

# **MONITORAGGIO E CONTROLLO DEI BENI MONUMENTALI: FORMAZIONE E CERTIFICAZIONE DEL PERSONALE**

Musacchio M.<sup>1</sup>, Buongiorno M.F.<sup>1</sup>, Casula G.<sup>2</sup>, Bianchi M.G.<sup>2</sup>, Bonali E.<sup>2</sup>, Caserta A.<sup>1</sup>, Govoni A.<sup>1</sup>, Gaudiosi I.<sup>3</sup>, Galli G.<sup>1</sup>, Porco.G.<sup>4</sup>, Romano D.<sup>4</sup>

<sup>1</sup>INGV, Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, via di Vigna Murata 605 – 00143 Roma

<sup>2</sup>INGV, Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Via D. Creti 12, 40100 Bologna

<sup>3</sup>INGV, Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Ponte Pietro Bucci, Cubo 30C, 87036 Rende (CS)

<sup>4</sup>SISMLAB s.r.l., Via P. Pietro Bucci, Università della Calabria - 87036 Rende (CS)

## **INTRODUZIONE**

Il presente lavoro costituisce una proposta per la formazione e la certificazione del personale che opera nel campo dei controlli e del monitoraggio dei beni monumentali ubicati in area sismica. Per bene Monumentale si intende qualsiasi manufatto con connotati a valenza storico – artistica realizzato prevalentemente in muratura con eventuali elementi in calcestruzzo armato e/o legno.

L'articolo scaturisce da una proposta di formazione da sviluppare nell'ambito del Progetto PON denominato MASSIMO [1], acronimo di "Monitoraggio in Area Sismica Sistemi Monumentali" e dal quale estrarre mirati percorsi di addestramento da inserire in un preciso contesto di certificazione, secondo gli usuali livelli di conoscenza previsti dalla norma UNI EN ISO 9712 "*Prove non distruttive - Qualificazione e certificazione del personale addetto alle prove non distruttive*"[2].

Pertanto, nelle successive sezioni, definito il percorso formativo relativo al progetto di ricerca, verranno illustrate le peculiarità e gli obiettivi di alcune attività di controllo e monitoraggio basate su tecniche NDT, ed inserite nello stesso. Per quelle maggiormente utilizzate nel processo di controllo, si provvederà ad elencare le conoscenze minime richieste e le ore di attività necessarie, a giudizio di chi scrive, per poter giungere ad una conoscenza più o meno approfondita del metodo, in base ai diversi livelli di competenza ed al fine di sostenere gli esami di certificazione.

Infine, verrà illustrato secondo degli schemi preordinati, il percorso di certificazione secondo la norma di riferimento.

## **1. LA FORMAZIONE DI OPERATORI ESPERTI PER IL MONITORAGGIO ED IL CONTROLLO DEI BENI MONUMENTALI**

Il controllo ed il monitoraggio dei beni Monumentali in area sismica coinvolge diversi settori disciplinari, che vanno dalla fisica, all'ingegneria, alla scienza e tecnologia dei materiali, evidenziando quindi una spiccata interdisciplinarietà. Infatti, allo stato attuale, il controllo delle opere a valenza storico - artistica è gestito da esperti con diverse estrazioni culturali, che si muovono in maniera indipendente e quindi, raramente, ci si imbatte in procedure e protocolli di gestione che attingano notizie utili da tutti i settori coinvolti. Appare, pertanto, utile definire un percorso formativo che fornisca agli operatori del settore conoscenze ad ampio spettro e differenziate a secondo dei livelli di conoscenza.

Con questi presupposti, è nato il progetto di formazione, in cui la figura professionale dovrà avere, a fine cammino, conoscenze interdisciplinari e specifiche che, attualmente, non vengono fornite nell'ambito dei corsi di laurea ordinari.

Non ultimo, la proposta formativa discussa ed illustrata nelle sezioni seguenti, costituirà la base dalla quale potranno essere definiti percorsi di formazione di operatori nel campo sperimentale da orientare al controllo e monitoraggio dei beni Monumentali. In pratica, dal corposo e consistente

programma formativo, saranno estrapolate specifiche nozioni tali da creare percorsi “snelli” per la formazione del personale da certificare successivamente.

### **1.1. OBIETTIVI E CONTENUTI DEL PROGETTO DI FORMAZIONE**

Le competenze, che il programma formativo si propone di trasferire, si focalizzano su due elementi essenziali: il “bene monumentale” ed il rischio strutturale dello stesso, in relazione al territorio su cui insiste. Questi potranno essere raggiunti affrontando tematiche su tre differenti filoni: il primo è quello di affrontare le problematiche normative, amministrative e tecniche associate al bene monumentale. Il secondo è relativo all’acquisizione di nozioni orientate allo studio dei manufatti e dei materiali, alla caratterizzazione meccanica in situ, all’acquisizione di parametri ricavati da controlli NDT, alla loro lettura e valutazione, nonché all’applicazione di “protocolli di controllo” per la gestione ed il monitoraggio dei beni monumentali. L’ultimo, ma non meno importante, è esplicitamente correlato ai risultati implementati dal progetto di ricerca PON MASSIMO, cui il percorso formativo si associa, ed è relativo al trasferimento delle conoscenze acquisite alla gestione ed utilizzo dell’innovativo sistema “autodiagnosticante” che il progetto di ricerca punta a sviluppare.

### **1.2. ARTICOLAZIONE E LOGISTICA DEL PERCORSO FORMATIVO**

Il percorso di studio mira a formare una nuova figura professionale di operatore esperto nella gestione di un innovativo sistema di monitoraggio in continuo sui beni monumentali localizzati in aree a rischio sismico.

L’esigenza cui risponde il percorso formativo è quella di definire una figura professionale, oggi non presente, in grado di essere efficacemente impegnata nel processo “a valle” di sviluppo dei risultati del programma di ricerca MASSIMO. Le figure formate, difatti, avranno le conoscenze di base e specialistiche, sia per essere inserite nelle imprese industriali per affrontare attività di ricerca e sviluppo nello specifico settore, sia per avviare la professione quali tecnici/professionisti impegnati nell’applicazione del modello innovativo MASSIMO, presso i fruitori finali.

Il programma formativo è rivolto a laureati in professioni tecniche (ingegneri, architetti, geologi), che intendano specializzarsi quali operatori esperti nel monitoraggio strutturale dei beni monumentali. Il programma si esplica attraverso l’erogazione di 1400 ore di lezione (2 corsi quasi paralleli di 700 ore), prestate in modalità d’aula ed in modalità operativa e si articola in 3 moduli con uno spiccato carattere di propedeuticità.

Il primo modulo è rivolto a trasmettere le conoscenze di base, tecniche e legislative, che interessano e caratterizzano il bene monumentale. Questo modulo si articolerà su quattro sub-moduli per un numero di circa 26 settimane di attività formativa e 600 ore di formazione erogata (300 ore per 2 aule formative), durante le quali si trasmetteranno e si approfondiranno le conoscenze specialistiche relativamente ai beni culturali riguardo la legislazione tecnica, la geofisica d’indagine e sperimentale a supporto della tutela degli stessi. Inoltre, verranno tenute lezioni in merito alla tecnologia dei materiali, agli elementi costruttivi ed agli interventi di restauro su beni monumentali.

Il secondo modulo approfondisce le esperienze operative in affiancamento a personale impegnato in attività di ricerca industriale e/o sviluppo sperimentale. Il modulo si articola su tre sub-moduli per un numero di circa 20 settimane di attività formativa e 560 ore di formazione erogata (280 ore per 2 aule formative). Le attività di didattica previste riguarderanno il Modulo B, che a sua volta si articolerà su tre sub-moduli per un numero di circa 20 settimane di attività formativa e 560 ore di formazione erogata (280 ore per 2 aule formative). Le attività di didattica previste riguarderanno la

meccanica sperimentale dei materiali, il controllo sperimentale delle strutture ed il monitoraggio strutturale.

Il terzo modulo è riferito all'apprendimento di conoscenze in materia di programmazione, gestione strategica, valutazione e organizzazione operativa dei progetti di ricerca industriale e/o sviluppo sperimentale. Questo modulo si articola su due sub-moduli per un numero di circa 4 settimane di attività formativa e 240 ore di formazione erogata.

A conclusione del percorso formativo, è prevista una verifica delle competenze in uscita che porterà alla possibilità di una certificazione che, negli obiettivi paralleli del progetto, potrà rappresentare una maggiore professionalità dei discenti spendibile tanto internamente al consorzio di sviluppo del progetto, quanto esternamente allo stesso.

Con l'obiettivo di raggiungere il più ampio bacino possibile di discenti, il progetto di Formazione verrà organizzato, con un leggero sfasamento temporale, tanto a Rende (CS), sede del responsabile del progetto di Formazione (UNICAL), quanto a Reggio Calabria, sede oltre che universitaria anche di uno dei dimostratori selezionati per il progetto di Ricerca, ossia l'Ex Convento della Visitazione.

## **2. MONITORAGGIO E CONTROLLO CON TECNICHE N.D.T.: CONOSCENZE MINIME**

In un processo di certificazione del personale è rilevante poter giungere alla stesura di un regolamento che disciplini non solo le fasi di accertamento del personale, ma stabilisca in modo chiaro, quale sia il profilo del tecnico in termini di competenze e di attività di campo in modo da poter fornire contributo alla esecuzione di un determinato test sperimentale. Pertanto, nelle sezioni seguenti, per le metodologie maggiormente in uso nel campo dei controlli sugli edifici storici ubicati in area sismica, verranno descritte le metodologie di indagine e gli strumenti utilizzati, nonché si provvederà ad elencare le conoscenze minime richieste all'operatore e il tempo di addestramento, secondo tre livelli minimi di conoscenza ed in base a quanto stabilito dalla norma di riferimento.

### **2.1. LA SISMOLOGIA STRUMENTALE PER LA VALUTAZIONE DELLA PERICOLOSITÀ SISMICA**

Il rischio sismico è un indicatore che tiene conto di tre fattori, ossia la pericolosità, la esposizione e la vulnerabilità. Sotto il profilo ingegneristico grande rilevanza viene assegnata alla vulnerabilità sismica, definita come la propensione di un edificio di subire un danno di un determinato livello, a fronte di un evento sismico di una data intensità. La vulnerabilità sismica di un edificio di nuova costruzione sarà fortemente legata alle scelte progettuali effettuate ed inoltre connotata da una aleatorietà di tipo teorico ossia, se al termine della costruzione dell'opera, tutto avverrà nel rispetto delle prescrizioni del progetto e senza vizi costruttivi, la struttura evidenzierà una piena convergenza tra vulnerabilità teorica di progetto e vulnerabilità reale. Altro aspetto sicuramente determinante nella definizione del rischio sismico è lo studio della pericolosità sismica dell'area di sedime. Questo concetto seppur tristemente noto per gli eventi registrati sul territorio italiano da oltre qualche secolo, solo di recente nel nuovo dispositivo normativo ha trovato la giusta evidenza diventando uno degli elementi base per il calcolo strutturale.

Come è ovvio intuire questi concetti, applicati ai beni monumentali ossia ed edifici con caratteristiche geometriche e materiche eterogenee, risultano estremamente ostici da trattare. Per quanto attiene alla vulnerabilità sismica determinante risulta la fase conoscitiva del bene mentre per quanto attiene allo studio della pericolosità del sito essa potrà variare da zona a zona, in funzione della distanza delle possibili sorgenti di frattura e dalla energia che esse potranno liberare e non ultimo dalla energia accumulata per via dei processi deformativi.

Per quest'ultimo aspetto fondamentale è il ruolo svolto della sismologia sperimentale. In pratica tale attività, che consiste nel monitoraggio del territorio mediante una rete di acquisizione permanente, consente localizzazioni e caratterizzazione di sorgenti sismiche utili alla valutazione della pericolosità locale su cui insiste il manufatto. Anche in questo contesto è auspicabile la definizione di un percorso formativo e di certificazione per il personale che opera con queste metodologie sperimentali. Nel rispetto di quanto riportato nella norma 9712 si può proporre per la conoscenza di base (Livello 1) della tecnologia, un corso della durata di 12 ore, mentre per la conoscenza intermedia di (Livello 2) si può prevedere un secondo corso di ulteriori 24 ore, infine per il livello 3, è ipotizzabile un corso della durata di 32 ore.

## 2.2. I RILIEVI CON IL LASER A SCANSIONE TERRESTRE

Il laser a scansione terrestre (TLS) è assimilabile ad una stazione totale ad alta automazione tale per cui un fascio di luce laser coerente e monocromatica generato da un diodo a semiconduttore viene proiettato sugli oggetti di studio a partire da una griglia regolare e mediante un sistema di specchi comandati da un motore [3], [6]. Gli scanner utilizzati in geodesia sono detti distanziometrici e possono essere di due tipi: a tempo di volo (ossia a impulso) o a differenza di fase (misura continua) e possono arrivare ad acquisire oltre un milione di punti al secondo [4]. Ogni punto della superficie investigata viene posizionato in un sistema di riferimento arbitrario interno allo scanner mediante misure del tempo di volo del segnale (TOF), oppure più spesso mediante misure di comparazione della fase fra segnale emesso dal sensore e successivamente riflesso dal target (differenza di fase). Ad ogni punto stazione, necessario per la modellazione 3D di un oggetto, corrispondono più scansioni ossia nuvole di punti strutturate. Tali nuvole sono costituite, per ogni punto della superficie del target, dalle coordinate (sferiche o cartesiane), dalla riflettività (rapporto fra energia riflessa dal target ed energia incidente) e dal colore del punto stesso [5]. Quest'ultimo viene determinato opzionalmente mediante la camera ottica interna allo scanner od in assenza di questa, mediante un'apposita camera esterna calibrata.

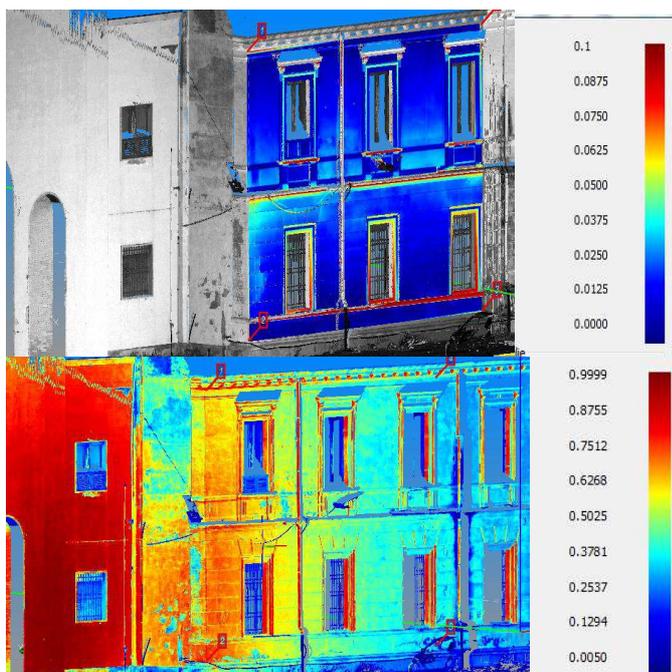


Fig.1 – Esempio di processamento dei dati provenienti da laser scanner in stazione

Il dato viene restituito mediante programmi appositi (es.: JRC Reconstructor: <http://www.gexcel.it/en/software>) in maniera da aggregare tutte le nuvole, precedentemente filtrate e registrate nello stesso sistema di riferimento, in un'unica nuvola non strutturata da cui è possibile studiare la forma dell'oggetto in esame. In particolare, è possibile il calcolo di sezioni di edifici, di intersezioni con piani di riferimento, oltre che eseguire misure di distanze o di posizione di punti di interesse. Infine, è possibile estrarre, dai modelli 3D risultanti, particolari di edifici (muri, colonne, absidi, ecc.) e confrontarli con superfici di forma nota come: piani, sfere o cilindri, oltre che esportare i modelli a mesh in ambiente CAD (Fig.1).

Per una conoscenza di base (Livello 1) della tecnologia è sufficiente un corso della durata di 8 ore, così suddiviso: una parte dedicata allo studio dello strumento, poche nozioni teoriche sulla tecnica e acquisizione di alcune scansioni da un oggetto scelto come campione con utilizzo di target piani per il pre-allineamento delle nuvole di punti derivanti dalle scansioni stesse ed un'altra finalizzata al trattamento del dato in cui si effettuano le principali operazioni di restituzione (software JRC Reconstructor). Una conoscenza intermedia (Livello 2) potrebbe prevedere un secondo corso di ulteriori 16 ore suddivise in ore di acquisizione ed ore di processing, in cui ciascun utente agirà personalmente sulla strumentazione e sul software fino al perfezionamento delle conoscenze della strumentazione e del trattamento del dato. Nel corso di livello 3, della durata di 16 ore, si prevede di far effettuare all'utente una prova di acquisizione e restituzione del dato sotto la supervisione dell'istruttore e valutazione del risultato degli elaborati.

### **2.3. TECNICHE NDT PER LA CARATTERIZZAZIONE DEI MATERIALI**

Nel monitoraggio e nel controllo di una struttura esistente, specie se è un bene monumentale, i tecnici si imbattono in problematiche legate alla non conoscenza dei materiali in sito, siano essi calcestruzzo, acciaio, murature o legno. Spesso, infatti, non si hanno informazioni né sulla geometria della struttura, né sulle caratteristiche composizionali e meccaniche dei materiali impiegati, sulle procedure di calcolo e sulle tecniche costruttive utilizzate. Partendo da questa situazione di non conoscenza del costruito, appare evidente la necessità di appoggiarsi a tecniche e controlli non invasivi, in modo da giungere ad una diagnosi dello stato di salute del manufatto.

Sicuramente, un approccio più ravvicinato a queste tematiche, è stato dato dalla entrata in vigore delle NTC'08, dove finalmente ritroviamo un intero capitolo (Cap.8) sulle procedure ed i controlli da effettuare sugli edifici esistenti. Infatti, la Norma prevede di affiancare alle canoniche tecniche distruttive, quelle non invasive con il duplice scopo, ossia quello di ridurre appunto il danneggiamento dell'opera e di ottimizzarne i costi. Ovviamente, il numero dei controlli NDT, da sostituire con quelli distruttivi, varia in funzione del livello di conoscenza che si vuole raggiungere e se siamo o meno di fronte ad un immobile a valenza storico – artistica. In questo ultimo caso, è sicuramente da privilegiare l'uso di tecniche non invasive a scapito di una maggiore conoscenza della struttura ed ovviamente di un migliore utilizzo delle risorse dei materiali impiegati.

I controlli NDT disponibili in letteratura e che in genere vengono utilizzati in ambito civile [7], sono molteplici ed hanno tutte le prerogative di rilevare parametri fisici, chimici e meccanici utili a verificare il materiale strutturale senza provocare danni alla struttura esaminata e con costi irrisori.

L'indagine con metodi non distruttivi diventa, quindi, un'operazione fondamentale per il controllo delle strutture, essendo spesso il semplice esame visivo non sufficiente a stabilire se vi sono o meno danni dovuti al degrado ed inoltre, non è in grado di fornire informazioni sull'entità dello stesso.

Ovviamente, in questa sede e per brevità di esposizione, ci soffermeremo esclusivamente sui metodi di indagine NDT applicabili sugli edifici storici, che nella maggior parte dei casi sono in muratura con parti in elementi lignei (solai, coperture, ecc.). In particolar modo, per le murature si parlerà di indagine a martinetti piatti e di indagine sonica, mentre per gli elementi lignei, di indagine ultrasonora e penetrometrica.

È bene precisare che qualsiasi prova sulle murature, dovrà essere prioritariamente affiancata da una prova magnetometrica, in modo da scongiurare la presenza di elementi metallici o di impianti, circoscrivendo aree libere su cui eseguire i test.

Di seguito, quindi, verranno illustrati brevemente, per ogni indagine, la metodologia e la strumentazione utilizzata, i risultati ottenibili, nonché le conoscenze minime richieste e le ore di addestramento che deve possedere un operatore rispettivamente di livello 1, livello 2 e livello 3.

#### **INDAGINE A MARTINETTI PIATTI**

A differenza delle altre metodologie NDT, l'indagine a martinetti piatti, che si colloca come prova semi-distruittiva e quindi non particolarmente idonea per un bene monumentale, permette di valutare, sperimentalmente e direttamente, alcuni parametri meccanici della muratura e di stabilire l'impegno statico delle pareti siano esse portanti o meno, in riferimento allo stato tensionale normale.

In particolare, l'impiego di un singolo martinetto consente di determinare lo stato tensionale di esercizio cui è sottoposta la muratura, mentre l'uso di due martinetti permette, attraverso una prova a compressione condotta in situ, di valutare la tensione di rottura ed il modulo elastico del complesso malta - elementi lapidei.

La possibilità di identificare tali grandezze, assume un'importanza rilevante in fase di verifica di sicurezza e di progettazione, specialmente per gli interventi di recupero, restauro e per l'adeguamento sismico.

Per quanto riguarda le conoscenze minime richieste ai vari livelli di conoscenza e le ore di addestramento necessarie, una possibile ipotesi potrebbe essere la seguente:

Livello 1: Un corso base potrebbe essere costituito da un numero di ore di addestramento pari a 15. Al termine del corso, l'operatore deve essere in grado di eseguire una prova a martinetti piatti in base a istruzioni scritte o sotto il controllo di personale di livello superiore. Quindi, è necessario che conosca l'uso di tutta la strumentazione necessaria, deve essere in grado di installarla in opera, regolarla, collegarla e verificare il corretto funzionamento, ed in caso effettuare le calibrazioni necessarie.

Deve altresì eseguire le prove, registrare e classificare i risultati in relazione a criteri scritti e redigere un rapporto sull'installazione e sui dati acquisiti.

Livello 2: Il corso potrebbe avere un numero di ore di addestramento pari a 20 e dovrebbe prevedere brevi cenni sulle norme di riferimento, una parte relativa alla scienza e tecnologia dei materiali, allo studio delle tipologie murarie e dei materiali di base ed alla loro caratterizzazione meccanica, alle principali tecniche NDT applicabili sulle murature, ponendo ampio spazio alla tecnica dei martinetti piatti. Al termine, l'operatore, oltre ad avere le conoscenze richieste ad un livello 1, deve avere una buona padronanza del metodo, saper scegliere la modalità operativa più idonea alle condizioni reali in sito, effettuare e sorvegliare le prove e verificare la corretta installazione della strumentazione indicata nel progetto, misurare opportunamente i parametri deducibili dall'indagine ed in caso inficiare la stessa, interpretare e valutare i risultati in funzione delle norme, dei codici o delle specifiche da rispettare e redigere il relativo rapporto.

Livello 3: Il corso potrebbe avere un numero di ore di addestramento pari a 28. Al termine del percorso formativo, il tecnico deve avere assoluta padronanza della strumentazione, delle apparecchiature di acquisizione dati, dei sistemi di trasmissione e software di gestione.

Inoltre, deve aver acquisito competenze per progettare, dirigere ed eseguire una campagna sperimentale di indagine a martinetti piatti, saper valutare ed interpretare i risultati in relazione alle norme, ai codici ed alle specifiche esistenti, definendo opportuni criteri di controllo.

Inoltre, ampio respiro sarà dedicato alla tecnica a martinetti piatti, soprattutto per ciò che concerne la valutazione ed interpretazione dei risultati ottenuti dalla prova.

#### **INDAGINE SONICA SULLE MURATURE**

Tale tecnica, assolutamente non invasiva, viene utilizzata per omogeneizzare e comparare murature in opera ed, affiancata a procedure di taratura basate su dati a rottura oggettivi, consente anche una valutazione di parametri meccanici. Inoltre, la metodologia può essere utilizzata per controllare le caratteristiche della muratura dopo interventi di consolidamento (iniezioni di malte e resine), verificando i cambiamenti delle caratteristiche fisiche dei materiali ed individuare la presenza di cavità macroscopiche, fessure o porzioni di muratura aventi caratteristiche differenti.

L'onda sonora viene generata sul supporto murario mediante la battitura con martello strumentato, e viene quindi ricevuta da un sensore, ad esempio un accelerometro, posto in un punto diverso della struttura (Fig.2).

La propagazione dell'onda nel materiale sarà influenzata dalla geometria della sezione e dalle caratteristiche fisico-meccaniche del materiale o di quelli attraversati. L'elaborazione dei dati consiste nel calcolo del tempo di trasmissione dell'onda, ricavando quindi, noto lo spazio che divide trasmettitore e ricevitore, la velocità media di attraversamento della muratura.



Fig.2 – Strumenti per l'indagine sonica: martello strumentato e sonda ricevente

Per quanto riguarda le conoscenze minime richieste ai vari livelli di conoscenza e le ore di addestramento necessarie, una possibile ipotesi potrebbe essere la seguente:

Livello 1: Un corso base potrebbe essere costituito da un numero di ore di addestramento pari a 12. Al termine del corso, l'operatore deve essere in grado di eseguire una indagine sonica in base a istruzioni scritte o sotto il controllo di personale di livello superiore. Quindi, è necessario che conosca l'uso di tutta la strumentazione necessaria, deve essere in grado di adoperarla in opera, regolarla, collegarla e verificare il corretto funzionamento, ed in caso effettuare le calibrazioni necessarie.

Deve altresì eseguire le prove, registrare e classificare i risultati in relazione a criteri scritti e redigere un rapporto sull'installazione e sui dati acquisiti.

Livello 2: Il corso potrebbe avere un numero di ore di addestramento pari a 20 e dovrebbe prevedere brevi cenni sui principi di fisica (tipo di onde, frequenza, ecc.), sulle norme di riferimento, una parte relativa alla scienza e tecnologia dei materiali, allo studio delle tipologie murarie e dei materiali di base, alle principali tecniche NDT applicabili sulle murature, ponendo ampio spazio alla indagine sonica, in particolar modo sul processo di omogeneizzazione delle

murature in opera in funzione dei dati acquisiti e sulla capacità di interpolare, mediante curve di correlazione, parametri NDT con valori a rottura.

Livello 3: Il corso potrebbe avere un numero di ore di addestramento pari a 24. Al termine del percorso formativo, il tecnico deve avere assoluta padronanza della strumentazione, delle apparecchiature di acquisizione dati, dei sistemi di trasmissione e software di gestione.

Inoltre, deve aver acquisito competenze per progettare, dirigere ed eseguire una campagna sperimentale di prove soniche, saper valutare ed interpretare i risultati in relazione alla struttura indagata, alle norme ed alle condizioni in sito esistenti, definendo opportuni criteri di controllo.

### **INDAGINE ULTRASONORA SUL LEGNO**

La tecnica ultrasonora, simile a quella che si effettua sul cls, si basa sulla velocità di transito di un'onda e permette di ottenere informazioni sullo stato del legno all'interno della sezione esaminata, sulle caratteristiche meccaniche del legno, sulla presenza di "difetti" (cipollature, nodi, ecc.) e sugli spessori degli strati attaccati da parassiti. Sapendo quale può essere la velocità di attraversamento in una zona non affetta da alterazioni, e basandosi su tabelle appositamente realizzate per il legno di varie specie, è possibile valutare, in corrispondenza di misurazioni di velocità particolarmente basse, la presenza di anomalie interne agli elementi (Fig.3).

Il metodo non è invasivo e la sua applicazione è consigliata nel caso di beni monumentali.



Fig.3 – Strumento ad ultrasuoni per il legno

Per quanto riguarda le conoscenze minime richieste ai vari livelli di conoscenza e le ore di addestramento necessarie, una possibile ipotesi potrebbe essere la seguente:

Livello 1: Un corso base potrebbe essere costituito da un numero di ore di addestramento pari a 16. Al termine del corso, l'operatore, oltre ad aver recepito nozioni base sulla classificazione del legname da costruzione e sulle principali caratteristiche fisiche, chimiche e meccaniche di questo materiale, deve essere in grado di eseguire una indagine ultrasonora su un elemento ligneo, in base a

istruzioni scritte o sotto il controllo di personale di livello superiore. Quindi, è fondamentale che conosca l'uso di tutta la strumentazione necessaria, deve essere in grado di usarla in opera, regolarla, collegarla e verificare il corretto funzionamento, ed in caso effettuare le calibrazioni necessarie.

Deve altresì eseguire le prove, registrare e classificare i risultati in relazione a criteri scritti e redigere un rapporto sull'installazione e sui dati acquisiti.

Livello 2: Il corso potrebbe essere strutturato in un numero di ore di addestramento pari a 20 e dovrebbe prevedere nozioni base sulla fisica delle onde, brevi cenni sulle norme di riferimento e sulle tipologie edilizie riscontrabili negli edifici storici e moderni, una parte relativa: alle prove di laboratorio per la caratterizzazione meccanica del legno, allo studio dei fenomeni dovuti al ritiro, alla conoscenza dei difetti ed alterazioni e dei danni di natura biotica. Inoltre, alle principali tecniche NDT applicabili sugli elementi lignei, ponendo ampio spazio alla tecnica ultrasonora, nonché alle modalità di svolgimento della stessa, in funzione anche delle informazioni che si vogliono ottenere.

Livello 3: Il corso potrebbe avere un numero di ore di addestramento pari a 24. Al termine del percorso formativo, il tecnico deve avere assoluta padronanza della strumentazione, delle apparecchiature di acquisizione dati, dei sistemi di trasmissione e software di gestione.

Inoltre, deve aver acquisito competenze per progettare, dirigere ed eseguire una campagna sperimentale di prove sul legno, conoscere le metodologie di indagine diagnostica, saper valutare ed interpretare i risultati in relazione alla struttura indagata, alla specie legnosa e alle possibili cause di degrado esistenti, definendo opportuni criteri di controllo.

#### **INDAGINE PENETROMETRICA SUL LEGNO**

L'indagine permette di individuare le variazioni di densità tra legno integro e legno decomposto ed effettuare una diagnosi sul posto di aree di decadimento interno del materiale in esame. Inoltre, con tale tecnica, è possibile valutare le sezioni resistenti residue, le dimensioni delle sezioni laddove non vi siano altre possibilità di accertamento e ricavare profili profondità/resistenza.

Si basa sul principio della “resistenza all'avanzamento di una sonda” la quale viene valutata in maniera indiretta attraverso la misurazione dell'energia assorbita per consentire l'avanzamento a velocità costante di una sottile punta di acciaio di 3 mm. Il foro lasciato ha un diametro relativamente piccolo rispetto alle normali sezioni degli elementi strutturali, il danno prodotto può essere considerato trascurabile e quindi, la sua applicazione è assolutamente consigliata nel caso di beni monumentali.

Per quanto riguarda le conoscenze minime richieste ai vari livelli di conoscenza e le ore di addestramento necessarie, una possibile ipotesi potrebbe essere la seguente:

Livello 1: Un corso base potrebbe essere costituito da un numero di ore di addestramento pari a 8. Al termine del corso, l'operatore, oltre ad aver recepito nozioni generali sulle caratteristiche del legno, deve conoscere la strumentazione ed essere in grado di eseguire una indagine penetrometrica in base a istruzioni scritte o sotto il controllo di personale di livello superiore.

Livello 2: Il corso potrebbe essere strutturato in un numero di ore di addestramento pari a 16 ed avere argomenti simili a quelli previsti a livello 2 nel metodo ultrasonoro. Tuttavia, dovrebbe soffermarsi ampiamente sull'indagine penetrometrica ed in particolar modo sullo studio ed interpretazione dei profili profondità – resistenza, queste ultimi ricavabili dai comuni strumenti utilizzati per eseguire la prova.

Livello 3: Il corso potrebbe avere un numero di ore di addestramento pari a 20 ed essere organizzato in modo simile a quello previsto per l'indagine ultrasonora allo stesso livello di competenza.

#### **2.4. LE MISURE DEL RUMORE PER LO STUDIO DEL COMPORTAMENTO STRUTTURALE**

L'analisi delle caratteristiche dinamiche di una struttura è fra gli obiettivi più impegnativi e multidisciplinari tra quelli che normalmente vengono presi in considerazione da chi si occupa di comportamento strutturale. E questo è a maggior ragione vero, quando ad essere coinvolti sono edifici di interesse storico-monumentale.

Un aiuto ci viene dall'analisi del cosiddetto rumore sismico o rumore ambientale di fondo. Quest'ultimo, altro non è che lo scuotimento del terreno in assenza di terremoto e tiene traccia delle caratteristiche, principalmente in frequenza, di tale scuotimento. La sua analisi è basata sulla registrazione della velocità di oscillazione del terreno là dove la stazione sismica, che rivela e registra tale velocità, è posizionata.

Istallando la stazione sismica all'interno dell'edificio oggetto di studio (Fig.4), si possono analizzare nello stesso modo, le caratteristiche di oscillazione dell'edificio permettendo così anche di mettere in relazione le caratteristiche di scuotimento del terreno ove l'edificio in studio insiste, con quelle dell'edificio stesso.



Fig. 4 – Velocimetro in opera

Poiché lo scuotimento del terreno rappresenta l'input alla struttura, è possibile investigare l'interazione suolo - struttura non pensando l'edificio come vincolato rigidamente al suolo; assunzione quest'ultima largamente adottata nel mondo ingegneristico.

Questo approccio è certamente speditivo, facile da approntare, economico e non invasivo. Di contro c'è da considerare, che una analisi basata solo sul rumore sismico, potrebbe non essere sufficiente data la estrema facilità con cui i risultati ottenuti possono essere male interpretati specialmente senza un solido expertise di base.

A livello base (Livello 1) si può ipotizzare un corso di una quindicina di ore in cui:

- si illustrano i rudimenti elementari della teoria su cui si basa l'approccio basato sul rumore sismico;
- si illustrano in modo elementare ma completo i principi di funzionamento di una stazione sismica con particolare riferimento alla registrazione di rumore sismico;
- si settano e si installano sul campo reti di stazioni sismiche;
- si estraggono le registrazioni e si controlla la bontà del dato.

Un corso intermedio (Livello 2) potrebbe essere di una ventina di ore, in cui si analizza più in dettaglio la teoria, il funzionamento delle stazioni sismiche e la loro installazione sia sul sito dove l'edificio in studio è localizzato, sia nell'edificio stesso, con particolare enfasi alla struttura. In particolare, per l'installazione sul campo si analizzano sia geometrie 2D passive, che 1D sia attive, che passive. Per gli edifici si illustrano brevemente i criteri di scelta del posizionamento delle stazioni al loro interno ed ai vari piani.

Per il livello più avanzato (Livello 3) si prevede la pianificazione di un esperimento su un edificio proposto, si realizza tale esperimento, si estraggono e immagazzinano i dati, si analizzano le registrazioni dando una interpretazione. Il tutto per un totale di almeno 24 ore.

## 2.5. IL MONITORAGGIO PER LA PROTEZIONE SISMICA

Una tecnica di monitoraggio, che può essere utilizzata con grandi benefici per il controllo di edifici storici in muratura in area sismica, è quella combinata, ossia costituita da due sistemi [8]. Il primo, che ha la prerogativa di acquisire in continuo, è costituito da accelerometri e centralina di acquisizione dotata di opportuni parametri di soglia, capace, quindi, di allertare gli organi di controllo quando le azioni sismiche ai diversi livelli di una struttura, attingono valori significativi. Il secondo, basato invece sull'impiego di sensori a fibra ottica residenti, potrà essere interrogato successivamente al rilevamento o alla percezione di un sisma al di sopra dei parametri limite. In pratica, quest'ultimo avrà principalmente la funzione di rilevare danni sulle strutture, ma potrà essere utilizzato periodicamente anche per controlli di routine inseriti nel piano di manutenzione.

Il monitoraggio strutturale mediante l'uso di accelerometri è quello tipicamente utilizzato nell'analisi dinamica ed ha la finalità di studiare la risposta della struttura alle vibrazioni, che possono essere di origine naturale, quali gli eventi sismici, oppure di origine antropica come il traffico veicolare o le esplosioni.

Invece, lo strumento base, per la predisposizione di un sistema di monitoraggio statico su una struttura esistente, è un rilevatore a fibra ottica appositamente collocato su elementi guida all'interno dei maschi murari. Il sensore utilizzato, banalmente, è un misuratore di spostamenti su una predefinita base di misura. Le misure di convergenza o di divergenza delle estremità della base, permettono successivamente di risalire a delle deformazioni le quali, comparate con quelle ultime del materiale che si sta osservando, consentono di valutare numericamente la distanza tra la configurazione attuale e quella di collasso, ossia restituiscono il coefficiente di sicurezza al momento della misurazione.

In definitiva, con il sistema di monitoraggio combinato si possono perseguire due obiettivi fondamentali:

-Le misure dei livelli di deformazione effettuate periodicamente e comparate con una banca dati appositamente creata, saranno in grado di fornire utili informazioni sullo stato di conservazione dei livelli di affidabilità dell'edificio, al fine di verificare al passare del tempo, il mantenimento della originaria vulnerabilità sismica. Inoltre, permetteranno di guidare le attività di manutenzione ordinaria e di controllare periodicamente il livello di efficienza della struttura.

-L'acquisizione delle deformazioni effettuate a valle di un evento sismico ed a seguito del segnale di allerta prodotto dal sistema di monitoraggio accelerometrico, permetterà invece di valutare la presenza di stati di collasso sui maschi murari resistenti e di quantificare la riduzione dei coefficienti di sicurezza della struttura in tempo reale.

Per quanto riguarda le conoscenze minime richieste ai vari livelli di conoscenza e le ore di addestramento necessarie, si dovrà distinguere il corso relativo al monitoraggio statico e quello inerente il dinamico.

### Monitoraggio statico

Livello 1: Un corso base potrebbe essere costituito da un numero di ore di addestramento pari a 30. Al termine del corso, l'operatore deve essere in grado di installare tutti i componenti della sensoristica, verificare il loro funzionamento mediante l'uso di una centralina di acquisizione dati, stendere i cavi di collegamento fino a una posizione stabilita, il tutto in base a istruzioni scritte o sotto il controllo di personale di livello superiore. Deve altresì eseguire le misurazioni, registrare i risultati in relazione a criteri scritti e redigere un rapporto di installazione dei sensori ubicati in opera.

Livello 2: Il corso potrebbe avere un numero di ore di addestramento pari a 45 e dovrebbe prevedere: principi di ottica ondulatoria, brevi cenni sulle norme di riferimento, una parte relativa alle caratteristiche meccaniche dei materiali in opera (calcestruzzo, acciai, muratura), una dedicata alle tipologie dei sensori disponibili sul mercato, alle loro possibili applicazioni ed ai risultati perseguibili. Al termine, l'operatore, oltre ad avere le conoscenze richieste ad un livello 1, deve avere una buona padronanza dei dispositivi di monitoraggio, saper scegliere la modalità operativa più idonea, misurare opportunamente i dati provenienti dai sensori a fibra ottica e comprenderne la loro affidabilità, effettuare e sorvegliare le operazioni nella fase di installazione indicate nel progetto di monitoraggio e redigere il relativo rapporto di lettura.

Livello 3: Il corso potrebbe avere un numero di ore di addestramento pari a 55. Al termine del percorso formativo, il tecnico deve avere una buona conoscenza della scienza e tecnica delle costruzioni, delle norme dedicate, assoluta padronanza della strumentazione, delle apparecchiature di acquisizione dati, dei sistemi di trasmissione e software di gestione.

Inoltre, deve aver acquisito competenze per progettare, dirigere ed eseguire un monitoraggio statico su qualsiasi tipo di struttura. Non ultimo, deve saper programmare ed interpretare le misure rilevate a breve, medio e lungo termine sulla struttura, definendo opportuni criteri di controllo, al fine di redigere un report interpretativo sulla campagna di misure acquisite.

#### Monitoraggio dinamico

Livello 1: Un corso base potrebbe essere costituito da un numero di ore di addestramento pari a 45. Al termine del corso, l'operatore deve essere in grado di installare tutti i componenti della sensoristica e verificare il loro funzionamento, il tutto in base a istruzioni scritte o sotto il controllo di personale di livello superiore. Deve altresì eseguire le misurazioni, registrare i risultati in relazione a criteri scritti e redigere un rapporto di installazione dei rilevatori accelerometrici installati.

Livello 2: Il corso potrebbe avere un numero di ore pari a 50 e dovrebbe prevedere: principi di dinamica, brevi cenni sulle norme di riferimento, una parte relativa alle caratteristiche meccaniche dei materiali in opera (calcestruzzo, acciai, muratura), una dedicata alle tipologie degli accelerometri disponibili sul mercato, alle loro possibili applicazioni ed ai risultati perseguibili. Al termine, l'operatore, oltre ad avere le conoscenze richieste ad un livello 1, deve avere una buona padronanza dei dispositivi di monitoraggio, saper scegliere la modalità operativa più idonea, misurare opportunamente i dati provenienti dai rilevatori e comprenderne la loro affidabilità, effettuare e sorvegliare le operazioni nella fase di installazione indicate nel progetto di monitoraggio e redigere il relativo rapporto di lettura.

Livello 3: Il corso potrebbe avere un numero di ore di addestramento pari a 70. Al termine del percorso formativo, il tecnico deve avere una buona conoscenza della scienza e tecnica delle costruzioni, di dinamica, di modellazione strutturale con software dedicati agli elementi finiti per effettuare analisi al passo e per affrontare problemi di identificazione strutturale. Inoltre, dovrà avere una buona conoscenza delle norme di settore nazionali e internazionali, assoluta padronanza della strumentazione, delle apparecchiature di acquisizione dati, e dei sistemi di trasmissione e dei relativi programmi di gestione.

### 3. LA CERTIFICAZIONE DEL PERSONALE PER IL MONITORAGGIO ED IL CONTROLLO DEI BENI MONUMENTALI

In relazione a quanto precedentemente illustrato è possibile procedere alla definizione dei requisiti minimi di addestramento del personale che dovrà operare con le tecniche sperimentali maggiormente in uso nel monitoraggio e controllo dei beni Monumentali.

<b>REQUISITI MINIMI DI ADDESTRAMENTO</b>			
<b>INDAGINI N.D.T. E MONITORAGGIO</b>	<b>INDAGINI PER LA PERICOLOSITÀ SISMICA DEL SITO</b>	<b>INDAGINE CON LASER SCANNER</b>	<b>INDAGINE A MARTINETTI PIATTI</b>
<b>LIVELLI MINIMI DI CONOSCENZA</b>			
<b>LIVELLO 1</b>	<b>12 ORE</b>	<b>8 ORE</b>	<b>15 ORE</b>
<b>LIVELLO 2</b>	<b>24 ORE</b>	<b>16 ORE</b>	<b>20 ORE</b>
<b>LIVELLO 3</b>	<b>32 ORE</b>	<b>16 ORE</b>	<b>28 ORE</b>
	<b>INDAGINE SONICA SULLE MURATURE</b>	<b>INDAGINE AD ULTRASUONI SUL LEGNO</b>	<b>INDAGINE PENETROMETRICA</b>
<b>LIVELLI MINIMI DI CONOSCENZA</b>			
<b>LIVELLO 1</b>	<b>12 ORE</b>	<b>16 ORE</b>	<b>8 ORE</b>
<b>LIVELLO 2</b>	<b>20 ORE</b>	<b>20 ORE</b>	<b>16 ORE</b>
<b>LIVELLO 3</b>	<b>24 ORE</b>	<b>24 ORE</b>	<b>20 ORE</b>
	<b>MISURA DEL RUMORE</b>	<b>MONITORAGGIO STATICO</b>	<b>MONITORAGGIO DINAMICO</b>
<b>LIVELLI MINIMI DI CONOSCENZA</b>			
<b>LIVELLO 1</b>	<b>15 ORE</b>	<b>30 ORE</b>	<b>45 ORE</b>
<b>LIVELLO 2</b>	<b>20 ORE</b>	<b>45 ORE</b>	<b>50 ORE</b>
<b>LIVELLO 3</b>	<b>24 ORE</b>	<b>55 ORE</b>	<b>70 ORE</b>

## CONCLUSIONI

La formazione e la certificazione del personale che opera nei controlli NDT è uno dei primi requisiti da soddisfare per poter giungere all'ottenimento di una attendibile diagnostica e per poter conseguire valide risposte in tema di sicurezza e di affidabilità. Con questi presupposti è stato proposto, in un ambito diverso dal dominio industriale, un percorso formativo con le prerogative di addestrare personale addetto ai controlli ed al monitoraggio dei beni monumentali ubicati in area sismica. Più precisamente, partendo da un esteso programma di studi affiancato al progetto PON MASSIMO, è stata estrapolata una proposta di formazione identificando requisiti minimi ed ore di addestramento secondo tre livelli di competenza. Naturalmente, la verifica di quanto proposto potrà ora avvenire con una validazione di campo, ossia definendo, all'interno di un centro di formazione permanente, dei corsi finalizzati alla certificazione del personale nelle metodologie di prova presentate.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] R. Basili et al – *“Monitoraggio in area sismica di beni monumentali: tecniche ndt e procedure di verifica”*. Il Giornale delle Prove non Distruttive Monitoraggio Diagnostica, n. 3 Settembre 2013. ISSN 1721-7075.
- [2] UNI EN ISO 9712: 2012 - *“Prove non distruttive - Qualificazione e certificazione del personale addetto alle prove non distruttive”*.
- [3] Bornaz L. - Laser scanning terrestre, 01/2006; ISBN: 8885137199 In book: Chapter: *I sistemi a scansione laser*, Publisher: 8885137199, Editors: CISM. - (2006)
- [4] Casula G., Bianchi M.G. and Mora P.- *“Detection of Terrain Morphologic Features Using GPS, TLS, and Land Surveys: “Tana della Volpe” Blind Valley Case Study”*. ASCE JSE, August 2010, pg. 132-138.
- [5] Casula G., Fais S., and Ligas P. – *“An experimental application of a 3D terrestrial laserscanner and acoustic techniques in assessing the quality of the stones used in monumental structures”*. Int.J. Microstructure and Materials Properties, Vol. 4, No. 1, 2009. Pag. 45-55.
- [6] Sgrenzaroli M., e Vassena G.P.M. - *“Tecniche di rilevamento tridimensionale tramite laser scanner”*, Volume 1 – Introduzione generale. Proprietà letteraria riservata © 2007 Matteo Sgrenzaroli e Giorgio Paolo Maria Vassena © 2007, Starrylink Editrice Brescia, Collana Topografia e Cartografia, <http://www.starrylink.it>.
- [7] G. Porco, D. Romano, G. F. Valer Montero – *“Le tecniche NDT per il controllo dei materiali e delle strutture in ingegneria civile”*. Convegno: il ruolo dei controlli NDT per le verifiche di affidabilità e per le attività di manutenzione. MADEexpo 2012 – Milano. ISBN 978-88-89758-12-0.
- [8] G. Porco - D. Romano - G. F. Valer Montero – *“Monitoraggio in area sismica: rilevatori di deformazione a fibra ottica”*. Conferenza Nazionale sulle Prove non Distruttive - Monitoraggio Diagnostica. 15° Congresso Nazionale AIPnD, 23-26 Ottobre 2013- Trieste.