

OTTAVIANO ALLEGRETTI

# *Effetti del clima sulla conservazione dei manufatti lignei di interesse storico artistico*

## *1. Introduzione*

Qualsiasi manufatto in legno massiccio è sottoposto a variazioni del proprio stato igroscopico e dimensionale ogni qualvolta si verificano variazioni di temperatura e umidità dell'aria dell'ambiente circostante. Tale comportamento igroscopico e deformativo dura per tutta la vita del manufatto.

Le oscillazioni eccezionali dovute ad eventi accidentali, ma anche (e soprattutto) le normali fluttuazioni di temperatura e umidità giornaliere e stagionali ripetute ciclicamente per lunghissimi tempi, producono deformazioni permanenti che modificano la forma e quindi la percezione estetica e la "godibilità" dell'opera. Tali deformazioni permanenti si sviluppano spesso in maniera impercettibile (poiché coprono archi temporali lunghissimi) ma continua e ad esse si accompagna lo sviluppo e l'accumulo di tensioni interne dovuto alla modifica dell'equilibrio fra le varie parti costituenti il manufatto. Quando queste tensioni superano le resistenze dei materiali si instaurano danni irreversibili quali apertura di fessurazioni, spacchi, cadute di strati pittorici.

Lo stato conservativo di un manufatto ligneo dipende in larga misura (escludendo i danni di origine biologica) dalla sua storia climatica e dagli "artifici" che l'uomo ha (in origine e nel tempo) escogitato per contrastare gli effetti delle variazioni climatiche (traverstaure, parchettature, trattamenti chimici...). La sua sensibilità e modalità di risposta (in senso lato) alle sollecitazioni ambientali dipendono dalle peculiarità costruttive e tecnologiche dell'opera d'arte

e da fenomeni fisici meccanici e reologici anche assai complessi e alcuni dei quali ancora in discussione.

Alcune problematiche conservative sono oggi in rese più pressanti dalle consistenti modifiche microclimatiche in edifici storici prodotte dalla installazione di sistemi di riscaldamento che portano, quando attivi in periodo invernale, ad un drastico abbassamento della umidità relativa dell'aria. Tale fenomeno è ancora più marcato e pericoloso in edifici dislocati in zone montane dell'area alpina il cui regime climatico è caratterizzato da estati temperate e umide e inverni freddi e secchi.

In questo caso, come anche nei casi ove sono installati sistemi di controllo climatico attivi (condizionatori, umidificatori...) si pone il problema della gestione di tali impianti, problema che investe aspetti conservativi, energetici, di fruibilità.

## *2. Il comportamento igroscopico deformativo del legno*

Il legno è un materiale di origine biologica caratterizzato da ampia variabilità inter e intra specifica, igroscopico e anisotropo.

La variabilità fa sì che le caratteristiche non siano mai costanti nemmeno nell'ambito dello stesso pezzo e che i valori caratterizzanti il materiale siano da intendersi sempre come valori medi. Tra le cause di variabilità possono essere anche ascritti i difetti e le anomalie che determinano caratteristiche e comportamenti del legno differenti da quelli di legno netto (cioè perfetta-

mente regolare e privo di anomalie). Per esempio, alcuni tipi di deformazione delle tavole quali arcuatura, falciatura e svergolamento dipendono dalla presenza di difetti (fibratura deviata, legno di reazione) mentre l'imbarcamento di tavole tangenziali dipende dalla anisotropia del materiale ed è quindi una deformazione per così dire inevitabile, perché dovuta alle caratteristiche del materiale.

### 2.1. Relazioni legno acqua

L'umidità del legno è definita dal rapporto in percentuale fra massa dell'acqua e massa anidra del legno contenente tale acqua ( $U = M_{H_2O}/M_O$ ). La massa anidra è uno stato non esistente in natura poiché è ottenibile solo ponendo il legno in stufa ventilata a 103°C.

La determinazione della umidità del legno può essere compiuta con metodo gravimetrico (con bilancia di precisione e stufa termostatica) o in maniera non distruttiva (meno precisamente) con igrometro elettrico.

#### 2.1.1. Intervallo igroscopico

Nell'albero in piedi l'acqua è presente sia all'interno dei lumi cellulari (acqua libera o di imbibizione) sia legata alle pareti cellulari (acqua di saturazione).

Il punto di saturazione delle fibre (PSF) è il valore di umidità soglia, al di sopra del quale vi è acqua libera, al di sotto del quale si è in presenza di sola acqua di saturazione. Il FSP varia tra il 22% e il 35% ma per convenzione è fissato al 30%. L'intervallo di umidità 0-30% è definito intervallo igroscopico. In questo intervallo avvengono tutte le più importanti variazioni delle caratteristiche fisico-meccaniche del legno, a cominciare proprio dalle variazioni dimensionali.

#### 2.1.2. Equilibrio igroscopico

È definito dalla relazione esistente fra umidità del legno e condizioni termogigrometriche ambientali.

L'equilibrio di umidità fra legno e am-

biente si ottiene solo se il pezzo di legno è posto in un ambiente con condizioni termogigrometriche perfettamente stabili per un periodo sufficientemente lungo, oppure se il pezzo di legno è molto sottile o per meglio dire ha uno spessore infinitesimale (e quindi con gradienti di umidità assenti). In assenza di queste condizioni (peraltro difficilmente verificabile in natura) il legno tende all'equilibrio, senza mai raggiungerlo, inseguendo dinamicamente le fluttuazioni di UR dell'aria. Per questo motivo è utile introdurre la definizione di *umidità di equilibrio potenziale*, e cioè l'umidità che avrebbe un pezzo di legno condizionato in ambiente stabile o, in alternativa la umidità di un pezzo di legno infinitamente sottile.

L'equilibrio igroscopico potenziale è definito con buona approssimazione dalle isoterme di sorbimento reperibili in qualsiasi testo di tecnologia sia in forma grafica che tabellare. Ai fini del calcolo le isoterme di sorbimento possono anche essere determinate per via analitica. A tale scopo è, soddisfacentemente precisa l'equazione di *Hailwood-Horrobin*, adattata da *Simpson* (1973).

#### 2.1.3. Dinamica dell'equilibrio igroscopico

In condizioni reali un pezzo di legno (con uno spessore  $s$ ) assorbe o perde acqua attraverso le superfici di scambio "inseguendo" l'equilibrio igroscopico. Alla superficie cioè allo spessore 0, l'equilibrio può essere considerato istantaneo. Da qui, l'equilibrio si propaga, per così dire, verso la parte più profonda del pezzo di legno, fino a raggiungere - se le condizioni non cambiano - il cuore. Durante questo processo di forma un profilo o gradiente di umidità lungo lo spessore del legno, ovvero differenti umidità a differenti profondità. Da ciò risulta evidente che la variazione di umidità media del pezzo di legno varia (a parità di altre condizioni) tanto più lentamente quanto più è grande lo spessore.

Il gradiente di umidità è l'origine e il "motore" del flusso interno di vapore acqueo. Si tratta di un flusso diffusivo descritto dalla prima (regime stazionario) e seconda (regime transitorio) legge di *Fick*.

Umidità relativa dell'aria	Temperature in gradi centigradi									+
	0°	10°	20°	30°	40°	50°	60°	70°	80°	
5%	1%	1%	1%	1%	1%	1%	1%	1%	1%	1%
10%	3%	3%	3%	2%	2%	2%	2%	2%	1%	1%
15%	4%	4%	4%	3%	3%	3%	3%	2%	2%	2%
20%	5%	5%	5%	4%	4%	4%	3%	3%	3%	2%
25%	6%	5%	5%	5%	5%	5%	4%	4%	3%	3%
30%	6%	6%	6%	6%	6%	5%	5%	4%	4%	3%
35%	7%	7%	7%	7%	6%	6%	5%	5%	4%	4%
40%	8%	8%	8%	7%	7%	7%	6%	6%	5%	4%
45%	9%	9%	9%	8%	8%	7%	7%	6%	6%	5%
50%	10%	10%	9%	9%	9%	8%	7%	7%	6%	6%
55%	11%	10%	10%	10%	9%	9%	8%	7%	7%	6%
60%	12%	11%	11%	11%	10%	10%	9%	8%	7%	7%
65%	13%	12%	12%	12%	11%	10%	10%	9%	8%	8%
70%	14%	14%	13%	13%	12%	11%	11%	10%	9%	8%
75%	15%	15%	15%	14%	13%	13%	12%	11%	10%	9%
80%	17%	17%	16%	16%	15%	14%	14%	13%	12%	11%
85%	19%	19%	18%	18%	17%	16%	15%	14%	13%	12%
90%	22%	22%	21%	20%	19%	18%	17%	16%	15%	14%
95%	27%	26%	25%	24%	23%	22%	21%	20%	19%	18%
100%	33%	32%	31%	30%	29%	28%	27%	26%	25%	24%

Tab. 1 - Umidità del legno in funzione di temperatura e umidità relativa dell'aria.

$$J = -D \left( \frac{\delta C}{\delta x} \right)$$

Ove

$J$  = flusso [ $\text{kg m}^{-2}$ ]

$D$  = coefficiente di diffusione [ $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$ ]

$(\delta C/\delta x)$  = gradiente di concentrazione [ $\text{kg m}^{-3} \text{m}^{-1}$ ]

Tale legge sancisce che il flusso di massa (grandezza vettoriale che denota la quantità di massa che passa, per un dato incremento di tempo, attraverso l'unità di superficie normale al vettore) è proporzionale al gradiente di concentrazione e dipende dal coefficiente di diffusività. Qual'ora il gradiente sia positivo si ha un assorbimento, qual'ora sia negativo si ha un desorbimento. Il coefficiente di diffusività al vapore acqueo è una caratteristica del materiale, misurabile con un apposito dispositivo denominato vaporimetro o attraverso un test di essiccazione normalizzato. Naturalmente, tanto più grande è  $D$  tanto più veloci saranno gli scambi igroscopici e

i tempi di equilibramento e tanto maggiori saranno al contempo i gradienti di umidità durante le fasi transitorie.

Le cose sono rese più complicate dal fatto che:

- $D$  non è costante ma è funzione di numerosi parametri i più importanti dei quali sono la umidità del legno, la temperatura e la direzione anatomica di scambio;
- gli scambi superficiali e cioè nell'interfaccia legno-aria non sono effettivamente istantanei come prima affermato ma hanno una loro dinamica espressa da un coefficiente di scambio superficiale ( $S$ ) dipendente da numerosi fattori quali le caratteristiche morfologiche della superficie e la velocità dell'aria dell'ambiente che lambisce la superficie;
- è presente un fenomeno di isteresi igroscopica in virtù del quale le curve di assorbimento e desorbimento non sono sovrapponibili.

## 2.2. Variazioni dimensionali

Ad ogni variazione di umidità nel domi-

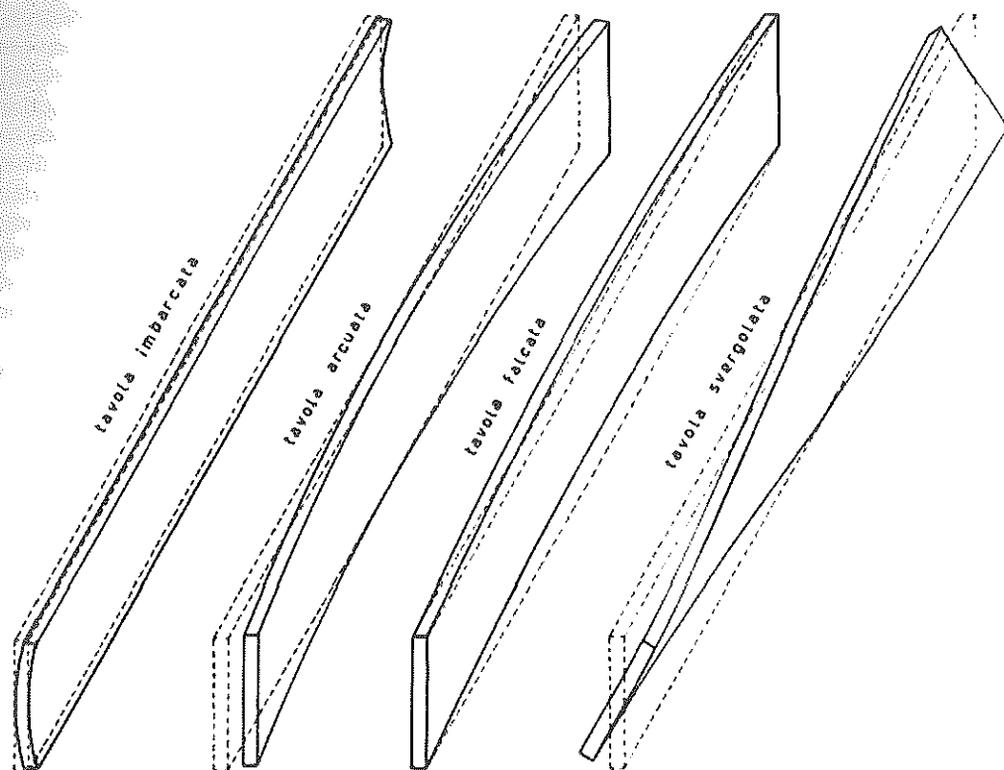


Fig. 1 - Coefficiente di diffusione in direzione trasversale per legni con gravità specifica di 0,5 a varie T e U (da Avradimis in AA.VV., 2004).

nio igroscopico corrisponde una variazione dimensionale. Il ritiro lineare totale ( $b_{D_{tot}}$ ) è definita la diminuzione dimensionale percentuale (rispetto alle dimensioni fresche) che un pezzo di legno subisce quando l'umidità passa dallo stato fresco ( $U \geq 30\%$ ) allo stato anidro.

$$\beta_{D_{tot}} = [(D_{fr} - D_0) / D_{fr}] \times 100$$

Con buona approssimazione, ai fini pratici, la relazione fra ritiri e umidità può essere considerata lineare. Analoghe considerazioni possono essere fatte per i rigonfiamenti che (a parte l'isteresi) possono essere considerati ritiri di segno opposto.

A causa dell'anisotropia del legno i ritiri sono differenti nelle tre direzioni anatomiche fondamentali:

- il ritiro longitudinale è molto piccolo ( $b_{L_{tot}} = 0,2\% - 0,8\%$ ) e può essere, nella maggior parte dei casi trascurato;
- il ritiro radiale  $b_{R_{tot}}$  è compreso fra il 3% e il 6%;
- il ritiro tangenziale  $b_{T_{tot}}$  è compreso fra il 6% e il 12%;
- il ritiro volumetrico è dato dalla somma dei tre ritiri sopra descritti  $b_{V_{tot}} + b_{T_{tot}} + b_{R_{tot}} + b_{L_{tot}}$ .

### 2.2.1. Conseguenze dei ritiri

Ritiri e rigonfiamenti lineari comportano variazioni dimensionali delle superfici con conseguenze più o meno gravi agli strati pittorici eventualmente presenti. In strutture complesse come per esempio in tavolati con traversaure, le variazioni dimensionali lineari producono stati di tensione dovuti al

fatto che le traverse impediscono il normale ritiro con conseguente possibile sviluppo di deformazioni secondarie o formazione di spaccature e fessurazioni.

A causa dell'anisotropia dei ritiri le variazioni di umidità producono nei solidi non solo variazioni dimensionali ma anche deformazioni. Le conseguenze inevitabili più importanti della anisotropia dei ritiri sono la deformazione di imbarcamento in tavole tangenziali e l'apertura di fessurazioni a V (solitamente lungo le superfici radiali) in assortimenti contenenti midollo.

Escludendo le già citate deformazioni dovute ad anomalie (es. svergolamenti dovuti a fibratura deviata) un'altra importante tipologia di deformazioni è data dalla formazione di gradienti di umidità lungo lo spessore del legno. La formazione di gradienti di umidità produce infatti gradienti di deformazione lungo lo spessore con lo sviluppo di conseguenti tensioni interne e ulteriori tendenze deformative. A questa tipologia di deformazioni appartengono le deformazioni dovute a gradienti asimmetrici che si instaurano in tavole dipinte in cui una faccia è resa impermeabile

dalla presenza di strati pittorici che riducono lo scambio di vapore. In tale situazione è il retro a scambiare maggiormente e quindi a subire ritiri e rigonfiamenti maggiori rispetto al fronte. Tali ritiri differenziali fra fronte e retro producono lo stesso effetto della anisotropia su una tavola tangenziale e cioè una deformazione di imbarcamento. Tali imbarcamenti dovuti ad asimmetrie igroscopiche sono transitori, essendo essi causati da gradienti che per definizione sono transitori.

Il ripetersi di deformazioni transitorie può produrre comunque deformazioni permanenti (solitamente di segno opposto rispetto alle transitorie) per l'instaurarsi di fenomeni plastici, viscoelastici e meccanosorbitivi sui quali, sebbene di fondamentale importanza, non ci possiamo dilungare.

### 3. Ricerche in corso

Nell'ambito di un progetto triennale (2003-2005) "post-doc" finanziato dalla PAT e in collaborazione operativa tra IVAL-

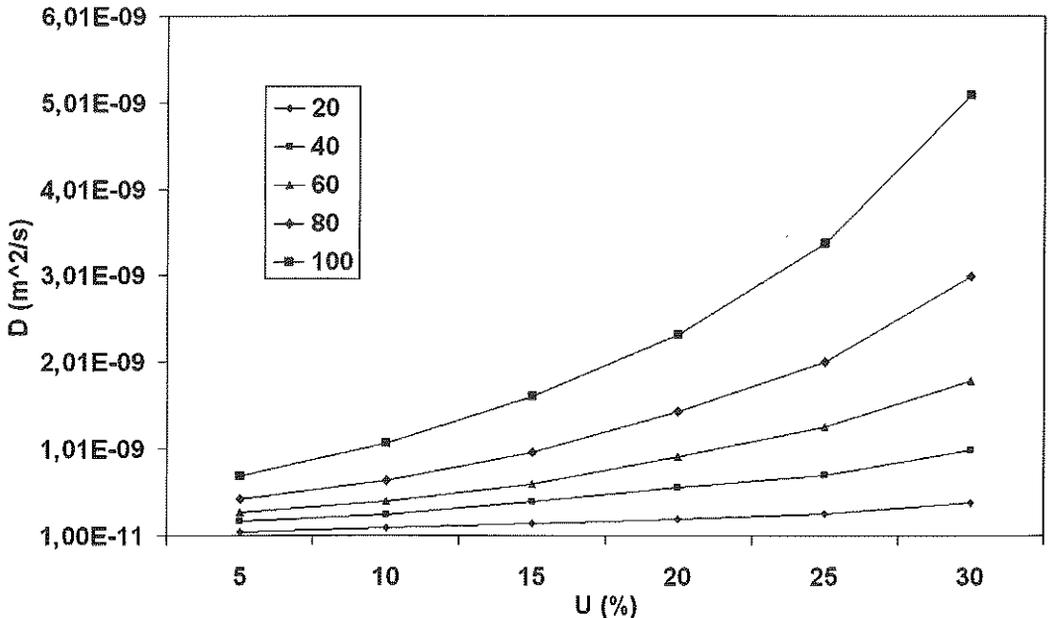


Fig. 2 - Vari tipi di deformazioni di una tavola.

SA-CNR e Soprintendenza dei beni Storico Artistici della PAT sono in corso delle ricerche atte a caratterizzare le interazioni esistenti fra dati regimi climatici di alcuni tipici ambienti espositivi - conservativi esistenti in ambito territoriale e la relativa risposta igroscopica deformativa di oggetti lignei di interesse storico artistico in essi conservati.

Tali ricerche basate sia su misurazioni non distruttive *in situ* compiute su oggetti reali sia sullo sviluppo e utilizzo di appropriati modelli di calcolo numerico hanno il fine pratico di rispondere ad una serie di quesiti operativi:

1. quali sono i regimi climatici ottimali?
  - a. qual è la UR% ambientale ottimale?
  - b. quali sono le fluttuazioni ammissibili?
  - c. quali sono le soglie di rischio?
2. quali sono gli interventi di restauro e manutenzione più opportuni?
3. come valutare lo stato di salute di un manufatto?
4. quali sono i sistemi di riscaldamento più idonei e quali devono essere le norme di gestione di tali impianti?

Il progetto è articolato nelle seguenti parti:

1. monitoraggio pluriennale delle condizioni termoigrometriche di alcuni ambienti espositivi rappresentativi della situazione locale (chiese, musei... con differenti tipi di climatizzazione) e della relativa risposta igroscopica deformativa di manufatti lignei in essi conservati principalmente oggetti mobili con funzioni non strutturali (dipinti su tavola, statue, altari...);
2. sviluppo e adattamento di un modello di calcolo numerico per la previsione del comportamento igroscopico deformativo di oggetti lignei con date caratteristiche esposti a condizioni climatiche reali e simulate;
3. prove di laboratorio per:
  - a. validazione modello numerico tramite rilievi igroscopici deformativi di repliche strutturali di manufatti lignei esposti a condizioni climatiche controllate;
  - b. test per la determinazione delle carat-

teristiche fisiche- meccaniche di base dei materiali (coefficienti di diffusività su diverse specie legnose e strati pittorici, ritiri rigonfiamenti, densità, caratteristiche meccaniche);

- c. valutazione del degrado delle superfici di strati pittorici di diverso tipo su provini di legno sottoposti a cicli di invecchiamento artificiale.

**Ottaviano Allegretti**

IVALSA CNR San Michele a.A.

## BIBLIOGRAFIA

ALLEGRETTI O, RÉMOND R, PERRÉ P., 2003 - *A New Experimental Device for Non-Symmetrical Drying Tests - Experimental and Numerical Results for Free and Constrained Samples*, 8<sup>th</sup> International IUFRO Wood Drying Conference, 65-70, Brasov, Romania.

AA.VV., 2004 - *Foundamental of Drying*, UE, COST E15, (in stampa).

SIMPSON WT, 1973 - *Predicting equilibrium moisture content of wood by mathematical models*. Wood Fiber 5:41-49.

SIAU J. F., 1984 - *Transport process in wood*. Springer-Verlag ed., cap. 6-7.

BODIG J., JAYNE B. A., 1982 - *Mechanics of wood and wood composites*. VNR ed., pp 133-137.

BRAY A., VICENTINI V., 1975 - *Meccanica sperimentale*. Chapter 9, Levrotto e Bella ed.

GUILLARD D. 1987 - *Mécanique du matériau bois et composites*. Cepadues éditions.

GIORDANO G., 1984 - *Tecnologia del legno*. Vol 1, UTET Torino.

SALIN J. G., 1999. - *Simulation Models; From a Scientific Challenge to a Kiln Operator Tool*. 6<sup>th</sup> International IUFRO Wood Drying Conference.

SVENSSON S., TORATTI T., 2002 - *Mechanical response of wood perpendicular to grain when subjected to changes of humidity*. Wood Science and Technology, Vol.36, pp 145-156.

UZIELLI L., FIORVANTI M., 1999 - *Il comportamento fisico-meccanico del legno nei dipinti su tavola*. In: *Dipinti su tavola - La tecnica e la conservazione dei supporti*. A cura di Ciatti M., Castelli C., Santacesaria A., ed. EDIFIR.