

Dipartimento di Ingegneria Civile,
Ambientale e Meccanica
dell'Università degli Studi di Trento

Un'introduzione al monitoraggio sismico.

Emiliano Debiasi
Davide Trapani



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI
DI TRENTO

Dipartimento di Ingegneria Civile,
Ambientale e Meccanica

In collaborazione con



Indice

1. CONCETTI GENERALI

1.1.	CONSIDERAZIONI GENERALI SULL’AZIONE SISMICA ED IL DANNO ECONOMICO	3
1.2.	L’IMPATTO ECONOMICO DEI TERREMOTI	9
1.3.	L’IMPORTANZA DEL MONITORAGGIO SISMICO	11
1.4.	STATO DELL’ARTE DEI SISTEMI DI MONITORAGGIO SISMICO	12

2. IL MONITORAGGIO SISMICO DI EDIFICI PREFABBRICATI. IL SISTEMA AREA PREFABBRICATI

2.1.	GENERALITA’ DEL SISTEMA DI MONITORAGGIO SISMICO	17
2.2.	ARCHITETTURA E CARATTERISTICHE DEL SISTEMA DI MONITORAGGIO SISMICO	18
2.3.	GESTIONE DELLE EMERGENZE.....	19
2.4.	ATTESTAZIONE DI CORRETTO FUNZIONAMENTO E MANUTENZIONE DEL SISTEMA DI MONITORAGGIO SISMICO.....	20
2.5	FAQ	20

3. CONCLUSIONI

4. BIBLIOGRAFIA

1. CONCETTI GENERALI

1.1 Considerazioni generali sull'azione sismica ed il danno economico

I terremoti sono eventi naturali di natura **non prevedibile** [1]. A dispetto dei considerabili sforzi fatti verso il miglioramento della conoscenza degli effetti di questi eventi naturali disastrosi e sulla protezione delle costruzioni, i terremoti causano ancora enormi danni dal punto di vista di perdite delle vite umane e costi economici ([1], [2], [3]):

- 1994 Northridge (California): 57 morti e danni economici pari a circa 40 miliardi di euro;
- 1995 Great Hanshin (Kobe, Giappone): oltre 5000 morti e danni economici pari a circa 110 miliardi di euro;
- 1999 Izmit (Turchia): 15000 morti e danni economici pari a 5-9 miliardi di dollari;
- 1993 Killari (India): 10000 morti e 1,3 miliardi di dollari;
- 1999 Chi-Chi (Taiwan): oltre 2400 morti e danni economici pari a circa 110 miliardi di euro;
- Abruzzo 2009: 308 vittime e 12-15 miliardi di euro di danni economici;
- Emilia Romagna 2012: 27 vittime e danni economici pari a 12.5 miliardi di euro.

Le cause delle perdite economiche e delle vite umane sono nella maggior parte dovute al collasso degli edifici e di altre strutture [1]. Lo scopo dell'ingegneria sismica, la branca dell'ingegneria che si occupa della mitigazione del rischio sismico, è quello di trovare delle soluzioni per pianificare, progettare, costruire e gestire strutture sismicamente resistenti.

Un terremoto è una frattura della crosta terrestre provocata da un accumulo di energia di deformazione causato da agenti tettonici. Di questa energia, è di interesse per l'ingegneria sismica, quella che all'atto della frattura viene convertita in energia cinetica e propagata a distanza sotto forma di onde sismiche [4]. La propagazione di queste onde sismiche provoca uno scuotimento del terreno. L'Italia è situata al limite di due placche, quella euroasiatica e quella africana.



Figura 1 – Placca africana e euroasiatica [5]

Il movimento tra queste due placche provoca un accumulo di energia che talvolta viene rilasciata sotto forma di terremoto. Data la presenza di queste due placche, praticamente tutto il territorio italiano può essere soggetto a sismi che possono provocare danni agli edifici. Negli ultimi 30 anni infatti si sono registrati sul territorio italiano circa 150.000 terremoti di cui almeno 50 di forte intensità [6].

Per quantificare la capacità distruttiva di un terremoto vengono utilizzate due misure differenti: la misura della *magnitudo* e la misura dell'*intensità macrosismica*. La magnitudo è una misura indiretta dell'energia meccanica sprigionata dal terremoto. In genere la magnitudo è espressa dalla scala Richter che permette di risalire alla quantità totale di energia liberata dall'evento sismico. Se la scala Richter permette di valutare da un punto di vista quantitativo l'intensità dei terremoti, l'intensità macrosismica invece permette di quantificare in maniera qualitativa i danni provocati. Questa scala classifica in modo empirico la severità di un sisma secondo una scala ordinale, espressa in gradi, degli effetti prodotti sia sulle strutture civili (in misura maggiore) che i danni geologici (in misura minore) [4]. Scale che misurano l'intensità macrosismica sono le scale Mercalli e Mercalli Modificata.

Nell'ingegneria sismica, invece, la misura più significativa atta a caratterizzare la capacità distruttiva del sisma, è rappresentata dall'accelerazione al suolo e in particolare dal suo valore massimo anche chiamato *Peak Ground Acceleration (PGA)*[4].

Questa accelerazione viene misurata da appositi strumenti chiamati accelerografi, tradizionalmente chiamati di tipo "strong motion" [4]. La *PGA* è utilizzata per la realizzazione delle mappe di **pericolosità sismica**. Dato che i terremoti non si possono prevedere, le informazioni su possibili sismi futuri sono date in termini di probabilità che possano accadere terremoti uguali o inferiori a una certa intensità. Le mappe di pericolosità sismica forniscono appunto queste informazioni. Questa mappa si basa essenzialmente sui terremoti passati e sulla geologia del terreno presente e fornisce appunto la *PGA* attesa in un certo intervallo di tempo in un dato luogo.

In particolare viene fornita l'accelerazione di picco al suolo che ha una probabilità di superamento pari al 10% in 50 anni. La mappa è in continuo aggiornamento e nella Figura 2 si riporta quella relativa al territorio italiano. La mappa mostra le zone di pericolosità da un valore minimo (colore grigio) a un valore massimo (colore viola). Si evidenzia che la costruzione di queste mappe è fondamentale da un punto di vista della prevenzione dei terremoti, dato che si possono costruire degli edifici maggiormente resistenti in zone dove ci si aspettano sismi di intensità più elevata.

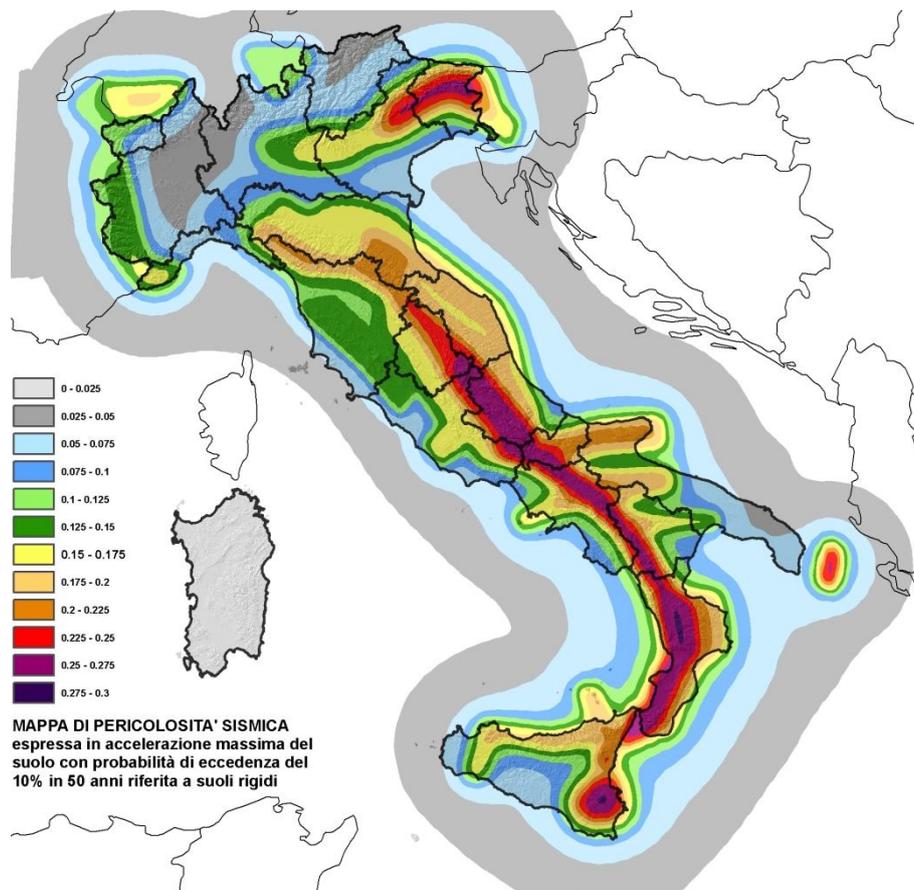


Figura 2 – Mappa di pericolosità sismica [7]

*A lungo, la progettazione ha avuto come unico scopo la sicurezza nei confronti del collasso strutturale per terremoti di elevata intensità. Solo recentemente gli specialisti hanno realizzato che questo unico scopo è economicamente non accettabile ed hanno concentrato la loro attenzione sulla **riduzione** dei danni strutturali [1].* La moderna progettazione richiede in particolare un'adeguata rigidità e resistenza per terremoti di ridotta intensità alle quali si aggiunge una specifica richiesta di duttilità soprattutto nel caso di terremoti di notevole intensità, ciò al fine di dissipare adeguatamente l'energia trasmessa dal sisma [1]. Una corretta progettazione deve prevedere che le zone plasticizzate siano posizionate in opportune parti della struttura, in modo da evitare il collasso totale o parziale della struttura stessa a causa della formazione di meccanismi di rottura. Come è noto, la plasticizzazione di un elemento strutturale si manifesta attraverso grandi spostamenti e rotazioni: ciò è possibile solo se l'elemento è realizzato adottando particolari accorgimenti costruttivi volti a garantirne la duttilità. La plasticizzazione degli elementi strutturali comporta un certo grado di dissipazione dell'energia del sisma; d'altra parte comporta anche un inevitabile danneggiamento della struttura.

Anche per le strutture "antisismiche", quindi, sono da prevedersi danni alle strutture in caso di eventi sismici. Non è corretto pertanto pensare che una struttura definita antisismica non sia danneggiabile dal terremoto.

In aggiunta la progettazione delle strutture nei confronti dell'azione sismica ha per sua natura delle incertezze elevate che sono molto superiori rispetto alla progettazione nei confronti delle altre azioni quali vento e neve. Se per esempio nel calcolo dell'azione da neve l'unica incertezza è il peso del manto nevoso (determinabile da elaborazioni statistiche), nel caso dell'azione sismica le incertezze sulla sua intensità ed in particolare sui suoi effetti risultano enormemente maggiori; ciò è testimoniato anche dal fatto che le mappe di intensità sismica devono essere continuamente aggiornate in funzione dei più recenti eventi sismici. Per di più a differenza delle altre azioni, quella sismica dipende non solo da cause esterne, ma anche dalla struttura stessa. Gli effetti dell'azioni sismica (spostamenti e sollecitazioni) sono fortemente influenzate, a parità di altri parametri, dalle caratteristiche della struttura stessa (geometriche e meccaniche). In generale infatti le azioni provocate dal sisma su una struttura più flessibile sono in termini di forza inferiori rispetto a una struttura più rigida. Inoltre variabilità locali non facilmente determinabili, come

l'esatta stratigrafia del terreno su cui giace la costruzione, possono amplificare notevolmente l'azione sismica. Sono possibili infatti casi in cui due edifici praticamente identici localizzati a poca distanza l'uno dall'altro, a causa della diversa amplificazione dell'azione sismica dovuta alla presenza di terreni diversi, subiscono dei danni di entità molto differente.

Le più recenti normative sismiche prevedono un approccio di tipo prestazionale. L'obiettivo è il controllo del livello di danneggiamento della costruzione a fronte dei terremoti che possono verificarsi nel sito della costruzione. In particolare, nel caso di terremoti violenti rari si accetta che la struttura si danneggi ovvero subisca al deformazioni ben oltre il limite elastico, purché siano salvaguardate le vite umane. In occasione di sismi di intensità più modesta, invece, si richiede che la struttura rimanga operativa con danni limitati [8].

La normativa definisce quattro stati limite, ai quali corrispondono altrettanti livelli prestazionali della struttura [9]:

- *Stato Limite di Operatività (SLO): a seguito del terremoto la costruzione nel suo complesso, includendo gli elementi strutturali, quelli non strutturali, le apparecchiature rilevanti alla sua funzione, non deve subire danni ed interruzioni d'uso significativi;*
- *Stato Limite di Danno (SLD): a seguito del terremoto la costruzione nel suo complesso, includendo gli elementi strutturali, quelli non strutturali, le apparecchiature rilevanti alla sua funzione, subisce danni tali da non mettere a rischio gli utenti e da non compromettere significativamente la capacità di resistenza e di rigidità nei confronti delle azioni verticali ed orizzontali, mantenendosi immediatamente utilizzabile pur nell'interruzione d'uso di parte delle apparecchiature.*
- *Stato Limite di salvaguardia della Vita (SLV): a seguito del terremoto la costruzione subisce rotture e crolli dei componenti non strutturali ed impiantistici e significativi danni dei componenti strutturali cui si associa una perdita significativa di rigidità nei confronti delle azioni orizzontali; la costruzione conserva invece una parte della resistenza e rigidità per azioni verticali e un margine di sicurezza nei confronti del collasso per azioni sismiche orizzontali;*
- *Stato Limite di prevenzione del Collasso (SLC): a seguito del terremoto la costruzione subisce gravi rotture e crolli dei componenti non strutturali ed impiantistici e danni molto gravi dei componenti strutturali; la costruzione*

conserva ancora un margine di sicurezza per azioni verticali ed un esiguo margine di sicurezza nei confronti del collasso per azioni orizzontali.

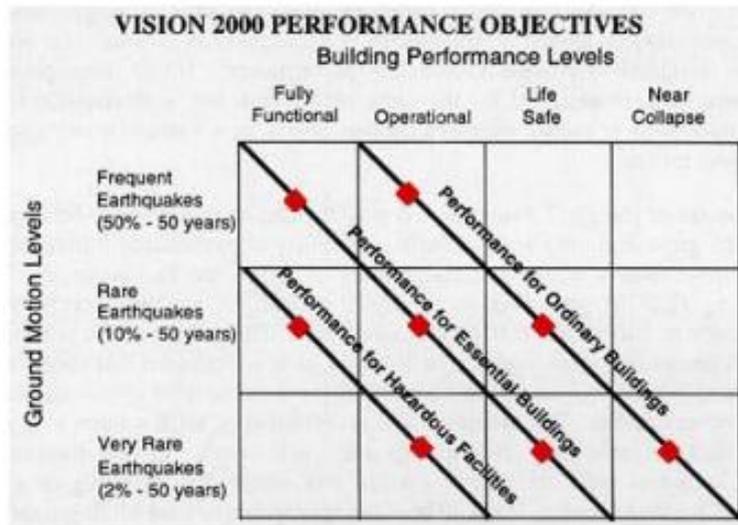


Figura 3 – Obiettivi prestazionali degli edifici [10]

La Figura 3 [10] mostra come in funzione della frequenza del terremoto (in ordinata), si abbia l'obiettivo di ottenere diverse prestazioni della struttura (in ascissa). Le diverse prestazioni sono individuate per edifici di tre diversi gradi di importanza (rette di colore nero). Per esempio per un edificio di ordinaria importanza in caso di terremoto frequente, si vuole che l'edificio rimanga operativo, cioè che si danneggi in maniera limitata e che sia facilmente riparabile.

La Figura 4 [11] mostra in maniera qualitativa che cosa si intende per completa operatività, operatività, salvaguardia della vita e collasso. Gli stati limite precedentemente descritti corrispondono agli stati 1,2,4 e 5 della Figura 4. Si fa notare comunque che anche nel caso di edificio considerato operativo si è già verificato un limitato danneggiamento della struttura.

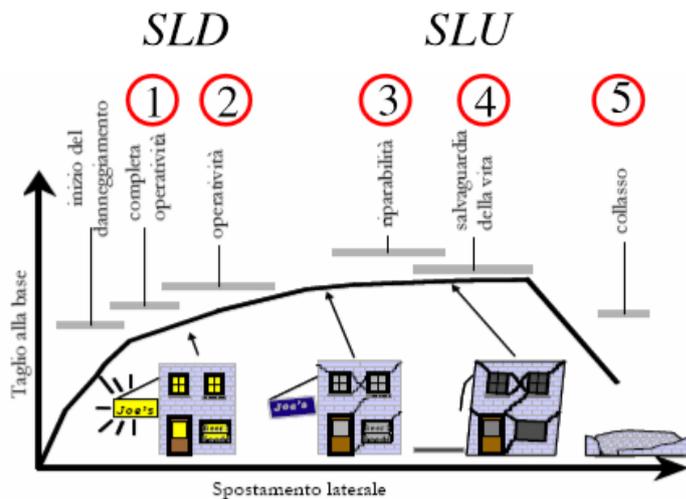


Figura 4 – Corrispondenza qualitativa tra stato limite e danneggiamento [11]

1.2 L'impatto economico dei terremoti

I più recenti terremoti italiani (Umbria-Marche 1997, Abruzzo 2009, Emilia 2012) hanno dimostrato come terremoti di medio-alta intensità possano provocare ingenti danni economici e perdite di vite umane. Contrariamente a quello che si potrebbe pensare, l'ultimo terremoto avvenuto in Emilia, ha dimostrato che le strutture che hanno subito ingenti danneggiamenti sono state, non solo gli edifici storici, ma anche edifici di nuova costruzione.

Aldilà di questo i recenti terremoti hanno dimostrato come il più grande impatto economico del terremoto, è l'interruzione delle attività produttive dovute in parte al collasso delle strutture, e in larga parte all'attesa della valutazione dei danni subiti.

In Emilia i danni a seguito del terremoto sono stimati in 12.5 miliardi di euro di cui 5.4 miliardi relativi alle sole attività produttive. Il **costo** dovuto all'**interruzione** di queste **attività** è stato di **3.1 miliardi** [12]. Si evidenzia il fatto che il costo dovuto all'interruzione delle attività produttive è pari a circa il 55% dei danni totali relativi alle stesse attività. Questo significa che nel terremoto emiliano, per le attività produttive, sono stati più i danni dovuti all'interruzione della produzione che i danni materiali. Le ispezioni negli edifici sono state circa 39000 in un tempo superiore a due mesi. Al termine delle ispezioni il 37% delle costruzioni è stato dichiarato immediatamente agibile e il 17% temporaneamente inagibile ma agibile con provvedimenti di pronto intervento [12].

Nel caso dell’Aquila invece la città è stata colpita da una violenta scossa sismica nella notte del 6 aprile 2009 ed è stata immediatamente evacuata, in attesa della verifiche dei danni. Più di quattromila ingegneri volontari sono giunti da tutta Italia, gli edifici sono stati ispezionati uno ad uno; ma sono occorsi più di due mesi prima che le ultime verifiche siano state completate. Al termine delle verifiche, più della metà degli edifici (il 52%) è stata riconosciuta immediatamente agibile [12]. Tuttavia, durante il periodo necessario alle valutazioni di agibilità molte persone non hanno avuto accesso alle proprie abitazioni e le attività produttive sono state interrotte, con ovvie ripercussioni sia sociali che economiche.

Edifici privati	Ispezioni	Immediatamente Agibili	Inagibili
1997 Umbria-Marche	110000	72%	28%
2009 Abruzzo	75000	52%	48%
2012 Emilia	39000	36%	64%

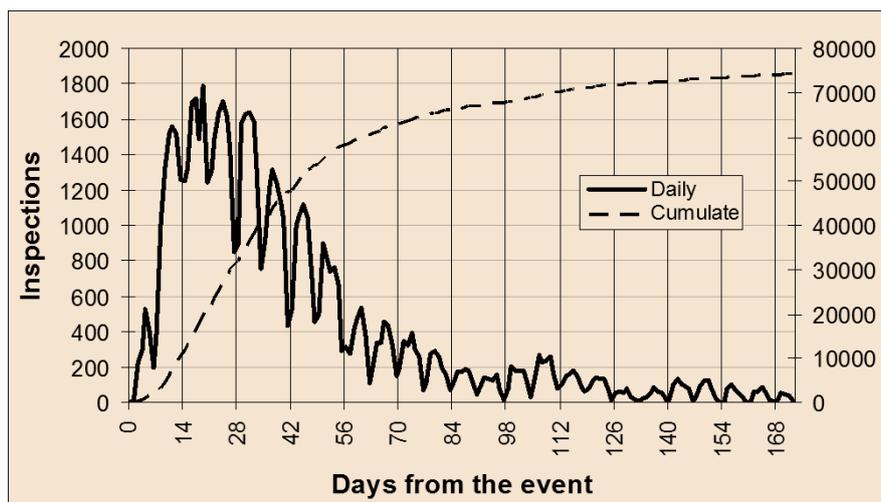


Figura 5 - Numero di ispezioni effettuate nel sisma dell’Emilia [12]

Allo stato attuale lo strumento utilizzato per le verifiche post-sismiche è la compilazione delle schede AeDES (Agibilità e Danno nell’Emergenza Sismica). Le schede forniscono un giudizio sintetico sull’agibilità. Per sua natura il **risultato** delle schede è di carattere **sogettivo** e in molti casi molto a favore di sicurezza, anche a causa delle responsabilità attribuite al tecnico rilevatore. Ogni rilevazione richiede l’ispezione di una squadra di tecnici direttamente gestita dal centro di coordinamento (COC) a livello comunale. Questa procedura

comporta inoltre che i **tempi** di risposta dei giudizi di agibilità siano piuttosto **elevati** sia per le abitazioni che per le attività produttive.

The image shows a detailed form for the AeDES assessment. It includes fields for location (State, Province, Municipality, etc.), a risk assessment table with levels from 'BASSO' to 'ALTO', and a list of suggested interventions categorized by type (e.g., structural, electrical, plumbing). The form also includes a section for 'Altre osservazioni' and a signature line.

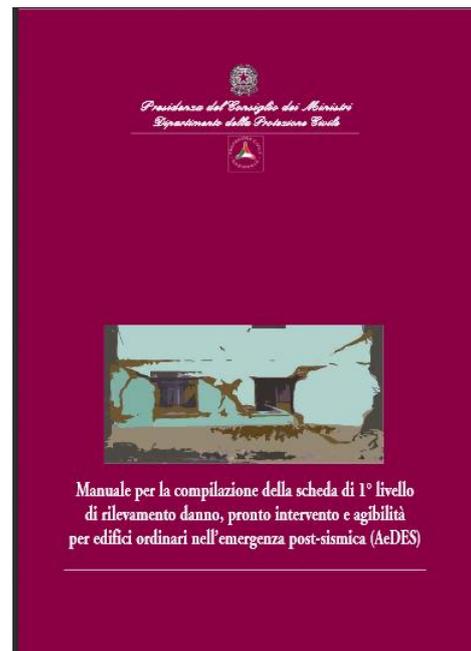


Figura 6 - Parte di scheda di valutazione AeDES e manuale [13]

Queste schede di rilevamento sono uno strumento molto valido nella gestione dell'urgenza immediata, ma nella realtà talvolta il tecnico rilevatore può non essere in grado, con i pochi strumenti a disposizione e il tempo limitato, di dare un giudizio preciso sullo stato dell'opera e sugli eventuali interventi da effettuare. Infatti nella scheda vengono fornite solo indicazioni di massima sui danni e sugli interventi di pronto intervento.

Inoltre le ispezioni di tipo visivo non sono in grado in molti casi di rilevare i danni, soprattutto se di entità non elevata, in zone poco visibili o difficilmente ispezionabili (per esempio in presenza di controsoffitti ecc.)

1.3 Importanza del monitoraggio sismico

Il monitoraggio sismico in Italia è a tutt'oggi ancora poco diffuso, contrariamente ad altri sistemi di protezione e sicurezza, come ad esempio il sistema antincendio. Nonostante anche gli incendi all'interno degli edifici industriali siano piuttosto rari, nessuno penserebbe di non installare strumenti per la prevenzione incendi; e allora perché non installare un sistema di monitoraggio sismico? Inoltre si è visto purtroppo che i terremoti non sono così rari. Con una cadenza sorprendente ogni 5 anni in Italia si verifica un sisma che provoca danni

ingenti (1997 Umbria-Marche, 2003 San Giuliano di Puglia, 2009 Abruzzo, 2012 Emilia). L'atteggiamento della collettività o dello Stato è quello di affidare ai privati gli oneri a seguito di un'emergenza sismica. La direzione, che coincide anche con quella di altri Paesi, è ormai stata tracciata e in futuro ogni privato dovrà presumibilmente assumersi totalmente i costi derivanti dai danni sismici.

Questo scenario apre a numerose implicazioni e obbliga il privato a guardare da un altro punto di vista il terremoto. Un passo importante potrà essere quello di stipulare delle assicurazioni contro questo rischio. E' auspicabile che le assicurazioni valutino il premio in funzione non solo della zona dove è ubicato l'edificio ma anche di come è costruito e dei sistemi di monitoraggio installati. Il sistema di monitoraggio sismico fornisce infatti dati **oggettivi** sugli effetti del terremoto sulla struttura che possono essere utilizzati per la valutazione dei danni. Uno dei più grandi vantaggi del monitoraggio sismico da un punto di vista economico, è la possibile immediata ripresa immediata dell'attività produttiva in caso di edificio non danneggiato. Si ricorda come evidenziato precedentemente che i costi dovuti all'interruzione di queste attività nell'ultimo terremoto emiliano sia stato pari a 3.1 miliardi di euro e pari a circa il 55% del totale. Questo è dovuto in parte all'attesa di una valutazione da parte di un tecnico esperto. Il sistema di monitoraggio sismico, attraverso la valutazione della risposta strutturale in tempo reale, fornisce informazioni utilizzabili nel processo decisionale per valutare l'agibilità dell'edificio. Nel caso di terremoto di ridotta intensità la valutazione dell'assenza di danni, supportata dal sistema di monitoraggio, consentirà una ripresa immediata dell'attività produttiva. Il sistema inoltre comporta un sensibile miglioramento della sicurezza. In caso la struttura sia stata effettivamente danneggiata dal terremoto, il sistema fornisce un allarme (analogo a quello antincendio) che vieta la ripresa delle attività. Questo potrebbe portare al salvataggio di vite umane in quei casi in cui in assenza di sistema di monitoraggio si fossero incautamente riprese le normali attività dopo l'evento sismico.

1.4 Stato dell'arte dei sistemi di monitoraggio

1.4.1 Monitoraggio sismico in Italia e nel mondo

Il monitoraggio sismico degli edifici è ad oggi diffuso in particolar modo negli Stati Uniti. In particolare si riportano due programmi, il CSMIP (California Strong Motion Instrumentation Program) e l'USGS (United States Geological Survey), che hanno installato e gestiscono sistemi di monitoraggio sismico per edifici

ed infrastrutture, con l'obiettivo primario di studiare il comportamento delle strutture colpite dal terremoto ed affinare le tecniche di progettazione. In particolare il CSMIP [14] ha strumentato finora 200 edifici, 27 dighe e 66 ponti, mentre l'USGS [15] ha strumentato 130 edifici e 77 dighe. Negli Stati Uniti l'interesse verso sistemi di monitoraggio sismici è aumentato soprattutto dopo il terremoto di Northridge, che danneggiò in particolare edifici a telaio in acciaio a livello dei nodi trave colonna. L'interesse verso il monitoraggio è aumentato soprattutto perché se ci fossero stati edifici dotati di sistemi di monitoraggio, non sarebbe stato necessario rimuovere le finiture (con i notevoli costi associati a questa operazione) per ispezionare le strutture.

Le strutture monitorate dall'USGS sono tipicamente strutture in acciaio o in cemento armato. Sugli edifici vengono installati sensori a certi piani con lo scopo di valutare i parametri correlati al danno, come i drift di piano. Il sito dell'USGS riporta come struttura monitorata di esempio l'UCLA Doris and Louis Factor building, un edificio in acciaio a 17 piani dotato di un sistema di monitoraggio costituito da 72 accelerometri, mostrato nella Figura 7.



Figura 7 - Monitoraggio UCLA Factor Building [8]

Anche in Italia si riscontrano esperienze di monitoraggio sismico. In particolare il monitoraggio di alcune costruzioni pubbliche, tra cui scuole, ospedali e municipi, è attualmente condotto dall'Osservatorio Sismico delle Strutture (OSS) gestito dal Dipartimento della Protezione Civile [13]. La prima installazione di un sistema di monitoraggio sismico da parte dell'OSS risale al 1997, con l'installazione di un sistema all'interno dell'Istituto Tecnico Commerciale di Moliterno (PZ), seguito dal sistema installato nell'edificio in muratura che ospita il Poliambulatorio di Pievepelago nel Modenese. Da allora la rete di strutture si è ampliata fino a raggiungere, oggi, il numero di

124 sistemi di monitoraggio (116 in edifici, 7 su ponti e 1 su diga). Un esempio di edificio monitorato sismicamente è la nuova scuola Jovine a San Giuliano di Puglia.

Il monitoraggio condotto dall'OSS consiste nell'utilizzare accelerometri (da 15 a 32 a seconda della dimensione e della complessità della struttura) posti sia all'interno della struttura che sul terreno alla base. Ciascun accelerometro è collegato a un'unità di acquisizione dotata di convertitore analogico-digitale. Il sistema di monitoraggio locale è collegato ad un sistema di allerta. Nel caso in cui le accelerazioni registrate dagli strumenti superino il valore di soglia pre-impostato, le misure vengono trasmesse attraverso connessione ADSL ad un server centrale situato nella sede del Dipartimento della Protezione Civile a Roma, dove i dati vengono elaborati al fine di stimare il danno. Il danno viene stimato utilizzando come input il moto del terreno registrato calcolando le massime accelerazioni strutturali e i massimi spostamenti relativi di punti caratteristici della struttura per mezzo di un software denominato RADOSS.

1.4.2 Strategia di monitoraggio sismico

Per la stima del danno strutturale indotto da un evento sismico esistono ad oggi diverse strategie, che si rispecchiano in altrettante tipologie di sistema.

- (1) Superamento del valore di accelerazione di picco di progetto: viene confrontato il valore di picco dell'accelerazione misurata alla base della struttura e il valore di accelerazione utilizzato nella progettazione della struttura stessa. In questo caso è sufficiente una terna (o più terne se le dimensioni in pianta della struttura sono notevoli) di accelerometri monoassiali disposti nelle tre direzioni ortogonali a livello delle fondazioni (ATC-54). La metodologia è di per sé piuttosto semplice, l'interpretazione delle misure ha tuttavia delle forti criticità, soprattutto perché il valore di picco dell'accelerazione è in genere scarsamente correlato con il danno strutturale se avviene a frequenze elevate. La strategia ha inoltre il difetto di non riferirsi alla reale struttura in opera, risultando applicabili a un ambito più progettuale che di monitoraggio effettivo.
- (2) Misura della time-history di accelerazione durante il sisma e analisi dinamica non lineare della struttura, utilizzando un software agli elementi finiti e imponendo nel modello la time-history di accelerazione registrata alla base della struttura. La verifica del danno sismico si effettua confrontando le deformazioni e le sollecitazioni nei diversi elementi strutturali indotte dall'evento sismico con

la capacità resistente (sia in termini di deformazioni che di sollecitazioni) di progetto. Anche in questo caso è sufficiente una terna di accelerometri monoassiali disposti nelle tre direzioni ortogonali a livello delle fondazioni. La principale criticità del metodo risiede nel fatto che esso è basato sui dati di progetto della struttura: resistenze e rigidità degli elementi in opera possono discostarsi anche notevolmente dai valori di progetto. In sostanza rispetto alla metodologia indicata dalla normativa anziché utilizzare accelerogrammi spettro compatibili o naturali ma relativi ad eventi sismici del passato, si utilizza come input la time history reale del terreno.

- (3) Confronto delle caratteristiche modali prima, durante e dopo l'evento sismico: viene determinato il periodo dei primi modi di vibrare della struttura attraverso la registrazione di time history di accelerazioni e l'analisi in frequenza della stessa. Al progredire del danneggiamento, si osserva un incremento del periodo, che corrisponde ad un progressivo degrado della rigidità e quindi ad un danneggiamento. I principali limiti di questa strategia di monitoraggio sono costituiti dal fatto che il metodo fornisce, peraltro attraverso correlazioni piuttosto complesse tra variazione delle caratteristiche modali della struttura e danno subito, unicamente l'indicazione di un danno strutturale, ma non la sua localizzazione.
- (4) Calcolo del drift di interpiano, ottenuto combinando linearmente gli spostamenti assoluti dei diversi piani della struttura. In letteratura sono note correlazioni tra il valore di drift e i danni subiti dalla struttura. La scelta di monitorare il drift è suffragata da studi ed esperienze condotti dall'USGS, le cui prove sperimentali hanno evidenziato che il drift di interpiano è il principale indicatore parametrico dello stato di danno in un edificio [16]. In questi sistemi è opportuno che gli strumenti di misura siano uniformemente distribuiti all'interno della struttura. Tuttavia alcune semplificazioni, quali l'ipotesi di piano infinitamente rigido, permettono di ridurre ad una doppia terna (per tenere conto anche degli effetti del sisma in direzione verticale) di accelerometri monoassiali per piano il numero di sensori totale ([17], [18], [19], [20], [21], [22], [23], [24]). Questa strategia di monitoraggio ha il vantaggio di fornire informazioni sul danno non solo riguardo la sua esistenza, ma anche sulla sua localizzazione, quando invece nel caso di monitoraggio basato sullo studio delle caratteristiche modali della struttura, la localizzazione del danno risulta particolarmente ardua ed incerta. Il metodo consiste nel

valutare se durante l'evento sismico i valori del drift hanno superato prefissati valori di soglia, che caratterizzano diversi livelli di danno [16].

Da quanto sopra scritto risulta quindi evidente che nel caso in cui si sia interessati alla localizzazione del danno e non solo ad evidenziarne la presenza, la strategia più idonea è quella di monitorare gli spostamenti assoluti e relativi di particolari punti della struttura.

Sorge il problema di misurare gli spostamenti assoluti. Nel monitoraggio tradizionale (non sismico), gli spostamenti fra due punti vengono in genere determinati per mezzo di appositi trasduttori (es. i trasduttori di spostamento LVDT) che sono dotati di due parti solidali rispettivamente ai due punti. Questo approccio non è possibile per il monitoraggio sismico in quanto manca la possibilità di avere un punto fisso rispetto al quale riferire la misura.

Le tecnologie che ad oggi consentono la misura assoluta degli spostamenti sono quelle basate sull'utilizzo di GPS o quelle basate sull'utilizzo di accelerometri, in cui gli spostamenti sono calcolati mediante doppia integrazione nel tempo delle accelerazioni,

La tecnologia GPS garantisce un'accuratezza delle misure di spostamento nell'ordine di 1 mm ed è possibile acquisire time history di spostamento con una frequenza di campionamento fino a 20 Hz. Con una frequenza di campionamento così limitata, vengono perse le oscillazioni della struttura a frequenze superiori a 2 Hz ed aumentano notevolmente gli errori di misura. Inoltre, il ricevitore GPS deve essere collocato sul tetto dell'edificio per essere in linea di vista con i satelliti; non è pertanto possibile il monitoraggio diffuso dell'edificio. Per questo motivo l'utilizzo del GPS è valido per strutture caratterizzate da un elevato periodo di oscillazione ed un unico modo di vibrare prevalente. In letteratura sono infatti disponibili esperienze di monitoraggio tramite GPS di edifici di grande altezza [25], in cui alcuni ricevitori GPS vengono posizionati alla sommità della struttura.

La tecnologia che utilizza gli accelerometri prevede l'acquisizione continua di misure di accelerazione, l'applicazione di un filtro passa-basso (ovvero l'eliminazione delle componenti di frequenza superiori ad un certo valore limite, generalmente compreso tra 50 e 100 Hz), e la doppia integrazione digitale dei

valori di accelerazione, volti al calcolo delle time history di spostamento.

Questa tecnica è stata già applicata con successo dall'USGS negli Stati Uniti, in particolare in alcuni edifici di grande altezza a San Francisco [26]. Il sistema è costituito da un lato server e da un lato client. Il lato server, all'interno della struttura, acquisisce continuamente le accelerazioni di ciascuno dei piani strumentati tramite accelerometri monoassiali disposti in certe posizioni. Le misure vengono salvate a livello locale quando viene superato un valore di soglia, e trasmesse al lato client tramite internet. Il software client scarica le misure da internet, e calcola per ogni punto monitorato velocità e spostamenti, sulla base dei quali vengono determinati i valori di drift. Ai vari valori di drift vengono automaticamente associati diversi valori di allarme.

Il sistema di monitoraggio Area Prefabbricati prevede l'utilizzo della tecnologia basata sugli accelerometri, che risulta essere ad oggi l'unica in grado di correlare con adeguata affidabilità l'azione sismica con lo stato di danno effettivo di un edificio.

2. IL MONITORAGGIO SISMICO DI EDIFICI PREFABBRICATI. IL SISTEMA AREA PREFABBRICATI.

2.1 Generalità del sistema di monitoraggio sismico

Area Prefabbricati S.p.A., in collaborazione con il Dipartimento di Ingegneria Civile, Ambientale e Meccanica, ha sviluppato un sistema di monitoraggio sismico per edifici prefabbricati in grado di identificare lo stato di danno della struttura in seguito ad un terremoto. Il sistema è in grado di fornire in tempo reale agli occupanti e/o gestori dell'emergenza la valutazione della sicurezza dell'edificio. Inoltre, il sistema fornisce un'indicazione oggettiva e quantitativa sullo stato di danno della struttura in seguito al sisma.

Il sistema è costituito da hardware (sensori, unità di acquisizione) e software che, una volta installato ed

inizializzato, opera automaticamente. La rete di accelerometri disposti in punti chiave della struttura (punti critici), è in grado di ricavare le accelerazioni a cui viene sottoposta la struttura stessa durante l'evento sismico. Gli accelerometri acquisiscono dati in continuo e l'elaborazione avviene in real time. Il software, sulla base delle misure di accelerazione, ricava, mediante algoritmi che effettuano la doppia integrazione delle accelerazioni, gli spostamenti dei punti critici della struttura. Il software poi confronta gli spostamenti ai quali è stato effettivamente soggetto l'edificio con gli spostamenti in grado di danneggiare la struttura. In questo modo il sistema risulta essere molto affidabile in quanto vengono valutati direttamente gli effetti che il sisma ha provocato sulla struttura. Per fare questo si parte da un'analisi approfondita della struttura che viene eseguita precedentemente all'installazione della strumentazione in modo da riconoscere il danno della struttura a partire dalle misurazioni sperimentali. Inoltre all'interno del software sono implementati algoritmi di riconoscimento del danno, che correlano i livelli di prestazione della struttura al superamento dei valori di soglia da parte dei parametri misurati dal sistema.

2.2 Architettura e caratteristiche del sistema di monitoraggio sismico

Il sistema di monitoraggio sismico proposto consiste in una rete di sensori accelerometrici distribuita all'interno della struttura, comunicanti in tempo reale con una o più unità di acquisizione e di interpretazione dei dati.

La rete di trasmissione dei dati che collega ogni punto di misura (accelerometro) al dispositivo di acquisizione è cablata e non wireless. Le motivazioni sono le seguenti:

- la trasmissione wireless risulta ad oggi molto meno affidabile della trasmissione cablata e un'eventuale perdita di misure non è ammissibile in questa applicazione;
- la trasmissione wireless non permette ad oggi la realizzazione di sistemi di monitoraggio operanti in real-time.

Le principali componenti che costituiscono il sistema sono le seguenti:

i) Centralina di acquisizione dati

La centralina o nodo "master" si compone di un controller real-time e di un modulo di input-output per il collegamento cablato dei punti di misura.

ii) Sensori accelerometrici

Gli accelerometri sono collegati alle centraline di acquisizione dati tramite cavi schermati.

iii) Alimentatori

Accanto ad ogni centralina è presente una scatola di alimentazione necessaria per l'alimentazione dei sensori accelerometrici. Ogni accelerometro è dotato di un unico cavo che provvede sia alla trasmissione dei dati che all'alimentazione dell'accelerometro stesso.

iv) Gruppo di continuità

Per far fronte a improvvise interruzioni dell'energia elettrica, anche dovute al terremoto stesso, è previsto un gruppo di continuità in grado di garantire la fornitura dell'energia necessaria al sistema per un certo tempo.

2.3 Gestione delle emergenze

La gestione delle emergenze consiste nel fatto che il sistema di monitoraggio si interfaccia con sistemi di comunicazione presenti all'interno delle strutture monitorate, fornendo un segnale di allarme agli occupanti se viene raggiunto il livello di prestazione relativo al limite di agibilità. Inoltre, il sistema di monitoraggio trasmette via internet tutti i dati tecnici rilevati ed una valutazione del danno.

I sistemi di allarme compatibili possono essere di diverso genere, e potranno essere concordati con il cliente, saranno in particolare proposti:

- sistemi visivi, quali un semaforo che indichi, successivamente ad un evento tellurico, se la struttura è agibile (verde), se sia necessaria una ispezione (giallo), o se sia d'obbligo un'immediata evacuazione dello stabile (rosso);
- sistemi acustici, quali sirene, per imporre lo sfollamento degli occupanti dagli edifici;

- sistemi complementari che comunichino al gestore dell'edificio, tramite un sms, una mail o altri strumenti, di eventuali danneggiamenti lievi o moderati e che forniscano indicazioni sulla localizzazione di questi e sulle prestazioni residue dell'edificio.

2.4 Attestazione di corretto funzionamento e manutenzione del sistema

Assieme all'installazione del sistema di monitoraggio, Area Prefabbricati provvederà a fornire un attestato di corretto funzionamento del sistema. Al termine dell'installazione infatti verrà eseguito un collaudo sia a livello di singolo sensore che a livello globale del software. Il test a livello globale verrà eseguito simulando artificialmente un terremoto, cioè inserendo nel sistema dei segnali elettrici analoghi a quelli che potrebbero verificarsi durante un sisma.

Questi test verranno eseguiti periodicamente in modo da certificare il funzionamento negli anni del sistema.

2.5 FAQ

D1: Che vantaggi dà il sistema di monitoraggio sismico?

R1: Nelle fasi dell'emergenza post sismica, il sistema di monitoraggio sismico rappresenta un importante ausilio per poter prendere, in tempi rapidi, una decisione corretta; la rapidità di intervento diminuisce proporzionalmente i costi dovuti al fermo di produzione.

Il sistema di monitoraggio sismico è inoltre uno strumento efficace per aumentare la sicurezza delle persone e ridurre i rischi connessi alla ripresa lavorativa post sisma.

La determinazione oggettiva del danno strutturale, che il sistema di monitoraggio sismico consente, implica i seguenti vantaggi:

- ❖ in caso di sisma "lieve" (senza disposizioni da parte dell'autorità di evacuazione e visita tecnica di ispezione):
 - una visione immediata dell'eventuale danno relativo allo specifico edificio considerato;
 - in caso di danno reale maggiore di quello atteso in relazione all'entità del sisma, il proprietario viene

- immediatamente informato e può, a suo giudizio, richiedere un'ispezione tecnica;
- in caso di danno limitato o nullo il sistema di monitoraggio sismico fornisce un importante supporto decisionale per l'immediata ripresa delle attività.
- ❖ In caso di sisma "forte" (con disposizioni da parte dell'autorità di evacuazione e visita tecnica di ispezione):
- visione immediata del danno relativo allo specifico edificio considerato;
 - permette all'ingegnere, incaricato dell'ispezione, di conoscere, in tempo reale, l'entità dell'eventuale danno strutturale;
 - il sistema di monitoraggio sismico migliora gli strumenti di lettura nelle mani degli ingegneri incaricati dell'ispezione rendendola più rapida;
 - costituisce un valido aiuto decisionale nel prospettare le soluzioni da adottare;
 - il sistema di monitoraggio sismico permette la localizzazione dell'eventuale danno.

L'oggettività del rilievo del danno risulta importante anche per semplificare e velocizzare le pratiche con le società di assicurazioni obbligate al risarcimento del danno, consentendone una quantificazione oggettiva e certa.

D2: Il sistema può prevedere i terremoti?

R2: Attualmente non esiste nessun sistema in grado di prevedere i terremoti, tuttavia il sistema di monitoraggio sismico, rilevando costantemente i terremoti locali, può diventare un prezioso supporto per la determinazione della pericolosità sismica del sito.

D3: Quali sono le utilità del sistema di monitoraggio sismico nelle fasi di emergenza?

R3: Le utilità del sistema sono principalmente le seguenti:

- permette di riconoscere immediatamente l'eventuale stato di danno della struttura;
- rappresenta un valido supporto decisionale per stabilire se evacuare l'edificio o mantenere le attività al suo interno, riducendo così i rischi per la sicurezza degli occupanti;
- minimizza i tempi di attesa decisionali ed i conseguenti periodi di fermo produzione;
- garantisce, con il supporto di dati oggettivi, una maggiore affidabilità delle scelte tecniche da adottare nelle fasi dell'emergenza post sismica.

D4: Il sistema può essere applicato a qualunque edificio?

R4: Il sistema di monitoraggio sismico, (nella configurazione attuale studiata per Area Prefabbricati S.p.A.), è stato sviluppato per una specifica applicazione su edifici prefabbricati. In generale la filosofia del monitoraggio sismico può essere applicata vantaggiosamente (con specifiche adattamenti) a qualsiasi tipologia di edificio, realizzato in calcestruzzo, in acciaio o altri materiali.

D5: In che modo il sistema di monitoraggio sismico è utile agli ingegneri responsabili della valutazione degli edifici nell'emergenza post sisma?

R5: Il sistema di monitoraggio sismico è un fondamentale ausilio per il tecnico incaricato dell'ispezione:

- consente di misurare gli spostamenti relativi della struttura soggetta al sisma reale (che possono essere diversi da quelli previsti dalla normativa);
- permette di monitorare i punti critici della struttura, scelti come tali in fase di progetto; i risultati sono disponibili anche nel caso in cui tali punti non siano direttamente visibili, per esempio a causa di elementi secondari di finitura;
- l'ingegnere può contare su un sistema oggettivo di misurazione che rende più ponderate le sue decisioni;
- il responso tecnico dell'ingegnere è più rapido e sicuro.

D6: Come vengono acquisiti i dati dal sistema di monitoraggio sismico?

R6: I dati vengono acquisiti continuamente, ad una frequenza di 1000 campioni per secondo, dalla unità di acquisizione del sistema, sotto forma di misure di accelerazione registrate da accelerometri. Le misure di accelerazione vengono trasmesse, per mezzo di collegamenti cablati, volti a garantire il massimo livello di affidabilità, alla unità di acquisizione ed analisi dei dati.

D7: L'installazione del sistema di monitoraggio sismico implica modifiche strutturali?

R7: No, l'installazione del sistema di monitoraggio sismico, una volta che l'edificio è stato valutato idoneo per l'applicazione del sistema stesso, non comporta modifiche strutturali; affinché l'edificio sia dichiarato idoneo all'installazione occorre che non possano verificarsi meccanismi di rottura "fragili" e possano manifestarsi unicamente meccanismi di rottura "duttili". Un edificio progettato in base alla normativa sismica non è soggetto a rotture "fragili".

D8: La registrazione, e successiva elaborazione dei dati, quali informazioni restituisce?

R8: Le misure di accelerazione registrate dagli accelerometri vengono analizzate in prima battuta per stabilire se si è verificato o meno un evento sismico. Gli accelerometri sono in grado di riconoscere le vibrazioni indotte da fenomeni diversi dal sisma (vento, urti, etc.) che, avendo caratteristiche diverse dalle vibrazioni sismiche, vengono catalogate come false risposte positive. Nel in cui caso un sisma si sia effettivamente verificato, le misure di accelerazione vengono utilizzate per determinare gli spostamenti subiti dai punti critici della struttura durante l'evento sismico ed i valori di drift (differenza tra spostamenti) massimi. Tali spostamenti vengono confrontati con i valori limite definiti da progetto, determinando la sicurezza della struttura ed l'entità del danno eventuale.

D9: Ha rilevanza l'esatta valutazione delle caratteristiche dinamiche dell'edificio in sede di progetto?

R9: No, in quanto il sistema di monitoraggio sismico è "robusto" (la "robustezza" di un sistema è la misura in cui il sistema si comporta in modo *ragionevole* in situazioni impreviste, non contemplate dalle specifiche) e permette di ricostruire la risposta sismica dell'edificio anche in un caso molto incerto della valutazione delle caratteristiche dinamiche.

D10: Il sistema di monitoraggio sismico è già stato sperimentato?

R10: Il sistema di monitoraggio sismico è stato ampiamente testato in laboratorio (presso il DICAM, Università degli Studi di Trento) nell'insieme delle sue componenti. Il funzionamento del sistema di monitoraggio sismico su di uno specifico edificio viene testato nella fase di collaudo successiva all'installazione.

D11: Quali segnali di allerta può dare il sistema di monitoraggio sismico e come possono essere interpretati?

R11: Si possono prevedere, in accordo con il progettista delle opere (e con il proprietario dell'immobile), segnali di allerta in varie forme: sirene, luci lampeggianti e messaggi, inviati tramite sms o e-mail ad indirizzi prefissati.

D12: E' possibile che si verifichino falsi negativi (si verifica il sisma, ma non viene riconosciuto dal sistema di monitoraggio)?

R12: No. Il sistema di monitoraggio sismico registra tutti i sismi che provocano sulla struttura accelerazioni maggiori di un prefissato valore di soglia(ad esempio 0.05 G); il sistema di monitoraggio sismico registra dunque anche sismi che, di regola, sono completamente innocui per l'edificio. Il sistema di monitoraggio sismico utilizza algoritmi che permettono di distinguere il terremoto da altre azioni dinamiche, per esempio lavorazioni interne della produzione o urti, per cui la probabilità di misclassificazione è trascurabile.

D13: E' possibile che si verifichino falsi positivi (non si verifica il sisma, ma il sistema di monitoraggio sismico dà l'allarme)?

R13: La probabilità che questo accada è bassissima; esistono infatti specifici algoritmi di calcolo implementati nel software demandati ad evitare che ciò accada.

D14: Il costo dell'installazione di un sistema di monitoraggio sismico su di un edificio prefabbricato ha un'incidenza finanziaria accettabile?

R14: Sì. Considerando il fatto che i terremoti, specie di lieve entità, sono frequenti nel territorio italiano, il sistema di monitoraggio sismico consente reali e consistenti risparmi nelle fasi dell'emergenza post sismica.

D15: Le strutture prefabbricate in calcestruzzo hanno un rischio sismico più alto rispetto alle altre strutture?

R15: Non c'è alcun motivo per considerare una struttura prefabbricata in calcestruzzo, correttamente progettata ed eseguita, più esposta al rischio sismico rispetto ad altre strutture. Le strutture prefabbricate in calcestruzzo costituiscono una tecnologia utilizzata e consolidata da decenni in tutto il mondo. Considerate, nella loro globalità, tutte le caratteristiche dell'edificio e considerando anche il rapporto costo-prestazione, sono spesso da considerare tra le strutture ottimali.

3. CONCLUSIONI

Nonostante i terremoti siano noti da tempo, la progettazione di edifici in grado di non subire danni a seguito di una scossa sismica è ancora economicamente di difficile implementazione. Negli ultimi terremoti italiani si è visto che una buona parte dei costi è dovuta all'interruzione delle attività produttive che in molti casi potrebbero riprendere senza dover aspettare le verifiche di agibilità. I recenti sviluppi sulle tecniche di monitoraggio permettono oggi di quantificare con adeguata affidabilità e in tempo reale i danni provocati alle strutture dall'azione sismica. Per questo Area Prefabbricati ha sviluppato, in collaborazione con l'Università degli Studi Trento, un prodotto innovativo per edifici prefabbricati in grado di valutare in maniera immediata i danni provocati da una scossa sismica, allo scopo di aumentare la sicurezza degli occupanti e di ridurre notevolmente i costi legati all'emergenza post-sismica.

4. BIBLIOGRAFIA

[1] Bursi O.S., Appunti delle lezioni di ingegneria sismica.

[2] Bibbee, A. et al. (2000), "Economic Effects of the 1999 Turkish Earthquakes: An Interim Report", OECD Economics Department Working Papers, No. 247, OECD Publishing. <http://dx.doi.org/10.1787/233456804045>

[3] Dunbar Paula K., Professor Roger G. Bilham, Professor Melinda J. Laituri. "Earthquake Loss Estimation for India Based on Macroeconomic Indicators" Risk Science and Sustainability. NATO Science Volume 112, 2003, pp 163-180.

[4] Castellani A., Faccioli E. 2008, "Costruzioni in zona sismica" Ulrico Hoepli Editore.

[5] <http://1.bp.blogspot.com/-Uo4FKSSyAO0/T83Z1NBBdCI/AAAAAAAAAD1c/1BkYmqHQYg/s1600/Placca%2BAfricana%2Bed%2BEuroasiatica%2B-%2BItalia.jpg>

[6] <http://ingvterremoti.wordpress.com/i-terremoti-in-italia/>

[7] <http://ingvterremoti.files.wordpress.com/2012/05/pericolositc3a02.jpg?w=528&h=515>

- [8] Limongelli M.P., Appunti lezioni, www.stru.polimi.it/home/limongelli/bacheca/criteri%20di%20progettazione%20antisismica/appunti%20lezioni.
- [9] D.M. 14 gennaio 2008. "Norme tecniche per le costruzioni".
- [10] Hamburger R.O. 1997, "A Framework for Performance-Based Earthquake Resistant Design", EERC-CUREe Symposium in Honor of Vitelmo V. Bertero, January 31 - February 1, 1997, Berkeley, California.
- [11] Limongelli M.P., Corso di perfezionamento in manutenzione, risanamento, conservazione e consolidamento di strutture in muratura. "Criteri generali di progettazione sismica".
- [12] Dolce M. 2013, Presentazione Conferenza ANIDIS 2013, Padova.
- [13] <http://www.protezionecivile.gov.it>
- [14] <http://www.consrv.ca.gov/cgs/smip/>
- [15] <http://www.usgs.gov/>
- [16] Çelebi M. 2011, "Real-Time Seismic Monitoring of Structures: Data Handling and Case Studies." Ed. Sinan Akkar, Polat Gülkan, and Torild van Eck. Earthquake Data in Engineering Seismology 14: 235–245. doi:10.1007/978-94-007-0152-6. <http://www.springerlink.com/index/10.1007/978-94-007-0152-6>.
- [17] Celebi M. 2008, Real-time monitoring of drift for occupancy resumption. In: Proceedings of the 14WCEE, Beijing, China, 13–17 October 2008.
- [18] Priestley M.J.N., Calvi G.M., Kowalsky M.J. 2007, Displacement-Based Seismic Design of Structures. Pavia: IUSS Press.
- [19] Santana J. and van den Hoven R. 2011, "A Capacitive Mems Verilog-based Sensor System for Building Integrity Monitoring." International Journal of Information Acquisition 08 (02) (June): 153–159. doi:10.1142/S0219878911002409.
- [20] Santana J., van den Hoven R., van Liempd C., Colin M., Sallien N., Zonta D., Trapani D., Torfs T., Van Hoof C. 2012, "A

3-axis Accelerometer and Strain Sensor System for Building Integrity Monitoring." *Sensors and Actuators A: Physical* 188 (December): 141–147. doi:10.1016/j.sna.2011.11.017. <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0924424711006741>

[21] Pozzi M., Zonta D., Trapani D., Athanasopoulos N., Amditis A., Bimpas M., Garetos A., Stratakos Y., Ulieru D. 2011, "MEMS-based Sensors for Post-earthquake Damage Assessment." *Journal of Physics: Conference Series* 305 (July 19): 012100. doi:10.1088/1742-6596/305/1/012100.

[22] Trapani D., Zonta D., Molinari M., Amditis A., Bimpas M., Bertsch N., Spiering V., Santana J., Sterken T., Torfs T., Bairaktaris D., Bairaktaris M., Camarinopulos S. 2012, Frondistou-Yannas S., Ulieru D. "Full-scale laboratory validation of a wireless MEMS-based technology for damage assessment of concrete structures." *Proc. SPIE* 8345-166.

[23] Torfs T., Sterken T., Brebels S., Santana J., van den Hoven R., Spiering V., Bertsch N., Trapani D., and Zonta D. 2011, "Low Power Wireless Sensor Network for Building Monitoring" 2011 (c). http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=6301674.

[24] Amditis A., Stratakos Y., Bairaktaris D., Bimpas M., Camarinopulos S., Frondistou-Yannas S., Kalidromitis V., Pozzi M., Santana J., Saillen N., Torfs T., Ulieru D., Wenk B., Zonta D. 2010, "An overview of Memscop project: an intelligent wireless sensor network for after-earthquake evaluation of concrete buildings", *Proc. "14th European Conference on Earthquake Engineering (14ECEE)"*, Ohrid, FYROM, 30 Aug - 03 Sep, 2010.

[25] Çelebi M., Sanli A. 2002, "GPS in pioneering dynamic monitoring of long-period structures". *Earthq. Spectra J. EERI* 18(1):47–61. February 2002.

[26] Celebi M. 2009, *Seismic Monitoring to assess performance of structures in near-real time: Recent Progress*, Chapter 1 in *Seismic Risk assessment and Retrofitting, Geotechnical, Geological and Earthquake Engineering*, Springer Publishing ISSN: 1573-6059, pp 1–24.