

# Alcune considerazioni di ingegneria sismica sul terremoto dell'Italia Centrale, 24 agosto 2016

Edoardo Cosenza<sup>1,2</sup> Junio Iervolino<sup>1,2</sup> Costantino Menna<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Dipartimento di Strutture per l'Ingegneria e l'Architettura, Università degli Studi di Napoli Federico II.

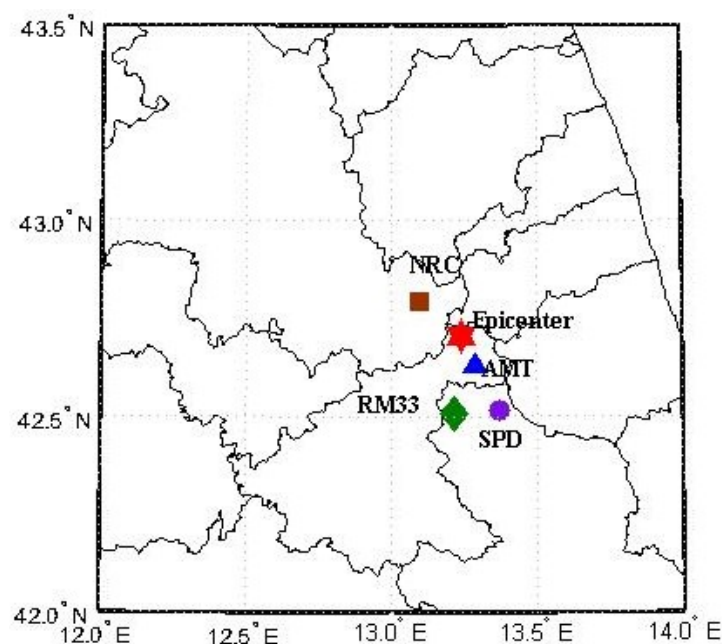
<sup>2</sup>Istituto di Tecnologie della Costruzione, URM c/o Università degli Studi di Napoli Federico II.

## 1. Premessa e brevi considerazioni sulle caratteristiche del terremoto

Un terremoto di magnitudo tra 6 e 6.2 (a secondo del modello di calcolo) è avvenuto la notte del ventiquattro agosto 2016 alle ore 03:36 italiane tra le province di Rieti e Ascoli Piceno. L'ipocentro è stato localizzato dalla Rete Sismica Nazionale dell'INGV ad una profondità di 4 km [1]. L'evento sismico che, come talvolta succede, sembra non essere stato preceduto da uno sciame, è seguito, come invece sempre accade, da una sequenza di repliche. La sequenza si è sviluppata in ottimo accordo con consolidati modelli di letteratura. Nella Figura 1a, tratta da [2], è riportato l'epicentro (in rosso) e la posizione delle stazioni accelerometriche della RAN (Rete Accelerometrica Nazionale) localizzate più vicine. In particolare, la Stazione di Amatrice AMT con una distanza stimata dall'epicentro di 8,9 Km, Norcia NRC (distanza 13,7 km), RM33 (a distanza 22,3km) e SPD (distanza 23,7km) in provincia de L'Aquila.

Si osservi che la zona interessata, in tempi recenti, è stata colpita dal terremoto di Avezzano (1915), e nella logica storica della classificazione sismica, superata solo negli anni '80, era stata in parte classificata sismica (II categoria) già dal 1927. E' questo il caso dei Comuni di Amatrice e di Accumoli mentre il comune di Norcia rientra nella logica storica della classificazione sismica a partire dal 1962.

La localizzazione della faglia è piuttosto complessa. Nelle semplici considerazioni che seguono si fa riferimento alla proiezione rettangolare della superficie del piano di rottura riposizionata in Figura 1b. È verosimile che la rottura abbia interessato un segmento di faglia orientato NNW-SSE e immergente verso SW. In particolare, la rottura cosismica ha avuto inizio nei pressi della città di Accumoli e sembra essersi propagata bilateralmente verso S-SE in direzione di Amatrice e verso N-NW in direzione di Norcia. Il massimo della deformazione cosismica è stato ubicato nei pressi di Accumoli [1]. In pratica, si tratta di un rettangolo allungato nella direzione appenninica che ha subito una dislocazione profonda con risalita verso l'adriatico e discesa verso il terreno.



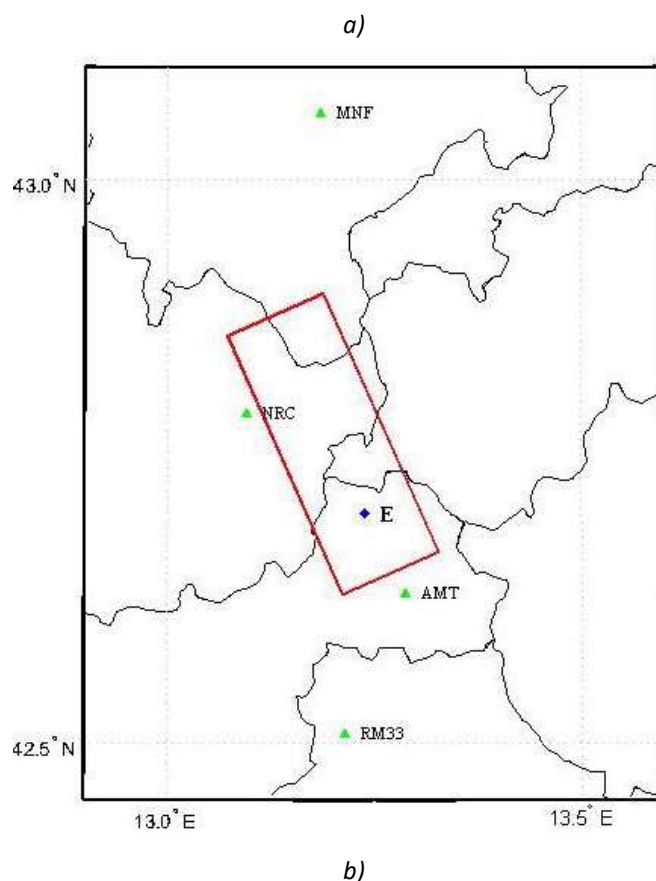


Figura 1: a) Mappa delle stazioni con le registrazioni più vicine all'epicentro di cui agli spettri nella Figura 2e Figura 6; b) proiezione della superficie del piano di rottura: in evidenza le province interessate ed alcune stazioni accelerometriche.

Utili per la comprensione di quanto accaduto, sono la Figura 2, Figura 3, Figura 4 e Figura 5, rispettivamente relative alle accelerazioni di picco, alle velocità di picco, all'intensità di Arias ed alla durata effettiva del sisma (main shock) [2]. E' evidente la grande attenuazione con la distanza di PGA e PGV, la non grande energia ai fini sismici, considerando i valori di PGV e Intensità secondo Arias; si osserva anche l'aumento di durata effettiva con la distanza, connessa all'aumento del contenuto in frequenza attraversando via via diversi strati di terreno. Approfondimenti sono riportati in [1,2].

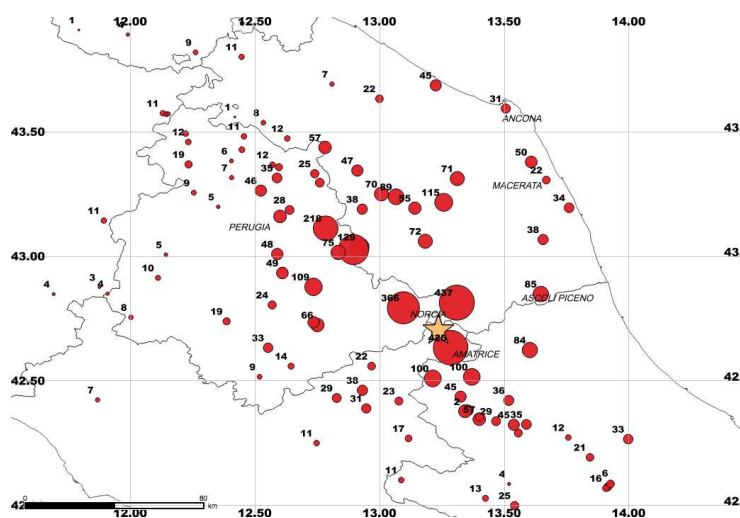


Figura 2: Mappa dell'accelerazione di picco (PGA, massimo tra le componenti orizzontali, in  $cm/s^2$ ). La stella in figura indica la posizione dell'epicentro [2].

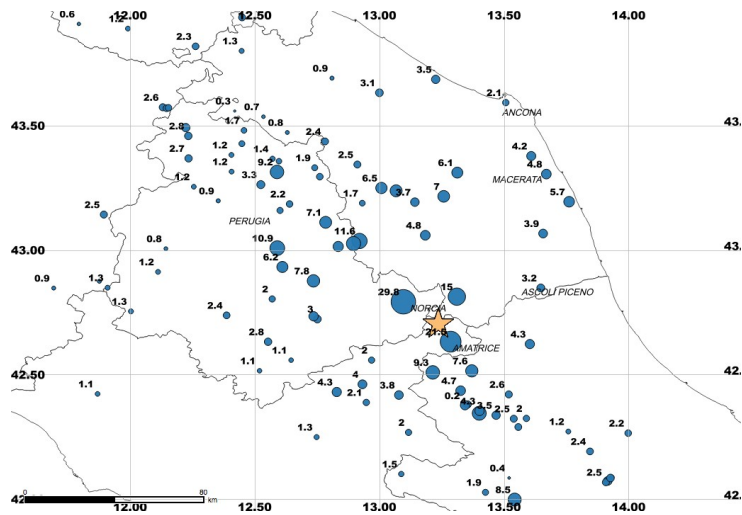


Figura 3: Mappa delle velocità di picco (PGV, massimo tra le componenti orizzontali, in cm/s). La stella in figura indica la posizione dell'epicentro [2].

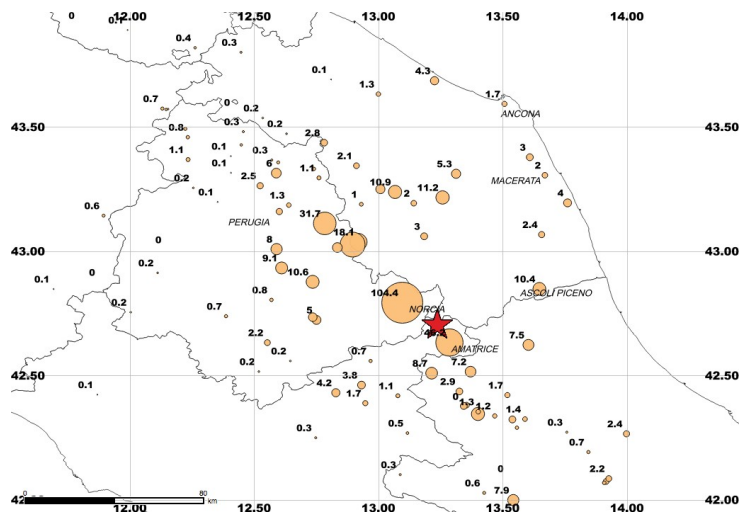


Figura 4: Mappa dell'intensità di Arias (massimo tra le componenti orizzontali, in cm/s). La stella in figura indica la posizione dell'epicentro [2].

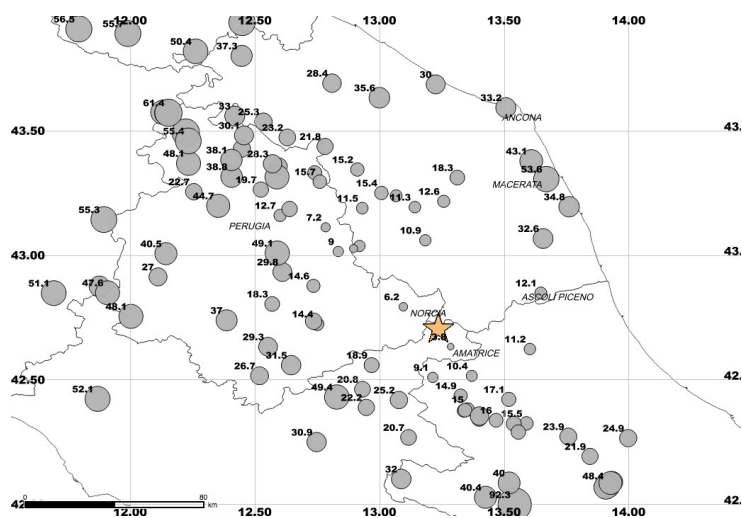


Figura 5: Mappa della durata effettiva del sisma (massimo tra le componenti orizzontali, in s). La stella in figura indica la posizione dell'epicentro [2].

dell'epicentro [2].

Di seguito si riportano alcune brevi, e ancora preliminari, considerazioni di ingegneria sismica sulla base delle informazioni ed elaborazioni ad oggi disponibili riguardo alla scossa principale.

## 2. Considerazioni di ingegneria sismica e dinamica delle strutture

Osservando i dati di cui al rapporto ReLUI-INGV [2] e considerando come al solito le componenti orizzontali E-W e N-S degli accelerogrammi registrati, le accelerazioni massime orizzontali al terreno sono risultate rispettivamente 0,43g e 0,36g per le registrazioni delle stazioni di Amatrice e Norcia (Figura 6). Allontanandosi dall'epicentro si ha evidentemente una notevole attenuazione dell'accelerazione di picco, generalmente coerente con quanto atteso dalle cosiddette 'leggi di attenuazione' a base semi-empirica per i terremoti italiani.

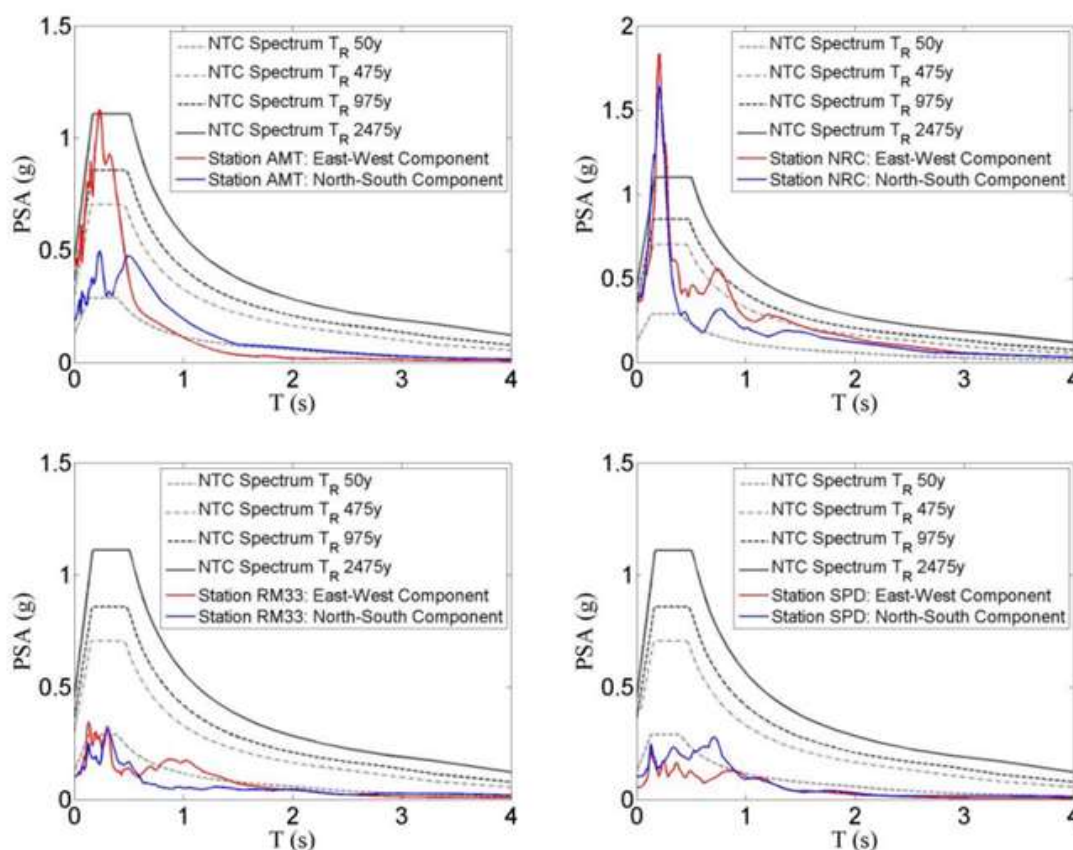


Figura 6: Spettri di risposta orizzontali osservati e spettri di norma per quattro periodi di ritorno per le quattro stazioni più vicine all'epicentro. Da sopra in senso antiorario AMT (distanza 8,9km); NRC (distanza 13,7 km); RM33 (distanza 22,3km); SPD (distanza 23,7km)

Analizzando gli spettri di risposta, per valori del fattore di smorzamento del 5%, si registrano rispettivamente accelerazioni di picco pari ad oltre 1g (AMT) e 1,8g (NRC), con valore della massima amplificazione spettrale rispettivamente pari a circa 2,6 e 5. Le forme spettrali sono tali per cui le accelerazioni sono intense nell'intervallo 0.2s-0.3s, relativamente agli altri periodi. Questo intervallo corrisponde, grossolanamente, a strutture rigide (tipicamente le più basse). In particolare per la registrazione di Amatrice, il picco di accelerazione spettrale si ha per 0,23 secondi.

Si osservi che il tessuto edilizio del centro storico di Amatrice è disposto sostanzialmente lungo Corso Umberto I e sue parallele, lungo direzioni quasi ortogonali (Figura 7). Per ragionare proprio in funzione di quanto accaduto agli edifici di Corso Umberto I, si sono valutati gli andamenti delle accelerazioni nella direzione del Corso Umberto I e ad esso ortogonale, a partire dalle classiche componenti E-W e N-S ed in base alle registrazioni della stazione RAN-AMT. In particolare, l'andamento delle accelerazioni per strutture

linearmente elastiche con periodo proprio 0,23 secondi è riportato nella Figura 8a per una durata di 60 secondi, e nella Figura 8b per l'ingrandimento dei pochi secondi in cui tutta la violenza distruttiva si è manifestata.



Figura 7: Mappa del comune di Amatrice (adattato da <https://www.geospatialworld.net/esi-usqs-data-help-understand-italy-earthquake-damage/>) con localizzazione di alcuni edifici di interesse e posizione della stazione AMT

E' evidente che la violenza estrema del sisma si sia manifestata con all'incirca due interi cicli intensi, in pratica con rilevantissimi picchi in entrambi i versi, per la componente parallela al Corso Umberto I, aventi valore pari a circa 1g. Contemporaneamente sono stati registrati circa 5 picchi di accelerazione, all'incirca pari a 0,5 g, nella direzione ortogonale. Da tale quadro, ne deriva un danneggiamento ciclico subito dalle strutture nella direzione parallela al Corso Umberto I con conseguente espulsione degli elementi ortogonali. La violenza del sisma, manifestatasi in pochissimi secondi e con cicli in entrambe le direzioni, è del tutto coerente con alcuni filmati resi noti di recente e riferiti proprio al centro di Amatrice in cui sono mostrati gli effetti disastrosi del sisma. In molti casi infatti, l'effetto è stato la totale distruzione delle strutture basse e rigide.

Si osservi invece che si sono riscontrati danni strutturali limitati a Norcia che, seppure con forma spettrale più a campana e dunque ancora più selettiva, anche ha subito enormi accelerazioni, con picchi addirittura maggiori rispetto ad Amatrice (Figura 6). Ciò potrebbe essere legato alle tecniche utilizzate per il rinforzo sismico post terremoto Umbria-Marche del 1997. Questo grande successo delle tecniche di rinforzo meriterebbe certamente studi più approfonditi, come *best practice* di ingegneria sismica ed è auspicabile che la comunità tecnico-scientifica italiana lo effettui con dovizia di studi e particolari.

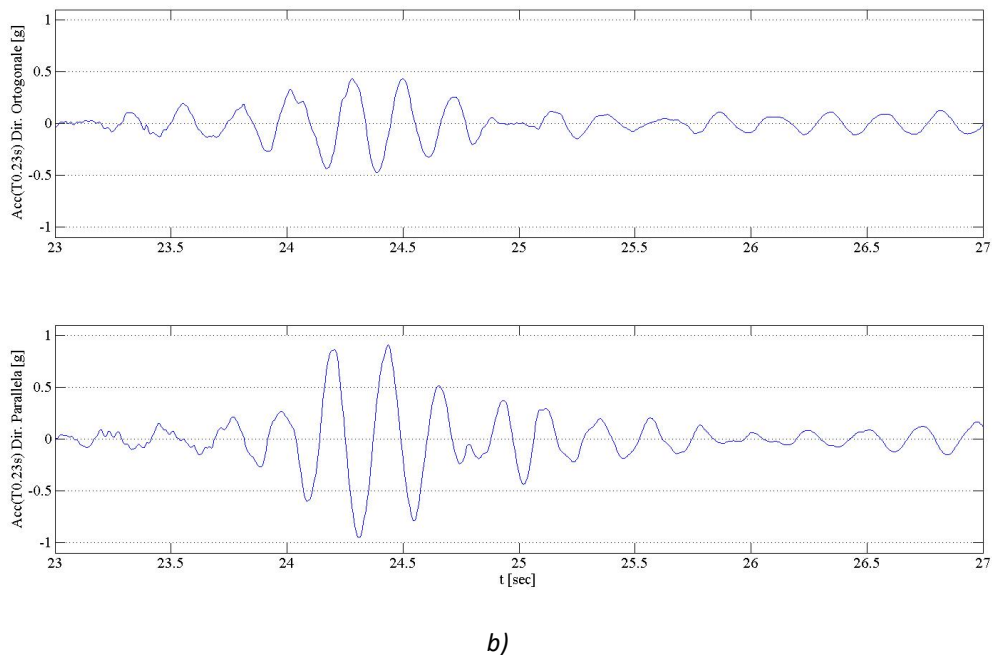
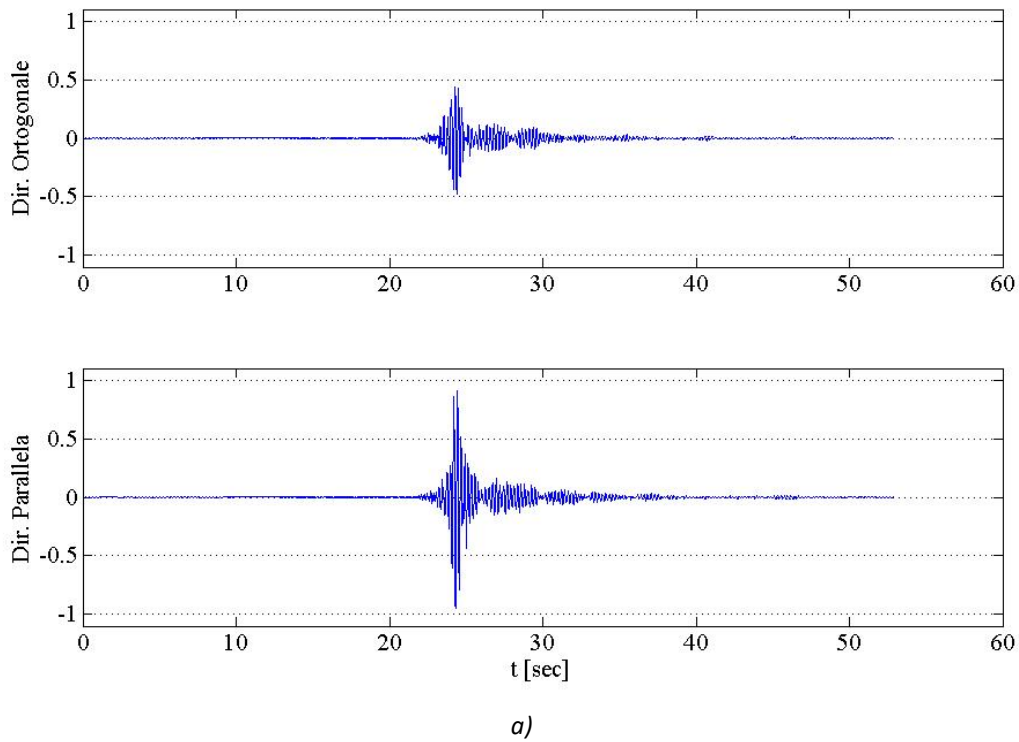
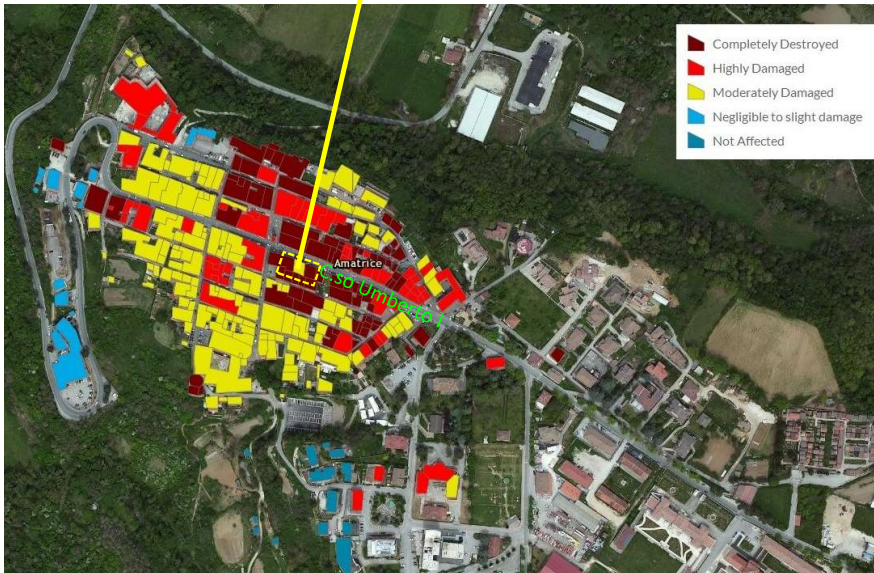


Figura 8: a) Andamenti delle accelerazioni nella direzione parallela ed ortogonale a Corso Umberto I (Amatrice) per un periodo proprio di 0,23 secondi e durata di 60 secondi; b) ingrandimento in corrispondenza della massima accelerazione registrata.

La forma spettrale potrebbe anche spiegare perché ad Amatrice abbia subito soltanto danni limitati la struttura in cemento armato più alta di Corso Umberto I, e relativamente flessibile, mostrata nelle Figura 9a,b,c, uno dei simboli di questo terremoto. In base alla forma spettrale registrata, è molto ragionevole pensare che abbia ricevuto azioni sismiche, in termini di accelerazioni, inferiori a quelle delle strutture rigide nelle vicinanze (a parità di eventuali effetti di amplificazione locale, essendo tute situate in prossimità). Le foto mostrano con chiarezza il totale collasso degli edifici adiacenti, bassi e in muratura, e la

sostanziale tenuta delle strutture in cemento armato dell'edificio alto. Sono stati comunque riscontrati danni strutturali importanti, come ad esempio visibile nella Figura 10a,b,c che mostra i danni alle tamponature esterne e i dettagli del nodo travi pilastro, peraltro tipici dell'epoca.



a)



b)



c)

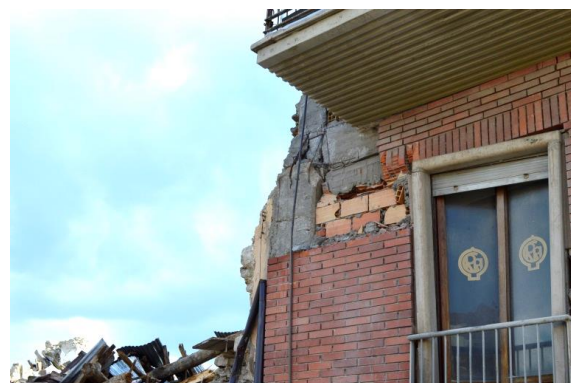
Figura 9: a) Mappa di Amatrice a seguito del sisma (mappa adattata da <http://www.emergenza24.org/terremoto-lazio-24-08-2016/>) e ingrandimento dell'edificio in c.a. rimasto in piedi; vista da Corso Umberto I pre-evento sismico (Google Maps); vista da Corso Umberto I post-evento sismico).



a)



b)



c)

Figura 10: a) Danni subiti dalle tamponature ortogonali al corso Umberto I; b) danni subiti dalle tamponature ortogonali al corso Umberto I con evidente distacco dell'involucro esterno in mattoni rossi; c) dettaglio danni nel nodo in c.a. al primo piano.

Stessa osservazione vale per il Campanile (torre Civica) isolato in muratura, molto prossimo all'edificio in cemento armato sopra citato, visibile nella Figura 11a,b: la struttura del campanile mostra significativi fuori piombo ma è rimasta assolutamente in piedi. Si osservi anche che l'edificio più alto in cemento armato di Amatrice, anche indicato in pianta in Figura 7, ha certamente registrato danni ma non è assolutamente collassato, come evidente dalla Figura 12.





a)



b)

Figura 11: a) Torre Civica di Amatrice; b) dettaglio del distacco della campana.



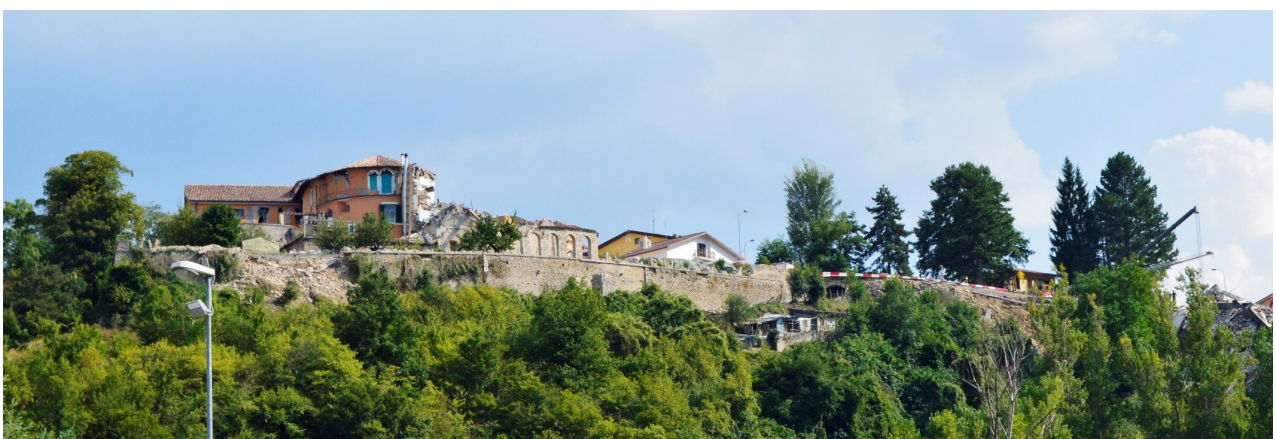
Figura 12: Edificio in c.a. evidenziato in Figura 7 post evento sismico (da [3]).

In definitiva, le caratteristiche dinamiche delle strutture hanno largamente influenzato il comportamento strutturale degli edifici presenti ad Amatrice. Purtroppo, le accelerazioni enormi di Amatrice sono state amplificate proprio dalle caratteristiche del patrimonio edilizio, in genere in muratura, che è tipico del luogo, creando danni disastrosi e tante vittime. Molto migliore è stato, in genere, il comportamento delle strutture intelaiate in cemento armato, più deformabili e quindi che in termini dinamici sono state soggette ad accelerazioni spettrali molto più contenute.

Come ulteriore osservazione si rileva che la stazione accelerometrica appare disposta, in pianta, nei pressi del centro storico, come da Figura 7. Ma in realtà essa è situata ai piedi del rilievo su cui sorge Amatrice, come meglio si vede da Figura 13a,b. Pertanto, le accelerazioni del centro storico sono state certamente amplificate da effetti topografici (previsti dalle Norme Tecniche attraverso l'uso di coefficienti topografici), ed è possibile quindi che nel centro storico si siano registrate accelerazioni maggiori, sempre in coerenza con quanto suggerito dalle NTC.



a)



b)

Figura 13: a) Posizione relativa della stazione RAN-AMT rispetto al centro abitato; b) dettaglio del danneggiamento subito dagli edifici e parapetti in corrispondenza delle zone limitrofe del centro abitato.

### 3. Confronto con i valori di riferimento normativi

Si consideri che le accelerazioni derivanti dalla analisi di pericolosità INGV e recepite dalla Normativa Tecnica Italiana, su suolo rigido (A nella classificazione), sono date, per Amatrice e Norcia (in base alle coordinate dei comuni), nella seguente tabella, al variare del periodo di ritorno dell'evento che ne causa il superamento.

	50 anni	475 anni	975 anni	1900 anni	2475 anni
Amatrice	0,103g	0,259g	0,332g	0,413g	0,440g
Norcia	0,103g	0,256g	0,329g	0,410g	0,448g

Il confronto con l'intero spettro è riportato nella già citata Figura 6 al variare del periodo di ritorno (del superamento), considerando il terreno di tipo B dichiarato nelli dati della rete RAN. È chiaro che per i siti prossimi all'epicentro e con riferimento alle strutture rigide, si tratta di un evento piuttosto raro, anche dell'ordine di 2475 anni nei casi delle registrazioni di Amatrice e Norcia sui picchi di accelerazione spettrale; tale evenienza però non fornisce elementi per mettere in discussione le mappe di pericolosità. Si noti infatti che, per come sono costruiti gli spettri di progetto, essi mediano tra possibili epicentri vicini e lontani dal sito di interesse (oltre che tra varie magnitudo possibili). Per questo, è del tutto atteso (anzi 'per costruzione' si potrebbe dire) che per i siti vicinissimi alla sorgente lo spettro di progetto sia superato in un evento del tutto contemplato dai calcoli di pericolosità. Considerazioni più approfondite su questo argomento, in particolare in termini di "disaggregazione", si trovano sempre nell'esteso rapporto [2].

Ciò è anche confermato dai grafici in Figura 6, valutando quanto graficizzato per le stazioni RM33 e MNF che si ricorda sono posizionate a 22,3 Km e 23,7 Km dall'epicentro. Si conferma che allontanandosi dall'epicentro, gli spettri si riempiono anche di altre frequenze, secondo un ben noto fenomeno di propagazione nei diversi e più lontani suoli più distanzi; inoltre, si ha l'usuale attenuazione delle massime accelerazioni, dovute ai fenomeni di attenuazione, e in definitiva gli spettri diventano compatibili con quelli di periodo di ritorno dell'ordine di 50 anni. Questo ragionamento, che può sembrare a prima vista contro intuitivo, in realtà è del tutto razionale e in linea con la filosofia della sicurezza strutturale allo stato dell'arte delle normative internazionali. Per ciò che riguarda i valori di accelerazione verticale, anche per tale componente sono stati registrati valori significativi nelle stazioni situate in prossimità dell'epicentro. In particolare, quest'ultima è risultata avere picchi di circa 0.19 g e 0.215 g rispettivamente per la stazione RAN AMT (Amatrice) e NRC (Norcia). Tali accelerazioni, seppur certamente elevate, in genere non possono essere decisive per strutture rigide verticalmente, come nel caso degli edifici, comportando in definitiva una variazione istantanea di circa il 20% della forza peso. Diverso è il caso di elementi strutturali deformabili, come mensole o strutture complessivamente inflesse di elevata luce, che potrebbero avere avuto una dinamica locale con periodi propri nel campo 0,2-0,3 sec. in cui le amplificazioni sono state notevoli, anche superando g.

### 4. Spettri di spostamento e isolamento sismico

Gli spettri di spostamento tratti da [2] (Figura 14) mostrano che, per i siti più prossimi all'epicentro, si raggiungono anche spostamenti di circa 15cm per strutture deformabili, con fattore di smorzamento pari al 5%. Evidentemente, a tali spostamenti corrispondono danni non strutturali molto rilevanti. Ad esempio, in una struttura alta 15m, e quindi con punto di applicazione delle forze orizzontali sismiche riferite al primo modo di vibrare a circa 10m, tali componenti potrebbero subire uno spostamento relativo di 0,015m. Considerando, approssimativamente, uno spostamento massimo relativo di piano pari al doppio del medio, si avrebbe 0,03 e dunque molto superiore al valore comunemente accettato per tramezzature e tamponature [4]. Naturalmente, questo rappresenta una situazione plausibile se tali componenti avessero avuto un periodo proprio sufficientemente grande per rendere valido questo ragionamento. Altrimenti gli spostamenti relativi di piano avrebbero raggiunto valori ben inferiori.

Si osservi che assumendo un valore dello smorzamento pari al 10%, certamente minimo considerando la tecnologia dell'isolamento sismico, il massimo spostamento registrato nel campo 2-2,5 secondi (anch'esso tipico dell'isolamento sismico) corrisponde a uno spostamento spettrale massimo dell'ordine di 15 cm o

poco meno. Tale spostamento è assolutamente compatibile con le tecniche di isolamento sismico attualmente utilizzate, considerando che gli isolatori si progettano per avere uno spostamento massimo nel campo di periodi indicato, non inferiore a 20 cm.

Si osservi anche che in tale campo di periodi, le accelerazioni spettrali sono bassissime e dunque non si sarebbe avuto alcun danno operativo ai contenuti delle strutture stesse, cioè il pieno mantenimento dello stato limite di operatività, nel caso fossero esistite strutture isolate sismicamente.

Dunque è possibile affermare che se le strutture dei centri più vicini alle stazioni fossero state isolate sismicamente, non avrebbero subito danni rilevanti.

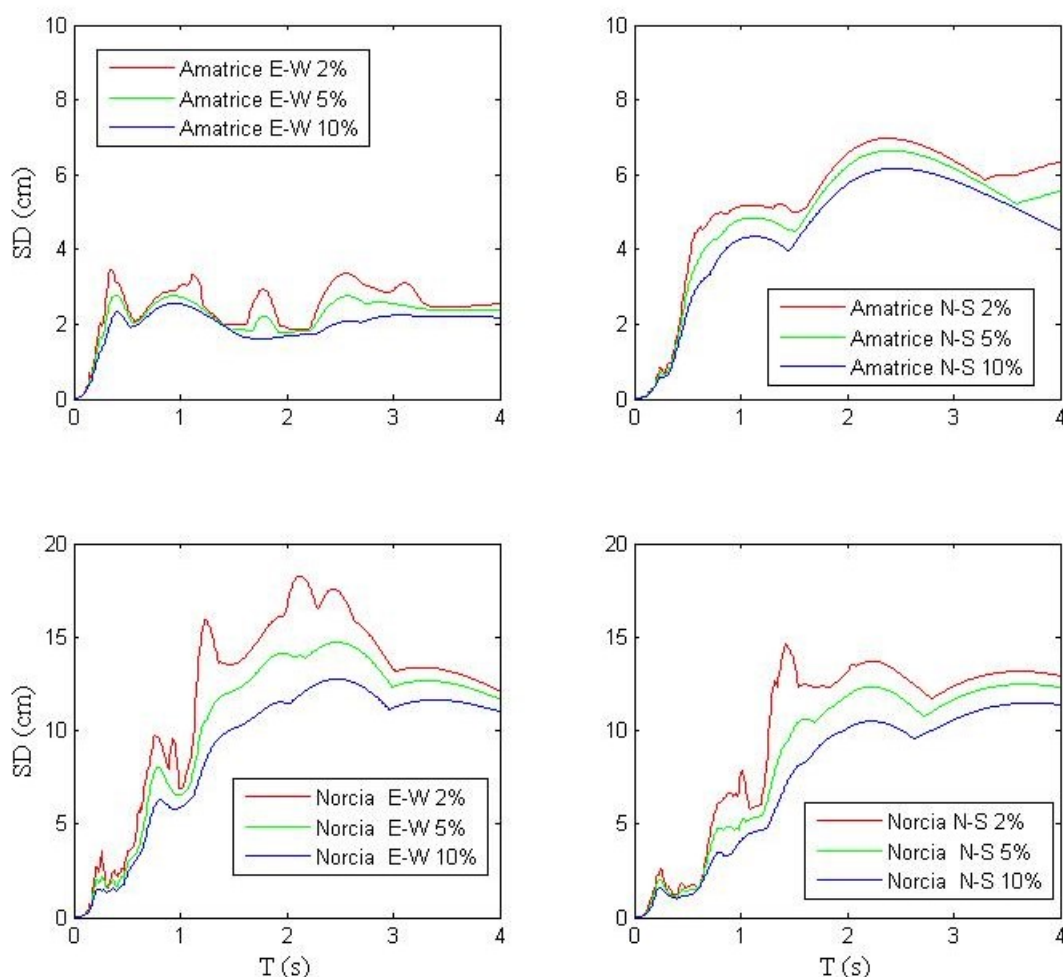


Figura 14: Spettri di spostamento per le due stazioni più vicine all'epicentro del terremoto (Amatrice e Norcia).

### Riferimenti bibliografici per approfondimenti

1. Gruppo di Lavoro INGV sul terremoto di Amatrice (2016). Primo rapporto di sintesi sul Terremoto di Amatrice MI 6.0 del 24 Agosto 2016 (Italia Centrale), doi: 10.5281/zenodo.61121
2. ReLUIS-INGV Workgroup (2016), Preliminary study of Rieti earthquake ground motion records V5, available at <http://www.reluis.it>
3. G. Santarsiero, L. Chiauzzi, A. Masi. Report ReLUIS (2016): Analisi del danneggiamento di edificio situati nella zona sud del comune di Amatrice (RI): confronto pre e post sisma del 24/08/2016 – V., available at <http://www.reluis.it>
4. Cosenza, E., & Manfredi, G. (2000). Damage indices and damage measures. Progress in Structural Engineering and Materials, 2(1), 50-59.