

Essiccazione e stagionatura del legno

Introduzione

Perché la essiccazione?

La realizzazione di prodotti finiti a partire dal legno necessita di una fase fondamentale di trasformazione della materia prima: l'essiccazione. Molte caratteristiche del legno sono infatti negativamente influenzate da un elevato contenuto di umidità, tanto che il legno fresco o verde non è direttamente utilizzabile. Fra le proprietà del legno influenzate dall'acqua vi sono:

- il peso: esso influenza negativamente i costi del trasporto e di movimentazione. Il legno allo stato fresco può avere un contenuto di acqua superiore al 100% del proprio peso secco¹. Si pensi a mo' di esempio che un metro cubo di abete può pesare intorno ai 400 Kg quando il suo contenuto di umidità MC (dall'inglese *Moisture Content*) è del 18% e 900 Kg quando è allo stato fresco: 500 kg di acqua per metro cubo di materiale sono trasportati inutilmente;
- la resistenza: praticamente tutte le proprietà meccaniche del legno decrescono all'aumentare del MC;
- la stabilità dimensionale: come si vedrà più avanti, ad ogni variazione di MC al di sotto del 30% sono sempre associati ritiri e deformazioni: lavorando il legno allo stato fresco si va incontro a modifiche dimensionali;
- la durabilità: cioè la resistenza del legno ad

attacchi di agenti biotici (funghi, insetti). Il legno è al sicuro da attacchi di funghi quando il MC è al di sotto del 18-20%;

- la verniciatura: le vernici a base oleosa non penetrano nel legno fresco e molti tipi di vernici che sembrano aderire si rovinano quando il legno si ritira;
- l'incollaggio: molti tipi di colla non formano buoni legami con legno troppo umido e i giunti incollati possono rompersi con lo sviluppo dei ritiri;
- la penetrazione di liquidi: la efficacia dei preservanti a base acquosa dipende dalla possibilità dei sali di penetrare a fondo. La rimozione di parte dell'acqua fornisce la "strada" attraverso la quale passano i preservanti e lo spazio di deposito per i sali.

Stagionatura o essiccazione?

Esistono due modi per essiccare il legno:

- la stagionatura naturale;
 - l'essiccazione artificiale.
- Perché essiccare il legno artificialmente? Qual è l'apporto in più o in meno dell'essiccazione artificiale rispetto alla stagionatura?

¹ Nell'alburno che è la parte esterna viva del tronco in cui scorrono i liquidi il contenuto di umidità può essere anche di molto superiore al 100% (a titolo di curiosità l'alburno della Balsa può avere umidità massime del 1000%). Al contrario la zona interna non più viva del tronco detta durame il contenuto di umidità può anche essere inferiore al 30%.

In primo luogo esistono delle ragioni tecniche dovute al fatto che con l'essiccazione si possono raggiungere umidità finali non raggiungibili dalla stagionatura².

Anche sul piano economico esistono delle differenze, talora più importanti delle motivazioni di ordine tecnico, che possono orientare la scelta verso l'essiccazione artificiale. Fra queste:

- la possibilità di ridurre le scorte di materiale;
- maggiore flessibilità della offerta;
- la possibilità di vendere al minuto il materiale essiccato;
- la diminuzione delle perdite di stagionatura³;
- il maggior valore del materiale essiccato artificialmente⁴;
- la possibilità di condurre la essiccazione come fonte di profitto.

A fronte di tali evidenze bisogna sottolineare che la essiccazione artificiale è in relazione diretta con fattori propri della impresa che sono essenzialmente:

- l'energia disponibile (sul piano qualitativo e quantitativo);
- i mezzi di manutenzione e gestione;
- la disponibilità di personale addetto;
- la superficie utilizzabile e la loro localizzazione.

Gli obiettivi della essiccazione

L'obiettivo della essiccazione è quello di portare il legno alla umidità di impiego 1) nel più breve tempo possibile, 2) con i minori costi energetici possibili, 3) ottenendo materiale di buona qualità. Da un punto di vista meramente economico si tratta di trovare un compromesso fra questi tre elementi con il fine di minimizzare l'incidenza del costo di essiccazione in rapporto al valore del materiale essiccato.

L'essiccazione artificiale è oggi, con l'introduzione del computer nella gestione degli impianti, una operazione fondamentalmente semplice. Tuttavia al pieno e proficuo raggiungimento del fine suddetto si può arrivare solamente avendo ben chiaro che cosa succede durante il processo all'in-

terno dell'essiccatoio, all'interno del legno e i rispettivi rapporti di causa ed effetto.

Nei processi di scambio di acqua fra legno e ambiente vi è la chiave interpretativa che permette di comprendere l'origine di molti dei fenomeni legati ai degradi qualitativi del materiale essiccato e di attuare quindi gli opportuni provvedimenti per ridurre il danno o per evitare che esso si ripeta.

Lo scopo di queste pagine è quello di rivisitare alcuni aspetti dei cosiddetti rapporti legno-acqua, in funzione di elementi qualitativi legati alla essiccazione.

L'acqua nel legno: definizioni, considerazioni teoriche e pratiche

Definizione di umidità del legno

Si definisce umidità del legno il rapporto percentuale fra il peso dell'acqua contenuta in un qualsiasi pezzo di legno ed il peso anidro di quest'ultimo⁵:

$$MC = \frac{M(H_2O)}{M_0} \times 100$$

con: $M(H_2O)$ massa dell'acqua
 M_0 massa anidra

Misurazione del contenuto di umidità

Questa definizione ci permette, con pochi mezzi, di calcolare praticamente e facilmente l'umidità media di un pezzo di legno

² Solitamente con la stagionatura naturale non si scende a contenuti umidità inferiori al 12- 14%. Queste sono umidità insufficienti per alcuni impieghi finali quali parquet.

³ La stagionatura naturale può portare a grosse perdite di valore del materiale essiccato dovute per esempio all'attacco di agenti biotici (funghi insetti) che possono verificarsi durante la giacenza del materiale sui piazzali.

⁴ Tale maggior valore è attribuibile alle garanzie di una qualità costante.

⁵ Nell'industria cartaria e in alcuni altri casi si usa talvolta riferire l'umidità al peso umido invece che al peso anidro. In questo caso, per definizione, l'umidità non può mai superare il 100%.

con il cosiddetto "metodo gravimetrico" che è per definizione il metodo esatto di misura del MC.

Quello che serve è una bilancia di precisione e una stufa in grado di mantenere la temperatura a 103 (± 2) °C. Si pesa il pezzo di legno alla umidità che si vuole conoscere (M_x), poi si mette in stufa fino a quando raggiunge lo stato anidro⁶ e si determina il MC con la formula:

$$MC = \frac{M_x - M_0}{M_0} \times 100$$

In contesti industriali il metodo gravimetrico è spesso inutilizzato, a causa dei tempi che richiedono le operazioni di determinazione dell'umidità e della presunta laboriosità del metodo.

Fortunatamente esistono altri metodi più speditivi e che non richiedono misurazioni distruttive.

Fra questi vi sono gli *igrometri elettrici* che consentono misurazioni speditive, non distruttive e sufficientemente precise nel campo di umidità fra il 6% e il 25%⁷. Gli igrometri elettrici sono costituiti da una coppia di elettrodi che vengono infissi nel legno ad una distanza di qualche centimetro l'uno dall'altro e sono collegati ad uno strumento che legge la resistenza al passaggio di corrente fra i due elettrodi offerta dal legno. Il principio di funzionamento si basa sul fatto che il legno è un cattivo conduttore e la resistività del materiale, a parità di altre condizioni (temperatura, specie legnosa...) è proporzionale (su scala logaritmica) al contenuto di acqua presente nel legno.

Gli igrometri elettrici sono correntemente usati per la lettura della umidità del legno negli essiccatoi e per il loro controllo. Fra i vantaggi che offrono tali strumenti va sicuramente citata la possibilità, tramite elettrodi isolati, di misurare i gradienti di umidità lungo lo spessore del legno e tra i principali svantaggi c'è la imprecisione di misura per umidità elevate.

Esistono inoltre sistemi elettrici basati su altri principi di funzionamento quali gli *igrometri elettrici capacitivi* a contatto che consentono misurazioni rapide e i *sistemi*

ad infrarossi a volte usati nei processi di essiccazione in linea⁸.

I "tipi" di acqua contenuta nel legno, il FSP

Esistono quattro tipi di acqua normalmente contenuti nel legno:

- acqua libera o di imbibizione: è acqua allo stato liquido che riempie i lumi cellulari e fluisce liberamente da una cellula all'altra. Essa influisce solo marginalmente sulle caratteristiche del materiale;
- acqua di legame o di saturazione: è acqua che si unisce con ponti idrogeno ai radicali ossidrilici liberi delle microfibrille di cellulosa delle pareti cellulari. Questo tipo di acqua influisce grandemente sulle caratteristiche del legno e sul suo comportamento (ritiri...);
- acqua di costituzione (chimica): sono molecole di acqua che entrano a far parte della composizione chimica delle molecole del legno (molecole idratate) e non interviene nei fenomeni di nostro interesse;
- vapore acqueo: è presente nell'aria delle cavità cellulari in equilibrio con l'acqua di saturazione e di imbibizione.

Come già accennato, nell'albero in piedi il tessuto legnoso è ricchissimo di acqua. Il cosiddetto "legno fresco", cioè il legno dell'albero appena abbattuto ha i lumi cellulari (specialmente nell'alburno) riempiti di acqua (acqua libera). Mantenendo il legno in un luogo ventilato si avrà la progressiva evaporazione dell'acqua, fino a che i lumi saranno completamente svuotati. Anche allora nel legno sarà comunque presente della

⁶ Il raggiungimento dello stato anidro si determina tramite pesate periodiche successive del pezzo di legno in stufa: quando due pesate successive danno lo stesso peso è raggiunto lo stato anidro.

⁷ Al di sopra e al di sotto di questi valori di umidità l'igrometro è estremamente impreciso e la misura mai affidabile. L'igrometro elettrico non è quindi utilizzabile nella misura dell'umidità di legno fresco.

⁸ L'essiccazione in linea è un tipo di produzione continua che si realizza tramite il passaggio del materiale da essiccare attraverso un tunnel o attraverso un numero variabile di celle di essiccazione in ognuna delle quali vi sono differenti condizioni climatiche.

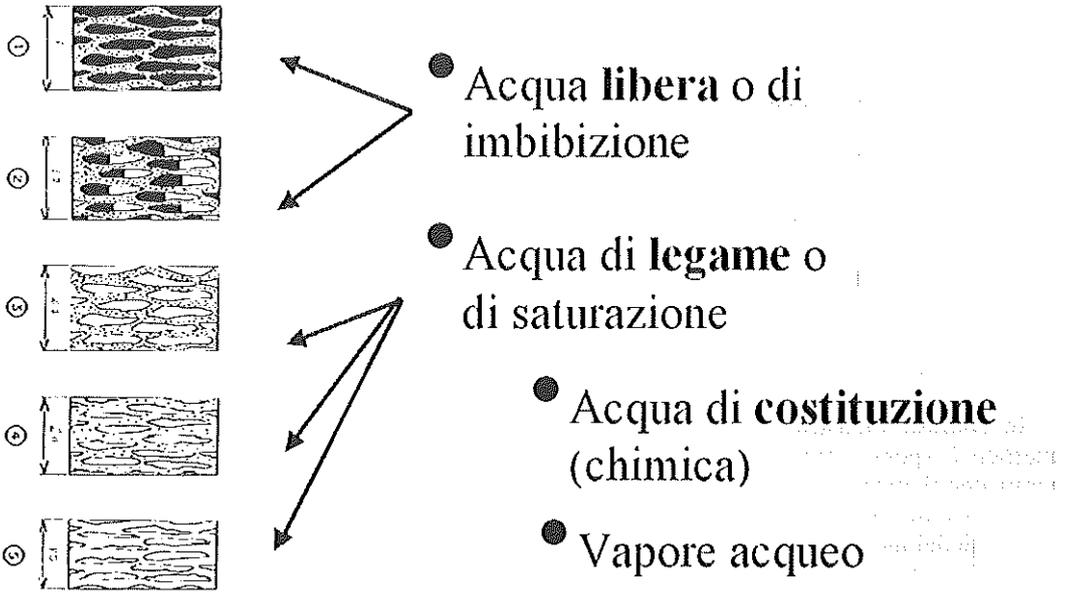
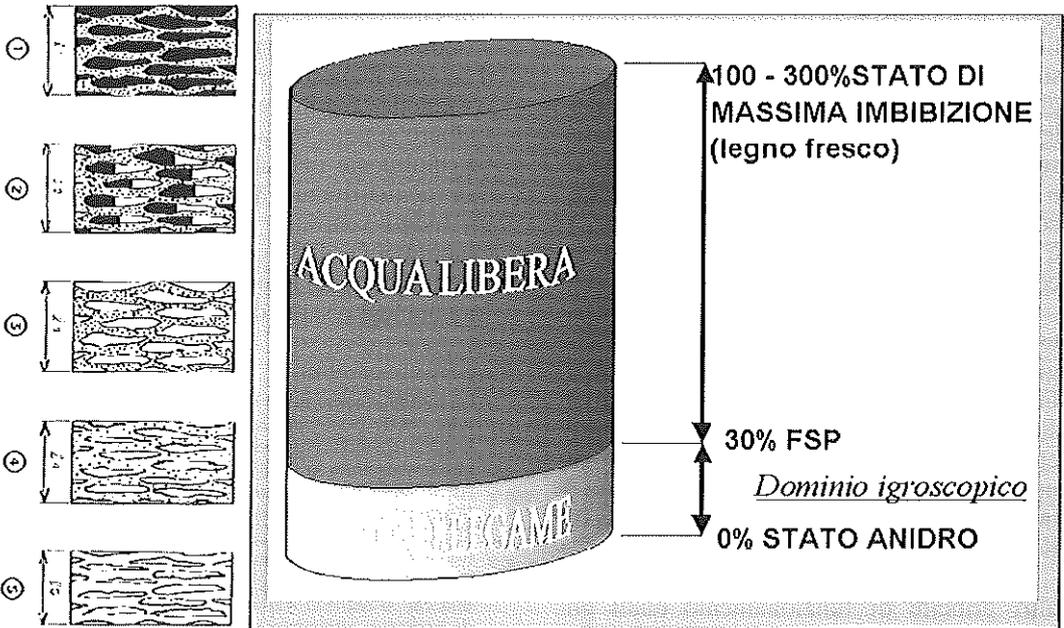


Fig. 1 - I vari tipi di acqua contenuti nel legno.



30 Fig. 2 - Acqua libera, di legame e punto di saturazione.

umidità che può essere totalmente eliminata (per raggiungere lo stato anidro) solo mettendo il legno in stufa a 100° C.

Quando tutta l'acqua libera è eliminata si raggiunge il punto di saturazione delle fibre (FSP: *Fiber Saturation Point*). Esso è definito dal valore di umidità del legno in corrispondenza del quale tutta l'acqua di imbibizione (dallo stato fresco fino al FSP) è stata eliminata, mentre tutta l'acqua di saturazione (dal FSP fino a 0%) è ancora legata alle pareti cellulari.

Il FSP è intorno a valori di umidità del 30% pur variando in funzione di alcuni fattori quali specie legnosa, temperatura ecc.

L'importanza del FSP è fondamentale nella essiccazione poiché esso segna una soglia al di sotto del quale si entra nel "dominio igroscopico" e il legno comincia a presentare sensibili variazioni delle sue proprietà fisiche-meccaniche in funzione della sua umidità mentre al di sopra, tranne il peso, non vi è nessuna relazione fra tali proprietà e umidità.

L'equilibrio igroscopico, l'umidità di impiego

Lasciando il legno a condizioni termoigrometriche costanti per un periodo sufficientemente lungo il legno tende comunque ad assorbire umidità (se il legno proviene dallo stato anidro) o a perdere umidità (se il legno proviene da uno stato igrometrico più elevato) fino a raggiungere l'equilibrio igroscopico.

Il legno è un materiale igroscopico e come tale tende a portarsi in condizioni di equilibrio con l'ambiente circostante. Si tratta di un equilibrio dinamico che si spezza e ricrea ogni qualvolta le condizioni igrometriche dell'aria subiscono delle variazioni.

Si definisce "umidità di equilibrio" (EMC: *Equilibrium moisture content*) il valore di umidità del legno che si trova in equilibrio igroscopico con l'aria circostante. L'equilibrio igroscopico è funzione principalmente della temperatura e della umidità relativa dell'aria, e varia leggermente anche in funzione della specie legno-

sa, del contenuto di estrattivi e anche a seconda se l'equilibrio sia raggiunto tramite assorbimento o desorbimento (isteresi).

Le tavole delle isoterme di sorbimento (fig. 3) sono uno strumento abbastanza preciso per conoscere l'EMC del legno in funzione della temperatura e dell'umidità relativa.

L'EMC serve a definire la "umidità di impiego" del materiale, cioè la umidità a cui è necessario portare il legno affinché sia in equilibrio con le condizioni termoigrometriche dell'ambiente ove il legno verrà impiegato. I valori di umidità di impiego vanno dal 18-20% per usi di carpenteria e imballaggi andanti fino al 4-6% per parquet e prodotti in legno che devono essere usati vicino a termosifoni.

L'umidità di impiego è chiamata nell'essiccazione "umidità finale" l'umidità cioè a cui viene portato il legno fresco.

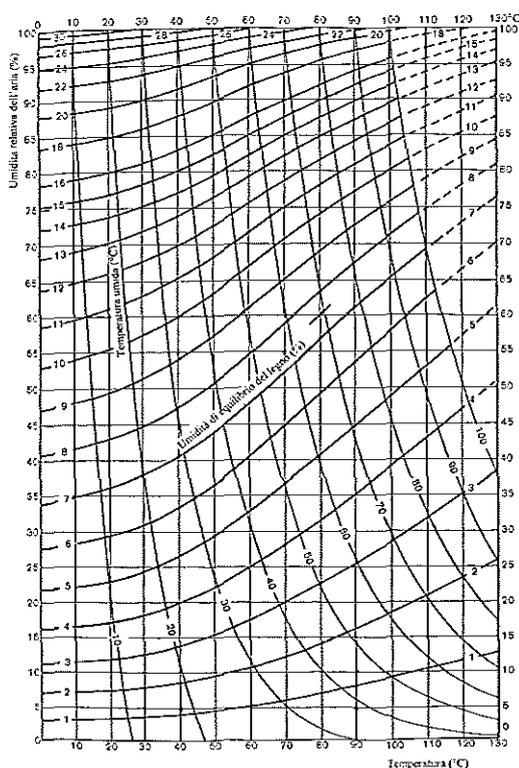


Fig. 3 - Tavola delle isoterme di "sorbimento" (fonte: Joly & More-Chevalier, 1980, modificato)

Perdita di umidità: Differenze al di sopra e al di sotto del FSP

Energia e cinetica dell'essiccazione

Affinché l'acqua sia eliminata dal legno essa deve essere prima trasformata in vapore il quale migra dal cuore verso la superficie del legno e qui è portato via. La trasformazione dell'acqua in vapore richiede una certa quantità di energia che nel caso della essiccazione per apporto termico è fornita sotto forma di calore.

Se nominiamo tale energia L_T abbiamo:

$$L_T = l_T + L_L$$

Ove: l_T = calore latente di vaporizzazione;
 L_L = energia di legame = $Q_i + Q_j$ con:
 Q_i quantità di calore necessaria per passare dall'acqua legata all'acqua libera cioè per rompere l'energia di legame dei ponti idrogeno; Q_j = quantità di calore per passare dal vapore saturo libero a vapore insaturo.

La relazione precedente serve a sottolineare il fatto che è necessario fornire più energia per eliminare l'acqua di legame che l'acqua libera.

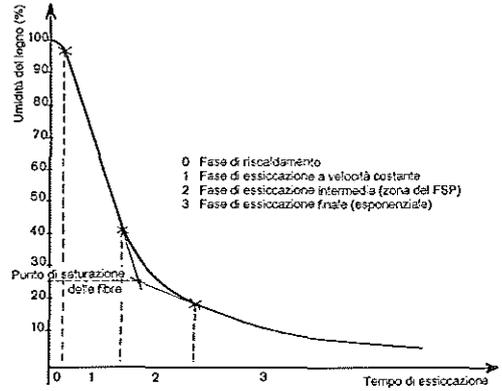


Fig. 4 - Andamento teorico di una curva di essiccazione (fonte: Joly & More-Chevalier, 1980, modificato).

L'altra faccia della medaglia di questo ultimo assioma è che, a parità di energia apportata, la velocità di essiccazione è maggiore nella fase di perdita di acqua libera che nella fase di perdita di acqua di legame. L'andamento teorico di una curva di essiccazione (fig. 4) è composta da una fase di essiccazione a velocità costante che va dallo stato fresco al FSP (prima fase), una fase intermedia intorno al punto di saturazione

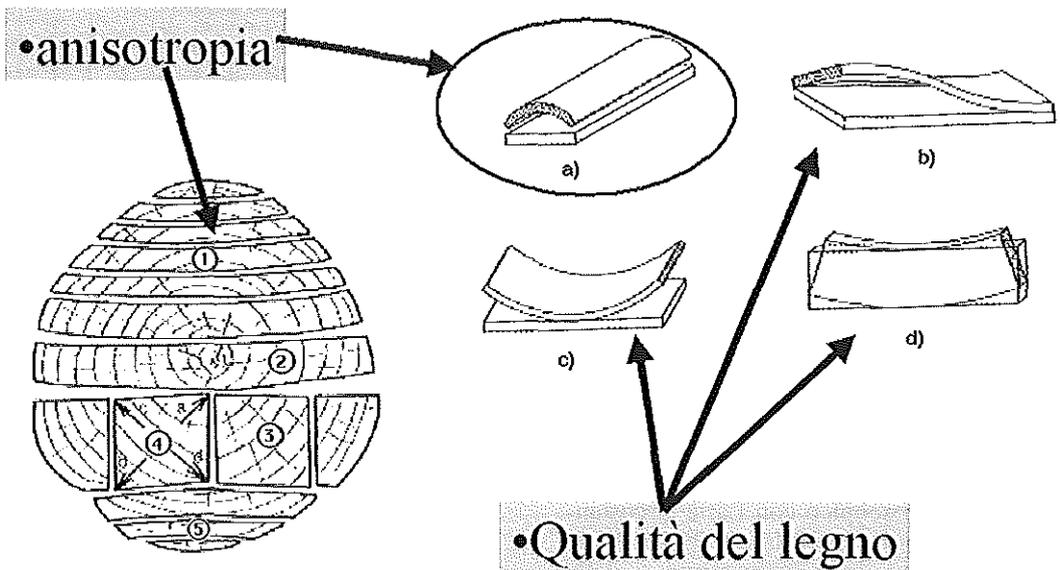


Fig. 5 - Deformazioni del legno conseguenti ai ritiri dovute alla anisotropia e alle caratteristiche del legno. a) imbarcamento; b) svergolamento; c) arcuatura; d) falcatura.

zione (seconda fase) e una fase di essiccazione nel dominio igroscopico a velocità decrescente (terza fase).

Ritiri: conseguenze inevitabili

Mentre la perdita di acqua libera non causa nessuna variazione dimensionale, alla perdita di acqua di legame sono sempre associati ritiri. A causa della natura anisotropica del legno i ritiri sono differenti nelle tre direzioni anatomiche, essendo minimi in direzione longitudinale e massimi in direzione tangenziale (intermedi fra i due in direzione radiale). La conseguenza di questa differenza di ritiri è che, inevitabilmente, un pezzo di legno che perde umidità subisce delle deformazioni. La deformazione di imbarcamento di una tavola e quella a rombo di un prisma (fig. 5) sono dovute alla anisotropia del legno. L'entità di tali deformazioni dipende dalla nervosità del legno che è una caratteristica definita dal rapporto fra i coefficienti di ritiro tangenziale e radiale e che varia a seconda della specie legnosa da 1,5 a 2,5.

Altri tipi di deformazioni inevitabili qua-

li lo svergolamento, la falcatura e l'arcatura dipendono invece da caratteristiche qualitative del legno, come per esempio dalla presenza di legno di reazione o di fibratura deviata.

Una tipologia di conseguenze inevitabili dei ritiri dovute alle caratteristiche proprie del legno sono alcuni tipi di fessurazioni che è importante saper distinguere da fessurazioni dovute a procedure di essiccazione errate che verranno illustrate più avanti.

Tra queste fessurazioni vi sono:

- le fessurazioni del midollo o fessurazioni mediane che corrono in direzione della fibratura in qualsiasi pezzo di legno contenente midollo;
- le fessurazioni dovute a fibratura intrecciata;
- le fessurazioni dovute a cipollatura che è una discontinuità degli anelli di accrescimento riscontrabile con maggior frequenza in alcune specie legnose come il castagno;
- le fessurazioni dovute a tensioni di accrescimento o a legno giovanile che si manifestano come spaccature alle testate associate spesso a forti deformazioni.

Tutti questi tipi di difetti sono in qualche

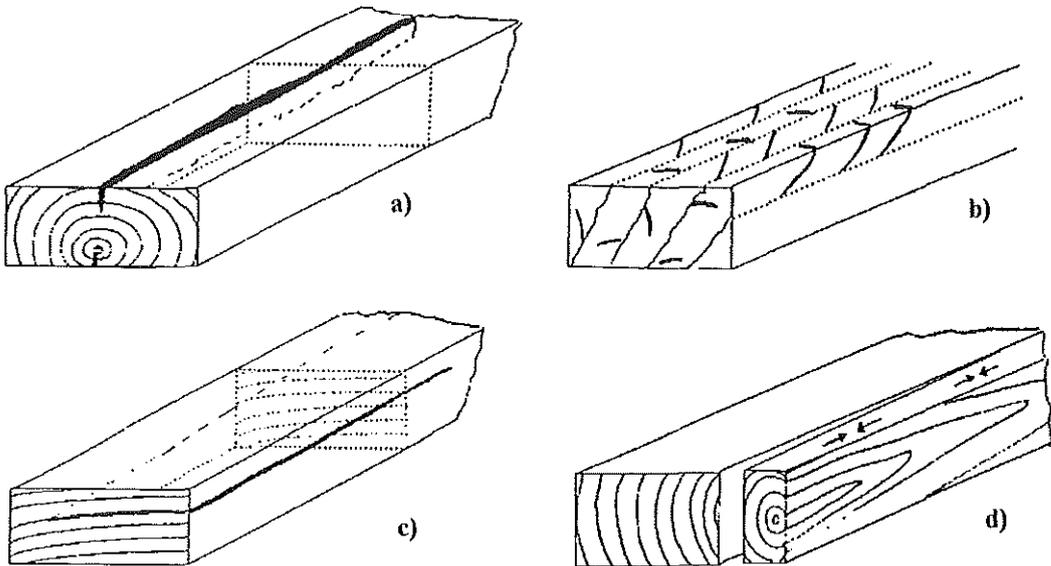


Fig. 6 – Fessurazioni dovute ai ritiri: a) fessurazioni del midollo; b) fessurazioni dovute a fibratura intrecciata; c) fessurazioni dovute a cipollatura; d) fessurazioni dovute a tensioni di accrescimento (fonte: Cont *et al.*, 1994).

modo indipendenti dalle procedure di essiccazione anche se alcuni accorgimenti come per esempio l'apposizione di pesi sulle cataste per contrastare l'imbarcamento possono contribuire alla loro riduzione.

Ad essi si contrappone un'altra tipologia di difetti che sono invece la conseguenza di procedure di essiccazione errate, che si verificano soprattutto quando, per ridurre i tempi, si "spinge" troppo l'essiccazione, si impongono cioè dei regimi con temperature o gradienti di temperatura troppo elevati e umidità troppo basse.

Questi difetti dipendono anche molto dalla specie legnosa e qualche volta essi sono tollerabili, se la loro gravità e incidenza in termini numerici (es.: quantità di tavole difettate in un lotto) risulta modesta. La valutazione della gravità viene compiuta tramite apposite norme che stabiliscono le procedure per misurare l'entità del danno e classificare di conseguenza la qualità del prodotto essiccato.

Tranne le alterazioni cromatiche (dovute a condensazioni di acqua, a temperature di essiccazione elevate, ad azzurramenti, ad impronte di listellatura...) e alcune tipologie di deformazioni (arcuatura multipla causata da listellatura errata o inadeguata),

i difetti più importanti di essiccazione (vari tipi di fessurazioni, collasso, tensioni interne, gradienti) sono quelli dovuti all'instaurarsi di un gradiente di umidità e/o a squilibri nella velocità di migrazione dell'acqua nello spessore del segato.

Trasporto di massa e gradienti di umidità

Consideriamo per semplicità una rappresentazione schematica di una sezione di un pezzo di legno (fig. 7) in cui il movimento di acqua avviene in una sola direzione (lungo l'asse delle ordinate).

In ascissa è rappresentato il contenuto di acqua (MC). Come abbiamo visto in precedenza la migrazione dell'acqua è attivata da un apporto energetico che può essere calore che arriva alla superficie (per convezione nel caso della essiccazione ad aria calda) e per conduzione si diffonde verso l'interno del legno. Per inciso, essendo il legno un buon isolante, il calore si propaga in esso con difficoltà e ciò, tanto più quanto più il suo contenuto di acqua è basso, poiché l'acqua contenuta nel legno è un mezzo di veicolazione di calore.

Nella zona centrale (Z_1) del corpo (cuore) c'è una sorta di riserva statica di acqua libera che non è direttamente influenzata dai moti delle parti sovrastanti. Nella zona

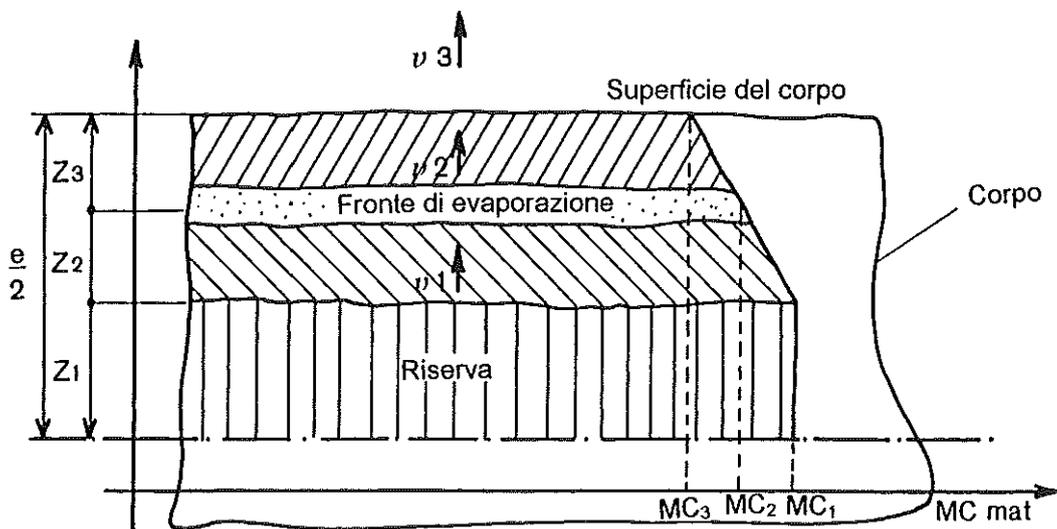


Fig. 7 - Rappresentazione schematica del flusso di acqua all'interno di un pezzo di legno (fonte: Joly & More-Chevalier, 1980, modificato).

Z_2 , vi è una zona ove l'acqua, sotto forma liquida, tende a salire in superficie dalla zona sottostante per capillarità attraverso le aperture che mettono in comunicazione i lumi cellulari. Da questa zona il contenuto di umidità decresce man mano che si va verso la superficie. Infine vi è una zona Z_3 ove si verifica un movimento di vapore legato che per diffusione, attraverso la parete cellulare migra verso la superficie ove è eliminato. Fra le zone Z_2 e Z_3 vi è una zona dai confini non ben delimitati che si sposta progressivamente verso l'interno, detta "fronte di evaporazione", ove l'acqua liquida si trasforma in vapore.

Se nominiamo v_p , v_2 e v_3 le diverse velocità di trasporto in ognuna delle tre zone, si dirà che si raggiunge l'equilibrio quando $v_1 = v_2 = v_3$. Come vedremo più avanti, questo è un concetto capitale nella pratica della essiccazione perché molti dei problemi qualitativi che si verificano sono proprio dovuti ad una disegualianza nella velocità di migrazione dell'acqua fra le tre zone.

Il contenuto di umidità è decrescente passando dal cuore verso la superficie. Si ha dunque un gradiente di umidità⁹ dovuto al fatto che l'abbassamento di umidità comincia sulla superficie e si propaga verso il

cuore. Tale gradiente è l'origine e il motore della circolazione dell'acqua dall'interno verso l'esterno e l'entità del gradiente è proporzionale alla velocità di essiccazione. In termini pratici ciò significa che l'essiccazione consiste nel produrre un gradiente e nel fare sì che tale gradiente sia il più elevato possibile (per velocizzare il processo) ma senza superare la soglia sopra la quale si produce il danno, in virtù del fatto che gradienti troppo elevati hanno conseguenza negative.

Durante l'essiccazione, nella sezione di un pezzo di legno possono essere distinte varie zone con umidità differenti, decrescenti dall'interno verso l'esterno. Questa situazione si esprime graficamente tramite le curve di ripartizione dell'umidità nello spessore (fig. 8) ove è visualizzata anche l'evoluzione dinamica dei gradienti.

In ascissa si ha lo spessore del pezzo di legno e in ordinata il contenuto di umidità. Le tre curve rappresentano la ripartizione di umidità nello spessore in tre differenti momenti: dall'inizio della essiccazione in cui l'umidità interna è elevata (la curva più alta) per poi decresce con il procedere della essiccazione (le curve successive). Si noti che le parti superficiali sono sempre intorno alla umidità di equilibrio e che di conseguenza il gradiente diminuisce con il tempo fino ad arrivare alla fine del processo, quando lungo tutto lo spessore il contenuto di umidità è in equilibrio con l'ambiente circostante (gradiente = 0). Il profilo e la forma di queste curve definiscono l'entità del gradiente che dipende dalle condizioni di essiccazione (temperatura, umidità relativa), dalle caratteristiche del materiale (legni permeabili avranno curve con cuspidi più pronunciate rispetto a legni impermeabili) e dallo spessore.

Nella realtà, la circolazione di acqua non avviene in una sola direzione come fino ad ora schematizzato. Per questo motivo i gradienti non si formano soltanto in direzione trasversale ma anche in direzione

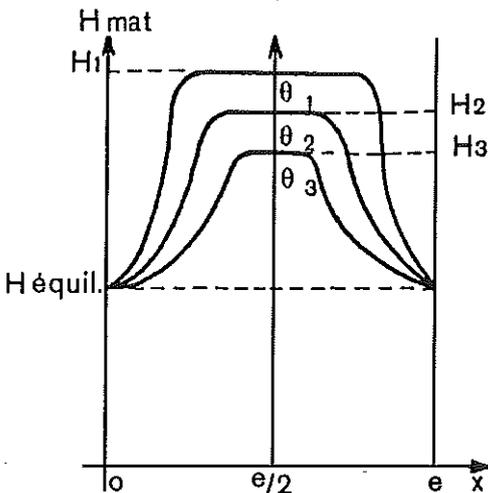


Fig. 8 - Curva di ripartizione del contenuto di umidità (H) lungo lo spessore (e) (fonte: Joly & More-Chevalier, 1980).

⁹ Il gradiente è definito come la differenza di umidità fra due punti in rapporto alla distanza che intercorre fra tali punti.

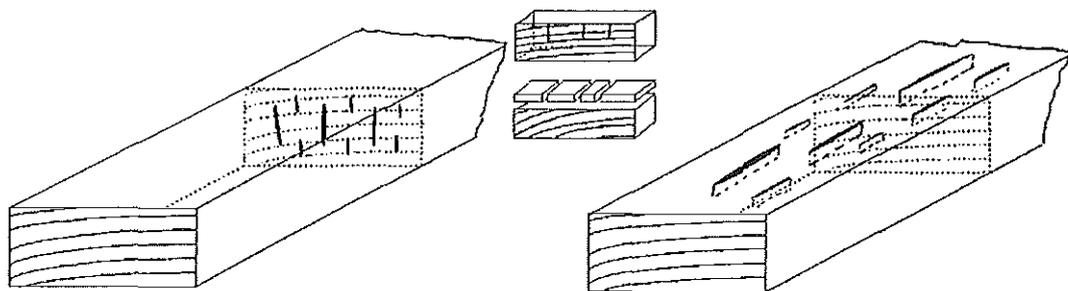


Fig. 9 - Fessurazioni alveolari e fessurazioni superficiali (fonte: Cont *et al.*, 1994).

longitudinale, in conseguenza alla perdita di umidità sulle testate delle tavole.

Conseguenze dei gradienti

Ancora una volta per semplicità schematizziamo un pezzo di legno soggetto ad essiccazione suddiviso in due parti: una parte interna ed una parte esterna ed osserviamo l'andamento dell'essiccazione in funzione del tempo.

FASE 1 - In una prima fase sia l'esterno che l'interno hanno una umidità superiore al 30%. Tale fase è in realtà solo teorica perché quasi subito la superficie raggiunge l'equilibrio con l'ambiente.

FASE 2 - La fase 1 termina comunque quando la zona esterna ha un MC < 30% mentre la zona interna ha ancora un MC > 30%. La zona esterna comincia a ritirare e come conseguenza entrerà in uno stato di tensione comprimendo la zona interna: si formano delle deformazioni plastiche di allungamento in parte irreversibili¹⁰. Se le tensioni presenti nella zona esterna superano la resistenza del materiale si formano *fessurazioni superficiali* che possono causare gravi problemi nella pratica, perché esse possono aprirsi e chiudersi in risposta alla variazione climatica (fig. 9). Tali fessurazioni tendono di solito a scomparire apparentemente (vedi oltre). La loro presenza può essere provata tagliando sottili fette da una sezione trasversale, parallelamente alla superficie: se ci sono le fessu-

razioni la fetta superficiale si rompe.

In alcune specie legnose particolarmente predisposte (Eucalipto, Pioppo, Quercia...) può inoltre verificarsi un altro tipo di difetto: il *collasso*. Una tavola collassata si riconosce da ondulazioni irregolari della superficie e da ritiri eccessivi a cui sono spesso associate delle fessurazioni alveolari. Il collasso si verifica durante la FASE 2 in conseguenza di essiccazioni troppo rapide tali da determinare una accelerazione della velocità di migrazione dell'acqua della zona esterna in rapporto alla velocità della zona interna ($v_e > v_i$). Questo fa sì che si creino delle discontinuità dei flussi di massa con accrescimento delle tensioni capillari che portano al collasso localizzato o estensivo delle cellule legnose. Se non è associato a fessurazioni alveolari il collasso non pregiudica le proprietà meccaniche del materiale ma è comunque di per sé un grave difetto in quanto comporta delle perdite di lavorazione. Esso può essere in parte ridotto impostando basse temperature e alte umidità relative nelle fasi iniziali della essiccazione. Esiste anche un trattamento di recupero del legno collassato chiamato "ricondizionamento", costituito da una fase a tempo con temperature e umidità molto elevate (100° C, 100%) alla fine del ciclo.

¹⁰ Il comportamento elastico o plastico del legno dipende in larga misura dal contenuto di umidità e dalla temperatura: elevate temperature e umidità favoriscono il comportamento plastico del legno; basse temperature e umidità favoriscono il comportamento elastico.

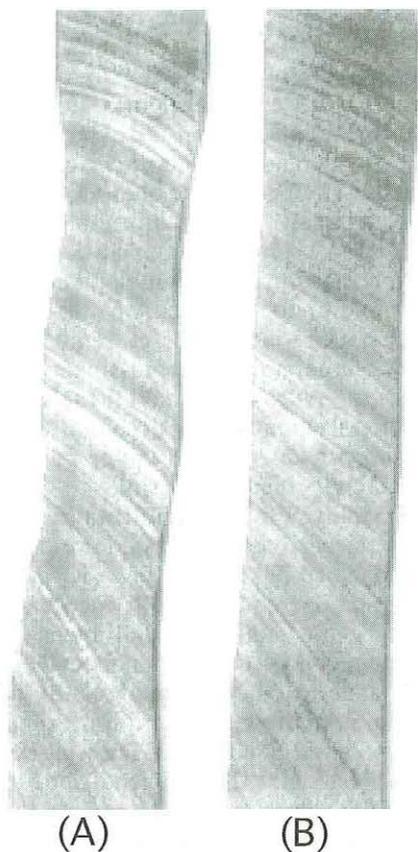


Fig. 10 - Sezione di tavola collassata, prima (A) e dopo (B) trattamento di ricondizionamento.

FASE 3 - Si ha quando anche nella zona interna il MC scende sotto il 30% e comincia quindi a ritirare. Il legno esterno è ormai essiccato e non è più plasticamente mobile cosicché si ha una "inversione delle tensioni" poiché la zona interna che si ritira entrerà in uno stato di tensione comprimendo la zona esterna. Come conseguenza nella zona esterna compressa le fessurazioni tenderanno a richiudersi apparentemente mentre nella zona interna tesa, se tali tensioni superano la resistenza del materiale, si formeranno delle *fessurazioni interne* dette anche *fessurazioni alveolari*. Esse causano una forte svalutazione del legname che in alcuni casi è di fatto inutilizzabile e

possono essere rilevate soltanto con sistemi distruttivi.

Tab. 1 - Tabella riassuntiva dell'andamento delle tensioni durante la essiccazione.

	zona esterna	zona interna
FASE 1	MC >30%	MC >30%
FASE 2	MC <30% Tensione	MC >30% Compressione
FASE 3	MC <30% Compressione	MC <30% Tensione

Anche qualora i gradienti di umidità non arrivino a causare fessurazioni, l'instaurarsi di tensioni interne permanenti è comunque fonte di dequalificazione del legname poiché esse producono consistenti deformazioni nel momento in cui il legname viene lavorato. Tali tensioni interne possono essere rilevate e misurate con vari tipi di prove (prova del pettine, prova di stratificazione).

Esse sono di frequente riconosciute sotto il nome di crosta sebbene, a nostro avviso, la crosta è più una causa che una conseguenza della formazione di tensione interne. La crosta è prodotta da condizioni troppo drastiche all'inizio della essiccazione che causano la migrazione in superficie di estrattivi che ne provocano la impermeabi-

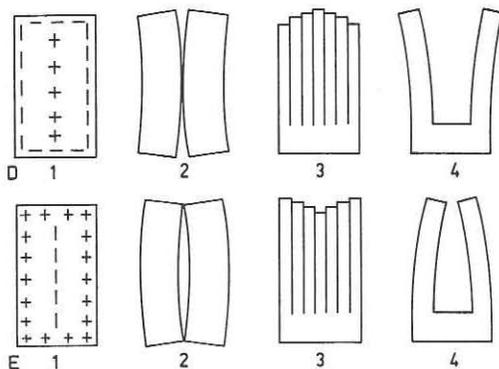


Fig. 11 - Rappresentazione delle tensioni interne in sezioni di tavole (+: compressione; -: trazione) e deformazioni conseguenti dei provini sottoposti a prove di rilievo delle tensioni interne. (fonte: Giordano, 1984).

lizzazione. Ciò determina l'instaurarsi di una zona esterna molto secca (spesso con visibili colorazioni rossastre) e di una zona interna che rimane umida anche alla fine del processo con la conseguente formazione di forti tensioni e di un perdurante gradiente di umidità.

A prescindere dalla crosta, l'esistenza di gradienti di umidità (trasversali e longitudinali) alla fine del ciclo di essiccazione è di per se un difetto così come lo sono tutte le variazioni di umidità (in una tavola, in una catasta, in un carico di essiccazione o in una partita in commercio) rispetto alla umidità finale. Anche in questo caso esistono delle norme di campionamento dei lotti per verificare tali differenze che possono essere misurate con metodi gravimetrici su sezioni di provini o, più speditamente, con igrometro elettrico dotato di elettrodi isolati.

Nella conduzione di una essiccazione vengono spesso previste delle fasi finali atte a ridurre i gradienti (trattamento di condizionamento) e le differenze di umidità fra le tavole all'interno dell'essiccatoio (trattamento di equalizzazione).

Tra le fessurazioni dovute ai gradienti esistono anche le *fessurazioni di testa* che partono dalla estremità della tavola e possono estendersi anche per lunghezze considerevoli. Esse sono dovute alla tendenza delle testate a perdere umidità con una rapidità maggiore rispetto alle altre facce delle tavole, cosa che comporta l'instaurarsi di gradienti localizzati elevati. Le fessurazioni di testa sono difficili da prevenire anche in condizioni di essiccazione blande se non sottoponendo le testate del legname di maggior valore o maggiormente predisposto a trattamenti con rivestimenti ritardanti (paraffina...) che riducano gli scambi delle testate con l'ambiente.

Conduzione della essiccazione: la ricerca dell'equilibrio

In generale il trasferimento esterno offre poca resistenza: l'essiccazione è in gran parte controllata dalla migrazione interna.

In base a ciò, si può dire che una buona conduzione della essiccazione si ha quando si riesce a ridurre la velocità di trasferimento esterna (v_3) e ad accelerare la velocità di trasferimento interno (v_2), cosa che deve essere fatta operando sui fattori che condizionano la essiccazione. Tra questi fattori, alcuni (quelli non variabili) dipendono dal legno e sono essenzialmente: la densità, la direzione anatomica di scambio, il contenuto di umidità, lo spessore. Altri dipendono dalle caratteristiche dell'aria: temperatura, velocità umidità relativa, pressione, possono essere controllati e modificati agendo sulle regolazioni dell'essiccatoio con lo scopo di condurre l'essiccazione secondo i principi e gli obiettivi descritti.

- Per ridurre il trasferimento esterno: nell'essiccazione convettiva, la velocità di essiccazione della prima fase (v. paragrafo "Energia e cinetica dell'essiccazione") è un buon indicatore dell'intensità di scambio con l'esterno e non dipende altro che dalle caratteristiche della corrente d'aria. È possibile ridurre il trasferimento esterno aumentando l'umidità relativa oppure abbassando il coefficiente di trasferimento di calore, riducendo cioè la velocità dell'aria, cosa che può però avere effetti negativi sulla omogeneità di essiccazione della catasta.

- Per accelerare il trasferimento interno: come abbiamo visto, nella tavola sottoposta ad essiccazione l'umidità migra sotto forma liquida (forze capillari) e gassosa (diffusione di vapore nelle pareti cellulari e nelle cavità cellulari). L'entità e l'efficacia di questi modi di trasferimento dipendono dalla temperatura e dal contenuto di acqua. Sul contenuto di acqua del legno non è possibile agire. Riguardo alla temperatura, di regola i trasferimenti sono facilitati quando la temperatura aumenta: diffusione di acqua legata e di vapore accelerata, viscosità dell'acqua meno elevata e possibilità di creare una sovrappressione gassosa interna (essiccazione sotto vuoto, essiccazione ad alte temperature cioè superiori ai 100° C).

Conclusioni

Quanto detto fino ad ora aveva l'obiettivo di spiegare in maniera descrittiva l'origine di alcuni fenomeni comuni di degrado associati alla conduzione della essiccazione, anche se ciò non è evidentemente sufficiente per arrivare a comprendere i dettagli tecnici del "come fare", cosa che richiederebbe ben più spazio e che non era peraltro tra gli obiettivi.

La essiccazione è stata definita come un processo il cui l'obiettivo è quello di cercare un compromesso fra qualità e rapidità.

In effetti si è visto che non vi sarebbe nessun problema pratico a ridurre i tempi: è solamente necessario apportare sufficiente energia al legno. Si tratta dunque di essiccare velocemente ma riducendo o evitando i difetti di essiccazione menzionati in precedenza, difetti in buona parte spiegabili conoscendo i processi di trasporto dell'acqua all'interno del legno, a sua volta influenzati dalle caratteristiche del trasporto esterno.

I fenomeni fisici descritti sono soprattutto validi per l'essiccazione convenzionale ad aria calda che è il sistema oggi più diffuso in Italia, probabilmente per ragioni di tradizione e per i costi relativamente bassi di impianto e gestione. Esistono anche altre metodologie di essiccazione, seppur utilizzate con minor frequenza, in cui i processi di migrazione di liquidi sono governati da principi fisici differenti. Fra queste metodologie vi è il sottovuoto che in molti casi, a parità di qualità del prodotto, permette

dei notevoli risparmi di tempi e costi. In ambedue i casi l'Italia è al vertice in Europa e nel mondo nel settore di produzione di impianti, per fatturato, esportazione e in molti casi anche per investimenti in termini di qualità e tecnologia.

Sul fronte della ricerca c'è attualmente a livello europeo un grosso impegno su molte tematiche e anche una buona rete di scambio fra i vari paesi e istituti di ricerca. In questo ambito, l'Istituto per la Tecnologia del Legno, tramite l'annesso Laboratorio di Essiccazione è oggi uno dei pochi istituti di ricerca ad occuparsi attivamente di essiccazione in Italia, operando a livello di consulenza, di ricerca in vari settori, di divulgazione e di informazione. Ciò grazie anche all'attuale notevole sforzo in termini finanziari per il rinnovo e l'implementazione delle attrezzature del laboratorio e in termini di attività svolta dal suo personale, a livello nazionale e comunitario. Parte degli sforzi operativi sono anche indirizzati a creare una rete nazionale di scambio di informazioni e di cooperazione fra le aziende operanti nel settore e la ricerca, che si auspica possa rinforzare il dialogo fra mondo dell'industria e quello della ricerca e portare alla realizzazione di progetti comuni finalizzati allo sviluppo tecnologico e scientifico nel campo della essiccazione del legno.

dott. Ottaviano Allegretti

CNR - ITL Istituto per la Tecnologia del Legno,
S.Michele a/A, Trento
e-mail: ottaviano.allegretti@ITL.TN.CNR.IT

BIBLIOGRAFIA ESSENZIALE

BIRD R. B., STEWART E., LIGHTFOOT N., 1960 - *Transport phenomena*. John Wiley & Sons, USA, 780 pp..

GIORDANO G., 1984 - *Tecnologia del legno*. UTET, Torino, I Vol., 708 - 837.

GIORDANO G., 1984 - *Tecnologia del legno*. UTET, Torino, II Vol. 334 - 588.

ISO 3130, 1975 - *Determination of moisture content for physical and mechanical tests*.

JOLY P., MORE-CHEVALIER F., 1980 - *Théorie, pratique & économie du séchage des bois*. Edition H. Vial, Douran, 203 pp.

CONT S., DEL SENNO M., RACHELLO E., (a cura di), 1994 - *Valutazione della qualità di essiccazione del legname*. NARDI - ITL, 36 pp.

PERRE P., 1993 - *Le séchage du bois*. ENGREF. Nancy, 96 pp.

SIAU J. F., 1971 - *Flow in wood*. Syracuse University Press, 131 pp.

SIAU J. F., 1984 - *Transport processes in wood*. Springer Series in Wood Science, Springer Verlag Berlin, 224 pp.

WHITAKER S., 1980 - *Heat and mass transfer in granular porous media*. Hemisphere P. C., 23-61.

UNI 4469, 1985 - *Determinazione del ritiro radiale e tangenziale*.

UNI 8662, 1986 - *Termini relativi alla essiccazione*.

UNI 8828, 1986 - *Determinazione delle tensioni interne*.

UNI 8829, 1986 - *Determinazione del gradiente di umidità*.

VILLIERE A., 1966 - *Séchage des bois*. Dunod Editeur, Paris, 409 pp.

Riassunto

La ottimizzazione del processo di essiccazione artificiale si ottiene quando si raggiunge un buon compromesso fra rapidità di essiccazione e qualità del prodotto essiccato.

Alla base del processo vi è la migrazione di acqua (allo stato liquido e di vapore) dall'interno del legno all'ambiente circostante che è attivata e regolata dalle caratteristiche dell'aria impostate nell'essiccatoio e che risponde a determinate leggi fisiche.

In generale la velocità di migrazione dell'acqua determina la velocità di essiccazione, ma anche sopra certe soglie, la comparsa di un degrado qualitativo del materiale.

La conoscenza dei meccanismi che regolano il trasporto di acqua all'interno del legno è quindi un elemento importante per interpretare correttamente alcuni fenomeni di degrado del materiale e per conseguire l'obiettivo dell'equilibrio fra rapidità e qualità.

Summary

The achievement of a compromise between drying speed and product quality is one of the objective of the drying process.

The water transport (in the liquid and vapour phase) from the wood core to the surrounding environment is the basis of the drying process and it is driven by the set out air characteristics in the kiln in accord with several physical laws.

In general, the water transport speed is related to the drying speed, but, in some cases, also to the coming out of quality degradation of the material.

The knowledge of the laws ruling the mass transport inside the wood is therefore an important element because it allows to properly explain some degradation phenomena of the dried wood and to achieve the goal of equilibrium between speed and quality.