POLITECNICO DI TORINO
Repository ISTITUZIONALE

Correlazioni Preliminari tra Proprietà Termiche e Densità nelle Strutture in Legno con Prove Non Distruttive

Original
Correlazioni Preliminari tra Proprietà Termiche e Densità nelle Strutture in Legno con Prove Non Distruttive / Sesana, R., R, R., Santoro, L., Borghese, V., Santini, S.. - ELETTRONICO. - (2024), pp. 1-14.

Availability:
This version is available at: 11583/2987997 since: 2024-04-23T04:29:25Z

Publisher:
IMREADY Srl https://www.ingenio-web.it/

Published
DOI:

Terms of use:

This article is made available under terms and conditions as specified in the corresponding bibliographic description in the repository

Publisher copyright

(Article begins on next page)

13 November 2026

Correlazioni Preliminari tra Proprietà Termiche e Densità nelle Strutture in Legno con Prove Non Distruttive

AUTORI: Luca Santoro, Ph.D. student; Vittoria Borghese, Arch. Ph.D Student; Silvia Santini, Professoressa; Raffaella Sesana, Professoressa.

INCIPIT/ABSTRACT

Questa ricerca delinea le fasi iniziali di una metodologia per la caratterizzazione fisica e meccanica degli elementi strutturali in legno di castagno in diverse condizioni di conservazione. Nell'ambito della tutela del patrimonio architettonico in legno, è cruciale ottenere stime delle proprietà fisiche (densità, trasmissività, livello di umidità) e meccaniche (modulo elastico, resistenza a compressione e flessione) degli elementi attraverso le correlazioni tra prove non distruttive (PnD), per guidare gli interventi di conservazione.

Introduzione

Il legno è un materiale anisotropo, spesso definito in maniera semplificata come ortotropo, caratterizzato quindi da una risposta differente nelle sue tre direzioni principali (longitudinale, trasversale e radiale). All'apparenza possiede dunque una struttura unica, ma proprietà intrinseche particolarmente variabili. A differenza di altri materiali, il legno viene definito frequentemente come vivo, poiché ha continui scambi di acqua con l'ambiente circostante. Questa caratteristica, unita alla sua complessa struttura, lo rende un materiale affascinante ma anche complesso da studiare e utilizzare.

Bisogna inoltre considerare che, ogni campione di legno, anche se prelevato dallo stesso elemento, può presentare caratteristiche fisiche e meccaniche anche molto diverse, influenzate da fattori come i difetti intrinseci, la specie, l'origine geografica, le condizioni di crescita e la lavorazione. La variabilità del legno rende difficile la sua classificazione e la previsione del suo comportamento. Inoltre, il legno è caratterizzato dai cosiddetti difetti, come nodi, fessure e cipollature e inclinazione della fibratura, che fanno parte della sua natura , ma che possono compromettere le sue proprietà strutturali.

Nonostante il legno sia il materiale più antico usato per l'architettura strutturale, e vi siano ancora delle strutture rilamenti al paleolitico superiore arrivate fino ai giorni nostri, oggigiorno la natura variabile e i suoi difetti hanno portato a una sottovalutazione del suo potenziale come materiale strutturale, nonostante non

vi sia alcune correlazione appurata tra la vetustà del materiale e la perdita di resistenza meccanica (Tampone 1996).

Spesso, la sostituzione di componenti strutturali in legno è considerata più semplice e conveniente rispetto alla loro manutenzione e riparazione. Tuttavia, questa tendenza ha portato alla perdita di molte strutture storiche antiche in legno, che rappresentano un patrimonio storico e culturale inestimabile.

La scarsa conoscenza del materiale e della sua natura e la difficoltà nell'ottenere le stime delle proprietà nelle tre direzioni che maggiormente lo caratterizzano nel tempo ha lasciato la strada spianata per gli interventi di completa sostituzione, invece che di diagnostica strutturale e manutenzione programmata. Questo è dovuto anche a fattori che non coinvolgono solo la conoscenza della materia, ma la scarsa accessibilità delle strutture lignee che spesso offre solo alcune facce disponibili per le indagini non distruttive in situ. Per questo è necessario ottenere stime accurate e consistenti e correlazioni chiare e veritiere tra le tre direzioni, di modo che l'inaccessibilità parziale non sia più un problema da considerare.

È necessario però tenere a mente che le sostituzioni portano a problematiche correlate alla conservazione non indifferenti. Difatti le normative vigenti prevedono, anche per colpa della scarsa fiducia (sempre legata alla scarsa conoscenza) che si ha verso le strutture in legno, coefficienti di sicurezza non trascurabili, che tendono a sovradimensionare particolarmente le strutture di nuova progettazione. Quando si progettano interventi sull'esistente, l'aumento delle sezioni causa problematiche connesse all'inserimento degli elementi nel contesto in oggetto. Variare le sezioni può comportare variazioni considerevoli della struttura esistente e del patrimonio architettonico, innescando una serie di modifiche dovute all'aumento delle sezioni strutturali che cambiano l'aspetto tecnologico oltre che storico.

Un altro grande problema, che è soprattutto legato alla normativa esistente, risiede nel fatto che le prove non distruttive per la stima della densità e delle proprietà meccaniche fanno riferimento a range di valori tarati sul legno nuovo e non su quello esistente. Questo rende approssimative e inesatte le stime che si possono ottenere per strutture storiche, dal momento che i valori sono completamente fuori range. Con questo si vuole sottolineare particolarmente che le stime fatte sulle strutture esistenti sono quindi sottostime delle loro proprietà, e che i valori reali indicherebbero strutture più performanti e resistenti di quanto invece si evidenzia dai risultati delle prove non distruttive (PnD). Per tale ragione è necessario confrontare i risultati sperimentali con i dati reali, di modo da creare range attendibili di valori.

L'industria del legno moderna si impegna a superare le sfide legate alla variabilità e ai difetti del legno, attraverso processi avanzati di lavorazione e selezione. Questo si declina, per quanto riguarda i difetti, non a una loro completa rimozione, ma a una loro riduzione, invece, per quanto riguarda la sua ortotropia, ad esempio incrociando le fibre, a performance e comportamenti più coerenti. Questi procedimenti possono però essere considerati non particolarmente sostenibili, anche se allo stato attuale sono poche le ricerche che approfondiscono queste tematiche.

Inoltre, sta crescendo l'interesse per il riutilizzo del legno proveniente da edifici storici o da demolizioni. Il riutilizzo offre numerosi vantaggi, tra cui la riduzione degli sprechi, la conservazione delle risorse e la valorizzazione del patrimonio edilizio esistente. Questa prassi è già consolidata per altri materiali, come ad esempio per il calcestruzzo, ma più difficilmente si fa riferimento al legno.

Un intervento degno di nota è quello di restauro della Chiesa romana di San Giuseppe dei Falegnami. La capriata lignea, crollata improvvisamente è stata ricostruita utilizzando ove possibile gli elementi strutturali meno danneggiati (anche declassandoli ad esempio da puntoni a saette). Questo approccio innovativo ha consentito la conservazione del patrimonio strutturale esistente.

Per tale ragione, la ricerca fa riferimento a correlazioni di PnD per elementi esistenti e di riuso.

Lo sviluppo di nuovi metodi di indagine e analisi è fondamentale per migliorare la conoscenza del legno e per sfruttare al meglio le sue potenzialità. Le PnD offrono un'alternativa efficace alle prove invasive, consentendo di valutare le proprietà del legno senza danneggiarlo. È però necessario conferire affidabilità a tali indagini e migliorare l'affidabilità delle stime attraverso correlazioni. La termografia infrarossa (IRT) è una tecnica PnD promettente per la stima della densità del legno, una proprietà chiave per la valutazione della sua resistenza strutturale.

Stato dell'arte

La ricerca sulla termografia come metodologia di prova non distruttiva per gli elementi in legno ha fatto notevoli progressi negli ultimi anni anche se è ancora impiegata in modo limitato, con una diversificazione di approcci e metodologie sempre più sofisticate. Alcune applicazioni fanno riferimento alle seguenti valutazioni:

- Densità: La termografia infrarossa (IRT) è stata utilizzata per stimare la densità del legno, una proprietà fondamentale per la valutazione della sua resistenza strutturale.
- Difetti: La IRT è stata impiegata per identificare difetti interni come nodi, inclinazione della fibratura e fessure.
- Degrado: La IRT ha permesso di monitorare lo stato di degrado del legno, valutando l'umidità e danni causati da riparazioni inadeguate o attacchi biotici.
- Proprietà meccaniche: La IRT è stata utilizzata per stimare le proprietà meccaniche del legno, come la resistenza alla trazione e alla compressione.

Per quanto riguarda le correlazioni tra PnD sono considerati fondamentali i lavori svolti da: Riggio et al. (2017), nel quale viene affrontata la valutazione della salute strutturale degli edifici storici attraverso l'applicazione combinata di tecniche non distruttive, enfatizzando l'importanza di un approccio olistico per una diagnosi accurata; il lavoro di Josifovski et al. (2023), che ha proposto un approccio basato sulla correlazione di parametri meccanici ottenuti da PnD per valutare le proprietà di resistenza in situ del legno, sottolineando l'importanza di una metodologia adatta alle esigenze delle strutture storiche

Alcune applicazioni ritenute rilevanti sono state condotte da Faella et al. (2012) su PnD effettuate nella Chiesa della Natività a Betlemme, combinando approcci come prove ultrasoniche e termografiche, dimostrando l'efficacia dell'approccio integrato nella diagnosi degli edifici storici. Anche Celano et al. (2023) ha condotto PnD approfondite in situ e analizzato il comportamento dinamico della Chiesa di Santa Maria Maddalena, fornendo un esempio di integrazione tra dati sperimentali e modellazione numerica per una valutazione accurata della struttura.

Analizzando alcune ricerche sempre più specifiche e connesse al mondo della termografia e all'analisi dei difetti del legno, ad esempio Kucharska et al (2021) ha proposto un'applicazione della termografia attiva, concentrandosi sulla caratterizzazione dei difetti per quanto riguarda elementi coperti di vernice. Questo studio evidenzia la sensibilità della tecnica in valutazioni specifiche, offrendo preziosi spunti sulla condizione degli elementi storici. Difatti, nonostante sia sconsigliato coprire gli elementi in legno con vernici protettive, poiché nel tempo rendono difficoltosa l'indagine e il rilievo dei difetti, l'utilizzo della termografia per superare questa problematica è un campo di applicazione sicuramente di grande interesse.

Similmente, anche altri studi si sono focalizzati sull'analisi dei difetti, come quelli proposti da Kandemir-Yucel et al. (2007) e Lopez et al. (2013), che hanno utilizzato la termografia infrarossa per valutare lo stato di deterioramento degli elementi in legno, identificando problemi come l'umidità e i danni causati da riparazioni incompatibili. Con alcune similitudini, Nassr et al. (2010) ha presentato una metodologia innovativa per rilevare il degrado biologico e altri danni in strutture in legno rivestite di compositi.

Per quanto riguarda la stima della densità vi sono pochi lavori attualmente, tra cui si menziona quello di Xin et al. (2021), che ha proposto un approccio basato sulla termografia infrarossa attiva per valutare la densità e le proprietà meccaniche di elementi storici in legno, approfondendo l'applicazione di questa tecnica a elementi storicamente significativi. L'analisi dell'effetto della densità sul comportamento termodinamico del legno, contribuendo a una comprensione più approfondita del potenziale della termografia infrarossa nella caratterizzazione fisica del materiale, è proposta da Lopez et al. (2018).

Lavori più sperimentali e avveniristici sono invece proposti ad esempio da Posta et al. (2015), dove l'uso della radiometria per valutare in maniera non distruttiva la densità degli elementi in legno fornisce un'alternativa preziosa per le strutture storiche. Un metodo basato sulla riflettometria a microonde è stato introdotto da Beni et al. (2015) per identificare anomalie nascoste nelle strutture architettoniche, ampliando l'insieme di tecniche non distruttive per l'analisi strutturale. Altri approcci avanzati sono proposti da Taskhiri et al. (2020) con l'approccio combinato di ultrasuoni e termografia per identificare difetti interni nel legno, offrendo soluzioni efficaci per migliorare la qualità del legno destinato alla lavorazione.

Approfondendo il tema della sostenibilità, Cruz et al. (2022) introduce, tra le altre proposte un'analisi multi-parametrica per la valutazione dei pavimenti in legno storici, utilizzando parametri come l'emissione acustica, dimostrando l'efficacia dell'analisi multi-criterio.

Incidenza dei difetti nell'analisi

Il fusto arboreo è composto essenzialmente da tre tessuti. Quello meccanico è il principale e consiste in fibre parallele tra loro unite in fasci e serve a sostenere la struttura. Poi vi sono il tessuto conduttivo e quello parenchimale. Il tessuto meccanico è quello che conferisce le proprietà meccaniche del materiale che, a seconda di come e dove viene tagliato il campione, offre una risposta diversa, conferendo la proprietà di ortotrotropia del materiale (Fratzl et al. 2007).

Questa sua caratteristica dovrebbe essere una delle considerazioni di base più rilevanti per l'esecuzione dei test, poiché ha notevoli ripercussioni sui risultati finali. Difatti, le fibre rispondono in modo diverso allo stress meccanico. La variabilità della risposta è particolarmente evidente anche nei test ad ultrasuoni, dove la misura effettuata nella direzione longitudinale delle fibre restituisce risultati più affidabili, rispetto a quella di superfice o a quella ortogonale (Borghese et al. 2023).

Come suddetto, oltre a questa eterogeneità del materiale, esso è, per sua natura, caratterizzato da alcuni difetti (nodi, o gruppi di nodi, fessure meccaniche o da ritiro, inclinazioni della fibratura e cipollatura) che ne alterano le caratteristiche fisiche e meccaniche, aggiungendo una grande variabilità dei risultati. I nodi, ad esempio, essendo punti di incremento della densità (dal momento che sono il punto di congiunzione tra il tronco e il ramo, o tra più rami), comportano un punto di discontinuità e conseguente fragilità della struttura.

E tre grandi incognite del legno, utili per definire il materiale e per procedere ad interventi di restauro, sono: la densità, il modulo elastico e la resistenza (intesa come resistenza a compressione e flessione parallela e perpendicolare alla fibratura).

In un lavoro precedente si affronta il tema della stime di due di questi tre parametri fondamentali relativi agli elementi in legno: la densità e il modulo elastico (Borghese 2023). In particolare si è analizzata la variazione dei risultati legati alla stima della densità in base alla misurazione superficiale o di profondità e in base alla variazione della misurazione del volume. La difficoltà nell'ottenere stime precise, soprattutto per quanto riguarda il volume, sul cantiere è affrontata attraverso un'analisi comparativa di diverse tecniche pertinenti, che fornisce una panoramica generale e una correlazione tra i dati ottenuti. Per il modulo elastico, è stata proposta una comparazione tra le velocità stimate basate sulla distanza delle sonde e una correlazione tra le misurazioni nelle varie direzioni.

L'incognita principale del legno, necessaria per la progettazione degli interventi di restauro, è la densità media, come espresso anche dalla norma europea EN 338:2010 che la identifica come uno dei tre fattori necessari per la classificazione degli elementi in legno. La densità può essere stimata attraverso test penetrometrici mediante l'uso di due strumenti: il Woodpecker e il Resistograph.

Il Resistograph non è stato impiegato in questo lavoro, ma nel precedente è possibile consultare correlazioni utili con il Woodpecker. La motivazione di questa scelta risiede nel voler confrontare misurazioni superficiali. Attraverso questi dispositivi, è possibile condurre test puntuali attraverso la penetrazione di punte all'interno del materiale. Nel caso del secondo strumento, si tratta di un test in profondità, permettendo di ottenere una conoscenza completa (anche se sempre puntuale) della sezione analizzata.

Per il Woodpecker, è possibile avere una mappa di punti più diffusa, ma l'analisi è limitata alla sola superficie. Il Resistograph è stato sviluppato negli anni '80 da Frank Rinn per gli studi forestali, come ad esempio per conoscere in dettaglio la tendenza degli anelli di crescita degli alberi e la presenza o assenza di insetti o funghi interni. Questo strumento, definito a rotoperforazione, confronta la lunghezza di penetrazione con la resistenza percentuale che il materiale oppone alla rotazione o alla pressione dell'ago. I picchi o le depressioni del grafico servono per capire eventuali incrementi o diminuzioni della densità (dovuti ad esempio ai nodi per i picchi o la presenza di attacchi biotici o fungini per le depressioni) (Icel et al. 2016).

Il Woodpecker, invece, è uno strumento che viene utilizzato attraverso l'infissione di 9 punti che formano una griglia a una distanza di almeno 2,5 cm l'uno dall'altro. Ogni punto è fissato mediante cinque colpi (detti battute) e si misura la penetrazione attraverso la sottrazione della lunghezza originale dell'ago (50 mm) meno la parte rimasta a vista. Grazie alle curve fornite dal produttore, in base alla specie di legno, è possibile correlare la profondità di penetrazione e la densità superficiale. Questi dati sono spesso meno affidabili, poiché la superficie del legno è spesso soggetta a degrado e perché le curve fornite sono tarate sul legno di nuova produzione (Fundova et al. 2018, Santini et al. 2023).

Metodologia

Con l'obiettivo di analizzare le correlazioni tra prove non distruttive, ed in particolare tra prove penetrometriche e termografia attiva (IRT), sono stati esaminati diversi campioni di castagno forniti da Erminio Brondello sas.

Commentato [VB1]: Citare bene

I campioni presentano la particolarità di essere sia di produzione standard che di riuso, con l'obiettivo di sottolineare l'esistenza di questa possibilità anche e soprattutto per elementi e per strutture in legno e per superare i pregiudizi sulla loro presunta scarsa affidabilità meccanica.

Gli otto campioni di legno analizzati includono sette elementi in castagno e uno in quercia. Alcuni sono di nuova produzione e altri di riuso, trattati in diversi modi quali: vaporizzazione, salificazione ed essiccazione. L'azienda in questione opera esclusivamente con legno proveniente da una fornitura locale entro un raggio di 20 km, includendo essenze come castagno (Castanea sativa o fagaceo), quercia (Quercus robur, Quercus petranea) e una limitata quantità di altre specie quali larice, abete e olmo.

L'azienda si dedica alla produzione di elementi in legno per finiture e utilizzi strutturali, ricavati sia da legno abbandonato a causa di fattori naturali (tempeste, frane, invecchiamento) che da travi provenienti da antichi casali o tetti dismessi, con un raggio di recupero che non supera i 30 km dal sito dell'azienda stessa.

La metodologia proposta per la ricerca si articola attraverso diverse fasi. Inizialmente, si procede con la selezione e la preparazione dei campioni. Questi campioni sono distinti in base alla loro provenienza, classificandoli come standard di produzione oppure come riutilizzati e sottoposti a trattamenti specifici, quali vaporizzazione, salificazione ed essiccazione.

Successivamente, si esegue un'approfondita ispezione visiva secondo normativa 11119:2004 su ciascun campione al fine di identificare eventuali difetti esterni o anomalie, consentendo così una stima visiva delle proprietà meccaniche del materiale.

Le prove penetrometriche, eseguite mediante l'uso di Woodpecker, vengono impiegate per stimare la densità superficiale dei campioni. La correlazione tra le curve di densità del Woodpecker e i dati di penetrazione derivati da tali prove contribuisce a fornire ulteriori dettagli sulla struttura interna del legno. Parallelamente, si effettua il test igrometrico per misurare il livello di umidità presente nei campioni.

Infine viene effettuata la prova di Termografia Infrarossa Attiva (IRT), impiegata per valutare le proprietà termiche attraverso un'indagine di fase e per identificare eventuali disuniformità sulla superficie dei campioni. L'utilizzo di un dispositivo specializzato per l'eccitazione e l'osservazione remota della temperatura superficiale contribuisce a ottenere dati più precisi.

Infine, viene effettuata una preliminare correlazione, ove possibile, tra i risultati delle prove PnD.

Tabella 1 - *Dati identificativi, geometrici in metri [m] e di peso in chilogrammi [kg] dei campioni presi in esame.*

Foto	Campione	Processo	Spessore	Altezza	Lunghezza	Volume	Peso
	1	Standard	0.028	0.320	0.160	0.0014	0.711
	2	Vaporizzazione	0.062	0.511	0.177	0.0056	2.735
	3	Standard	0.024	0.207	0.130	0.0006	0.322
	4	Standard	0.028	0.236	0.182	0.0012	0.538
	5	Essicazione	0.062	0.280	0.175	0.0030	1.390
	6	Salificazione	0.065	0.454	0.183	0.0054	3.044
	7	Vaporizzazione	0.065	0.505	0.140	0.0045	2.357
	8	Salificazione	0.064	0.610	0.154	0.0060	2.893

Commentato [VB2]: È giusto essicazione?

Prove non Distruttive

Indagine visiva

La norma italiana UNI 11119:2004 per l'ispezione visiva fornisce dei criteri per ottenere una stima di alcune proprietà meccaniche, tra cui resistenza e modulo elastico, degli elementi in legno mediante l'osservazione di difetti superficiali.

La geometria (dimensioni massime e presenza di smussi) e i difetti devono essere ispezionati visivamente e classificati secondo lo standard. La presenza dei difetti, e la loro incidenza sulla geometria della sezione, consentono la classificazione in una delle tre categorie (I, II e III) previste dalla normativa. In base alla categoria e alla specie di appartenenza lo standard fornisce dei valori di riferimento per la stima delle proprietà meccaniche.

Questa indagine è condotta per conoscere lo stato di conservazione degli elementi di castagno, anche se è principalmente indicata per l'ispezione di elementi nuovi piuttosto che di quelli storici.

Se si analizzano strutture antiche, i dati ottenuti dalla normativa possono essere meno affidabili e fornire una sottostima delle caratteristiche meccaniche. Poiché si tratta di elementi di nuova produzione o di riuso, ma comunque trattati, lo standard è facilmente applicabile (anche grazie all'assenza di sussi, fessure e altri difetti macroscopici). Tuttavia, rimangono valide le richieste per nodi o gruppi di nodi e per l'inclinazione delle fibrature.

Per quanto riguarda i campioni di castagno, tutti sono considerati di classe I con un modulo elastico di 10000 [N/mm²].

Oltre all'ispezione visiva, sono stati condotti due test PnD, un test igrometrico, un test penetrometrico con Woodpecker e indagini di termografia attiva.

Indagine penetrometrica

Il Woodpecker (WP) è un penetrometro per legno ridisegnato utilizzato per stimare la densità, prodotto dalla ditta italiana DRC e composto da un ago in acciaio (con un diametro di 2,5 mm) appuntito. La profondità di penetrazione o penetration depth (PD) viene determinata misurando la porzione dell'ago esposta dopo essere stato inserito nel legno con cinque colpi (con un interasse prefissato di 25 o 30 mm) e sottraendola dalla lunghezza totale (50 mm). Il produttore fornisce diverse leggi di correlazione per la PD, in base alla specie legnosa. È possibile difatti stimare sia la resistenza meccanica, che la densità, ma anche il modulo elastico.

La scelta di utilizzare il Woodpecker, invece di metodi d'indagine più precisi, è motivata dall'intenzione di voler conoscere la densità superficiale e correlarla alle proprietà termiche evidenziate dai test termografici attivi, che analizzano a loro volta la parte esterna del materiale. Solitamente per lo svolgimento del test sarebbe preferibile evitare l'area che include difetti visibili, al fine di ottenere una stima media corretta senza variazioni eccessive di densità che altererebbero il risultato del test. In questo caso, è essenziale creare una griglia che copra l'intera superficie del campione e che consenta di avere in vari punti i dati termici corrispondenti. Si è mantenuta una distanza di 30 mm tra tutti i punti della griglia.

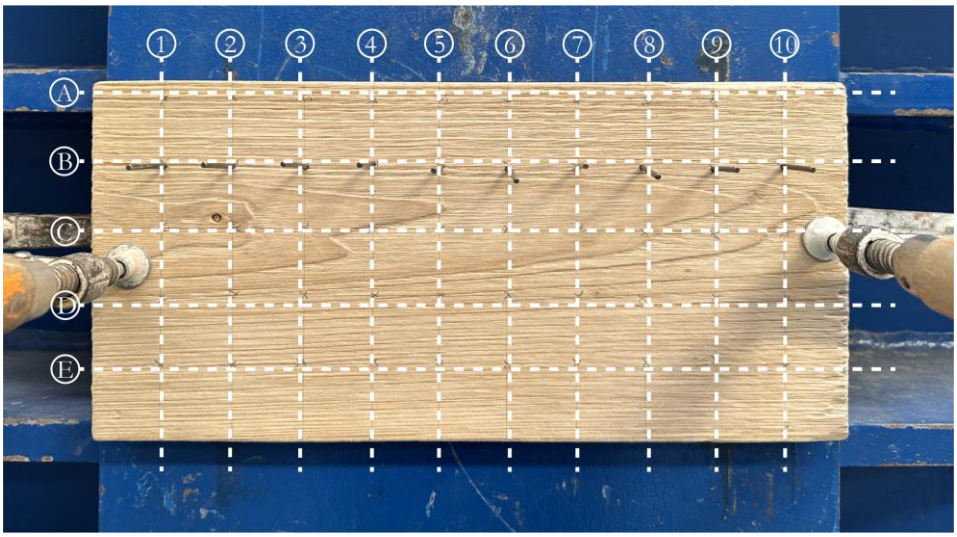

Figura 1 – Setup e prima linea di battute effettuate per la *Prova penetrometrica del Woodpecker sul campione 1.*

Prova con termografia attiva

Le prove con termografia attiva prevedono lo studio del transitorio termico del componente in risposta ad una stimolazione esterna[22], [23], [24]. In questo lavoro è stata utilizzata una termocamera FLIR A6751sc, e come sorgente stimolante una lampada alogena con potenza di 2kW con potenza modulata in frequenza.

La prova viene effettuata inserendo nel sistema (il provino) una forzante termica (calore emesso dalla lampada) ad una frequenza predefinita, detta frequenza di lock-in, durante la prova vengono acquisite delle immagini termografiche con lo scopo di studiarne il contenuto in frequenza per rilevare disuniformità e variazioni di diffusività termica nel materiale.

La risposta in fase del segnale ci permette di identificare le variazioni di densità e umidità all' interno del manufatto, che sia ricoperto di vernice o meno. Infatti, la composizione delle fibre legnose, essendo fortemente anisotropa, presenta discontinuità di densità e contenuto di umidità nelle interfacce, e quindi discontinuità nella conduzione del calore.

Per cui nei risultati sarà presentata la mappa di fase, dove la fase del segnale termico, alla frequenza di lock-in, è calcolata per ogni pixel e visualizzata. Il contrasto tra i differenti colori è indice della disuniformità interna del provino.

Risultati

Risultati della densità

La tabella seguente fornisce un riepilogo dei risultati ottenuti, mostrando sia la densità effettiva che quella stimata attraverso i test PnD per ciascun campione.

È importante notare che il valore stimato risulta costantemente al di sotto della densità effettiva, come precedentemente ipotizzato. Questa misurazione deriva dal fatto che gli strumenti sono calibrati per il legno nuovo anziché per quello invecchiato.

Tabella 2 – *Risultati dell'indagine visiva e confronto tra la densità reale e la stima ottenuta dalle prove penetrometriche effettuate tramite Woodpecker.*

Campione	Processo	Classe di resistenza	Densità [kg/m^3]	Densità WP [kg/m^3]
1	Standard	I	495.9	425.4
2	Vaporizzazione	I	487.7	419.7
3	Standard	I	498.6	473.6
4	Standard	I	447.3	428.9
5	Essicazione	I	457.5	415.8
6	Salificazione	I	563.6	445.7
7	Vaporizzazione	I	512.8	432.5
8	Salificazione	i	481.2	420.9

Con l'esclusione del campione 3, considerato un outlier anche per la sua natura diversa dagli altri, e del campione 4 il grafico a dispersione mostra una tendenza generale costante tra la densità reale D [kg/m^3] e la densità stimata con il Woodpecker D_{WP}. L'equazione della retta di regressione e il valore R^2 forniscono ulteriori approfondimenti sulla correlazione. L' R^2 quasi pari a 0.95 rappresenta un'ottima correlazione tra il valore reale e la stima.

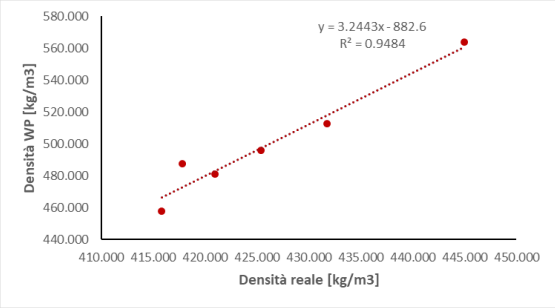

Figura 2 – *Correlazione tramite retta di regressione e coefficiente R^2 tra la densità reale D e stimata tramite WP D_{WP} dei campioni presi in esame.*

La retta di regressione mostra la seguente equazione:

$$D_{WP} = 3.2443\mathrm{D} - 882.6$$

Con la formula inversa, è possibile ottenere la densità reale dai test con il Woodpecker.

$$D = \frac{(D_{WP} - 882.6)}{3.2443}$$

Ciò suggerisce che l'equazione di regressione lineare si adatta bene ai dati sperimentali, indicando una correlazione significativa tra le due variabili. Tuttavia, è importante notare che la popolazione è limitata e l'eliminazione di un campione può influenzare l'analisi.

Utilizzo della termografia attiva per la stima della distribuzione di densità e umidità

Nella seguente sezione è presentato il risultato del test termografico. In Figura 3 è possibile vedere come la mappa di fase di un provino verniciato riesca a darci informazioni sulla distribuzione delle fibre sottostanti, aprendo la possibilità all' utilizzo della termografia come tecnica diagnostica anche su manufatti ricoperti da vernice come travi o opere d'arte.

Allo stesso modo il valore della fase contiene delle informazioni fisiche, permettendoci di identificare zone con diversa densità e percentuale di umidità. Infatti, il calore diffonde maggiormente in zone a maggiore densità e maggiore contenuto di umidità. Tuttavia, anche l'orientamento delle fibre influisce sulla misura, in quanto il calore diffonde maggiormente nella direzione parallela alle fibre del legno.

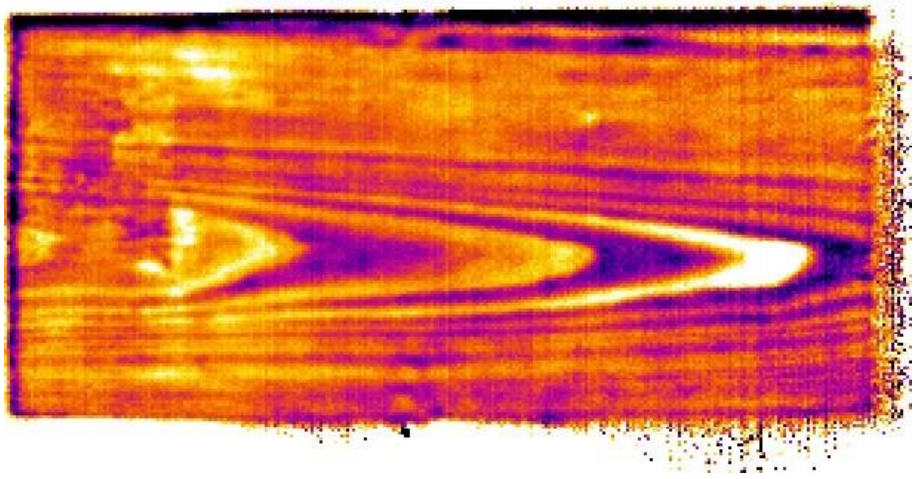

Figura 3 – Mappa di fase di un provino ricoperto da vernice nera.

In figura 4, quindi, sono state sovrapposte le mappe di fase e densità e fase e umidità rispettivamente.

Si nota come la fase sia influenzata da entrambe, tuttavia le misure di umidità e densità possono essere effettuate solo in maniera puntuale, limitando di molto la definizione dei risultati. Va considerato che il punto su cui viene effettuata la misura, se spostato di pochi millimetri può cadere in una fibra o in un'altra, se non

nell' interfaccia tra le due. Questo influenza fortemente l'interpretazione della misura, che invece nel caso della tecnica termografica ha una definizione molto più alta.

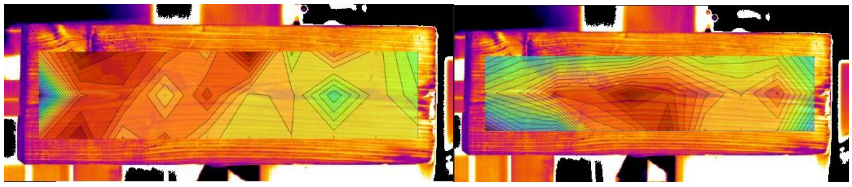

Figura 3 – Mappa di fase sovrapposta alla mappa di densità (sx) e umidità (dx).

Conclusioni

La ricerca presentata in questo articolo si concentra sull'uso delle prove non distruttive (PnD) per valutare le proprietà fisiche e meccaniche degli elementi strutturali in legno, con un particolare interesse verso il legno di castagno usato in architetture storiche e moderne. Utilizzando metodi come la termografia infrarossa attiva e i test penetrometrici, gli autori hanno dimostrato che è possibile ottenere stime affidabili della densità e delle proprietà meccaniche del legno, senza causare danni al materiale.

Una delle scoperte principali è stata che i valori di densità ottenuti attraverso le PnD tendono a essere sottostimati rispetto alla densità reale, particolarmente a causa delle tarature basate su legno nuovo e non su quello storico. Questa sottostima suggerisce che le strutture in legno potrebbero essere più resistenti di quanto indicato dai test standard.

Inoltre, l'articolo mette in luce l'importanza della conservazione e del riutilizzo del legno proveniente da strutture storiche, proponendo una riflessione critica sulle pratiche attuali che favoriscono la sostituzione piuttosto che la manutenzione. Gli autori promuovono un approccio più sostenibile e informato verso la gestione del legno nelle costruzioni, evidenziando come le tecniche di PnD possano contribuire significativamente a tale processo.

In conclusione, lo studio enfatizza la necessità di migliorare le correlazioni tra i risultati delle prove non distruttive e i dati reali, per affinare ulteriormente l'affidabilità delle stime e supportare interventi di conservazione più efficaci e rispettosi dell'integrità storica e strutturale del legno.

Bibliografia

[1] Beni, S., Micheletti, F., Olmi, R., Riminesi, C.: Time-domain approach for non-destructive assessment of embedded anomalies in architectural structures based on microwave reflectometry. In: 2015 8TH INTERNATIONAL WORKSHOP ON ADVANCED GROUND PENETRATING RADAR (IWAGPR). IEEE, 345 E 47TH ST, NEW YORK, NY 10017 USA (2015). IEEE. 8th International Workshop on Advanced Ground Penetrating Radar (IWAGPR), Firenze, ITALY, JUL 07-10, 2015

[2] Borghese, V., Santini, S., Sguerri, L.: SUSTAINABLE ASSESSMENT: A CONTRIBUTION TO IMPROVE THE RELIABILITY OF NDT ON OLD CHESTNUT PURLINS. World Conference on Timber Engineering 2023 (WCTE2023) (2023) https://doi.org/10.52202/069179-0131

[3] Celano, T., Ceroni, F., Fabbrocino, G., Rainieri, C., Casapulla, C.: Thermographic investigations and dynamic identification tests for non-destructive structural assessment and enhanced fe modelling of a historical iron-strengthened masonry church. JOURNAL OF CIVIL STRUCTURAL HEALTH MONITORING 13(4-5, SI), 901–924 (2023) https://doi.org/10.1007/s13349-022-00645-6

[4] Cruz, C., Gaju, M., Gallego, A., Rescalvo, F., Suarez, E.: Non-destructive multi- feature analysis of a historic wooden floor. BUILDINGS 12(12) (2022) https: //doi.org/10.3390/buildings12122193

[5] Faella, G., Frunzio, G., Guadagnuolo, M., Donadio, A., Ferri, L.: The church of the nativity in bethlehem: Non-destructive tests for the structural knowledge. JOURNAL OF CULTURAL HERITAGE 13(4, S), 27–41 (2012) https://doi.org/ 10.1016/j.culher.2012.10.014

[6] Fundova, I., Funda, T., Wu, H.X.: Non-destructive wood density assessment of Scots pine (Pinus sylvestris L.) using Resistograph and Pilodyn. PLoS ONE 13(9), 0204518 (2018) https://doi.org/10.1371/journal.pone.0204518

[7] I¸cel, B., G¨uler, G.: Nondestructive determination of spruce lumber wood density using drilling resistance (Resistograph) method. Turkish Journal of Agriculture and Forestry 40(6), 900–907 (2016) https://doi.org/10.3906/tar-1606-76

[8] Josifovski, A., Todorovic, N., Milosevic, J., Veizovic, M., Pantelic, F., Askrabic, M., Vasov, M., Rajcic, A.: An approach to in situ evaluation of timber structures based on equalization of non-destructive and mechanical test parameters. BUILDINGS 13(6) (2023) DOI: 10.3390/buildings13061405

[9] Kandemir-Yucel, A., Tavukcuoglu, A., Caner-Saltik, E.N.: In situ assessment of structural timber elements of a historic building by infrared thermography and ultrasonic velocity. INFRARED PHYSICS & TECHNOLOGY 49(3), 243–248 (2007) DOI: 10.1016/j.infrared.2006.06.012

[10] Kucharska, M., Jaskowska-Lemanska, J.: Active thermography in diagnostics of timber elements covered with polychrome. MATERIALS 14(5) (2021) DOI: 10.3390/ma14051134

[11] Lopez, G., Basterra, L.A., Acuna, L.: Estimation of wood density using infrared thermography. CONSTRUCTION AND BUILDING MATERIALS 42, 29–32 (2013) https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.01.001

[12] Lopez, G., Basterra, L.-A., Acuna, L.: Infrared thermography for wood density estimation. INFRARED PHYSICS & TECHNOLOGY 89, 242–246 (2018) https: //doi.org/10.1016/j.infrared.2018.01.015

[13] Nassr, A.A., El-Dakhakhni, W.W., Ahmed, W.H.: Biodegradation and debonding detection of composite-wrapped wood structures. JOURNAL OF REINFORCED PLASTICS AND COMPOSITES 29(15), 2296–2305 (2010) https://doi.org/10. 1177/0731684409347598

[14] Posta, J., Dolejs, J.: Non-destructive assessment of timber elements with an emphasis on radiometry. INTERNATIONAL JOURNAL OF ARCHITECTURAL HERITAGE 9(6, SI), 655–664 (2015) DOI: 10.1080/15583058. 2015.1041192 . Rubner Holzbau; Rothoblaas; Bovair; Trentino Network; UnivTrento, Dept Civil Engn & Mech Engn; CNR IVALSA, Trees & Timber Inst; European Corp Sci & Technol. 2nd International Conference on Structural Health Assessment of Timber Structures (SHATIS), Trento, ITALY, SEP 04-06, 2013

[15] Riggio, M., Macchioni, N., Riminesi, C.: Structural health assessment of historical timber structures combining non-destructive techniques: The roof of giotto's bell tower in florence. STRUCTURAL CONTROL & HEALTH MONITORING 24(7) (2017) DOI: 10.1002/stc.1935

[16] Santini, S., Borghese, V., Baggio, C.: HBIM-Based Decision-Making Approach for Sustainable Diagnosis and Conservation of Historical Timber Structures. Sustainability (Switzerland) 15(4), 3003 (2023) DOI: 10.3390/su1504300320

[17] Santini, S., Baggio, C., Sguerri, L.: Sustainable Interventions: Conservation of Old Timber Roof of Michelangelo's Cloister in Diocletian's Baths. International Journal of Architectural Heritage 17(3), 500–517 (2023) https://doi.org/10.1080/15583058.2021.1938747

[18] Taskhiri, M.S., Hafezi, M.H., Harle, R., Williams, D., Kundu, T., Turner, P.: Ultrasonic and thermal testing to non-destructively identify internal defects in plantation eucalypts. COMPUTERS AND ELECTRONICS IN AGRICULTURE 173 (2020) https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105396

[19] Xin, Z., Guan, C., Zhang, H., Yu, Y., Liu, F., Zhou, L., Shen, Y.: Assessing the density and mechanical properties of ancient timber members based on the active infrared thermography. CONSTRUCTION AND BUILDING MATERIALS 304 (2021) https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124614

[20] Yang, G., Kabel, J., Van Rietbergen, B., Odgaard, A., Huiskes, R., Cowin, S.C.: Anisotropic Hooke's law for cancellous bone and wood. Journal of Elasticity 53(2), 125–146 (1998) DOI: 10.1023/A:1007575322693

[21] Zhang, X., Yang, J., Zhu, W., Li, G.: A non-destructive health evaluation method for wooden utility poles with frequency-modulated empirical mode decomposition and laplace wavelet correlation filtering. SENSORS 22(11) (2022) https://doi. Org/10.3390/s22114007

[22] Santoro, L., Quercio, M., Canova, A. & Sesana, R. Measuring thermal and electrical performances of additively manufactured magnetic shielding material: an active thermography approach. Nondestruct. Test. Eval. 1–24 (2024) doi:10.1080/10589759.2024.2305703.

[23] Santoro, L., Razza, V. & De Maddis, M. Frequency-based analysis of active laser thermography for spot weld quality assessment. Int. J. Adv. Manuf. Technol. (2023) doi:10.1007/s00170-023-12845-5.

[24] Sesana, R., Santoro, L., Curà, F., Molica Nardo, R. & Pagano, P. Assessing thermal properties of multipass weld beads using active thermography: microstructural variations and anisotropy analysis. Int. J. Adv. Manuf. Technol. (2023) doi:10.1007/s00170-023-11951-8.