

MONITORAGGIO IN AREA SISMICA DI BENI MONUMENTALI:

TECNICHE NDT E PROCEDURE DI VERIFICA

R. Basili², M.G. Bianchi⁵, G. Casula⁵, M. D'Amico³, A. D'Alessandro⁷, U. Di Giammatteo¹, A. Gervasi⁷, I. Guerra⁷, M. Musacchio², F. Pacor³, D.Romano⁶, E. Russo⁴, M. Tiberti², G. F. Valer Montero⁶.

¹A.C.S. S.p.A, via della Bufalotta 378 - 00139 Roma

²INGV, Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, via di Vigna Murata 605 – 00143 Roma

³INGV, Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Via Bassini 15, 20133 Milano

⁴INGV, Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Ponte Pietro Bucci, Cubo 30C, 87036 Rende (CS)

⁵INGV, Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Via D. Creti 12, 40100 Bologna

⁶SISMLAB s.r.l., Via P. Pietro Bucci, Università della Calabria - 87036 Rende (CS)

⁷UNICAL, Università della Calabria, via Pietro Bucci - 87036 Rende (CS)

INTRODUZIONE

Negli ultimi anni il concetto di vulnerabilità sismica è tristemente entrato a far parte delle conoscenze anche dei non addetti ai lavori. Infatti, gli eventi sismici che hanno interessato dagli inizi del '900 il territorio Italiano, hanno sistematicamente messo in risalto l'elevata vulnerabilità sismica del nostro patrimonio edilizio, ivi compresi i beni monumentali, nonché, l'inesistenza di qualsiasi attività di programmazione della manutenzione periodica ordinaria e straordinaria delle strutture sismo-resistenti, che garantiscono nel tempo la conservazione delle loro capacità di risposta alle perturbazioni esterne.

In questo ambito, sicuramente le NTC'08, dopo anni di vuoto normativo sui temi della verifica del patrimonio edilizio esistente e sul monitoraggio strutturale, finalmente ampliano il concetto di controllo, inteso, non solo come azione eseguita a valle e cioè quando l'opera è già sede di degrado o di un dissesto evidente, ma come un insieme di attività finalizzate ad evitare tali situazioni. L'insieme delle procedure e delle metodologie di analisi, utili a perseguire la verifica di sicurezza di una struttura sia essa in muratura o in c.a. anche tutelata, sono esplicitate in forma protocollare nelle Norme di riferimento e hanno una articolazione diversificata in termini di invasività, al fine di assicurare, nel caso di strutture a valenza storica artistica, la conservazione e la integrità del bene. Sicuramente, il nuovo impianto normativo ha prodotto una svolta al controllo dell'esistente che negli anni passati non era disciplinato ed il più delle volte veniva affrontato con procedure estemporanee ed a forte connotazione soggettiva. Tuttavia, le NTC08 non forniscono ancora una metodologia che possa tener conto al passare del tempo delle mutate condizioni del bene, le quali rendono variabile il concetto di sicurezza. In pratica, quest'ultimo, introdotto dalle NTC'08 è fortemente ancorato al momento in cui il controllo viene eseguito, e l'aggiornamento dell'affidabilità strutturale potrà essere rivalutato in epoche successive, solo con la riproposizione dello stesso protocollo associato con una forte attività di campo da parte dei tecnici. Questa

limitazione potrà essere, a giudizio di chi scrive risulta, associando alle procedure di controllo oramai consolidate e basate principalmente su metodologie NDT, architetture di monitoraggio per l'aggiornamento delle variabili di controllo e processi di diagnosi in tempo reale, procedendo al trattamento dei dati ed alla loro interpretazione mediante un sistema di controllo autodiagnosticante. L'idea è stata trasfusa in un progetto di ricerca identificato con l'acronimo "MASSIMO", che verrà illustrato all'interno del presente lavoro, con il fine anche di mostrare come la disponibilità di procedure sperimentali non distruttive e di sistemi di monitoraggio possono costituire un mezzo formidabile per garantire la tutela del patrimonio artistico.

1. IL PROGETTO "MASSIMO"

Il progetto PON sul Monitoraggio in Area Sismica di Sistemi Monumentali nasce con la prerogativa di produrre uno strumento dedicato alla tutela di strutture a valenza storico – artistica, attraverso un percorso di catalogazione, di analisi del bene inteso come elemento costituito da elementi resistenti e da materiali, di studio del sito dove la struttura è ubicata e di attività di monitoraggio. Con questa prerogativa il progetto è stato presentato dai proponenti al MIUR che, con Decreto Direttoriale n. 1/Ric. del 18 Gennaio 2010, ha selezionato, con un invito aperto, progetti ad alto contenuto scientifico-tecnologico capaci di innovare prodotti, processi e servizi del tessuto imprenditoriale. L'obiettivo era ed è rendere più competitive le Regioni della Convergenza (Puglia, Sicilia, Calabria, Campania), favorendo lo sviluppo sostenibile del territorio, insieme ad una diversificazione della specializzazione produttiva e il consolidamento dei settori di eccellenza. La possibilità di creare sinergie innovative nell'integrazione di soggetti pubblici (Università ed Enti Pubblici di Ricerca, e Organismi di ricerca) e privati (Grande, media e piccola impresa) rappresenta uno degli obiettivi paralleli delle azioni del MIUR, considerando comunque determinante nella presentazione dei progetti il riferimento all'impiego e allo sviluppo di quelle tecnologie abilitanti, in grado di rafforzare la competitività dei sistemi produttivi e migliorare la qualità della vita. I programmi di coesione e sviluppo sociale supportati dal MIUR, sono confluiti nel Programma Operativo Nazionale "Ricerca e Competitività" 2007-2013 (PON "R&C"), che è lo strumento attraverso il quale l'Italia contribuisce allo sviluppo della Politica di Coesione della Unione europea a favore delle proprie aree territoriali più svantaggiate. Di concerto, l'Unione europea e l'Italia, hanno condiviso che una consistente quota delle risorse dei Fondi strutturali europei fosse destinata al sostegno delle attività di ricerca e innovazione nelle 4 Regioni dell'Obiettivo "Convergenza"(Puglia, Calabria, Sicilia, Campania), con l'obiettivo di farne motori di sviluppo sociale e economico.

In questo contesto normativo e programmatico, l'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, l'Università della Calabria, la Sismlab S.r.l., l'A.C.S. s.p.a. ed Ecoteam S.r.l. si sono trovate nel condividere gli intenti e gli obiettivi confluendo nella stesura della proposta di progetto MASSIMO, "Monitoraggio in Area Sismica di Sistemi Monumentali" in accordo a quanto elencato all'art. 1 comma 6 del D.D. n. 1/Ric del 18 gennaio 2010 si colloca nel settore/ambito "Beni Culturali; Tecniche e tecnologie per la tutela, valorizzazione e fruizione dei beni culturali". Questa proposta è stata poi accettata e finanziata dal Ministero dell'Istruzione e della Ricerca Scientifica.

1.1. CONTENUTI ED OBIETTIVI DEL PROGETTO DI RICERCA

L'obiettivo generale del progetto MASSIMO è la generazione di una installazione complessa, in parte infrastrutturale ed in parte strumentale che verrà destinata al monitoraggio dei beni architettonici e monumentali della regione Calabria e che intende fungere da volano per lo sviluppo economico e per le attività tecniche in questo particolare ambito.

L'infrastruttura si caratterizzerà come veicolo portatore di soluzioni tecniche e tecnologiche ad oggi non presenti nel sistema di produzione industriale, risponderà alle caratteristiche di operare nell'ambito delle aree scientifico-tecnologiche in grado di generare processi di trasformazione del sistema produttivo regionale e contribuendo alla creazione di nuovi settori di eccellenza nella Regione.

Il progetto MASSIMO prende corpo dall'analisi di quanto è già stato eseguito sul territorio in termini di identificazione e catalogazione, secondo gli standard nazionali, delle strutture architettoniche e dei beni culturali nelle provincie di Cosenza e Reggio Calabria. La selezione dei siti, chiamati anche dimostratori, è stato un passo propedeutico allo sviluppo delle attività tecnico scientifiche ed è stato condotto tenendo presente le esigenze delle autorità locali incaricate della gestione del patrimonio pubblico. Quest'attività ha permesso di selezionare i dimostratori, che sono caratterizzati dalla combinazione di una tipologia costruttiva specifica e di una precisa disposizione geologico-geografica.

I dimostratori identificati sono:

- Il Complesso monumentale di Sant'Agostino a Cosenza (Beni Architettonici e Monumentali)
- Il Monastero della Visitazione a Reggio Calabria (Cemento Armato)

A valle della scelta tipologica sopra descritta è iniziata la fase di progettazione e sviluppo di un sistema strumentale complesso che prevede l'uso di strumenti di misura ed analisi prossimali e di sensori dedicati all'analisi dei movimenti relativi suolo/edificio. Si procederà anche all'installazione, su indicazione delle Sovrintendenze competenti, di sensori in prossimità ed all'interno di strutture monumentali presenti nei siti scelti per valutarne alcune caratteristiche di

oscillazione (frequenze proprie di risonanza, moti differenziali, etc.), un insieme di strumenti per la misura di parametri funzionali alla definizione dello stato di conservazione del bene in esame (Camere termiche, Laser scanner Architettonico, Spettroradiometri), di sismometri (velocimetri e accelerometri più digitalizzatori) capaci di operare nel range di frequenze di interesse sia sismologico che di ingegneria sismica. Questi strumenti ed infrastrutture saranno collegate attraverso un sistema di trasmissione ed analisi delle informazioni acquisite dalla strumentazione dispiegata. I parametri così acquisiti, permetteranno il confronto tra le caratteristiche dei terreni unitariamente agli edifici prescelti, nel tentativo, quindi, di raggiungere una visione olistica dei beni considerati. La definizione di modelli di catalogazione dei beni soggetti a rischio sismico, linee guida per la definizione di interventi conservativi e protocolli attuativi di intervento rappresentano i risultati paralleli del progetto MASSIMO.

1.2. UNA PROPOSTA OPERATIVA DI CONTROLLO IN AREA SISMICA BASATA SU SISTEMI DI MONITORAGGIO RESIDENTI

Il progetto, per poter rendere sempre aggiornato sotto il profilo temporale, il controllo di un edificio in muratura o in c.a soggetto a tutela, propone operativamente una procedura basata sul monitoraggio e sui controlli NDT che sinteticamente è rappresentata negli schemi riportati nelle figure 1 e 2 . Le procedure per come riportato negli schemi attuativi sono basate su una consistente fase di acquisizione di dati di primo impianto, che consistono principalmente in controlli e rilievi in opera con tecniche NDT e congruenti con quanto contenuto nelle NTC08. La procedura, ed è qui la novità, si arricchisce al passare del tempo di dati provenienti dai sistemi residenti di monitoraggio che forniranno nuovi parametri e nuove variabili utili all'aggiornamento dei coefficienti di sicurezza.

Nelle sezioni seguenti chiarita succintamente la procedura decisionale relativa alla verifica di sicurezza di un edificio in c.a o in muratura in area sismica, verranno illustrati alcuni aspetti legati alle aree di sedime, alle strutture ed ai materiali, cui correntemente si ricorre per affrontare il percorso di analisi e di valutazione.

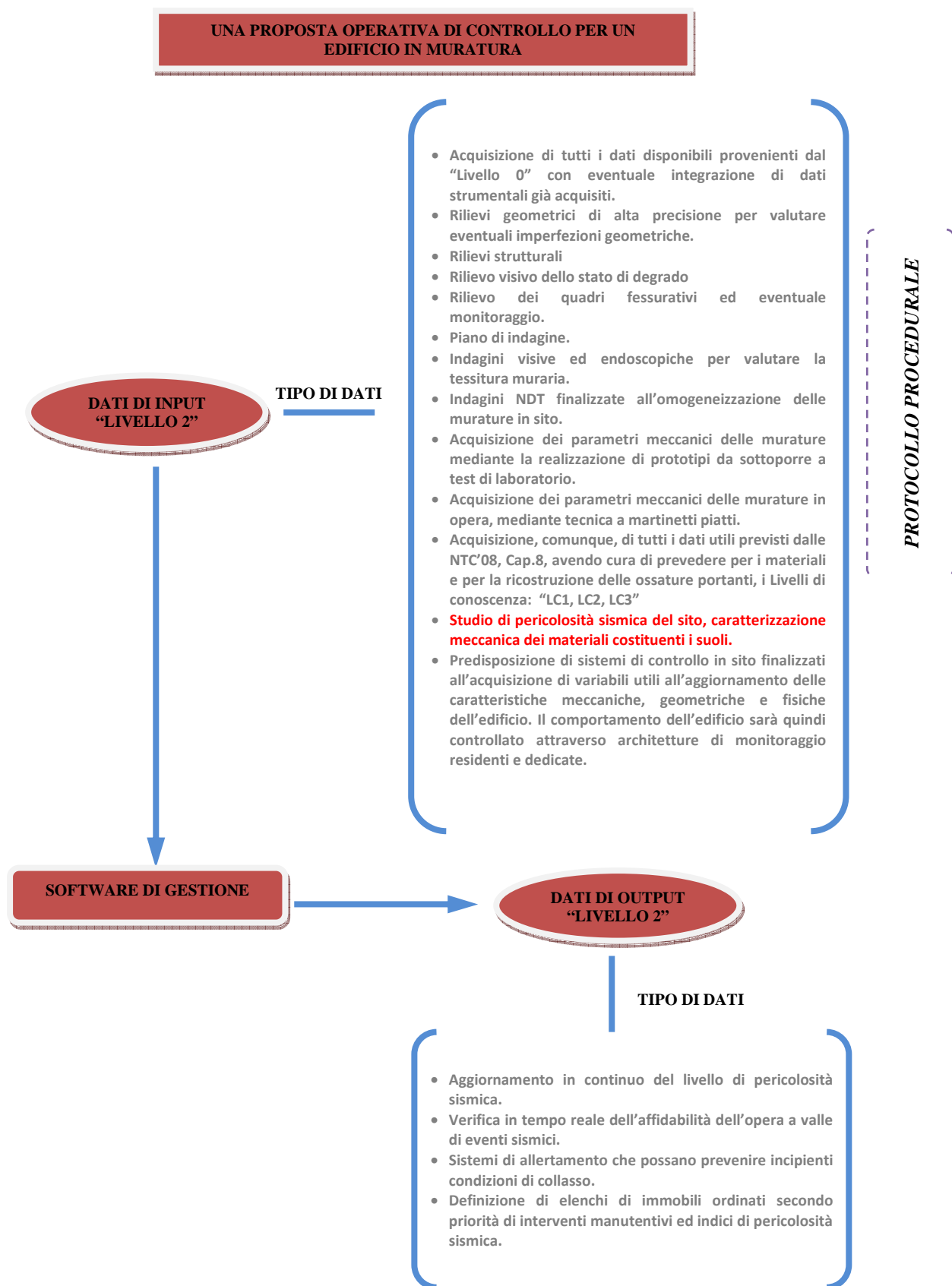


Fig. 1 – Proposta operativa di controllo per un edificio in muratura

UNA PROPOSTA OPERATIVA DI CONTROLLO PER UN EDIFICIO
IN C.A.

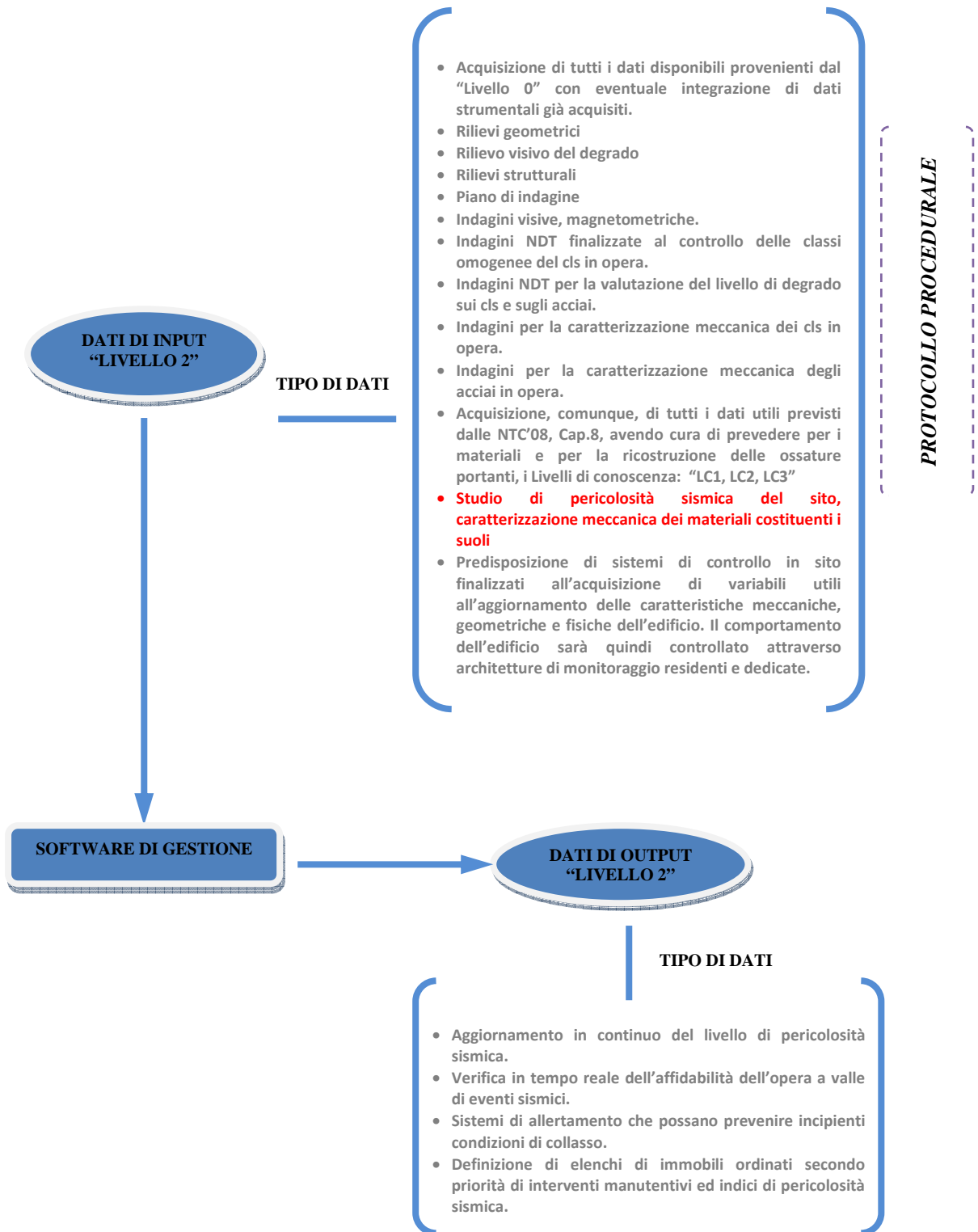


Fig. 2 – Proposta operativa di controllo per un edificio in c.a.

2. LA VERIFICA DI SICUREZZA SU EDIFICI STORICI IN C.A. E MURATURA IN AREA SISMICA

Gli schemi operativi riportati nella sezione precedente possono essere illustrati con l'ausilio di fasi ordinate cronologicamente, in modo da rendere più evidenti il primo step di input e il completamento della procedura ossia la fase di output la quale, con l'aggiornamento continuo di alcune variabili proveniente dai sistemi di monitoraggio produrrà un continuo aggiornamento sullo stato di affidabilità del bene.

Nel dettaglio, la verifica di sicurezza in area sismica potrà essere effettuata secondo le fasi appresso riportate.

Fase I

- a) Analisi del sito, indagini geologiche e studi di pericolosità sismica;
- b) Ricognizione sullo stato dei luoghi;
- c) Attività decisionale relativa: alla messa in sicurezza di aree e parti strutturali ed all'eventuale controllo dei quadri fessurativi;
- d) Attività di reperimento della documentazione disponibile;
- e) Rilievi geometrico-strutturali;

Fase II

- f) Definizione del piano di indagine, predisposizione di tavole grafiche esplicative;
- g) Esecuzione delle indagini visive ed NDT;
- h) Esecuzione delle indagini in situ:
 - 1. sulle murature: esecuzione indagini Soniche e a martinetto piatto;
 - 2. sui calcestruzzi e sugli acciai: esecuzione di prelievi di materiale con successiva caratterizzazione meccanica degli acciai e dei calcestruzzi in laboratorio;
- i) Definizione degli organismi strutturali e materici da sottoporre a verifica;
- j) Fasi di input;
- k) Acquisizione di un primo livello di verifica in ottemperanza alle NTC08;
- l) Progettazione e realizzazione di sistemi di monitoraggio in opera;

Fase III

- m) Fase di acquisizione delle variabili in opera monitorate, secondo una definita cronologia o a seguito di un evento singolare;
- n) Fase di output periodica o con aggiornamento dei livelli di affidabilità dell'opera.

Tutte le attività richiamate evidenziano una forte multidisciplinarietà delle diverse fasi che racchiudono conoscenze geologiche, sismiche, ingegneristiche e di controllo dei materiali. Al fine di rendere più agevole la lettura di seguito brevemente saranno richiamati alcuni utili concetti

relativi alla pericolosità sismica del sito, alla ricostruzione geometrica delle parti resistenti delle strutture, soffermandosi infine sulle tecniche NDT di controllo dei materiali che trovano ampio spazio nella procedura proposta.

2.2. L'IMPORTANZA DELLE SORGENTI SISMOGENETICHE PER LA VALUTAZIONE DELLA PERICOLOSITÀ SISMICA

Per pericolosità sismica di un sito si intende la probabilità che a causa di un terremoto esso sia interessato in un prefissato intervallo di tempo da uno scuotimento superiore ad un certo livello. Il modo di fissare la soglia dipende dal parametro utilizzato per valutare lo scuotimento (intensità, accelerazione di picco, ecc). Qualsiasi sia il parametro utilizzato, per la determinazione della pericolosità sismica è necessaria la conoscenza dei parametri fondamentali delle sorgenti sismogenetiche (localizzazione e dimensioni), in quanto da questi dipende la distribuzione degli effetti, che risultano condizionati innanzitutto dall'energia liberata dal terremoto (espressa indirettamente dalla magnitudo dell'evento) e dalla distanza ipocentrale. Ulteriori fattori che condizionano la severità degli effetti diretti o indiretti del terremoto in un sito sono l'attenuazione delle onde sismiche, dipendente dalle caratteristiche del mezzo attraversato, ed il *pattern* di radiazione, cioè la variazione dell'ampiezza e del contenuto frequenza delle onde elastiche emesse dalla sorgente, variabili entrambe in funzione dell'azimuth e a loro volta influenzate dalla velocità e dalla direzione in cui si sviluppa la frattura lungo il piano di faglia.

Lo studio della sismicità storica riveste chiaramente un ruolo fondamentale nell'individuazione delle principali aree sismogenetiche. Tuttavia, come ben noto, i cataloghi della sismicità storica Italiana risultano incompleti o possono considerarsi localmente completi solo per eventi di magnitudo medio-alta e comunque solo a partire dall'anno 1000 circa. Negli ultimi decenni, le numerose indagini geologiche e paleosismologiche condotte sul territorio Italiano hanno mostrato come forti terremoti possono avere tempi di ricorrenza molti lunghi, anche dell'ordine delle migliaia di anni. L'utilizzazione delle notizie storiche nella caratterizzazione delle sorgenti sismogenetiche è complicata non solo dal problema della scarsa estensione temporale e dell'incompletezza dei cataloghi, ma anche da quelli della debolezza dei vincoli e talvolta addirittura della non univocità della determinazione dei loro parametri. È chiaro quindi che, per una corretta stima della pericolosità sismica, le informazioni di sismicità storica devono essere integrate con accurati studi della sismicità strumentale. La sismologia strumentale oggi, grazie all'accresciuta densità di stazioni sismiche presenti sul territorio nazionale e alla definizione sempre più dettagliata di modelli di velocità crostale, permette di determinare con elevata accuratezza e precisione i parametri focali anche di terremoti di moderata magnitudo. Per il territorio italiano oggi, mentre i

cataloghi di sismicità storica possono essere considerati completi solo per magnitudo superiori a 5, quelli di sismicità strumentale risultano completi per magnitudo 2.5 (localmente anche molto meno). È da ricordare che le aree sismogenetiche attive vengono individuate strumentalmente proprio perché sono sedi di attività sismica. Le moderne tecniche di osservazione permettono di definire oltre ai volumi sismogenetici anche i piani di scorrimento.

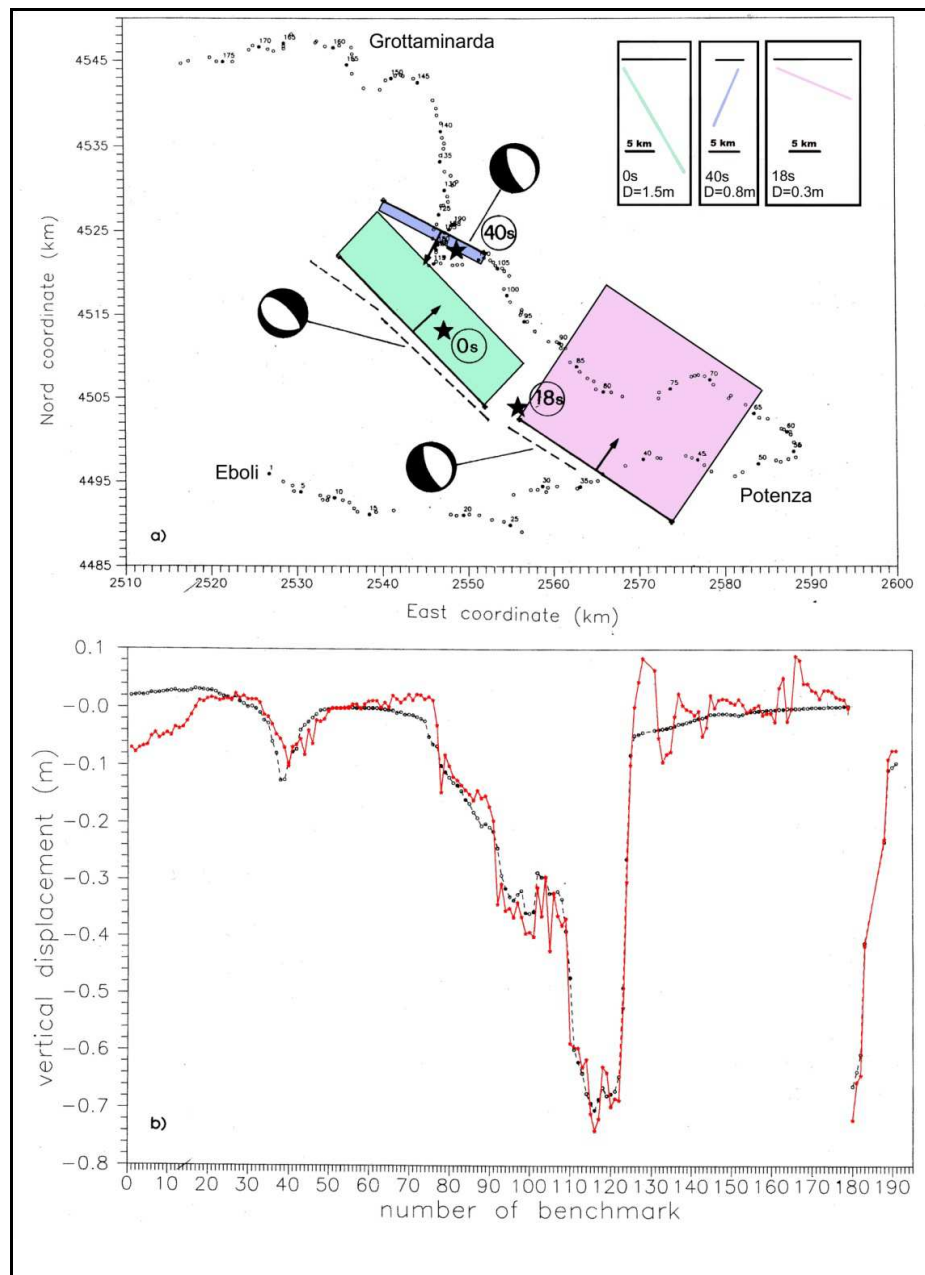


Fig. 3 - Modello genetico del terremoto dell'Irpinia del 23 novembre 1980 (da Pingue et al., 1993, ridisegnato). (a) Secondo il modello proposto da Barnard e Zollo (1989), il terremoto dell'Irpinia è stato generato da tre rotture originate nei punti rappresentati da stelle e propagatesi lungo diversi piani di faglia (rettangoli) ai tempi 0, 18 e 40 sec; le frecce indicano la direzione di immersione dei piani; nei tre inserti in alto a destra le loro sezioni verticali e gli spostamenti tra i lembi delle faglie. (b) confronto tra gli spostamenti verticali misurati lungo la linea di livellazione Grottole – Potenza – Eboli (linea rossa) e valori teorici calcolati sulla base del modello illustrato in (a).

Inoltre, i meccanismi focali ormai determinabili con sufficiente accuratezza anche per piccole magnitudo, forniscono informazioni addizionali, quali la giacitura del piano di faglia e il

vettore scorrimento, i quali possono permettere la ricostruzione del *pattern* di irraggiamento sismico e quindi una più accurata stima della pericolosità sismica.

Le conoscenze attuali, supportate dalla moderna informatica, consentono di descrivere, con un dettaglio difficilmente immaginabile fino ad alcuni decenni orsono, la nascita e lo sviluppo del fenomeno di fratturazione che porta al terremoto, anche nel caso di eventi di moderata magnitudo.

Il problema più grave delle moderne ricerche sismologiche è che le conoscenze vengono acquisite a posteriori e che gli studi attuali probabilmente non porteranno a conoscenze trasformabili in procedure operative in tempo utile. La speranza che anima i sismologi in attività è quella di pervenire ad un miglioramento della conoscenza della fisica delle sorgenti sismiche e alla delineazione di un quadro di grandissimo dettaglio delle strutture sismogenetiche identificabili con le tecniche di monitoraggio sismico e geodetico. L'esperienza ha mostrato infatti che i terremoti di maggiore energia consistono in genere in un fenomeno complesso di fratture, che si susseguono in rapida sequenza su strutture sismogenetiche a distanze sufficientemente ridotte affinché la variazione dello stato di sforzo nell'intorno di una di esse inneschi la frattura di una adiacente. Il terremoto dell'Irpinia del 1980 [1],[2] ad esempio è stato attribuito a tre episodi di frattura in rapida sequenza lungo piani di scorrimento distinti (Fig.3).

Questo discorso è particolarmente valido per le aree della Dorsale Appenninica, consistente in un edificio a falde di ricoprimento. In questo caso le possibili superfici di frattura non sono visibili all'osservazione diretta e per la loro natura presumibilmente presentano tutte delle dimensioni lineari piuttosto limitate. Per questo motivo, fin quando godremo dell'attuale pausa nell'attività sismica di elevata energia cominciata per la Calabria e la Sicilia nord-orientale nel 1908, è di fondamentale importanza intensificare, come si sta facendo nell'ambito del progetto MASSIMO, il monitoraggio della sismicità di basso livello energetico con tecniche non solo sismografiche ma anche di deformazioni del suolo (GPS e SAR). La definizione di modelli di velocità sempre più dettagliati, porterà col tempo alla definizione di localizzazione, giacitura, dimensioni e campi di sforzo per una serie di sorgenti sismogenetiche anche poco significative singolarmente, ma potenzialmente molto pericolose nell'ipotesi di fratture sequenziali.

2.3. IL RUOLO DELLE SORSENTI SISMOGENETICHE NELLA STIMA DEL MOTO ATTESO AL SUOLO

La tettonica dell'Arco Calabro è dominata dalla presenza della subduzione, a cui sono in vario modo legate sia le faglie crostali trascorrenti e normali della porzione emersa, sia le strutture inverse presenti nell'offshore ionico. La conoscenza delle sorgenti sismogenetiche in Calabria è finora progredita in gran parte nell'area onshore. Numerose sono tuttavia anche le strutture a mare, che possono generare terremoti con risentimenti anche a terra. Le faglie parametrizzate e qui presentate

sono sorgenti sismogenetiche composite sensu Basili et al. (2008) e DISSWG (2010; Database of Individual Seismogenic Faults, <http://diss.rm.ingv.it/diss/>)[4],[5].

Per ognuna delle tre città sede dei dimostratori selezionati dal progetto MASSIMO sono state individuate le sorgenti sismogenetiche di maggiore interesse (Fig.4) e definiti i parametri necessari allo svolgimento delle analisi successive.

La conoscenza dell'ubicazione e la modellazione dei parametri geometrici e cinematici delle sorgenti sismogenetiche potenzialmente più minacciose per l'area oggetto di studio rappresentano il dato di partenza per la stima del moto atteso al suolo. Tali stime costituiranno l'input sismico per la valutazione della risposta di strutture strategiche e architettoniche individuate nell'ambito del progetto.

L'approccio di base per il calcolo di scenari di scuotimento deterministici può essere schematizzato mediante i seguenti passaggi:

- a. individuazione delle faglie sismogenetiche potenzialmente pericolose per i siti e definizione delle loro caratteristiche geometriche e sismologiche (momento sismico, meccanismo focale, massimo spostamento);
- b. definizione della struttura e delle caratteristiche reologiche del mezzo di propagazione tramite velocità delle onde sismiche, densità e fattore di qualità o fornendo i parametri del modello di attenuazione e dello *spreading* geometrico;
- c. definizione degli intervalli di variabilità dei parametri cinematici descriventi il processo di rottura della sorgente (punti di nucleazione, distribuzioni di slip, *rise time*, velocità di rottura);
- d. applicazione di modelli empirici predittivi e/o di tecniche di simulazione del moto sismico;

	Tecniche	Grandezze simulate	Variabilità associata
Livello 0	Modelli empirici predittivi del moto del suolo a scala regionale e nazionale	Valori di picco in accelerazione e velocità ordinate spettrali (PGA, PGV) Parametri integrali del moto (intensità di Arias e Housner) Intensità macrosismica	Deviazione standard dei modelli empirici predittivi
Livello 1	Tecniche di simulazione stocastiche	Serie temporali "approssimate" calcolate su sorgente puntiforme o estesa, per campo vicino e lontano, solo per fasi dirette, con limiti in alta o bassa frequenza	Analisi statistica relativa alla distribuzione dei parametri derivati da famiglie di serie temporali simulate.
Livello 2	Tecniche di simulazione ibride	Sismogrammi sintetici larga banda contenenti l'intero campo d'onda.	Analisi statistica relativa alla distribuzione dei parametri derivati da famiglie di sismogrammi sintetici simulate.

Tab. 1 – Scenari di scuotimento sismico ai diversi livelli di complessità

Gli scenari di scuotimento sismico possono essere elaborati a diversi livelli di complessità definiti in funzione delle tecniche di calcolo utilizzate per la stima del moto (Tab. 1). La scelta del livello di complessità dipende sia dalle caratteristiche sismotettoniche delle aree di studio che dal successivo utilizzo ingegneristico dei dati simulati.

Nell'ambito del progetto MASSIMO, la generazione di accelerogrammi sintetici da cui deriveranno le mappe di scuotimento atteso verrà effettuata mediante l'utilizzo di tecniche di simulazione stocastica (ad esempio, EXSIM, Motazedian and Atkinson, 2005, o DSM, Pacor et al., 2005)[6],[7]. Tali tecniche, benché approssimate, permettono la simulazione di un elevato numero di scenari e ben riproducono il comportamento di una faglia estesa nella banda di frequenze di interesse ingegneristico.

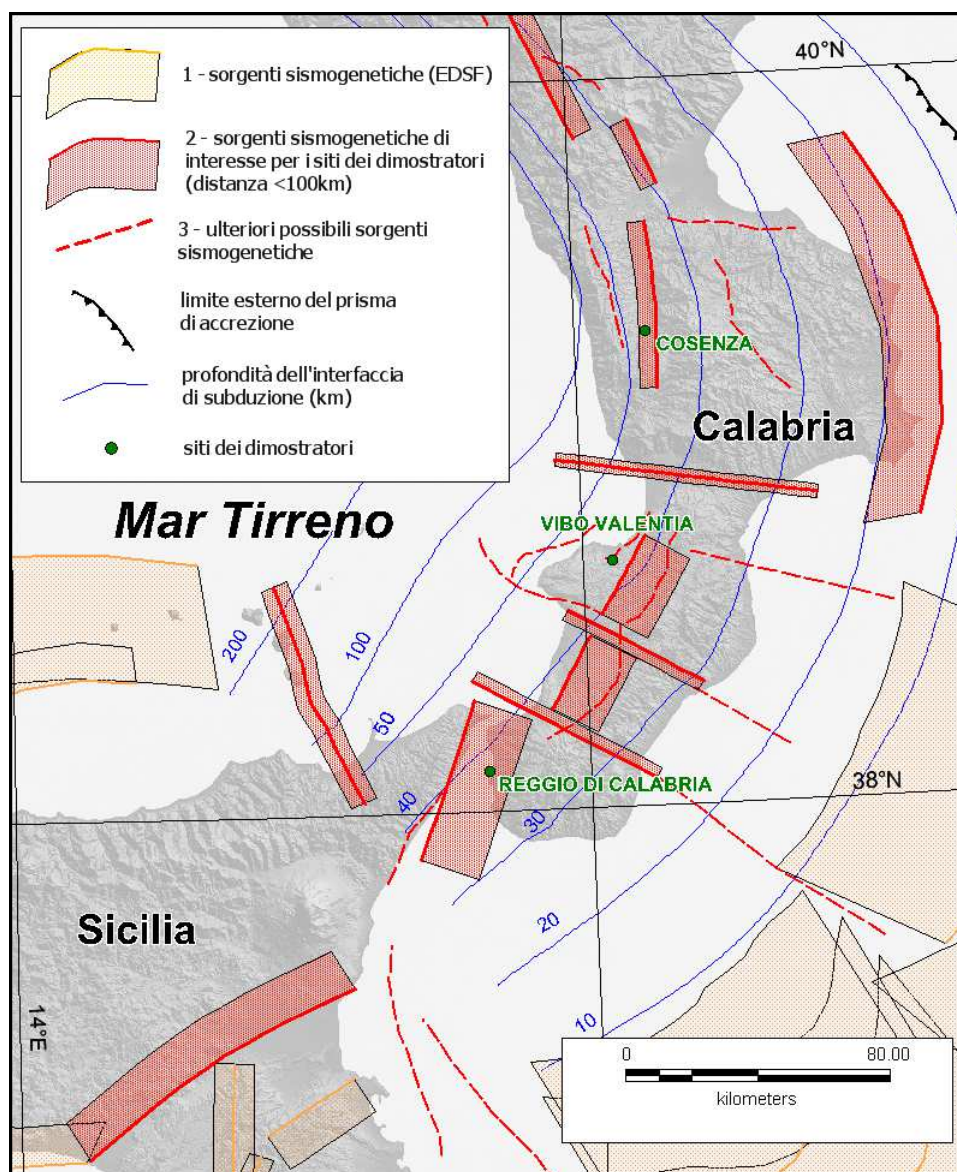


Fig. 4 – Sorgenti sismogenetiche in Calabria e zone limitrofe. 1 – sorgenti presenti nello European Database of Seismogenic Faults (EDSF - <http://diss.rm.ingv.it/share-edsf/>)[3], 2 – sorgenti sismogenetiche nel raggio di 100 km dai siti dei dimostratori e completamente parametrizzate, 3 - strutture crostali note o possibile prolungamento *offshore* di strutture note *onshore* la cui capacità di rilasciare terremoti di magnitudo significativa non è conosciuta o non ancora investigata.

2.4. IL RILIEVO DELLE MEMBRATURE PORTANTI E LA VALUTAZIONE DELLE CARATTERISTICHE MECCANICHE DEI MATERIALI

La prima parte della procedura di analisi e di valutazione è basata, per come riportato precedentemente, sulla ricostruzione delle membrature portanti delle strutture in esame e sulla identificazione dei parametri meccanici dei materiali. La seconda parte del processo introduce come innovazione del controllo i sistemi di monitoraggio installati in opera con rilevazioni anche in continuo. Appare opportuno pertanto, al fine di offrire qualche utile spunto su tali attività soffermarsi a delineare strumenti e metodi per il rilievo, metodologie sperimentali di campo NDT e sistemi di monitoraggio dei livelli di deformazione in area sismica[9].

2.4.1 Indagine magnetometrica

L'indagine magnetometrica è una tecnica sperimentale che nella maggioranza dei casi risulta tecnica preliminare sia per l'esecuzione delle indagini sulle strutture in c.a., che sulle murature. Infatti, per poter eseguire le indagini a martinetto piatto all'interno di un paramento murario, è utile verificare l'assenza di qualsiasi elemento appartenente agli impianti, così come di elementi in acciaio.

Per la sua minima invasività, può considerarsi un'indagine NDT da eseguire anche su un bene monumentale in muratura.

2.4.2 Indagini endoscopiche

Le indagini endoscopiche permettono il rilievo stratigrafico della muratura e l'individuazione di eventuali vuoti o cavità all'interno dei corpi murari.

Lo strumento che viene utilizzato è il boroscopio rigido, cioè un'asta con opportuno sistema di lenti e luce guida che permette la completa ispezione interna delle pareti del foro dalla quale è deducibile l'esecuzione tecnologica della muratura permettendo di rilevare qualsiasi situazione di discontinuità.

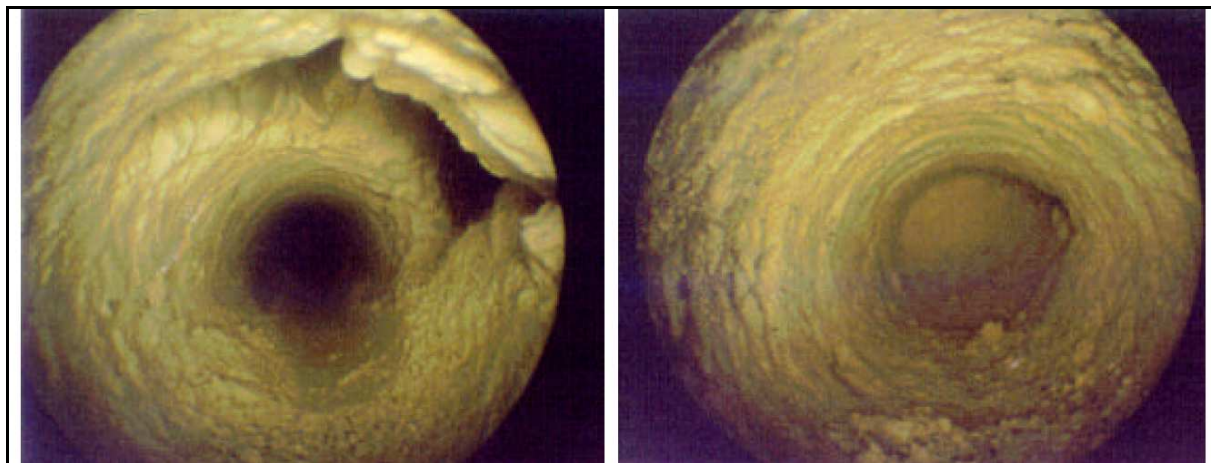


Fig. 5 – Applicazione dell'endoscopio all'interno di una muratura

Qualora siano presenti nella muratura fessure o distacchi sufficientemente ampi si può ricorrere all'utilizzo dell'endoscopio flessibile, dotato di fibra ottica, che ha la particolarità di adattarsi al cammino del foro. All'endoscopio può essere applicata una macchina fotografica o una videocamera che consente l'archiviazione della prova eseguita.

2.4.3 Indagini soniche

L'indagine sonica è una tecnica NDT che 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.

La tecnica di indagine sonica (Fig.6) si basa sulla generazione di impulsi meccanici con frequenze nel campo del sonoro (20-20000 Hz) e per questo detti sonici.

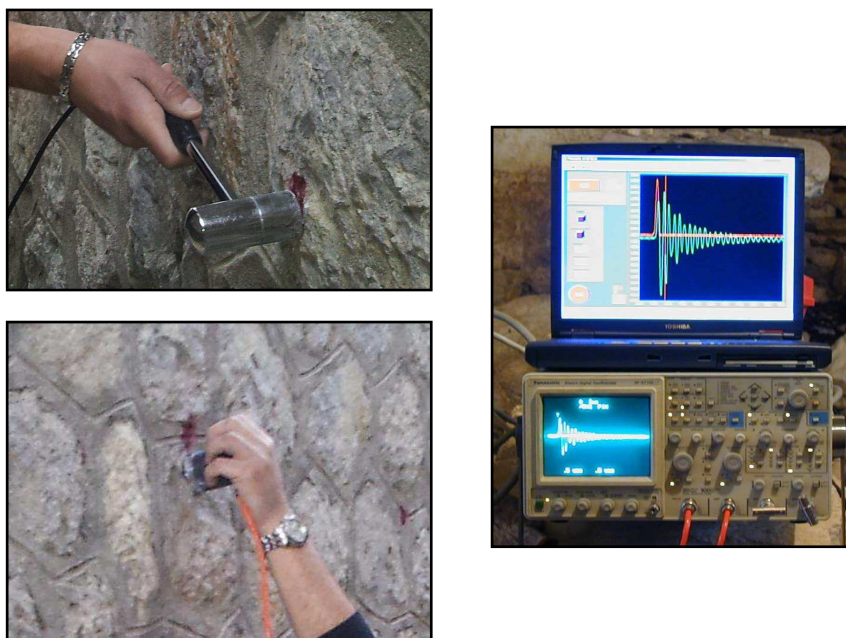


Fig. 6 – Strumentazione indagine sonica

L'onda sonora viene generata sul supporto murario mediante ad es. battitura con martello strumentato, e viene quindi ricevuta da un sensore (ad esempio un accelerometro) posto in un punto diverso della struttura. Entrambi i dispositivi sono collegati ad un amplificatore di segnale e ad un convertitore analogico-digitale per la visualizzazione e registrazione dei dati.

Per la sua minima invasività, può considerarsi un'indagine NDT da eseguire anche su un bene monumentale in muratura.

2.4.4 Martinetti piatti

La tecnica dei martinetti piatti, a differenza delle altre metodologie NDT, permette di valutare sperimentalmente e direttamente, alcuni parametri meccanici della muratura e di stabilire l'impegno statico delle pareti sia esse portanti che non, 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.



Fig. 7 – Prova a martinetto singolo

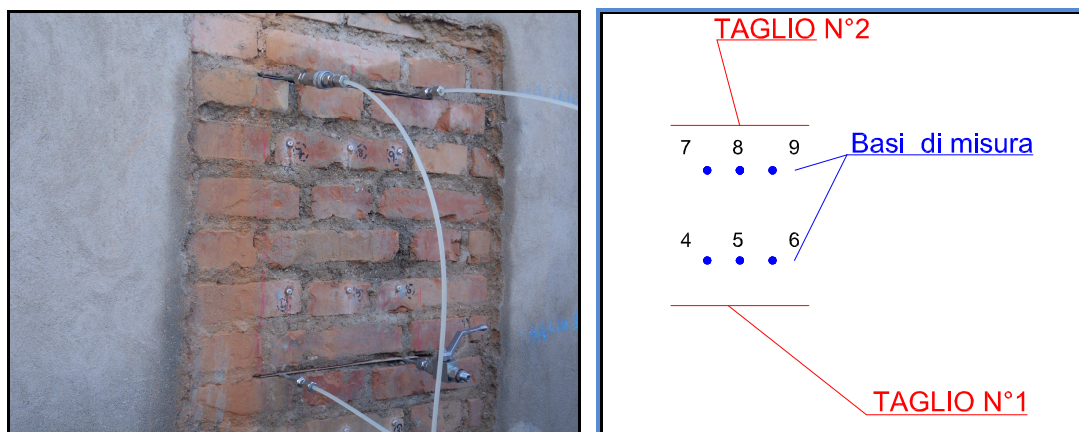


Fig. 8 - Prova a martinetto doppio: schema

Per la loro invasività, è da ridurre al minimo l'uso di queste indagini su un bene monumentale in muratura.

2.4.5 Monitoraggio dei quadri fessurativi

Mediante il monitoraggio dei quadri fessurativi, si può arrivare alla determinazione delle cause perturbatrici e di conseguenza, allo studio ed all'applicazione dei necessari rimedi di primo intervento o di natura definitiva.

Le operazioni di misurazione avvengono attraverso diverse tipologie di sistemi di acquisizione. Nel caso in cui il numero dei sensori sia elevato, è possibile impiegare sia un sistema centralizzato, sia più sistemi modulari dislocati nei vari punti della struttura, tutti comunque facenti capo ad un acquirente centralizzato, con collegamento per lettura a distanza.

Per applicazioni localizzate e con numero di sensori limitato, dislocati non molto distanti tra loro, i dati, dopo essere stati acquisiti e condizionati, vengono memorizzati, a cadenza prestabilita, su memoria non volatile riscrivibile. Le letture vengono quindi, effettuate periodicamente tramite collegamento seriale con computer portatile esterno o direttamente trasmesse via modem.

2.5. LA METODOLOGIA DI TELERILEVAMENTO PROSSIMALE PER LA VALUTAZIONE DELLO STATO DI CONSERVAZIONE DEL BENE

La tecnologia offre numerosi strumenti per l'analisi dello stato di conservazione del patrimonio edilizio storico; con il termine telerilevamento prossimale si intendono le tecniche di telerilevamento a piccola scala mediante sensori di vario genere che forniscono come prodotto finale immagini tridimensionali (3D) per lo studio e l'analisi qualitativa dell'oggetto indagato. I rilievi si possono raggruppare sotto due categorie: rilievi tramite sensori *passivi* e tramite sensori *attivi*. La prima tipologia di rilievo non si avvale di emissione di segnali propri ma sfrutta la luce solare riflessa per misurare le distanze (infrarossi, fotogrammetria e primi sistemi topografici). La seconda tecnica a sensori attivi si avvale di strumenti che emettono un proprio segnale come i sistemi a triangolazione a luce strutturata e il Laser a Scansione Terrestre (TLS). Il TLS è una tecnica di telerilevamento prossimale che può essere utilizzata da sola o come supporto ad altre tecniche di indagine non distruttive. Il TLS consiste in un emettitore (diodo) a luce laser di lunghezza d'onda che va dai 600 nm a 1500 nm pilotato da un sistema di specchi movimentato da un motore che consente il movimento di precisione del fascio laser su di una griglia calibrata a passo regolare e su di un angolo che può variare dai 20 ai 360 gradi in verticale ai 0-360 gradi in orizzontale. Un sensore integrato (diodo ricettore) rileva il segnale riflesso dall'oggetto investigato (*target*). Esistono essenzialmente due tipi di TLS, a tempo di volo (TOF) e a differenza di fase. I primi misurano il tempo di volo del segnale emesso e successivamente riflesso dalla superficie del *target* mentre i secondi misurano la differenza di fase fra il segnale laser emesso e quello riflesso dal *target* stesso. I TLS a tempo di volo sono strumenti ad impulso che vengono utilizzati principalmente per i rilievi a lunga distanza di fenomeni geologici come le misure della stabilità di versante ed il monitoraggio del dissesto idrogeologico (*very long range* – 1 Km o più); in questo caso la frequenza di acquisizione dei dati è pari a diverse decine di migliaia di punti al secondo. Nella tipologia TLS a variazione di fase il segnale laser è continuo e può avere velocità pari a un milione di punti al secondo. Questi strumenti possono arrivare a rilevare oggetti distanti fino ad un massimo di 150 metri; sono quindi adatti a rilievi di strutture architettoniche e consentono di ottenere come prodotto finale la modellazione 3D degli edifici.

I rilievi effettuati con i sistemi TLS producono *nuvole di punti* di cui sono note le coordinate X Y Z, e la *riflettanza* (o riflettività) ossia il rapporto fra la percentuale di segnale emesso e quella

di segnale riflesso dal *target*; infine, alla nuvola di punti è associato un set panoramico di fotografie dello scenario tramite una fotocamera digitale che consente di *colorizzare* la nuvola di punti stessa.

Tutti i rilievi TLS hanno un certo livello di rumore (*Noise level*): la nuvola di punti non restituisce valori complanari, ma esiste un margine di errore (per esempio dell'ordine di qualche millimetro per il TLS a variazione di fase) che è definibile per ciascun tipo di strumento.

Le nuvole di punti ottenute dai rilievi devono essere ripulite dal *noise level* mediante algoritmi specifici di filtraggio. Dopo il filtraggio preliminare si procede all'inquadrimento delle nuvole in un unico sistema di riferimento (registrazione) per ottenere la visione globale dell'intero scenario in esame. Infine si può passare attraverso applicazioni specifiche di modelli matematici che permettono di ottenere prima una *meshing* ossia una rappresentazione delle superfici attraverso triangoli adiacenti per procedere in seguito, tramite programmi opportuni, alla rappresentazione 3D dell'oggetto.

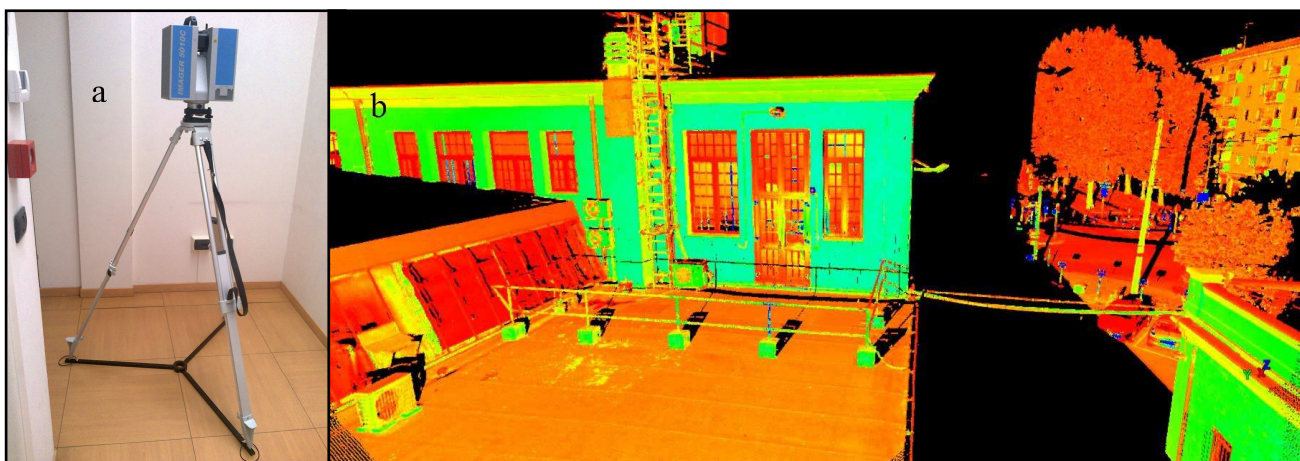


Fig. 9 – (a) Laser Scanner Architettonico in stazione durante il rilievo di un edificio. (b) Particolare della nuvola di punti con mappa di riflettanza derivante dal rilievo di un edificio.

Il prodotto finale sarà una immagine 3D dell'oggetto in esame, in scala naturale, dalla quale è possibile ottenere misure metriche di distanze semplicemente rimanendo seduti alla propria scrivania, misurando spessori, intersezioni con piani e quindi sezioni, oppure definire un quadro morfologico dell'oggetto in esame.

2.6. IL MONITORAGGIO PER LA PREVENZIONE SISMICA

In zona sismica, i sistemi residenti di monitoraggio vengono concepiti seguendo un rigido iter progettuale attraverso il quale sono rese evidenti le parti strutturali che, in virtù delle condizioni di carico verticali opportunamente combinate con il sisma, entrano per prima in stato di crisi e mediante l'impiego di misuratori di deformazione, possono essere tenute sotto controllo. Questo approccio, oramai consolidato per le strutture in c.a. di nuova costruzione, potrebbe costituire un

solido punto di partenza per proporre protocolli di monitoraggio di strutture esistenti realizzate in muratura. In pratica, con le dovute cautele e i necessari accorgimenti tecnico operativi, la metodologia del controllo basata sul rilievo della deformazione in campo statico, potrebbe essere proposta anche sul patrimonio edilizio esistente in muratura, per poter effettuare verifiche di affidabilità o attivare controlli *routinari* per gli interventi manutentivi. Il sistema da implementare dovrà essere in grado di fornire utili informazioni sullo stato di conservazione dei livelli di affidabilità dell'edificio per verificare al passare del tempo, il mantenimento della originaria vulnerabilità sismica. Inoltre, a valle di un evento tellurico di significativa portata, dovrà garantire l'accertamento della presenza o meno di stati di crisi e/o di condizioni di riduzione dei coefficienti di sicurezza. Una proposta di sistema di controllo non potrà prescindere da due aspetti principali, il primo di riconoscere quali parti strutturali di un edificio in muratura rappresentano gli elementi primari che si oppongono al sisma, il secondo la necessita di solidarizzare in predefinite aree dell'apparato murario, rilevatori di deformazione di lunghezza adeguata

In riferimento alla individuazione degli elementi primari, notoriamente i maschi murari verticali svolgono il ruolo di elementi resistenti principali quando sono ben solidarizzati, sia agli orizzontamenti, sia agli altri elementi verticali disposti in posizione trasversale. Pertanto, possiamo riconoscere in un organismo murario semplificato principalmente tre parti resistenti principali, ossia, i pannelli murari, i cordoli di collegamento e le zone di ammorsamento di pannelli disposti trasversalmente tra di loro.

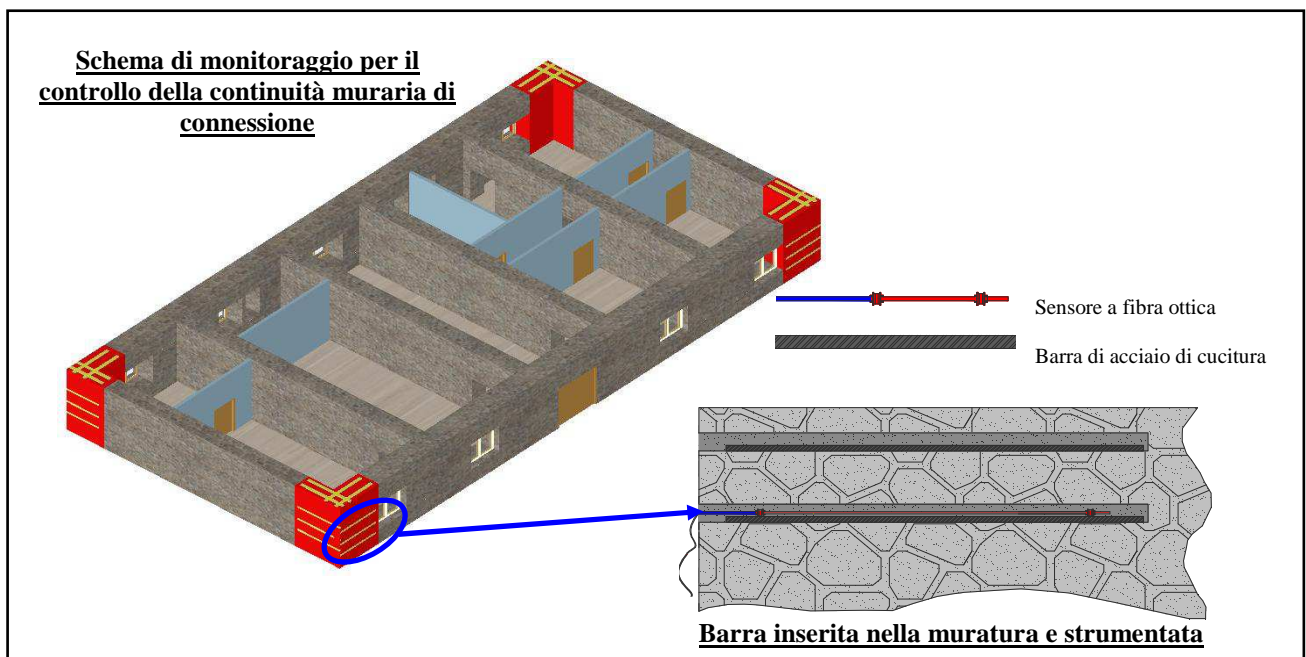


Fig. 10 – Schema di monitoraggio per il controllo della continuità muraria di connessione

La possibilità di cogliere in queste aree, modifiche del regime di deformazioni con misure quasi puntuali è estremamente arduo. Una delle vie che è possibile seguire per ridurre gli effetti scala e mitigare gli effetti locali, è quello di inserire per lunghezze apprezzabili all'interno della

muratura, con l'ausilio del carotaggio, delle barre di acciaio sulle quali possono essere installati dei sensori a fibra ottica.

Con riferimento alla figura 10, una possibile applicazione dei sensori in una area sensibile potrà avvenire con l'ausilio di barre di acciaio o di materiale pultruso inserite nell'apparato murario dotate di rilevatori di deformazione. In pratica, con l'ausilio di elementi guida in acciaio o di altro materiale utilizzati come basi di riferimento sui quali applicare dei misuratori di deformazione, sarà possibile definire un sistema di monitoraggio in opera per il controllo dei livelli di affidabilità delle strutture murarie esistenti. Naturalmente, un sistema efficace di controllo dovrà scaturire da una consistente analisi numerica di simulazione del comportamento dell'edificio sotto sisma, mediante la quale saranno individuati gli elementi resistenti da tenere sotto controllo per poter successivamente installare i rilevatori di deformazione sui supporti in acciaio. Inoltre, sarà indispensabile che i processi di acquisizione, elaborazione e interpretazione dei dati siano disciplinati da protocolli procedurali, dove saranno raccolte in ordine temporale le azioni da porre in essere per raggiungere gli obiettivi prefissi.

2.7. L'IMPORTANZA DI UNA BASE GRAFICA AD ALTA RISOLUZIONE PER L'ANALISI DI DATI DIAGNOSTICI ACQUISITI IN TEMPO REALE CON SENSORI LOCALI

Lo sviluppo delle tecnologie digitali consente oggi l'acquisizione e l'elaborazione di un numero sempre crescente di informazioni, ad altissima risoluzione geometrica, sui beni monumentali e offre la possibilità di analisi sempre più accurate ed affidabili. Tuttavia la disponibilità di queste enormi quantità di dati, in particolar modo di quelli acquisiti continuamente, pone nuove sfide tecnologiche per poter estrarne tutto il contenuto informativo al fine di adottare misure tempestive di prevenzione e correzione.

Per analizzare in maniera efficace i dati diagnostici acquisiti dai sensori locali è necessario creare una base di dati grafici ad alta risoluzione che preservi nel tempo la conoscenza acquisita e ne permetta la fruizione. I dati acquisiti sui beni monumentali sono intrinsecamente tridimensionali in quanto rappresentano misure (di vario tipo) sulla superficie dei manufatti o al loro interno. Esempi tipici sono le acquisizioni laser scanner, le riprese con camere sensibili nel visibile e nell'infrarosso, le misure radiografiche, i sondaggi puntiformi con tecnologia LIF e LIBS.

Per la loro natura queste misure possono essere inserite in database geo-spaziali quali i sistemi CAD o GIS (a seconda della scala spaziale di interesse). Questo rende facile co-registrare i vari dati, interpolarli e riportarli nella stessa geometria. Si realizzano così dei modelli 3D in cui a ciascun punto dello spazio vengono associate N misure, secondo il paradigma della ripresa multispettrale e della cosiddetta *data fusion*.

Numerose ricerche condotte negli ultimi anni hanno mostrato come il valore aggiunto di dati eterogenei risieda nella loro interpretazione congiunta. E' proprio dall'analisi integrata di dati di natura differente che si possono ricavare le informazioni più interessanti. Lo studio combinato di dati di natura diversa mette infatti in evidenza correlazioni statistiche inaspettate e consente di sviluppare modelli matematici estremamente accurati dei fenomeni osservati.

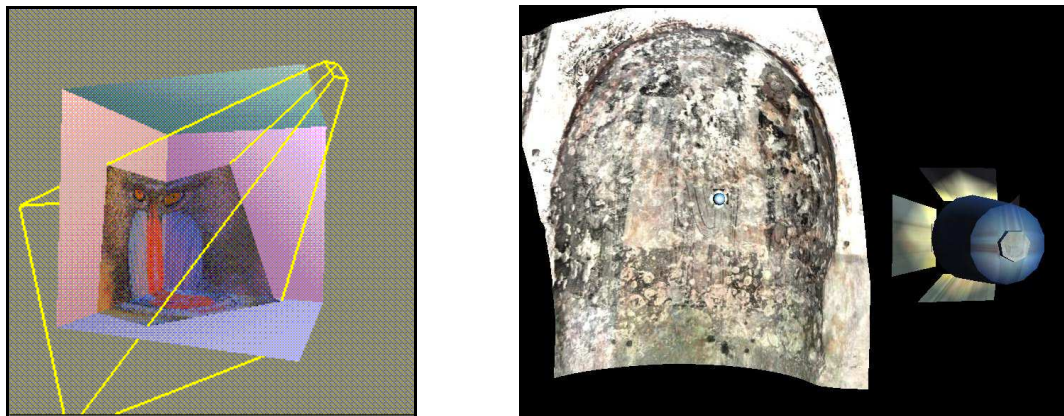


Fig. 11 - Proiezione delle texture su modelli geometrici 3D

Per analizzare i dati della base grafica ad alta risoluzione vengono usati algoritmi di classificazione multispettrale mutuati dal telerilevamento satellitare. Ad ogni punto dello spazio fisico viene fatta corrispondere una posizione in uno spazio virtuale N-dimensionale (spazio radiometrico). Nello spazio radiometrico i punti si addensano in gruppi più o meno densi (*cluster*). Nel caso di misure acquisite localmente è in genere possibile effettuare un esame visivo di alcuni campioni e associare a ciascun *cluster* una precisa tipologia fisico-chimica, secondo la tecnica della classificazione *supervised*.

Di particolare importanza, specie nel caso di misure *Real Time*, è la possibilità di studiare serie temporali di dati per mezzo di algoritmi di *Information Mining*. Queste analisi permettono di mettere chiaramente in evidenza l'evoluzione dei fenomeni e di realizzare delle visualizzazioni 4D (3D + tempo) di grande impatto visivo, alle scale temporali più adatte ai fenomeni.

I dati contenuti nella base grafica, elaborati con le tecniche descritte, possono essere visualizzati su diverse piattaforme tecnologiche, dal teatro virtuale immersivo fino ai dispositivi portatili come *smartphone* e *tablet*. Proprio queste ultime tipologie di dispositivi appaiono oggi le più versatili e promettenti essendo entrati nell'uso quotidiano. Sono in fase di sviluppo molte applicazioni che permetteranno la fruizione dei dati diagnostici a diverse categorie di utenti (dall'esperto di restauro al semplice visitatore) sfruttando le possibilità di geo-localizzazione e di misura di assetto. E' così possibile immaginare nuovi scenari d'uso in cui le misure (presenti o passate) vengono sovrapposte all'immagine reale con tecniche di realtà aumentata, incrementando in maniera significativa le possibilità di interpretazione e la tempestività degli interventi. Si sta

anche sviluppando la componente *social* di tali applicazioni in cui gli utenti potranno non solo visualizzare le informazioni della base grafica ma anche arricchirle con i propri commenti, da condividere con la comunità on-line.

CONCLUSIONI

Nel presente lavoro sono state illustrate alcune procedure per la tutela del patrimonio monumentale in area sismica contenute nel progetto MASSIMO. Il progetto mira a definire una procedura di controllo inserita all'interno di un software auto diagnosticante per verificare in continuo ed anche a valle di eventi sismici sensibili, l'affidabilità dei beni monumentali soggetti a tutela.

Le diverse fasi che compongono le procedure di controllo sono basate principalmente su tecniche NDT con le quali è possibile analizzare i siti di sedime, rilevare i manufatti ed identificare i parametri meccanici dei materiali in opera. Inoltre, l'aggiornamento dei coefficienti di sicurezza sarà garantito sempre attraverso l'uso di sistemi di monitoraggio residenti.

I protocolli proposti saranno naturalmente oggetto di sperimentazione sul campo e attraverso l'implementazione delle attività sperimentali e di monitoraggio su determinati dimostratori, verranno opportunamente tarati e validati.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Bernard P. e Zollo A., 1989: *The Irpinia (Italy) 1980 earthquake: detailed analysis of a complex normal fault* – J. Geophys. Res., 94, 1631-1648.
- [2] Pingue F., De Natale G. e Briole P., 1993: *Modeling of the 1980 Irpinia earthquake source: constraints from geodetic data* – Ann. Geofis., 36, 1, 27-40.
- [3] Basili R., Kastelic V., Demircioglu M. B., Garcia Moreno D., Nemser E. S., Petricca P., Sboras S. P., Besana-Ostman G. M., Cabral J., Camelbeeck T., Caputo R., Danciu L., Domac H., Fonseca J., García-Mayordomo J., Giardini D., Glavatovic B., Gulen L., Ince Y., Pavlides S., Sesetyan K., Tarabusi G., Tiberti M. M., Utkucu M., Valensise G., Vanneste K., Vilanova S., Wössner J. (2013). *The European Database of Seismogenic Faults (EDSF) compiled in the framework of the Project SHARE*. <http://diss.rm.ingv.it/share-edsf/>, doi: 10.6092/INGV.IT-SHARE-EDSF
- [4] Basili R., G. Valensise, P. Vannoli, P. Burrato, U. Fracassi, S. Mariano, M.M. Tiberti, E. Boschi (2008), *The Database of Individual Seismogenic Sources (DISS), version 3: summarizing 20 years of research on Italy's earthquake geology*, Tectonophysics, doi:10.1016/j.tecto.2007.04.014.
- [5] DISS Working Group (2010). *Database of Individual Seismogenic Sources (DISS), Version 3.1.1: A compilation of potential sources for earthquakes larger than M 5.5 in Italy and*

surrounding areas. <http://diss.rm.ingv.it/diss/>, © INGV 2010 - Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia - All rights reserved; doi:10.6092/INGV.IT-DISS3.1.1.

[6] Motazedian, D. and G.M. Atkinson (2005). *Stochastic Finite-Fault Modelling Based on a Dynamic Corner Frequency*, Bulletin of the Seismological Society of America, 95, 995-1010.

[7] Pacor, F., Cultrera G., Mendez, A., and M. Cocco (2005). *Finite fault modeling of strong motions using a hybrid deterministic-stochastic approach*. Bull. Seismol. Soc. Am., 95, 225-240.

[8] G. Porco, D. Romano, G. F. Valer Montero – “*Il monitoraggio strutturale per il controllo delle fasi costruttive e per la verifica di affidabilità delle strutture in c.a.*”. Il Giornale delle Prove non Distruttive Monitoraggio Diagnostica, n. 4 Dicembre 2012. ISSN 1721-7075.

[9] 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.