

INDAGINI PRELIMINARI SUL COMPORTAMENTO DELLE FONDAZIONI LIGNEE A VENEZIA

Guido Biscontin¹, Francesca Caterina Izzo¹, Claudio Bini¹, Enrico Rinaldi²,
Nicola Macchioni³, Benedetto Pizzo³, Chiara Capretti³, Giuliano Molon⁴,
Michele Regini⁴, Alberto Lionello⁵, Ilaria Cavaggioni⁵, Zeno Morabito⁶

¹ Università Ca' Foscari di Venezia, Dipartimento di Scienze Ambientali

² CORILA, Consorzio per il coordinamento delle ricerche sul sistema lagunare di Venezia

³ CNR/IVALSA

⁴ Insula Spa

⁵ Soprintendenza per i Beni Architettonici e Paesaggistici di Venezia e Laguna

⁶ Arcadia Ricerche Srl

ABSTRACT: The preliminary study of the state of conservation of Venice wooden foundations is here presented. From ancient times, waterlogged wood has been considered to be strongly resistant, due to the fact that the conditions are not favourable for the degradation processes. Nevertheless, recent studies on historical building foundations in Venice and in Amsterdam show a very different situation, underlining the necessity of an in-depth and accurate research.

This research was supported by CORILA (Consorzio per il coordinamento delle ricerche sul sistema lagunare di Venezia).

KEY-WORD: waterlogged wood, wooden foundations, Venice, deterioration, bacteria, CORILA.

1. Introduzione

1.1 Il sistema delle fondazioni a Venezia

"Le palificate vogliono esser fatte ad imitazione delle radici degli alberi sotto terra, perchè le principali sono molto lunghe e grosse: alcune poi mezzane, ed altre assai più corte e sottili, perchè a questo modo s'abbarbicano meglio nella terra e traggono ad esse l'umore e mantengono in piede le loro piante: ed anche vediamo le dentature degli animali, per grandi che siano, le quali hanno alcune radici molto lunghe e grosse e l'altre poi mediocri, e finalmente alcune assai più sottili e corte, e tutte tramezzate dalle gengive e da altra materia differente; il che si può dire che sia un modello delle palificate d'un edificio materiale." Così Vincenzo Scamozzi nel suo trattato *'L'idea dell'architettura universale'* [1] introduceva il tema dei principi costruttivi dei sistemi di fondazione e del consolidamento del terreno *'quand' egli sia fiacco, tenero e molle'* come nel caso dei terreni di Venezia. I terreni di fondazione costituiti da sabbia, limo,

argilla e torba si trovano spesso mescolati in diverse proporzioni; tutti gli strati appaiono relativamente consolidati con una scarsa capacità portante. I pali impiegati erano di larice, rovere, ontano, olmo con diametri variabili dai 10 ai 25 cm, infissi a percussione affiancati gli uni agli altri procedendo dall'esterno verso il nucleo della fondazione, infiggendone solitamente nove per metro quadrato. Le lunghezze dei pali variavano da un massimo di 3,50 m a misure inferiori al metro. Non è ancora chiaro se vi sia e quale sia la legge che lega la lunghezza dei pali alle caratteristiche ed ai carichi della fabbrica soprastante e alla stratigrafia del terreno. Piantati i pali venivano segate le teste per ottenere un piano regolare su cui impostare dei tavolati lignei ad uno due o più strati. Questi venivano realizzati con tavole o travi di spessori crescenti, chiamati *madieri*, in funzione del carico che dovevano sopportare; nel caso di campanili si arrivava a spessori complessivi della zatterone superiori a 50 cm; l'interposizione di tavolati incrociati sopra la palificata favoriva comportamenti e cedimenti omogenei dei massi fondati sovrastanti.

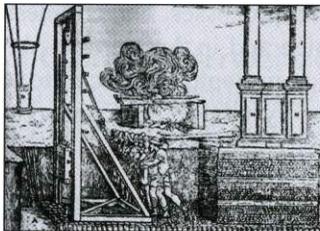


Figura 1: Macchina battipalo secondo G. A. Rusconi, *Dell'Architettura secondo i precetti di Vitruvio*, Venezia, 1590

Gli studi storici e l'osservazione diretta dei dati materiali hanno documentato con chiarezza l'impiego da parte dei costruttori dell'edilizia tradizionale di diverse tipologie di sistemi fondazionali utilizzati con soluzioni più o meno complesse in modo differenziato in relazione alle caratteristiche costruttive e dimensionali della fabbrica, ma anche all'interno dello stesso manufatto, in funzione della posizione delle strutture murarie e dei carichi che queste trasmettono al terreno; se dunque nella tipologia edilizia residenziale i muri di spina, su cui normalmente gravava in parte il peso dei solai, sono di norma semplicemente appoggiati al terreno, per le murature perimetrali veniva generalmente utilizzata la fondazione a zattera formata da un impalcato di travi in legno di rovere o di larice – *madieri* – disposti direttamente sul terreno a semplice orditura o a doppio strato incrociato a formare appunto una sorta di zattera su cui si impostava la struttura muraria in laterizio. La fondazione con zatterone in legno

impostato su pali
 possa aspettare;
 palazzi, di solito
 dunque più leg
 intenzionalità an
 giustificate da
 dell'edificio e del
 misura di prevedo
 gli assestamenti
 indagini su due s
 Santa Maria Glori
 hanno evidenziat
 conservazione de
 fondamentale sull'

1.2 Lo stato di con

Se da un lato è da
 sui sistemi costrut
 praticamente inesi
 conservazione delle
 Venezia, per lungo
 subisse particolari
 fondazioni lignee so
 in acqua non mar
 imbibizione e le con
 della fondazione vi
 degrado del materia
 aggressivi non trov
 recenti studi effettua
 alquanto più comples
 una situazione di degr
 svolte sulle palificate
 in luce l'esistenza di
 fondazione degli edifi
 del trecentesco campan
 valutare che una parte
 soprattutto, dai risultat
 a seconda della specie
 sembrano avere subit

impostato su palificata era, nell'uso, molto più limitata di quanto non ci si possa aspettare; veniva generalmente impiegata per i muri di facciata dei palazzi, di solito non gravati dal peso delle strutture lignee dei solai e dunque più leggeri. Queste eterogeneità costruttive con carattere di intenzionalità anche all'interno di una stessa fabbrica erano probabilmente giustificate da valutazioni d'insieme del comportamento strutturale dell'edificio e della sua condizione di stabilità che consentivano in qualche misura di prevedere il comportamento delle strutture murarie nel tempo e gli assestamenti anche differenziali dovuti ai carichi. Recenti studi ed indagini su due strutture a torre della città, il campanile della basilica di Santa Maria Gloriosa dei Frari e il campanile della chiesa di Santo Stefano, hanno evidenziato come le caratteristiche costruttive e lo stato di conservazione degli elementi di fondazione hanno un'importanza fondamentale sull'equilibrio dell'intera fabbrica [2].

1.2 Lo stato di conservazione delle fondazioni in ambiente veneziano

Se da un lato è da sottolineare l'esistenza di una buona conoscenza di base sui sistemi costruttivi delle fondazioni della città [3, 4], dall'altro sono praticamente inesistenti indagini scientifiche riguardanti lo stato di conservazione delle stesse. Guardando al caso delle palificazioni lignee di Venezia, per lungo tempo si è pensato che il legno immerso in acqua non subisse particolari forme di degrado: è luogo comune pensare che *se le fondazioni lignee sorreggono Venezia da mille anni, allora il legno immerso in acqua non marcisce...* Di per sé, infatti, la situazione di completa imbibizione e le condizioni chimico-fisiche e biologiche nelle quali il legno della fondazione viene a trovarsi non sono tali da provocare un rapido degrado del materiale ligneo, poiché gli agenti del degrado biotico più aggressivi non trovano un ambiente idoneo al loro sviluppo. In realtà, recenti studi effettuati sulle fondazioni hanno evidenziato una situazione alquanto più complessa. Analogamente a quanto evidenziato in Olanda [5], una situazione di degrado dei pali di fondazione è emersa anche dalle analisi svolte sulle palificate lignee di due antichi campanili veneziani [6] mettendo in luce l'esistenza di alcune questioni di fondo sul problema dei sistemi di fondazione degli edifici di Venezia. Le analisi effettuate sui reperti lignei del trecentesco campanile della Chiesa dei Frari hanno, infatti, consentito di valutare che una parte dei pali ha subito un degrado più che rilevante e, soprattutto, dai risultati appare chiara una forte differenziazione del degrado a seconda della specie legnosa. In particolare i pali di legno di ontano sembrano avere subito un degrado particolarmente intenso. Per contro



Figura 3: particolare palificazione e zatterone-Rio delle Acque Dolci



Figura 4: particolare palificazione e zatterone- Rio San Martino

I campioni lignei sono stati prelevati nella parte delle palificazioni prospiciente il canale, pur sotto il terreno ma nei solo primi 30 cm di profondità, per mezzo di scalpello, in parte con trapano con punta a tazza e con carotatore appositamente messo a punto; il campionamento del terreno è stato effettuato previo carotaggio fino a profondità di circa 1 metro (Tabella 1).

Cantiere	Campione ligneo	Tipologia di campione ligneo	Campione di terreno	Profondità di prelievo del terreno
Ca' di Dio	A	tavolato	C1 1	0-10 cm
	A	tavolato	C1 2	10-20 cm
	B	carota (2)	C1 3	25-40 cm
	B	carota (3)	C1 4	40-55 cm
	C	palo (camp 1)	C1 5	55-70 cm
	D	palo (camp 2)	C1 6	70-90 cm
	D	carota (1)	C1 7	90-100 cm
	E	carota (4)	C2 1	0-15 cm
	F	carota (5)	C2 2	15-30 cm
	G	carota (6)	C2 3	30-45 cm
			C2 4	45-60 cm
			C2 5	60-75 cm
			C2 6	75-80 cm
	Acque dolci	H	tavolato (camp 1)	C3 1
H		tavolato (camp 2)	C3 2	18-30 cm
H		tavolato (camp 3)	C3 3	21-45 cm
H		tavolato (carota 1)	C3 4	46-60 cm
J		tavolato pietre (c.8)	C3 5	61-75 cm
L		palo (camp 4)		
L		carota (2)		
M		palo (camp 5)		
N		palo (camp 6)		
P		palo (camp 7)		
San Martino	R	palo (1)		
	S	palo (2)		
	T	palo (3)		

Tabella 1: campionamento di legno e terreno nei siti individuati

2.2 Indagini su legno e terreno

Le indagini eseguite sul legno hanno lo scopo di determinarne le caratteristiche al momento del prelievo dal sito di scavo, secondo quanto previsto dalla norma UNI 11205:2007 [7]. La caratterizzazione del legno archeologico imbibito prevede: analisi delle caratteristiche anatomiche del legno per mezzo di microscopia ottica ed elettronica (SEM e/o ESEM), densità basale (g/cm^3), MWC (Maximum Water Content %), il contenuto di estrattivi organici, il contenuto di estrattivi acquosi, il contenuto di ceneri, la lignina acida eseguita secondo la metodologia descritta nella norma TAPPI T222 [8] e l'olocellulosa (H).

La composizione chimica di un terreno riguarda principalmente la sua frazione solida, che interagisce con il contorno limitatamente nell'interfaccia di separazione. Pur essendo inerte la maggior parte della frazione mineralogica, vi sono tuttavia alcune caratteristiche della composizione del terreno che hanno una significativa influenza, come il pH, il potenziale ossido-riduttivo, la conducibilità, la presenza di sostanza organica e di calcare. I campioni di terreno sono stati sottoposti in laboratorio ad una serie di analisi [9]: determinazione del Carbonio Organico e del Calcare Totale, tessitura, spettrometria infrarossa in trasformata di Fourier (FT-IR), analisi termogravimetriche (TG-DSC), fluorescenza ai raggi X (XRF) e diffrazione ai raggi X (XRD).

3. Risultati e discussione

3.1 Gli elementi lignei delle fondazioni

La prima risposta fornita dalle indagini anatomiche riguarda la determinazione delle specie legnose (Tabella 2). Esiste una notevole stabilità di specie utilizzate all'interno di ciascuna fondazione: nel cantiere di Rio Ca' di Dio tutti gli elementi, indipendentemente dalla tipologia, sono risultati di legno di larice, mentre nel Rio delle Acque Dolci sembra potersi individuare una maggiore varietà tra le tipologie di manufatto: i pali sono tutti di legno di ontano, mentre il tavolato sopra la palificazione è di legno di quercia caducifolia. Il tavolato di larice nello stesso cantiere presenta invece una collocazione del tutto peculiare. Infine i pali da cui sono stati prelevati i campioni nel Rio San Martino sono tutti di pino silvestre.

Le analisi anatomiche consentono anche di analizzare lo stato di conservazione della parete cellulare e di valutarne l'eventuale tipologia di attacco.

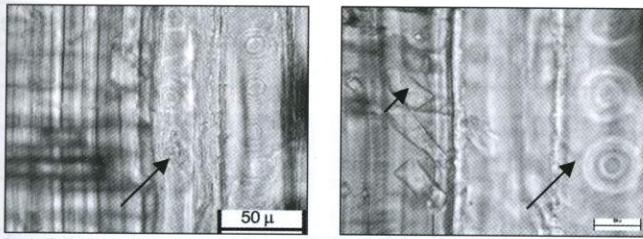


Figura 5: Rio Ca' di Dio. A sinistra sez. radiale del campione C e a destra del campione D entrambi di larice (*Larix decidua* Miller). Tramite le frecce sono indicati i segni dell'attacco batterico.

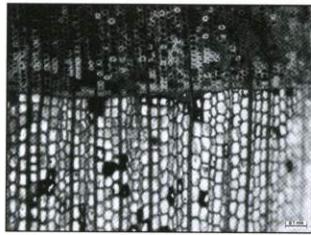


Figura 6: Rio Ca' di Dio. Sez. trasversale di un campione del tavolato di larice.

La Figura 5 mostra una sezione radiale ottenuta dal campione C ed una dal campione D, ambedue di legno di larice. Le frecce indicano la presenza di chiare tracce lasciate dagli attacchi da parte di batteri da erosione: lo attestano sia i solchi a forma romboidale (frecce più lunghe) che le sottili erosioni intorno alle punteggiature areolate (freccia corta). Anche sulle sezioni trasversali, in particolare del legno di conifera (omoxilo), sono comunque visibili le tracce lasciate dagli attacchi da parte dei batteri ad erosione. In Figura 6 è visibile un passaggio di anello in sezione trasversale del campione A: in alto il legno tardivo dell'anello precedente ed in basso quello primaticcio dell'anello successivo. Il legno tardivo, a pareti più spesse, consente di osservare meglio la presenza di attacchi in atto nelle cellule di colore più scuro.

Su un legno di latifolia, eteroxilo, a porosità diffusa, quale quello di ontano, l'intensità dell'attacco è più difficilmente riscontrabile in un'immagine a basso ingrandimento come quelle in Figura 7. Osservando a maggiore ingrandimento sarebbe sicuramente riscontrabile un'importante assottigliamento dello spessore delle pareti cellulari delle fibre (le cellule di dimensioni minori), mentre le pareti dei vasi, di spessore e composizione diversa, risultano in genere meno attaccate. Quando però il degrado diventa particolarmente intenso la struttura legnosa non è più in grado di sostenere carichi anche di piccola intensità e può andare incontro ad un collasso

generalizzato delle cellule ed alla sostanziale perdita di leggibilità del tessuto legnoso (in Figura 7, a destra).

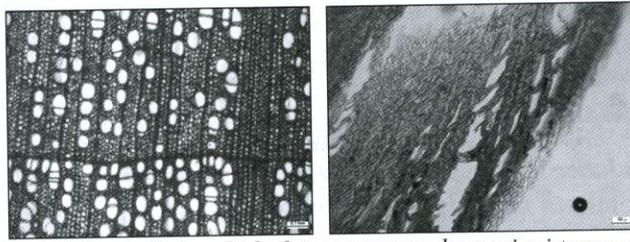


Figura 7: Rio de' Gozzi. Entrambi le foto mostrano due sezioni trasversali di ontano (*Alnus glutinosa* (L.) Gaertn.): in quella di sinistra lo stato di conservazione delle pareti cellulari è nettamente migliore di quello mostrato nella foto di destra. In quest'ultima i forti schiacciamenti causano la scomparsa di molti lumi cellulari.

	Specie	Tipologia	MWC %	Dbas (g/cm3)	Dbas res (%)	Ceneri %	Estr. totali %	Lignina %	Olocellulosa %	H/L
Ca' di Dio										
A	larice	tavolato	281	0,28	49,5	54,7	10,5	21,6	13,2	0,61
A	larice	tavolato	153	0,47	83,7	7,2	3,4	43,3	46,1	1,07
B	larice	carota	406	0,21	36,8	6,5	8,3	37,9	47,3	1,25
B	larice	carota	169	0,42	74,5	29,4	17	20,0	33,6	1,68
C	larice	palo	197	0,37	65,8	8,1	4	33,4	54,5	1,63
D	larice	palo	272	0,28	50,8	11,3	5,9	31,2	51,6	1,66
D	larice	carota	416	0,2	36,1	6,7	6,4	32,6	54,3	1,67
E	larice	carota	202	0,36	64,5	2	9,3	27,4	61,3	2,24
F	larice	carota	160	0,44	77,8	1,7	6,6	26,7	65,0	2,43
G	larice	carota	151	0,46	81,5	7,7	7,6	26,8	57,9	2,16
Acque Dolci										
H	larice	tavolato	325	0,25	44,0	8,1	5,2	41,1	45,6	1,11
H	larice	tavolato	64	0,91	162,5	68,4	2	14,1	15,5	1,09
H	larice	tavolato	133	0,51	90,3	14,5	5,4	41,1	39,0	0,95
H	larice	tavolato	64	0,91	162,5					
J	quercia	tavolato pietre	148	0,46	69,2	4,1	6,9	30,7	58,3	1,90
L	ontano	palo	519	0,17	42,3	2,4	12,9	42,6	42,1	0,99
L	ontano	carota	519	0,17	42,3	1,7	7	56,7	34,6	0,61
M	ontano	palo	204	0,36	89,6	4	3,5	66,9	25,6	0,38

N
P
San Martino
R
S
T

Grazie alla
quanto ill
differenze
Ca' di Dio
abbastanz
nel legno
fronte di
Consegue
l'MWC m
buono, m
come il
considera
mostrano
La situaz
Acque D
generale
tra le s
conserva
corrispo
densità
influenz
provoca
liquido
In realtà
quello
valutab
di tipo
conser
qualch

N	ontano	palo	603	0,15	37,5	2,9	9	63,5	24,6	0,39
P	ontano	palo	703	0,13	33,1	5,4	5,6	50,9	38,1	0,75
San Martino										
R	pino silvestre	palo	482	0,18	39,0	8,5	9,6	58,3	23,6	0,40
S	pino silvestre	palo	483	0,18	39,0	34,1	6,8	49,8	9,3	0,19
T	pino silvestre	palo	429	0,20	42,9	14,7	6,1	51,6	27,6	0,54

Tabella 2: risultati delle analisi sul legno delle fondazioni

Grazie alla caratterizzazione fisica dello stato di conservazione e secondo quanto illustrato in Tabella 2, sono state evidenziate delle sostanziali differenze nel legno prelevato nei diversi cantieri di campionamento. In Rio Ca' di Dio lo stato di conservazione medio del materiale ligneo esaminato è abbastanza buono se paragonato alle caratteristiche solitamente riscontrate nel legno archeologico: la densità basale media rilevata è di $0,35 \text{ g/cm}^3$ a fronte di una densità basale media di letteratura per il larice di $0,56 \text{ g/cm}^3$. Conseguentemente la densità basale residua media è pari al 62%. Anche l'MWC medio (241%) indica uno stato di conservazione medio piuttosto buono, ma, tenendo conto dell'utilizzo specifico, non si può non ricordare come il comportamento meccanico di materiale così degradato debba considerarsi ridotto. Tra questi campioni anche quelli più degradati (C e D) mostrano in ogni caso un degrado di livello intermedio.

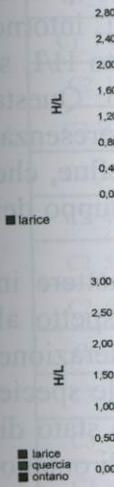
La situazione appare molto differente invece nel secondo cantiere, Rio delle Acque Dolci, dove è stata riscontrata una maggiore varietà di specie. In generale si riscontra una netta differenziazione nello stato di conservazione tra le specie: i campioni di ontano risultano tutti in cattivo stato di conservazione; quello apparentemente meglio conservato, il campione M, corrisponde all'immagine di destra in Figura 7Figura . I valori di MWC e di densità basale (conseguentemente anche di densità basale residua) sono influenzati dal generale collassamento delle cellule legnose: esso ha provocato la perdita di lumi cellulari a disposizione per l'acqua allo stato liquido e, conseguentemente, un aumento della densità apparente del legno. In realtà lo stato di conservazione generale è addirittura peggiore rispetto a quello degli altri campioni di legno di ontano. In questo caso è facilmente valutabile l'importanza di una diagnosi multidisciplinare; la sola valutazione di tipo fisico, molto speditiva, avrebbe fotografato una situazione di conservazione esattamente opposta rispetto alla realtà. Una situazione in qualche modo comparabile è quella relativa ai valori ottenuti per il secondo

provino del campione H. Il valore di MWC è estremamente basso, mentre il valore di densità basale è addirittura eccessivamente elevato, in maniera del tutto anomala, tanto che la densità basale residua risulta eccessivamente elevata, molto superiore al 100%.

Infine per quanto riguarda Rio San Martino (Tabella 2), si può affermare che i campioni, tutti di pino silvestre, sono in uno stato di conservazione molto uniforme: densità basale intorno a $0,2 \text{ g/cm}^3$, quindi circa il 40% della densità basale originaria. Potrebbe essere definito uno stato di conservazione compreso tra quello mediamente riscontrato sul larice e quello invece misurato sull'ontano, che è in ogni caso quello nelle condizioni peggiori. Riassumendo, si può affermare che non esiste una sufficiente continuità di specie nei diversi cantieri tale da consentire un adeguato confronto dei risultati che riguardano lo stato di conservazione misurato con metodi fisici. Dalla caratterizzazione chimica dei campioni prelevati in Rio Ca' di Dio, risulta subito evidente che in alcuni campioni la quantità di ceneri sia nient'affatto trascurabile, con valori mediamente superiori al 5% del peso del campione, tranne che per i pali E e F in cui tale valore si attesta attorno al 2%. Il valore delle ceneri per il legno di larice non degradato è normalmente dello 0,1% circa. Si può quindi comprendere come i risultati ottenuti in questo caso siano da imputare al prolungato periodo di interrimento dei campioni, durante il quale il sedimento ha permeato le cellule legnose, depositando sali, ossidi e gli altri composti inorganici che costituiscono le ceneri. Inoltre, mentre per la gran parte dei campioni il valore è comunque inferiore al 10-11%, per il provino MR3 del palo B esso risulta del 30% circa, e addirittura per il provino MT1 del tavolato A esso risulta superiore al 50%: ciò potrebbe aver influenzato tutte le misure basate su determinazioni gravimetriche, comprese quelle provenienti dalle analisi fisiche. Occorre notare che i campioni con maggiore contenuto di estrattivi acquosi (all'incirca 8% e 11%) sono quelli a maggiore contenuto di ceneri, ad indicare che in questo caso alcuni dei sali presenti all'interno del legno (e che costituiscono parte delle ceneri) vengono anche disciolti in acqua durante le estrazioni.

I risultati dei campioni prelevati nel cantiere del Rio delle Acque Dolci mostrano anche in questo caso un elevato contenuto di ceneri, compreso tra il 2% e l'8% tranne che per i provini CC3 (15% circa) e CC2 (70% circa), entrambi appartenenti al tavolato H. Occorre notare che la quantità mediamente inferiore di estrattivi acquosi (1%-3%) è stata riscontrata anche nei provini a maggiore contenuto di ceneri (CC2 e CC3 del tavolato H), ad indicare il fatto che in questo caso i residui inorganici non sono idrosolubili.

Per quanto
Martino, g
rispetto ag
campioni),
del palo S
contro 8,5%
In Figura
olocellulos
divisi per
riportato c
operazioni
Rio Ca' d
(tutti di p
Acque Do
3. Tutto c
valori risc



Informaz
del rapp
valore d
degradat
percentu

HLRR =

Per quanto riguarda, invece, i tre campioni di pino silvestre di Rio San Martino, gli estrattivi organici del palo R sono sensibilmente più elevati rispetto agli altri 2 pali (circa 7% per R contro il 4% circa per gli altri due campioni), inoltre il contenuto di ceneri, molto alto in tutti i casi, è nel caso del palo S superiore di circa 4 volte rispetto a quello del palo R (34,1% contro 8,5%).

In Figura 8 sono riportati, in forma grafica, i valori del rapporto tra olocellulosa e lignina (indicato con la sigla H/L) per i singoli campioni, divisi per cantiere così come fatto in precedenza. Nei vari grafici si è riportato come ordinata massima il valore relativo al legno non degradato, operazione che è risultata agevole per i campioni provenienti dal cantiere di Rio Ca' di Dio (tutti di larice, ordinata massima 2,8) e di Rio San Martino (tutti di pino, ordinata massima 2,7). Nel caso del cantiere di Rio delle Acque Dolci si è scelto invece di utilizzare un valore medio nominale pari a 3. Tutto ciò ha permesso di confrontare il valore di H/L nel legno sano con i valori riscontrati nei campioni veneziani.

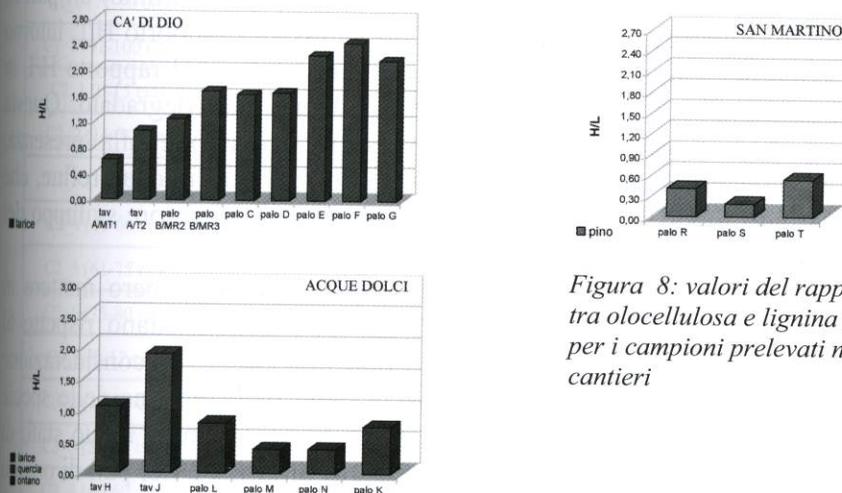


Figura 8: valori del rapporto tra olocellulosa e lignina (H/L) per i campioni prelevati nei cantieri

Informazioni qualitativamente analoghe possono essere ottenute se invece del rapporto H/L si utilizza il parametro HLRR, dato dal rapporto tra il valore di H/L per i vari campioni e il valore di H/L per il legno non degradato della stessa specie. In questo modo, HLRR è espresso in termini percentuali. Risulta in particolare:

$$HLRR = \frac{(H/L)_{WAW}}{(H/L)_{NDW}}$$

dove la sigla WAW indica per l'appunto i vari campioni di legno proveniente dai cantieri e NDW si

riferisce al legno non degradato della stessa specie di ogni campione. Dall'uso di questo parametro è emersa chiaramente una situazione di degrado diffusa, con valori del rapporto H/L generalmente inferiori al 60% del valore di riferimento (come valore di riferimento si può considerare quello del legno della stessa specie non degradato): fanno eccezione alcuni campioni di larice (ed in particolare i pali E, F e G del cantiere di Rio Ca' di Dio), in cui i valori di tale rapporto sono dell'ordine dell'80%. È possibile fare delle considerazioni anche sulla base del comportamento di alcune specie. In particolare, il tavolato di larice, in entrambi i cantieri in cui esso è stato analizzato (Rio Ca' di Dio e Rio delle Acque Dolci), è risultato in cattivo stato di conservazione, con valori del parametro HLRR dell'ordine del 40%, e con una certa variabilità all'interno delle varie porzioni di tavolato. Per inciso, il tavolato di quercia (trovato nel cantiere di Rio delle Acque Dolci), è in uno stato di conservazione sensibilmente migliore (HLRR del 60% circa). Interessante, sempre nel caso del cantiere di Rio Ca' di Dio, anche la differenziazione tra i pali di larice, fra i quali vi è una certa diversificazione tra i pali D, C e B (e all'interno di quest'ultimo) e i pali E, F e G. Infatti mentre i primi presentano un valore del rapporto H/L intorno al 60% circa del valore di riferimento, per questi ultimi il rapporto H/L si attesta intorno al 80% circa del valore del legno non degradato. Questa differenza di comportamento potrebbe essere imputabile alla presenza, proprio in prossimità dei pali B, C e D di uno scarico di acque reflue, che può avere dato luogo alle migliori condizioni per un maggiore sviluppo dei microrganismi responsabili del degrado del legno.

Riguardo alle altre specie, le analisi effettuate sembrerebbero mettere in evidenza la minore durabilità del pino silvestre e dell'ontano rispetto al larice, pur se in questa valutazione non può non pesare la considerazione fatta in precedenza rispetto alla limitatezza della distribuzione delle specie nei vari cantieri. Della quercia si è già detto in precedenza: il suo stato di conservazione è migliore di quello del tavolato di larice e dei pali di ontano e pino, e questo nonostante il tavolato di larice, a differenza di quello di quercia, non sia a diretto contatto né con i pali né tanto meno col sedimento.

3.2 I terreni di fondazione

Durante la fase di campionamento è stato possibile effettuare sui terreni alcune misure direttamente in situ, come il pH e l'Eh (potenziale ossido-riduttivo). Le misure di pH hanno registrato valori tipici della condizione di leggera alcalinità: i valori di pH tendono leggermente a decrescere man mano che aumenta la profondità. Nel caso specifico delle palificazioni, il

terreno si tro
 dunque di qu
 più riducente
 l'ossigeno atr
 di forte riduz
 infatti, i valo
 mV (Tabella

Campioni (profondità prelievo)
C1_1 (0-10)
C1_2 (10-25)
C1_3 (26-40)
C1_4 (41-55)
C1_5 (56-70)
C1_6 (71-90)
C1_7 (91-100)
C2_1 (0-15)
C2_2 (16-30)
C2_3 (31-45)
C2_4 (46-60)
C2_5 (61-75)
C2_6 (75-80)
C3_1 (0-17)
C3_2 (18-30)
C3_3 (31-45)
C3_4 (46-60)
C3_5 (61-75)

Nei tre siti si
 3-4%: tale
 probabilmente
 all'accumulo
 terreni prelev

terreno si trova in una condizione di completa immersione in acqua e dunque di quasi totale assenza di ossigeno che comportano una condizione più riducente rispetto ai terreni che sono maggiormente a contatto con l'ossigeno atmosferico. Le misure di Eh raccolte in situ confermano lo stato di forte riduzione in cui si trova il terreno a ridosso dei pali di fondazione: infatti, i valori negativi di Eh registrati oscillano mediamente fra -16 e -90 mV (Tabella 3).

Campione (profondità di prelievo)	pH	Eh (mV)	Sostanza Organica %	Calcare Totale %	Sabbia %	Argilla %	Limo %
C1_1 (0-10 cm)	8,43	-90	3,90	13,40	34,9	41,9	23,2
C1_2 (10-25 cm)	8,39	-90	1,20	9,90	32,8	43,5	23,7
C1_3 (26-40 cm)	8,20	-68	2,90	13,30	33,8	41,4	24,8
C1_4 (41-55 cm)	8,20	-78	3,80	13,80	34,6	40,8	24,6
C1_5 (56-70 cm)	8,25	-81	4,30	14,30	37,2	40,9	21,9
C1_6 (71-90 cm)	8,16	-83	4,50	12,90	50,4	35,8	13,8
C1_7 (91-100 cm)	8,05	-77	4,80	13,80	51,9	36,9	11,2
C2_1 (0-15 cm)	nd	nd	3,20	11,20	40	40,1	19,9
C2_2 (16-30 cm)	nd	nd	3,50	11,60	38,9	38,7	22,4
C2_3 (31-45 cm)	nd	nd	3,60	14,80	39,3	37,5	23,2
C2_4 (46-60 cm)	nd	nd	3,80	15,20	37,5	37,6	24,9
C2_5 (61-75 cm)	nd	nd	3,20	14,70	43,7	31,2	25,2
C2_6 (75-80 cm)	nd	nd	4,40	13,80	46,3	39,9	13,8
C3_1 (0-17 cm)	7,40	-21	1,90	8,50	40,9	36,6	22,5
C3_2 (18-30 cm)	7,46	-27	2,00	10,30	38,4	35,5	26,1
C3_3 (31-45 cm)	7,35	-31	2,20	8,10	39,8	36	24,2
C3_4 (46-60 cm)	7,30	-20	2,40	9,40	45,6	34,8	19,6
C3_5 (61-75 cm)	7,26	-16	3,20	10,70	49,8	32	18,2

Tabella 3: risultati delle analisi sul terreno delle fondazioni

Nei tre siti si riscontra una percentuale di sostanza organica mediamente del 3-4%: tale valore aumenta con l'aumentare della profondità e ciò è probabilmente dovuto ai depositi lagunari ricchi di materia organica ed all'accumulo e alla stratificazione di materiale organico nei canali. Tutti i terreni prelevati contengono mediamente tra l'8 e il 15% di carbonati: la

quantità di calcare non sembra avere una correlazione diretta con la profondità di prelievo, come invece evidenziato per la sostanza organica. Un'elevata dotazione di calcare, come nei casi registrati in ambiente marino, ha come principale effetto l'aumento del pH fino a valori di 8,5 (è possibile trovare riscontro confrontando questo dato con le misure di pH effettuate in situ).

Basandosi sul triangolo delle classi tessiturali proposto dal servizio del suolo degli Stati Uniti (USDA) che riporta le varie combinazioni tra sabbia, limo e argilla, è possibile valutare la tessitura globale dei campioni di suolo prelevati a ridosso delle palificazioni. In media, tutti i terreni presentano dei valori tali da poter classificare il suolo nelle classi *franco argilloso* e *franco argilloso sabbioso* (Figura 9). Dai dati ottenuti, all'aumentare della profondità (circa 1 m nel primo caso, 75 cm nel secondo e 80 cm nel terzo) si riscontra un generale aumento della quantità percentuale di sabbia, mentre diminuiscono la percentuale di argilla e di limo, che costituiscono la parte di suolo con dimensioni più ridotte.

Tramite analisi XRF è emerso che in tutti i campioni di suolo analizzati è stata rilevata la presenza di elementi quali calcio, ferro, silicio, potassio, alluminio, zolfo e tracce di titanio, cromo e manganese (Figura 10). In generale, dagli spettri XRF registrati si possono trarre considerazioni simili. L'elemento calcio, il più abbondante, è probabilmente riconducibile alla presenza di carbonato di calcio, CaCO_3 , come suggerito anche dalle alte percentuali di calcare totale riscontrate in tutti i campioni. Il ferro, anch'esso presente sotto forma di carbonato, siderite FeCO_3 , è ipotizzabile anche come pirite, solfuro di ferro FeS : va sottolineato che la formazione di FeCO_3 e FeS richiede delle condizioni di potenziale ossido-riduttivo negativo (ambiente riducente), quali quelle riscontrate in fase di campionamento dei terreni. Elementi come alluminio e silicio sono i costituenti di materiali argillosi, mentre titanio, potassio, cromo e manganese sono tipici elementi presenti nei terreni. Come evidenziato per l'analisi XRF, i risultati ottenuti tramite analisi FT-IR per le differenti carote di terreno sono piuttosto simili (Figura 11). I campioni mostrano la presenza di carbonati, in particolare carbonato di calcite, dolomite e di siderite, di componenti silicatiche-argillose (come l'illite) e di materiale organico, già riscontrato in seguito alla determinazione della sostanza organica. Anche le analisi termogravimetriche forniscono risultati piuttosto somiglianti (Figura 12). Tutti i termogrammi ottenuti mostrano una perdita di massa nell'intervallo fra 650°C e 800°C e 350°C e 500°C , attribuibile a calcite e dolomite. Inoltre, nell'intervallo fra i 300°C e i 600°C è riscontrabile la presenza di

silicati: in part
quarzo (SiO_2)
notare anche l
e si trova in a
tutti i campi
carbonato di
rilevata la pr
(Figura 13).

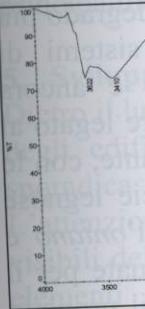
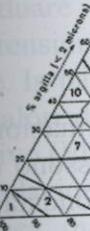


Figura 11:

silicati: in particolare, intorno ai 570-600°C si osserva la trasformazione del quarzo (SiO_2) che modifica la sua struttura cristallina da α a β . È possibile notare anche la presenza di tiosolfato di sodio $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ (48°C), che si forma e si trova in ambiente riducente come quello di campionamento. Infine, in tutti i campioni è stata confermata tramite analisi XRD la presenza di carbonato di calcio sotto forma di calcite e di dolomite: è stata anche rilevata la presenza di silicati, fra cui albite, sepiolite e illite, e di quarzo. (Figura 13).

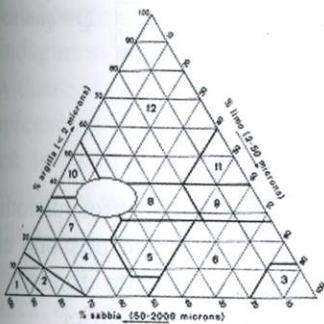


Figura 9 Triangolo delle classi tessiturali secondo il servizio del suolo degli Stati Uniti.: nella zona evidenziata rientrano i campioni analizzati, considerando la media del loro contenuto in sabbia, limo e argilla.

Legenda:

- 1 Sabbioso. 2 Sabbioso franco. 3 Limoso.
- 4 Franco sabbioso. 5 Franco. 6 Franco limoso.
- 7 Franco sabbioso argilloso. 8 Franco argilloso.
- 9 Franco limoso argilloso. 10 Argilloso sabbioso. 11 Argilloso limoso. 12 Argilloso

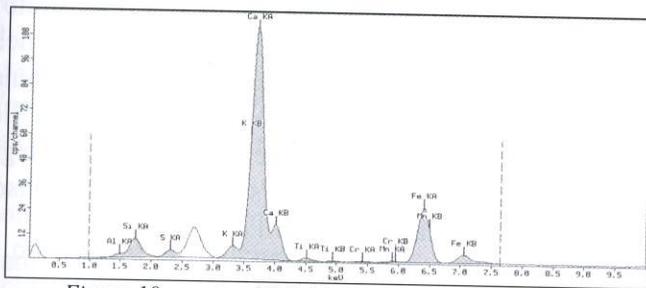


Figura 10 : spettro XRF del campione C1_1 (0-10 cm)

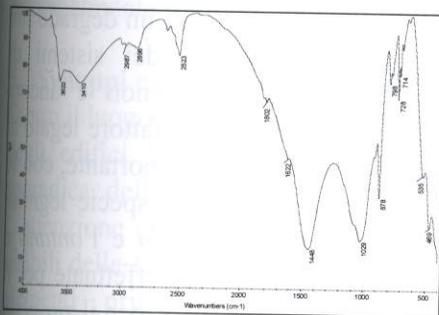


Figura 11: spettro FT-IR del campione C1_3

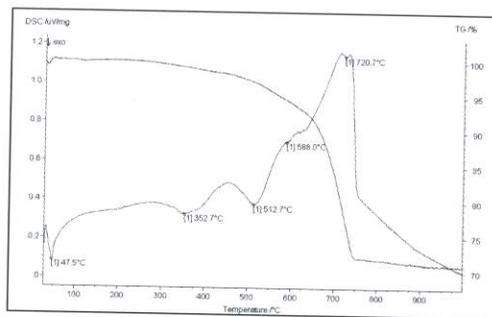


Figura 12: termogramma del campione C1_1

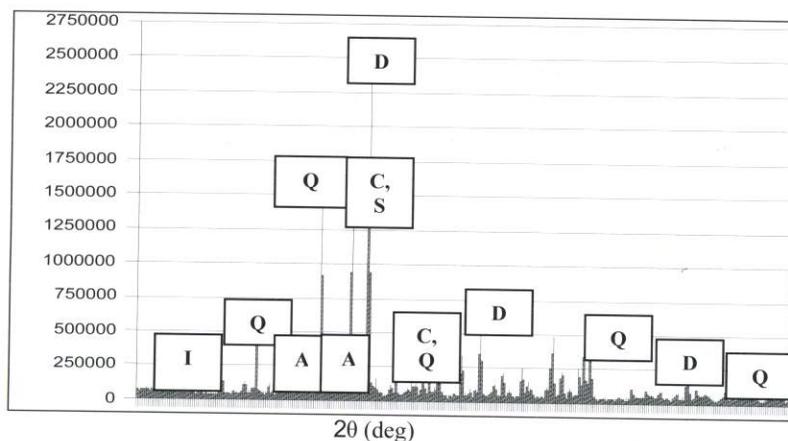


Figura 13:
diffratogramma
del campione C
1_5

Legenda:
A= albite
C= calcite
D= dolomite
I= illite
S= sepiolite
Q= quarzo

4. Conclusioni

La ricerca ha consentito di individuare una serie di informazioni sul comportamento del sistema delle fondazioni veneziane che possono essere considerati un inizio per una conoscenza scientificamente fondata sulle condizioni e le caratteristiche delle fondazioni lignee degli edifici.

Il protocollo di campionamento messo a punto si è dimostrato affidabile ed ha consentito di ottenere risultati importanti sia in situ che nelle successive indagini di laboratorio, sia per i prelievi lignei che per il terreno. Allo stesso modo, i parametri relativi al sistema nel suo complesso (legno-terreno-acqua), che sono stati scelti per valutare il degrado del legno al fine di giungere ad una diagnosi complessiva sullo stato di conservazione del materiale legnoso, sono risultati attendibili e significativi.

Le analisi eseguite sul materiale legnoso hanno confermato che, nelle condizioni in uso nelle fondazioni di Venezia, è soggetto a processi di degrado con cinetiche apparentemente lente, che dovranno essere ulteriormente studiate. È possibile confermare la presenza di un degrado più o meno marcato a carico della componente legnosa dei sistemi di fondazione esaminati, ma con le conoscenze acquisite non è ancora possibile mettere in relazione l'intensità del degrado con il fattore legato al tempo di messa in opera del materiale ed infine, cosa più importante, con le effettive condizioni statiche del sistema di fondazione. Le specie legnose individuate sono state il *larice*, il *pino silvestre*, la *quercia* e l'*ontano* e rientrano tra quelle già determinate in indagini precedenti effettuate per il campanile dei Frari e quello di S. Stefano a Venezia [6] e per il progetto *Bacpoles* [10]. Il degrado è risultato essere prevalentemente di natura

biotica; gli
mezzo di an
degradano il
rendere assa
naturale del
di resistere
confermata
risaputo che
mentre le
probabilmen
Le indagini
individuare
comprensio
lignee. In p
con valori
negativo (E
di fondazio
organica d
carbonica
carbonato
contenuto i
franco arg
USDA. Su
ferro, silic
manganese
carbonati,
formazio
e di quar
principalme

5. Svilupp

Dietro il l
degli edif
sporadica
L'attenzio
visibili de
elementi
difficilme
che l'im

biotica; gli agenti biotici del degrado che è stato possibile individuare per mezzo di analisi microscopiche sono i batteri da erosione. Questi organismi degradano il legno in condizioni di quasi totale assenza di ossigeno, tali da rendere assai difficile lo sviluppo dei funghi da carie soffice. La durabilità naturale del legno nei confronti degli attacchi batterici, cioè la sua capacità di resistere all'attacco da parte di questi agenti di degrado, sembra essere confermata come caratteristica dipendente dalla specie legnosa. È, infatti, risaputo che in genere le latifoglie sono più sensibili all'attacco dei batteri mentre le conifere vengono considerate maggiormente resistenti, molto probabilmente grazie alla differente struttura della loro lignina.

Le indagini svolte sui terreni delle fondazioni in esame hanno permesso di individuare i parametri più significativi per la caratterizzazione e la comprensione del comportamento del terreno in relazione alle palificazioni lignee. In particolare è emersa una generale condizione di leggera alcalinità, con valori di pH mediamente di 8. Il potenziale ossido-riduttivo ha valore negativo (Eh), determinando una condizione di riduzione. Inoltre, nei terreni di fondazione studiati è stata riscontrata una quantità notevole di sostanza organica di varia ed ampia provenienza e una percentuale di anidride carbonica CO_2 compresa fra il 10 e il 15%, con valori dominanti del carbonato di calcio (CaCO_3). Le analisi dimensionali in relazione al contenuto in sabbia, limo e argilla permettono di classificare il terreno come *franco argilloso* e *franco argilloso sabbioso* secondo la classificazione USDA. Su tutti i campioni è stata rilevata la presenza di carbonio, calcio, ferro, silicio, potassio, alluminio, zolfo e tracce di titanio, cromo e manganese con valori molto simili. Le FT-IR confermano la presenza di carbonati, in particolare di calcite, dolomite e di siderite FeCO_3 (la cui formazione richiede condizioni di riduzione, quali quelle evidenziate in situ) e di quarzo. Dalle analisi XRD è emerso che la parte argillosa è principalmente riconducibile ad illite, albite e sepiolite.

5. Sviluppi e prospettive della ricerca

Dietro il luogo comune della *inalterabilità nel tempo* delle fondazioni lignee degli edifici veneziani si cela in realtà una conoscenza superficiale e sporadica dello stato di conservazione dei pali su cui *poggia* la città. L'attenzione che viene data alla conservazione e manutenzione delle parti visibili della fabbrica (strutture, rivestimenti, coperture) non si ritrova negli elementi primari che sostengono l'edificio, oltretutto invisibili e difficilmente accessibili; ciò forse in ragione della schematica supposizione che l'immersione nel fango e la mancanza d'aria ne preservino la

consistenza. Con questa ricerca si è iniziato invece a dimostrare che così non è, o potrebbe non essere, o che comunque possono essere presenti situazioni anche molto diverse tra un edificio e l'altro, e tra una zona e l'altra della città.

La ricerca, basandosi sui pochi casi indagati in passato, e sui limitati campionamenti che è stato possibile effettuare, ha messo in evidenza la presenza – a volte importante – di un degrado delle palificazioni, con differenze anche significative tra diversi edifici e diverse tipologie del legno adoperato. Sono state trovate le prime correlazioni tra i parametri che caratterizzano il sistema palo-terreno-acqua, ciò che rappresenta l'inizio della conoscenza del reale stato di degrado del legno che potrà permettere di effettuare anche previsioni sulla stabilità nel tempo dell'intera fabbrica. A tal fine è necessario aumentare la casistica di studio, spingendo istituzioni, professionisti, imprese a indagare sulle palificazioni che venissero alla luce in cantieri di restauri, sia di edifici pubblici che privati, come di rii e fondamente; ma anche effettuare studi e sondaggi specifici su edifici o zone della città di particolare interesse.

Si ritiene necessario, oltre ad un approfondimento delle competenze, l'impiego di ulteriori metodi di indagine non distruttiva, valutando altre esperienze a riguardo, e la possibilità che riescano a fornire risposte alle problematiche individuate.

Acknowledgements:

Questa ricerca è finanziata dal Corila (Consorzio per il coordinamento delle ricerche sul sistema lagunare di Venezia) e fa parte del Secondo Programma di ricerca del Corila (Area dell'Architettura e dei Beni Culturali).

BIBLIOGRAFIA

- [1] – SCAMOZZI V. (1615), *L'idea dell'architettura universale*, Venezia
- [2] - GOTTARDI G., LIONELLO A., MODENA C. (2008) , *Influenza delle caratteristiche di fondazione sulla stabilità dei campanili di S. Stefano e dei Frari a Venezia Metodi e strategie di progetto* in Quaderni IUAV:54 Geologia e progettazione nel centro storico di Venezia – La riqualificazione della città e dei territori – Il Poligrafo – Padova 2008 pp. 79-98
- [3] – ZUCCOLO G. (1975), *Il restauro statico nell'architettura di Venezia*, Istituto Veneto di Scienze Lettere ed Arti, Venezia
- [4] – STEFINLONGO G.B. (1994), *Pali e palificazioni della laguna di Venezia*, il Leggio, Chioggia (Ve)

- [5] - KLAAS International
- [6] - BERTO PIGNATELLI *historical for* Delhi, Eds. P
- [7] - UNI archeobotanic
- [8] – TAPPI, Lexington AM
- [9] – MINIS *Metodi di ana*
- [10] - GELB *degraded bac* 32.
- [11] – BROW Interscience P
- [12] – LIONI *restauro. Il ca* Soprintendenz

- [5] - KLAASSEN R. K., EATON R.A., LAMERSDORF N. (2008), Editorial, *International Biodeterioration & Biodegradation* 61, pag. 1-2.
- [6] - BERTOLINI C., CESTARI L., MARZI T., MACCHIONI N., PIZZO B., PIGNATELLI O. (2006), *New methodological approaches to the survey on timber historical foundations* in: "Structural analysis of historical constructions", New Dehli, Eds. P.B. Lourenco, P. Roca, C. Modena, S. Agrawal, pag. 335 – 342.
- [7] - UNI 11205:2007. Beni culturali. Legno di interesse archeologico ed archeobotanico. Linee guida per la caratterizzazione.
- [8] - TAPPI, Standards, Technical Association of Pulp and Paper Industry 360 Lexington AM., New York, T222.
- [9] - MINISTERO DELLE POLITICHE AGRICOLE E FORESTALI (2005), *Metodi di analisi mineralogica del Suolo*, Franco Angeli, Roma
- [10] - GELBRICH J., MAI C., MILITZ H. (2008), *Chemical changes in wood degraded bacteria*, *International Biodeterioration & Biodegradation* 61, pag. 24 – 32.
- [11] - BROWNING B.L. (1967), *Methods of wood chemistry*, Vol. I, New York, Interscience Publishers, John Wiley
- [12] - LIONELLO A. (a cura di) (2008), *Reficere. Tecniche e linguaggio del restauro. Il campanile di Santa Maria dei Frari a Venezia in Venezia*, Electa e Soprintendenza per i Beni Architettonici e Paesaggistici di Venezia e Laguna

SCIENZA E BENI CULTURALI

XXV. 2009

CONSERVARE E RESTAURARE IL LEGNO Conoscenze, Esperienze, Prospettive

Atti del convegno di studi
Bressanone 23 - 26 giugno 2009

a cura di Guido Biscontin e Guido Driussi

Organizzazione:

Università degli Studi di Padova, *Dipartimento di Scienze Chimiche*;
Università Cà Foscari di Venezia, *Dipartimento Scienze Ambientali*;
Università degli Studi di Genova, *Dipartimento di Scienze per l'Architettura DSA e Scuola di Specializzazione in Restauro dei Monumenti*;
Università degli Studi di Brescia, *Centro di Studio e Ricerca per la Conservazione ed il Recupero dei Beni Architettonici ed Ambientali-Dipartimento di Ingegneria Civile*;
Università Mediterranea degli Studi di Reggio Calabria, *Dipartimento Patrimonio Architettonico ed Urbanistico*;
Politecnico di Milano, *Dipartimento di Scienza e Tecnologie dell'Ambiente Costruito (BEST)*;
Ministero per i Beni e le Attività Culturali, *Direzione Generale per i beni architettonici, storico artistici ed etnoantropologici*;
Consorzio I.N.S.T.M.

Enti Patrocinatori:

Ministero per i Beni e le Attività Culturali; Istituto Centrale del Restauro; Consiglio Nazionale delle Ricerche; ICCROM; Amministrazione Comunale di Bressanone, Azienda di Cura e Soggiorno di Bressanone.

Con la collaborazione di:

Arcadia Ricerche Srl, Colorificio San Marco Spa