

SPERIMENTAZIONE DI PRODOTTI E DI METODICHE PER IL TRATTAMENTO DEI REPERTI IN LEGNO DEGRADATO ED IMBIBITO D'ACQUA

Giachi Gianna

Soprintendenza per i Beni Archeologici della Toscana - Laboratorio di Analisi, Firenze

Giovedì 6 Dicembre 2007
1° Intervento

Introduzione

Il lavoro scaturito dallo scavo archeologico effettuato a Pisa nell'area del cosiddetto "Cantiere delle navi antiche" è stato, ed è tuttora, di eccezionale portata per la quantità e la diversità dei materiali recuperati. In questo contesto, particolare spicco rivestono i numerosi reperti di legno e, fra questi, i diversi scafi di imbarcazioni antiche.

Pur risultando, quello pisano, uno scavo terrestre l'aver operato per lo più in sedimenti che si trovano al di sotto del livello di falda, ha comportato il recupero di reperti in legno imbibito d'acqua. Questo, pur conservando un buon aspetto in quanto a forma e dimensioni, presenta un cattivo stato di conservazione¹ dovuto al degrado di natura chimica² e soprattutto biologica³ della parete cellulare, degrado che ha comportato la perdita di buona parte della massa legnosa ed il conseguente aumento della porosità e della quantità di acqua trattenuta dal materiale⁴. La rimozione dell'acqua per evaporazione spontanea dal legno degradato costituisce un'operazione rischiosa e, in relazione alla gravità del degrado, è possibile prevedere la deformazione e la fessurazione del reperto dovute al ritiro ed al collasso delle cellule legnose.

La conservazione dei reperti in legno dello scavo di Pisa ha posto, e pone, dunque, la necessità di operare scelte mirate che tengano conto non solo del mantenimento di forma e dimensioni dei reperti, ma anche della loro stabilizzazione in considerazione anche del successivo ambiente di conservazione⁵ e del fatto che, nel caso dei relitti, il restauro deve mirare anche a impartire, quando mancanti, le idonee caratteristiche fisiche al legno perché questo mantenga la sua funzione meccanica. Va da sé che in ogni caso devono essere considerate anche altre informazioni che riguardano la sicurezza dei processi impiegati per gli operatori e per l'ambiente⁶, l'economicità degli stessi ed, infine, seppur in discussione, la loro reversibilità⁷.

A questo scopo è stato realizzato presso il cantiere pisano un lavoro di sperimentazione di prodotti e di metodiche per il trattamento dei reperti in legno degradato ed imbibito d'acqua per valutare prodotti e metodiche di trattamento già in uso presso laboratori specializzati italiani e non, accanto a prodotti di nuova formulazione.

La sperimentazione è tuttora in corso e viene effettuata su una serie di campioni di legno ricavati da tronchi pertinenti la vegetazione accumulata nei vari episodi di esondazione dell'Arno nell'area dell'Ampliamento Sud dello scavo.

Il fine è quello di raccogliere sperimentalmente dati obiettivi su cui basare le scelte operative del cantiere, nell'ottica di adottare non necessariamente un unico trattamento per tutti i reperti. La sperimentazione, progettata e coordinata dalla Soprintendenza Archeologica della Toscana, si è avvalsa della sinergia di esperienze specifiche maturate nel settore da parte della stessa Soprintendenza e di Enti di ricerca italiani: l'Istituto per la Valorizzazione del Legno e delle Specie Arboree, IVALSA-C.N.R. di Firenze, il Dipartimento di Chimica Fisica "F. Accascina" dell'Università degli Studi di Palermo, il Dipartimento di Chimica e Chimica Industriale dell'Università degli Studi di Pisa. A questi si è unito, per la caratterizzazione del legno e per la messa a punto di una tecnica di trattamento⁸, il Dipartimento di Scienze dell'Ambiente e del Territorio dell'Università di Milano-Bicocca.

Materiali e metodi

Per la realizzazione dell'indagine, sono stati scelti, in relazione alla disponibilità sul cantiere, legni che presentassero una buona variabilità in termini di specie rappresentate.

E' stato possibile selezionare una conifera, il pino marittimo (*Pinus pinaster* Aiton), e quattro latifoglie, tre delle quali ad anello poroso, quercia caducifolia (*Quercus* sp. caducifolia), olmo

(*Ulmus* cfr. *minor*), faggio (*Fagus* cfr. *excelsior*), ed una ad anello diffuso-poroso, il corbezzolo (*Arbutus unedo* L.). Dalle porzioni di tronco raccolte sono stati ricavati cuboidi di circa 5 cm di spigolo, distinti oltre che dalla sigla del reperto da lettere dell'alfabeto (Figura 1).



Figura 1. Preparazione di cuboidi per la sperimentazione, legno di pino marittimo

Poiché i risultati del lavoro devono essere riferiti oltre che alla specie costituente, allo stato di conservazione del legno trattato, è risultato necessario realizzare in via preliminare indagini diagnostiche volte alla caratterizzazione del materiale. La procedura seguita è stata quella che si basa sulle norme UNI⁹.

Caratterizzazione del legno¹⁰, è consistita nella:

- identificazione della specie legnosa costituente¹¹;
- determinazione del degrado del legno mediante misure fisiche di contenuto d'acqua alla massima imbibizione (MWC%), di densità basale (Db) e quindi di calcolo di densità basale residua (Dbr%) e, laddove possibile, del ritiro dimensionale percentuale nelle tre direzioni caratteristiche del legno¹².

Inoltre, esulando dalla norma citata, sono state effettuate misure di densità della parete cellulare (Dp) e di volume delle cavità (Vc), mediante densimetro a spostamento di gas¹³

- determinazione del degrado mediante analisi chimica qualitativa e quantitativa allo scopo di risalire al contenuto residuo di olocellulosa e di lignina ed alla valutazione del loro rapporto (o/l), oltre che a quello degli estrattivi organici, acquosi ed al contenuto di ceneri¹⁴

La caratterizzazione del legno prima e dopo il trattamento, è stata effettuata mediante la tecnica gascromatografica di Py/GC-MS per verificare l'effetto del processo adottato sul legno (temperatura, durata, possibile interazione con le sostanze impregnanti).

I legni utilizzati per la sperimentazione sono risultati prevalentemente molto degradati. La sintesi dei risultati scaturiti dalle analisi è riportata nella Tabella I, dove sono elencati i valori limite per ogni grandezza indagata, rilevati in ciascuna specie.

Specie	MWC%	Dbr%	o/l
corbezzolo	608-775	13.6-16.9	0.07-0.09
olmo	549-649	24.6-29.8	0.10-1.14
pino marittimo	301-727	24.0-52.0	0.07-0.57
quercia cad.	224-515	26.0-51.5	0.10-0.18
faggio	439-575	25.4-32.4	0.10

Tabella I. Valori limite delle grandezze fisiche indagate per la caratterizzazione del legno nei cuboidi prodotti

I campioni di legno sono stati trattati per immersione in soluzioni di prodotti diversi, anche miscelati fra loro, e poi sono stati essiccati.

Per l'impregnazione sono state impiegate:

- *soluzioni acquose di polietilenglicoli (PEG) a vario peso molecolare*. I PEG sono fra i prodotti più diffusamente utilizzati per il restauro del legno archeologico imbibito d'acqua. Esiste già un'ampia letteratura a riguardo e sono noti ormai molti dei vantaggi e degli inconvenienti che comporta il loro uso¹⁵; i lavori più conosciuti sono quelli di Hoffmann¹⁶ il quale ha studiato e messo a punto sistemi di impregnazione con PEG a diverso peso molecolare anche per il trattamento conservativo di grandi imbarcazioni (per esempio: Vasa, Bremen Cog): a tale proposito Hoffmann ha verificato la possibilità di utilizzare tecniche di impregnazione con PEG differenziate per il legno di conifera e per quello di latifoglia, ad uno o più stadi, e che si diversificano anche a seconda dello stato di conservazione del legno;

- *soluzioni acquose di miscele di PEG con TREA (Trealosio)*. Il TREA (α -D-glucopiranosil- α -D-glucopiranosio) è un disaccaride del glucosio in cui non sono presenti legami ad idrogeno intramolecolari (Figura 2): questo impartisce alla molecola una certa flessibilità intorno al legame glicosidico ed, inoltre, permette una facile rimozione delle molecole d'acqua dalle sue soluzioni durante l'essiccazione¹⁷;

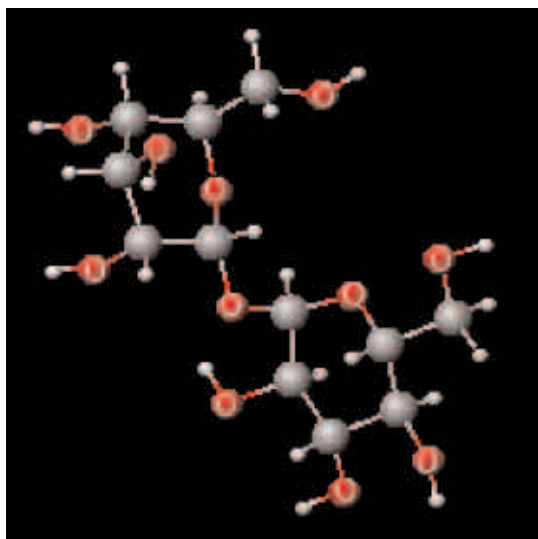


Figura 2. Struttura molecolare del TREA

- *miscele di PEG in PPG425 (polipropilenglicol)*. I PPG possiedono, a parità di unità monomeriche, viscosità e igroscopicità minori rispetto al PEG. Agiscono, inoltre, come antibatterico¹⁸;

- *soluzione acquosa di klucel (idrossipropilcellulosa)*. Il prodotto usato ha P.M. 80.000 e MS (sostituzione molecolare, equivalente ai gruppi eteri aggiunti alla molecola) di 3.7. Il klucel, poco sensibile all'acqua, è da tempo utilizzato nel restauro della carta e di recente è stato testato anche per il trattamento del legno degradato e imbibito¹⁹;

- *dispersione acquosa di BMT (copolimero Butil acrilato/Metil metacrilato/Trimetossisilpropil metacrilato) in presenza di tensioattivi (Figura 3)*. Il prodotto era già stato testato con buoni risultati, in termini di consolidamento, nel restauro del legno non imbibito.

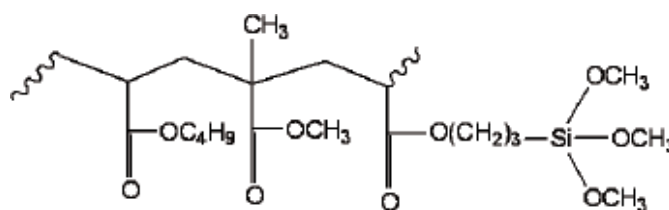


Figura 3. Struttura molecolare del polimero BMT

• *soluzione idroalcolica di isoeugenolo e successiva polimerizzazione in situ.* Il metodo sfrutta la possibilità da parte di monomeri fenilpropenoidici (Figura 4) di formare un polimero simile alla lignina (Figura 5), ma maggiormente idrofobico e resistente. L'isoeugenolo è una sostanza naturale, che non presenta alcun grado di tossicità e svolge anche un'azione antibatterica²⁰.

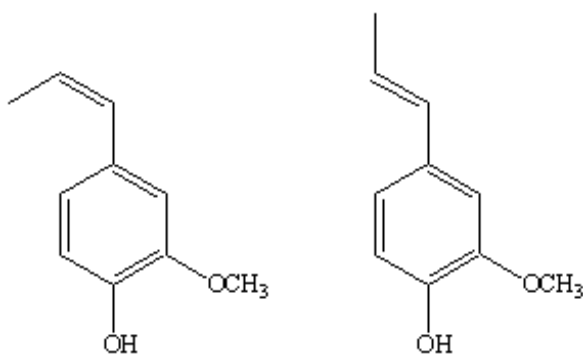


Figura 4. Struttura dell'isoeugenolo, cis-trans

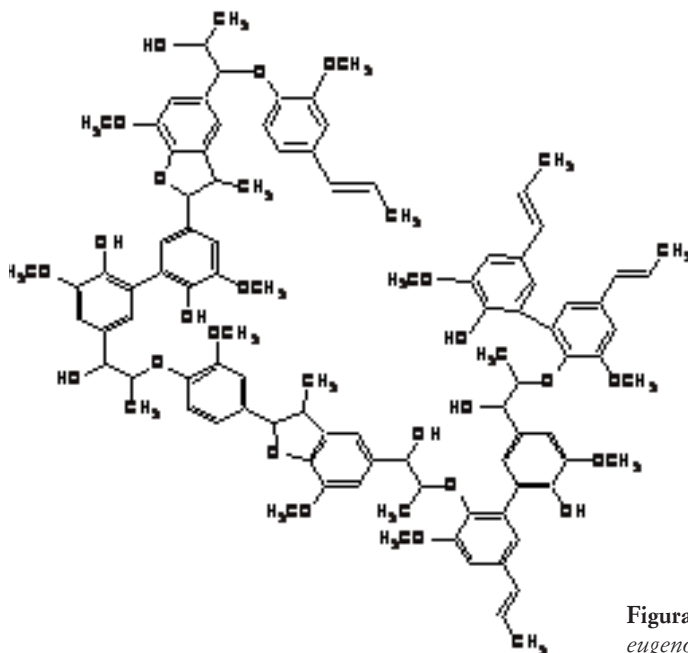


Figura 5. Ipotetica struttura del polimero dell'isoeugenolo

- *soluzione di colofonia in acetone.* La colofonia costituisce il residuo secco della distillazione della trementina, oleoresina prodotta da alcune Pinacee (Figura 6): contiene più del 90% di acidi resinici, tra cui l'acido abietico, difficili da cristallizzare. I trattamenti del legno archeologico imbibito con colofonia sono riportati per la prima volta da Mc Kerrell nel 1972²¹. Sperimentata negli anni 1980 dalla Soprintendenza Archeologica per la Toscana²² è tuttora in uso per il restauro di oggetti di piccole dimensioni.

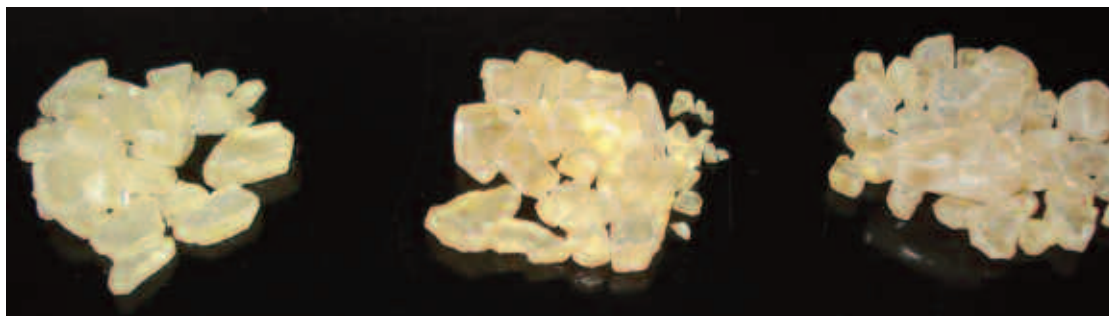


Figura 6. Nella foto compaiono, da destra: colofonia, Rosin 100, Rosin 459

- *soluzioni di colofonia esterificata in acetone.* Sono stati utilizzati gli esteri di pentaeritritolo (Rosin 100) e da polialcoli (Rosin 459)²³.

- soluzioni di un polimero vinilico (consolidante 80/20 MAPEI)²⁴ in acetone. Il prodotto (che è stato ampiamente sperimentato nel campo dei lapidei) è costituito da un vinilacetato al quale è stata introdotta nella molecola una ramificazione iso di nove atomi di carbonio in modo da renderlo resistente all'idrolisi e in modo che non ingiallisca per invecchiamento; è atossico e può essere risolubilizzato.

La caratterizzazione delle miscele impregnanti, è stata realizzata mediante:

- misure di viscosità (η);
- misure di tensione superficiale (γ);
- calcolo del coefficiente di risalita capillare di Darcy secondo l'equazione di Rideal-Washburn²⁵.

La composizione delle miscele, la temperatura utilizzata nei trattamenti e il metodo di essiccazione sono riportati nella Tabella II.

La scelta delle concentrazioni da adottare è stata fatta in base ai risultati delle prove di caratterizzazione delle miscele, cercando di operare un giusto compromesso fra i dati cinetici e quelli di quantità di prodotto da veicolare nel legno.

E' stato scelto di adottare una temperatura che oscillasse entro i 45°C come limite cautelativo rispetto ad un ulteriore possibile danneggiamento delle componenti residue del legno.

Nel caso di trattamento del legno con soluzioni acquose l'essiccazione è avvenuta o secondo un processo controllato di diminuzione progressiva del contenuto d'acqua o per liofilizzazione, anche per mettere a confronto le due tecniche. Nel caso dell'utilizzo di solventi organici l'essiccazione è stata effettuata cercando di effettuare, per quanto possibile, un'evaporazione lenta.

Componenti	Concentrazione %	T (°C)	essiccazione
PEG400 + PEG4000 in H ₂ O (due fasi)	30, 50	45	controllata
PEG400 + PEG4000 in H ₂ O (due fasi)	40, 70	45	controllata
PEG400 + PEG4000 in H ₂ O (due fasi)	24, 40	45	controllata
PEG400 + PEG4000	94-6	45	controllata
PEG400 + TREA in H ₂ O	20-2	45	controllata; liofilizzazione
PEG600 + TREA in H ₂ O	20-2	45	liofilizzazione
PEG1500 + TREA in H ₂ O	20-2	45	liofilizzazione
PEG4000 + TREA in H ₂ O	20-2	45	controllata; liofilizzazione
PEG600 in H ₂ O	20	45	controllata
PEG1500 + PPG425	20-80	45	controllata
PEG1500 + PPG 425	30-70	45	controllata
PEG3000 + PPG 425	50-50	45	controllata
Klucel in H ₂ O	7	30	liofilizzazione
BMT dispersione in H ₂ O	20	amb.te	liofilizzazione
Colofonia in acetone	63	35	
Rosin 100 in acetone	60	35	
Rosin 459 in acetone	60	35	
Colofonia + PEG 3400 in acetone	30-30	35	
Vinilacetato 8020 in acetone	11	amb.te	
Isoeugenolo in (H ₂ O/EtOH 1:1; H ₂ O ₂ ; Cu Salen)	10	amb.te	liofilizzazione

Tabella II. Prodotti e condizioni utilizzati nel trattamento dei legni

L'andamento dei processi di impregnazione in soluzione acquosa è stato seguito mediante misure di indice di rifrazione (n_D), mentre quelli in soluzione di acetone per mezzo di misure di densità. E' stato necessario rinnovare più volte le soluzioni per ciascun processo fino ad arrivare ad una concentrazione del bagno impregnante analoga a quella di partenza (Figura7). Il confronto dei tempi necessari a ciascuna impregnazione permette di valutarne, in termini di durata relativa e quindi di consumi energetici, la possibile economicità.

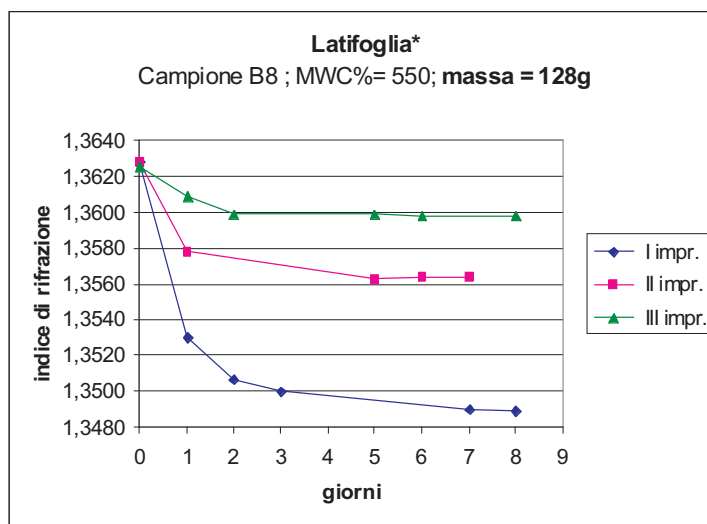


Figura 7. Andamento dell'indice di rifrazione durante il processo di impregnazione di un cuboide di olmo: è risultato necessario il rinnovo del bagno per tre volte successive

Efficacia dei trattamenti

Nel contesto considerato, l'efficacia di un trattamento sta essenzialmente nella:

- capacità del metodo di stabilizzare forma e dimensioni dell'oggetto;
- capacità dell'oggetto di sopportare l'ambiente successivo di conservazione;

Il raggiungimento, completo o in parte, degli scopi prefissati viene valutato mediante le determinazioni di:

- quantità di prodotto trattenuto come misura della variazione del peso del legno impregnato rispetto allo stesso non impregnato, allo stato anidro;
- variazione di porosità del legno derivata dalle misure del volume delle cavità;
- igroscopicità acquisita, come aumento contenuto d'acqua all'equilibrio in condizioni diversificate di umidità relativa ambiente;
- stabilizzazione dimensionale all'equilibrio ricavata dalle misure dimensionali in condizioni diversificate di umidità relativa ambiente.

Inoltre, sono state verificate le modalità di deposizione dei prodotti impregnanti per confrontarle con gli effetti degli stessi trattamenti.

Alcune valutazioni preliminari

Il lavoro di sperimentazione è tuttora in corso.

Quanto finora portato a termine è stato improntato sul confronto e sulla valutazione di metodiche di impregnazione del legno con polietilenglicoli a vario peso molecolare, in miscela fra loro o con un disaccaride (trealosio), oppure sulla verifica delle metodiche di impregnazione con un derivato della cellulosa (klucel) ed ancora con un polimero acrilico di nuova sintesi (BMT). I polietilenglicoli sono stati messi a confronto per l'ampia diffusione del loro utilizzo nel settore, anche fuori dei confini nazionali, ed anche per l'ormai ampio repertorio di studi che riguardano la stabilità dei legni così trattati in diverse condizioni di conservazione.

In particolare, i metodi sperimentati e messi a punto da Per Hoffmann che fanno uso di polietilenglicoli, sono utilizzati ormai da circa due decenni in larga misura in tutta Europa ed oltre. Indubbiamente, pur nella convinzione che non sia stato trovato tuttora, comunque, un metodo che soddisfi completamente le necessità del restauro del legno archeologico imbibito, l'ampia diffusione, come casistica e come durata nel tempo dell'attuazione del metodo Hoffmann, obbliga a considerarlo un punto di riferimento per ogni lavoro che affronti questo tema. Poiché uno dei "difetti" dei polietilenglicoli, in questo ambito, è la loro igroscopicità - proprietà che varia nella scala dei pesi molecolari - sono stati sperimentati, nel presente lavoro,

prodotti che possiedono peso molecolare variabile da 400 a 4000. Fra questi il prodotto con PM intermedio, il 1500, è stato usato insieme ad un polimero molto meno igroscopico, il polipropilenglicol (PPG425): proficui sono apparsi i trattamenti con queste miscele, anche se, proprio dai primi risultati è possibile dedurre che le caratteristiche così acquisite dal legno possono essere migliorate.

Rimangono alcune preoccupazioni derivanti dalla frequente presenza nel legno archeologico imbibito di composti di zolfo e di ferro, i quali con le loro trasformazioni, in presenza di ossigeno e umidità, si rivelano nocivi.

Il lavoro sta proseguendo anche per tutte gli altri trattamenti previsti dalla Tabella 2. Fra questi compare il trattamento con colofonia, utilizzato dalla Soprintendenza con successo ormai da oltre venticinque anni, e quelli che utilizzano colofonie esterificate.

Nel campo delle nuove applicazioni appare di notevole interesse la polimerizzazione *in situ* dell'isoeugenolo, anche per i riscontri di eco-sostenibilità del processo.

Come in tutti i lavori complessi le fasi iniziali sono state utili anche all'individuazione e alla messa a punto degli aspetti operativi e quanto finora sperimentato appare proficuo per il raggiungimento degli scopi prefissati da questo studio.

Bibliografia

- AA.VV. 2003: AA.VV., *La reversibilità nel restauro. Riflessioni, Esperienze, Percorsi di Ricerca*, in Biscontin G., Driussi G. (a cura di), Atti del Convegno di Studi "Scienza e Beni Culturali", Bressanone, 1-4 luglio 2003 (2003), Edizioni Arcadia Ricerche
- BETTAZZI et al. 2005: F. Bettazzi, G. Giachi, G. Staccioli, S. Chimichi, N. Macchioni, *Chemical and physical characterisation of wood of shipwrecks discovered in the ancient harbour of Pisa (Tuscany-Italy)*, in P. Hoffmann, K. Strætkvern, J.A. Spriggs, D. Gregory (Eds.), Proceedings of the 9th ICOM Group on Wet Organic Archaeological Materials Conference – Copenhagen 2004, Bremenhaven (2005), pp. 127-143
- BJÖRDAL et al. 1999: C.G. Bjordal, T. Nilsson, G. Daniel, *Microbial decay of waterlogged archaeological wood found in Sweden*, in *International Biodeterioration and Biodegradation*, 4, 1999, pp. 63-73
- DONATO et al. 2003: I.D. Donato, M. Mulè Cascio, *Determinazione della densità di legni integri e degradati su campioni di piccole dimensioni e di forma irregolare*, in *Arkos - Scienza e restauro*, 1, 2003, pp. 39-43
- DONATO & AGOZZINO 2004: D.I. Donato, P. Agozzino, *Composti polimerici per il consolidamento di legni degradati*, in *Science and Technology for Cultural Heritage*, 13, 2004, pp. 71-81
- FENGEL 1991: D. Fengel, *Aging and fossilization of wood and its components*, in *Wood Sci. Technol.*, 25, 1991, pp. 153-177
- GALLINA et al. 2006: M.E. Gallina, P. Sassi, M. Paolantoni, A. Morresi, R.S. Cataliotti, *Vibrational Analysis of Molecular Interactions in Aqueous Glucose Solutions. Temperature and Concentration Effects*, in *J. Phys. Chem. B*, 110, 17, 2006, pp. 8856-8864
- GIACHI 1990: G. Giachi, *Conservazione dei reperti in legno*, in F. Nicosia, A. Romualdi (a cura di), *Relitto del Pozzino. B del Golfo di Baratti*, Zeta, Firenze 1990, pp. 39-40
- GIACHI et al. *in press*: G. Giachi, B. Pizzo, N. Macchioni, I. Santoni, *A Chemical characterisation of the decay of waterlogged archaeological wood*, in Strætkvern K. (Ed.), Proceedings of the 10th ICOM Group on Wet Organic Archaeological Materials Conference - Amsterdam 2007 (in press)
- GIACHI & TORDI 1989: G. Giachi, G. Tordi, *Progetto di restauro di reperti lignei sommersi*, in G. Tampone (a cura di), *Legno e Restauro*, Messaggerie Toscane, Firenze 1989, pp. 312-313
- GRATTAN & CLARKE 1987: D.W. Grattan, R.W. Clarke, *Conservation of Waterlogged Wood*, in C. Pearson (Ed.), *Conservation of Marine Archaeological Objects*, Butterworth, London 1987, p.188
- HEDGES 1990: J.I. Hedges, *The chemistry of archaeological wood*, in R.M. Rowell and R.J. Barbour (Eds.), *Archaeological wood. Properties, chemistry, and preservation*, Advances in Chemistry Series 225, Am. Chem. Soc., Washington DC 1990, pp. 111-139
- HOFFMANN 1986: P. Hoffmann, *On the stabilization of waterlogged wood with PEG II. Designing two step treatment for multi-quality timbers*, in *Studies in Conservation*, 31, 1986, pp. 103-113
- HOFFMANN 1990: P. Hoffmann, *On the stabilization of waterlogged softwood with Polyethylene glycol (PEG). Four species from China and Korea*, in *Holzforschung*, 44, 1990, pp. 87-93
- HOFFMANN 1997: P. Hoffmann, *The conservation of the Bremen Cog – between the steps*, in T. Daley, T. Grant, P. Hoffmann, J.A. Spriggs (Eds.), The 6th ICOM Group on Wet Organic Archaeological Materials - York 1996 (1997), pp. 527-545
- HOFFMANN 2006: P. Hoffmann, *The Bremen Cog project The conservation of a big medieval ship*, in *La Chimica e L'Industria*, 5, 2006, pp. 96-101
- HUANG et al. 2002: Y. Huang, S.-H. Ho, H.-C. Lee, Y.-L. Yap, *Insecticidal properties of eugenol, isoeugenol and methyleugenol and their effects on nutrition of Sitophilus zeamais Motsch. (Coleoptera: Curculionidae) and Tribolium castaneum (Herbst) (Coleoptera: Tenebrionidae)*, in *J. Stored Products Research*, 38, 2002, pp. 403-412
- KAWAI et al. 1977: F. Kawai, K. Hanada, Y. Tani, K. Ogata, *Bacterial degradation of water-insoluble polymer. Polypropylene glycol. Microbial Degradation of Synthetic Polymers(II)*, in *Journal of Fermentation Technology*, 55,

- 1977, pp. 89-96
KIM & SINGH 2000: Y.S. Kim, A.P. Singh, *Micromorphological characteristics of wood biodegradation in wet environments: a review*, in *IAWA J.*, vol. 21(2), 2000, pp. 135-155
ITALIANO 2004: S. Italiano, *Consolidamento dei reperti lignei provenienti da siti sommersi*, Tesi del Master “Materiali e tecniche diagnostiche nel settore dei beni culturali”, Dipartimento di Chimica e Chimica Industriale, Università di Pisa, 2004
MACCHIONI 2003: N. Macchioni, *Physical characteristics of wood from the excavations of ancient port of Pisa*, in *Journal of Cultural Heritage*, 4, 2003, pp. 85-89
Mc KERRELL et. al 1972: H. Mc Kerrell, E. Roger, E. Varsanyi, *The acetone/rosin method of conservation of waterlogged wood*, in *Studies in Conservation*, 17, 1972, pp. 111-125
PIZZO et al. 2006: B. Pizzo, G. Giachi, L. Fiorentino, *Metodi di caratterizzazione chimica del legno fossile imbibito*, in Atti del Convegno “La Diagnostica e la conservazione dei manufatti lignei” Marsala 2004, Nardini Editore©, ISBN 88-404-4151-4, Firenze 2006, pp. 1-9
UNGER 2001: A. Unger, *Conservation of wood artefacts*, Springer-Verlag, Berlin 2001

Note

- 1 BETTAZZI et al. 2005; GIACHI et al. *in press*
- 2 UNGER 2001
- 3 BJÖRDAL et al. 1999; KIM & SINGH 2000
- 4 HEDGES 1990; FENGEL 1991
- 5 GRATTAN & CLARKE 1987
- 6 DD.Lgs. 25/2002 e 65/2003
- 7 AA.VV. 2003
- 8 Polimerizzazione di isoeugenolo *in situ*, v. Orlandi et al. in questo stesso volume, pp.
- 9 Ente nazionale italiano di unificazione
- 10 Beni Culturali. Legno di interesse archeologico ed archeobotanico. Linee guida per la caratterizzazione. UNI 11205:2007
- 11 Beni Culturali. Manufatti lignei. Criteri per l'identificazione delle specie legnose. UNI 11118:2004.
- 12 MACCHIONI 2003
- 13 DONATO et al. 2003; DONATO & AGOZZINO 2004
- 14 PIZZO et al. 2006
- 15 UNGER 2001
- 16 HOFFMANN 1986, 1990, 1997, 2006
- 17 GALLINA et al. 2006; ITALIANO 2004
- 18 KAWAI et al. 1977
- 19 DONATO & AGOZZINO 2004
- 20 HUANG et al. 2002
- 21 MC KERRELL et. al. 1972
- 22 GIACHI & TORDI 1989; GIACHI 1990
- 23 Le due Rosin sono state gentilmente fornite dalla Ditta Bresciani, Milano
- 24 Il prodotto è stato gentilmente fornito dalla MAPEI, Milano, che lo produce
- 25 $\chi = (\gamma / \eta)^{1/2}$: si ricava dall'equazione di Rideal-Washburn