

INDAGINE DIAGNOSTICA SU STRUTTURE LIGNEE ANTICHE

Note introduttive

1. Specificità delle strutture lignee

Le strutture lignee che più frequentemente ricorrono negli edifici antichi sono le *coperture* ed i *solai*. Esse sono diffuse in tutta Italia con una ampia gamma di tipologie strutturali, costituendo una importante e insostituibile parte del patrimonio architettonico nazionale.

La natura della materia prima impiegata in tali strutture è caratterizzata da una *elevata variabilità* in termini di specie legnosa, tipo di lavorazione, differenziazione e distribuzione durame/alburno, tipo e distribuzione di difetti, anomalie, ecc., tanto da risultare in una altrettanto ampia variabilità sia delle proprietà fisico-meccaniche che della durabilità degli elementi lignei che le costituiscono.

Come ogni altra struttura, anche le strutture lignee nel corso della loro vita sono esposte all'azione del degrado. Tali strutture, tuttavia, oltre al *degrado strutturale* vero e proprio (per rotture, sconessioni, deformazioni eccessive, ecc.) sono esposte anche ad un altro tipo di degrado, talvolta meno appariscente e più difficilmente quantificabile, direttamente collegato con la natura organica del materiale: il *degrado biologico* (carie, attacchi da insetti xilofagi), la cui gravità è in stretto rapporto con la sua estensione e posizione nella struttura.

Varie e molteplici sono le conseguenze del degrado. Tra le principali possono essere ricordate la compromissione o la perdita della testimonianza e del valore storico della struttura, della sua utilizzabilità e della sua sicurezza statica. Per queste ragioni, le istanze di conservazione spesso impongono di intervenire sulla struttura allo scopo di porre rimedio ai danni prodotti dal degrado.

Una delle fasi più critiche del programma di conservazione o di ripristino delle condizioni di sicurezza è senza dubbio la progettazione degli interventi di restauro, consolidamento o riparazione, la quale deve essere basata su un adeguato supporto conoscitivo relativamente alle condizioni di conservazione della struttura.

Ispezione visiva di una copertura



Ispezione visiva di un solaio





2. Scopo e utilità della diagnostica

Tanto la verifica statica della struttura quanto la progettazione vera e propria degli interventi di restauro presuppongono la *conoscenza quanto più possibile completa e dettagliata dello stato di fatto*. Da questa infatti dipendono sostanzialmente la *affidabilità* e la *probabilità di successo* della progettazione.

La diagnostica applicata alle strutture lignee ha lo scopo di conferire certezza ed affidabilità alla progettazione del restauro attraverso la determinazione oggettiva dello *stato di conservazione* e della *funzionalità strutturale*, fornendo informazioni utili ad eliminare una serie di fattori di incertezza tra i quali:

- la qualità resistente del legno (specie legnosa, tipo, dimensioni e distribuzione dei difetti e delle anomalie...)
- la presenza eventuale di degrado biologico (tipo di degrado, sua distribuzione e possibile evoluzione nel tempo; sezione resistente residua)
- la presenza eventuale di danni di tipo meccanico (rottture, sconnessioni, deformazioni eccessive, ecc.).

3. Procedimento di indagine

L'indagine diagnostica si esegue su ogni singolo elemento strutturale ed è articolata in tre fasi:

Fase 1: Ispezione visiva, con descrizione particolareggiata di ciascun elemento della struttura, identificazione della specie legnosa, valutazione dei difetti e delle anomalie presenti, localizzazione e quantificazione delle alterazioni subite nel corso del tempo, valutazione dello stato dei collegamenti.

Fase 2: Analisi strumentale, eseguita mediante tecniche diagnostiche non distruttive applicate *"in situ"*, ha lo scopo di integrare le analisi condotte visivamente, con particolare riferimento alle parti non visibili o non accessibili della struttura (tipicamente gli appoggi sulle murature e le parti interne o nascoste degli elementi); tra queste, l'analisi cosiddetta *"resistografica"* costituisce allo stato attuale la tecnica meglio rispondente ai requisiti di affidabilità, praticità di uso ed economicità richiesti per essere realmente utile ed applicabile ai fini diagnostici.

Fase 3: Elaborazione dei risultati e predisposizione della relazione tecnica comprendente: classificazione secondo la qualità resistente e stima della sezione resistente residua di ogni elemento, identificazione e localizzazione delle sezioni di minima resistenza, stima dello stato e della efficienza dei collegamenti, visualizzazione grafica sintetica dei risultati.

Condizioni necessarie per la fattibilità di una indagine diagnostica sono: l'accessibilità della struttura in ogni sua parte visibile nel rispetto delle norme sulla sicurezza e la prevenzione degli infortuni, la pulizia e la visibilità delle superfici, la adeguata illuminazione dell'ambiente di lavoro, la disponibilità di disegni o rilievi al fine di permettere una adeguata restituzione dei risultati.



Metodo di indagine e costi

L'attività viene svolta come servizio per conto di tecnici che operano nel settore del restauro, del recupero e della manutenzione edilizia. Essa ha lo scopo di fornire le informazioni necessarie per la elaborazione dei progetti di restauro/adeguamento, per la verifica della sicurezza di esercizio della strutture, per la elaborazione dei piani di manutenzione. Le tipologie di committenti comprendono principalmente studi di architettura e ingegneria, imprese, Enti Pubblici e Privati, società di diagnostica.

In generale il servizio costituisce un supporto indispensabile per il tecnico che deve decidere se e quali interventi effettuare e per quantificare questi stessi interventi, utilizzando al meglio le risorse disponibili (economiche, tecniche, organizzative).

Il lavoro di indagine sul cantiere (ispezione) viene svolto da una o più squadre di due persone, composte ciascuna da un Dottore in Scienze Forestali specializzato in Tecnologia del Legno e da un Ingegnere Civile. Le squadre sono fornite di tutte le attrezzature specifiche indispensabili per l'esecuzione dell'indagine diagnostica, compresi i necessari dispositivi antinfortunistici individuali. In funzione dalle condizioni di accessibilità della struttura, possono essere necessari eventuali mezzi od opere (ponteggi fissi o mobili, piattaforma aerea, ecc.) per consentire il raggiungimento in sicurezza di ogni parte della struttura da ispezionare.

Nel caso di strutture complesse (capriate) l'indagine viene eseguita su ogni elemento della capriata.

I risultati dell'indagine sono riportati normalmente sia in forma tabulare che grafica. Attualmente è in corso di definizione una norma italiana UNI-NORMAL che nella sostanza corrisponde all'approccio sopra descritto.

Il **costo** dell'indagine dipende dalla sua complessità. Mediamente una squadra (2 persone) costa circa 1.550 Euro al giorno + IVA, escluso le spese di trasferta e i costi relativi agli eventuali mezzi od opere necessari per rendere accessibili le strutture. Il costo dell'indagine è computato sulla base del numero di giornate di cantiere. Esso comprende anche tutto il lavoro di elaborazione, restituzione dei dati e stesura della relazione tecnica.

Negli ultimi anni sono stati svolti numerosi lavori, alcuni dei quali anche abbastanza impegnativi (fino a 20 giornate/squadra) su diverse tipologie strutturali e nelle più svariate condizioni di accessibilità.

A titolo di esempio possiamo citare i seguenti casi:

Lavoro/Commessa	Tipologia	Consistenza	Giornate di cantiere (squadra di due persone)
Palazzo della Provincia (Pisa)	copertura	13 capriate + 266 travi	12 giornate
Cattedrale di Arezzo	copertura	17 capriate	6 giornate
Castello di Rozzano (Milano)	solai	75 travi + 1156 travicelli	17 giornate
Palazzo degli Istituti Culturali (Comune di Forlì)	solai	85 travi	6 giornate

Nelle strutture ordinarie, in condizioni di accessibilità buona, si possono ispezionare in media 2-5 capriate di 5-15 m di luce o 4-10 travi di 5-10 m di luce al giorno.

La squadra è totalmente autonoma per quanto riguarda lo svolgimento del proprio lavoro; a seconda dei casi può essere necessaria l'assistenza di una impresa per la fornitura e/o la messa in



opera di ponteggi o quant'altro necessario per assicurare l'accessibilità alla struttura nel rispetto delle norme di sicurezza.

In genere per lavori particolari o impegnativi, è necessario un nostro sopralluogo preliminare allo scopo di programmare l'impegno di mezzi e persone e quantificare i costi dell'indagine.

L'indagine diagnostica estesa a tutti gli elementi della struttura consente di ottenere i massimi vantaggi in termini di affidabilità della verifica statica e di accuratezza nella pianificazione del lavoro; essa inoltre permette la riduzione degli interventi allo stretto necessario, riduce al minimo gli imprevisti in corso d'opera e fornisce maggiori garanzie circa l'opportunità e l'esito degli interventi, garantendo nel complesso una elevata probabilità di successo del progetto di restauro.

L'indagine diagnostica costituisce la premessa di qualsiasi intervento affidabile e rispettoso dell'integrità del manufatto. Essa è necessaria in tutti i casi in cui vi siano specifiche esigenze di conservazione (edifici monumentali e edifici soggetti a vincolo architettonico in genere), oppure quando si desidera ripristinare l'uso di edifici abbandonati da lungo tempo. Essa è inoltre necessaria quando siano richiesti interventi di adeguamento statico, quando sia previsto un mutamento di destinazione d'uso, oppure nel caso di edifici danneggiati da eventi sismici. Anche i piani di manutenzione debbono prevedere uno o più interventi diagnostici programmati. Gli utenti tipici, oltre ai progettisti, sono i proprietari o gestori di immobili, le imprese di restauro e manutenzione, le soprintendenze.

Note tecniche esplicative

- 1) Ispezione visiva:** Viene effettuata osservando direttamente la superficie esterna degli elementi e mettendo in evidenza tutte le particolarità che hanno importanza ai fini dell'indagine (caratteri macroscopici, caratteri morfologici, difetti e anomalie varie). Nel caso che attraverso la osservazione dei soli caratteri macroscopici sia impossibile o dubbia l'identificazione della specie legnosa, viene prelevato un campione per la successiva analisi microscopica in laboratorio. I difetti presi in considerazione sono quelli che condizionano le proprietà meccaniche del legno (nodi, fessurazioni, deviazione della fibratura, ecc.). Di questi viene valutata la localizzazione e l'estensione. Per quanto riguarda il degrado biologico si fa riferimento principalmente agli attacchi da parte degli insetti xilofagi e dei funghi della carie, responsabili di gravi diminuzioni della resistenza del legno.
- 2) Analisi resistografica:** Questa analisi è sostanzialmente di tipo non distruttivo e viene effettuata "in situ", cioè direttamente sul materiale in opera, mediante un particolare strumento denominato RESISTOGRAPH®. Si tratta fondamentalmente di uno strumento capace di misurare la resistenza opposta dal legno alla penetrazione di una punta azionata da un sofisticato trapano. La punta, che ha un diametro di circa 3 mm, è dotata di un movimento combinato di rotazione e di avanzamento a velocità costante. Dato che il foro lasciato dallo strumento ha un diametro relativamente piccolo rispetto alle normali sezioni degli elementi strutturali, il danno prodotto può essere considerato trascurabile. Lo strumento restituisce dei grafici (diagrammi), denominati "profili", nei quali sull'asse delle ordinate è riportata la resistenza (espressa mediante una unità di misura arbitraria) e sull'asse delle ascisse la profondità di penetrazione (espressa in millimetri). I profili del legno normale hanno un andamento caratteristico che dipende dalla specie legnosa e dalla diversa densità del legno nelle parti primaticce e tardive degli anelli di accrescimento. Lo strumento fornisce indicazioni sulle caratteristiche del legno (compresi difetti, anomalie e alterazioni) in punti particolari dell'elemento. Lo strumento è particolarmente utile in tutti i casi in cui siano presenti danni da insetti e/o funghi della carie, specialmente nelle zone non visibili o non accessibili (vedi ad

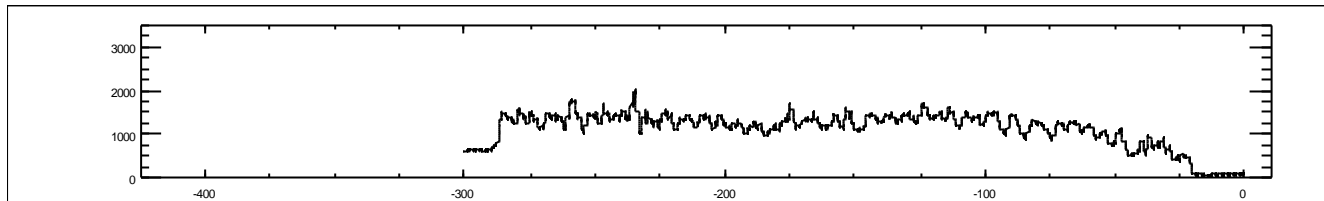


esempio l'estremità delle travi inserite nelle murature). Con questa tecnica è possibile non soltanto localizzare e quantificare i danni di natura biotica ma anche valutare le dimensioni delle sezioni laddove non vi siano altre possibilità di accertamento.

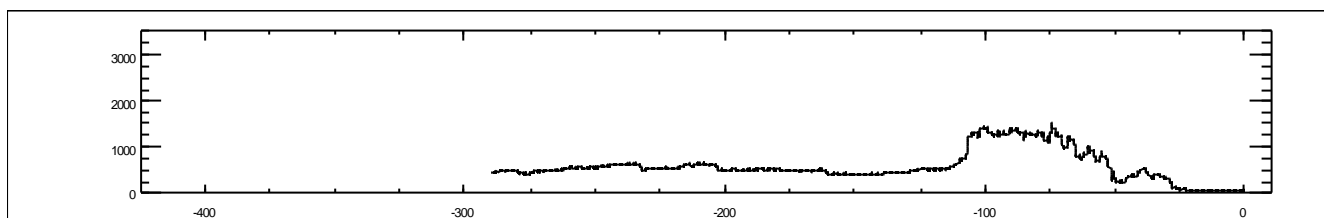
- 3) **Classificazione secondo la qualità resistente:** La classificazione dei vari elementi lignei viene effettuata secondo i criteri stabiliti nella Tabella 1 (Classificazione secondo GIORDANO); tale sistema di classificazione prevede la attribuzione di ciascun elemento strutturale ad una particolare "classe di qualità resistente", denominata "categoria", alla quale corrispondono le caratteristiche di resistenza ed elasticità riportate nella Tabella 2, dati questi indispensabili per i calcoli di verifica statica.
- 4) **Stima della sezione resistente residua:** Nei casi in cui sia stato osservato un danno di natura biotica (attacco da insetti, carie) l'indagine diagnostica permette di quantificare sia la gravità che l'estensione del danno. Oltre certi limiti l'apporto in termini di capacità portante della parte di legno interessata dall'attacco viene considerato nullo. Per tale ragione la sezione originaria dell'elemento viene diminuita opportunamente (sezione resistente residua) e di questa diminuzione deve essere necessariamente tenuto conto nei calcoli di verifica strutturale.
- 5) **Identificazione e localizzazione delle sezioni di minima resistenza:** Gli elementi strutturali talvolta possono presentare localmente, a livello di una o più sezioni, una particolare concentrazione di difetti (nodi, fessurazioni, deviazione della fibratura, ecc.) che nell'insieme provocano una sensibile riduzione della resistenza. Tali sezioni costituiscono dei punti di indebolimento strutturale in corrispondenza dei quali il rischio di rottura aumenta notevolmente, in dipendenza delle sollecitazioni alle quali gli elementi strutturali sono sottoposti.
- 6) **Stima dello stato e della efficienza dei collegamenti:** La capacità portante e la stabilità di una struttura lignea, soprattutto se questa è di tipo complesso, dipendono non soltanto dalla qualità resistente dei singoli elementi strutturali che la compongono ma anche dalla efficienza con la quale i carichi vengono trasmessi da un elemento strutturale all'altro. La valutazione dello stato dei collegamenti, di qualsiasi natura essi siano (semplice appoggio, incastri di vario tipo, staffature metalliche, imbullonature, chiodature, fasciature, tirantature, ecc.), viene effettuata mediante accurata osservazione delle condizioni del legno e delle eventuali altre parti non legnose al fine di determinare le caratteristiche geometriche e dimensionali del collegamento, lo stato di conservazione dei materiali che lo costituiscono e eventualmente il suo stato tensionale.

Profili resistografici relativi a prove eseguite su travi di solaio

Profilo 1	Quercia caducifolia (rovere/farnia)	45° rispetto all'asse della trave in corrispondenza dell'innesto nella muratura	Profilo regolare, lunghezza dell'appoggio stimata pari a 19 cm
------------------	-------------------------------------	---	--



Profilo 2	Quercia caducifolia (rovere/farnia)	45° rispetto all'asse della trave in corrispondenza dell'innesto nella muratura	Diminuzione di resistenza nei primi 2 cm di profondità per attacco da insetti xilofagi. Diminuzione notevole di resistenza a partire dalla distanza di circa 6 cm dal filo muro per carie
------------------	-------------------------------------	---	---



Indagine strumentale (resistografica) all'appoggio di una trave di copertura



Indagine strumentale (resistografica) all'appoggio di una trave di solaio





TABELLA 1 - Criteri per classificare una trave in opera ed assegnarla ad una categoria, allo scopo di attribuirle le caratteristiche di resistenza ed elasticità indicate nella Tabella 2 ⁽¹⁾

CARATTERISTICA	CATEGORIA ⁽²⁾		
	1a	2a	3a
Azzurramento	SI	SI	SI
Lesioni da fulmine Cretti da gelo Gallerie di insetti Cipollature Marciumi	NO	NO	LIM
Nodi singoli ⁽³⁾	max. 1/5 max. 50 mm	max. 1/3 max. 70 mm	max. 1/2
Nodi raggruppati ⁽⁴⁾	max. 2/5	max. 2/3	max. 3/4
Inclinazione in sez. rad. fibratura: in sez. tang.	max. 7% max. 10%	max. 12% max. 20%	max. 20% max. 33%
Fessurazioni radiali da ritiro	SI (purché non passanti)	SI (purché non passanti)	SI
conifere	max. 2 mm	max. 3,3 mm	oltre 3,3 mm
Spessore anelli quercia	min. 7 mm	min. 4 mm	meno di 4 mm
castagno	min. 8 mm	min. 3,3 mm	meno di 3,3 mm

LEGENDA

SI: ammissibili

NO: non ammissibili

LIM: ammissibili, purché presenti in misura limitata

NOTE

⁽¹⁾ Queste regole si applicano alle parti di trave la cui sezione sia stata valutata come resistente

⁽²⁾ Travi non classificabili neppure come 3a categoria non sono idonee per strutture a carattere permanente

⁽³⁾ Massimo rapporto fra diametro del nodo e larghezza della faccia su cui compare

⁽⁴⁾ Massimo rapporto fra la somma dei diametri dei nodi compresi in un tratto di 15 cm e larghezza della faccia su cui compaiono

[Tabella ripresa e modificata dal Manuale di Ingegneria Civile Vol.2 ESAC-ZANICHELLI-CREMONESE 2a ed. 1991 Cap. XI "Strutture di legno" a cura del Prof. Ario CECCOTTI]



TABELLA 2 - Tensioni ammissibili e modulo elastico in direzione parallela alla fibratura delle principali specie legnose tradizionalmente usate per travature in Italia ⁽¹⁾

SPECIE LEGNOSA	CATEGORIA ⁽²⁾	valori in Megapascal (N/mm ²)				MODULO ELASTICO
		TENSIONI AMMISSIBILI				
		compr.	fless.	traz.	taglio	
Abete bianco	1a	11	11,5	11	0,9	13 000
	2a	9	10	9	0,8	12 000
	3a	7	7,5	6	0,7	11 000
Abete rosso	1a	10	11	11	1,0	12 500
	2a	8	9	9	0,9	11 500
	3a	6	7	6	0,8	10 500
Larice	1a	12	13	12	1,1	15 500
	2a	10	11	9,5	1,0	14 500
	3a	7,5	8,5	7	0,9	13 500
Pino silvestre e altri Pini	1a	11	12	11	1,0	13 000
	2a	9	10	9	0,9	12 000
	3a	7	8	6	0,8	11 000
Castagno, Olmo, Frassino	1a	11	12	11	0,8	10 000
	2a	9	10	9	0,7	9 000
	3a	7	8	6	0,6	8 000
Pioppo (non ibrido euram.)	1a	10	10,5	9	0,6	9 000
	2a	8	8,5	7	0,5	8 000
	3a	6	6,5	4,5	0,4	7 000
Quercia	1a	12	13	12	1,2	13 500
	2a	10	11	10	1,0	12 500
	3a	7,5	8,5	7	0,9	11 500
Robinia	1a	12	13,5	13	1,2	14 000
	2a	10	11,5	11	1,0	13 000
	3a	7,5	9	7	0,9	12 000

NOTE

- ⁽¹⁾ Per carichi di lunga e media durata e strutture protette dalle intemperie; negli altri casi si applicano appositi coefficienti correttivi.
⁽²⁾ La classificazione delle travi in categorie può essere effettuata in base ai criteri visuali riportati nella Tabella 1

[Tabella ripresa e modificata dal Manuale di Ingegneria Civile Vol.2 ESAC-ZANICHELLI-CREMONESE 2a ed. 1991 Cap. XI "Strutture di legno" a cura del Prof. Ario CECCOTTI]

[IndagineStruttureAntiche(apr02).doc]