



Valutazione dello stato di salute di edifici a seguito di terremoti: considerazioni preliminari su indici di danno e accelerometri MEMS

Marco Bosio^a, Andrea Belleri^a, Paolo Riva^a, Giorgio Barzon^b, Daniele Comotti^b

^a Dipartimento di Ingegneria e Scienze Applicate. Università degli Studi di Bergamo, Viale Marconi 5, 24044 Dalmine

^b 221e srl, via Pasubio 5, 24044, Dalmine (BG), Italy

Keywords: Indici di danno; MEMS; Danneggiamento strutturale.

ABSTRACT

Le recenti esperienze (terremoti de L'Aquila, 2009, Emilia-Romagna, 2012, Centro Italia, 2016) hanno evidenziato come, nelle fasi di soccorso a seguito dell'evento sismico, l'organizzazione delle operazioni di intervento assuma un'importanza fondamentale. Tali operazioni potrebbero essere facilitate nel caso in cui parte del patrimonio esistente disponesse di sensori in grado di fornire un primo feedback dello stato di salute dell'edificio. L'applicazione di queste tecnologie fornirebbe l'input per effettuare una stima dei danni mediante indici già presenti in letteratura. Oltre a fornire alle autorità competenti uno strumento utile per le operazioni di soccorso, tali informazioni potrebbero essere di supporto per la valutazione dell'agibilità post-sisma e per la conseguente definizione degli interventi di riparazione. Tuttavia, per rendere fattibile l'installazione di questa tecnologia spesso si opta per l'utilizzo di accelerometri basati su tecnologia MEMS (Micro Electro-Mechanical Systems) a costo contenuto, caratterizzati da un rumore strumentale che potrebbe inficiarne l'applicazione. Il presente lavoro si propone di valutare l'applicabilità di questi sistemi di misurazione e di valutarne l'accuratezza a partire dalla loro implementazione in indici di danno in letteratura e da prove su tavola vibrante, validando le procedure implementate negli algoritmi di calcolo attraverso l'applicazione a un caso studio.

1 INTRODUZIONE

I recenti progressi della tecnologia utilizzata nella produzione di sensori, la potenza computazionale, la miniaturizzazione dei sensori stessi hanno contribuito a porre una maggior attenzione al tema del monitoraggio strutturale come strumento di diagnosi di eventuali danni. La determinazione del danno a seguito di un terremoto assume una notevole importanza; correlato ad esso infatti troviamo l'esigenza delle utenze di poter utilizzare nuovamente gli edifici sottoposti al sisma. Tipicamente l'operazione di definizione del danno necessita di ispezioni visive da parte di tecnici. Ciò, oltre a richiedere tempistiche piuttosto lunghe, sottopone gli addetti a rischio di incidente. Gli algoritmi sviluppati nell'ambito dello "structural health monitoring" (SHM) sono ampiamente utilizzati per l'identificazione dei parametri dinamici di strutture reali nel mondo. Tali metodi (Abdo and

Hori 2002, Carden and Fanning 2004, Doebling et Al. 1998, Fan and Qiao 2011, Farrar and Worden 2007, Pandey et Al. 1991, Ratcliffe 1997, Sohn et Al. 2003) prevedono l'estrazione di dati dalla struttura, anche sottoposta a sole eccitazioni ambientali. L'introduzione di sensori distribuiti in modo capillare sul territorio e sugli edifici può sicuramente fornire informazioni molto utili per determinare localmente l'intensità ed i principali parametri del sisma (Manfredi et. Al. 2003, Trifunac and Novikova 1998), oltre che stimare il danneggiamento degli edifici stessi (Cosenza and Manfredi 2000). Per rendere questo sistema applicabile è necessario raggiungere un compromesso tra l'accuratezza delle registrazioni e il costo del sistema di acquisizione. Ad oggi, accelerometri e giroscopi a basso costo basati su tecnologia MEMS sono utilizzati da diversi anni per applicazioni consumer, nel settore automotive, nello sport e nel fitness, e nella medicina (Caldara 2014, Comotti et Al. 2013, Pedrana et Al. 2018).

Grazie agli sviluppi degli ultimi anni, è stato possibile ampliare il numero di applicazioni basate su questa tecnologia a settori con requisiti e specifiche più esigenti. La risoluzione di questi sensori è dell'ordine di decine di μg , il rumore può raggiungere qualche centinaio di μg -RMS, le frequenze di acquisizione possono arrivare a diversi kHz ed il fattore di forma è sempre più ridotto. Queste caratteristiche rendono i sensori MEMS adatti per applicazioni di monitoraggio strutturale e sismico capillare mantenendo costi ridotti

2 VALUTAZIONE DELLA SENSORISTICA UTILIZZATA E PROVE SPERIMENTALI

L'acquisizione dei dati è stata effettuata utilizzando una piattaforma elettronica multi sensore riportata in Figura 1. Come si può osservare la dimensione dell'intera piattaforma risulta essere molto compatta, inoltre è dotata di interfaccia radio Bluetooth, denominata *Muse* (<https://www.221e.com/muse>) utilizzabile per il download delle registrazioni.

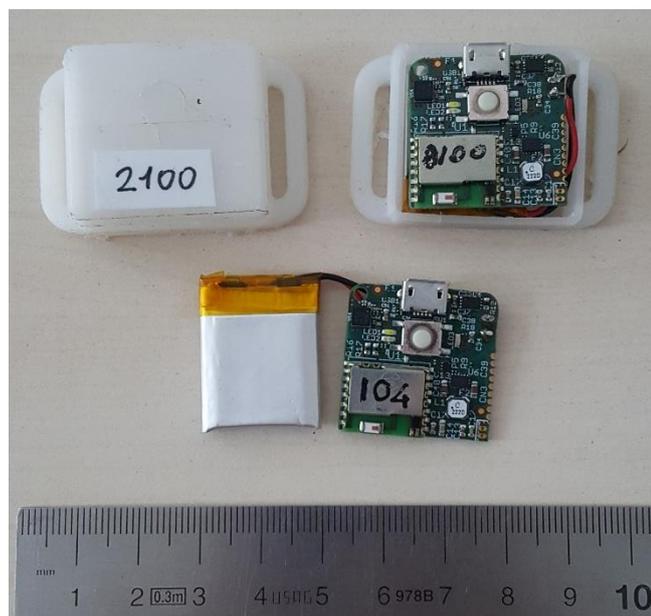


Figura 1 Sistema di acquisizione dati

Questo tipo di sistema permette di misurare l'accelerazione, la velocità angolare ed il campo magnetico nello spazio 3D. Integra inoltre un accelerometro ad alto impatto, fino a 400 g (non rilevante per la tematica affrontata in questo lavoro) ed un sensore di pressione relativa. L'accelerometro MEMS integrato a bordo è il componente LSM303D prodotto da STMicroelectronics, che permette di effettuare

misure di accelerazione con una risoluzione di circa $60 \mu\text{g}$ ed una frequenza fino a 1600 Hz.

La densità spettrale di rumore del sensore è di $150 \mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$ che, per il range di frequenze di lavoro, si traduce in un valore di white noise pari a circa $1500 \mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$.

I valori di spostamento misurati rispetto alla posizione non deformata durante il terremoto, sia del singolo sensore che relativi tra sensori dislocati ad altezze differenti della struttura, permettono di determinare e di quantificare il danno strutturale. Tali spostamenti possono essere calcolati a partire dai dati di accelerazione misurata dopo opportune operazioni di filtraggio e di integrazione del segnale: tale argomento è tutt'ora in fase di studio e analisi, in primis considerando segnali generati dal software ad elementi finiti, poi introducendo a questi un rumore che permette di modellare il caso reale della misura di un MEMS ed infine passando ai dati reali. Le frequenze di taglio utilizzate nel filtraggio del segnale sono state ottenute da un'analisi in frequenza insieme ad ordini di filtro per cui fosse richiesto un numero di campioni contenuto per la convergenza del filtro stesso. In tali operazioni sulle grandezze inerziali sono stati considerati risultati per cui i valori di accelerazione e di velocità di inizio e fine evento sismico fossero pari a zero. Per lo spostamento, invece, la posizione iniziale e finale, prima e dopo l'evento, non può essere definita a priori poiché possono risultare differenti a causa di spostamenti residui dovuti al danno.

L'acquisizione dati dei valori inerziali è stata effettuata utilizzando una tavola vibrante (Figura 2) simulando sei diversi eventi sismici con intensità e/o distanza dall'epicentro crescenti (terremoti T1-T6 riportati in Tabella 3).

Dall'analisi spettrale dei dati di accelerazione misurati è emerso che l'intervallo di frequenze in cui è concentrata la maggior parte del segnale è $[0.25; 25] \text{ Hz}$. Le acquisizioni di accelerazione sono state effettuate in un primo momento con i sensori (n.d.a. *Muse*) posizionati nel rispettivo alloggiamento e fissati sulla tavola vibrante e successivamente confrontate con le accelerazioni ottenute derivando lo spostamento della tavola vibrante acquisito mediante un trasduttore di posizione. I primi risultati ottenuti hanno mostrato accelerazioni significative anche nella direzione ortogonale trasversale alla direzione di vibrazione della tavola. Per tale motivo i test sono stati ripetuti fissando l'elettronica direttamente alla tavola,

senza alloggiamento nel case, ed ottenendo dei risultati più fedeli alla forma d'onda di vibrazione della tavola (Figura 3).



Figura 2 Set-up di prova per la registrazione dei segnali di accelerazione e spostamento

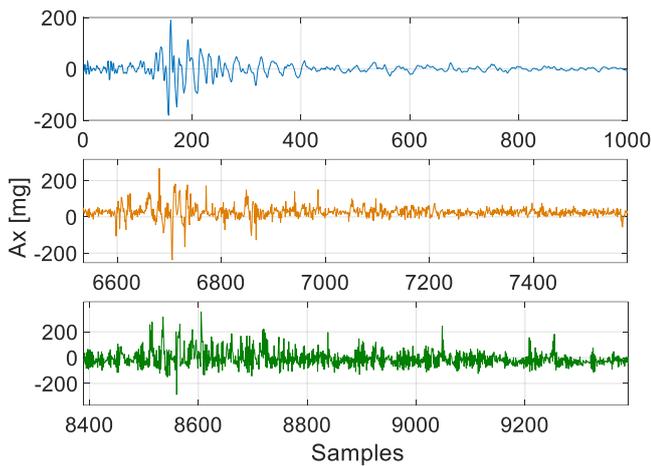


Figura 3 Risultati prova sperimentale, output della tavola (blu), misurazione senza case (arancio), e con case (verde)

3 MISURE DI DANNO

La determinazione del danno, sia per quanto riguarda elementi strutturali che elementi definiti secondari, è sempre riconducibile a parametri (forza, spostamento, energia) ottenibili mediante l'applicazione di sensori adatti alla registrazione delle accelerazioni a cui un edificio, o porzioni di esso, è sottoposto durante un evento sismico. Questi dati possono essere processati in modo da determinare degli indicatori in grado di fornire lo stato di salute dell'edificio.

A partire dagli anni '80 sono stati sviluppati una serie di indici di danno che, combinati all'acquisizione di dati strumentali come accelerazioni e spostamenti relativi possono

portare ad una rapida stima dello stato di salute dell'edificio. In questo capitolo dopo una panoramica relativa ai principali indicatori di danno presenti in letteratura (tratti dai seguenti articoli: Azhdary and Shabakhty 2013, Datta and Ghosh 2008, Sinha and Shuradhonkar) verrà proposta una classificazione degli stessi. In sintesi è riportata di seguito la simbologia principale utilizzata nella formulazione degli stessi:

k_0, k_m : rispettivamente rigidità iniziale e rigidità secante corrispondente al massimo spostamento strutturale;

d_u, d_m, d_y : rispettivamente spostamento ultimo, massimo e a snervamento dalla struttura;

F_u, F_m, F_y : rispettivamente forza ultima, massima e a snervamento dalla struttura;

E_h : energia dissipata dalla struttura;

μ_m, μ_u : rispettivamente duttilità massima e ultima richieste alla struttura.

Gli indici di danno considerati sono:

Indice di danno Lybas and Sozen:

$$ID_1 = \frac{k_0}{k_m} \quad (1)$$

Indice di danno FDR Banon:

$$ID_2 = \frac{\frac{d_m}{F_m} - \frac{d_y}{F_y}}{\frac{d_u}{F_u} - \frac{d_y}{F_y}} \quad (2)$$

Indice di danno Banon and Veneziano:

$$ID_3 = \sqrt{\left(\frac{d_m}{d_y - 1}\right)^2 + \left[\left(\frac{2E_h}{F_y d_y}\right)^{0.38}\right]^2} \quad (3)$$

Indice di danno Hwang and Scribner:

$$ID_4 = \sum_{i=1}^n \frac{k_i d_i^2}{k_e d_y^2} \quad (4)$$

Indice di danno Park and Ang:

$$ID_5 = \frac{d_m}{d_u} + \frac{\beta}{F_y d_u} \int dE \quad (5)$$

Dove β è ottenibile dalla seguente equazione:

$$\beta = (-0.447 + 0.073 \frac{L}{d} + 0.24n + 0.314\rho_t) \cdot 0.7^{\rho_w}$$

Con L altezza della colonna, d altezza utile della

sezione, n l'azione assiale normalizzata, ρ_l la percentuale di armatura longitudinale e ρ_w il rapporto di confinamento.

Indice di danno Wang and Shah:

$$ID_6 = 1 - \frac{F_y}{F_m} \quad (6)$$

$$ID_7 = \frac{e^{\eta\beta} - 1}{e^\eta - 1} \quad \text{con} \quad \beta = C \sum_{i=1}^n \frac{d_i}{d_u} \quad (7)$$

Dove η può assumere valore pari a -1 o -3, mentre C è una costante pari a 0.15.

Indice di danno Powell and AllAhabadi:

$$ID_8 = \frac{\mu_m - 1}{\mu_u - 1} \quad (8)$$

Analizzando la composizione di questi indici è possibile classificarli in funzione del parametro utilizzato per la definizione del danno, in particolare possiamo individuare indicatori legati alla rigidezza, alla duttilità, al numero di cicli all'energia dissipata e infine indici che combinano più grandezze. In Tabella 1 è riportata la classificazione effettuata sugli indici precedentemente definiti.

Tabella 1. Classificazione indici di danno.

Tipologia di indice	Indice
Rigidezza	(1) (2) (4) (6)
Duttilità	(2) (3) (4) (5) (7) (8)
Numero di cicli	(3) (4) (5) (7)
Energia dissipata	(3) (5)
Combinati	(2) (3) (4) (5) (7)

Tali indici, se valutati sul singolo elemento strutturale o su porzioni differenti di edificio possono essere combinati tra loro per ottenere un indice globale per l'intera struttura. In particolare questo è possibile in due modi tramite una media pesata: la prima metodologia utilizza come peso l'energia dissipata mentre la seconda il carico assiale supportato dall'elemento:

$$ID_{piano} = \frac{\sum_{i=1}^n ID_i P_i}{\sum_{i=1}^n P_i} \quad (9)$$

$$ID_{strutt} = \frac{\sum_{i=1}^N ID_{piano,i} P_{piano,i}}{\sum_{i=1}^N P_{piano,i}} \quad (10)$$

Dove, ID_{strutt} rappresenta l'indice di danno della struttura calcolato come media pesata degli indici di danno di piano (ID_{piano}) a sua volta calcolato come media pesata degli indici di danno dei singoli elementi strutturali (ID_i). P_i il peso utilizzato per effettuare la media pesata, nel caso specifico si è deciso di utilizzare come peso l'energia dissipata, in quanto consente di non considerare nel calcolo del danneggiamento globale gli elementi che rispondono in modo elastico, ovvero in assenza di danno. Infine n rappresenta il numero di elementi strutturali di ogni piano e N il numero di piani dell'edificio.

Va tuttavia evidenziato come gli indici presentati siano stati normalizzati nelle analisi successive al fine di ottenere come risultato il valore di 1 nel caso di raggiungimento delle condizioni ultime della struttura e 0 in condizioni di assenza di danno.

4 CASO STUDIO

L'edificio considerato come caso studio per l'applicazione degli indici di danno precedentemente definiti, cerca di rappresentare una tipica costruzione residenziale costruita nel secondo dopoguerra in assenza di specifiche normative sismiche. L'edificio risulta pertanto dimensionato per i soli carichi verticali, ha uno sviluppo in altezza di 4 piani fuori terra con una dimensione in pianta 10x9.6m. La struttura è realizzata mediante un telaio a tre campate nella direzione corta; direzione nella quale appoggiano i solai separati da un telaio centrale posto in mezzera del lato lungo. L'edificio è stato dimensionato per i seguenti carichi:

Permanenti strutturali (G_1):	4.00 kN/m ²
Permanenti non strutturali (G_2):	4.14 kN/m ²
Accidentali (Q):	2.00 kN/m ²
Tamponamenti	4.30 kN/m
Neve in copertura	1.20 kN/m ²

Le sezioni risultanti degli elementi strutturali principali sono riportate in Tabella 2.

Tabella 2. Dimensione elementi strutturali.

Elemento	Dimensione	Armatura
Pilastro	30x30 cm	8 ϕ 14
Trave centrale	70x25 cm	4 ϕ 14+4 ϕ 18/ 4 ϕ 14+3 ϕ 18
Trave di bordo	40x25 cm	4 ϕ 14/4 ϕ 14
Cordolo laterlar	40x25 cm	4 ϕ 14/4 ϕ 14

Per ogni elemento strutturale, realizzato con calcestruzzo di classe C25/30 (resistenza considerata nelle analisi 30MPa) e acciaio feb44k (resistenza considerata nelle analisi 440MPa), sono state definite le cerniere plastiche, modellate attraverso un comportamento del tipo Takeda, ad entrambe le estremità dell'elemento. Non sono stati considerati meccanismi di collasso fragili.

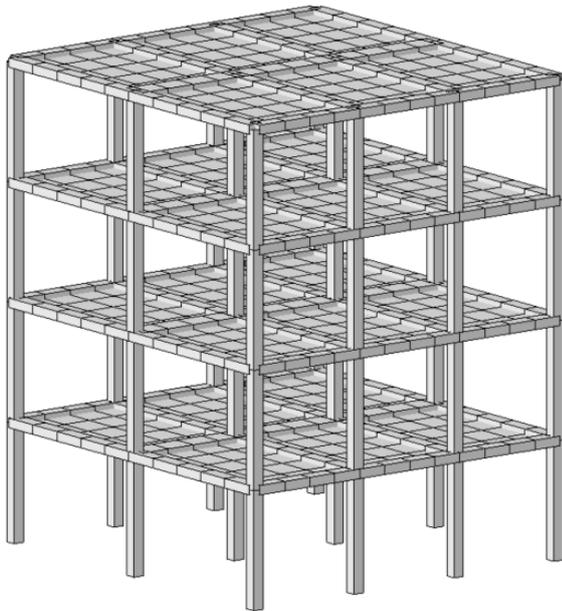


Figura 4 Caso studio

In Figura 4 viene riportato il modello ad elementi finiti dell'edificio, esso è stato sottoposto ad una serie di analisi di tipo Time History aventi come sollecitazione terremoti italiani. I terremoti sono stati individuati per magnitudo crescente, diversa tipologia di terreno e diverse distanze dall'epicentro classificandoli in tre fasce: fascia A con distanza < 20 km, fascia B con distanza compresa tra 20 e 60 km e fascia C con distanza maggiore di 60 km.

In Tabella 3 sono riportate le caratteristiche dei terremoti considerati:

Tabella 3. Terremoti utilizzati.

Terremoto	M _w	Terreno	Fascia			
			A [km]	B [km]	C [km]	
Gubbio	T1	3.1	B	7.2	34.4	82.3
Fiordimonte (MC)	T2	3.9	D	5.8	29.9	61.1
Norcia	T3	4.0	A	5.2	31.6	81.4
Ponte San Pellegrino (MO)	T4	5.0	C	7.4	31.5	80.4
L'Aquila	T5	5.3	B	9.7	20.2	74.3

Norcia	T6	5.4	E	17.7	34.1	76.4
L'Aquila	T7	5.9	B	4.9	30.8	80.1
Capo del Colle (PG)	T8	6.1	A	11	26	91

In totale sono state condotte 48 analisi numeriche poiché, per ogni terremoto, sono state considerate, oltre alla componente verticale, le due componenti orizzontali ruotate di 90 gradi. Mediante analisi push-over è stato possibile determinare i parametri di snervamento e ultimi di ogni piano della struttura, tali parametri sono stati utilizzati nell'applicazione delle misure di danno.

Tabella 4. Parametri per l'applicazione degli indici di danno.

Piano	F _y [kN]	D _y [mm]	F _u [kN]	D _u [mm]
P1	263	10.5	286	46.0
P2	226	8.9	252	63.0
P3	187	7.6	210	91.0
P4	143	6.0	165	126.0

4.1 Applicazione degli indici di danno

Applicando gli indici di danno alle varie analisi condotte si è osservato come solo per terremoti con magnitudo prossima a 6 si riscontrino elevati danni strutturali, e solo nella fascia A, mentre nelle altre analisi si osserva come il solo sisma di Ponte San Pellegrino (MO) presenta danni seppur di lieve intensità. In questo lavoro verranno illustrati i risultati relativi ad un'analisi per ognuno dei terremoti individuati.

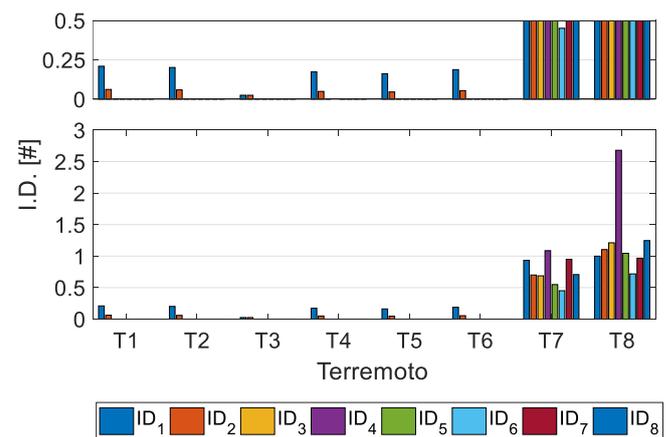


Figura 5 Indici di danno

In Figura 5 si può osservare come ci sia un valore superiore all'unità solo nei terremoti 7 e 8. Inoltre è interessante osservare come gli indici ID₁ e ID₂ siano gli unici indici che segnalano danno anche per terremoti di bassissima intensità, mentre ID₄ va a sovrastimare il danno rispetto a tutti gli

altri indici. Questo è da ricondursi alla natura stessa degli indici, infatti essi risultano essere quelli che utilizzano come parametro ingegneristico la rigidità. Pertanto se nella modellazione si ha una risposta che differisce, anche solo lievemente, rispetto a quella perfettamente elastica abbiamo che l'indice segnala un danno che in realtà non si è verificato nella struttura. Il problema, già presente nelle modellazioni numeriche sarà maggiormente risentito nell'applicazione ad un caso reale, dove la risposta della struttura non sarà mai perfettamente lineare. Tutti gli altri indici invece, seppur con piccole differenze, restituiscono un risultato abbastanza coerente tra loro.

5 EFFETTO DEL RUMORE SULLE VALUTAZIONI

Le valutazioni condotte nel capitolo precedente sono state sviluppate partendo da segnali di spostamento e forze di piano ottenute direttamente dal software ad elementi finiti, tuttavia nell'applicazione reale di tali tecnologie è tipicamente disponibile come unico dato in output l'accelerazione assoluta nelle posizioni in cui sono collocati i sensori, in questo caso accelerometri. Tali registrazioni risultano inoltre influenzate dal rumore dello strumento. Pertanto assume un'elevata importanza il rapporto segnale/rumore. In Figura 6 è possibile osservare il rapporto segnale rumore per i terremoti analizzati; è interessante osservare come, per terremoti inferiori a magnitudo 5, il sensore non dispone di una sufficiente sensibilità per effettuare le registrazioni e quindi si ottiene in output il solo rumore strumentale.

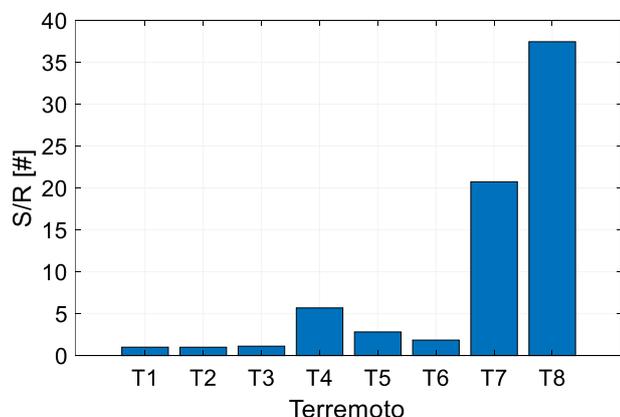


Figura 6 Rapporto segnale rumore per i terremoti analizzati

Il rumore introdotto nelle analisi corrisponde a una deviazione standard di 5 mg. Tale valore è stato ottenuto partendo dalla densità di rumore del sensore tenendo conto della frequenza di campionamento pari a 200Hz, e considerando in aggiunta il rumore flicker "1/f" e quello introdotto dall'elettronica della piattaforma in cui l'accelerometro stesso è integrato. Le operazioni di filtraggio necessarie per ottenere i valori di spostamento riescono a ridurre l'entità del rumore, migliorando di conseguenza il rapporto segnale/rumore.

Nell'ipotesi di avere almeno un sensore per piano è stato possibile ricavare i valori di spostamento di ogni piano tramite doppia integrazione e una stima delle forze sollecitanti andando a moltiplicare la massa di piano per l'accelerazione assoluta.

In Figura 7 si osserva come l'errore assoluto commesso nella stima del drift d'interpiano cresca quasi linearmente al crescere del valore del drift manifestato. Tuttavia si evidenzia come l'errore risulta quasi trascurabile per drift minori dello 0.5%. Inoltre si osserva come la procedura mediante doppia integrazione che consente di passare dalle accelerazioni ai valori di spostamento non consente di cogliere eventuali drift residui della struttura a fine terremoto. Questo è dovuto al filtraggio del segnale necessario per eliminare le costanti d'integrazione.

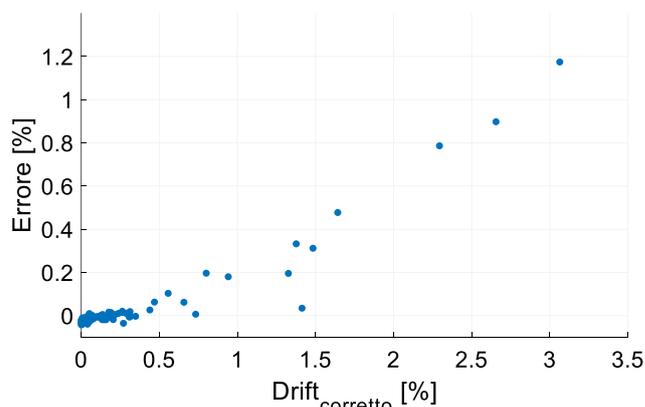


Figura 7 Errore commesso nella stima del drift d'interpiano

Stimati i valori di spostamento e taglio di ogni piano è possibile riapplicare gli indici di danno considerando i nuovi segnali.

In Figura 8 si osserva come la valutazione effettuata a partire dai segnali letti dai sensori tende a incrementare l'errore commesso nella valutazione del danno mediante indicatori che considerano la rigidità, in cui si risente maggiormente della non linearità della struttura.

Per tutti gli altri indici si osserva una generale sottostima del danno. Risulta tuttavia importante evidenziare come l'aggiunta del rumore dello strumento, gli errori dovuti alla stima del taglio e dello spostamento, non forniscono falsi positivi, ovvero in tutti i modelli in cui non si evidenziava danno nelle valutazioni con i dati ottenuti da modello numerico non si riscontra danno nemmeno con l'aggiunta del rumore strumentale.

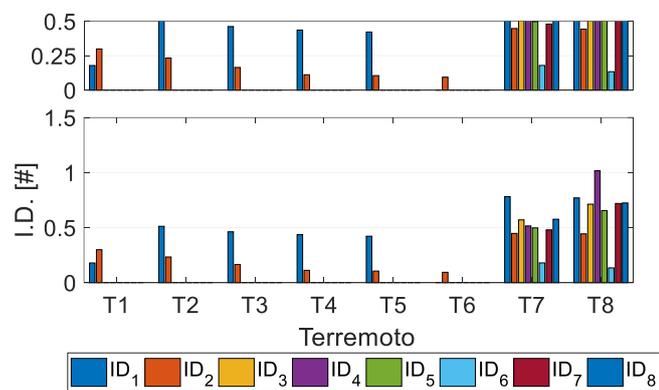


Figura 8 Indice di danno calcolato sui dati letti da sensore

6 CONCLUSIONI

L'applicazione diffusa in modo capillare sul territorio di dispositivi atti alla registrazione dei parametri sismici del terremoto, combinata all'applicazione degli indici di danno, può considerarsi un valido strumento di supporto nelle fasi di soccorso post-sisma e nella valutazione dello stato di salute dell'edificio. Attraverso l'applicazione di accelerometri di tipo MEMS è possibile, con costi ridotti, avere una stima di tali informazioni.

Tra gli indici di danno presenti in letteratura ed analizzati nel presente lavoro si è potuto osservare come gli indici basati sul confronto delle rigidezze della struttura risultano essere inaffidabili, poiché evidenziano danni anche per terremoti di intensità estremamente ridotta. Tale aspetto è stato riscontrato nelle analisi condotte attraverso modelli ad elementi finiti e risulta accentuato quando si passa all'applicazione reale dove, in aggiunta al rumore strumentale, i parametri necessari alla stima debbano essere ricavati mediante doppia integrazione con filtraggio dell'accelerazione e attraverso la stima della masse di piano.

Tali aggiunte influenzano generalmente tutti gli indici di danno considerati come mostrato in Figura 9. Si conferma come siano gli indici di danno associati alla valutazione della rigidezza

strutturale a commettere gli errori maggiori: ID₁ e ID₂ sovrastimano il danno presente nella struttura, mentre ID₄ sottostima pesantemente il danno soprattutto nel terremoto T8, ovvero quello che porta un danno maggiore alla struttura.

Tra gli altri indici si vede come tendenzialmente, nei terremoti T7 e T8 ovvero quelli caratterizzati dal maggior danno strutturale, si tende a sottostimare il danno. Tale risultato è stato confermato anche nelle analisi eseguite ma non presentate direttamente in questo lavoro.

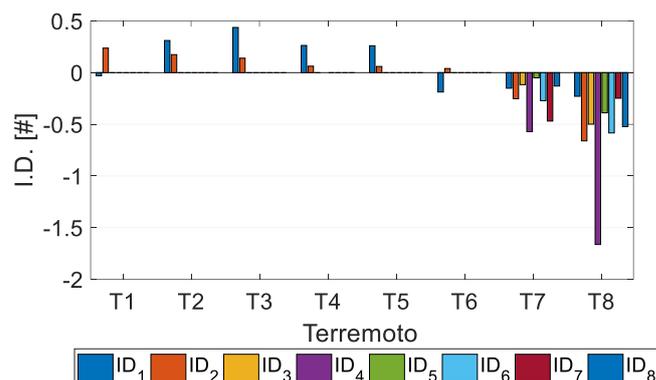


Figura 9 Errore assoluto nella determinazione dell'indice di danno per effetto dell'aggiunta del rumore strumentale.

Inoltre si osserva come, analizzando tutti i risultati ottenuti, gli indici che minimizzano l'errore in seguito alla valutazione del danno ottenuta a partire dal segnale di accelerazione sono ID₅ (Park and Ang), ID₆ e ID₇ (Wang and Shah). Alla luce dell'incertezza legata ai vari processi per la determinazione dell'indice di danno, si ipotizza pertanto di fissare dei valori di soglia inferiori o al più uguali a 0.5. Oltre tale valore è ipotizzabile un elevato danneggiamento della struttura. Infine, è interessante osservare come in tutti i casi in cui si è evidenziato danno nei modelli ad elementi finiti, il danno è stato segnalato anche mediante l'applicazione degli indici di danno ottenuti a partire dal segnale registrato dal sensore, seppur segnalando un'entità di danno inferiore.

RINGRAZIAMENTI

Il presente lavoro è stato parzialmente sviluppato a partire dal finanziamento di Regione Lombardia nell'ambito del bando Smart Living: progetto SCREESE, screening reale energetico e sismico di edifici.

BIBLIOGRAFIA

- 221e SRL – Muse platform official web page, <https://www.221e.com/muse>
- Abdo MAB, Hori M. 2002. A numerical study of structural damage detection using changes in the rotation of mode shapes. *Journal of Sound and Vibration*;251:227–239.8.
- Azhdary F. and Shabakhty N., Probabilistic Evaluation of Damage Index of Steel Moment Frames at Different Performance Levels, *Journal of Applied Science and Agriculture*, **8**(3): 213-223, 2013
- Caldara M. et al., A, 2014. Novel Body Sensor Network for Parkinson's Disease Patients Rehabilitation Assessment, *11th International Conference on Wearable and Implantable Body Sensor Networks, Zurich*, pp. 81-86. doi: 10.1109/BSN.2014.28
- Carden EP, Fanning P. 2004. Vibration based condition monitoring: a review. *Structural Health Monitoring*; **3**(4):355–377.9.
- Comotti D., Ermidoro M., Galizzi M. and Vitali A., 2013. Development of a wireless low-power multi-sensor network for motion tracking applications, *2013 IEEE International Conference on Body Sensor Networks, Cambridge, MA, USA*, pp. 1-6. doi: 10.1109/BSN.2013.6575466
- Cosenza E., Maifredi. G., 2000. Indici e misure di danno nella progettazione sismica, *CNR-Gruppo Nazionale per la Difesa dai Terremoti – Roma*, 125 pp.
- Datta D. and Ghosh S., 2008. Estimating park-ang damage index using equivalent systems, *The 14th World Conference on Earthquake Engineering*.
- Doebbling SW, Farrar CR, Prime MB. 1998. A summary review of vibration-based damage identification methods. *The Shock and Vibration Digest*; **30**(2):99–105.3.
- Fan W, Qiao P. 2011. Vibration-based damage identification methods: a review and comparative study. *Structural Health Monitoring*;10(1):83–111.5.
- Farrar CR, Worden K., 2007. An introduction to structural health monitoring. *Philosophical Transactions of the Royal Society*;365:303–315.
- Manfredi G., Polese M., Cosenza E., 2003. Cumulative demand of the earthquake ground motions in the near source, *Earthquake Engineering and structural dynamics*, 32:1853-1865.
- Pedrana A., Comotti D., Locatelli P. and Traversi G., 2018. Development of a telemedicine-oriented gait analysis system based on inertial sensors, *7th International Conference on Modern Circuits and Systems Technologies (MOCASST), Thessaloniki*,. 1-4. doi: 10.1109/MOCASST.2018.8376592
- Pandey AK, Biswas M, Samman MM. 1991. Damage detection from changes in curvature mode shapes. *Journal of Sound and Vibration*;145(2):321–332.6.
- Ratcliffe CP. 1997. Damage detection using a modified Laplacian operator on mode shape data. *Journal of Sound and Vibration*;204:505–517.7.
- Shiradhonkar S. and Sinha R., 2012. Detailed evaluation of available seismic damage indices, *Iset golden jubilee symposium*.
- Sohn H, Farrar CR, Hemez FM, Shunk DD, Stinemates DW, Nadler BR. 2003. A review of structural health monitoring literature: 1996–2001. *Technical Report, Los Alamos National Laboratory, LA-13976-MS, Los Alamos, New Mexico, USA*.
- Trifunac M.D., Novikova E.I., 1994. Duration of strong ground motion in terms of earthquake magnitude epicentral distance, site conditions and site geometry, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 23:1023-1043.