

CONSTRUÇÃO EM MADEIRA INFLUÊNCIA DAS CONDIÇÕES AMBIENTAIS EM ESTRUTURAS DE MADEIRA

Helena Cruz^[1], João Custódio^[2], Pedro Palma^[3]

^[1] Investigadora Principal, ^[2] Bolseiro Pós-Doc, ^[3] Bolseiro de Doutoramento
Laboratório Nacional de Engenharia Civil

Referem-se os principais aspetos do desempenho dos elementos e estruturas de madeira que são afetados pelas condições ambientais. Apresentam-se os estudos conduzidos para obter informação relevante sobre as condições de serviço e discutem-se algumas situações paradigmáticas em que o conhecimento dessas condições é determinante para garantir a resistência e a durabilidade das estruturas de madeira.

1. EFEITOS DAS CONDIÇÕES AMBIENTAIS

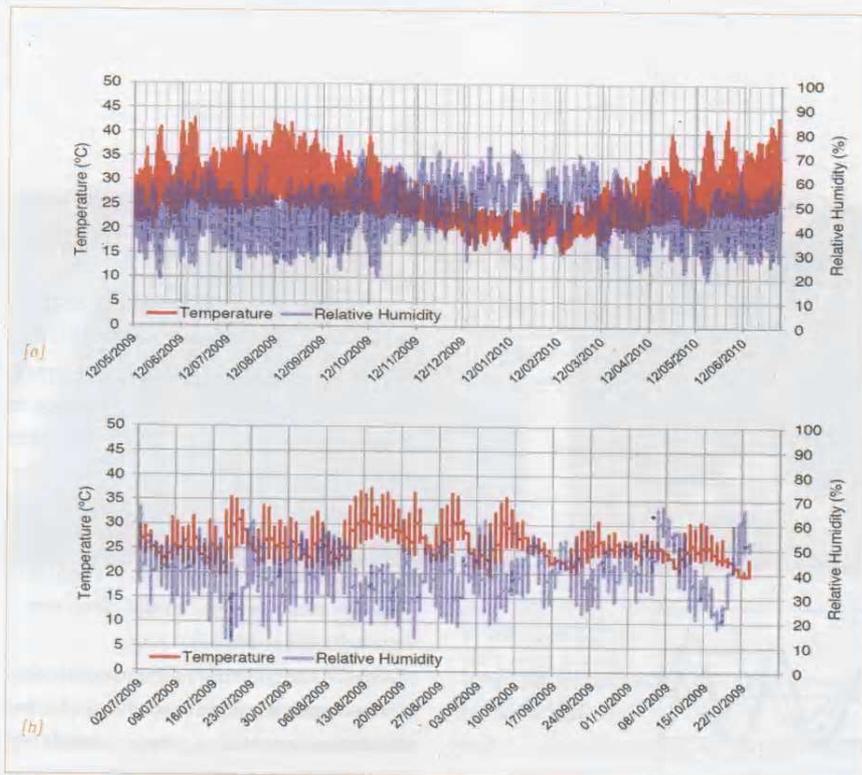
As condições ambientais envolventes afetam o desempenho de elementos e das estruturas de madeira, em termos da sua estabilidade dimensional, resistência mecânica, durabilidade e aspeto visual. A madeira tende continuamente para o equilíbrio higroscópico com o ar envolvente, absorvendo ou libertando água em função da temperatura e da humidade relativa do ar, num processo dinâmico ao longo de toda a vida, sendo que o teor de água determina muitas das propriedades da madeira em cada momento. Na gama dos valores de teor de água da madeira correntemente registados em estruturas e edifícios (abaixo do ponto de saturação das fibras), as variações do teor de água implicam necessariamente variações dimensionais das peças, ocorrendo o seu inchamento quando o teor de água aumenta e retração quando o teor de água diminui. Estas variações são também, frequentemente, acompanhadas pelo desenvolvimento de empenhos e fendas [respetivamente, em resultado da anisotropia

da madeira e de gradientes de humidade], com implicações funcionais, estéticas e, no caso de algumas fendas, de perda de resistência. O teor de água da madeira afeta também de forma clara a sua resistência mecânica. Por esta razão, os valores de resistência indicados em qualquer fonte bibliográfica, nomeadamente na norma Europeia EN 338 (Estruturas de madeira – Classes de resistência) referem-se sempre a um dado teor de água (em geral 12 %) ou ao equilíbrio com um ambiente específico (geralmente $65 \pm 5\%$ de humidade relativa e $20 \pm 2^\circ\text{C}$ de temperatura). No dimensionamento de estruturas de madeira permanente ou temporariamente sujeitas a condições muito distintas destas, especialmente ambientes húmidos ou aplicações no exterior, essa influência deve ser tida em conta por meio de coeficientes de modificação que reduzam adequadamente a resistência da madeira em função da Classe de Serviço, conforme especificado na norma Europeia EN 1995-1-1 (Eurocódigo 5 – Projeto de estruturas de madeira). As condições de aplicação afetam igualmente a durabilidade dos elementos de madeira, na medida em que a temperatura e o seu teor de água condicionam a capacidade de desenvolvimento de determinados agentes biológicos, como fungos de podridão, térmitas e carunchos, capazes de utilizar este material como alimento. No caso de derivados de madeira, por exemplo elementos estruturais lamelados colados ou placas de aglomerado de fibras ou partículas, além dos aspetos referidos, o ambiente pode ainda comprometer a integridade do próprio material, nomeadamente por via da sensibi-

lidade das colas à temperatura e à humidade. As ligações entre elementos são outro dos aspetos a ter em conta, uma vez que, quer sejam realizadas por meio de ligadores metálicos quer através de colas estruturais (usadas em ligações originais ou introduzidas em intervenções de reparação ou reforço) podem ser afetadas negativamente pela exposição prolongada à água, à humidade ou a temperaturas elevadas, exposição essa que poderá resultar, por exemplo, na corrosão dos ligadores metálicos, ou na hidrólise, fissuração, ou degradação térmica irreversíveis das colas.

2. CONDIÇÕES DE EXPOSIÇÃO DE ESTRUTURAS EM PORTUGAL

A informação disponível relativamente à temperatura e à humidade relativa do ar no interior de edifícios e em contacto com as estruturas de madeira em Portugal é escassa. Diversos estudos conduzidos nos EUA e na Arábia Saudita [1-9] registaram a temperatura máxima de 76°C atingida ao longo de um ano em coberturas, embora o somatório dos períodos de tempo com temperatura superior a 71°C não tenha excedido 21 horas e com temperatura superior a 66°C não tenha excedido 64 horas em edifícios multifamiliares típicos. Para temperaturas exteriores de cerca de 40°C , temperaturas de 58°C ou superiores foram registadas durante 11 horas em coberturas inclinadas. Em coberturas planas, com revestimento fino e escuro, em Riyadh as temperaturas superficiais chegaram a 93°C entre abril de 1989 e novembro de



> 1

1990. Sob coberturas metálicas, na zona leste do estado do Tennessee foram atingidos 73 °C em maio de 1986.

Estes estudos incidiram sobre técnicas de construção, materiais estruturais, isolamento térmico e pormenorização distintos dos utilizados correntemente em Portugal. Consequentemente, tendo em conta a importância das condições ambientais no desempenho das estruturas de madeira, considerou-se importante obter dados relevantes para a realidade nacional, bem como medir a humidade relativa do ar, aspeto não considerado nos estudos mencionados.

Um dos objetivos deste trabalho foi avaliar as condições de temperatura e humidade do ar a que estão sujeitas algumas estruturas de madeira em edifícios com diferentes usos, localizados em várias regiões do país. Foram monitorizadas as condições exteriores e interiores de diversos edifícios (estruturas modernas de madeira lamelada colada, estruturas históricas e coberturas de edifícios tradicionais), com diferentes utilizações (piscinas, centros comerciais, teatros e edifícios de habitação) e em diferentes regiões climáticas (região de Lisboa e arredores – clima mediterrânico – e Alentejo interior – clima continental).

As medições (exemplos na Figura 1) foram feitas junto aos elementos de madeira, ao nível das respetivas coberturas, em pontos não expostos diretamente à radiação solar e afastados do revestimento da cobertura e de eventuais equipamentos ou insuflação de ar.

3. REFORÇO POR COLAGEM EM OBRA – ESCOLHA E ENSAIO DE COLAS

Um dos objetivos da monitorização efetuada era saber até que ponto a temperatura ambiente a que uma estrutura de madeira está exposta se reflete na temperatura sentida no interior dos elementos. Por outras palavras, saber até que ponto a baixa condutibilidade térmica da madeira consegue proteger de um aquecimento excessivo eventuais linhas de cola localizadas no interior das secções.

Esta informação é particularmente relevante no caso de intervenções de reforço estrutural recorrendo a colagem em obra, já que algumas colas usadas para este fim apresentam perdas de rigidez e de resistência com o aumento da temperatura, efeito esse que pode ser já pronunciado quando expostas a temperaturas de

serviço de cerca de 30 °C ou 40 °C.

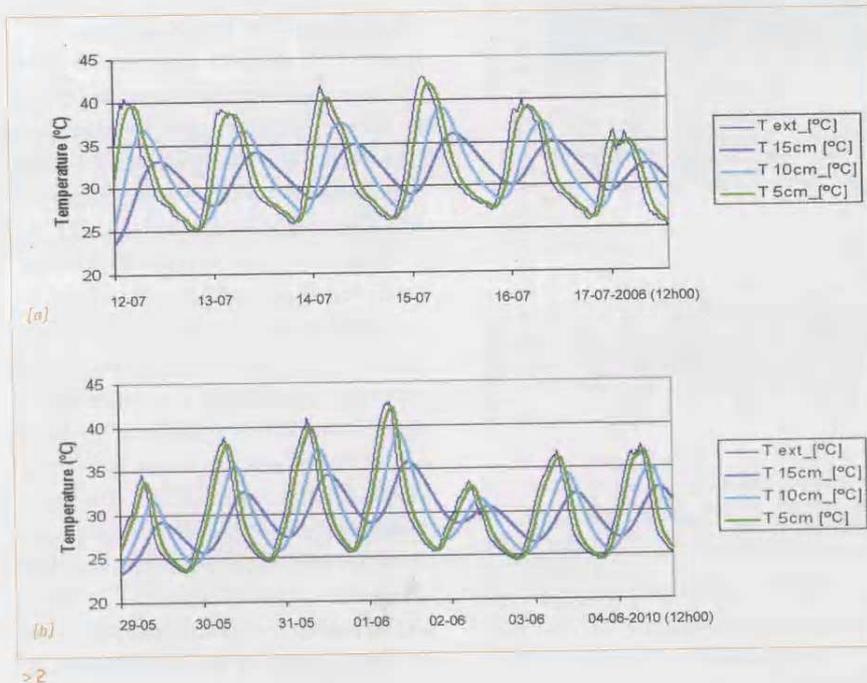
Os valores da temperatura ambiente registados foram usados em modelos numéricos para prever a evolução de temperatura sentida no interior dos elementos de madeira a diversas profundidades e consequentemente impostas às eventuais ligações coladas (Figura 2).

Diversas colas comerciais epoxídicas e de poliuretano e respetivas ligações coladas foram ensaiadas no LNEC a vários patamares de temperatura dentro da gama de valores esperados em serviço, para avaliar a sua resistência e durabilidade ([10]). Os resultados mostram que as várias colas estudadas apresentam comportamentos distintos para as temperaturas geralmente atingidas em serviço (Figura 3). As colas epoxídicas analisadas (A-R) manifestaram um marcado decréscimo de rigidez e resistência com o aumento da temperatura de ensaio e a 60 °C a sua rigidez é diminuta. As colas de poliuretano ensaiadas (S e T) apresentaram, até 60 °C, um comportamento semelhante ao da maioria das colas epoxídicas, mas a perda de propriedades subsequente foi muito menos pronunciada, só perdendo totalmente a sua rigidez acima de 90 °C.

Importa referir que, embora o isolamento térmico conferido às juntas coladas pela camada de madeira que as cobre (espessura de recobrimento) provoque o desfaseamento temporal e o amortecimento da temperatura máxima atingida pela cola (Figura 2), em ambientes permanentemente quentes ou sob um aquecimento prolongado as juntas coladas acabam por atingir temperaturas relativamente elevadas, que devem merecer atenção.

Naturalmente que no caso de elementos de reforço colados diretamente sobre a superfície dos elementos estruturais o aquecimento da cola é particularmente relevante, sobretudo em elementos diretamente expostos à radiação solar. Em contrapartida, é importante salientar que, numa eventual situação de incêndio, o rápido aquecimento exterior não é acompanhado por um aquecimento significativo no interior da secção transversal dos elementos de madeira expostos ao fogo, pelo que as colas protegidas no interior das peças são

> Figura 1: Alguns exemplos dos registos de temperatura e humidade relativa do ar interior: a) Cobertura de vidro num centro comercial; b) Caixa de palco de um edifício histórico (teatro).



> 2

pouco afetadas numa fase inicial de exposição. Como recomendação geral, estas intervenções de reforço devem ser adequadamente dimensionadas e pormenorizadas, sempre que possível embebendo as ligações coladas no interior dos elementos, e evitando o sobreaquecimento dos elementos, através do seu sombreamento e da ventilação dos locais. O conhecimento das condições de serviço a que

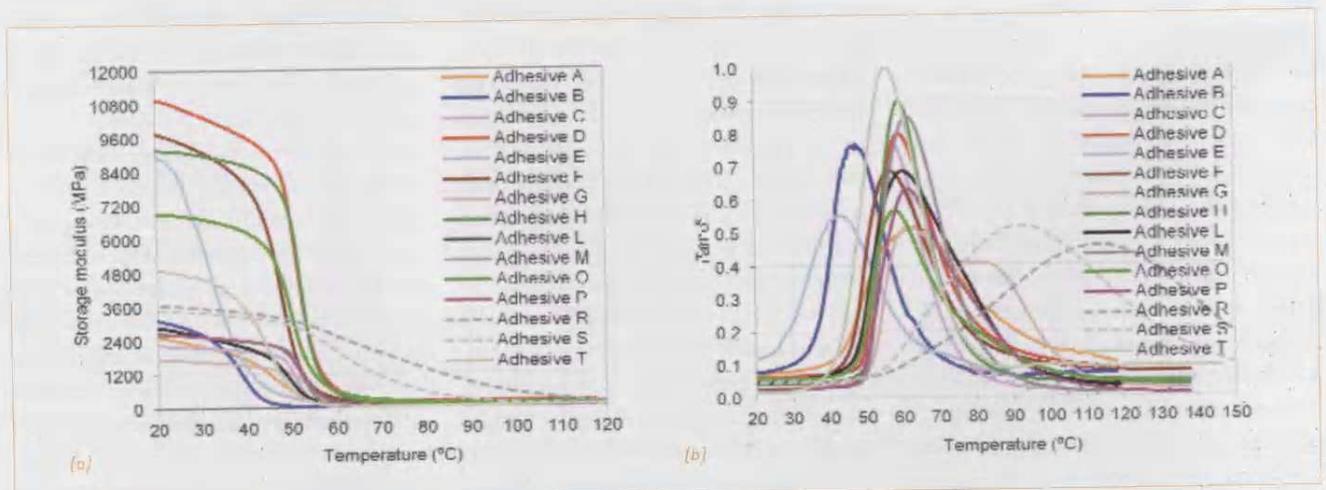
ficarão expostos os elementos intervencionados com recurso a colagem em obra permite selecionar colas com adequado desempenho térmico. A temperatura de transição vítrea da cola, indicada na respetiva Ficha Técnica, é indicativa das temperaturas a não alcançar em serviço, podendo a sua sensibilidade à temperatura ser mais rigorosamente avaliada por meio de ensaios laboratoriais.

4. REABILITAÇÃO DE EDIFÍCIOS – ALTERAÇÃO DAS CONDIÇÕES AMBIENTAIS

A reabilitação e a requalificação de edifícios passam frequentemente pela substituição de caixilharia e pelo isolamento (e impermeabilização) da cobertura. Embora em termos do desempenho térmico e consumo energético essas alterações sejam muitas vezes essenciais, a redução drástica da permeabilidade ao ar da envolvente do edifício nem sempre é acompanhada por estudos e eventuais medidas complementares que permitam a ventilação adequada do interior.

Nos casos em que existe significativa produção de humidade, seja em consequência das atividades humanas, seja por exemplo em resultado da ascensão de água a partir das fundações e sua evaporação no interior dos compartimentos, uma insuficiente taxa de renovação do ar pode ter como consequências mais visíveis a ocorrência de condensações e todos os problemas derivados da humificação dos materiais (na madeira: inchamento, bolores, podridão, etc.).

Convém também ter em atenção que a climatização de edifícios antigos, ou a alteração do seu uso [por exemplo, no caso de sótãos que passam a ser habitados] podem alterar drasticamente o seu ambiente interior (tornando-o em geral mais estável, mas em média também



> 3

> Figura 2: Temperatura ambiente registada em duas coberturas, durante o verão, e temperatura correspondente a 5, 10 e 15 cm abaixo da superfície dos elementos de madeira. a) sótão em Lisboa; b) cobertura de vidro em centro comercial.

> Figura 3: Efeito da temperatura: a) no módulo de armazenamento [rigidez] e b) na temperatura de transição vítrea.



> 4



> 5

mais seco), o que pode provocar a secagem da madeira com o conseqüente desenvolvimento de fendas e empenos de elementos estruturais de madeira e eventual degradação de elementos decorativos.

Mesmo que não haja produção de calor ou humidade, a alteração das características de permeabilidade e isolamento térmico da envolvente, por exemplo de um telhado, é suscetível de alterar os valores extremos e médios de temperatura e da humidade relativa do ar ambiente no interior dos edifícios, alterando o teor de água de equilíbrio da madeira de estruturas e revestimentos.

Como forma de ilustrar este último caso, apresentam-se seguidamente as conclusões obtidas com a monitorização das condições ambientais no exterior e no interior de dois sótãos não habitados em edifícios de habitação. A primeira destas coberturas, localizada em Lisboa, é constituída por telhas de barro vermelho diretamente apoiadas sobre um sistema de ripas, varas e madres de madeira, com elevada permeabilidade (Figura 4). Na segunda estrutura, localizada em Oxford (no Reino Unido), o revestimento da cobertura incluía um forro de madeira e uma membrana impermeável (Figura 5).

As condições exteriores e interiores em ambos os locais foram registadas entre outubro de 2005 e outubro de 2008.

O Quadro 1 compara as amplitudes térmicas e

de humidade relativa do ar diárias, observadas nos dois casos.

Verifica-se que, em Lisboa, a amplitude térmica no interior é maior do que no exterior, possivelmente em conseqüência do aquecimento do revestimento devido à insolação e sua radiação para o interior durante o dia, seguida de um rápido arrefecimento do ar interior durante a noite facilitada pela grande permeabilidade do telhado. Em Oxford verifica-se o oposto, com amplitudes térmicas interiores menores do que as exteriores. Relativamente à humidade relativa do ar, embora em ambos os casos se observe uma variação diária menor no interior do que no exterior, em Oxford as diferenças entre as amplitudes no interior e no exterior são muito mais acentuadas.

Os Quadros 2 e 3 mostram as diferenças de temperatura e humidade relativa do ar, entre o interior e o exterior, para cada uma das coberturas.

Comparando as duas coberturas, as principais diferenças são ao nível da temperatura mínima e média diária e da humidade relativa do ar máxima diária, em que a cobertura de Oxford regista maiores diferenças entre os valores interiores e exteriores do que a cobertura de Lisboa.

Em ambos os casos, no interior a temperatura é sempre mais elevada e a humidade relativa do ar é geralmente mais baixa do que no exterior. No entanto, as diferenças entre as condições

exteriores e interiores são mais notórias na cobertura de Oxford do que na de Lisboa, em que o ambiente interior segue mais de perto o ambiente exterior.

Note-se que o aumento da temperatura e a redução da humidade relativa do ar implicam uma redução do teor de água de equilíbrio da madeira. Embora as duas coberturas estejam em locais diferentes, e conseqüentemente esta análise deva ser encarada com alguma reserva, os dados apresentados são indicativos de como a redução da permeabilidade e o aumento de isolamento térmico da envolvente são suscetíveis de reduzir o teor de água de equilíbrio da madeira.

No caso de estruturas com interesse histórico ou patrimonial, especialmente quando importa preservar revestimentos interiores, elementos decorativos ou mobiliário existente no seu interior, é importante zelar para que o equilíbrio destes elementos com as novas condições ambientais não acabe por ter uma ação destrutiva.

5. CONDIÇÕES DE EXPLORAÇÃO DOS EDIFÍCIOS – PROJETO E REALIDADE

Uma das causas frequentes de anomalias em edifícios, relacionadas com a falta de durabilidade dos materiais, resulta de se considerar no projeto condições ambientais e de exploração manifestamente desfasadas da realidade.

> Figura 4: Cobertura de um edifício residencial em Lisboa.

> Figura 5: Cobertura de um edifício residencial em Oxford (Reino Unido).

> Quadro 1: Amplitudes térmicas [T] e de humidade relativa [HR] do ar observadas.

Amplitudes diárias	Lisboa		Oxford	
	T [°C]	HR [%]	T [°C]	HR [%]
Exterior	7,5	36,6	10,3	41,6
Interior	9,4	27,2	9,4	12,4
Diferença	1,9	-9,4	-0,9	-27,5

> Quadro 2: Diferenças entre as condições interiores e exteriores – Lisboa.

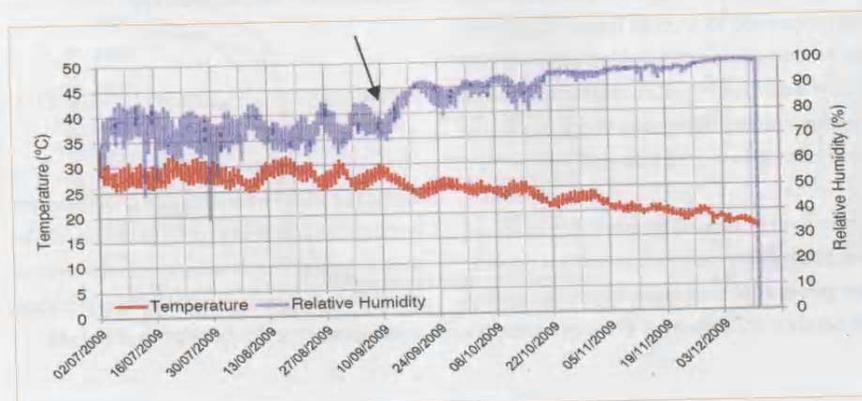
	Diferenças diárias					
	T _{interior} - T _{exterior} [°C]			HR _{interior} - HR _{exterior} [%]		
	T _{max.}	T _{min.}	T _{média}	HR _{max.}	HR _{min.}	HR _{média}
Média	2,5	0,6	1,1	-13,5	-4,1	-9,1
Dia quente [2006-07-15]	5,7	1,1	2,3	-4,7	0,4	-2,3
Dia frio [2006-01-29]	0,9	0,7	0,1	-8,2	0,5	-6

> Quadro 3: Diferenças entre as condições interiores e exteriores – Oxford.

	Diferenças diárias					
	T _{interior} - T _{exterior} [°C]			HR _{interior} - HR _{exterior} [%]		
	T _{max.}	T _{min.}	T _{média}	HR _{max.}	HR _{min.}	HR _{média}
Média	4,5	5,4	5,4	-23,4	5,8	-10,8
Dia quente [2006-07-19]	10,8	6,0	7,6	-26,7	2,6	-11,7
Dia frio [2005-12-28]	5,7	7,3	6,3	-20,3	-8,8	-16,0

Um exemplo típico passa por assumir o funcionamento em permanência de condicionamento ambiente em edifícios públicos, o qual, por razões económicas ou outras, é desligado

de forma intermitente ou por períodos mais ou menos prolongados. Em edifícios de habitação são também frequentes grandes diferenças entre fogos e desvios das condições



> 6

> Figura 6: Temperatura e humidade relativa do ar interior na estrutura de cobertura de uma piscina coberta, antes e após a desativação do sistema de climatização..

ambientais face ao previsto, em resultado de diferentes formas de utilização dos espaços (sombreamento, ventilação, produção de vapor de água, aquecimento, limpeza), ou de períodos de ausência dos seus ocupantes. No caso de edifícios de habitação, são relativamente frequentes as anomalias em revestimentos de piso relacionadas com a secagem ou a humidificação das réguas de madeira após assentamento, com as consequentes retrações, aberturas de fendas e de juntas, ou inchamentos, emolamentos e descolamentos das réguas, respetivamente. Embora nos edifícios de habitação correntes se conheçam os intervalos de teor de água recomendáveis para a madeira à data da sua aplicação, em edifícios com exigências de ambiente específicas, como bibliotecas, museus, etc., ou em presença de pavimentos radiantes, as condições ambientais devem ser bem identificadas e o teor de água da madeira (e o tipo de material) ajustados cuidadosamente a essas condições.

Devem também ser alvo de atenção as situações transitórias, seja durante a construção de uma estrutura, seja durante períodos de avaria dos sistemas de ventilação e condicionamento, paragem para férias ou ações de manutenção. A Figura 6 mostra as condições ambientais registadas na estrutura de cobertura de uma piscina no interior do país, em regime normal e após desativação do sistema de climatização.

É notória a progressiva deterioração das condições ambientais após a desativação do equipamento, com descida acentuada da temperatura (seguindo as condições exteriores) e forte aumento da humidade relativa do ar, o que foi acompanhado por graves problemas de condensação e consequente deterioração das estruturas e dos revestimentos, atacados por fungos e bolores.

Nestas situações é também previsível a deterioração irreversível dos eventuais derivados de madeira que sejam adequados unicamente para ambiente interior seco e ficam temporariamente expostos a condições significativamente mais exigentes do que as previstas no projeto.

