PM27</b> | <b>670%</b>   | Folhosa                      | Ria de Aveiro F       | 10                                       |
| <b>PM30</b> | <b>360%</b>   | <i>Pinus</i> (Conífera)      | Ria de Aveiro A       | 1                                        |
| <b>PM31</b> | <b>684.4%</b> | Folhosa                      | Ria de Aveiro F (115) | 10                                       |

---

<sup>2</sup> Tecido lenhoso

### **7.2.2 Resultados e discussão**

Ao analisarmos os provetes depois de secos, foram encontrados três tipos de deformação padrão, que se relacionam com a tipologia do tecido lenhoso e com o nível de degradação do provete.

Os provetes mais afetados foram os PM27, PM10, PM31, apresentando uma deformação volumica acentuada, chegando aos 70% de perda. Consideramos que este facto se deve ao nível de degradação avançado que apresentavam.

Outro ponto a salientar foi a inexistência de fendas ou fissuras nos provetes, tal caso é explicado pela homogeneidade da degradação do provete. O tecido lenhoso quando muito degradado encontra-se muito frágil e plástico, devido à hipersaturação da lenhina e à falta de celulose das paredes das células.

Durante a secagem, as células colapsam facilmente e as tensões criadas pelos diferenciais de gradientes de humidade são muito reduzidas, originando uma contração homogénea da madeira. Como todo o tecido lenhoso colapsa sobre si mesmo, tendo um único sentido, as fendas ou fissuras não se verificam. A madeira torna-se um material mais denso e duro com uma porosidade muito baixa, perto do nulo.

Nesta situação foram identificados três tipos de deformação diretamente relacionados com a estrutura do tecido lenhoso (Imagem 32, 33 e 34). O provete PM10 apresenta uma deformação aparentemente aleatória, que denominamos de *Tipo 1* em que se dá um esmagamento da periferia para o interior, idêntico ao colapso gravitacional. A madeira perde todas as suas referências dimensionais, tornando-se compacta e muito comprimida. É um tipo de deformação que se poderá relacionar com as madeiras do grupo das Coníferas, por serem madeiras de estrutura lenhosa simples, com poucas células radiais.

No caso do exemplar PM27, ainda que a sua forma pareça aleatória, ela tem o seu princípio na deformação em diamante, contudo o seu estado, muito mais avançado, acaba por evoluir da forma em losango, para uma forma achatada, sem qualquer referência geométrica, que designamos de *Tipo 2*. Já o provete PM31 com um teor de humidade semelhante ao PM27,

apresentou uma deformação seccional, isto é, a sua deformação deu-se essencialmente no sentido tangencial do provete e ao qual denominados de deformação *Tipo 3*. A explicação para o sucedido encontra-se no arranjo do tecido lenhoso, e no sentido das suas células radiais, sendo que, os provetes PM27 e PM31 pertencem a espécies do grupo das Folhosas, madeiras mais ricas em células radiais. Assim, o tecido ganha resistência à contração no sentido radial, uma vez que as células, mesmo quando muito degradadas, apresentam elevada resistência à contração no sentido longitudinal das fibras.

Deste modo, quanto mais densa for a presença de células radiais, maior será a propensão da madeira a produzir deformações do *tipo 2* e *3* dependendo do corte e orientação das células radiais. Em termos volúnicos, o provete PM31 perdeu cerca de 70% no sentido tangencial e apenas 10% no sentido radial. Sendo que estes 10 % não se refletem totalmente numa contração radial, mas sim, devido ao ligeiro encurvamento das células radiais, provocada pelas forças de tensão inerentes ao colapso das células em redor. Conclui-se também que, quanto mais numerosos forem os grupos de células radiais, menor vai ser esse encurvamento.

Por outro lado, enquanto na deformação do *Tipo 2*, a forma deixa de ser geométrica, a deformação do *Tipo 3* resulta sempre numa secção retangular, mais ou menos definida consoante a curvatura das células radiais.

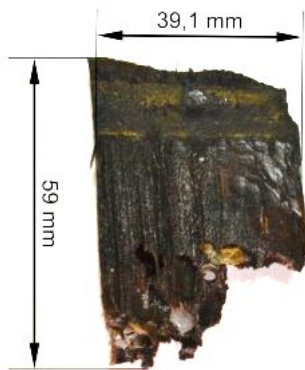
No caso dos provetes PM9, PM11, PM30 não foram visíveis deformações volumétricas significativas. Ainda assim alguns empenos foram detetados nos provetes PM9 e PM11 onde foi verificado o empeno da secção tangencial. Tendo em conta o tamanho dos provetes, que são de pequenas dimensões, podemos perceber que num objeto, de maiores dimensões, os empenos poderão ser mais severos, pois as curvaturas dos empenos serão mais pronunciadas. Para além dos empenos os provetes apresentaram ainda fissuras e fendas superficiais com maior ou menor grau de incidência dependendo do seu nível de degradação. Tal facto deve-se essencialmente à boa condição de conservação dos provetes (veja-se que os níveis de degradação destes tecidos enquadra-se entre o nível 1 e o nível 3). Nestes casos existe uma grande amplitude de teores de humidade entre o interior da madeira e a superfície (Imagem31). O aparecimento dos empenos e das fendas bem como a sua profundidade ou grau de severidade estão relacionados com a variação de teores de

**Secagem de Madeiras Arqueológicas:**  
**Análise dos comportamentos físicos e aplicação do modelo de secagem binário**

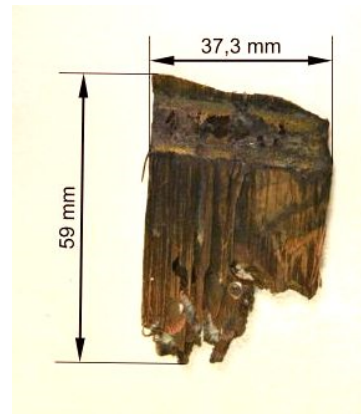
---

humidade. Quanto mais profunda for a degradação superficial das madeiras, mais profundas e largas serão as fendas.

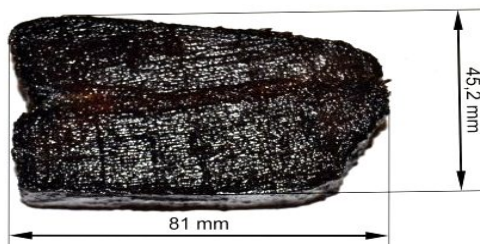
PM8 Saturado



PM8 Seco



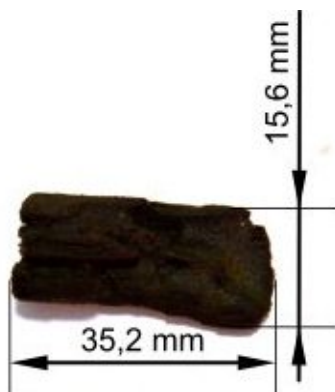
PM9 aturado



PM9 Seco



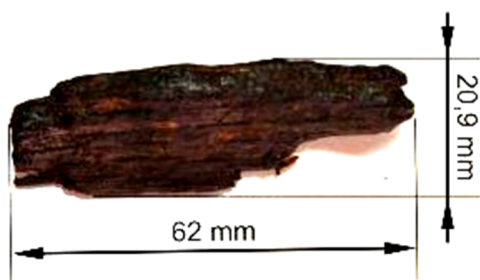
PM10 aturado



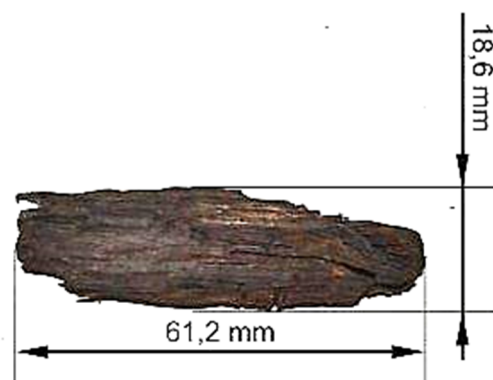
PM10 Seco



PM11 aturado



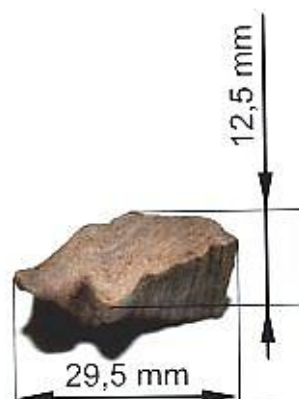
PM11 Seco



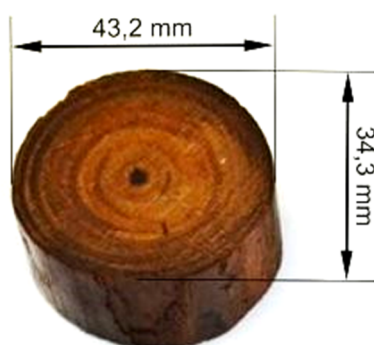
PM27 aturado



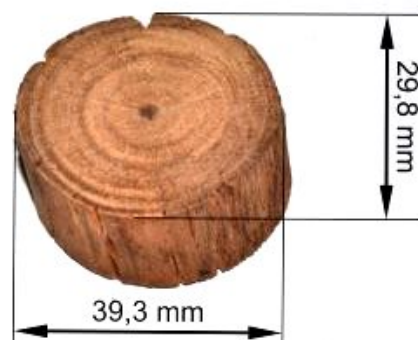
PM27 Seco



PM30 Saturado



PM30 Seco



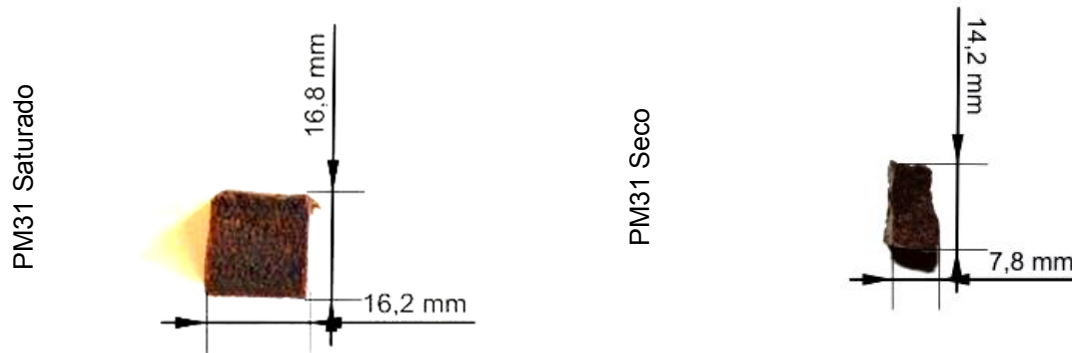


Imagem 30 Grupo dos provetes secos ao ar.

Esta patologia deve-se essencialmente à taxa de contração da madeira que é muito mais intensa na superfície degradada, do que no interior da madeira, em bom estado de conservação. Já os empenos estão associados à velocidade de secagem e à capacidade de manter os diferenciais de teor de humidade em valores que permitam à madeira suportar as tensões derivadas desse diferencial.

Desta forma, percebe-se que por mais cuidada que seja a secagem não evitará o problema da fissuração, mas como veremos no capítulo seguinte poder-se-á diminuir a intensidade deste tipo de anomalias e anular totalmente os empenos.

É importante realçar que o facto das madeiras arqueológicas serem todas trabalhadas pelo homem, fazendo com que, regra geral, os artefactos provenientes de meios arqueológicos sejam madeiras que já foram alvo na sua época de preparação. Quer isto dizer, que foram seleccionadas e secas, eliminando praticamente todos os defeitos da madeira, tratando-se por isso de madeiras equilibradas, apuradas e de boa qualidade (Schindelholz, et al., 2007, p. 19). Este pormenor é especialmente relevante na atenuação dos efeitos nocivos durante a secagem das madeiras e explica o comportamento dos três provetes PM9, PM11 e PM30.

Deste modo o principal problema das madeiras com este tipo patologia são os diferenciais do teor de humidade inerentes a este material, que é proporcional ao estado de degradação.

Embora a perda da forma do objeto não esteja em perigo, a fendilhação superficial pode causar a perda de leitura e de informação do artefacto.

Por fim, o provete PM8, considerando que o seu estado de conservação é excelente do ponto de vista do tecido lenhoso, apresentou um empeno ligeiramente acentuado e alguns pequenos colapsos localizados.



Imagem 31 Fendas superficiais derivadas da secagem do provete PM9

Realça-se também aqui, que neste caso, o controlo dos diferenciais de gradientes de teor de humidade é de extrema importância para evitar este tipo de deformação e como pretendemos explorar mais à frente, a utilização de um programa de secagem binário poderá contribuir positivamente para uma secagem controlada e logo aliviar as tensões, evitando essas deformações.



**Secagem de Madeiras Arqueológicas:**  
**Análise dos comportamentos físicos e aplicação do modelo de secagem binário**

---

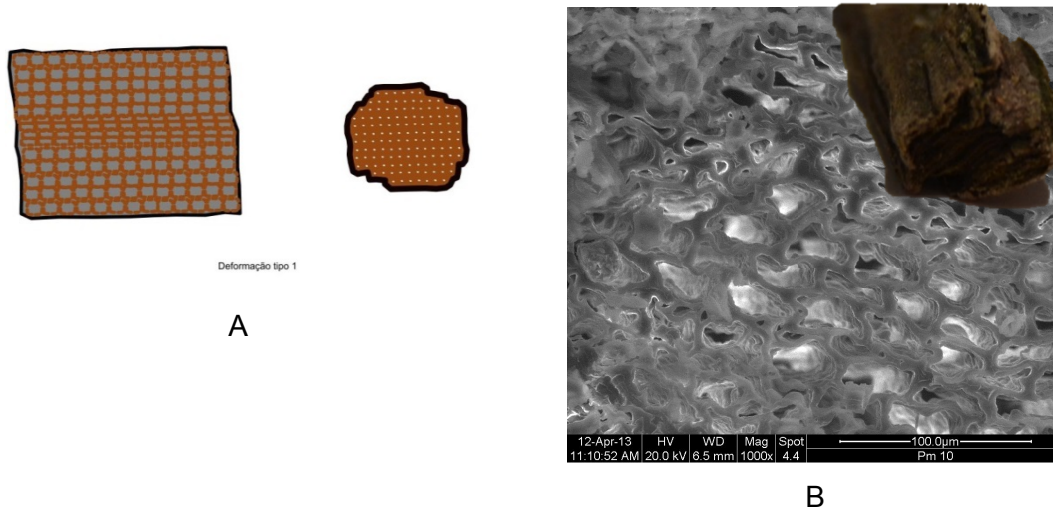


Imagem 32 A) Ilustração da deformação do tipo 1 numa madeira do grupo das Gimnospermas. B) Imagem de SEM das células colapsadas e deformadas de uma *Gimnosperma*.

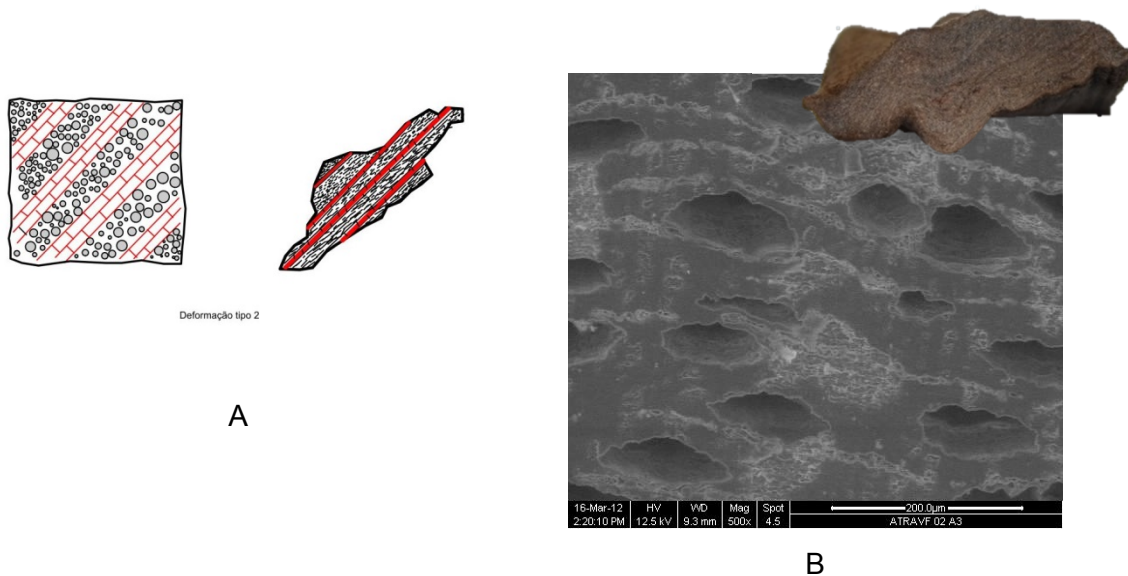
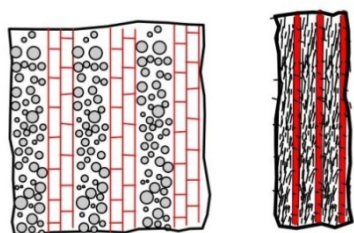
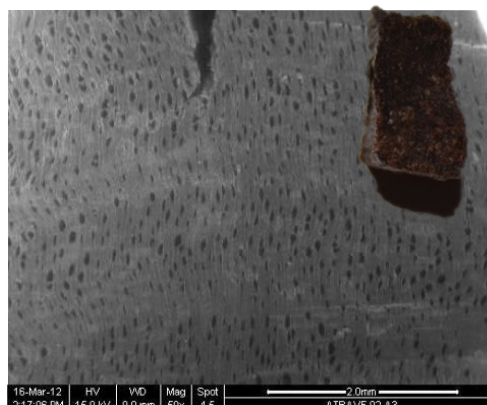


Imagem 33 A) Ilustração da deformação do tipo 2 numa madeira do grupo das Angiospermas. B) Imagem de SEM dos vasos espalmados e das células colapsadas de uma Angiosperma.



Deformação do tipo 3

A



B

Imagem 34 A) Ilustração da deformação do tipo 3 numa madeira do grupo das Angiospermas. B) Imagem de SEM dos vasos espalmados e do colapso das células num padrão orientado pelas células radiais

Deste modo conclui-se que:

1. Madeiras com degradação muito avançada (a partir do nível 5) podem produzir deformação *Tipo 1* para as Coníferas, *Tipo 2* ou *Tipo 3* para as Folhosas, dependendo da espécie e arranjo do tecido lenhoso, sendo mais severo quanto maior for o nível de degradação;
2. Madeiras com degradação superficial avançada produzem fendilhação na periferia, sendo tanto mais profunda, quanto maior for o estado degradativo. É característico de madeiras com níveis de degradação superior a 1;

Madeiras com tecido lenhoso intacto podem apresentar empenos e deformações quando secas ao ar. Quando apresentam fragmentação ou perda de volume podem apresentar empenos mais bruscos.

### **7.3 Colapso das células: Dinâmica da secagem das células da madeira**

No ponto anterior foram analisados aspetos comportamentais da madeira e a sua dinâmica perante a secagem. De seguida debruçamo-nos na dinâmica de secagem da célula da madeira.

Atualmente, a ideia que perdura é de que o fator de colapso das células deve-se à tensão capilar causada pela saída da água livre da madeira, e que abaixo do PSF, as tensões são as principais causas dos empenos e fissurações (Melo, 1999, pp. 60-64; Santini, 1996, p. 5; Andrade, 2000, p. 6; Mellado, 2007, p. 4).

No entanto, durante alguns testes, com diferentes programas de secagem, ficou perceptível que havia outras forças, para além da tensão capilar a interagir durante a secagem. Essa percepção surgiu porque, independentemente do programa o resultado final era sempre o mesmo, sendo que as “regras” aplicadas às madeiras verdes não se aplicavam neste caso.

No decorrer das análises foram testados programas com temperaturas altas, temperaturas baixas, altos e baixos teores de humidade, bem como vapor quente. Em qualquer dos casos o resultado foi o total colapso do provete, não se verificando nenhuma diferença na intensidade ou forma de colapso.

Neste sentido foi tentada a aplicação de uma nova abordagem, que nos permitisse retirar da equação as forças de tensão capilar, segundo o seguinte modelo teórico, considerando um capilar cheio de água:

- Se num dos lados for aumentada a pressão do ar, essa pressão vai expulsar a água pelo lado oposto do capilar. A pressão positiva do ar ao ser superior à

pressão negativa da tensão capilar faz com que a água seja expulsa do capilar, sem que as forças da tensão capilar tenham influência nas paredes das células, devido à pressão positiva do ar sobre as paredes. Desta forma, a água livre sai sem causar qualquer dano na madeira e abaixo do PSF, a secagem realiza-se com os lúmens das células sob pressão positiva, evitando o colapso posterior.

Logo, procedeu-se à realização do ensaio da seguinte forma (imagem 35):

1. Selecionou-se um provete com teor de madeira a cerca de 600% de teor de humidade cosiderado de nível 10 no TRP;
2. Construiu-se uma cápsula cilíndrica, onde um dos lados era fechado com uma entrada de ar ligada a um compressor;
3. O provete foi cortado à medida do diâmetro do tubo e encaixado no interior do tubo com algum aperto;
4. Foi injetado ar comprimido com uma pressão de 1bar, para que atravessasse a madeira apenas pelos poros.

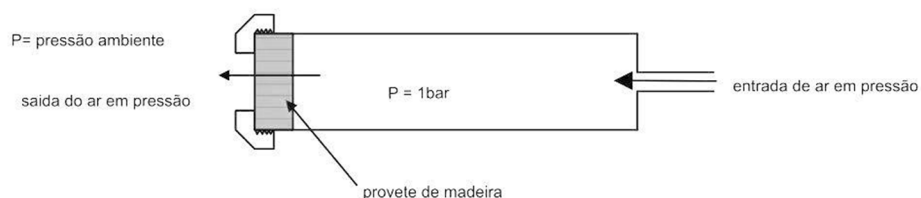


Imagem 35 Esquema da câmara de secagem por diferencial de pressão.

Durante o processo registamos uma saída muito rapidamente da água livre, sem que houvesse qualquer fenómeno de retração ou colapso da madeira. No entanto, depois de algum tempo de secagem da água higroscópica, o provete começou a apresentar sinais de deformação, iniciando o processo de retração do provete e verificando-se o mesmo tipo de colapso, que nos provetes secos ao ar e por secagem em estufa.

Este ensaio permite perceber que uma madeira com pouca celulose possui um índice de retração muito elevado, o que nos indica, que a lenhina neste caso, o composto em maior concentração, quando desidratada, possui uma elevada taxa de retração. Revela também a importância da celulose como agente estabilizador e estruturador do material.

Assim sendo, o colapso dá-se pelo desequilíbrio de forças entre a celulose e a lenhina. A celulose, como agente estruturador, possui alguma plasticidade quando hidratada e perde resistência mecânica. A lenhina, por seu lado, é um composto amorfo. Ao desidratar, a lenhina começa a exercer uma força negativa nas paredes de celulose que, quando essa força é superior à resistência mecânica da celulose, a parede da célula é rompida e colapsa sobre si mesma (Imagem 36 e 38).

Ainda assim, a tensão capilar causada pela saída da água faz sentido na secagem de madeiras verdes, pois, pode ser suficiente, em alguns casos, para desequilibrar as forças entre a celulose e a lenhina, uma vez que a tensão capilar exerce uma força negativa, fragilizando a celulose. Contudo, o facto de se ter verificado que a deformação da amostra de teste só aconteceu após a saída total da água livre do interior das células, pode concluir-se que o colapso não é especificamente causado pela tensão capilar, mas sim, por forças mecânicas que interagem entre as paredes das células e a própria lenhina (Imagem 36 e 37).

Tendo em conta esta situação, conclui-se que quanto menor for a concentração de celulose, maior é a sua propensão ao colapso e à deformação, sendo que, do mesmo modo se aplica às células.

As conclusões deste experimento também permitem aferir que não é possível, com estas condições, desidratar uma madeira muito degradada sem um tratamento que impeça a

retração da lenhina, mesmo que o programa de secagem consiga eliminar as forças de tensão capilar da água.

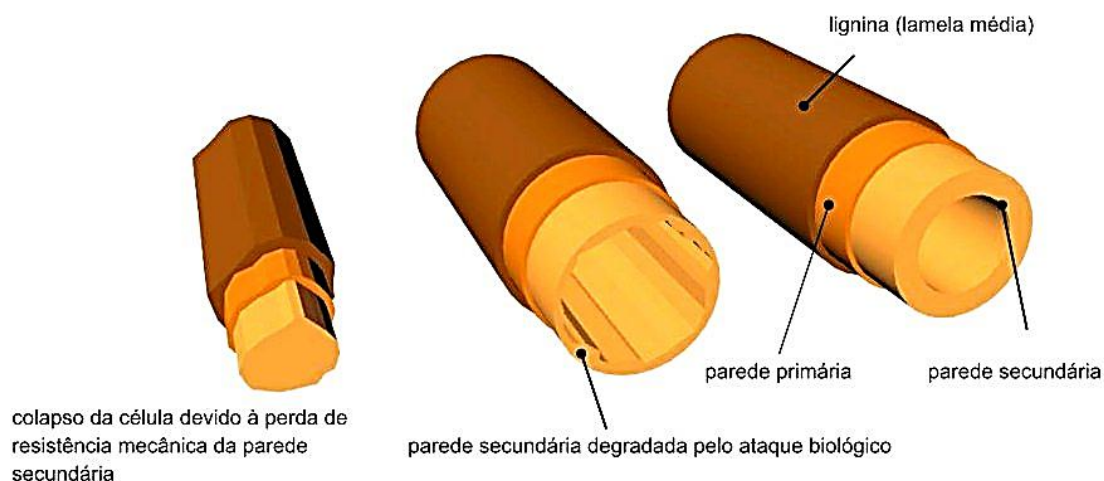


Imagem 36 Esquema geral 3D de uma célula e madeira, onde se verifica a fragilização da parede secundária, diminuindo consideravelmente a sua resistência mecânica, culminando no colapso total.

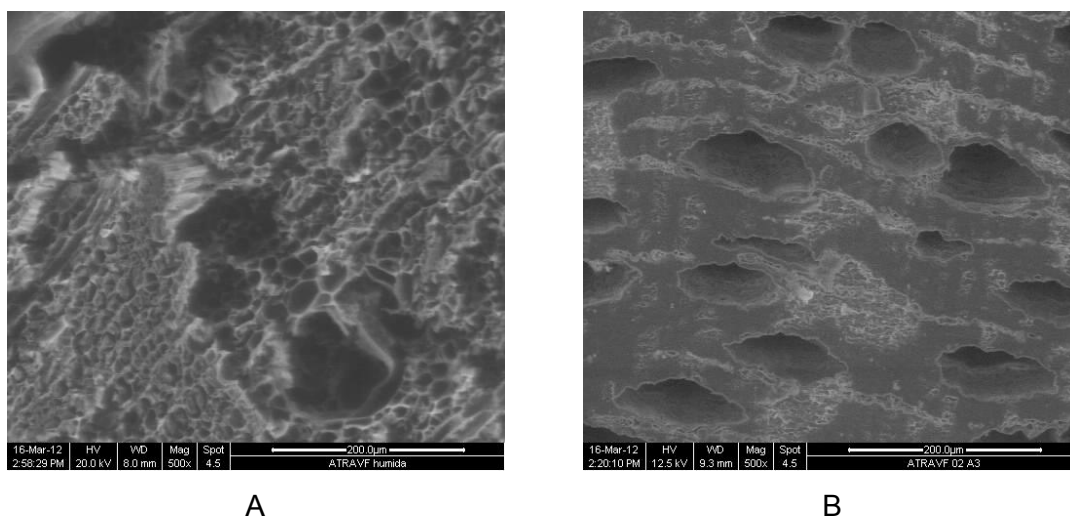
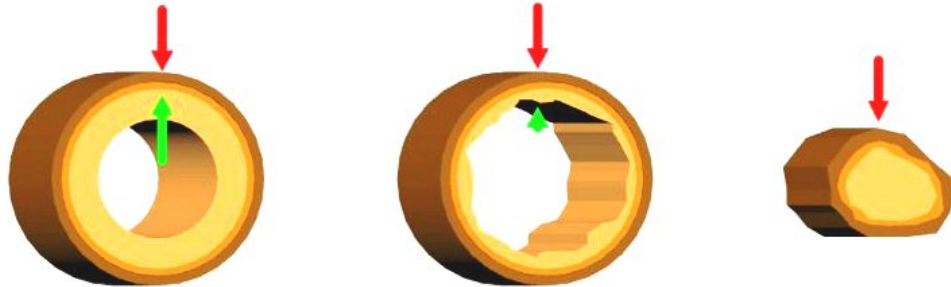


Imagem 37 Imagem de microscopia eletrônica (amp. 500x) do provete húmido (A) e imagem do provete (amp. 500x) seco onde se verifica o colapso total das células menores e o achatamento dos vasos.



□

Imagem 38 Esquema representativo das forças presentes no interior da célula durante a secagem, a resistência ao colapso aumenta quanto menor for a degradação da parede secundária.





## **8. Processo experimental: ensaios de programas de secagem**

### **8.1 Secagem binária: Definição e plano teórico do processo**

O programa de secagem, designado de secagem binária, é um modelo combinado de dois tipos de secagem, num processo sistemático, alternado e padronizado. O processo visa favorecer a desidratação da madeira com baixos diferenciais de gradiente de humidade, a fim de evitar tensões que possam contribuir para a deformação das madeiras.

Tendo em conta as dinâmicas de movimento da humidade na madeira, que foram percecionados durante as primeiras análises realizadas, considerou-se pertinente desenvolver um modelo de ensaio em estufa concebido para proporcionar uma secagem, mantendo os diferenciais de humidade muito baixos. Deste modo, as madeiras submetidas a este modelo terão uma secagem aliviada das fortes tensões criadas pelos altos desníveis dos gradientes internos e periféricos, causados normalmente pelas secagens convencionais.

A denominação de secagem binária deve-se ao facto de que este programa combinar dois modelos num só, dispostos alternadamente, através de um padrão regulável. Deste modo, são favorecidos períodos de secagem absoluta e períodos de secagem de equilíbrio.

**Secagem absoluta** – é o momento em que existe a perda efetiva de água da madeira através da evaporação da superfície para o ar. A secagem é feita através da indução de calor por radiação eletromagnética de infravermelho, aquecendo o provete durante um período de tempo e promovendo a evaporação da água superficial e o fluxo de massa no interior da madeira. Este processo desequilibra os gradientes de humidade, deixando a periferia mais seca do que interior da madeira, e deste modo, em desequilíbrio e tensão. O período de tempo em que, a temperatura é aumentada e consequentemente a humidade relativa é diminuída, é um período de secagem muito curto, pelo que, deve ser adaptada às características e dimensões da madeira a ser seca.

Os parâmetros que devem ser adaptados no sistema binário são: a temperatura máxima, o momento de duração do aquecimento e o tempo entre períodos de secagem absoluta.

Entende-se, pois, que quanto maior for a permeabilidade e a taxa de difusão da humidade na madeira, menores poderão ser os tempos entre os períodos de aquecimento, pois o tempo necessário ao equilíbrio será menor neste casos.

Assim, nesta fase, a secagem da madeira é realizada pela evaporação da humidade da superfície e pela secagem por fluxo de massa no interior (Imagem 39).

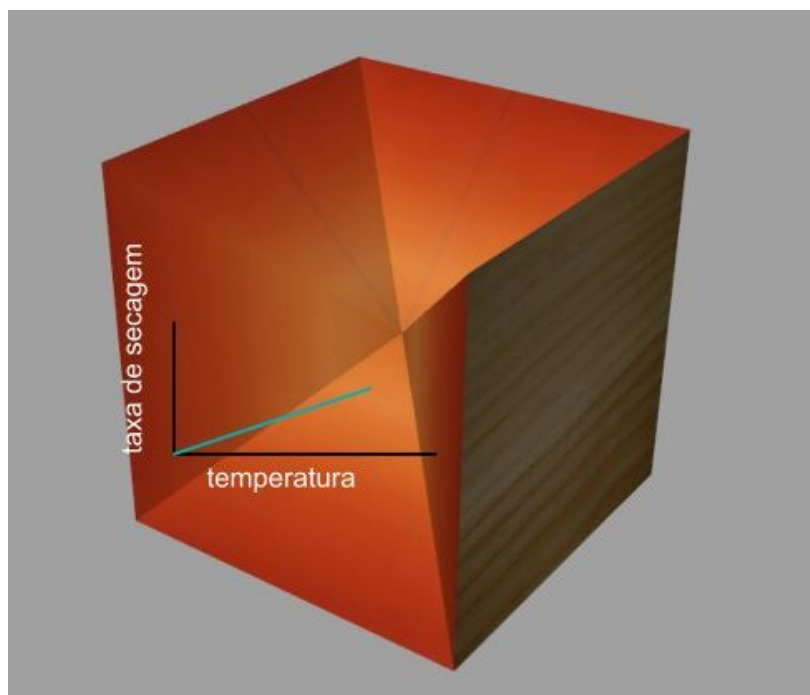


Imagem 39 Modelo da evolução da taxa de secagem e aumento da temperatura da madeira na fase de secagem absoluta. À medida que a temperatura da madeira aumenta da superfície para o interior, também a taxa de secagem vai aumentando. Neste sentido as regiões mais avermelhadas (mais quentes) do gráfico terão uma taxa de secagem superior às regiões mais alaranjadas (menos quentes).

**Secagem de equilíbrio** – é o momento onde não existe perda de água do provete, podendo inclusive recuperar alguma da água libertada. No entanto, promove a secagem de zonas internas mais húmidas a fim de se equilibrarem com as zonas periféricas mais secas.

Em termos concretos trata-se do período de tempo entre as subidas de temperatura, onde estas são diminuídas e a humidade relativa se eleva para perto dos 100%. Nesta fase não existe libertação da água para o exterior, apenas o reequilíbrio no interior da madeira, estabilizando os teores de humidade.

A diminuição da temperatura externa irá promover a deslocação de humidade das zonas mais húmidas e quentes (interior) para as zonas mais frias e secas (periferia), através da difusão da humidade pelas paredes das células (Imagem 40). Neste sentido, o diferencial de gradientes de temperatura também desempenha um papel fundamental na aceleração da difusão da humidade no interior da madeira. Este processo tende a estabilizar-se ao fim de algum tempo, deixando o provete relaxado e sem tensões, estando pronto para voltar a submeter-se a um período de secagem absoluta.

Neste caso poderá haver um aumento do teor de humidade na madeira, uma vez que, alguma da humidade irá ser reabsorvida do ar.

## Secagem de Madeiras Arqueológicas

### Análise dos comportamentos físicos e aplicação do modelo de secagem binário

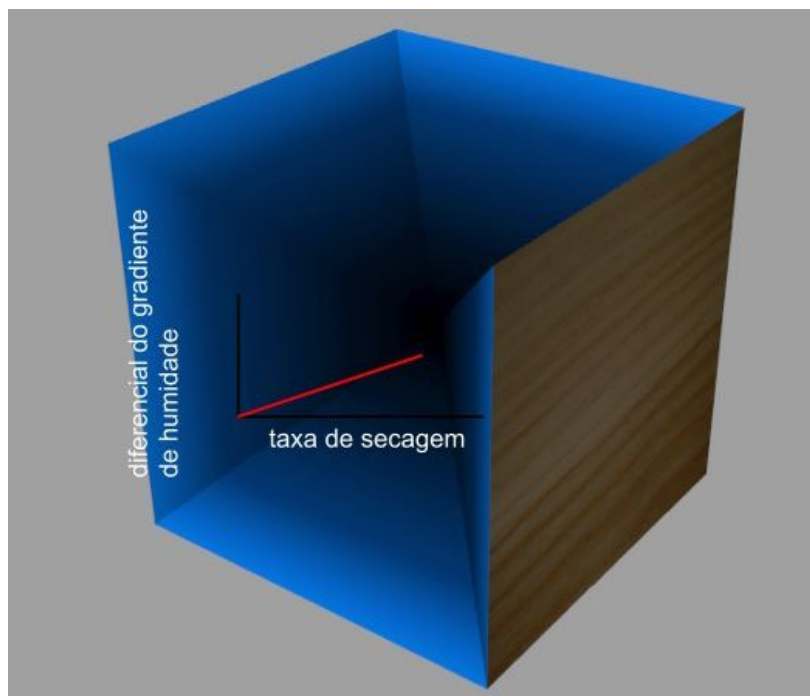


Imagem 40 Modelo 3D da evolução da taxa de secagem no interior da madeira durante a fase de secagem de equilíbrio. O diferencial de humidade aumenta do interior para o exterior proporcionalmente ao aumento da taxa de secagem. Enquanto houver um diferencial de temperatura dilatado o processo de equilíbrio é mais rápido, tendo tendência a diminuir à medida que a temperatura do provete se torna mais homogênea. Nessa altura quanto maior for o degradé da cor azul (mais escuro, maior teor de humidade) maior será a taxa de secagem, sendo que o teor de humidade da madeira é maior quanto mais próximo estiver o interior e menor quanto mais próximo estiver da superfície.

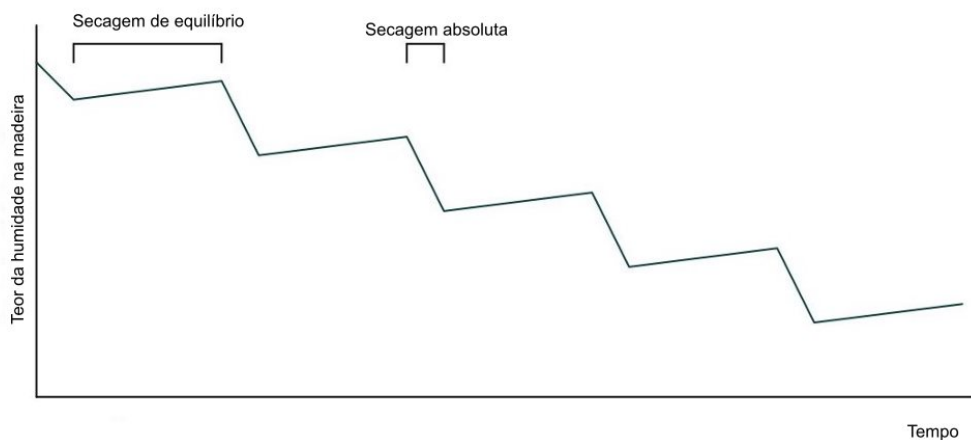


Imagem 41 Modelo do desenvolvimento do teor de humidade da madeira durante a secagem binária

Estes dois sistemas integrados num só programa permitem secar uma madeira com baixos diferenciais de humidade, mantendo o tecido lenhoso equilibrado e com baixas tensões mecânicas. No final, a madeira sairá da estufa já praticamente em equilíbrio, com teores de humidade homogéneos, ao contrário das secagens convencionais onde a madeira é retirada da estufa com diferenciais de gradientes de humidade elevados.

No entanto, este programa é particularmente lento, o que aumenta substancialmente o tempo de secagem, ainda assim, no caso da secagem de madeiras arqueológicas, a qualidade da secagem sobrepõe-se à rapidez, evitando que a madeira sofra danos que possam por em causa a integridade e informação do artefacto.

Como em arqueologia, as madeiras se apresentam com diferentes níveis de degradação e atendendo que a secagem depende do estado de conservação, optamos por aplicar dois sistemas com parâmetros diferenciados. Como se explicará de seguida em pormenor foi experimentado um, mais lento (*programa 1*), composto por períodos mais longos de secagem de equilíbrio e períodos muito curtos de secagem absoluta (Imagem 42, 43 e 44) e outro, mais agressivo (*programa 2*), diminuindo os períodos de secagem de equilíbrio e aumentando os períodos de secagem absoluta (Imagem 45, 46 e 47). O modelo foi definido tendo em conta o tamanho dos provetes e tempos de segurança uma vez que, devido à falta de equipamento que permitisse executar o cálculo da difusão térmica e de humidade não nos foi possível monitorizar os momentos de equilíbrio e secagem dos provetes com rigor. Essa análise foi feita com base no resultado durante e no final da secagem.

## Secagem de Madeiras Arqueológicas

### Análise dos comportamentos físicos e aplicação do modelo de secagem binário

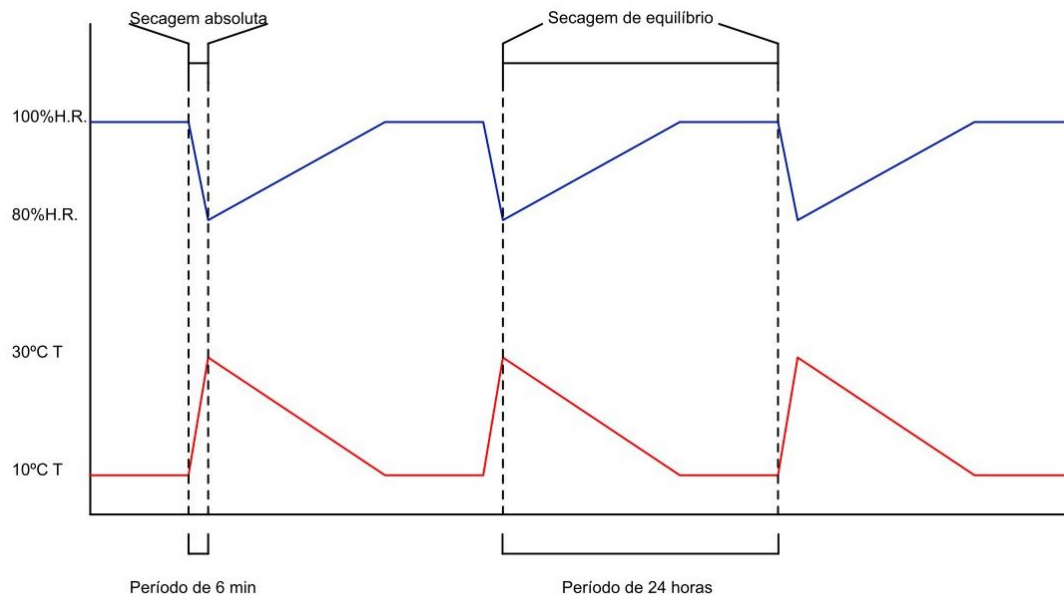


Imagem 42 Programa 1 - Modelo de secagem binário 1 elaborado para o provete PM28.

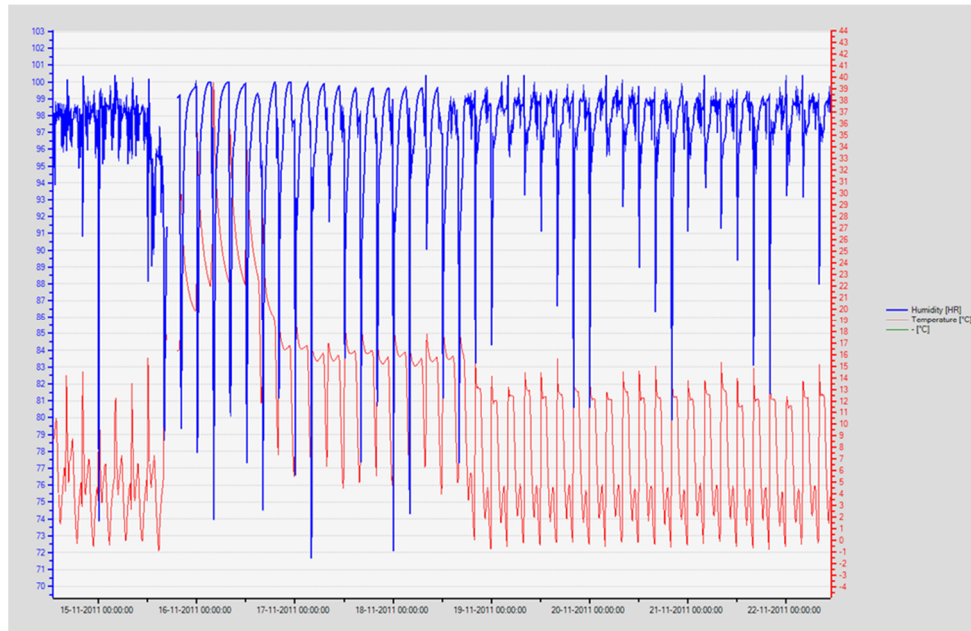


Imagem 43 Gráfico geral do ambiente da estufa climática do programa 1 de secagem binária longo

## Secagem de Madeiras Arqueológicas: Análise dos comportamentos físicos e aplicação do modelo de secagem binário

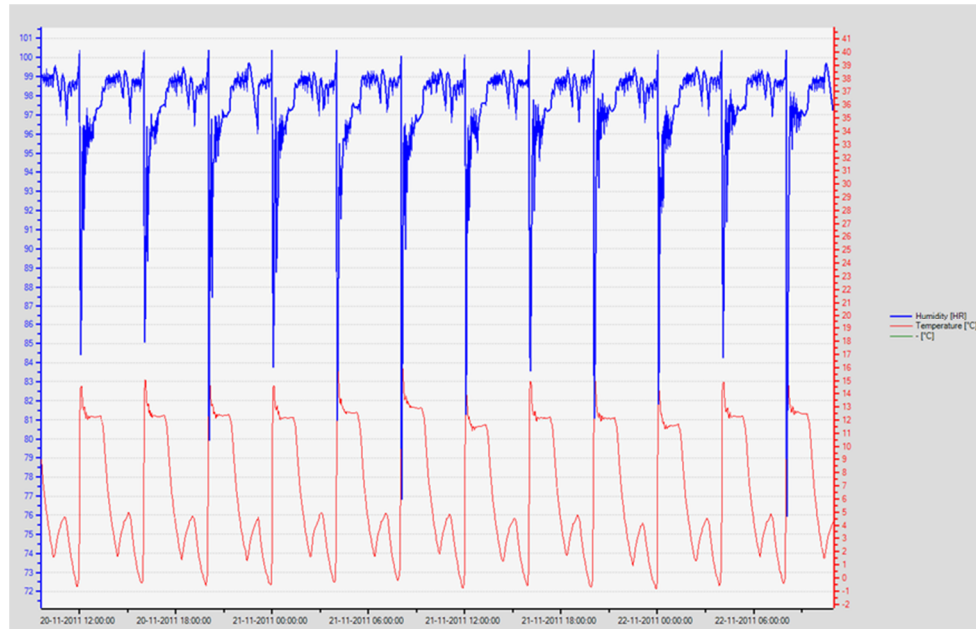


Imagem 44 Pormenor do padrão obtido na estufa climática do programa 1 de secagem binária longo.

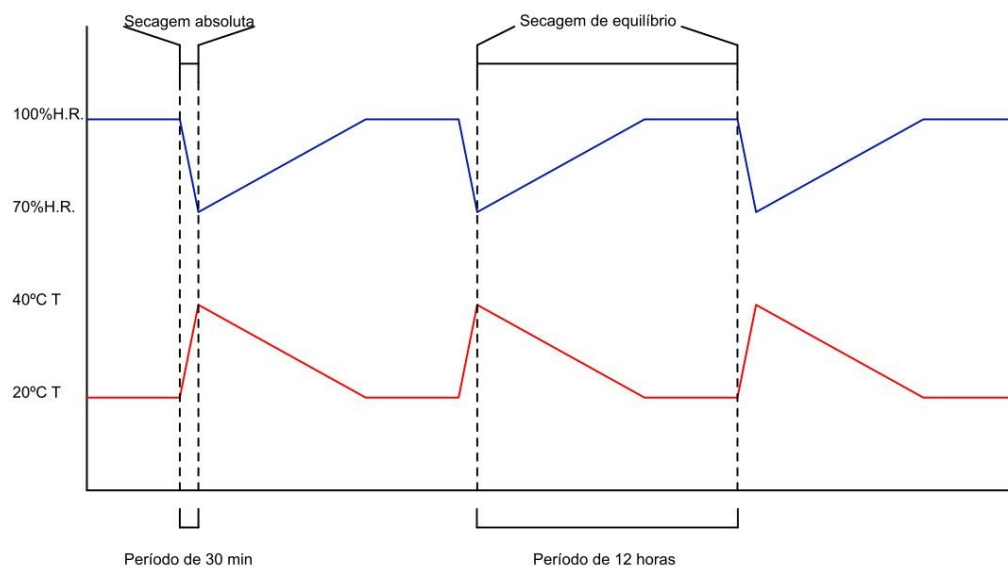


Imagem 45 Programa 2 - Modelo da secagem binário elaborado para os provetes PM6, PM7, PM24, PM25, PM26.

## Secagem de Madeiras Arqueológicas

### Análise dos comportamentos físicos e aplicação do modelo de secagem binário

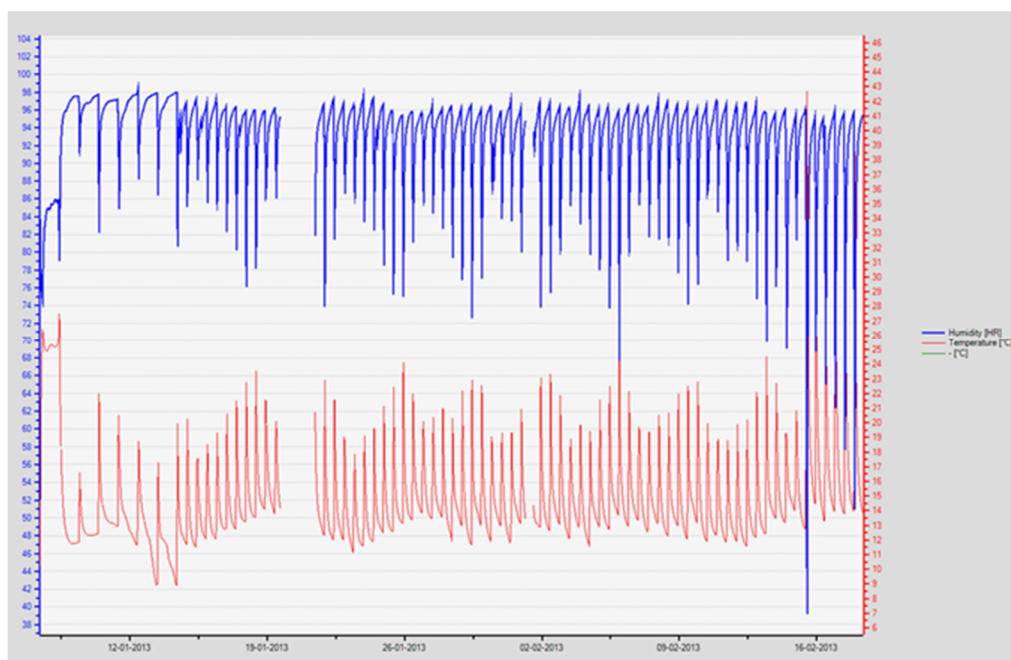


Imagem 46 Gráfico geral do ambiente da estufa climática do programa 2 de secagem binária curto

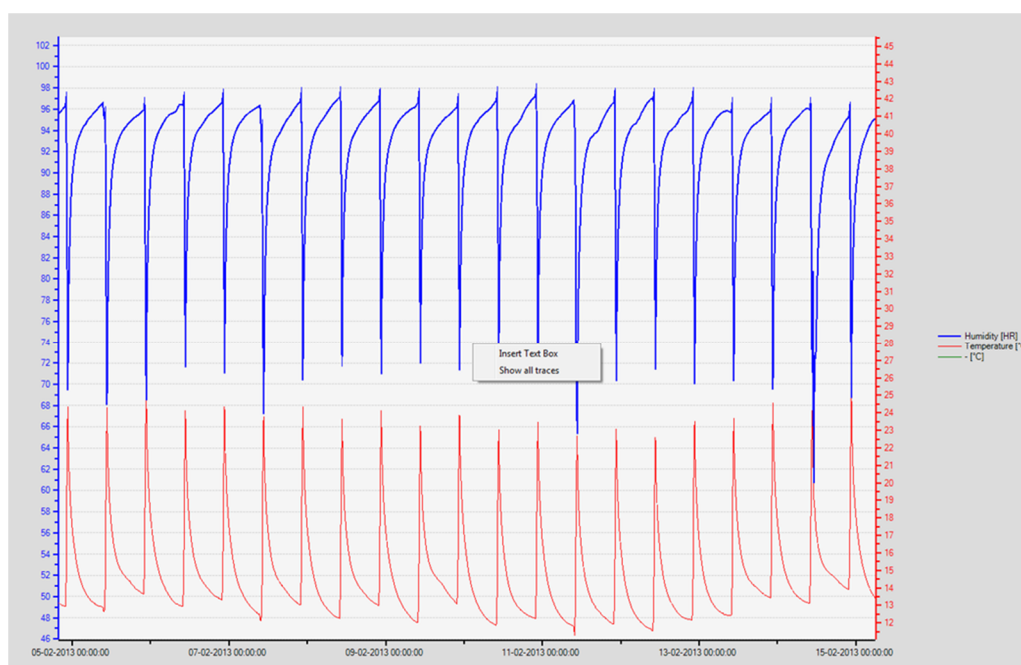


Imagem 47 Pormenor do padrão do programa obtido na estufa climática do programa 2 de secagem binária.



## **8.2 Metodologia**

Foram cortados e selecionados seis provetes de diferentes espécies e níveis de degradação (ver Tabela 3).

Depois de serem inventariados, pesados e medidos, o provete (PM28) o mais degradado foi submetido ao *programa 1* de secagem. Por ser o provete com uma degradação mais avançada foi aplicado um programa com períodos muito curtos de secagem absoluta e períodos muito longos de secagem de equilíbrio, de forma a garantir diferenciais de gradientes de humidade muito baixos (Imagem 42, 43 e 44).

Quando se verificou uma descida acentuada da taxa de secagem, observou-se um equilíbrio do provete com o ambiente da estufa e após uma análise visual do provete, que demonstrou apresentar resistência mecânica foi retirado da estufa e deixado a secar ao ar. Apesar de o provete apresentar um teor de humidade à saída da estufa de 105% não sofreu mais alterações físicas consideráveis durante a secagem ao ar, estabilizando com cerca de 11% de humidade.

Numa segunda fase foram submetidos os cinco provetes (PM6, PM7, PM24, PM25, PM26) ao *programa 2* de secagem, no sentido de se verificar a reação de cada um deles, já que se trata de um grupo de provetes muito heterogéneo, no que diz respeito à sua degradação. Neste caso o programa (Imagem 45, 46 e 47) foi modificado para uma secagem mais rápida com períodos de secagem absoluta um pouco maiores (30 min) e períodos de secagem de equilíbrio mais curtos (12 horas). Os provetes foram retirados da estufa segundo o mesmo critério utilizado para o PM28.

Durante a fase final de secagem ao ar, os provetes não apresentaram grandes alterações do ponto de vista físico. Tal como o provete PM28 apenas sofreram perda de massa derivada à eliminação da humidade e ligeira contração, sem deformação (ver Tabela 5).

Os teores de humidade à saída da estufa variaram de provete para provete (ver Tabela 4), no entanto esse fator não afetou o desempenho das madeiras durante a secagem ao ar.

## Secagem de Madeiras Arqueológicas

### Análise dos comportamentos físicos e aplicação do modelo de secagem binário

Tabela 3 Inventário dos provetes utilizados.

| Ref. | Teor de<br>humidade. | Espécie                      | Proveniência         | Nível de<br>Degradação |
|------|----------------------|------------------------------|----------------------|------------------------|
| PM6  | 107.6%               | Folhosa                      | Ria de Aveiro F (14) | 1                      |
| PM7  | 192.4%               | Ulmus minor<br>(folhosa)     | Troia I              | 1                      |
| PM24 | 360%                 | Pinus pinaster<br>(Conífera) | Ria de Aveiro A      | 1                      |
| PM25 | 118.2%               | Folhosa                      | Museu da Levada      | 2                      |
| PM26 | 362%                 | Pinus pinaster<br>(Conífera) | Museu da Levada      | 5                      |
| PM28 | 640%                 | Bétula alba<br>(folhosa)     | Ria de Aveiro F      | 10                     |

Tabela 4 Diferencial de teores de humidade entre a saída da estufa e depois de estabilizarem ao ambiente natural.

| Ref. | Th. à saída da estufa | Th final | Diferencial de Th |
|------|-----------------------|----------|-------------------|
| PM6  | 85%                   | ±11.5%   | 73.5%             |
| PM7  | 46.8%                 | ±9.6%    | 37.2%             |
| PM24 | 134%                  | ±12.6%   | 121.4%            |
| PM25 | 40%                   | ±10.1%   | 29.9%             |
| PM26 | 103%                  | ±11%     | 92%               |
| PM28 | 105%                  | ±11.8%   | 93.2%             |

**Tabela 5 Tabela da taxa de contração dos provetes no sentido radial (R) e tangencial (T).**

| PM6  |      | PM7  |      | PM24         | PM25 |      | PM26 |      | PM28 |      |
|------|------|------|------|--------------|------|------|------|------|------|------|
| R(%) | T(%) | R(%) | T(%) | Diâmetro (%) | R(%) | T(%) | R(%) | T(%) | R(%) | T(%) |
| 6.1  | 18.6 | 0    | 12.8 | 11.2         | 8.5  | 16   | 13.3 | 36.8 | 6.4  | 25.6 |

### **8.3 Equipamentos e instrumentos utilizados**

Devido à complexidade do programa foi necessário recorrer à construção de uma estufa climática, que nos permitisse produzir este tipo de padrão artificial no interior desta. Assim, adaptou-se um frigorífico (marca desconhecida devido a falta de referência) com duas sondas de temperatura e humidade de alta precisão, modelo Hygroclip HC2-S da marca Rotronic, um humidificador iónico da marca Taurus, um desumidificador da marca Solac modelo DH8935 e duas fontes de radiação de infravermelho (Imagem 48).

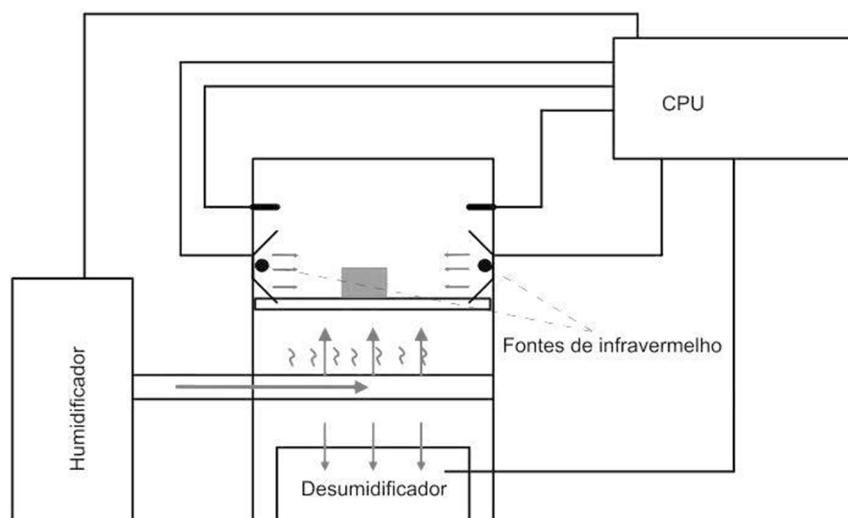


Imagem 48 Esquema de montagem da estufa climática.

Os provetes foram pesados em balança de alta precisão, com 3 casas decimais e medidos com régua. Para a análise do teor de humidade foi usado um forno industrial, sendo o teor de humidade calculado através da desidratação das amostras em estufa a 102 graus até estabilizar o peso e segundo a seguinte fórmula:

$$Th = \frac{m1 - m2}{m2} \times 100$$

Onde:

$Th$  = teor de humidade

$m1$  = massa do provete húmido

$m2$  = massa do provete seco

As análises morfológicas das secções transversais das madeiras seleccionadas foram analisadas através de microscopia simples e microscopia eletrónica (SEM), no laboratório de Microscopia da Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro.

#### **8.4 Resultados e discussão**

No contexto geral, o resultado ficou dentro do esperado. Os provetes com exceção do provete PM28 não apresentaram deformações do seu volume e permaneceram estáveis durante a secagem. Ainda assim existiu fissuramento superficial diferenciado em cada exemplar.

O provete PM7 foi o exemplar com melhor resultado do grupo, não apresentando qualquer tipo de dano e com taxas de contração muito baixas (Tabela 5). No entanto deve-se referir que este provete está em excelentes condições de conservação (nível 1) e aparenta ser uma madeira muito estável. Ainda assim, comparado com a secagem ao ar e temperatura crescente, o resultado foi o mais positivo, no sentido em que, nos outros dois provetes da mesma madeira foram observados empenos e colapsos pontuais.

Neste sentido, podemos concluir que em madeiras bem conservadas pode ser utilizado com sucesso o sistema binário, uma vez que, é notória a capacidade deste modelo de secagem atenuar ou eliminar deformações criadas pelas tensões do tecido lenhoso

O provete PM6 foi onde se verificou igualmente a capacidade da secagem binária em diminuir substancialmente as tensões durante a mesma. Em termos de aspeto visual final foi notório o melhoramento geral da madeira. Durante a secagem foi verificado, por comparação dos dois provetes, que a fissuração do PM6 foi menor e menos intensa que no PM9 (seco ao ar). Isto significa que, embora no final as fendas se tenham reduzido, melhorando o aspeto visual final do PM9, em termos internos do tecido lenhoso, a estrutura do PM9 foi mais afetada do que a estrutura do PM6.

O provete PM6 apresentou uma contração natural, dentro dos parâmetros, mas cerca de 2% superior, no sentido tangencial, à contração do PM9. Não foi analisado nenhum tipo de deformação, apenas a fissuração superficial esperada devido à degradação da camada periférica do provete. Ainda no campo das fissuras foi também, claramente visível, que estas foram muito menos intensas no provete PM6 do que no PM9, sendo que quando o provete foi retirado da estufa apresentava-se com um teor de humidade equilibrado, sendo comprovado pela inalteração física do provete durante a adaptação ao ambiente, fora da estufa.

O mesmo se reflete nos provetes PM24 e PM26, onde também não se verificaram deformações, sendo bem visível, a diminuição da intensidade das fissurações superficiais, embora não tenha sido tão significativa no PM24.

No que diz respeito ao provete PM25 e PM28, os resultados foram particularmente interessantes, ainda que, por motivos diferentes.

O caso do provete PM25 apresentava um maior desafio, por ser um exemplar com registos de entalhes e forma irregular. No final da secagem o provete manteve a sua forma inicial, não se verificando qualquer tipo de deformação do volume, exibindo apenas fissurações superficiais.

Já o provete PM28, para além do seu programa de secagem ter sido diferente dos restantes provetes, devido ao seu avançado estado de degradação, os topos do provete foram selados para evitar a evaporação e secagem no sentido axial, homogeneizando as taxas de difusão. O resultado final, ao fim de 51 dias de secagem, foi uma madeira com deformação e contração acentuada, ainda assim em termos comparativos com os provetes da mesma espécie e do mesmo fragmento de madeira, sujeitos à secagem ao ar, a diferença foi notória, tendo-se reduzido substancialmente o colapso e a deformação.

A análise microscópica e ultramicroscópica revelou que as células de maior diâmetro do lúmen (vasos) preservaram-se. No entanto, as células mais pequenas sofreram colapso total, sendo a origem da contração e deformação acentuada.

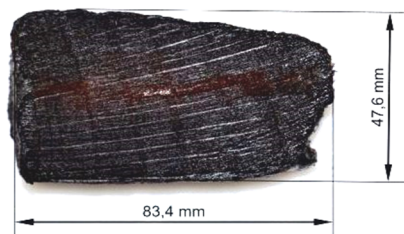


## Secagem de Madeiras Arqueológicas

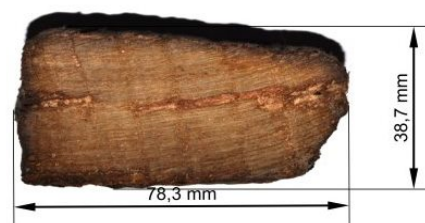
### Análise dos comportamentos físicos e aplicação do modelo de secagem binário

---

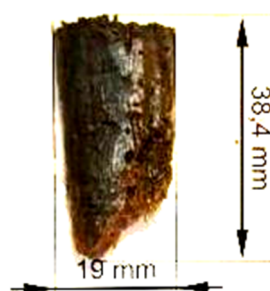
PM6 Saturado



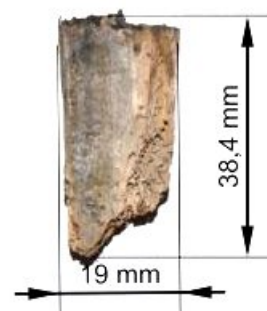
PM6 Seco



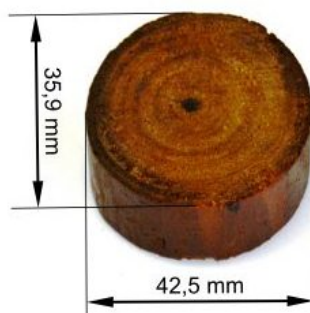
PM7 Saturado



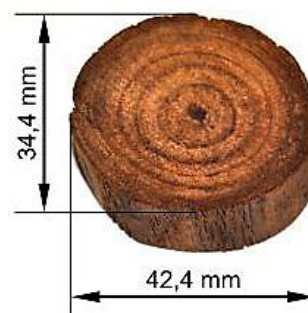
PM7 Seco



PM24 Saturado



PM24 Seco





**Secagem de Madeiras Arqueológicas:  
Análise dos comportamentos físicos e aplicação do modelo de secagem binário**

---

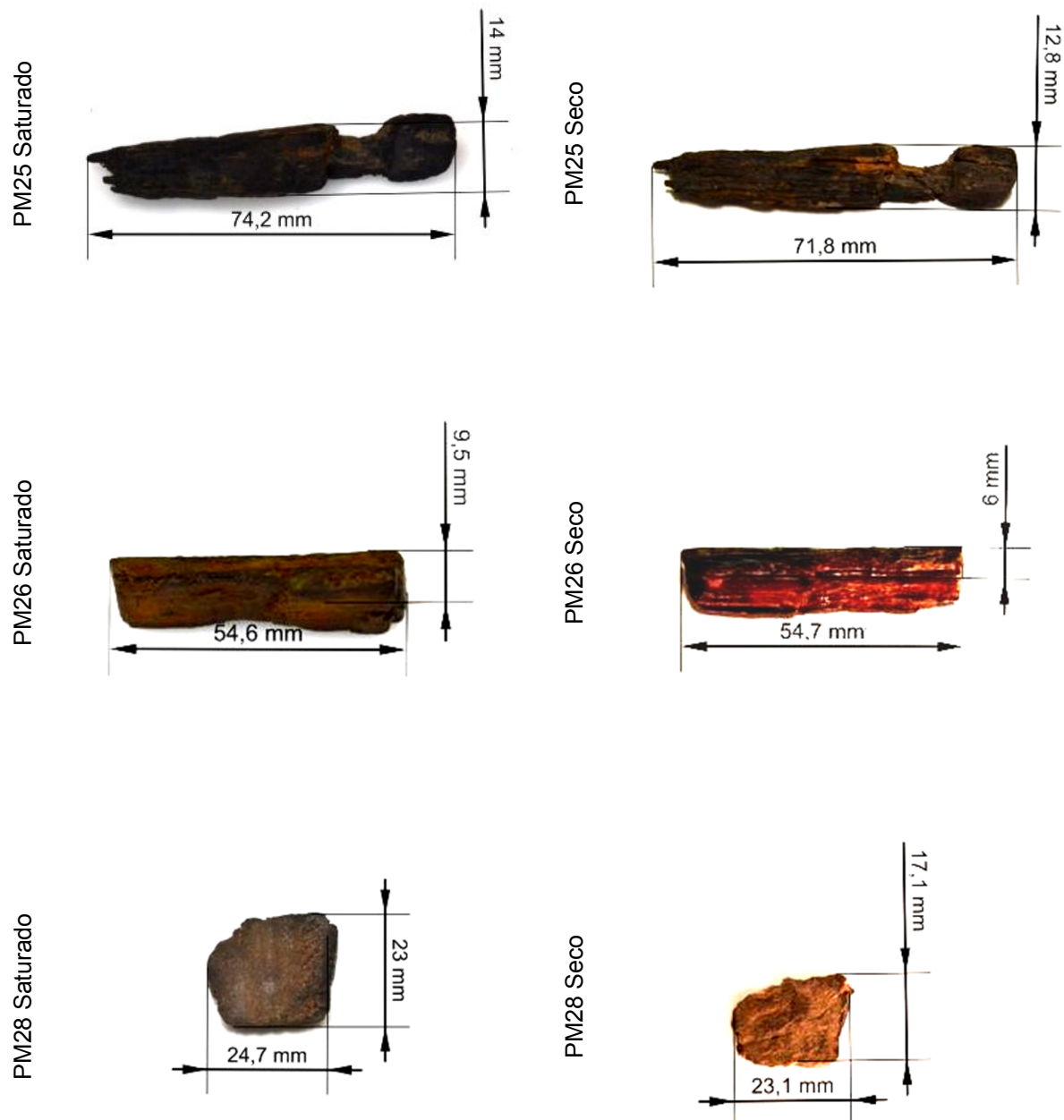


Imagem 50 Grupo dos provetes submetidos ao programa de secagem binário



## **9. Secagem por aumento gradual da temperatura em ambiente de elevada humidade do ar: Definição e modelo teórico do processo**

No sentido de averiguar o comportamento das madeiras degradadas a outros programas de secagem e despistar de uma forma mais concreta os efeitos da secagem binária foi testado um modelo de secagem a temperaturas e humidade altas. Este teste tem como objetivo analisar o comportamento das madeiras a secagens com temperaturas mais altas, a fim de averiguar o efeito da temperatura na secagem de madeiras degradadas e compara-lo com o modelo de secagem binária.

As altas temperaturas e humidades relativas constantes proporcionam uma secagem por fluxo de massa, sendo que, quanto maior for a temperatura, maior será a velocidade desse fluxo e consequentemente, maior será a taxa de secagem.

Por outro lado, a humidificação do ar tem o objetivo de minimizar a secagem por difusão, uma vez que a superfície da madeira é constantemente molhada, mantendo os gradientes de humidade periféricos elevados, orientando a secagem apenas por fluxo de massa.

O fluxo de massa dá-se com o aumento da temperatura do tecido lenhoso, promovendo a evaporação da água para os lúmens das células onde a água é extraída do interior da madeira pelos poros.

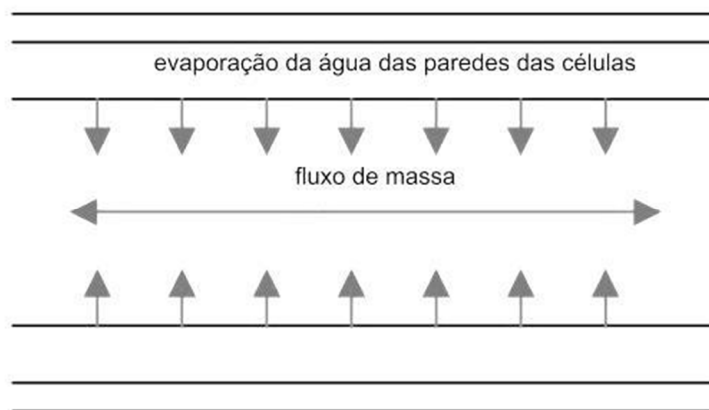


Imagem 51 Esquema da secagem por fluxo de massa no interior da célula.

## **9.1 Metodologia**

Para esta análise foram selecionados seis provetes (ver Tabela 6), integrando um exemplar de cada uma das espécies já testadas atrás, com o intuito de se poderem comparar posteriormente.

As amostras foram pesadas, medidas e inventariadas antes de serem submetidas à secagem na estufa. Os provetes foram inicialmente colocados na estufa num ambiente de 15°C e uma humidade relativa de 95%.

A temperatura foi elevada gradualmente durante 120 horas até aos 50°C, sendo constantemente injetado vapor de água, criando um ambiente quente e muito húmido.

No final, os provetes foram retirados da estufa ainda com alguma humidade e deixados a secar ao ar até estabilizarem.

**Tabela 6 Inventário dos provetes secos com temperatura crescente.**

| <b>Ref.</b> | <b>T.H.</b> | <b>Espécie</b>               | <b>Proveniência</b>   | <b>Nível de<br/>degradação</b> |
|-------------|-------------|------------------------------|-----------------------|--------------------------------|
| <b>PM12</b> | 449.2%      | Pinus pinaster<br>(Conífera) | Museu da Levada       | 4                              |
| <b>PM13</b> | 101.1%      | Folhosa                      | Ria de Aveiro F (14)  | 1                              |
| <b>PM14</b> | 539.6%      | Folhosa                      | Museu da levada       | 6                              |
| <b>PM15</b> | 360%        | Pinus pinaster<br>(Conífera) | Ria de Aveiro A       | 2                              |
| <b>PM16</b> | 640.4%      | Folhosa                      | Ria de Aveiro F (115) | 10                             |
| <b>PM17</b> | 192.4%      | Ulmus minor (folhosa)        | Troia I               | 1                              |

## **9.2 Equipamentos e instrumentos utilizados**

Os provetes foram ensaiados na mesma estufa climática já descrita atrás, alterando apenas o programa ambiental.

Na sequência foram pesados em balança de precisão e medidos com régua como já referido anteriormente.

As análises basearam-se na verificação visual e geral dos provetes, tendo em conta o aspeto estético, a forma, bem como a presença de danos criados durante a secagem.

### **9.3 Resultados e discussão**

Durante a monitorização das condições do ambiente dentro da estufa, verificou-se que, à medida que a temperatura se elevava, a humidade relativa baixava proporcionalmente, ainda que, a estufa estivesse constantemente a ser humidificada, revelando incapacidade do equipamento em compensar a reposição de humidade com o aumento da temperatura.

Inicialmente essa situação comprometeu a realização do programa de secagem estipulado. No entanto, à medida que se fazia a verificação dos provetes, foi possível aferir que estes mantinham a sua superfície constantemente hidratada e, deste modo, embora as sondas indicassem uma humidade relativa do ar baixa, o objetivo de manter a superfície dos provetes humidificada foi conseguido.

No geral, a secagem a temperaturas e humidades elevadas revelou-se muito agressiva para as madeiras. Do grupo, exclui-se apenas o provete PM13 (Imagem 52), o único com resultado mais aceitável, tendo em conta a comparação com os restantes provetes do grupo. **No entanto também sofreu alguma deformação por empeno** e fissuração superficial, correspondente à área mais degradada do provete.

Durante a secagem, os provetes, com exceção do PM13 e PM17, ao final de 48 horas a 30 graus de temperatura já apresentavam um elevado fissuramento superficial, mesmo com a superfície humidificada.

Esta situação deve-se ao facto de que, mesmo que a periferia da madeira esteja humidificada, o seu teor de humidade foi drasticamente diminuído, tendo em conta que as áreas superficiais destes provetes possuíam um teor de humidade inicial superior a 600%. A perda da água livre destas áreas degradadas proporcionou a ação das forças da tensão capilar sobre as paredes das células, que juntamente com a perda de água higroscópica da lenhina, iniciando o seu processo de contração, facilitou os colapsos e tensões na região mais degradada dos provetes, dando origem à fissuração ou ao colapso total superficial. Com isto foi possível observar que, às 48 horas de secagem, as regiões periféricas dos provetes já estariam muito abaixo dos 600% de teor de humidade.

O provete PM15 (Imagem 52) sofreu fissuração intensa da superfície, não apresentou, no entanto, deformação em termos de volume. Ainda assim o seu aspeto e superfície foram muito afetados. Comparativamente ao provete PM24 (Imagem 52) é possível verificar que os danos são menos intensos no PM24 do que no PM15, sendo o número de fendas de grande dimensão superior neste último.

O provete PM17 (Imagem 52) revelou-se incompatível com este tipo de programa de secagem, apresentando no final deformação por empeno e algum colapso pontual das células localizadas na periferia. **Este provete revela que mesmo uma madeira em que o seu tecido lenhoso se encontre em excelente estado de conservação necessita de cuidados na sua secagem, e que comparativamente ao provete PM7 da mesma espécie e com o mesmo nível de degradação, é prova concreta dos benefícios da secagem binária.**

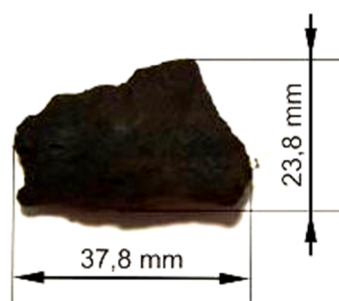
O provete PM12 (Imagem 52), por seu lado, expôs alguma deformação derivada da contração superficial, ainda assim, a sua forma original foi mantida devido à boa preservação do interior do provete. Desta forma, não apresentou fendilhação, sendo que a área periférica do provete apresentava um índice de degradação extremamente elevado, colapsando-se sobre o seu núcleo. O interior manteve a forma geral do objeto, mas ficou completamente desfigurado a nível superficial, revelando o que pode acontecer a uma madeira de nível superior a 4.

Os provetes PM14 e PM16 foram os mais afetados, sendo também os mais degradados do grupo. O PM14 apresentou uma deformação do *Tipo 1* e o provete PM16 revelou uma deformação do *Tipo 3*, ficando praticamente irreconhecíveis.

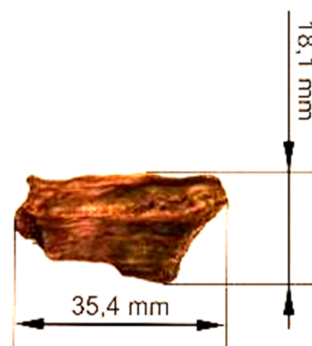
## Secagem de Madeiras Arqueológicas

### Análise dos comportamentos físicos e aplicação do modelo de secagem binário

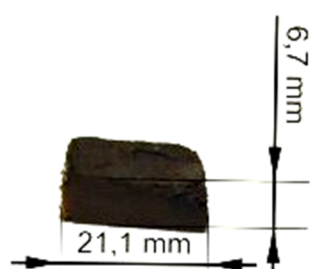
PM12 Saturado



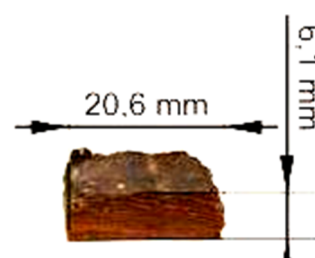
PM12 Seco



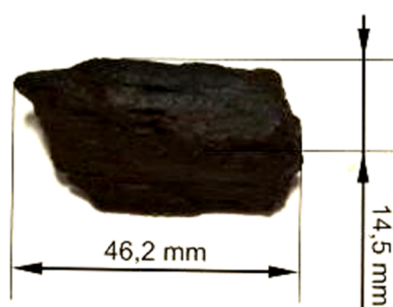
PM13 Saturado



PM13 Seco



PM14 Saturado



PM14 Seco





**Secagem de Madeiras Arqueológicas:  
Análise dos comportamentos físicos e aplicação do modelo de secagem binário**

---

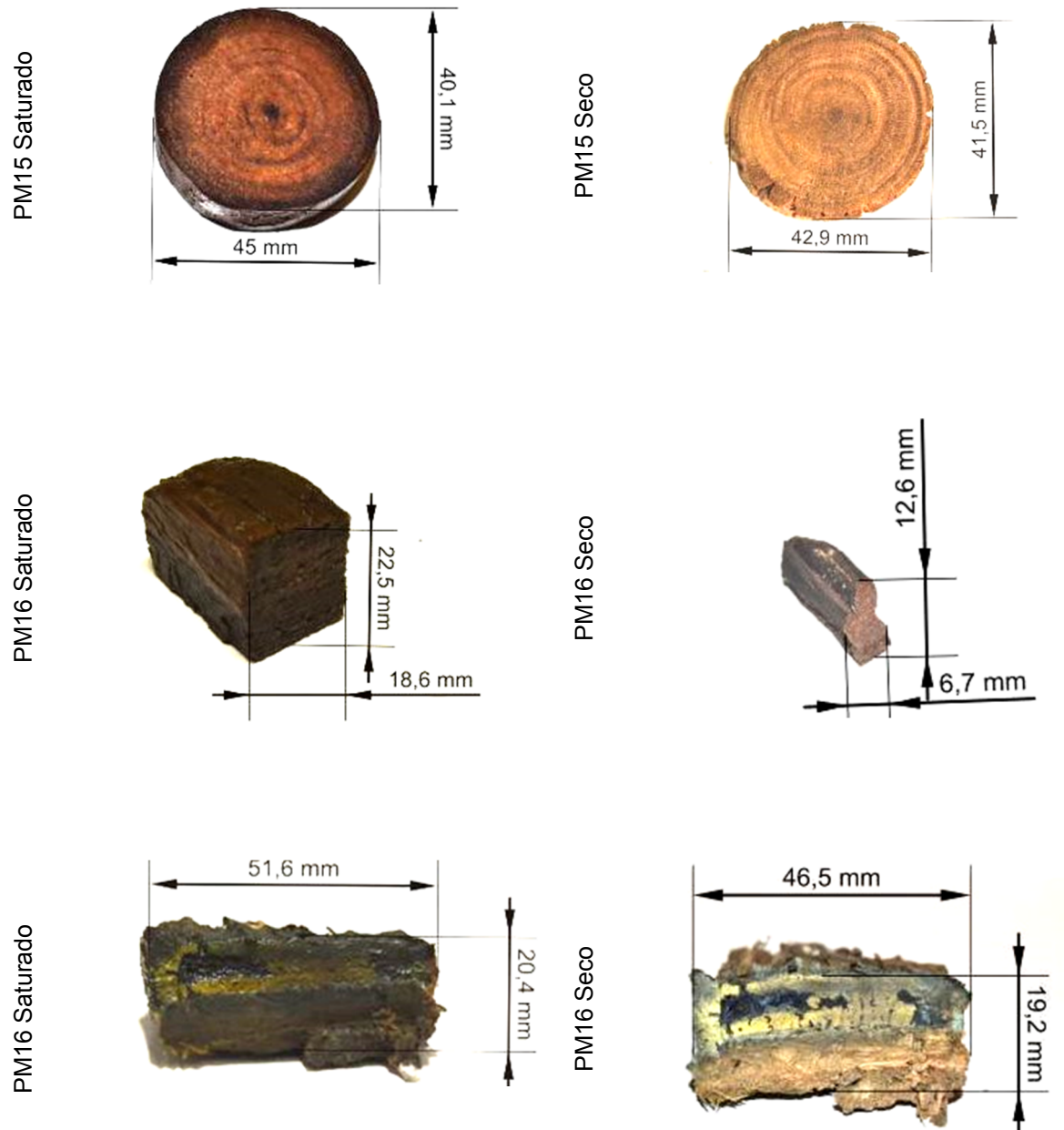


Imagem 52 Grupo dos provetes submetidos à secagem a temperaturas e humidades elevadas.



## **10. Aplicação da secagem binária na conservação de dois fragmentos de madeira arqueológicos.**

Tendo em conta os resultados positivos e o conhecimento adquirido até ao momento sobre a capacidade e a mais-valia da aplicação do modelo de secagem binário na secagem de madeiras degradadas, optou-se pela sua prática no tratamento em dois fragmentos arqueológicos de madeira de uma entrosga do séc.XVIII, provenientes do sítio arqueológico Museu da levada.

Por uma questão de segurança dos vestígios arqueológicos, optamos por desenvolver o modelo combinado de secagem binária com consolidante, permitindo aumentar progressivamente o mesmo, caso se verificasse ineficiência ou perda de controlo da secagem.

O plano inicial de tratamento do conjunto das madeiras continha em si o uso de PEG como consolidante, no entanto durante a intervenção houve a necessidade de rever a metodologia, uma vez que a presença de óxidos de ferro, visíveis na superfície da madeira, em alguns elementos arqueológicos, colocava o tratamento em risco pelas condicionantes químicas conhecidas relativamente ao PEG e à sua reação com os compostos metálicos. Neste sentido, optou-se pelo tratamento de Sacarose, material já utilizado em tratamentos de conservação de madeiras alagadas como já foi referenciado no capítulo das metodologias.

Antes da aplicação nos vestígios arqueológicos realizaram-se alguns testes através da colocação da Sacarose em ambientes com vários níveis de humidade relativa, no sentido de perceber a sua estabilidade em ambientes com elevada humidade e aferir a sua compatibilidade com o ambiente característico do tratamento de secagem binária (na maior parte do tempo o ambiente encontra-se saturado, com uma humidade relativa perto dos 100%).

Dos testes realizados com Sacarose e PEG em altas concentrações (por saturação da solução) ficou claro que a Sacarose possui inúmeras vantagens sobre o PEG e que serão enumeradas e descritas abaixo segundo os parâmetros de análise utilizados.

O ponto de comparação será feito principalmente com o PEG 400 pela semelhança do peso molecular dos dois polímeros, tendo alguns apontamentos relevantes com os PEGs de maior peso molecular.

- **Peso molecular** – A Sacarose possui uma massa molecular de cerca de  $342,30 \text{ g mol}^{-1}$ , e portanto, inferior à do PEG 400 que é aproximadamente de  $400 \text{ g mol}^{-1}$ . **Este ponto é de especial interesse, uma vez que a Sacarose se encontra em estado sólido em ambiente natural e o PEG 400 em estado líquido.** Por este motivo os tratamentos de PEG são sempre complementados com um PEG de maior massa molecular, contudo, quanto maior for a massa molecular menor será a capacidade de penetração. Este é o principal motivo para que as madeiras densas e em bom estado de conservação sejam muito difíceis de tratar. É ainda importante referir que o facto de o PEG 400 ser líquido no ambiente natural implica uma maior dificuldade na sua estabilização, bem como a presença de água constante no interior da madeira. Este fator é preponderante para a existência de reações químicas e biológicas que favorecem a degradação das madeiras.
- **A higroscopicidade** – os testes revelaram que a Sacarose possui uma higroscopicidade muito inferior aos PEGs, demonstrando uma estabilidade superior no pós-tratamento não se verificando alterações visuais na superfície da madeira tratada, nomeadamente, o aumento da viscosidade e humificação da superfície. Já nos tratamentos com PEG foi verificada uma grande instabilidade no que diz respeito ao acondicionamento em ambiente natural e em condições iguais aos elementos tratados com Sacarose, observando-se a completa liquidificação do PEG em dias com humidades relativas acima dos 60%.

- **Aspetto estético** – os artefactos tratados com Sacarose sofreram um clareamento da madeira retomando o seu aspeto original após a sua secagem, ao contrário dos tratamentos com PEG, onde se verificou um acentuado escurecimento. Ao fim de alguns meses foram detetados nos tratamentos de algumas peças tratadas com Sacarose a formação de pequenos cristais na superfície, no entanto, após uma limpeza com um pano húmido, não foi verificado mais nenhuma ocorrência de cristalização.
- **Reações químicas** – as reações químicas do PEG com compostos metálicos ou químicos como o enxofre já era conhecido e já foram descritos nos capítulos anteriores. No caso da Sacarose, esses efeitos não foram detetados até ao momento e é aparentemente estável em conjunto com outros compostos contaminantes. Isto não significa que os contaminantes não devam ser retirados do interior da madeira, mas fornece uma margem de erro muito maior, não pondo em causa o futuro do objeto.
- **Atividade biológica** – este é um fator comum aos dois polímeros, contudo a Sacarose é muito mais vulnerável ao ataque biológico, por um alimento natural de muitos seres vivos. Durante os tratamentos iniciais, o ataque por parte de insetos e formigas foi uma barreira. Ainda assim foi possível contornar esses efeitos com biocidas e anular essa vulnerabilidade como será descrito mais adiante. Como já foi referida, a principal desvantagem da Sacarose prende-se no facto de ser um material vulnerável ao ataque biológico. Esta situação levantou algumas dificuldades durante e após os tratamentos, uma vez que a degradação da solução, pela atividade biológica e o ataque de animais da espécie *Formicidae* tornou-se uma preocupação constante e colocava em risco a conservação dos objetos. Atendendo a este ponto foram testadas três soluções de Sacarose com quantidades de formol diferentes: com 1% formol; com 2% de formol e outra; com 4% de formol. A escolha do formol deve ao facto de ser um ótimo inibidor biológico de longa duração usado para preservação de espécimes naturais, pelo que apresenta as características necessárias para inibir a atividade biológica na solução de Sacarose.

Todas as soluções apresentaram um excelente resultado mantendo a solução limpa e estável, contudo a solução de 1% de formol revelou só ser eficaz na solução de Sacarose até 50%.

Face aos excelentes resultados apresentados pela utilização da Sacarose mais formol, situação que poderia limitar o seu uso ou tornar inexecutível a utilização do processo de secagem binária, passamos à sua aplicação nos objetos arqueológicos.

Os artefactos arqueológicos são em madeira do grupo das Angiospermas, com nível de degradação de nível 2 (método TRP), apresentando um tecido lenhoso muito denso, **que devido à complexidade e heterogeneidade do mesmo, resulta normalmente em secagens demoradas, instáveis e difíceis, sendo este quadro patológico o mais difícil de tratar atualmente**. Apesar do razoável estado de conservação do tecido lenhoso, a elevada densidade da madeira origina a presença de uma pequena quantidade de água livre comparativamente com a quantidade de água higroscópica. Este fator tem uma grande influência na velocidade de secagem e na importância de manter os gradientes de humidade equilibrados, caso contrário, as tensões internas do tecido lenhoso podem criar danos na madeira, que se repercutem no objeto arqueológico.

Perante as características apresentadas, os dois objetos ofereciam um excelente desafio para testar o modelo de secagem binária combinado.

Por outro lado, a possibilidade de podermos comparar os resultados com os restantes materiais do grupo, tratados segundo as metodologias atuais, permite-nos retirar conclusões mais claras da capacidade da aplicação deste método.

## 10.1 Metodologia

Tendo em conta as características da madeira, o seu estado de conservação e os objetivos científicos da intervenção foi delineado um plano de tratamento que consistiu em realizar um tratamento combinado de impregnação de água com Sacarose a 40% (numa diminuição de

15% a 20% do que seria considerado num tratamento de Sacarose com secagem normal, controlada ao ar) seguido da secagem em estufa com o modelo binário.

A solução de Sacarose foi conduzida por aumentos graduais da percentagem de concentração, iniciando-se com uma solução de 5%, sendo a cada semana, acrescentado mais 5% até ao total de 40% de concentração.

À solução foi inicialmente adicionado 1% de Formol, tendo em conta que a solução não ultrapassava os 50% de concentração de Sacarose, e que nos testes, a solução de formol a 1% obteve bons resultados até à concentração de 50%. Neste sentido o formol vai agir como inibidor da atividade biológica durante a emersão e durante o período de secagem na estufa.

Durante sete semanas, os dois fragmentos estiveram mergulhados na solução, sendo posteriormente retirados. O excesso de Sacarose na superfície foi removido cuidadosamente com pano humedecido em água, para eliminar eventuais aglomerados de Sacarose.

Para além da função de segurança referida anteriormente, a impregnação com Sacarose permite avaliar a sua capacidade para se poder combinar com a secagem binária, bem como verificar a sua resistência ao ambiente artificial da estufa climática.

A sua estabilidade é muito superior à do PEG, uma vez que a sua higroscopicidade é muito menor, principalmente depois de se agregar à madeira.

Após o processo de impregnação as duas madeiras foram colocadas na estufa climática e submetidas à secagem segundo um modelo binário dinâmico, ou seja, um modelo que se ajusta às necessidades da madeira durante a secagem. Ao contrário do testado nos programas 1 e 2 (ver páginas 123 à 125) nos provetes, foram implementadas algumas alterações com vista a maximizar a capacidade de secagem, mantendo os tempos e os valores de segurança superiores, bem como proceder-se a ajustes dos parâmetros de tempo de secagem absoluta e secagem de equilíbrio durante o processo.

Neste sentido, optou-se por desenvolver o programa apresentado na tabela 7 que tem como principais alterações dos padrões anteriormente testados o facto de ter um período de

## Secagem de Madeiras Arqueológicas

### Análise dos comportamentos físicos e aplicação do modelo de secagem binário

calibragem perto do final da secagem (padrão 5), bem como o controlo dinâmico dos parâmetros de secagem durante a desidratação.

**Tabela 7 Programa de secagem binária.**

| Padrão                   | Parâmetros    | Tempo em horas | Variação térmica °C | Variação da H.R. | Duração em dias |
|--------------------------|---------------|----------------|---------------------|------------------|-----------------|
| Padrão 1                 | S. absoluta   | 00:15          | 10                  | 30% $\pm$ 5      | 9               |
|                          | S. equilíbrio | 23:45          | $\pm$ 2             | 0%               |                 |
| Padrão 2                 | S. absoluta   | 00:15          | 10                  | 30% $\pm$ 5      | 7               |
|                          | S. equilíbrio | 11:45          | $\pm$ 2             | 0%               |                 |
| Padrão 3                 | S. absoluta   | 00:20          | 20                  | 35% $\pm$ 5      | 55              |
|                          | S. equilíbrio | 23:40          | $\pm$ 2             | 0%               |                 |
| Padrão 4                 | S. absoluta   | 00:25          | 30                  | 40% $\pm$ 5      | 11              |
|                          | S. equilíbrio | 23:35          | $\pm$ 2             | 0%               |                 |
| Padrão 5<br>(calibragem) | S. absoluta   | -              | -                   | -                | 9               |
|                          | S. equilíbrio | 24             | $\pm$ 2             | 0%               |                 |
| Padrão 6                 | S. absoluta   | 00:25          | 30                  | 40% $\pm$ 5      | 34              |
|                          | S. equilíbrio | 23:35          | $\pm$ 2             | 0%               |                 |

Neste sentido, foi elaborado um plano mais lento à semelhança do programa 1 de secagem binária dos ensaios (padrão 1), com patamares de secagem absoluta de 15 minutos e patamares de secagem de equilíbrio de 23 horas e 45 minutos. Ao fim de nove dias de secagem as madeiras começaram a apresentar resistência à secagem, verificando-se a estabilização do peso das madeiras. Esta resistência deve-se à quantidade de energia fornecida à madeira pela radiação de infravermelho ser inferior à necessária para fazer evaporar a água da madeira. Assim sendo, foram alterados os patamares de secagem para o padrão 2, mantendo os 15 minutos de secagem absoluta e diminuindo o período de secagem de equilíbrio para 11 horas e 45 minutos (metade do anterior). O facto de colocarmos dois períodos de secagem absoluta num período de 24 horas aumenta a



quantidade de energia fornecida à madeira num determinado período de tempo, elevando a quantidade de energia fornecida à madeira, reiniciando a secagem. Ao final de sete dias de secagem foram observadas algumas pequenas fissurações que indicavam uma secagem superficial demasiado rápida, ou seja, os gradientes de humidade não estavam a compensar devidamente. Esta situação deve-se ao facto dos parâmetros estarem a induzir demasiada energia à madeira resultando numa secagem mais rápida e agressiva. Os parâmetros foram novamente reajustados para 20 minutos de secagem absoluta e 23 horas e 40 minutos de secagem de equilíbrio (padrão 3). Este padrão revelou-se menos agressivo que o segundo padrão, recolocando a taxa de secagem numa velocidade segura. Para, além disso, percebeu-se que o incremento de energia deveria ser também ele gradual e lento, permitindo à madeira ter vários patamares de resistência, resultando numa melhor calibragem dos seus gradientes de teor de humidade. Deste modo a quantidade de energia foi baseada em tempo de exposição à radiação infravermelha (secagem absoluta), aumentado a cada ponto de resistência 5 minutos ao tempo anteriormente programado. Ao fim de 55 dias as madeiras voltaram a apresentar resistência à secagem. Os parâmetros foram novamente alterados, aumentando a período de secagem absoluta para 25 minutos e o período de secagem de equilíbrio para 23 horas e 35 minutos durante um período de 11 dias (padrão 4). Ao fim dos onze dias, notou-se um agravamento das fissuras, pelo que, por razões de segurança, realizou-se um período de calibragem mais demorado, passando 9 dias em ambiente saturado de 100% de H.R. até estabilizar o seu peso e de forma a calibrar os gradientes de humidade da madeira. Esta situação permitiu também perceber que à medida que a madeira vai secando, mais demorada é a calibração dos gradientes, pelo que provavelmente o período de secagem de equilíbrio também deve ser aumentado. No final dos nove dias o peso das madeiras estabilizou e observou-se um melhoramento das fissuras.

Após este patamar de segurança reiniciou-se a secagem com o padrão 6 durante mais trinta e quatro dias, período em que a madeira apresentou novamente resistência à secagem. No entanto, neste ponto, a madeira já apresentava uma excelente aparência, resistência e um aspeto seco, optando-se por parar a secagem binária e diminuir gradualmente a humidade relativa da estufa.

## **10.2 Resultados e discussão**

Os resultados obtidos foram surpreendentemente positivos, apresentando um bom desempenho em todos os parâmetros de análise.

A avaliação dos resultados foi realizada segundo os seguintes pontos:

- Distorção do volume;
- Retração dimensional;
- Aparência e textura da madeira;
- Cor;
- Estabilidade a alterações de humidade e temperatura;
- Comparação com o tratamento de PEG;
- Estabilidade ao ataque biológico e;
- Duração do tratamento.

As madeiras não apresentaram variações significativas da forma, exceto as inerentes à contração natural originada pela secagem. Não foram verificados empenos nem anomalias criadas por tensões extremas. É notória e é de realçar a qualidade do tratamento neste aspeto, pois é uma das principais causas do insucesso na secagem das madeiras bem preservadas, densas e difíceis de secar. Os empenos contribuem para a deformação do objeto, resultando em danos para o artefacto arqueológico.

A retração dimensional dos dois objetos encontra-se dentro dos parâmetros normais, como podemos verificar na tabela 8. No entanto foi verificado na madeira ML-T27 a abertura de uma pequena fenda junto ao elemento metálico. Esta fenda foi criada na ultima fase da secagem após a madeira ter saído da estufa climática e deve-se ao facto da cavilha metálica ter aumentado o seu volume fruto da oxidação do ferro. Esta variável alterou as

**Secagem de Madeiras Arqueológicas:**

**Análise dos comportamentos físicos e aplicação do modelo de secagem binário**

---

condições originais do artefacto que perante a contração do tecido lenhoso foi obrigado a ceder, originando a fenda. Contudo não se trata de uma anomalia relevante ou que ponha em causa a integridade e conservação do bem arqueológico.

**Tabela 8 Índice de contração das madeiras.**

| Madeiras |   | Dimensões húmido | Dimensões seco | Variação dimensional |
|----------|---|------------------|----------------|----------------------|
| ML-T27   | C | 22cm             | 22cm           | 0%                   |
|          | L | 6.8cm            | 6.3cm          | 7.3%                 |
|          | H | 7.7cm            | 6.5cm          | 15.5%                |
| ML-T14   | C | 25cm             | 25cm           | 0%                   |
|          | L | 4.2cm            | 3.7cm          | 11.9%                |
|          | H | 4.1cm            | 4.0cm          | 2.4%                 |

Legenda: C= comprimento; L = Largura; H = Altura

No que diz respeito à aparência, as madeiras apresentam excelentes resultados, comprovados pelo aspeto limpo, seco e natural da mesma. No caso da ML-T14 o aparecimento de fendas superficiais (Imagem 54) foram consideradas normais devido a fatores intrínsecos da madeira, nomeadamente a presença de nós que criam anomalias do tecido lenhoso, contribuindo para o aparecimento das fissuras superficiais. Contudo, deve-se ressaltar que algumas das fissuras observadas já faziam parte do objeto, apenas se encontravam dissimuladas devido à sujidade e à dilatação da madeira que provocou o seu fechamento.

O mesmo não aconteceu no artefacto ML-T 27 por ser uma madeira mais estável e sem anomalias naturais, dando origem a uma superfície praticamente sem defeitos (Imagem 55).

As fissuras superficiais serão uma característica deste tipo de secagem, quando na presença de anomalias naturais das madeiras. Contudo devemos entender que faz parte da

sua natureza, bem como do seu aspeto original, pois dificilmente se pode conservar as madeiras, permitindo a sua retração, sem que as suas anomalias naturais deixem de se notar. Como já foi enumerado nesta tese, os tratamentos por consolidação até à saturação não permitem a retração da madeira e por esse motivo estas anomalias não são visíveis. No entanto não significa que o aspeto original do objeto antes de submergir fosse o resultado que geralmente se obtém nestes tratamentos. Prova disso é o facto dos dois objetos tratados com este método serem do mesmo local arqueológico, da mesma espécie, provavelmente do mesmo lote de madeira e o resultado final ter sido diferente. A resposta a essa diferença só se explica pelas anomalias bem visíveis num dos fragmentos que proporcionaram o aparecimento das fissuras. Contudo a sua aparência é perfeitamente natural e proporcional a qualquer objeto com desgaste e envelhecido.



Imagem 53 Madeira ML-T 14 antes (em cima) e após o tratamento (em baixo)

Relativamente à cor, as madeiras revelaram também um excelente comportamento. Não se verificou o escurecimento habitual, em parte, devido à baixa percentagem de impregnação da utilização da Sacarose, o que permitiu manter o aspeto seco e natural.

Comparando o tratamento destas madeiras relativamente a outras do grupo, tratadas com o processo de PEG, podemos verificar a superior qualidade do tratamento desta nova metodologia a vários níveis. Como é possível verificar na imagem 55, a madeira tratada com o método composto por Sacarose mais secagem binária apresenta um aspeto muito mais natural, sem o enegrecimento característico do PEG.

Outro fator importantíssimo na avaliação é a estabilidade pós-tratamento às variações de humidade e temperatura. Neste ponto as madeiras apresentam igualmente um excelente comportamento, retomando a sua dinâmica natural, característica das madeiras secas e como tal, não necessitam de cuidados especiais ou ambientes rigorosamente controlados.

Desde que foi concluída a secagem a 11 de Março de 2014, e até ao momento, não foram observados sinais de cristalização ou ataques por parte de seres vivos, facto que se deve provavelmente à baixa humidade da madeira e que se reflete na sua estabilidade.

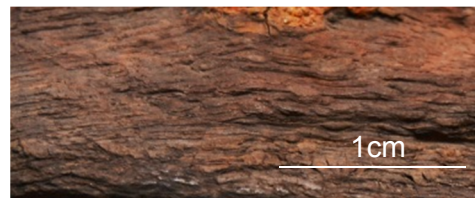


Imagem 54 (esquerda) Aspeto da madeira tratada com PEG à saturação onde se observa uma superfície enegrecida e pouco natural. (direita) Aspeto da madeira após o tratamento de Sacarose mais secagem binária, onde é notório o melhoramento da cor e do aspeto mais natural da madeira.

O ponto menos favorável nesta metodologia é sem dúvida a duração dos tratamentos, no entanto, os resultados obtidos nos restantes itens de avaliação compensam os longos períodos de secagem.

Em referência à Sacarose, o polímero natural teve um comportamento muito interessante e revelou-se um bom complemento como reforço do tecido lenhoso degradado. O resultado

final foi muito semelhante a resultados obtidos pelo método combinado da liofilização, perdendo apenas no tempo de tratamento. Ainda assim a maior facilidade de construção de estufas climáticas grandes pode tornar este método uma alternativa viável aos tratamentos atuais.



Imagem 55 Em cima a madeira ML-T 27 encharcada e em baixo após a secagem.

## **11. Considerações finais**

No contexto geral e com base nos resultados obtidos pode-se afirmar que os objetivos propostos no início do trabalho foram atingidos praticamente na sua totalidade.

É certo que o objetivo inicial era desenvolver um modelo de secagem que permitisse a desidratação de madeiras arqueológicas degradadas, evitando a introdução de consolidantes. Este objetivo não foi conseguido na íntegra, sendo que a sua aplicação nesses moldes só poderá ser usado em madeiras em bom estado de conservação, não deixando, no entanto, de ser um avanço tecnológico e importante para conservação deste património.

Por outro lado, provou-se que o estudo no que diz respeito à compreensão da física da secagem ainda não estava totalmente desenvolvida, sendo ainda mais limitativa no que se refere às madeiras arqueológicas degradadas.

Em parte, o incumprimento dos objetivos iniciais, no sentido em que, quando do início da realização da dissertação havia uma possibilidade teórica de aplicação de um modelo que garantisse uma conservação das madeiras, sem aplicação de consolidantes, usando somente um programa de secagem artificial controlado, verificou-se impossibilitado. Os ensaios realizados permitiram concluir determinados dados não considerados, devido às lacunas dos estudos na matéria.

Neste sentido, o redirecionamento da pesquisa na procura das causas do parcial malogro do modelo teórico foi concluído com sucesso. Os dados recolhidos anuíram compreender o que é necessário para tratarmos com qualidade as madeiras degradadas provenientes de meios húmidos. Prova disso foi a aplicação com sucesso da secagem binária complementada com a consolidação de Sacarose no tratamento das duas madeiras provenientes do Museu da Levada.

Neste sentido, conclui-se que:

- O principal motor de colapso das células da madeira não são as tensões criadas pelas forças capilares, inerentes à tensão superficial da água, mas sim as características morfológicas inerentes à lenhina. Este ponto é de extraordinária importância, pois altera a perspectiva como olhamos para secagem da madeira e explica o sucesso e insucesso de alguns modelos de secagem, bem como a necessidade de introdução de resinas mesmo no caso da secagem por liofilização e  $CO_2$  Supercrítico (sistemas em que a ausência de tensão capilar não invalida o colapso das madeiras). Ainda assim a tensão capilar tem a sua responsabilidade na matéria, no que diz respeito, ao desequilíbrio de forças nas paredes das células, e nesta medida, deve ser tida em conta.
- Ficou também claro que a tentativa de secar uma madeira degradada por secagem artificial, por mais complexa que seja não é suficiente para podermos realizar secagens seguras e de qualidade em madeiras arqueológicas muito degradadas. Ainda assim provou-se que quando combinada com a Sacarose pode ser um tratamento eficaz, seguro e vantajoso.
- O método de secagem binário mostrou-se como uma alternativa viável para a secagem de madeiras bem conservadas, bem como, quando complementada, pode ser usada na secagem de madeiras mais degradadas. A sua capacidade para reduzir as tensões ao mínimo será de grande utilidade para casos como as madeiras da embarcação do Troia I, sendo um exemplo de madeiras que poderão ser secas com este método, sem aplicação de qualquer consolidante. Por outro lado, permite quando combinada com um consolidante, diminuir quer a quantidade de consolidante a utilizar, quer uma secagem mais segura e com índices de qualidade superior. **Por fim, como conclusão mais importante desta tese é o facto deste método permitir colmatar as dificuldades de tratamento e secagem de madeiras arqueológicas bem preservadas, que preconizam, até ao momento, a grande dificuldade neste tipo de tratamentos.**



Assim, e com base no conhecimento adquirido podem apontar-se algumas propostas de desenvolvimento para a investigação futura:

Tendo em conta o sucesso da aplicação da Sacarose como consolidante combinada com a secagem binária, bem como a suas características físicas e químicas e a estabilidade apresentada relativamente às alterações ambientais, crê-se que é de enorme importância explorar melhor este polímero natural. O seu comportamento, baixo custo, elevada acessibilidade e facilidade de manuseamento, torna-o uma excelente opção. Por outro lado, o desenvolvimento da ciência dos nanopolímeros naturais ou sintéticos hidrófugos, compostos por monómeros inferiores a 0.55 nm, que possam criar soluções em suspensão aquosa, podem ser uma solução alternativa à Sacarose para a conservação do espólio lenhoso submerso. Felizmente, a criação de nanopartículas de celulose já começa a ser uma realidade (Silva & D'Almeida, 2009; Christensen, et al., 2011) e a sua aplicação na conservação de madeiras degradadas pode ser uma realidade a curto prazo.

O sucesso do tratamento está intimamente relacionado com a capacidade de cristalização e resistência mecânica do composto reestruturador, para que quando a lenhina inicie a perda da água higroscópica, essas paredes já estejam perfeitamente definidas e possuam resistência mecânica suficiente para suportar as forças de contração da mesma.

Ao contrário dos métodos atuais que atuam pelo preenchimento total das células, os novos polímeros devem ser preparados para reconstruir uma parede secundária artificial ao invés de preencher o lúmen.

Inevitavelmente, o elevado tempo despendido pela construção dos equipamentos para a realização das experiências descritas nesta tese foi preponderante na eliminação de tempo precioso que não pode ser utilizado na investigação. Com o intuito de finalizar-se a tese dentro do tempo regulamentar de três anos, optou-se por apresentar os resultados obtidos e

as conclusões encontradas, não considerando que esta dissertação seja um fim, mas estabelece as prerrogativas para o início da descoberta de novos modelos e alternativas de conservação de objetos arqueológicos provenientes de meios húmidos.

De referir ainda que as limitações do equipamento não permitiram desenvolver mais o modelo de secagem binária, na medida em que devem ser feitos alguns ajustes na estufa, que permita recolher outro tipo de dados e acima de tudo, aperfeiçoar a parte final da secagem.

Como último apontamento, este trabalho presta um contributo válido para as bases da conservação de madeiras arqueológicas provenientes de meios húmidos e para uma melhor compreensão dos fenómenos físicos e químicos que ocorrem durante a perda de água nas madeiras.

Neste sentido, o objetivo de consolidar uma boa base epistemológica com vista a desenvolver novas soluções sustentadas para a preservação do património subaquático, bem como desenvolver uma nova metodologia de tratamento de madeiras arqueológicas foi conseguido.

**É inegável, também, o facto da investigação realizada contribuir de uma forma significativa para resolver um dos problemas mais difíceis da conservação na área das madeiras arqueológicas encharcadas, ajudando, de uma forma clara, para a colmatação de uma lacuna técnica específica nesta ciência.**

## **Referências Bibliográficas**

- Alves, F. et al., 2002. *Projeto Ria de Aveiro A - 2000 (FCT) nº 8 V 1*, Lisboa: CNANS.
- Andrade, A. d., 2000. *Indicação de Programas para Secagem Convencional de Madeiras*, Piracicaba: Universidade de São Paulo.
- Antunes, T. & Pinto, I., 2006. *Botânica: Passagem à Vida Terrestre*. Lisboa: Lidel.
- Baglione, P. et al., 2011. Hydroxide Nanoparticles for Deacidification of Highly Wood. In: *Proceedings in Shipwrecks*. Stockholm: Vasa Museet, pp. 136-141.
- Baglioni, M. & Poggi, G., 2006. Le Nuove Frontier della Chimica per la Conservazione della Nave da Guerra più importante della Flotta Svedese del XVII Secolo. *Diagnostica per l'arte 1*, 1 Semestre.
- Barbour, J. R., 1984. Condition and Dimensional Stabilisation of Highly Deteriorated Waterlogged Hardwoods. In: *Proceedings of the 2th ICOM Waterlogged Wood Working Group*. Grenoble: CETBGE- CENG ORIS, pp. 23-37.
- Becker, G., 1958. *Report to the Government of India of the Protection of Wood against Marine Borers*, India: FAO.
- Berducou, M. C., 1990. La Conservation en Archeologie, Methodes et Pratique de Conservation-restauration des Vestiges Archéologiques. In: *ArchéoSciences, revue d'Archéométrie*. Paris: Masson, pp. 235-241.
- Bergstrand, T., 2001. In Situ Preservation and Re-Burial. In: *Proceedings of the 8th ICOM Group on Wet Organic Archaeological Materials Conference*. Stockholm: Per Hoffmann; James A. Spriggs; Tara Grant; Clifford Cook; Andrea Recht, pp. 155-166.
- Bjordal, C. G., Nilsson, T. & G., D., 1999. Microbial Decay of Waterlogged Archaeological Wood Cultural Heritage. *Elsevier, International Biodeterioration & Biodegradation* 43, pp. 63-73.

Bjordal, C. & Nilsson, T., 1998. Laboratory Reburial Experiments. In: *Proceedings of the 7th ICOM-CC Working Group on Wet Organic Archaeological Materials Conference*. Grenoble: ARC-Nucléart; CEA/Grenoble, pp. 71-77.

Bjordal, C. & Nilsson, T., 2001. Decomposition of Waterlogged Archaeological Wood. In: *Proceedings of the 8th ICOM Group on Wet Organic Archaeological Materials Conference in Stockholm*. Stockholm: Per Hoffmann; James A. Springs; Tara Grant; Andrea Recht, pp. 235-243.

Bjordal, C., Nilsson, T. & Kaassen, R., 2007. Bacterial Destruction of Wood Cultural Heritage . In: *Proceedings of the 7th European Conference "Sauveur", Safeguard Cultural Heritage, Understanding & Viability for the Enlarged Europe Vol.1*. Czech Republic: Miloš Drdáký; Michel Chapuis, pp. 9-14.

Bjordal, C., Nilsson, T. & Petterson, R., 2006. Preservation, Storage and Display of Waterlogged Wood and Wrecks in an aquarium: Project Aquarius. *Journal of Archaeological Science* 34, pp. 1169-1177.

Blanchete, R., 2000. A Review of Microbial Deterioration Found in Archaeological Wood From Different Environments. *Elsevier International Biodeterioration & Biodegradation* 46, pp. 189-204.

Braovac, S., 2001. An Evaluation of the Viking Age Collections at the Viking Ship. In: *Museum Internal Repor*. Oslo: University Museum of Cultural Heritage.

Braovac, S. & Kutzke, H., 2012. The Presence of Sulfuric Acid in Alum Conserved Wood - Origin and consequences. *Journal of Cultural Heritage* 13, pp. 203-208.

Brown, C. E., 1991. Conservation of Waterlogged Wood: A "Review" in Waterfront Archaeology. In: *Proceedings of the 3th International Conference on Waterfront Archaeology*. London: Hardcover, pp. 121-123.

Bugani, S. et al., 2008. Evaluation of Treatments for Archaeological Waterlogged Wooden Artifacts. In: *9th International Conference on NDT of Art*. Jerusalem Israel: NDT.

Butterfield, B. G. & Meylan, B. A., 1980. *Tree-dimensional Structure of Wood, An Ultrastructural approach*. 2ª edição ed. New Yorq: Chapman and Hall Ltd.

Caneva, G., Nueari, M. & Salvador, O., 1994. *La Biologia nel Restauro*. Firenze: Nardini Editore.

Cardoso, A. d. S., Vieira, G. E. G. & Marques, A. K., 2011. O uso de Microalgas para Obtenção de Biocombustíveis. *Revista Brasileira de Biociências*.

Carrilho, E., Tavares, M. C. M. & Lanças, F. M., 2001. Fluídos Supercríticos em Química Analítica 1ª Cromatografia com Fluido Supercrítico: Conceitos Termodinâmicos. *Química Nova*, Volume 24, pp. 509-515.

Chaumat, G., Albino, C. & Tran, O. K., 2011. A New Protocol Suitable for the Treatment of Composit Artefacts: PEG Treatment + Freeze Drying + Radiation - Curing Resin Consolidation. In: *Proceedings in Shipwrecks*. Stockholm: Vasa Museet, pp. 160-164.

Chaumat, G. et al., 2001a. Contribution to the Optimisation of PEG Concentrations in Waterlogged Degraded Wood Suitable for Subsequente Freeze-Drying Treatments. In: *Proceedings of the 8th ICOM Group on Wet Organic Archaeological Materials Conference*. Stockholm: Per Hoffmann; James A. Springgs; Tara Grant; Clifford Cook e Andrea Recht, pp. 363-370.

Chaumat, G., Bernard-Maugiro, H., Gelas, A. & Barthez, J., 2001b. New Approach to Saturation Spraying Treatment by Using an "atomisation" Process. In: P. Hoffmann, et al. edits. *Proceedings of the 8th ICOM Group on Wet Organic Archaeological Materials Conference*. Stockholm: s.n., pp. 353-362.

Chaumat, G., Trans, Q., Perre, C. & Lumia, G., 1998. Trials of Shape Recovering from Collapse Waterlogged Wood by Treatment Whith CO2 Supercritical Fluid. In: *Proceedings of the 7th ICOM-CC Working Group On Wet Organic Archaeological Material Conference*. Grenoble: ARC-Nucléart; CEA/Grenoble, pp. 137-141.

Chen, Y., Chen, T. E. & Wetzel, M., 1996. A Numerical Analysis Technique to Evaluate the Moisture Dependent Diffusion Coefficient on Moisture Movement During Drying. *Wood and Fiber Science* 3, Volume 28, pp. 338-345.

Child, N., 2002. From wood to what? From the Oseberg find: Gustafson's sled, Documentation of its condition and changes in its structural fabric and. *UKM skrifter n.1*, pp. 49-63.

Christensen, B. B., 1970a. *The Conservation of Waterlogged Wood in the National Museum of Denmark*. Copenhagen: National Museum of Denmark.

Christensen, B. B., 1970b. The Conservation of Waterlogged Wood in the National Condition And Changes in its Structural Fabric and Composition. *UKM Skrifter n.1*, pp. 49-63.

Christensen, M., Kutzke, H. & Fim, K., 2011. Biomimetic Conservation: Cellulose and Chitosan for Wood Preservation . In: *Proceedings in Shipwrecks*. Stockholm: Vasa Museet, pp. 154-158.

Cohen, O., 1998. The Kinneret boat: Conservation and Exhibition. In: *Proceedings of the 7th ICOM-CC Working Group on Wet Archaeological Material Conference*. Grenoble: ARC-Nucléart; CEA/Grenoble, pp. 182-187.

Colombini, M. P., Lucejko, J. J., Modugno, F. & Orlandi, M., 2009. A Multi-Analytical Study of Degradation of Lignin in Archaeological Waterlogged Wood. *Elsevier*, Volume 80, pp. 61-70.

Cook, C. & Grattan, D. W., 1984. A Partial Comparative Study of Treatments for Waterlogged Wood - Part III - Pretreatment Solutions for Freeze-Drying. In: *Proceedings of the 2th ICOM Waterlogged Wood Working Group*. Grenoble: CETBGE- CENG ORIS, pp. 219-240.

Cristensen, M., Fansen & Kutzke, H., 2012. New Materials used for the Consolidation of Archaeological Wood - Past Attempts, Present Struggles, and Future Requirements. *Journal of Cultural Heritage*, Volume 13, pp. 183-190.

- Curci, J., 2006. The Reburial of Waterlogged Archaeological Wood in Wet Environments. *Technical Briefs in Historical Archaeology*, Volume 25, pp. 21-25.
- Cutler, D. F., Botha, C. E. J. & Stevenson, D., 2008. *Plant Anatomy: An Applied Approach*. New York: Blackwell.
- Derner, B. R. et al., 2006. Micro Algas, Produtos e Aplicações. *Ciência Rural*, Volume 36.
- Eaton, 2005. Ecology of Wood-Degrading Bactéria . In: R. Klaassen, ed. *Preserving Cultural Heritage by Preventing Bacterial Decay of Wood in Foundation Poles and Archaeological Sites EVKH-CT Final Report*. s.l.:s.n., pp. 125-133.
- Esau, K., 1972. *Antonio Vegetal*. Barcelona: Ediciones Omega S.A..
- Fahn, A., 1974. *Anatomia Vegetal*. Madrid: H. Blumes Ediciones.
- Fengel, D. & Wengener, G., 1989. *Wood, Chemistry, Ultrastructure Reactions*. s.l.:Walter de Gruyter & CO.
- Fortes, S. G. & Travieso, N. F., 2008. *Conservación de Bienes Arqueológicos*. Madrid: Editorial Síntesis.
- Garner, D., Hoffmann, P. & Koppenol, W., 2011. *International Evaluation of the Future for Vasa Project*. Stockholm: Statens Maritime Museer.
- Ghisalberti, E. et al., 2001. The Analysis of Acid Affected Batavia Timber. In: P. Hoffmann, et al. edits. *Proceedings of the 8th ICOM-CC Groupon Wet Organic Archaeological Materials Conference*. Stockholm: s.n., pp. 281-302.
- Giachi, G., Donato, C. C. I. D., Machioni, N. & Pizzo, B., 2011. New Trials in the Consolidation of Waterlogged Archaeological Wood With Different Acetone - Carried Products. *Journal of Archaeological Science*.
- Giachi, G., Macchioni, N., Pizzo, B. & Capretti, C., 2011. The Waterlogged Wood of the Shipwrcks Found in Pisa (Italy): Diagnosis and Conservations. In: V. Museet, ed. *Proceedings in Shipwrecks*. Stockholm: s.n., pp. 78-84.

Gonzaga, A. L., 2006. *Cadernos Técnicos 6 - Madeira: Uso e Conservação*. Brasília: IPHAN.

Guerreiro, S. M. C. & Glória, B. A., 2006. *Anatomia Vegetal 2*. s.l.:Universidade Federal de Viçosa.

Hafors, B., 1998. Procedures in Selecting and Evaluating the Conservation liquid for the Vasa Woden Material. In: *Proceedings of the 7th ICOM-CC Working Group on Wet Organic Archaeological Material Conference*. Grenoble: ARC-Nucléart; CEA/Grenoble, pp. 87-93.

Hamilton, D. L., 1999. *Methods of Conserving Archaeological Material from Underwater Sites*. Texas: Texas A&M University.

Hamilton, D. L., 2001. COnservation of Cultural Materials from Underwater Sites. In: *Archives and Museum Informatics 13*. Netherlands: Kluwer Academic Publishers, pp. 291-323.

Herbst, C. F., 1861. Om Bevaring av Trae Fundne i Torvemoser. In: *Antikvarisk Tidskrift 1858-1860*. s.l.:s.n., pp. 174-176.

Highley, T. L., 1999. Biodeterioration of Wood. In: *Wood Handbook, Wood as an Enjeneering Material*. s.l.:Department of Agriculture Forest Service.

Hiron, X., Jannet, M. & Sirand, C., 1998. Sculptures sur Bois de Sources de la Seine COnservées au musée Archaeologique de Dijon: un Cas de Conservation Preventine. In: *Proceedings of the 7th ICOM-CC Working Group on Wet Organic Archaeological Material Conference*. Grenoble: ARC-Nucléart; CEA/Grenoble, pp. 32-39.

Hoadley, B. R., 1997. *Understanding Wood, A Craftsman's Guide to Wood Technology*. s.l.:Taunton Press, Inc.

Hoadley, B. R., 1998. *Identifying Wood, Accurate Results With Simple Tools*. s.l.:Taunton Press, Inc.

Hoffmann, P., 2001. The Conservation of the Bremen Cog- The Final Years. In: P. Hoffmann, et al. edits. *Proceedings of the 8th ICOM-CC Group on Wet Organic Archaeological Materials Conference*. Stockholm: s.n., pp. 27-48.



Hoffmann, P. & Kuhn, H. J., 1998. The Cabdy Ship from Friesland. In: *Proceedings of the 7th ICOM-CC Working Group on Wet Organic Archaeological Material Conference*. Grenoble: ARC-Nucléart; CEA/Grenoble, pp. 196-293.

Holanda, L. R. d., Medeiros, F. d. S. R. E. R. C. d. & Santos, J. D. d., 2011. O Cultivo de Microalgas para a Geração de Eletricidade. In: *VII Congresso Nacional de Excelência em Gestão*. Rio de Janeiro: s.n.

Hug, B., 1984. Lyophilisation: 10 Ans D'experience. In: *Proceedings of 2nd ICOM-CC Waterlogged Wood Working Group Conference*. Grenoble: CETBGE - CENG ORIS, pp. 207-212.

Huisman, H., 2005. Erosion Bacteria and Sulphur. In: R. Klaassen, ed. *Preserving Cultural Heritage by Preventing Bacteria Decay of Wood in Foundation Poles and Archaeological Sites EVKH- CT Final Report*. s.l.:s.n., pp. 198-202.

IAWA Committee, 1989. IAWA List of Microscopic Features for Hardwood Identification. In: E. A. Wheeler, P. Bass & P. E. Gasson, edits. *IAWA Bulletin 10*. s.l.:s.n., pp. 219-232.

Imazu, S. & Morgos, A., 1998. Lactitol Conservation of a 6m Long Waterlogged Timber Coffin. In: *Proceedings of the 7th ICOM-CC Working Group on Wet Organic Archaeological Material Conference*. Grenoble: ARC-Nucléart; CEA/Grenoble, pp. 210-215.

Imazu, S. & Morgos, A., 2001. An Improvement on the Lactitol Conservation Method Used for the Conservation of Archaeological Waterlogged Wood (the Conservation Method Using Lactitol and Trehalose Mixture). In: P. Hoffmann, et al. edits. *Proceedings of the 8th ICOM-CC Group on Wet Organic Archaeological Materials Conference*. Stockholm: s.n., pp. 413-427.

Jankowsky, I. & Henriquez, E., 1983. Gradientes de Humidade e Desenvolvimento de Tensões de Secagem Artificial da Madeira de Pinus Caribaea, Var, Hondurensis. *IPEF 24*, pp. 27-32.

Jankowsky, I. & Silva, L., 1985. Gradientes de Humidade Durante a Secagem da Madeira de Araucaria Angustifolia (Bert) O. KTZE. *IPEF 31*, pp. 57-59.

Jespersen, K., 1984. Extend Storage of Waterlogged Wood in Nature. In: *Proceedings of the 2nd ICOM-CC Waterlogged Wood Working Group Conference*. Grenoble: CETBGE- CENG ORIS, pp. 39-61.

João Leitão; António Cheney, 2011. *Empreitada de Requalificação do Complexo Cultural e Museu da Levada: Lista dos Artefactos Relacionados com a Entrosga do Edifício E07* , Tomar: GENS Arqueologia Lda.

Jong, J. D., 1977. Conservation Techniques for Old Waterlogged Wood from Chipwrecks Found in the Netherlands. In: A. S. Publishers, ed. *Biodeterioration Investigation Techniques*. London: A. Walters, pp. 295-338.

Jurgens, J. & Blanchete, R. A., 2005. *Characterization of Wood Destroying Microorganisms in Archaeological Woods From Marine Environments*. [Online] Available at: <http://iaws-web.org/files//file/2005-Chile-Fullpaper-Jurgens-Blanchete.pdf> [Acedido em 9 Novembro 2012].

Kerbauy, G. B., 2008. *Fisiologia Vegetal*. 2 ed. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan.

Kim, Y. S. & Adya, P., 2000. Micromorphological Characteristics of Wood Biodegradation in Wet Environments. *IAWA Journal* 21, pp. 135-155.

Klock, U., Muniz, G., Hernandez, J. & Andrade, A., 2005. *Química da Madeira*. 3 ed. Curitiba: Universidade Federal do Paraná.

Koefoed, I. B. et al., 1998. Compression of Frozen and Freeze-Dried Aqueous PEG Solution. In: *Proceedings of the 7th ICOM-CC Working Group on Wet Organic Archaeological Material Conference*. Grenoble: ARC-Nucleart; CEA/Grenoble, pp. 110-115.

Kollmann, F. & Côté, W. A., 1968. *Principles of Wood Science and Technology Solid Wood*. New York: Springer.

Lan, Z., 1998. Conservation of an Ancient Boat Using PEG Spray Method. In: *Proceedings of the 7th ICOM-CC Working Group on Wet Organic Material Conference*. Grenoble: ARC-Nucleart; CEA/Grenoble, pp. 179-181.

Lillie, M. & Smith, R., 2009. *International Literature Review: In Situ Preservation of Organic Archaeological Wood Remains*. s.l.:English Heritage.

Lindahz, K., Sahlstedt, M., Sandstrom, T. & Wikstad, E., 2006. Saving Alum-Trated Archaeological Wood - Report From a Research Project Underway. In: *Triennia Conservation Conference at Northumbria University*. s.l.:s.n.

Lorin, A. & Lemetayer, F., 1998. La Lyophilisation Atmospherique, Quoi de Neuf. In: *Proceedings of the 7th ICOM-CC Working Group on Wet Organic Material Conference*. Grenoble: ARC-Nucleart; CEA/Grenoble, pp. 116-119.

Louzada, J. L. P. C., S. M. R. M. & Silva, M. E. C. M., 2002. *Avaliação do Comportamento de Secagem da Madeira em Estufa para 14 Espécies Florestais*. [Online] Available at: [http://www.cifap.utad.pt/Secagem\\_Brasil.PDF](http://www.cifap.utad.pt/Secagem_Brasil.PDF) [Acedido em 2 Janeiro 2013].

Lumia, G. et al., 2003. Supercritical CO<sub>2</sub> is a Tool for Natural Material Treatments. In: *6th International Symposium on Supercritical Fluids*. Versailles: Intl. Soc. Adv. Supercritic.

Macdonald, R. G., 1969. *The Pulping of Wood*. 2 ed. s.l.:McGraw-Hill Book Company.

Maitland, P. S., 1978. *Biology of Fresh Waters*. London: Blackie.

Mellado, E., 2007. *Tese de Doutorado: Modelo de Transferência de Calor e Massa na Secagem de Madeira Serrada de Pinus*. Paraná: Universidade Federal do Paraná.

Melo, J. R., 1999. *Secagem de Madeiras, Teoria e Prática de Secagem Artificial de Madeiras*. Lisboa: Estação Florestal Nacional, Tilgráfica S.A..

Mertzani, M., 2001. The Liftings and Conservation of an Assemblage of Wet Organic Objects from Cova D'es Carrix, Menorca, Spain. In: P. Hoffmann, et al. edits. *Proceedings of the 8th ICOM-CC Group on Wet Organic Material Conference*. Stockholm: s.n., pp. 17-26.

Meyer, I., 1996. A Logboat from Berne to Brede: The Conservation of a Swiss Logboat in Denmark. In: P. Hoffmann, T. Grant, J. A. Spriggs & T. Daley, edits. *Proceedings of the 6th*

ICOM-CC Group on Wet Organic Archaeological material Conference. York: s.n., pp. 281-294.

Miao, X. & Wu, Q., 2006. Production of Biodiesel from Heterotrophic Microalgal Oil. *Bioresource Technology*.

Morel-Deledalle, M., 1998. Marseille, 150 années de Découvertes et de Conservation de Bois Gorges D'eau de Grand Dimensions. In: *Proceedings of the 7th ICOM-CC Working Group on Wet Organic Archaeological Material Conference*. Grenoble: ARC-Nucléart; CEA/Grenoble, pp. 40-44.

Moreschi, J., 2012. *Propriedades da Madeira*. 3 ed. Curitiba: Ministério da Educação e do Desporto, Setor das Ciências Florestais e da Madeira.

Nilsson, T. & Bjordal, C., 1998. Microbial Degradation of Wood - An Overview With Special Emphasis on Waterlogged Wood. In: *Proceedings of the 7th ICOM-CC Working Group on Wet Organic Archaeological Material Conference*. Grenoble: ARC-Nucléart; CEA/Grenoble, pp. 65-70.

Nilsson, T. & Bjordal, C., 2005. Identity of Wood Degrading Bacteria . In: R. Kaassen, ed. *Preserving Cultural Heritage by Preventing Bacterial Decay in Foundation Poles and Archaeological Site EVJH-CT Final Report*. s.l.:s.n., pp. 123-124.

Nilsson, T. & Kaassen, R., 2008. Abiotic Bacterial Degradation?. *IAWA Journal*, Volume 29, pp. 55-68.

Oliveira, L., 1981. *Perguntas e Respostas em Secagem*. São Paulo: IPT.

Olvera, A. A., Reyes, T. T. & Anaya, D. M., 2001. Conservación de Maderas Arqueológicas Húmedas: Perspectiva Actual y Retos para el Futuro en México. *Conserva* 5, pp. 57-79.

Palma, P., Capretti, C., Macchioni, N. & Pizzo, B., 2011. The Swash Channel Wreck in Situ Protection and Preservation. In: *Proceedings in Shipwrecks*. Stockholm: Vasa Museet, pp. 50-57.

Panshin, A. J. & Zeeuw, C. d., 1980. *Textbook of Technology, Structure, Identification Properties, and Uses of Commercial Woods of the United States and Canada*. 4 ed. s.l.:McGraw-Hill Inc..

Piero, T., s.d. *Biodegradation of Cultural Heritage: Decay Mechanisms and Control Methods*. [Online]

Available at: [http://www.arcchip.cz/w09/w09\\_Tiano.pdf](http://www.arcchip.cz/w09/w09_Tiano.pdf)  
[Acedido em 20 Novembro 2012].

Piló-Veloso, D., Afonso, E. & Morais, S., 1993. Isolamento e Análise Estrutural de Lenhinas. *Química Nova* 16, pp. 435-446.

Pomey, P., 1984. Organisation et activites des Recherches Archaeologiques Subaquatiques Françaises. In: *Proceedings of the 2nd ICOM-CC Waterlogged Wood Working Group Conference*. Grenoble: CETBGE - CENG ORIS, pp. 9-12.

Pomey, P., 1998. Remarques Sur la Conservation "In Situ" du Bois de Quelques Epaves Antiques de Mediterranée. In: *Proceedings of the 7th ICOM-CC Working Group on Wet Organic Archaeological Material Conference*. Grenoble: ARC-Nucléart; CEA/Grenoble, pp. 53-57.

Pornou, A., Jones, A. M. & Moss, S., 1998. In Situ Protection of the Zakynthos Wreck . In: *Proceedings of the 7th ICOM-CC Working Group on Wet Organic Archaeological Material Conference*. Grenoble: ARC-Nucléart; CEA/Grenoble, pp. 104-109.

Raven, P. H., Evert, R. F. & Eichhorn, S., 2001. *Biological Vegetal*. 6 ed. Rio de Janeiro: Guanabara Kogan.

Rodrigo, R., 2002. Relatório Preliminar de Escavação e acompanhamento Arqueológico Ria de Aveiro F. *Trabalhos do CNANS* 6.

Rosenqvist, A. M., 1959. The Stabilizing of Wood found in the Viking Ship of Oseberg, Parts I, II. *Studies in Conservation* 4, pp. 13-21; 62-72.

Saerterhaug, R. & Turner-Walker, G., 2001. Conservation of Roman Strutural Timbers Using the Two Steps Method. In: P. Hoffmann, et al. edits. *Proceedings of the 8th ICOM-CC Group on Wet Organic Archaeological Organic Material Conference*. Stockholm: s.n., pp. 91-102.

Sandstrom, M. et al., 2001a. Acidity and Salt precipitation on Vasa: the Sulfur Problem. In: P. Hoffmann, et al. edits. *Proceedings of the 8th ICOM Group on Wet Organic Archaeological Materials Conference*. Stockholm: s.n., pp. 67-89.

Sandstrom, T. P., Hall-Roth, I. & Karlsson, A., 2001b. Slats Precipitation on Vasa Timbers: An Introdution to the Problem. In: P. Hoffmann, et al. edits. *Proceedings of the 8th ICOM Group on Wet Organic Archaeological Materials Conference*. Stockholm: s.n., pp. 55-66.

Santini, E., 1996. *Alternativas para Monitorização e Controle do Processi de Secagem de Madeira Serrada em Estufa*. Curitiba: Universidade Federal do Paraná.

Santini, E., 2000. Temperatura da Madeira como Alternativa de Controle do Processo de Secagem. *Cerne* 2, Volume 6, pp. 112-121.

Santini, E. & Haseilein, C., 2002. Efeito da Temperatura e Velocidade do Ar sobre a Taxa de Secagem da Madeira de Pinus Elliotti, Engelm. *Ciencia Florestal, Santa Maria* 12, pp. 99-106.

Schindelholz, E. et al., 2007. *An Evaluation of Supercritical Drying and PEG/Freeze Drying of Waterlogged Archaeological Wood*. s.l.:The Mariners Museum.

Semb, A., 2012. *Can the Oseberg Vikings be Saved?*. [Online] Available at: <http://www-khm.uio.no/english/research/news-and-events/news/2012/oseberg.html> [Acedido em 2 Fevereiro 2013].

Silva, D. d. J. & D'Almeida, M. L. O., 2009. Nano Cristais de Celulose. *O Papel* 7, Volume 70, pp. 34-52.

Smith, C. W., 2002. *A Second Set of Experiments Using Hydrolysable Polymers to Preserve Waterlogged Wood*. Miami: WAG Postprints.

Smith, C. W., 2003. *Archaeological Conservation Using Polymers: Pratical Applications for Organic Artifact Stabilization*. s.l.:Texas A&M University Antropology Series.

Smith, C. W., 2005. *Rethinking Conservation Paradigms for the Preservation of Waterlogged Wood*. Minneapolis: WAG Postprints.

Smith, G., 1955. *Botânica Criptogâmica*. 3 ed. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian.

Stéphanie, A., Stephanie, L., Nasanen, N. & Gonzàlez-Pereyra, B. R., 2013. Conservation of Waterlogged Archaeological Corks Using Supercritical CO<sub>2</sub> and Treatment Monitoring Using Strutured-light 3D Scanning. *Journal of Supercritical Fluid*.

Storch, P., 1997. *Taking Care of Wet Archaeological Artifacts*. [Online] Available at: <http://www.mnhs.org/about/publications/techtalk/TechTalkJanuary1997.pdf> [Acedido em 2 Novembro 2012].

Strigazzi, G. & Preuss, H., 1998. Concentrated Saccharides Mixture for Waterlogged Wood. In: *Proceedings of the 7th ICOM-CC Working Group on Wet Organic Archaeological Material Conference*. Grenoble: ARC-Nucleart; CEA/Grenoble, pp. 167-171.

Teshirogi, M. et al., 2001. Conservation Treatment of Waterlogged Wood Whith Supercritical Carbon Dioxide. In: P. Hoffmann, et al. edits. *Proceedings of the 8th Group on Wet Organic Archaeological Material Conference*. Stockholm: s.n., pp. 371-377.

Tomaselli, L. & Richmond, A., 2004. *The microalgal Cell, Handbook of Microalgal Culture: Biotechonology and applied Phycology*. Oxford: Blackwell Publishing Ltd.

Tran, K. Q., Gelas, A. & Mordant, D., 1998. Remiseen Forme de la Pirogue Carolingienne de Noyen-Sur-Seine Après son Traitement au PEG à Saturation. In: *Proceedings of the 7th ICOM-CC Working Group on Wet Organic Archaeological Material Conference*. Grenoble: ARC-Nucléart; CEA/Grenoble, pp. 188-195.

Turner, R. D., 1974. *In the Path of Warm Salina Affluent*. s.l.:The American Malacological Union.

Unger, A., Shniewind, A. & Unger, W., 2001. *Conservation of Wood Artifacts Germany*. Berlin: Springer-Verlag.

Valgãón, V., 2008. *Biología Aplicada a la Conservación e Restauración*. Madrid: Editorial Síntesis.

Vários, 1940. *Grande Enciclopédia Portuguesa e Brasileira*. Lisboa: Editorial Enciclopédia, Lda.

Vere, S. L., Crawshaw, A. & Springgs, J. A., 1998. Further Research into the Copper/Silver Ion Sterilization System as Applied to the treatment of archaeological Waterlogged Oak Wood in PEG Solutions. In: *Proceedings of the 7th Working Group on Wet Organic Archaeological Material Conference*. Grenoble: ARC-Nucleart; CEA/Grenoble, pp. 95-100.

Walsh, Z. et al., 2011. Supramolecular Self-assembled Fe(III) Sequestering 3D Polymer Networks for the Preservation of Maritime Archaeological Wood. In: *Proceedings in Shipwrecks*. Stockholm: Vasa Museet, pp. 148-151.

Watson, J., 1996. Freeze-Drying Highly Degraded Waterlogged Wood. In: P. Hoffmann, T. Grant, J. A. Spriggs & T. Daley, edits. *Proceedings of the 6th ICOM-CC Group on Wet Organic Archaeological Material Conference*. York: s.n., pp. 9-25.

Wengert, E., 2006. *Principles and Practices of Drying Lumber*. Virginia: Lignomat Ltd.

Zimmerman, M. & Brown, C. L., 1971. *Trees: Structure and Function*. New York: Springer-Verlag.