



Evoluzione storica della normativa sismica italiana alla luce degli effetti causati dal terremoto dell'Aquila del 2009

Giuseppe Oliveto

Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale, Università di Catania. Viale Andrea Doria 6 - 95125 - Catania.

Laura Liberatore, Luis D. Decanini

Dipartimento di Ingegneria Strutturale e Geotecnica, Sapienza Università di Roma. Via Antonio Gramsci 53, 00197 Roma.

Keywords: Terremoto L'Aquila 2009, Normative, Cemento armato, Danni

ABSTRACT

Il terremoto che il 6 aprile 2009 ha colpito l'Abruzzo, di magnitudo M_w 6.3, ha provocato seri danni al patrimonio storico, monumentale ed edilizio della regione. La città dell'Aquila è stata duramente colpita dall'evento; il risentimento macrosismico, secondo la scala MCS, è stato pari a IX, mentre a Onna ha raggiunto il valore X. Nel presente lavoro, vengono descritte da un lato, le caratteristiche del moto del suolo, e dall'altro le cause dei crolli avvenuti nelle strutture in cemento armato esaminando questi aspetti alla luce dello sviluppo della normativa sismica in Italia.

1 INTRODUZIONE

Il terremoto che il 6 aprile 2009 ha colpito l'Abruzzo, di magnitudo M_w 6.3, ha provocato seri danni al patrimonio storico, monumentale ed edilizio della regione. La città dell'Aquila è stata duramente colpita dall'evento; il risentimento macrosismico, secondo la scala MCS, è stato pari a IX, mentre a Onna, località prossima a L'Aquila, ha raggiunto un valore massimo pari a X.

L'Aquila si localizza in pieno *near-fault* in posizione di *hanging wall* ad una distanza di circa 6 km dall'epicentro. Questo si riflette nelle caratteristiche del moto del suolo, che ha causato il collasso di diverse costruzioni (cemento armato e muratura), provocando 309 vittime, migliaia di feriti, decine di migliaia di senza tetto. Altresì, si sono verificati danni significativi nella maggior parte degli edifici storici e residenziali in muratura e in alcuni edifici in cemento armato residenziali, commerciali ed industriali.

L'Aquila era stata colpita precedentemente da terremoti severi. Nella Figura 1 sono riportati gli eventi che si sono susseguiti a partire dalla fine del XIII secolo.

Dall'inizio del XX secolo, diverse normative sono state introdotte in Italia, con maggiori o minori modifiche rispetto alle precedenti. L'introduzione di nuove normative spesso avveniva a seguito del verificarsi di terremoti moderati o forti.

Di particolare interesse è il terremoto del 1915 di Avezzano (o Marsica), di magnitudo 6.8 ed intensità epicentrale XI MCS, che ha colpito un'area a sud-ovest dell'Aquila. A seguito di questo terremoto, L'Aquila e altri comuni vicini ad Avezzano sono entrati nell'elenco dei comuni classificati in zona sismica (RD 29/04/1915, n. 573). Successivamente, nel 1927 (RD 13/03/1927 n. 431), vengono definite due categorie sismiche. L'Aquila è inclusa nella seconda (sismicità meno elevata).

Per quanto riguarda gli edifici in cemento armato a L'Aquila, questi risalgono a diversi periodi, principalmente a partire dagli anni '30. Secondo l'ultimo censimento ISTAT (Istituto Nazionale di Statistica) tali costruzioni ammontano a 4113, rappresentando circa il 29% della totalità degli edifici presenti. Buona parte degli edifici colpiti dal terremoto del 2009 sono stati progettati con le norme del 1937 e del 1962.

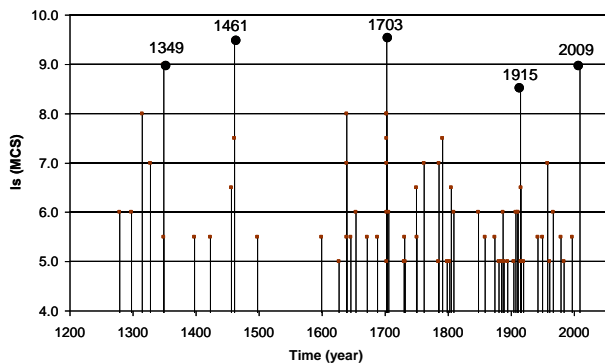


Figura 1. Storia sismica dell'Aquila (Sorrentino *et al.*, in stampa).

Nel presente lavoro, vengono descritte da un lato, le caratteristiche del moto del suolo, e dall'altro le cause dei crolli avvenuti nelle strutture in cemento armato esaminando questi aspetti alla luce dello sviluppo della normativa sismica.

Altre informazioni e studi riguardanti il terremoto del 2009 sono presentati in diversi rapporti, pubblicati da istituzioni pubbliche e private, ed articoli scientifici tra cui (EERI, 2009, INGV, 2009, Global Risk–Miyamoto, 2009, AON Benfield UCL HRC, 2010, Ameri *et al.*, 2009, Akinci *et al.* 2010, Di Sarno *et al.*, 2010, Mori, 2010, Çelebi *et al.*, 2010, Chioccarelli e Iervolino, 2010, Decanini *et al.*, 2009, 2010a, 2010b)

2 ASPETTI SISMOLOGICI

L'evento del 6 aprile 2009 (1:32 UTC), è stato un terremoto di tipo distensivo (Figura 2) di momento sismico $M_0 = 3.7 \times 10^{18}$ Nm. La faglia è orientata secondo l'andamento dell'Appennino. Le coordinate dell'epicentro secondo l'INGV (Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia) sono 42.33 N, 13.33 E. La profondità focale è pari a circa 10 km. Sono state fornite diverse valutazioni delle coordinate epicentrali da parte di varie agenzie, comunque non si discostano molto tra loro e le differenze non hanno una ricaduta importante sull'analisi dell'input sismico.

La scossa principale è avvenuta nell'ambito di uno sciame sismico.

Dal 30 marzo 2009 sette scosse con $M_L \geq 3$ hanno preceduto la scossa principale. Le più severe sono avvenute il 30 marzo alle 18:38 ($M_L = 4.0$, $M_W = 4.4$) e il 5 aprile alle 20:48 ($M_L = 3.9$).

Dopo la scossa principale, e fino alla fine di settembre si sono verificate una ventina di repliche con $M_L \geq 4$. Le repliche maggiori sono state quelle del 7 aprile (ore 17:48, $M_W = 5.6$)

localizzata nella Valle dell'Aterno, circa 4 km a sud-ovest dell'Aquila e del 9 aprile (ore 00:53, $M_W = 5.4$) vicino al lago di Campotosto, circa 16 km a nord dell'Aquila.

Le repliche del sisma definiscono una superficie di rottura che passa sotto la città dell'Aquila (Figura 3). Il tracciamento della presunta superficie è stato realizzato utilizzando il metodo proposto da Wells e Coppersmith (1994).

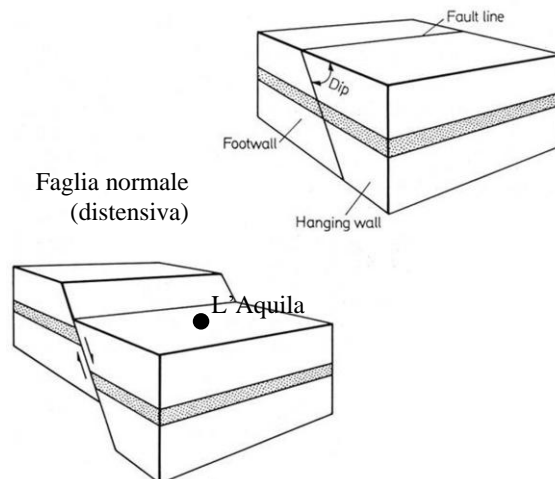


Figura 2. Tipo di meccanismo focale.

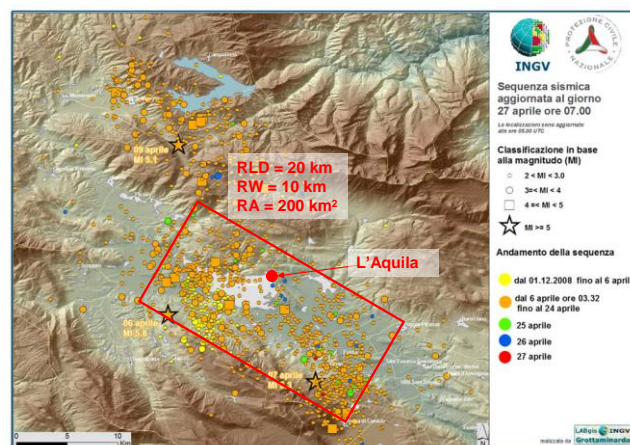


Figura 3. Sequenza sismica e indicazione della proiezione superficiale della faglia.

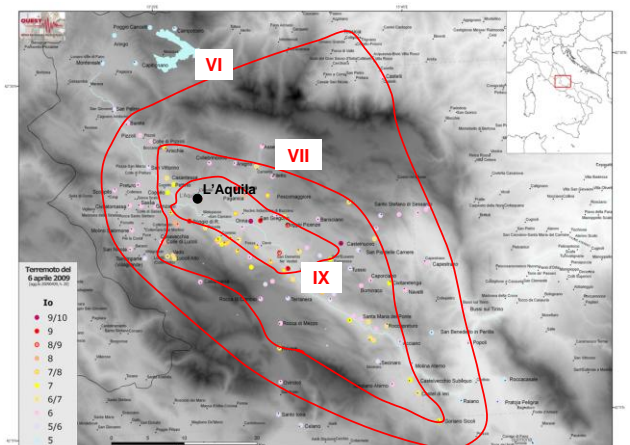


Figura 4. Linee isosisme, intensità MCS. (Decanini *et al.*, in stampa)

L'andamento delle linee isosisme (intensità MCS) è illustrato nella Figura 4. Si può osservare l'allungamento nella direzione appenninica (sub parallela alla direzione della faglia sismo-genetica).

3 CARATTERISTICHE DEL MOTO DEL SUOLO

A seguito dell'evento principale del 2009, sono state attivate 58 stazioni accelerometriche della RAN (Rete Accelerometrica Nazionale) gestite dalla Protezione Civile, alcune delle quali ubicate nella città dell'Aquila o nella porzione della Valle dell'Aterno a nord-ovest della città. Inoltre, anche alcune stazioni dell'INGV hanno registrato le scosse.

Nel seguito vengono prese le registrazioni di cinque stazioni: due molto prossime al centro della città (AQU e AQK) e tre nella Valle dell'Aterno (AQA, AQV e AQQ) a nord-ovest dell'Aquila (Figura 5). Queste stazioni sono tutte su suolo B secondo la classificazione dell'EC8.

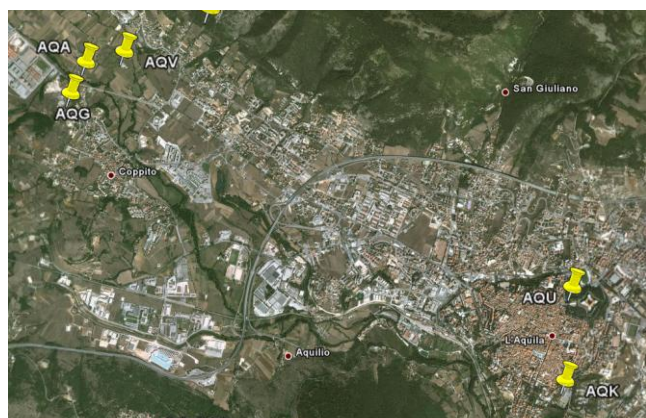


Figura 5. Stazioni accelerometriche considerate, L'Aquila e dintorni (mappa base da Google Earth).

Le registrazioni delle stazioni AQU e AQK presentano evidenti pulsazioni in velocità (Figura 6). Dette pulsazioni, abbastanza frequenti in condizioni *near-fault*, contengono un elevato input sismico energetico.

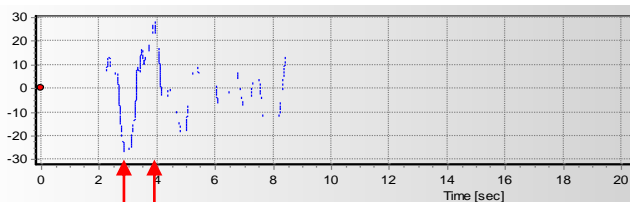


Figura 6. Velocigramma stazione AQK (componente EW).

La durata efficace dei moti registrati è molto breve, compresa circa tra 3 e 10 s (Decanini *et al.*, in stampa). Questo ha avuto una diretta ripercussione sul numero di cicli in campo anelastico delle strutture, che è risultato molto ridotto.

I parametri tipici del moto del suolo, PGA, PGV e PGD per le componenti orizzontali delle registrazioni considerate sono riportati nella Tabella 1 insieme all'accelerazione efficace (EPA) e allo spostamento spettrale massimo (d_{max}). L'accelerazione efficace, EPA, è data dalla seguente espressione:

$$EPA = \frac{\bar{S}_{pa}}{2.5} \quad (1)$$

in cui \bar{S}_{pa} è uguale alla media dell'accelerazione spettrale nell'intervallo di periodi 0.1 – 0.5 s. L'EPA rappresenta un indice del potenziale distruttivo del moto del suolo molto più significativo del PGA strumentale. Infatti, i valori normativi di PGA non possono essere confrontati con il massimo registrato. Le normative più affidabili nel mondo fanno riferimento al valore efficace e non a quello strumentale.

La componente verticale del moto del suolo è stata significativa. Infatti, per le stazioni considerate il rapporto tra accelerazione verticale massima e accelerazione orizzontale massima del suolo è compreso tra 0.64 e 1.34. Nella Tabella 2 sono riportati, oltre all'accelerazione verticale massima del suolo, PGA_v , l'accelerazione spettrale massima, $S_{av,max}$, ed il periodo associato a tale valore, $T_{Sav,max}$. Come si può notare il periodo $T_{Sav,max}$ non supera il valore 0.16 s.

Tabella 1. Parametri relativi alle componenti orizzontali delle registrazioni considerate.

Acc.	PGA (g)	PGV (cm/s)	PGD (cm)	EPA (g)	d_{max} (cm)
AQV-EW	0.626	36.7	8.4	0.471	12.2
AQV-NS	0.598	40.5	4.2	0.502	8.0
AQG-EW	0.416	33.6	8.0	0.316	13.1
AQG-NS	0.434	35.9	3.9	0.309	12.0
AQA-EW	0.394	30.5	6.4	0.254	10.1
AQA-NS	0.451	24.5	4.0	0.384	7.2
AQK-EW	0.342	30.3	8.0	0.220	24.2
AQK-NS	0.340	38.6	11.0	0.245	22.6
AQU-EW	0.263	20.6	3.6	0.209	9.5
AQU-NS	0.316	30.7	5.8	0.157	12.4
Media	0.418	32.2	6.3	0.307	13.1

Tabella 2. Parametri relativi alla componente verticale delle registrazioni considerate.

Acc.	PGA_v (g)	$S_{av,max}$ (g)	$T_{Sav,max}$ (s)
AQV-UP	0.529	1.583	0.04
AQG-UP	0.277	0.685	0.16
AQA-UP	0.490	1.300	0.04
AQK-UP	0.371	0.971	0.06
AQU-UP	0.353	0.715	0.06

Gli spettri di pseudo-accellerazione delle componenti orizzontali di AQU ed AQK sono riportati in Figura 7. Nella figura è indicato, con

tratto blu, il valore corrispondente alle normative pre-2003, questo è ottenuto moltiplicando il valore di coefficiente sismico, C , pari a 0.07, per opportuni fattori di trasformazione secondo la seguente espressione:

$$S_a = 2.25 \times R \times C \quad (2)$$

Il primo coefficiente trasforma lo spettro adottato per le verifiche con il metodo alle tensioni ammissibili nello spettro da utilizzare nel metodo agli stati limite ultimi, il secondo (R) è equivalente ad un fattore di struttura che converte lo spettro di progetto in uno spettro elastico. Per $R=4$ si ottiene il valore indicato in Figura 7, pari a 0.63.

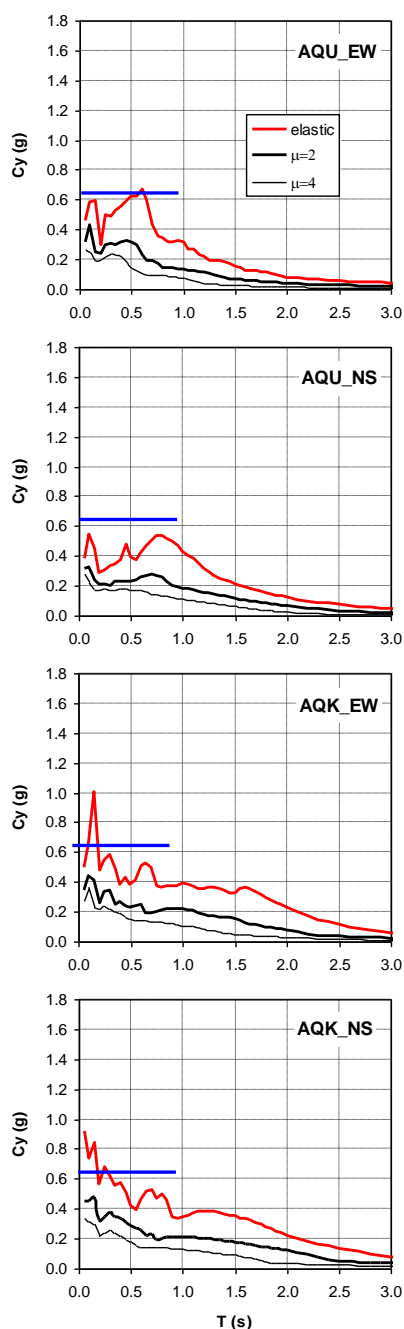


Figura 7. Spettri di pseudo-accelerazione delle componenti orizzontali, stazioni AQU e AQK. La linea blu rappresenta il valore normativo pre-2003.

Si può notare che gli spettri elastici della registrazione AQU sono paragonabili con quelli normativi; per la registrazione AQK, gli spettri elastici superano il valore 0.63 nel campo delle alte frequenze (periodi minori di 0.3 s).

Le forme spettrali fornite dalle nuove Norme Tecniche per le Costruzioni (NTC 2008), che modificano significativamente quelle precedenti (poiché sostituiscono le precedenti quattro zone sismiche con un reticolo che assegna ad ogni punto del territorio italiano dei parametri per la definizione degli spettri di progetto sulla base delle coordinate geografiche), sono definite, su suolo di riferimento rigido in funzione dei tre parametri: accelerazione orizzontale massima del terreno, a_g ; valore massimo del fattore di amplificazione dello spettro in accelerazione orizzontale, F_0 , e periodo di inizio del tratto a pseudo-velocità costante, T_C^* . Per le cinque stazioni considerate, i parametri sono riportati in Tabella 3 per il primo dei due stati limite ultimi previsti dalla norma:

- **Stato Limite di salvaguardia della Vita** (SLV), in cui la costruzione, anche se danneggiata, conserva 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), in cui la costruzione, anche se gravemente danneggiata conserva ancora un margine di sicurezza per azioni verticali ed un esiguo margine di sicurezza nei confronti del collasso per azioni orizzontali.

Tabella 3. Parametri per la definizione degli spettri per lo Stato Limite di salvaguardia della Vita (NTC 2008).

Stazione	Long.	Lat.	a_g (g)	F_0	T_C^* (s)
AQA	13.339	42.376	0.260	2.362	0.345
AQG	13.337	42.373	0.260	2.362	0.345
AQK	13.401	42.345	0.261	2.364	0.347
AQU	13.402	42.354	0.261	2.364	0.347
AQV	13.344	42.377	0.260	2.362	0.346

Confrontando i valori di PGA strumentali (Tabella 1) e di ancoraggio dello spettro, a_g (Tabella 3), si osserva che i primi sono, nel complesso, abbastanza superiori ai secondi. Infatti, i valori di PGA risultano, in media, 1.6 volte maggiori alle accelerazioni a_g . Però, come già accennato, non è corretto confrontare un picco strumentale con un valore efficace. Il confronto tra EPA (Tabella 1) ed a_g (Tabella 3) mostra che i valori derivati dalle registrazioni sono mediamente 1.18 volte superiori al valore normativo.

In sintesi, i valori normativi di accelerazione al suolo per l'area considerata sottostimano quelli registrati per lo Stato Limite di salvaguardia della Vita, specialmente considerando che il terremoto del 2009 ha un periodo di ritorno (325 anni) minore dell'evento corrispondente a quello di salvaguardia della vita (475 anni).

D'altra parte, per le due stazioni più vicine agli edifici collassati (AQU e AQK), gli spettri anelastici mostrano valori non eccezionali e generalmente decrescenti per periodi maggiori di 0.5 s (Figura 7).

Nella Tabella 4 sono riportati, oltre ad a_g , i valori della velocità massima del suolo, v_g , dello spostamento massimo del suolo, d_g , e del massimo spostamento spettrale elastico, d_{max} sempre relativi allo Stato Limite di salvaguardia della Vita (NTC 2008). Data la vicinanza fra le diverse stazioni considerate, questi parametri sono approssimativamente uguali.

Tabella 4. Valori normativi per lo Stato Limite di salvaguardia della Vita (NTC 2008).

Stazione	Suolo	a_g (g)	v_g (cm/s)	d_g (cm)	d_{max} (cm)
AQA	B	0.260	22.1	9.1	21.8
AQG	B	0.260	22.1	9.1	21.8
AQK	B	0.261	22.3	9.2	22.1
AQU	B	0.261	22.3	9.2	22.1
AQV	B	0.260	22.2	9.2	21.8

Si può notare che anche per le velocità i valori normativi sottostimano quelli registrati. Al contrario, la domanda in termini di spostamento, sia del suolo che spettrale massimo, è perlopiù inferiore a quella normativa. Infatti, gli spostamenti spettrali massimi, d_{max} , derivati dalle registrazioni sono compresi tra 7.2 e 13.1 cm ad eccezione di quelli di AQK, che superano leggermente i valori normativi. Per tale stazione differenti studi hanno messo in luce effetti di amplificazione locale associati al sito (De Luca *et al.*, 2005, Ameri *et al.*, 2009, Akinci *et al.*, 2010).

Infine, è utile menzionare che la valutazione di diversi parametri che caratterizzano il potenziale di danneggiamento del moto del suolo, quali quelli energetici, hanno messo in luce che l'evento del 6 aprile non può essere definito eccezionale (Decanini *et al.*, 2010a, 2010b).

4 EVOLUZIONE DELLA NORMATIVA SISMICA IN ITALIA

Dall'inizio del XX secolo diverse normative si sono susseguite, una delle prime è quella pubblicata nel 1915 (RD 29/04/1915 n. 573). Questa definisce le regole relative ai sistemi di

fondazione, alle dimensioni delle costruzioni e alle distanze fra gli edifici, nonché i metodi di analisi da adottare per le costruzioni in zona sismica. In tale norma è prescritto esplicitamente di tenere in conto nel progetto delle azioni sismiche orizzontali in due direzioni ortogonali. I rapporti fra le forze orizzontali ed i corrispondenti pesi sono posti uguali a un ottavo o un sesto in funzione dell'altezza totale dell'edificio e del piano considerato.

Il RD 13/03/1927 n. 431 introduce la seconda zona sismica, in cui viene inclusa L'Aquila. Per la seconda categoria il rapporto tra le forze orizzontali ed i corrispondenti pesi è posto uguale a un decimo o un ottavo in funzione dell'altezza dell'edificio.

Altri aggiornamenti normativi risalgono al 1937 (RD 22/11/1937 n. 2105) e al 1962 (Legge 25/11/1962 n. 1684). Sempre per la zona 2 il taglio alla base da considerare è pari al 5% (RD 1937) e al 7% (Legge 1962) della somma dei carichi permanenti più un terzo degli accidentali. Anche in queste versioni è ribadita la necessità di avere sistemi resistenti a forze orizzontali comunque dirette (almeno due sistemi resistenti secondo due direzioni ortogonali).

Con la legge n. 64 del 2/2/1974 ed il successivo DM n. 40 del 15/3/1975 viene introdotto, per la prima volta in Italia, il concetto di spettro di risposta. Per periodi minori di 0.8 s il coefficiente sismico per la seconda zona sismica è assunto costante e pari a 0.07, per periodi superiori decresce con legge iperbolica.

Dopo il terremoto dell'Irpinia del 1980, nel 1984 tutto il territorio nazionale è riclassificato con criteri abbastanza omogenei, sulla base della "Proposta di riclassificazione sismica" del Progetto Finalizzato Geodinamica (GdL, 1980) e viene introdotta la terza zona sismica. Aumenta sensibilmente il numero di comuni classificati in zona sismica. Per tutta l'area aquilana è confermata la classificazione sismica precedente (Figura 8).

Le "Norme tecniche relative alle costruzioni antisismiche" del 1986 assegnano alle tre zone i coefficienti sismici convenzionali 0.10, 0.07 e 0.04 per le zone 1, 2 e 3, rispettivamente.

La normativa del 1996 (DM 16/1/1996) segna un passaggio importante introducendo il calcolo agli stati limite ultimi. La classificazione sismica e lo spettro di risposta rimangono comunque invariati rispetto a quelli del 1974.

Nel 1998 un gruppo di lavoro costituito sulla base di una risoluzione della “Commissione Nazionale di Previsione e Prevenzione Grandi Rischi” realizza uno studio e propone una nuova classificazione sismica dei comuni italiani, che tuttavia non viene adottata. In tale studio, per il comune dell’Aquila viene riconfermata la zona 2.

Un significativo cambiamento della normativa, con variazione della classificazione sismica e dei parametri caratteristici, avviene dopo il terremoto di San Giuliano di Puglia del 2002.

L’OPCM 3274/2003, in particolare, combina la classificazione allora vigente con la proposta del 1998 e definisce per la prima volta la zona 4; da allora tutto il territorio nazionale appartiene ad una delle 4 zone sismiche (Figura 9). Ogni zona è contrassegnata da un diverso valore dell’accelerazione orizzontale di ancoraggio dello spettro di risposta elastico con probabilità di superamento del 10% in 50 anni, a_g (Tabella 5). Gli spettri di risposta elastici vengono definiti in funzione del profilo stratigrafico del suolo di fondazione. Si introduce il fattore di struttura q per la definizione dello spettro di progetto. Lo stesso provvedimento introduce lo Stato Limite Ultimo e lo Stato Limite di Danno.

Tabella 5. Accelerazione di ancoraggio dello spettro di risposta elastico (OPCM 2003).

Zona	a_g (g)
1	0,35
2	0,25
3	0,15
4	0,05

Nei primi mesi del 2004 l’INGV presenta alla Commissione Grandi Rischi una nuova mappa di pericolosità sismica (Figura 10) preparata secondo i criteri proposti dall’OPCM 3274. L’OPCM 3519 del 2006 adotta la mappa di pericolosità sismica del 2004 quale riferimento ufficiale. Secondo tale mappa tutta l’area interessata dal terremoto del 6 aprile rientra nella fascia con a_g compresa tra 0.250 e 0.275 g.

Successivamente è stata operata una ulteriore revisione che ha portato alla redazione delle nuove Norme Tecniche delle Costruzioni (Decreto 14/01/2008 del Ministero delle Infrastrutture). In queste norme, la definizione della pericolosità sismica si basa sui risultati del progetto “esse1”, svolto da INGV insieme ad alcune Università italiane per conto del Dipartimento della Protezione Civile (<http://esse1.mi.ingv.it>).



Figura 8. Mappa di classificazione sismica del territorio nazionale del 1984 (<http://zonesismiche.mi.ingv.it/>).

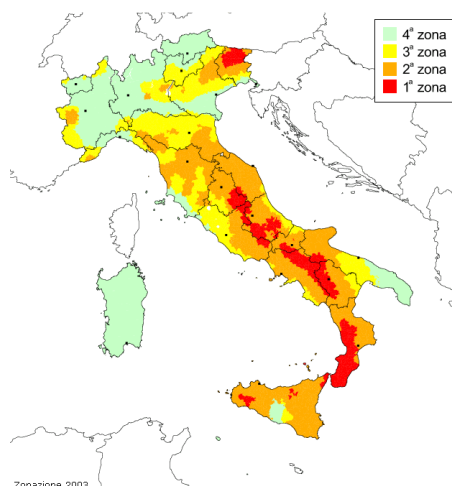


Figura 9. Mappa di classificazione sismica del territorio nazionale del 2003 (<http://zonesismiche.mi.ingv.it/>).

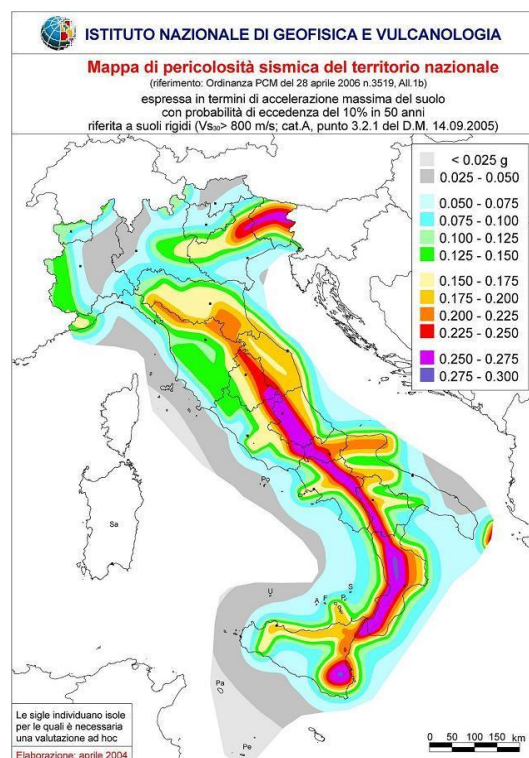


Figura 10. Mappa di pericolosità sismica del 2004 (<http://zonesismiche.mi.ingv.it/>).

Anche secondo questo studio L'Aquila si trova in zona ad alta pericolosità con accelerazione compresa tra 0.25 e 0.275 g (probabilità di superamento del 10% in 50 anni).

Per un confronto tra le varie normative, nella Tabella 7 sono riportati i valori di accelerazione efficace convenzionale (valore di ancoraggio dello spettro di risposta elastico). Per le norme pre-2003, in cui era assegnata una accelerazione di ancoraggio, bensì un coefficiente sismico, il valore di ancoraggio è stato calcolato dividendo S_a (Equazione 2) per 2.5 e considerando due valori del fattore di riduzione R (2 e 4).

Tale confronto mostra che i valori relativi alle norme a partire dal 1937 sono confrontabili se si considera un valore del fattore di riduzione $R=4$. Tuttavia, questo valore, che è legato al tipo di struttura ed in particolare alle capacità dissipative, si raggiunge solo applicando opportuni criteri di progettazione e costruzione.

Tabella 6. Accelerazione di ancoraggio calcolata per le normative dal 1915 al 1996 e accelerazione di ancoraggio prevista dalle norme del 2003 e del 2008.

Anno	Zona 1		Zona 2	
	$R = 2$	$R = 4$	$R = 2$	$R = 4$
1915	0.30	0.60	--	--
1927	0.30	0.60	0.23	0.45
1937	0.18	0.36	0.09	0.18
1962-1975-1996	0.18	0.36	0.13	0.25
2003-2008	0.35		0.25	

Per quanto riguarda la componente verticale dell'azione sismica, una sintesi di quanto previsto dalle normative a partire dal 1915 è riportata nella Tabella 7.

Si può notare, che nel 1937, oltre ad una riduzione dell'azione sismica orizzontale, si assiste ad una significativa riduzione di quella verticale rispetto a quella prevista dal regolamento del 1927. È evidente, peraltro, che le maggiori azioni verticali si traducevano in un aumento di resistenza e di rigidità delle strutture che poteva tornare a beneficio anche del comportamento sotto le azioni orizzontali.

Nella norma del 1962, l'azione sismica verticale viene considerata solo per la verifica delle strutture a sbalzo, che devono essere calcolate con una maggiorazione del carico permanente ed accidentale del 40 per cento per tener conto dell'azione sussultoria. Nei regolamenti del 1975 e 1996, le azioni sismiche verticali sono considerate per gli elementi di luce superiore a 20 m, per le strutture spingenti e per le strutture a sbalzo.

Tabella 7. Componente verticale dell'azione sismica secondo le principali norme a partire dal 1915.

Anno	Zona 1	Zona 2
1915	0.5 (G + Q)	--
1927	0.5 (G + Q)	0.3 (G+Q)
1937	0.4 (G + 1/3 Q)	0.25 (G + 1/3 Q)
1962	0.4 (G + Q) ¹	0.4 (G + Q) ¹
1975-1996	$\pm 0.2(G + 1/3Q)$ ²	$\pm 0.4(G + 1/3Q)$ ¹
2003-2008	spettri ³	spettri ³

G = carichi permanenti; Q = carichi accidentali.

¹ Solo per le strutture a sbalzo

² Solo per membrature con luci superiori a 20 m e strutture di tipo spingente.

³ Solo per grandi luci, elementi precompressi, elementi a mensola, strutture spingenti, pilastri in falso e edifici con piani sospesi.

È solo nel 2003 (OPCM 3274), che viene introdotto lo spettro di risposta della componente verticale. Comunque è d'obbligo considerare tale componente solo in specifici casi (grandi luci, elementi precompressi, elementi a mensola, strutture spingenti, pilastri in falso e edifici con piani sospesi).

5 EDIFICI IN CEMENTO ARMATO

Secondo l'ultimo censimento dell'ISTAT (http://www.istat.it/dati/catalogo/20071022_08/), il 22% degli edifici presenti nella provincia dell'Aquila è in cemento armato. Il 70% in muratura e il restante 8% è classificato come "altro". Considerando il totale degli edifici (muratura + c.a. + altro), circa il 50% è stato costruito prima del 1945. Per gli edifici in cemento armato solo il 4% è stato costruito prima del 1945, mentre il 23% risale al periodo che va dal 1946 al 1971 ed il restante 73% è successivo al 1972.

Il numero di piani delle costruzioni in c.a. è compreso tra 2 ed 8 piani. Negli edifici più recenti il piano terra è spesso occupato da attività commerciali.

La struttura è realizzata con telai, la tipologia con setti (*shear wall*) è inconsueta, come del resto nella maggior parte del territorio italiano. I setti possono, comunque, essere presenti nei nuclei di circolazione verticale. I solai sono generalmente latero-cementizi (travetti in c.a. e laterizi).

Dei 4113 edifici in c.a. presenti nel comune dell'Aquila, circa 20 hanno subito danni molto gravi o il collasso a seguito della scossa del 6 aprile 2009, e più di 100 sono stati danneggiati significativamente.

Il crollo totale o parziale di 12 edifici in c.a. ha causato ben 134 vittime. La data di costruzione di questi edifici è compresa tra la fine degli anni '50 e la fine degli anni '60. Pertanto dovrebbero essere stati progettati con le normative del 1937 o del 1962.

Nel seguito si discutono le possibili cause di collasso e danneggiamento negli edifici in c.a.

5.1 Cause di collasso

Come già osservato, le accelerazioni efficaci associate alle registrazioni più significative per l'area centrale dell'Aquila (AQK e AQU) risultano confrontabili con quelle previste per la zona dell'Aquila dalle normative che dovevano applicarsi all'epoca di costruzione purché la progettazione e la costruzione fossero compatibili con le prassi progettuali in zona sismica.

L'osservazione delle costruzioni collassate ha messo in luce, purtroppo, la elevata vulnerabilità sismica degli edifici colpiti. Nel seguito sono elencate le carenze che hanno maggiormente influenzato la risposta sismica degli edifici.

Presenza di telai in una sola direzione. Questa configurazione è tipica degli edifici progettati per soli carichi verticali ed è legata alla tessitura mono-direzionale dei solai. Nei telai su cui non poggia direttamente il solaio possono essere presenti travi a spessore, ma in alcuni casi è stata riscontrata l'assenza totale di travi trasversali. Si configura pertanto una situazione in cui nella direzione parallela alla tessitura dei solai, la resistenza alle azioni sismiche orizzontali è molto ridotta o assente. Riguardo alla presenza di telai in una sola direzione, si ribadisce che sin dal 1915, la normativa prescriveva di tenere in conto nel calcolo delle strutture portanti le azioni sismiche orizzontali in due direzioni ortogonali. Spesso invece le verifiche venivano svolte solo secondo una direzione, come si è avuto modo di constatare dall'esame di alcune relazioni di calcolo dell'epoca. Purtroppo, nella pratica corrente, si ritenevano sufficienti le verifiche in una sola direzione e le configurazioni strutturali mono-dimensionali.

Piano aperto o debole. Questa situazione si verifica soprattutto al piano terreno, dove esigenze funzionali determinano l'assenza o la riduzione di tamponature, ma può verificarsi talvolta anche ai piani superiori. Come è noto, la brusca riduzione di resistenza e rigidità che deriva dalla presenza di un piano aperto, determinando la concentrazione della domanda di

duttilità e la diminuzione di resistenza in tale piano, ha conseguenze molto negative sulla risposta globale dell'edificio.

Il collasso dell'edificio in Figura 11 è legato, oltre alla presenza di un piano parzialmente aperto e con tamponature molto deboli, alla mancanza di duttilità degli elementi strutturali. La scarsa cura del getto può, inoltre, aver determinato delle superfici preferenziali di rottura alla sommità dei pilastri (De Luca *et al.* 2010)



Figura 11. Collasso del piano terreno.

Scarsa duttilità. Molti degli edifici costruiti nel secolo scorso presentano carenze significative, sia locali che globali, tali da precludere adeguati livelli di capacità di dissipazione dell'energia. A livello globale, è palese l'assenza di una concezione d'insieme atta a garantire la plasticizzazione in alcune sezioni e la redistribuzione delle sollecitazioni. In particolare si rileva la presenza di travi forti e pilastri deboli. Questo riduce fortemente la possibilità per l'edificio di sopportare un certo numero di cicli in campo anelastico. Spesso, a livello locale è evidente la carenza di adeguati dettagli. Si riscontrano, ad esempio, l'assenza completa di staffe nei nodi trave-pilastro, l'insufficienza di armature trasversali nei pilastri (Figura 13, Figura 12), le insufficienti lunghezze di ancoraggio e sovrapposizione delle armature.

Si sottolinea che fino a un paio di decenni fa concetti quali "capacità di dissipazione" e "duttilità" non erano ancora abbastanza utilizzati nella pratica professionale italiana.

Fino al 1939 le normative non contenevano prescrizioni relative alle armature trasversali. È solo dal 1939 (RD n. 2229), che vengono esplicitamente richieste staffe ad una distanza non maggiore di metà della dimensione minima della sezione trasversale e di dieci volte il diametro dell'armatura longitudinale. Nulla veniva specificato sul confinamento dei nodi. Negli anni

70 ulteriori prescrizioni sono state aggiunte, ma in realtà è solo dal 1997, con la circolare del Ministero dei Lavori Pubblici n. 65 (Allegato 1), che si è realizzato un significativo passo avanti, con l'introduzione di regole finalizzate ad assicurare risorse di duttilità adeguate alle domande sismiche.



Figura 12. Dettagli costruttivi carenti.



Figura 13. Insufficiente armatura trasversale.

Irregolarità strutturale. La notevole influenza della regolarità sulla risposta sismica delle costruzioni è ormai ampiamente riconosciuta. Le più importanti normative nel mondo considerano esplicitamente gli effetti legati alla regolarità/irregolarità dovuta sia alla configurazione strutturale che alla sfavorevole disposizione di elementi non strutturali. I casi di piano aperto e presenza di telai in una sola direzione rientrano tra le possibili cause di irregolarità. Altre situazioni sfavorevoli riscontrate a L'Aquila sono: configurazioni in pianta non compatte e non simmetriche e posizioni asimmetriche di vani scala e ascensori. Un caso molto particolare di irregolarità è quello dell'edificio mostrato nelle Figura 14 e 15. La configurazione è a gradoni e la volumetria è molto articolata. La struttura portante è costituita

da telai piani disposti nella direzione trasversale in corrispondenza dei primi quattro piani, e telai disposti in direzione longitudinale in corrispondenza dei piani superiori. A questa inconsueta disposizione si aggiunge anche la presenza di un piano parzialmente aperto. Secondo il progetto, i telai paralleli dovevano essere collegati tra loro da travi a spessore disposte ortogonalmente ai piani dei telai stessi; però di tali travi non è stata trovata traccia nei sopralluoghi eseguiti sull'edificio.



Figura 14. Edificio irregolare a L'Aquila. Vista prima del sisma (Virtual Disaster Viewer).



Figura 15. Edificio irregolare a L'Aquila. Vista dopo la scossa del 6 Aprile.

Materiali utilizzati. Per quanto riguarda le armature, nella maggior parte degli edifici danneggiati è stata riscontrata la presenza di barre lisce, come era usuale negli anni di costruzione. Le tensioni ammissibili utilizzate erano compatibili con la qualità del materiale. Riguardo al calcestruzzo, in genere la qualità (resistenza e omogeneità) risultano inadeguate.

Uno dei principali difetti osservati è la grande variabilità di resistenza da un punto all'altro di uno stesso edificio, dovuta probabilmente alla realizzazione in sito di tipo manuale che consentiva di produrre solo piccole quantità alla volta. Altri difetti osservati sono la segregazione degli inerti (Figura 16) e la presenza di giunti costruttivi carenti.



Figura 16. Segregazione degli inerti nel calcestruzzo.

6 CONCLUSIONI

Lo studio del comportamento delle costruzioni in c.a. durante il terremoto dell'Aquila e l'analisi delle normative sismiche del secolo scorso hanno evidenziato quanto segue.

- L'osservazione dei danni dovuti al terremoto del 2009 mette chiaramente in luce l'importanza della progettazione strutturale e della cura dei particolari costruttivi nel cemento armato.
- La revisione delle normative del secolo scorso mostra la carenza di regole sulla configurazione strutturale e sulla costruzione dei particolari di armatura.
- Le normative del 1997 e del 2003 hanno rappresentato un importante passo in avanti, in quanto recepiscono molti concetti fondamentali relativi alla definizione dell'azione sismica e alla risposta sismica delle strutture.
- Per quanto riguarda le azioni sismiche con le quali gli edifici danneggiati sono stati calcolati, queste risultano confrontabili con quelle della normativa attuale solo se la configurazione strutturale e i dettagli costruttivi sono sufficienti a garantire un'adeguata capacità di dissipazione dell'energia.
- La causa principale dei collassi e dei danneggiamenti severi è attribuibile principalmente alla vulnerabilità degli edifici piuttosto che all'eccezionalità dell'azione

avvenuta. Spesso, questi edifici non erano rispondenti neanche alle normative dell'epoca di costruzione.

RINGRAZIAMENTI

Questo studio è stato in parte realizzato nell'ambito dell'attività di ricerca finanziata dal MIUR.

BIBLIOGRAFIA

- Akinci, A., Malagnini, L. and Sabetta, F. (2010). Characteristics of Strong Ground Motions from the 6 April 2009 L'Aquila Earthquake, Italy, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 30, 320-335.
- Ameri, G., Massa, M., Bindi, D., D'Alema, E., Gorini, A., Luzi, L., Marzorati, S., Pacor, F., Paolucci, R., Puglia, R. and Smerzini, C. (2009). The 6 April 2009 Mw 6.3 L'Aquila (Central Italy) Earthquake: Strong-motion Observations, *Seismological Research Letters*, 80:6, 951-966.
- AON Benfield UCL Hazard Research Centre (2010). *The 2009 L'Aquila Earthquake: Findings and Implications*, Event Science Report 02, London, UK.
- Çelebi, M., Bazzurro, P., Chiaraluçe, L., Clemente, P., Decanini, L., De Sortis, A. *et al.* (2010). Recorded Motions of the 6 April 2009 Mw 6.3 L'Aquila, Italy, Earthquake and Implications for Building Structural Damage: Overview. *Earthquake Spectra*, Vol. 26, No. 3, pp 651-684.
- Chioccarelli, E., Iervolino, I. (2010). Near-source seismic demand and pulse-like records: A discussion for L'Aquila earthquake. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 39, 1039-1062.
- Decanini, L.D., Liberatore, L., Mollaioli, F., Monti, G., Al Shawa, O. (2009). *Studio preliminare della domanda sismica elastica ed anelastica in termini di energia, spostamento e forze (Rel. 1.0)*, <http://www.reluis.it>
- Decanini, L.D., Liberatore, L., Mollaioli, F., Monti, G. (2010a). 2009 L'Aquila earthquake, seismic demand and damage characterization. *14th European Conference on Earthquake Engineering*, Paper 445.
- Decanini, L.D., Liberatore, L., Mollaioli, F. (2010b). Damage suffered by RC buildings during the 2009 L'Aquila earthquake, a general overview and a case study. *14th European Conference on Earthquake Engineering*, Paper 443.
- Decanini, L.D., Liberatore, L., Mollaioli, F. (in stampa). Damage potential of the 2009 L'Aquila, Italy, earthquake, *Journal of Earthquake and Tsunami*.
- De Luca, G., Marcucci, S., Milana, G., Sanò, T. (2005). Evidence of low frequency amplification in the city of L'Aquila, Central Italy, through a multidisciplinary approach including strong and weak motion data, ambient noise, and numerical modelling. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 95(4), 1469-1481.
- De Luca, F., Ricci, P., Verderame, G.M., Manfredi, G. (2009). Interazione locale e globale tra tamponature e strutture in c.a.: gli edifici di Pettino a L'Aquila, un caso studio, *13° Convegno L'Ingegneria Sismica in Italia*.
- Di Sarno, L., Elnashai, A.S., Manfredi, G. (2010). *Seismic Response of RC Members Subjected to the 2009 L'Aquila (Italy) Near-Field Earthquake Ground*

- Motions*. Mid-America Earthquake Center, Report No. 10-01. February 2010.
- EERI Special Earthquake Report (2009). *Learning from Earthquakes - The Mw 6.3 Abruzzo, Italy, Earthquake of April 6, 2009*, Earthquake Engineering Research Institute, USA.
- Global Risk – Miyamoto (2009). *2009 L'Aquila M6.3, Italy, Earthquake Field Investigation Report*, Lafayette, CA 94549, USA.
- INGV EMERGEO Working Group (2009). Evidence for Surface Rupture Associated with the Mw 6.3 L'Aquila Earthquake Sequence of April 2009 (Central Italy), *Terra Nova*, Vol. 22, No.1, 43-51.
- Mori, J. (2010). *The 2009 L'Aquila, Italy, Earthquake (M6.3): Damage and Response to a Moderate Event*, Annuals of Disas. Prev. Res. Inst., Kyoto Univ., No.53 A, Japan.
- Oliveto, G. (2004). Review of the Italian Seismic Code Released After the 1908 Messina Earthquake, *Passive Control Symposium 2004*, 1-20, Structural Engineering Research Center, Yokohama, Japan.
- Oliveto, G., Decanini, L.D. (2011). Historical review of the Italian seismic code from the perspective of the 2009 L'Aquila earthquake, *8th International Conference on Urban Earthquake Engineering*, Tokyo, Japan
- Sorrentino, L., Raglione, E., Liberatore, D., Decanini, L.D. (in stampa). Chiesa di s. Biagio d'Amiternum a L'aquila. Catalogo sismico locale e meccanismi di collasso. In: *l'Università e la Ricerca per l'Abruzzo. Il come e il perché dei danni ai monumenti*, L'Aquila: textus.
- Wells, D.L., Coppersmith, K.L. (1994). New empirical relationships among magnitude, rupture width, rupture area, and surface displacement, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 84, 974-1002.