

RELAZIONI LEGNO-ACQUA

Grandi settori:

- **Umidità dell'aria**
- **Presenza di acqua nel legno**
- **Umidità del legno**
- **Igroscopicità del legno**
- **Ritiro e rigonfiamento del legno**

UMIDITA' DELL'ARIA

Vapore (acqueo):

- comportamento analogo ai gas ideali
- non esiste in natura aria assolutamente ànida (secca)
- quantità di vapore che può essere contenuta in una dato volume d'aria:

?? umidità assoluta ? (psi)

?? umidità relativa **f** (phi)

Umidità assoluta ? :

- rapporto fra massa di vapore contenuta nell'aria, e volume di tale aria (grammi/m³)
- quantità massima di vapore contenibile (per data temperatura e pressione): umidità di saturazione dell'aria

Temperatura (°C)	Umidità di saturazione dell'aria (g/m ³)
0	4,85
20	17,3
100	598

- l'acqua eventualmente in eccesso (aumenta la pressione, abbassa la temperatura) condensa, e viceversa evapora
- punto di rugiada: temperatura che provoca un inizio di condensazione (dipende dall'umidità dell'aria)
- pressione parziale del vapore
- pressione parziale del vapore in un volume di aria satura: pressione di vapore saturo (cresce con la temperatura)
- punto di ebollizione: press. di vapore saturo = press. atmosferica

Umidità Relativa f (od anche UR):

- più importante per i fenomeni biologici, e per il legno (igroscopico)
- rapporto (%) fra f attuale e f saturazione
- indica quanto l'aria è vicina al punto di saturazione
- a parità di f (p.es. in un recipiente sigillato), f dipende dalla temperatura
- alla stessa temperatura, f aumenta con f

$f = 0\%$ aria ànida (assolutamente secca)

$f = 100\%$ aria satura di vapore

$f = 55-65\%$ condizioni di benessere

Strumenti per misurare f

- che devono essere tarati:
 - ?? igrometro “a capello” (crine di cavallo, fibra sintetica igroscopica: variano lunghezza con f):
 - ?? termoigrografo (registratore: giornaliero, settimanale....)
 - ?? strumenti e data-logger elettronici
- “assoluto” (che non necessita di taratura):
 - ?? psicrometro (a fionda, di Assmann, ...):
 - due termometri di precisione (bulbo secco T, bulbo umido Tw)
 - corrente d'aria da misurare
 - differenza psicrometrica T-Tw (bulbo umido più freddo, per calore di evaporazione, quanto più secca è l'aria)
 - leggo f su apposita tabella, diagramma, software, entrando con T e T-Tw

PRESENZA DI ACQUA NEL LEGNO

Normalmente il legno contiene acqua in 4 modalità:

- **a. di imbibizione (= libera)**
- **a. di saturazione delle pareti cellulari (= legata)**
- **a. di costituzione (chimica)**
- **vapore acqueo**

Acqua di imbibizione:

- **liquida**
- **contenuta nei lumi cellulari**
- **può fluire liberamente da una cellula all'altra (nel legno fresco)**
- **influenza poco le caratteristiche tecnologiche del legno, salvo la densità (si comporta come una zavorra distribuita)**
- **può essere perduta abbastanza facilmente e rapidamente**
- **può essere recuperata soltanto mediante contatto con acqua liquida**

Acqua di saturazione:

- **(saturazione delle pareti cellulari, non dell'aria)**
- **si unisce con legami di idrogeno ...**
- **... ai radicali ossidrilici liberi disponibili sulle (nelle) pareti cellulari**
- **... prevalentemente alle microfibrille di cellulosa**
- **influenza grandemente proprietà e comportamenti del legno**
- **può essere perduta e recuperata tramite l'aria (comportamento igroscopico)**
- **via via che diminuisce, l'asportazione richiede maggiore energia**

Acqua di costituzione:

- **facente parte delle molecole (idratate) costituenti il legno**
- **se viene a mancare (p.es. carbonizzazione), non abbiamo più legno**
- **non interviene nei fenomeni che trattiamo in questo corso**

Vapore acqueo:

- **presente nell'aria che riempie (parzialmente) le cavità cellulari**
- **è in equilibrio (igroscopico) con:**

?? l'acqua di saturazione delle pareti cellulari ($0 < f < 100\%$)

?? l'acqua di imbibizione eventualmente presente ($f = 100\%$)

UMIDITA' DEL LEGNO

Definizione (internazionalmente accettata e normata in Tecnologia del Legno):

- **umidità del legno (o “contenuto di umidità”; non “umidità relativa”) ...**
- **... è la quantità di acqua contenuta in un pezzo di legno ...**
- **... espressa come % della massa ànida dello stesso pezzo**

$$u = \frac{(m - m_0)}{m_0} \times 100$$

- con: **m** massa umida (non necessariamente “fresca”)
m₀ massa ànida (= assolutamente secca”)
 (può ottenersi mediante essiccazione in stufa ventilata)

Commenti:

- **questa definizione assume che (m - m₀) sia la massa dell’acqua contenuta nel legno (saturazione + imbibizione + vapore)**
- **U può superare il 100%**
- **non confondere U con f (sono collegate, ma non la stessa cosa)**
- **spesso per abitudine si usa p (peso) anziché m (massa):**
 ?? in pratica è la stessa cosa (la massa si determina con la bilancia, che in realtà misura un peso)
 ?? concettualmente è diverso (il Sistema Internazionale usa la massa come grandezza fondamentale)
- **nel legno fresco capita spesso U = 150-200%**
- **il legno di Balsa (leggerissimo, molte cavità cellulari, poca parete cellulare) può raggiungere U = 1000%**

ESERCIZI – ESERCIZI – ESERCIZI (NUMERICI...)

Umidità del legno riferita alla massa umida

- nell'industria cartaria, si usa talora riferire l'umidità alla massa umida (al "tal quale"):

$$u^* = \frac{(m-m_0)}{m} \times 100$$

- il valore numerico è diverso: $u = \frac{100 \cdot u^*}{100 - u^*}$ $u^* = \frac{100 \cdot u}{100 + u}$
- in base a questa definizione, u^* non può essere $> 100\%$

Punto di saturazione (delle pareti cellulari)

- valore di umidità del legno, in corrispondenza del quale:
 - ?? tutta l'acqua di imbibizione è stata eliminata
 - ?? tutta l'acqua di saturazione è ancora presente
- dipende da molti fattori:
 - ?? specie legnosa, presenza di estrattivi
 - ?? massa volumica
 - ?? % di legno primaticcio e tardivo
 - ?? presenza di legno di reazione
 - ~~4~~ temperatura [per uno stesso pezzo di legno]
- è in genere compreso fra 28% e 40%
- viene convenzionalmente fissato ad $u = 30\%$
- costituisce il limite superiore del campo igroscopico (0-30%)
- segna una soglia: al di sotto, le proprietà fisico-meccaniche del legno variano sensibilmente con l'umidità.

Gradienti di umidità

L'acqua si muove nel legno con velocità finita

Nell'ambito di uno stesso pezzo di legno possono coesistere zone con umidità diversa (per tempi anche lunghi: ore-giorni-mesi)

Superfici esterne perdono/acquisiscono umidità, scambiandola con l'aria circostante (avviene rapidamente); dalle parti interne l'acqua deve migrare verso quelle esterne (o viceversa, in caso di adsorbimento) ↗ tempi +/- lunghi (anatomia e permeabilità del legno, direzione anatomica, temperatura ...)

Gradiente di U (più o meno “ripido”): $\Delta u / \text{dist}$

Gradienti:

- longitudinali
- trasversali

(alcune) conseguenze dei gradienti di umidità:

↗ **Gradienti di ritiro (tensioni interne, fessurazioni, deformazioni, rotture)**

↗ **Cautele nel determinare il valore di U (in quale zona del pezzo?)**

IGROSCOPICITA' DEL LEGNO

Spiccata affinità con l'acqua allo stato di vapore

Campo (intervallo) igroscopico:

- intervallo dei possibili valori di umidità cui un pezzo di legno mantenuto in aria libera può equilibrarsi
- da stato anidro a punto di saturazione (assunto = 30%)
- cattura/cede molecole acqua legandole alle pareti (adsorbimento/desorbimento)
- fuori dal campo igroscopico solo imbibizione (acqua libera)

Equilibrio igroscopico:

- di tipo dinamico
- convergenza delle velocità di evaporazione e di condensazione
- in pratica: peso costante (se T e $UR = \text{cost.}$)
- se T e UR variano \neq tende a raggiungere l'equilibrio
- non cessa mai, finché è legno
- **NON**: stagionatura lunga \neq legno sempre più secco

Umidità di equilibrio (EMC = Equilibrium Moisture Content):

- U del legno in equilibrio con aria circostante (T e $UR = \text{cost.}$)
- valori tipici validi (\pm) per tutte le specie (tabelle, grafici \neq "isoterme di equilibrio")
- (U "normale")
- in realtà, ciascun provino tende a valori leggermente diversi (specie, estrattivi, storia, isteresi ...)

Adsorbimento/Desorbimento:

- attrazione molecole vapore da parte di gruppi $-OH$ presenti nelle pareti cellulari (catene cellulosa ed emicellulose + altre sostanze)
- legame (chimico) a ponte di idrogeno
- inizialmente strato monomolecolare
- allontanamento cristalliti (\neq rigonfiamento)
- ulteriori strati molecolari, fino alla totale saturazione (**NON** imbibizione)
- meccanismi facilmente reversibili, in funzione di UR

Isteresi igroscopica:

- U di equilibrio dipende dalla storia (U “in salita” o “in discesa”)
- grafico UR – U, isoterme
- spiegazione (nel desorbimento una parte degli –OH si satura reciprocamente)
- massima isteresi per il primo desorbimento
- cicli (e valori) dell’isteresi si riducono, se variano fra estremi di UR più vicini
- isteresi non si annulla mai

Valori “notevoli” dell’umidità del legno:

- condizioni “normali” (per convenzione) $T=20^{\circ}\text{C}$ UR=65%
 - ✍ U “normale” del legno 12% (valore di riferimento)
- stato di massima imbibizione
- stato “fresco” ($U > U_{\text{sat}}$) (commercialmente $U > 20-22\%$)
- punto di saturazione ($U \sim 30\%$)
- “stagionato all’aria” ($U > 20\% =$
- “shipping-dry” [letteralmente: (abbastanza) “asciutto per il trasporto” (senza attacchi di funghi xilofagi)]:
 - ?? in realtà dipende da vari fattori (specie, temperatura, ...)
 - ?? fonte di contestazioni, meglio specificare valori e scostamenti
- “umidità commerciale” ($U \sim 15\%$)
- umidità di impiego (= U tecniche):
 - ?? lavorare ~ alla stessa U che avrà in opera (deformazioni, ritiri, rigonfiamenti)
 - ?? climi esterni/interni
 - ?? stagionatura naturale non basta
 - ?? segati per edilizia 12-18%
 - ?? mobili e parquet per locali riscaldati 7-10%
- stato anidro (solo in laboratorio)

Tempi di ambientamento (ore – settimane – mesi ...):

- specie (\pm permeabile)
- dimensioni, direzioni anatomiche
- assortimento (tondo, segati refilati o no....)
- corteccia o trattamenti superficiali
- temperatura, velocità aria
- alburno/durame

RITIRO E RIGONFIAMENTO

Adsorbimento \rightarrow incuneamento molecole H_2O :

- \rightarrow rigonfiamento parete cellulare
- \rightarrow rigonfiamento legno

Desorbimento \rightarrow perdita molecole H_2O :

- \rightarrow ritiro parete cellulare
- \rightarrow ritiro legno

Esperimento (ideale):

- cubo con spigoli orientati nelle tre direzioni principali (L, R, T)
- portato a equilibrarsi in atmosfere con UR via via più bassa
- registrate periodicamente variazioni (dimensionali e) di volume:

?? stato fresco (fino a U_{sat})	V_f	
?? da U_{sat} in poi	V_u	$V_o < V_u < V_f$
?? allo stato anidro	V_o	
- andamento approssimativamente lineare (V in funzione di U_{eq})

Ritiro volumetrico totale (β_v):

- diminuzione di volume (% del volume fresco V_f)
- totale: nel passaggio da $U_f (=U_{sat})$ a $U_o=0$ (stato anidro)

Anisotropia del ritiro:

- i ritiri dimensionali (spigoli del cubo) non sono uguali nelle tre direzioni (cubo \rightarrow parallelepipedo):

?? $\beta_{assiale}$:	molto piccolo	(tipicamente 0,2 - 0,5 %)
?? $\beta_{tangenziale}$:	massimo	(tipicamente 6 - 12 %)
?? $\beta_{radiale}$:	circa metà del tangenziale	

Spiegazione dell'anisotropia dei ritiri:

- differenza longitudinale-trasversali:
 - ?? orientamento microfibrille strato S2 parete secondaria
- differenza radiale-tangenziale:
 - ?? fattori ultrastrutturali (? angoli microfibrille, lignificazione maggiore nelle pareti radiali)
 - ?? fattori microstrutturali (meno o per niente influenti) (coazione da parte dei raggi, interazione fra legno primaticcio e tardivo)

Ritiri dimensionali totali (β_L , β_R , β_T):

- **diminuz. delle dimensioni** (% della dimensione fresca $L_f - R_f - T_f$)
- **totali**: nel passaggio $U_f (=U_{sat}) \approx U_o (=0)$
- **definizioni con formule analoghe al β_v**

Relazioni fra β dimensionali e β volumetrico:

- **ricavabili mediante calcolo banale (ma lungo e noioso), con buona approssimazione valgono:**

$$?? \beta_v \sim \beta_T + \beta_R + \beta_L$$

$$?? \beta_v \sim \beta_T + \beta_R \quad (\beta_L \text{ è molto piccolo})$$

- **altre relazioni, approssimate ma utili:**

$$?? \beta_T \sim 2 \beta_R \quad (\text{risultato sperimentale tipico})$$

$$?? \beta_v \sim 3 \beta_R \quad (\text{combinando le due formule sopra})$$

$$?? \beta_T \sim 2/3 \beta_v \quad (\text{ulteriore combinazione di formule})$$

$$?? \dots\dots\dots \quad (\text{a volontà})$$

Fattori che influenzano il ritiro:

- **specie*** (ultrastruttura e composizione chimica delle pareti)
- **massa volumica (=densità) del legno** $\approx (\beta_v \sim ?b \cdot U_{sat})$
- **estrattivi* duramificanti insolubili in acqua:**
 - ?? **si incuneano** \approx pareti mantenute in parziale rigonfiamento
 - ?? **incrostano pareti cellulari** \approx occupano parte dei siti -OH
-

* alcune specie sono particolarmente “stabili”, e spesso anche “durabili” (v. oltre), p.es.:

?? **Teck (*Tectona grandis*):** mobili, coperte di yacht

?? **Iroko (*Chlorophora excelsa*):** sostituto del Teck

?? **Doussié (*Azelia* sp.p.):** infissi esterni, stadi, palestre, velodromi,

Se ai ritiri/rigonfiamenti si sovrappongono sollecitazioni meccaniche \approx comportamento reologico, mecano-sorbitivo (deformazioni permanenti si sommano ai ritiri/rigonfiamenti; effetti esaltati, non semplice sovrapposizione lineare)

Quanto sopra vale (all'inverso) anche per il rigonfiamento (a), salvo:

- influenza dell'isteresi
- influenza del primo ciclo di desorbimento
- si calcola con riferimento (dimensioni e volume) allo stato anidro
 \Rightarrow (numericamente) $a > \beta$

Andamento del ritiro con l'umidità:

- ritiri totali considerano solo stati estremi (fresco \Rightarrow anidro), quindi esprimono un andamento medio
- in realtà l'andamento è curvilineo (~ sigmoide) \Rightarrow la variazione dimensionale ΔV non è costante per ogni ΔU
- istéresi igroscopica \Rightarrow istéresi dei ritiri/rigonfiamenti (+ qualche complessità aggiuntiva)
- per stime pratiche approssimate delle variazioni dimensionali/volumetriche, si ricorre alla:

approssimazione lineare

- si ammette un andamento lineare (pendenza costante) anziché curvilineo
- per qualsiasi ΔU la variazione dimensionale ΔV è costante purché:
 ΔV sempre riferita alla stessa dimensione (fresca)
 ΔV nel campo igroscopico!
- analogamente a $\beta_v = \Delta V_{tot} / \Delta V_f$
- si può definire un coefficiente unitario (costante) di ritiro (=ritiro specifico):

$$\beta_{v,spec} = \Delta V_{tot} / (\Delta V_f \Delta U_{max}) = \beta_v / U_{sat}$$

- che esprime quanto varia il volume del provino per ogni 1% di umidità perduta (o acquisita)

Analogamente si può fare per i ritiri dimensionali

ESERCIZI – ESERCIZI – ESERCIZI (NUMERICI.....)

RITIRO ANGOLARE

- rotella con taglio radiale si apre a V
- conseguenza dell'anisotropia dei ritiri trasversali ($\beta_T \sim 2 \beta_R$)
- numericamente: $\beta = (\alpha/360^\circ) \cdot 100$
- (ampiezza della V espressa come % dell'angolo giro)
- con calcoli noiosi di può dimostrare $\beta_T \sim \beta_R + \beta$
- applicazione pratica:
 - ?? per determinare β_T (medio) su rotelle prelevate in bosco
 - ?? non occorre misurare con precisione allo stato fresco (vale 360° !)
 - ?? basta un taglio radiale oppure 4 spicchi
 - ?? (se non si aiuta a “concentrare” il V, fessure radiali e tensioni interne falsano i risultati)

NERVOSITÀ DEL LEGNO

(nelle dispense manca il §)

- $\beta_T / \beta_R \sim 2$ è solo un valore medio approssimato
- β_T / β_R è compreso fra 1,6 e 2,4 circa
- valori più bassi \Rightarrow legno più stabile \Rightarrow meno anisotropo \Rightarrow meno nervoso
- valori più alti \Rightarrow legno più nervoso

Termine “nervoso”:

- spesso usato genericamente per “legno che tende a muoversi e/o deformarsi rapidamente e/o molto al variare dell'UR
- il comportamento “nervoso” può avere diverse cause tecniche, p.es.:
 - ?? molto anisotropo (=tende ad imbarcarsi)
 - ?? l. di reazione (=tende a deformarsi, in vari modi)
 - ?? elevati valori di ritiro/rigonfiamento (=muove molto)
 - ?? permeabile (=reagisce rapidamente, smorza poco)
 - ??

DEFORMAZIONI TIPICHE DEI SEGATI

Quattro geometrie tipiche:

- **imbarcamento** (a tegola)
- **arcuatura** (appoggiato di piatto alza le testate)
- **falcatura** (si incurva restando nel proprio piano)
- **svergolamento** (si torce a elica)

Principali (varie) cause possibili:

- **imbarcamento:**
 - ?? anisotropia dei ritiri (trasversali)
 - ?? una faccia più asciutta dell'altra (transitorio)
- **arcuatura (a doga di botte):**
 - ?? legno di reazione su una faccia (βL anomalo, arc. varia con l'U)
 - ?? una faccia più asciutta dell'altra (transitorio)
 - ?? stagionato in catasta mal fatta = listelli non allineati (permanente)
 - ?? tensioni interne di accrescimento
 - ?? ...
- **falcatura (=a lama di falce):**
 - ?? segato da un tronco curvo...
 - ?? legno di reazione su un bordo (βL anomalo, falc. varia con l'U)
 - ?? tensioni interne di accrescimento
 - ??
- **svergolamento:**
 - ?? legno anomalo presso il midollo del tronco (l. di reazione, l. giovanile, per ambedue βL è anomalo) (sverg. varia con l'U)
 - ?? fibratura elicoidale
 - ??

CONSEGUENZE DEI RITIRI

Ritiro/rigonfiamento: di per sé inevitabile

Conseguenze principali (tronchi, segati, manufatti):

- **variazioni dimensionali**
- **deformazioni**
- **tensioni interne:**
 - ?? **prodotte da deformazioni impedito (continuità del materiale, vincoli esterni...)**
 - ?? **causano fessurazioni, rotture, deformazioni permanenti, deformazioni elastiche che si liberano alla lavorazione,...**

Forze che accompagnano le variazioni dimensionali impedito:

- **comportamenti complessi (reologico, mecano-sorbitivo)**
- **aspetti pratici ben noti:**
 - ?? **tenuta all'acqua di botti, fasciame di imbarcazioni**
 - ?? **tenuta incastri, manici di utensili (ascia...)**
 - ?? **pressioni di rigonfiamento per esercitare grandi forze (cave di pietra, salita blocchi Piramidi egiziane, rimessa in forza volte...)**
 - ?? **rigonfiamento dei parquet “troppo secchi” messi in opera in ambiente o su massetto “troppo umido”**

Conseguenze (schematizzando per comodità di esposizione):

- **inevitabili**
- **evitabili (almeno teoricamente, essiccando razionalmente)**

Inevitabili:

- **dovute all'anisotropia dei ritiri:**
 - ?? **distorsione dei solidi**
 - ?? **distorsione delle sezioni (di listelli e segati)**
 - ?? **ovalizzazione di fori**
 - ?? **fessure a V negli assortimenti “con midollo incluso” (☞ travi!)**
 - ?? **imbarcamento (tavole tangenziali!)**
- **dovute alla presenza di anomalie del legno:**
 - ?? **l. di reazione (arcuatura, falcatura, svergolamento, rotture....)**
 - ?? **fibratura elicoidale (svergolamento...)**
- **dovute alla inomogeneità del legno:**
 - ?? **primaticcio/tardivo (sollevamento di “punte” della fiammatura, in sez. tang.)**

Evitabili (dovute a essiccazione mal condotta ☞ presenza di gradienti elevati/eccessivi):

- **tensioni interne (specialmente trasversali)**
- **“crosta”**
- **fessurazioni**
- **cretti (sulle testate: da gradiente long. , da tensioni di accrescim.)**
- **collasso, fessurazioni a “nido d'ape”**

COLLASSO

- **(NON è ritiro): “implosione” di cellule causato da uscita acqua capillare senza ingresso di aria (specialm. in Eucalipti):**
 - ?? **deformativo**
 - ?? **fessurativo**
- **prevenzione: pre-stagionatura, impregnazione, essiccazione a bassa temperatura...**
- **“cura”: essiccazione con cicli adeguati, ricondizionamento con vapore...**

ACCORGIMENTI, TECNICHE, TRATTAMENTI per ridurre l'entità dei ritiri e/o le loro conseguenze

Studiati specificamente per:

- ridurre l'entità dei ritiri in opera:
- ridurre gli effetti negativi

Ridurre l'entità dei ritiri in opera:

- riduzione escursioni umidità del legno
 - ?? stagionatura adeguata prima della lavorazione /messa in opera
 - ?? controllo delle condizioni termoigrometriche dell'ambiente

- riduzione igroscopicità del legno
 - ?? impregnazione con rigonfianti o stabilizzanti (saturazione degli -OH con sostanze introdotte):
 - ☞ ~~☞~~ "acetilazione"
 - ☞ ~~☞~~ monomeri ☞ polimerizzazione
 - ☞ ~~☞~~ PEG
 - ☞ ~~☞~~ cere, resine
 - ?? autosaturazione degli -OH:
 - ☞ ~~☞~~ trattamenti termici
 - ☞ ~~☞~~ trattamenti chimici
 - ?? attacchi di funghi (stadio iniziale!) (legno "rosato per interni di pannelli listellari)
 - ?? riduzione della velocità di scambio dell'umidità
 - ?? film vernicianti, idrorepellenti, ... (impermeabilizzazione mai completa!)

- compensazione/bloccaggio dei ritiri
 - ?? pannelli di vario tipo
 - ☞ ~~☞~~ artigianali ("dorso a dorso", ...)
 - ☞ ~~☞~~ industriali (compensati, particelle, ecc.)
 - ?? accorgimenti costruttivi
 - ☞ ~~☞~~ incastri
 - ☞ ~~☞~~ listelli trasversali
 - ☞ ~~☞~~ ...

Ridurre gli effetti negativi del ritiro:

- **incastrati (metodo più consono alle caratteristiche del legno)**
 - ?? **avere chiaro**
 - ↗ **reversibilità dei movimenti (può rigonfiare...)**
 - ↗ **anisotropia del legno (collegamenti con fibratura perpendicolare)**

- **collegamenti**
 - ?? **lasciare libertà di movimento:**
 - ↗ **pannelli mobili nei telai degli infissi**
 - ↗ **perlinature (specialm. esterne)**
 - ↗ **nel consolidamento con materiali estranei (ferri, piastre, tiranti, incollaggio lamine, betoncini, barre...)**
 - ?? **ma non troppa:**
 - ↗ **perdita di funzionalità**
 - ↗ **facilita deformazioni permanenti**

Esempi anche nella conservazione dei Beni Culturali:

- **sculture lignee**
 - ?? **Cavaliere di San Cassiano (Jacopo della Quercia)**
 - ?? **Crocifisso chiesa San Carlo (Andrea Orcagna)**
- **dipinti su tavola (problema delle traversature)**
- **strutture portanti lignee**
 - ?? **bloccaggio movimenti originariamente consentiti (p.es. nodi capriate)**
 - ?? **durabilità nel tempo di incollaggi strutturali (betoncini di resina, barre o lamine incollate ...)**

ATTENZIONE!

Ai fini della conservazione dei manufatti lignei, il ritiro/rigonfiamento (aspetti meccanici) non è l'unico problema:

- **accumulo umidità ↗ condizioni favorevoli ai funghi (marciume)**
- **movimenti del supporto ↗ fessurazione dei film protettivi**
- **....**

(ALCUNI PRINCIPALI) METODI E STRUMENTI PER MISURARE L'UMIDITA' DEL LEGNO

Metodi diretti:

- **Gravimetrico**
- **Distillazione**
- **Titolazione con reattivo di Fischer**

Metodi indiretti:

- **elettrico**
- **equilibrio igroscopico**

Determinazione dell'umidità:

- **in un pezzo di legno (oggetto, zona o campione considerato rappresentativo, ecc.)**
- **in un oggetto più grande (segato da cui estraggo il campione: sezione, carotina, segatura, ecc.)**
- **lotto di pezzi da accettare/rifutare (criteri di campionamento)**
- **....**

METODO GRAVIMETRICO (UNI 9091-2) (“Doppia pesata”)

Metodo di riferimento

Attrezzature:

- **stufa ventilata $103\pm 2^{\circ}\text{C}$**
- **bilancia tecnica o analitica**
- **recipiente “essiccatore” (contenente materiale disidratante) [per far raffreddare il provino senza che riassorba umidità dall’aria]**

Procedimento:

- **prelievo il provino (pezzi, sezioni, trucioli ...)**
- **pesata allo stato umido (non necessariamente “fresco”)**
- **in stufa ventilata 103°C per 48 ore (dipende dalle dimensioni)**
- **estrazione, raffreddamento nel recipiente, pesata**
- **nuovamente in stufa per almeno 6 ore**
- **nuova estrazione e pesata**
- **finché due pesate successive risultano sufficientemente uguali**

Fonti di errore (e rimedi):

- **estrattivi che evaporano sotto 100°C**
- **aria nella stufa non perfettamente anidra**
- **recupero di umidità dall’aria**
- **colonna aria calda ascendente**

Varianti:

- **essiccazione sotto vuoto**
- **termobilancia**
- **riscaldamento con microonde***
- **...**

*** (attenzione alle esplosioni, causate dal vapore che si forma all’interno del pezzo e non riesce a uscire abbastanza rapidamente!)**

METODO ELETTRICO (UNI 9091-1)

Premesse:

- **relazioni legno-elettricità**
- **influenza vari fattori:**
 - ?? **temperatura**
 - ?? **umidità**
 - ?? **elettroliti**
 - ?? **.....**

Campo utile di misura: 7-27%

Tipi:

- **a resistenza (conducibilità): infissione/contatto elettrodi**
- **dielettrici (radiofrequenza, ecc.): nel legno penetra il campo elettrico**

Incertezze intrinseche: correlazione umidità – proprietà elettriche

Accuratezza (1-2%): funzione della correlazione, non dei decimali sul display!

Aspetti operativi:

- **elettrodi con stelo isolato (gradienti), profondità infissione**
- **criteri campionamento zone di misura**
- **correzioni per:**
 - ?? **specie (alburno/durame)**
 - ?? **temperatura del legno**
 - ?? **errori per storia del provino (immersione in mare, attacchi,...)**

Nota: SE il legno contiene elettroliti (sale marino, trattamenti preservanti, ecc.) che aumentano la conducibilità:

- **la misura non fornisce valori accurati,**
- **MA possiamo essere certi che l'umidità “vera” non è maggiore del valore letto (errato)**

METODO PER DISTILLAZIONE (UNI 9091-3)

(accurato, ottimo per legno con estrattivi insolubili in acqua)

- **legno sminuzzato**
- **pesata allo stato umido**
- **messo nel pallone di un distillatore con toluene anidro (estrae l'acqua dal legno)**
- **la miscela acqua+toluene evapora a temperatura più bassa del toluene puro (distillazione azeotropica)**
- **ricondensando (temperat. ambiente) acqua e toluene si separano**
- **la quantità di acqua ($=m-m_0$) si misura nel tubo graduato**
- **si applica la stessa formula del metodo gravimetrico**

METODO DELL'EQUILIBRIO IGROSCOPICO (UNI 9091-4)

Principio: in condizioni di equilibrio igroscopico:

- **aria condiziona legno (se c'è molta aria)**
- **legno condiziona aria (se c'è molto legno)**

Metodi:

- **in contenitore**
- **foro nel legno e sonda igrometrica**

Occorre diagramma

Valido nel solo intervallo igroscopico (0-30%)

Legno finemente sminuzzato

Influenza variazioni temperatura

METODO PER TITOLAZIONE (REATTIVO FISCHER)

Legno finemente sminuzzato

Estrazione acqua con metanolo

Titolazione dell'acqua presente nel metanolo

METODO CON "MATITE"

Impasto a contatto col legno (simile a gessetti) cambia colore in base all'umidità del legno (soltanto zona superficiale).

Impreciso e obsoleto

CAMPIONAMENTO, ACCETTAZIONE/RIFIUTO DI UN LOTTO (UNI 8939, e altre)

Chiarire ben lo scopo per cui si determina l'umidità:

- **valore medio**
- **limite all'umidità massima**
- **limite all'umidità minima**
- **intervallo da non superare**
- **....**

UNI 8939: conformità tra umidità nominale e umidità effettiva

Accordo preventivo:

- **umidità nominale**
- **scostamenti ammissibili (pezzi conformi/non conformi)**
- **metodo di misura**
- **metodo di prelievo (casuale)**
- **che fare del lotto non conforme**

Esecuzione:

- **piano di campionamento:**
- **numerosità del lotto --> numerosità del campione**
- **numero di accettazione / numero di rifiuto**

Altre norme (ISO, EN ...) sul campionamento:

- **non soltanto per l'umidità, ma in genere per caratteristiche, dimensioni, difetti, ecc. (pezzi conformi / non conformi)**
- **LQA (Livello di Qualità Accettabile): massima percentuale di pezzi non conformi accettabile nell'intero lotto**
- **tabelle basate sulla scienza statistica**
- **si può attuare un campionamento:**
 - ?? **semplice**
 - ?? **suddiviso in due fasi: in molti casi, il risultato (lotto conforme, oppure non conforme) può emergere già dalla prima fase, non occorre la seconda (si risparmia!)**