

# Attività svolta nell'ambito delle verifiche di agibilità nella provincia de L'Aquila e considerazioni sulle registrazioni accelerometriche del 06/04/2009

Andrea VIGNOLI - Emanuele DEL MONTE - Barbara ORTOLANI

## 1. INTRODUZIONE

A seguito dei recenti eventi sismici che hanno interessato la Provincia de L'Aquila, con scossa principale alle ore 03:32 del 06/04/2009, il Dipartimento della Protezione Civile ha richiesto al Consorzio ReLUIS (Rete dei Laboratori Universitari di Ingegneria Sismica) di coordinare le Unità di Ricerca ad esso afferenti nello svolgimento delle verifiche di agibilità innanzitutto degli edifici pubblici, in un secondo momento delle attività produttive e degli edifici privati. Il Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale (DICEA) dell'Università degli Studi di Firenze, nella persona del Prof. Ing. Andrea Vignoli, Responsabile dell'Unità di Ricerca 10 della Linea 11, ha dato la propria disponibilità al Consorzio ReLUIS, collaborando allo stesso tempo con il COM2 (Centro Operativo Misto), Sede San Demetrio Ne' Vestini (AQ), gestito dalla Regione Toscana. Il DICEA si è impegnato con circa 20 persone tra Docenti, Ricercatori, Assegnisti e Dottorandi. Attualmente l'Unità di Ricerca 10 è coinvolta nelle iniziative del Ministero per i Beni e le Attività Culturali dirette al rilievo dei meccanismi di danno su 45 edifici tutelati [1], con riferimento anche agli interventi di consolidamento su di essi effettuati, il tutto allo scopo, oltre che di promuoverne il recupero, di apportare eventuali correzioni alle Linee Guida per la Valutazione e Riduzione del Rischio Sismico del Patrimonio Culturale [2].

Nel presente articolo si illustra l'attività svolta dagli Autori nell'ambito delle verifiche di agibilità. In

particolare tra tutti gli edifici esaminati ne sono stati selezionati tre, uno per tipologia strutturale (c.a., c.a.p. e muratura), ritenuti più rappresentativi. Si fornisce poi un breve resoconto della situazione riscontrata a Castelnuovo, una delle Località maggiormente colpite. Vengono inoltre date delle indicazioni preliminari sulla risposta del costruito, in base a quanto osservato sul campo ed in base ad alcune valutazioni che è già possibile fare sulle registrazioni accelerometriche del 06/04/2009. L'evento sismico in oggetto è stato inquadrato nella storia sismica del territorio de L'Aquila e messo in relazione con i terremoti più significativi verificatisi in Italia negli ultimi decenni: Friuli 1976, Irpinia 1980, Umbria-Marche 1997, Molise 2002. Infine si è proceduto ad un confronto con l'azione sismica prevista dall'attuale Normativa (D.M. LL.PP. del 14/01/2008 [3] e relativa C.M. LL.PP. N. 617 del 02/02/2009 [4]), confronto dal quale non può prescindere una lettura critica del grado di danneggiamento prodotto sulle diverse tipologie strutturali.

## 2. ZONE DI PERTINENZA

Gli Autori hanno operato a più riprese, nei mesi di Aprile, Maggio e Giugno, nelle zone de L'Aquila, San Demetrio Ne' Vestini (AQ) e Castelnuovo, Frazione di San Pio delle Camere, (AQ), (Figura 1), in un raggio di circa 30 km dall'epicentro della scossa del 06/04/2009 (coordinate geografiche Lat. 42.33 N e Long. 13.33 E).

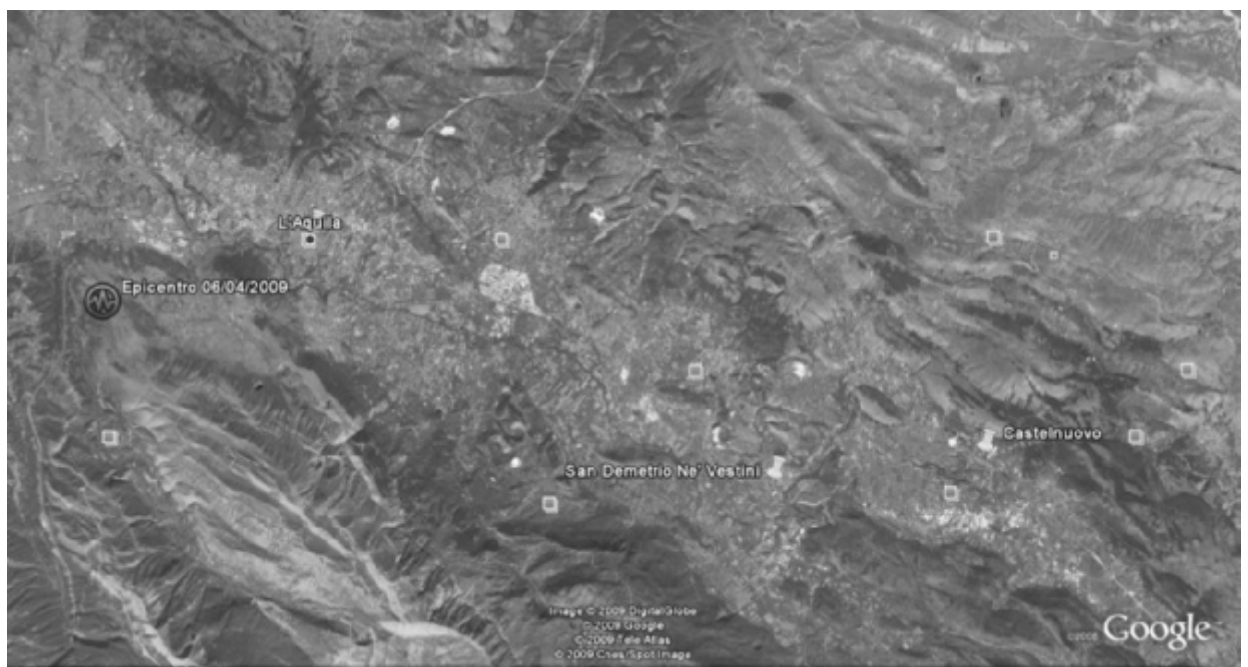


Figura 1 - Zone di pertinenza.

<sup>1</sup> "Valutazione e Riduzione della Vulnerabilità di Edifici in Muratura".

### 3. ATTIVITÀ SVOLTA

L'attività svolta dagli Autori ha riguardato verifiche di agibilità di edifici pubblici, attività produttive e edifici privati, con strutture portanti in c.a., c.a.p., acciaio e muratura.

Gli edifici indagati sono stati i seguenti:

1. Attività produttiva, Zona Industriale de L'Aquila. *Struttura in c.a.p.*
2. Attività Commerciale, Zona Artigianale le Pile L'Aquila. *Struttura in c.a.*
3. Attività Produttiva, Località Boschetto di Pile L'Aquila. *Struttura in c.a.p.*
4. Attività Produttiva, Zona Artigianale le Pile L'Aquila. *Struttura in c.a. e acciaio.*
5. Scuola Elementare F. Rossi, San Demetrio Ne' Vestini (AQ). *Struttura in c.a.*
6. Ex Scuola Elementare L. Volpicelli, San Demetrio Ne' Vestini (AQ). *Struttura in muratura.*
7. Borgo Fortificato di Castelnuovo, Frazione di San Pio delle Camere (AQ). *Edifici in muratura.*
8. Aggregato 8800098, Castelnuovo, Frazione di San Pio delle Camere (AQ). *Struttura in c.a.*
9. Aggregato 8800216, Castelnuovo, Frazione di San Pio delle Camere (AQ). *Struttura in muratura.*
10. Abitazione Castelnuovo, Frazione di San Pio delle Camere (AQ). *Struttura in c.a.*

Complessivamente quindi il campione è di 5 edifici in c.a., di cui uno con parti in acciaio, 2 edifici in c.a.p., 2 edifici in muratura, più vari sopralluoghi nel Borgo Fortificato di Castelnuovo, prevalentemente costituito da edifici in muratura.

Tra questi edifici, ne sono stati selezionati 3,

uno in c.a., uno in c.a.p., uno in muratura, al fine di evidenziare la risposta all'evento sismico in oggetto delle diverse tipologie strutturali. L'esposizione riprende l'impostazione della Scheda di 1° Livello (AeDES) [5]. A chiusura si riporta una descrizione di quanto osservato nel Borgo Fortificato di Castelnuovo, il cui stato post\_sisma è sintomatico del livello di distruzione raggiunto in alcuni centri storici della Provincia de L'Aquila.

#### ***Abitazione Castelnuovo, Frazione di San Pio delle Camere (AQ) - Struttura in c.a.***

Edificio isolato ad uso residenziale, collocato nell'area di nuova edificazione dell'abitato di Castelnuovo, a due piani di altezza media compresa tra 3.50 m e 5.00 m, senza interrato, pianta di impianto rettangolare, con alcuni aggetti al piano primo, superficie media di piano (100 ÷ 200) m<sup>2</sup>, epoca di costruzione tra il 1982 ed il 1991, (Figura 2.a e Figura 2.b).

La struttura è in c.a. a telaio, irregolare in pianta ed in elevazione, con solai in laterocemento (soletta rigida), copertura a falde inclinate in laterocemento (pesante non spingente), tamponamenti esterni (disposti nella maglia strutturale) e tramezzature interne in laterizio.

Tutti i nodi trave\_pilastro al piano primo risultano gravemente danneggiati, con formazione di cerniere plastiche e instabilità delle barre longitudinali, (Figura 2.c e Figura 2.d). È ragionevole ritenere che ciò possa essere imputato alla scarsa qualità del calcestruzzo, constatata mediante una semplice ispezione visiva, abbinata ad una staffatura insufficiente dei pilastri.



(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 2 - Abitazione Castelnuovo, Frazione di San Pio delle Camere (AQ).

Il danneggiamento degli elementi strutturali ha comportato un consistente danneggiamento degli elementi non strutturali, tamponamenti esterni e tramezzature interne.

### **Attività Produttiva, Zona Industriale de L'Aquila - Struttura in c.a.p.**

Capannone isolato ad uso deposito con anti-stanti uffici, pianta rettangolare di dimensioni (28.0 x 96.0) m, ad un solo piano di altezza media superiore a 5.00 m, senza interrato, epoca di costruzione successiva al 2002.

La struttura in c.a.p. è composta da pilastri, travi di bordo e capriate, copertura a capanna (leggera non spingente), manto di copertura in lamierino, tamponamenti esterni (disposti nella maglia strutturale) in pannelli armati prefabbricati, tramezzature interne in laterizio o cartongesso, (Figura 3.a). Le capriate, ad anima piena e dotate di una piattabanda inferiore larga 2.50 m e di spessore 5.0 cm, hanno un interasse di 3.50 m, minore rispetto all'interasse dei pilastri, pari a 12.0 m. Esse appoggiano sulla parte a "mensola" della trave di bordo, di dimensioni (20 x 30) cm, armata con 4Ø12 e staffe Ø8/10".

Per quanto riguarda gli elementi non strutturali, è stato accertato il distacco di alcuni tamponamenti esterni ed il danneggiamento di alcuni "capitelli", realizzati in opera, per facilitare il processo di montaggio, a sbalzo sulla testa dei pilastri, (Figura 3.b).

Per quanto riguarda gli elementi strutturali, è stata rilevata, ai due lati di ciascun pilastro, sulla porzione a "mensola" della trave di bordo, una lesione con inclinazione a 45° (Figura 3.c). Si tratta di lesioni da taglio all'appoggio della trave di bordo, probabilmente indotte anche dall'intervento di una forte componente verticale dell'azione sismica. Tali lesioni hanno raggiunto l'apertura massima di 5.0 mm circa in corrispondenza dei pilastri maggiormente sfalsati rispetto all'asse delle capriate adiacenti, (Figura 3.d).

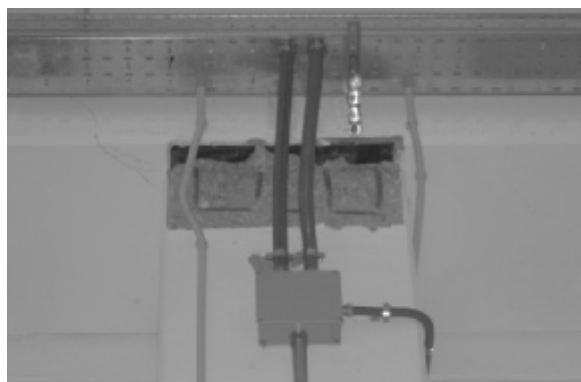
### **Ex Scuola Elementare L. Volpicelli, San Demetrio Ne' Vestini (AQ) - Struttura in muratura.**

Complesso comprendente due edifici isolati distinti, attualmente utilizzati in maniera saltuaria, epoca di costruzione tra il 1900 ed il 1919.

Il primo edificio (Figura 4.a) ha pianta ad U allungata con superficie media di piano (300 ÷ 400) m<sup>2</sup>, a due piani di altezza media compresa tra 3.50 m e 5.00 m, più un sottotetto praticabile, senza interrato. La struttura è in muratura di pietrame a tessitura irregolare e di cattiva qualità, a due paramenti mal collegati, di spessore medio 60 cm. Ciascun paramento è costituito da pietre grezze non lavorate di forma irregolare e di varie dimensioni, (Tipo I A.2 [5]), con malta di cattiva qualità. Il solaio del piano primo è a voltine su putrelle in acciaio, il solaio del sottotetto in putrelle in acciaio e laterizi, dunque entrambi con soletta deformabile, senza catene o cordoli. La copertura è a falde inclinate in legno (capriate e puntoni, travi secondarie, orditura minuta) e pianelle, dunque leggera non spingente. L'edificio



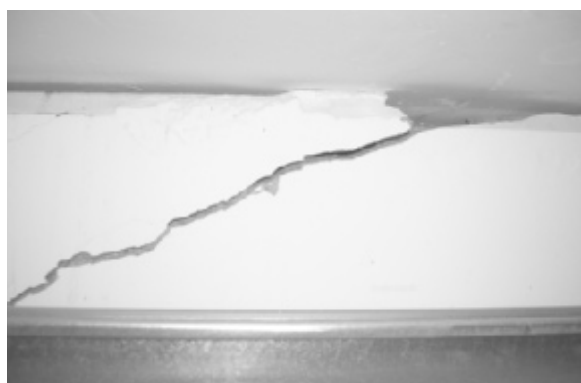
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 3 - Attività Produttiva, Zona Industriale L'Aquila.



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)

Figura 4 - Ex Scuola Elementare L. Volpicelli, San Demetrio Ne' Vestini (AQ).

mostra un elevato grado di danneggiamento diffuso su tutti i pannelli murari, con prevalenza di fessure diagonali passanti. Le aperture, per lo più ad arco, presentano lesione verticale in chiave (Figura 4.b), presumibilmente da imputare all'intervento di una forte componente verticale dell'azione sismica. Alla quota del sottotetto buona parte delle pareti, che proseguono fino alla copertura mantenendo lo stesso spessore, sono crollate sfondando il solaio sottostante, (Figura 4.c e Figura 4.d).

Il secondo edificio (Figura 4.e) ha pianta quadrata con superficie media di piano ( $100 \div 130$ ) m<sup>2</sup>, a due piani di altezza media compresa tra 3.50 m e 5.00 m, senza piano interrato, struttura analoga a quella dell'edificio precedente ed analogo grado di danneggiamento, con fessure diagonali passanti che si staccano dagli angoli delle aperture verso gli spigoli adiacenti, (Figura 4.f).

#### **Castelnuovo, Frazione di San Pio delle Camere (AQ) - Edifici in muratura.**

Anticamente noto con il nome di Castronuovo, il borgo fortificato di Castelnuovo (Figura 5) nasce nel XII sec., per ragioni difensive, a collegamento dei castelli di Camponesco, Bargionello, San Pio delle Camere, San Nicandro, Tussi ed il più lontano Castel del Monte. Quello del borgo fortificato è un fenomeno tipico del territorio de L'Aquila, che risentiva della grande vicinanza di Roma, in controtendenza con la concomitante evoluzione urbanistica del resto dell'Abruzzo, in cui si assisteva allo spostamento della popolazione dall'entroterra montano alla fascia collinare costiera. Su di una cartina risalente al 1752, il nucleo originale di Castelnuovo appare ubicato sulla cima di uno dei colli della Piana di Navelli, a



Figura 5 - Vista aerea del borgo fortificato di Castelnuovo.

conferma del fatto che successivo è l'ampliamento urbano, sviluppatosi seguendo le curve di livello del terreno, sul fronte Sud della collina.

Per comprendere, almeno in parte, cosa qui è andato perso con il terremoto del 06/04/2009 è indispensabile premettere una descrizione di Castelnuovo, così come si può dedurre fosse, alla luce delle poche notizie reperite [6] e delle ispezioni effettuate.

Il borgo fortificato è raggiungibile attraverso un percorso situato sul versante Nord-Ovest, che si inerpica con una serie di tornanti fino in sommità. La planimetria (Figura 6), di configurazione rettangolare ed impianto ortogonale a decumano e cardo, ha superficie (70.0 x 56.0) m, suddivisa in quattro isolati di dimensioni simili, con modulo (27.0 x 32.0) m, delimitata dalle case mura.

A queste si affianca, sul fronte Ovest, la Chiesa di Santo Stefano e San Silvestro, ad una sola navata, quasi completamente distrutta dal terremoto del 06/04/2009, secondo un modello che si reitera in maniera sistematica. Fu infatti eretta dopo il terremoto del 1915, in sostituzione della Chiesa di San

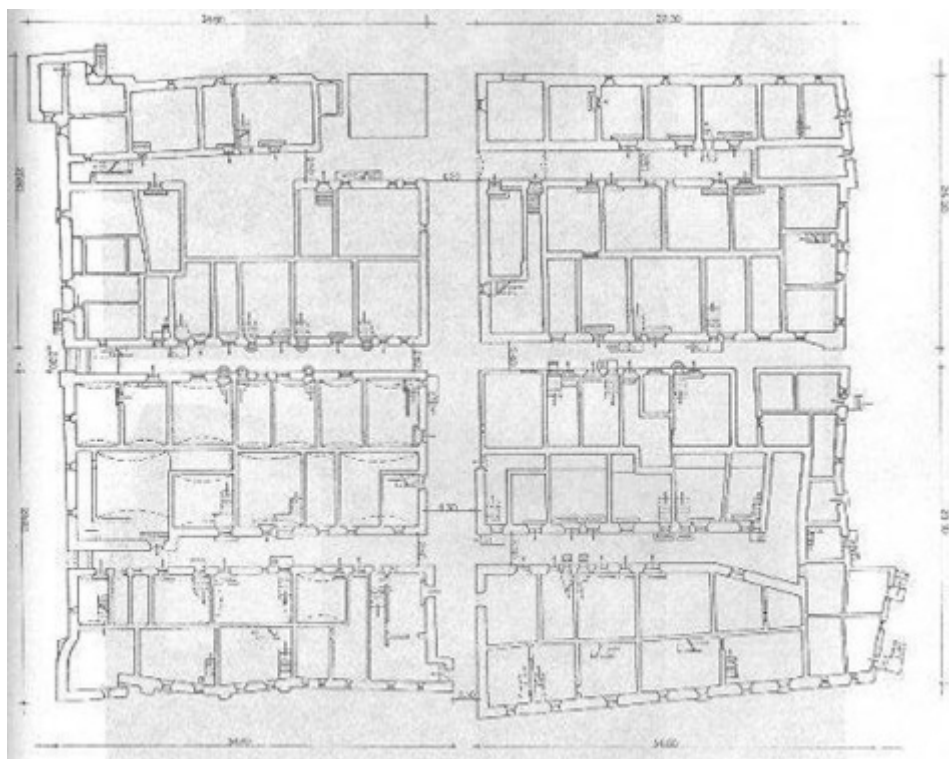


Figura 6 - Planimetria del borgo fortificato di Castelnuovo.

Giovanni Battista, a sua volta costruita sulle rovine dell'omonima Chiesa, abbattuta dal terremoto del 1703. Uno scritto a firma del Parroco del tempo, Enrico Cipolloni, testimonia la sorprendente analogia tra i danni prodotti dal terremoto del 1915 e quelli prodotti dal terremoto del 2009.

La via cardinale (decumano massimo), di lunghezza 68.0 m, interseca l'agglomerato da Sud-Ovest a Nord-Est, con una larghezza di 3.50 m. Superato l'ingresso a Sud-Ovest, sulla sinistra si scorgeva un arco di matrice gotica, che fungeva da ingresso al camminamento per la guardia. Proseguendo, si incrocia una via senza sbocco di minore larghezza (2.50 m) e poi il cardo massimo, terminante nei pressi della già citata Chiesa di Santo Stefano e San Silvestro, oltrepassato il quale lo schema si ripete nella porzione di insediamento opposta.

Nel lato Nord-Ovest, il collegamento tra interno ed esterno del borgo fortificato avviene per mezzo di una scalinata di insolita ampiezza ed alzata, dovuta alla differenza di quota altimetrica rispetto al piano calpestabile adiacente. In questo tratto del cardo massimo è possibile vedere i caratteristici gradoni di accesso alle abitazioni, a semicerchio, in pietra, alcuni in blocco unico, altri in blocchi composti, in numero di tre sovrapposti, con diametro decrescente dal basso (1.80 m ÷ 2.00 m) verso l'alto. Lungo il camminamento per la guardia permanevano delle piccole aperture allineate, di forma rettangolare (0.35 x 0.55) m, per consentire l'affaccio. La prerogativa difensiva è più evidente sul lato Sud-Est provvisto, nei sotterranei, di carceri interrate. Piccole celle, unite a cameroni con sedili in pietra, accessibili con scale piuttosto tortuose.

Alcune testimonianze orali, insieme alle informazioni derivate da scavi compiuti nell'ultimo decennio per opere di urbanizzazione, hanno dato per indubbia la presenza di un fossato intorno alle case mura, che dovrebbe essere stato ricoperto definitivamente negli ultimi anni del 1800. Si può escludere che sia mai stato riempito d'acqua, per l'assenza di un approvvigionamento idrico sufficiente a soddisfare tale necessità.

A seguito del terremoto del 06/04/2009 la maggior parte degli edifici del borgo fortificato sono, se non del tutto distrutti, gravemente danneggiati nelle strutture verticali e nelle strutture orizzontali, di frequente rappresentate da volte in foglio, (Figura 7 e Figura 8).



Figura 7 - Vista aerea di Castelnuovo dopo il terremoto del 06/04/2009.



(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 8 - Immagini di Castelnuovo dopo il terremoto del 06/04/2009.

Un ruolo decisivo è stato svolto dalla cattiva qualità della muratura, realizzata per lo più in pietra a tessitura irregolare, murato con legante mediocre, spesso a due paramenti mal collegati, in assenza di ricorsi, listature e diatoni. Si sono osservati crolli totali o parziali degli edifici, in alcuni casi estesi a porzioni del paramento esterno, mentre raramente sono state rilevate lesioni tipiche sui pannelli murari o attivazione di meccanismi locali di collasso, anche in presenza di interventi di consolidamento, quali inserimento di catene metalliche, che infatti risultano inefficaci quando le caratteristiche meccaniche della muratura sono inadeguate.

Un aspetto che ha di certo influito sull'esito disastroso dell'evento sismico in oggetto a Castelnuovo è la peculiare morfologia del territorio, documentata da studi geologici commissionati dal Comune di San Pio delle Camere. La parte alta del colle è occupata, per uno spessore dell'ordine della decina di metri, da strati di ghiaia sub\_orizzontali (Formazione di Vall'Orsa), che appoggiano su limi calcarei bianchi, noti in Letteratura con il termine di Formazione di San Nicandro: depositi lacustri a grana fine, ad alto contenuto di  $\text{CaCO}_3$ , stratificati e laminati, dotati di coesione debole ed elevata porosità. Inoltre, al di sotto dell'insediamento, sussiste un sistema di cavità ipogee, molto ramificate, per la facile asportabilità dei limi calcarei nei quali sono state scavate, a volte bonificate dai singoli proprietari con materiale rimaneggiato. È possibile ipotizzare un triplice esito: amplificazione dovuta alla tipologia di terreno e all'effetto topografico, cedimento (constatato in\_situ) delle calotte delle cavità ipogee, favorito dal loro progressivo assottigliamento a causa dell'infiltrazione di acqua.

#### 4. VALUTAZIONI SULL'EVENTO SISMICO DEL 06/04/2009

La sequenza sismica che ha investito la Provincia de L'Aquila ha avuto inizio a Dicembre 2008. La scossa principale è stata registrata alle ore 03:32 del 06/04/2009 (epicentro alle coordinate geografiche Lat. 42.33 N e Long. 13.33 E), con Intensità VIII – IX MCS e Magnitudo Momento  $M_w$  6.3. A questa hanno fatto seguito, alla data del 18/05/2009, una serie di circa 20000 repliche, di cui 30 con  $M_w$  compresa tra 3.5 e 5.0 (Figura 9).

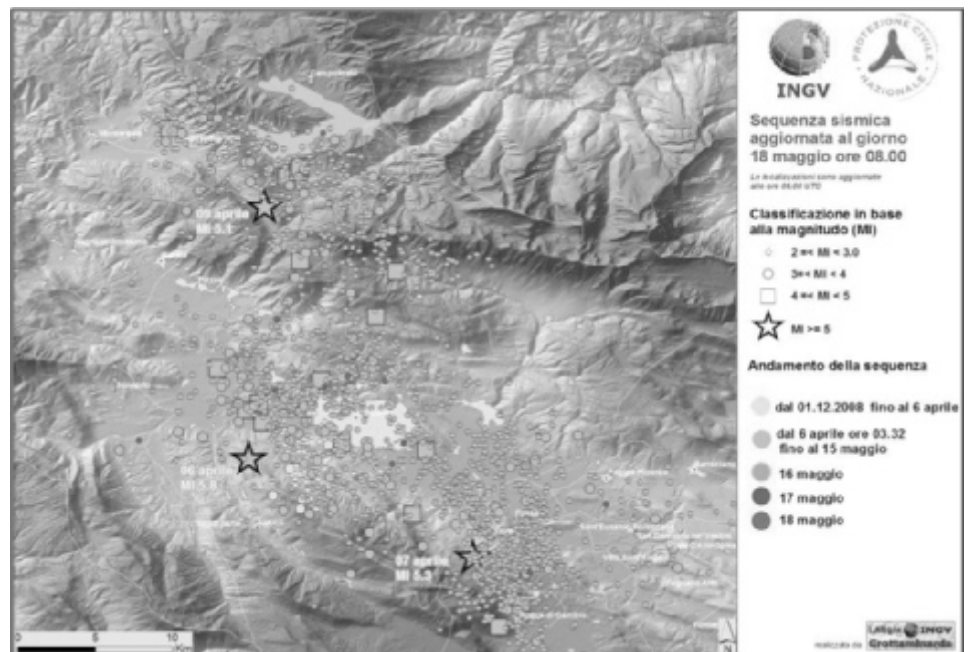


Figura 9 - Sequenza sismica aggiornata alla data del 18/05/2009.

La distribuzione in pianta delle scosse, avvenute per lo più nella crosta superiore, entro (10 ±12) km, permette di circoscrivere la zona di attinenza, che si estende per oltre 30 km in direzione NO – SE, parallelamente all’asse della catena appenninica. I dati raccolti dall’INGV [7] concordano nell’identificare la struttura responsabile della sequenza sismica come una faglia, con movimento diretto, che si sviluppa per circa 15 km in direzione NO – SE ed immersione SO, localizzata in superficie in corrispondenza della faglia di Paganica. La rottura associata all’evento sismico del 06/04/2009, più precisamente, si è propagata dal basso verso l’alto e da NO verso SE, in direzione della Valle dell’Aterno.

La Provincia de L’Aquila è già stata colpita in passato da fenomeni sismici importanti [8]. I tre maggiori terremoti, comprovati dopo il 1300, sono quelli del 09/09/1349 (Intensità IX – X MCS), del 26/11/1461 (Intensità X MCS) e del 02/02/1703 (Intensità X MCS). In Figura 10 e Figura 11 si illustra la storia sismica del territorio in oggetto. Il terremoto del 06/04/2009 presenta delle affinità con quello del 26/11/1461, come epicentro, zone interessate dai danni e rilascio di energia (Figura 12).

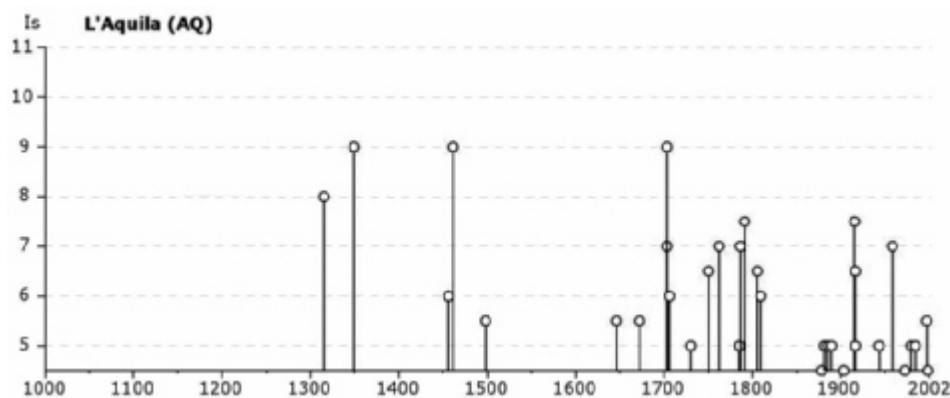


Figura 10 - Storia sismica del territorio de L’Aquila in termini di  $I_s$ .

Se valutato in termini di  $M_w$ , l’evento sismico a L’Aquila del 06/04/2009 è il terzo in Italia dal 1972<sup>2</sup>, essendo inferiore solo a quello dell’Irpinia delle ore 20:34 del 23/11/1980 (epicentro alle coordinate geografiche Lat. 40.76 N e Long. 15.31 E) di  $M_w$  pari a 6.9 ed a quello del Friuli delle ore 22:00 del 06/05/1976 (epicentro alle coordinate geografiche Lat. 46.35 N e Long. 13.26 E) di  $M_w$  pari a 6.4. Il terremoto dell’Umbria\_Marche del 26/09/1997 ha sprigionato un’energia minore; i due eventi sismici delle ore 02:33 e 11:40, hanno avuto una  $M_w$  pari a 5.7 il primo e 6.0 il secondo (epicentro alle coordinate geografiche Lat. 43.02 N e Long. 12.89 E il primo e Lat. 43.01 N e Long. 12.85 E il secondo). Infine, il terremoto del Molise del 31/10/2002, ore 12:32, ha avuto una  $M_w$  pari a 5.7 (epicentro alle coordinate geografiche Lat. 41.72 N e Long. 14.89 E).

Tutti i dati sopra citati ed impiegati nelle successive considerazioni provengono dal Progetto INGV ITACA [9].

<sup>2</sup> Il 1972 è l’anno a cui risalgono le prime registrazioni della Rete Accelerometrica Nazionale (RAN).

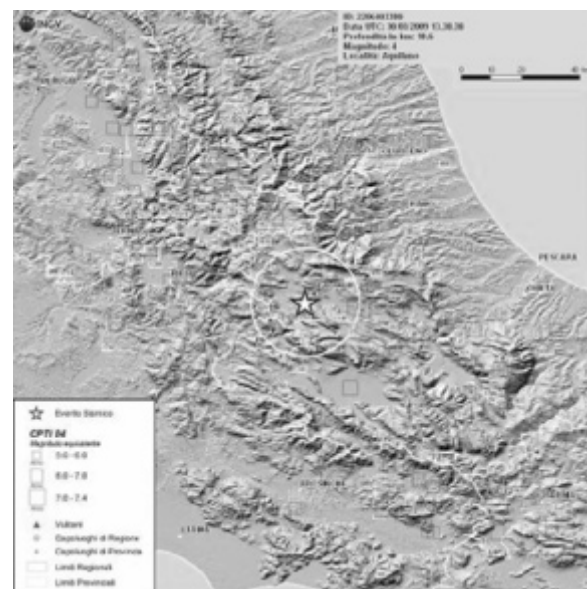


Figura 11 - Distribuzione degli eventi sismici nel territorio de L’Aquila.



Figura 12 - Terremoto del 26/11/1461 a L’Aquila.

La scossa principale delle ore 03:32 del 06/04/2009 a L’Aquila è stata registrata da 55 stazioni accelerometriche della RAN. In Figura 13 sono localizzate sul territorio le stazioni accelerometriche che distano meno di 100 km dall’epicentro ed in Tabella 1 si riporta il dettaglio del codice, delle coordinate geografiche, della distanza epicentrale, della classificazione del sito secondo EC8 [10] e dei principali parametri acquisiti, ovvero PGA e PGV massime tra le tre componenti (NS, WE, UP). Le stazioni accelerometriche sono state ordinate in dipendenza della distanza epicentrale. A seguire si forniscono i parametri più significativi (distanza epicentrale, PGA e PGV) per le registrazioni accelerometriche fondamentali dei terremoti del Molise (Tabella 2), Umbria\_Marche (Tabella 3), Irpinia (Tabella 4) e Friuli (Tabella 5).



Figura 13 - Posizione delle stazioni accelerometriche.

Tabella 1 - Terremoto Abruzzo 06/04/2009 ( $M_w = 6.3$ ).

Codice	Località	Lat N	Long E	Distanza Epicentrale [km]	EC8	PGA [cm/s <sup>2</sup> ]	PGV [cm/s]
AQG	L'Aquila - V. Aterno - Colle Grilli	42.373	13.337	4.4	B	506.86	35.54
AQA	L'Aquila - V. Aterno - F. Aterno	42.376	13.339	4.6	B	461.05	32.03
AQV	L'Aquila - V. Aterno - Centro Valle	42.377	13.344	4.9	B	646.07	42.83
AQK	Aquil PARK ing.	42.345	13.401	5.6	C	365.34	36.21
ANT	ANTRODOCO	42.418	13.079	23	A	25.98	2.47
CLN	CELANO	42.085	13.521	31.6	A	89.14	6.64
AVZ	AVEZZANO	42.027	13.426	34.9	C	67.68	11.28
CHT	CHIETI	42.37	14.148	67.0	C	29.41	7.91
CDS	CASTEL DI SANGRO	41.787	14.112	88.4	A	9.95	1.72
ASS	ASSISI	43.075	12.604	101.7	A	6.04	0.43

Tabella 2 - Terremoto Molise 31/10/2002 ( $M_w = 5.7$ ).

Codice	Distanza Epicentrale [km]	PGA [cm/s <sup>2</sup> ]	PGV [cm/s]
GLD	25.7	17.48	1.012
CMM	40.4	7.99	0.77
SSV	41.1	59.63	2.58
LSN	41.6	63.98	1.75
SCV	45.6	6.93	0.89
VSE	46.4	41.08	1.28
SNN	57.8	38.53	1.31
CHT	95.2	6.77	0.46
ORC	106.9	3.99	0.44
AVZ	126.3	6.619	0.66

Tabella 3 - Terremoto Umbria-Marche 26/09/1997 ( $M_w = 6.0$ ).

Station	Distanza Epicentrale [km]	PGA [cm/s <sup>2</sup> ]	PGV [cm/s]
CLF	2.8	338.16	24.54
NCR	13.1	465.75	21.09
ASS	24.0	152.32	5.86
MNF	24.3	24.40	1.11
CSA	24.5	98.48	6.91
BVG	24.9	51.77	6.20
MTL	26.9	48.63	2.37
CSC	35.2	29.00	1.31
SPM	35.4	47.94	1.69
FHC	39.0	64.62	2.99
GBP	40.6	34.12	3.80
LNS	51.5	25.99	1.22
RTI	66.1	25.48	2.01
AQK	86.1	6.43	0.98
BTT2	125.8	6.97	1.28



Tabella 4 - Terremoto Irpinia 23/11/1980 ( $M_w = 6.9$ ).

Station	Distanza Epicentrale [km]	PGA [ $\text{cm/s}^2$ ]	PGV [ $\text{cm/s}$ ]
CLT	18.9	173.04	35.67
BGI	21.8	185.42	36.12
ALT	23.8	57.31	4.84
BSC	28.3	95.28	21.03
STR	33.3	310.14	72.91
RNR	35.5	99.68	14.04
BRN	42.2	222.37	13.71
MRT	46.1	136.97	12.22
BVN	54.4	46.74	5.65
BNV	58.5	59.09	9.81
SGR	65.3	17.79	2.21
TRR	73.1	46.52	6.10
ARN	76.6	31.89	3.21
TDG	78.1	58.69	8.29
GSN	94.2	27.60	2.89
LRG	95.8	15.67	1.65
SSV	102.4	21.61	2.73

Tabella 5 - Terremoto Friuli 06/05/1976 ( $M_w = 6.4$ ).

Station	Distanza Epicentrale [km]	PGA [ $\text{cm/s}^2$ ]	PGV [ $\text{cm/s}$ ]
TLM1	21.7	335.64	32.60
CDR	48.4	89.76	9.44
BRC	57.2	31.79	1.16
CNG	91.1	68.11	5.73
FLT	110.1	37.18	1.96

Tra le registrazioni accelerometriche a disposizione è stato deciso di operare un confronto prendendo in esame quelle corrispondenti al valore massimo di PGA, ovvero AQV per L'Aquila, NCR per Umbria\_Marche, STR per l'Irpinia, TLM1 per il Friuli. Per ciascuna di esse si forniscono gli accelerogrammi delle tre componenti: NS, WE, UP, (Figura 14 – Figura 25).

L'AQUILA 06/04/2009

Componente NS - Stazione AQV

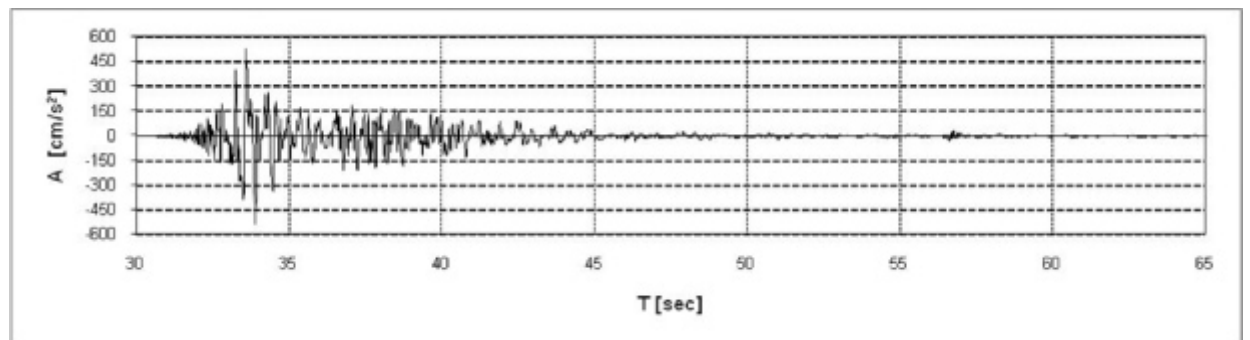


Figura 14 - Componente NS - Stazione AQV.

Componente WE - Stazione AQV

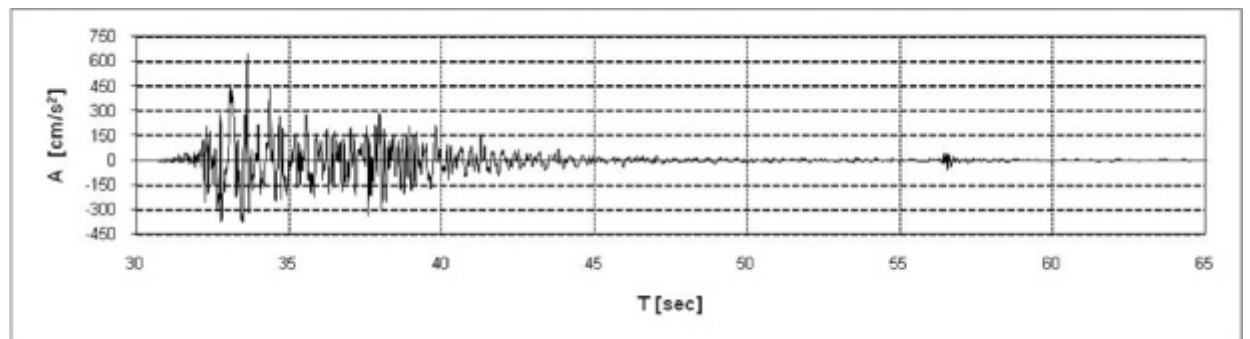


Figura 15 - Componente WE - Stazione AQV.

Componente UP - Stazione AQV

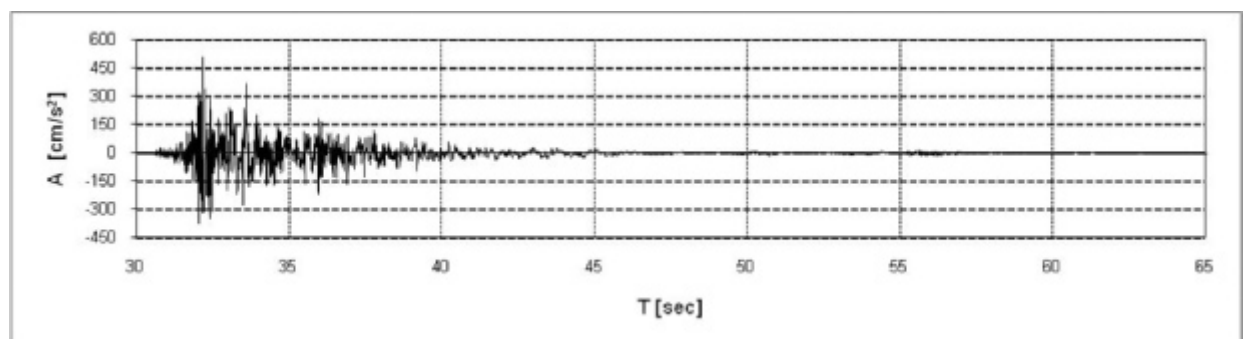


Figura 16 - Componente UP - Stazione AQV.

Componente NS - Stazione NCR

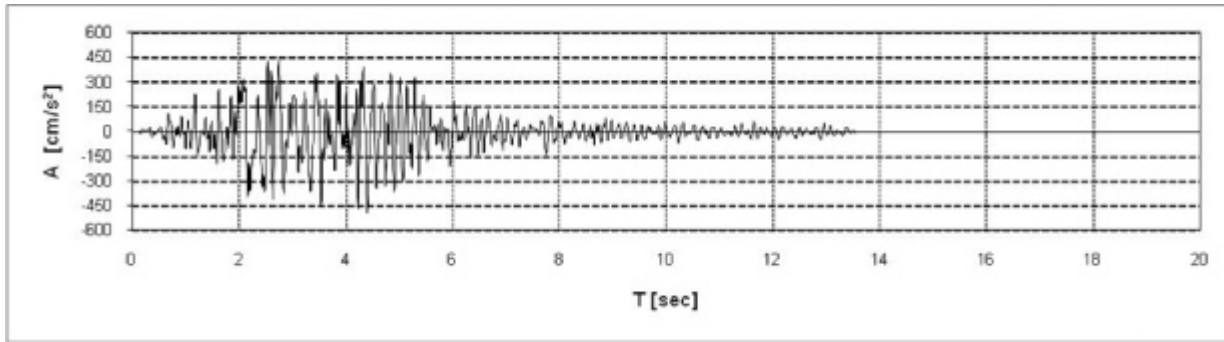


Figura 17 - Componente NS - Stazione NCR.

Componente WE - Stazione NCR

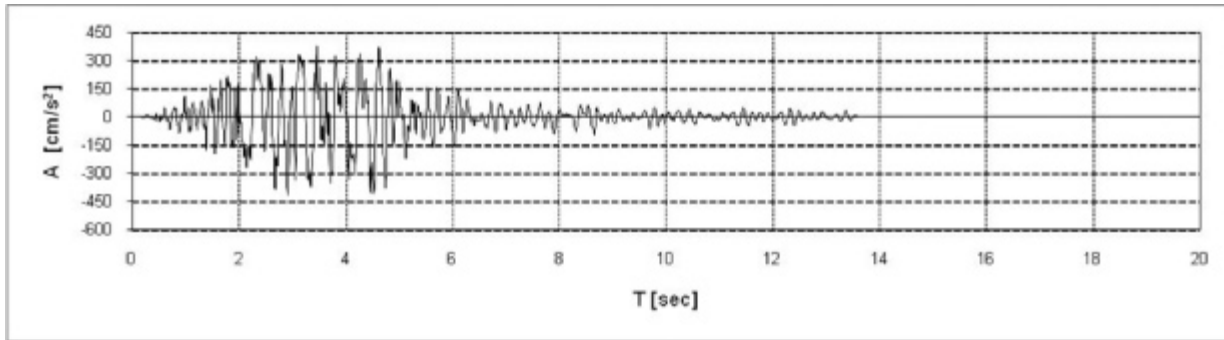


Figura 18 - Componente WE - Stazione NCR.

Componente UP - Stazione NCR

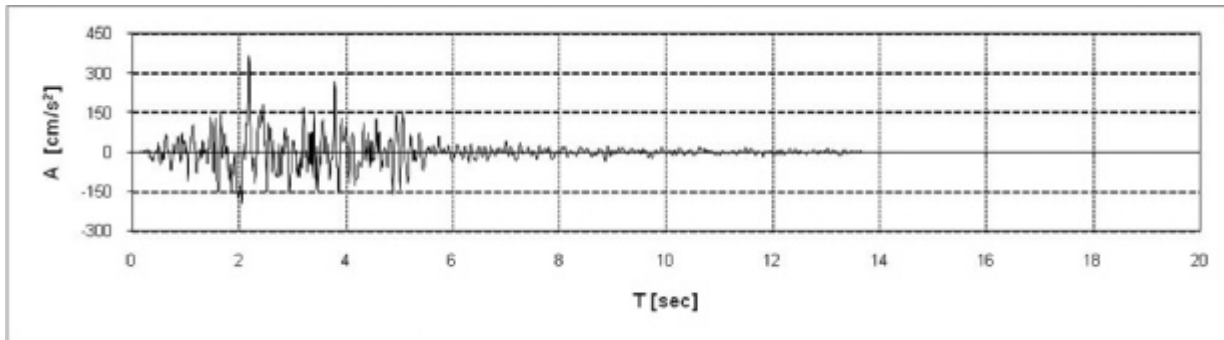


Figura 19 - Componente UP - Stazione NCR.

Componente NS - Stazione STR

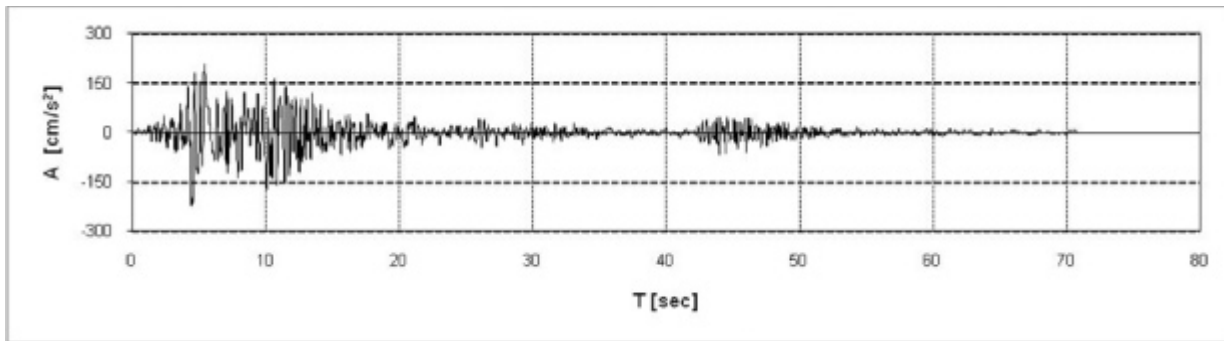


Figura 20 - Componente NS - Stazione STR.

Componente WE - Stazione STR

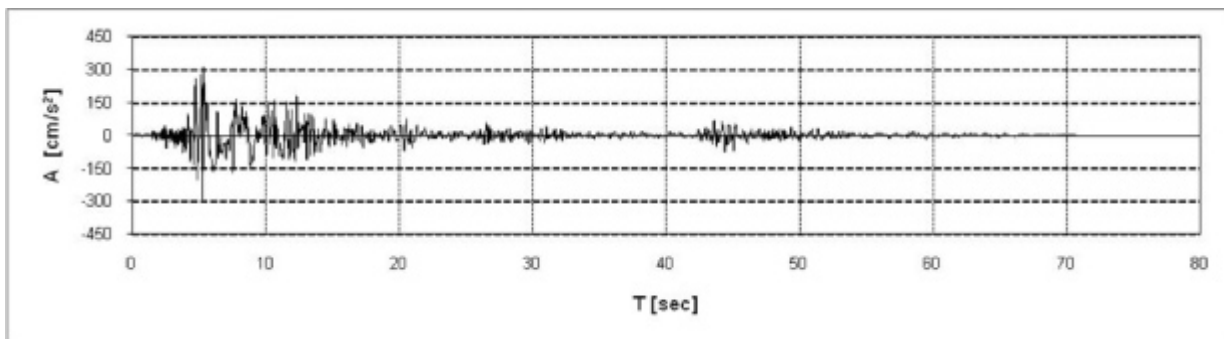


Figura 21 - Componente WE - Stazione STR.

Componente UP - Stazione STR

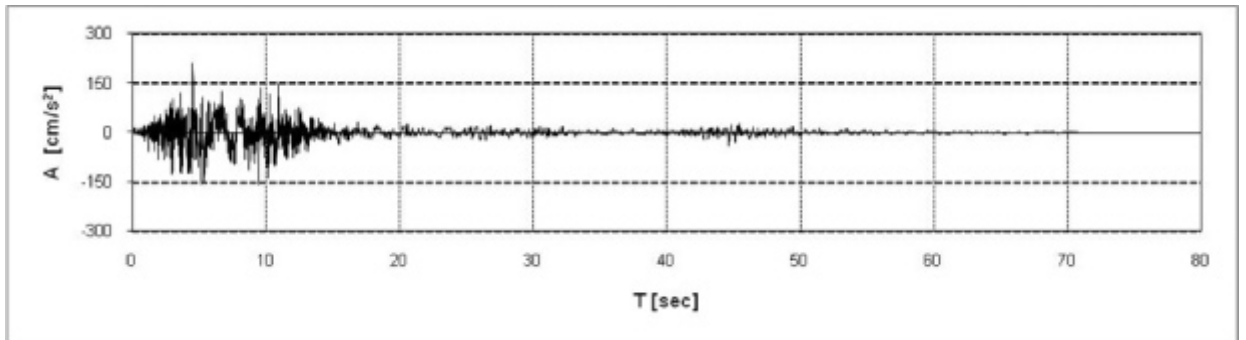


Figura 22 - Componente UP - Stazione STR.

FRIULI 06/05/1976

Componente NS - Stazione TLM1

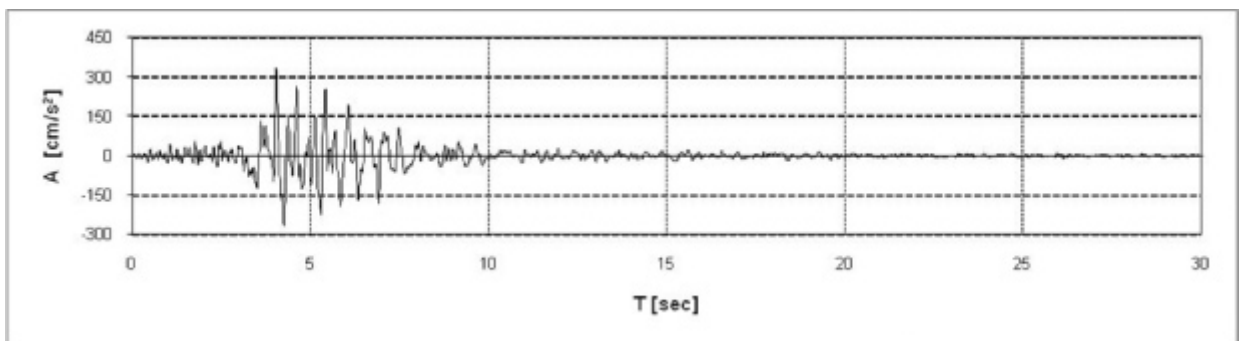


Figura 23 - Componente NS - Stazione TLM1.

Componente WE - Stazione TLM1

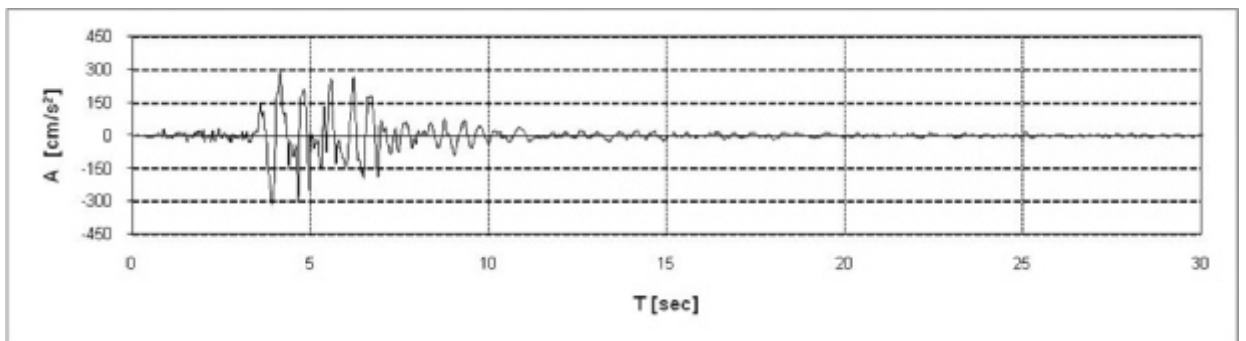


Figura 24 - Componente WE - Stazione TLM1.

Componente UP - Stazione TLM1

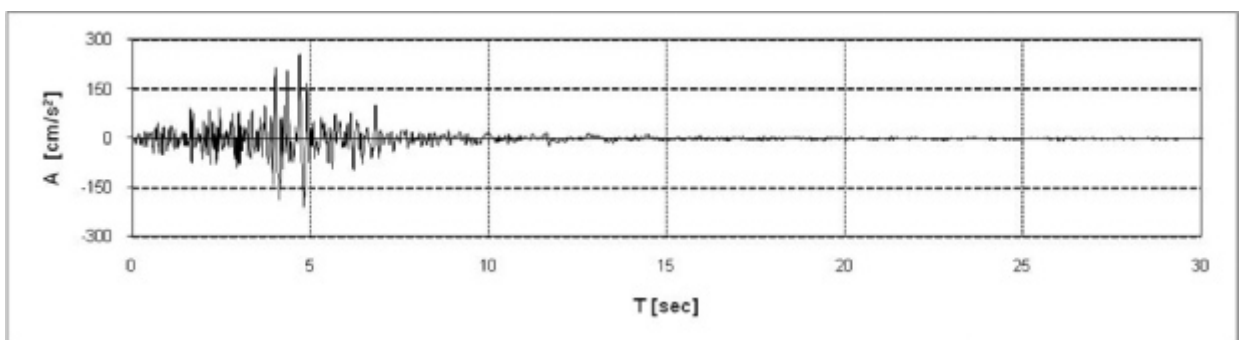


Figura 25 - Componente UP - Stazione TLM1.

Per il terremoto del Molise i dati sono poco sintomatici e si è dunque ritenuto di poterli trascurare. Per ciascun accelerogramma è stato determinato il rispettivo spettro di risposta, calcolato con uno smorzamento al 5.0%. Con x si indica la componente NS (Figura 26), con y la componente WE (Figura 27), con z la componente UP (Figura 28).

Per completezza lo spettro di risposta della registrazione accelerometrica AQV de L'Aquila è stato messo a confronto con gli spettri di Normativa [3] massimi e minimi per un  $T_R$  di 2475 anni (Figura 29 e Figura 30) ed un  $T_R$  di 475 anni (Figura 31 e Figura 32).

Nel primo caso il massimo si ha per terreno C ed il minimo per terreno D. Nel secondo caso il massimo si ha per terreno D ed il minimo per terreno A. In particolare gli spettri di Normativa sono stati calcolati assumendo le coordinate geografiche dell'epicentro dell'evento sismico del 06/04/2009, per uno smorzamento al 5.0%, in assenza di amplificazione topografica ( $S_T = 1.0$ ). Il  $T_R$  di 2475 anni corrisponde allo SLC per una struttura con  $V_N$  di 100 anni (opere di importanza strategica) e  $C_U$  pari a 2.0 (Classe d'Uso IV, costruzioni con funzioni pubbliche o strategiche importanti, anche con riferimento alla gestione della protezione civile in caso di calamità), ovvero una struttura con  $V_R$  di 200 anni, ad esempio un ospedale. Il  $T_R$  di 475 anni corrisponde allo SLV per una struttura con  $V_N$  di 50 anni (opere ordinarie) e  $C_U$  pari a 1.0 (Classe d'Uso II,

$T_R$  2475

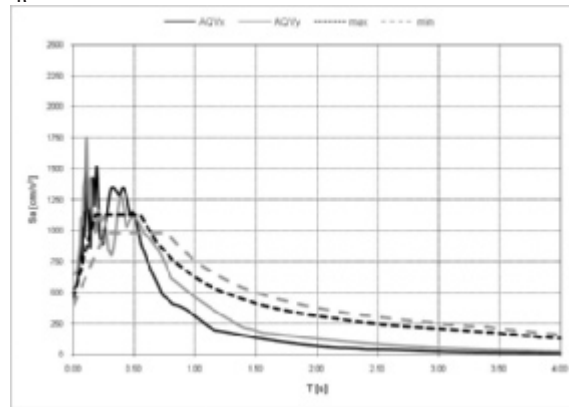


Figura 29 - Confronto NTC 2008  $T_R$  2475 componente orizzontale.

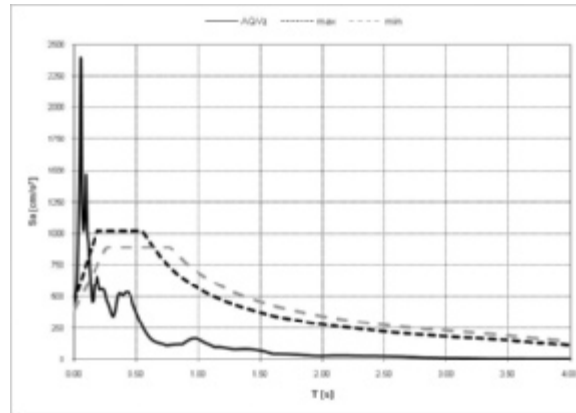


Figura 30 - Confronto NTC 2008  $T_R$  2475 componente verticale.

$T_R$  475

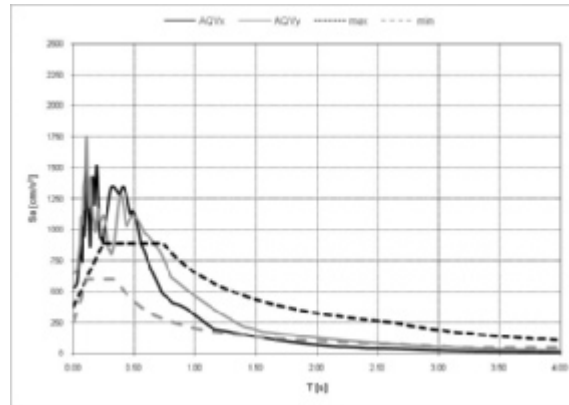


Figura 31 - Confronto NTC 2008  $T_R$  475 componente orizzontale.

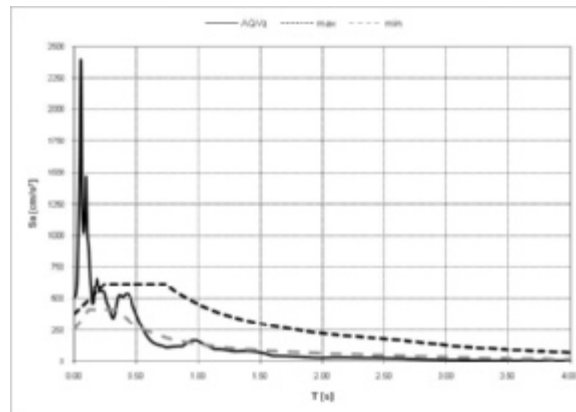


Figura 32 - Confronto NTC 2008  $T_R$  475 componente verticale.

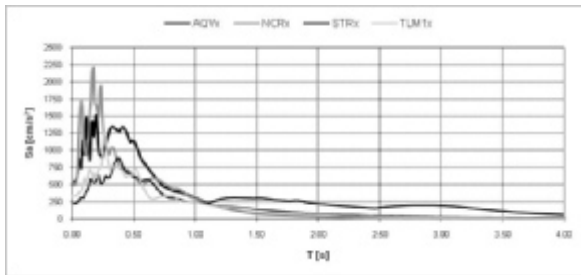


Figura 26 - Spettri di risposta componente x.

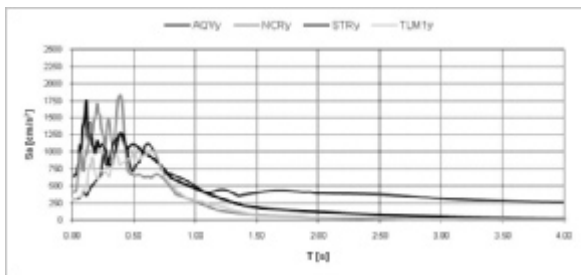


Figura 27 - Spettri di risposta componente y.

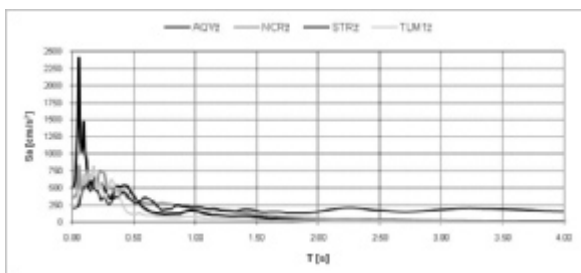


Figura 28 - Spettri di risposta componente z.

costruzioni il cui uso preveda normali affollamenti, senza contenuti pericolosi per l'ambiente e senza funzioni pubbliche o sociali essenziali), ovvero una struttura con  $V_R$  di 50 anni, ad esempio un'abitazione.

Tutte le misure, sia in termini di accelerogramma sia in termini di spettro di risposta, ci mostrano che l'unico evento sismico con cui si può operare un confronto sensato è quello dell'Umbria\_Marche, in quanto le informazioni disponibili sono maggiormente significative, come numero e distanze epicentrali.

In entrambi i casi la registrazione accelerometrica risulta avere un contributo rilevante in un intervallo di tempo di circa 10.0 s, con tracciato però differente. AQV ha valore massimo nella componente WE ( $646.07 \text{ cm/s}^2$ ), con picchi concentrati nei primi 5.0 s e ampiezze che poi si assestano intorno a  $150 \text{ cm/s}^2$ . NCR ha valore massimo nella componente NS ( $465.75 \text{ cm/s}^2$ ), con oscillazioni tra i  $150 \text{ cm/s}^2$  e  $300 \text{ cm/s}^2$  nei primi 5.0 s. Per quanto riguarda poi la componente UP, questa è di  $512.36 \text{ cm/s}^2$  per AQV, cioè dello stesso ordine di grandezza delle componenti NS e WE, mentre per NCR è pari a  $366.45 \text{ cm/s}^2$ .

Queste valutazioni sono ribadite dal confronto fatto in termini di spettri di risposta, dai quali emerge ancora di più quanto consistente sia stata la componente verticale nell'evento sismico de L'Aquila. Il valore di picco è infatti di  $1513.32 \text{ cm/s}^2$  per la componente NS,  $1744.13 \text{ cm/s}^2$  per la componente WE e  $2399.72 \text{ cm/s}^2$  per la componente UP. Per la componente NS, NCR è superiore ad AQV sotto 0.25 s, dopodiché scende bruscamente. Per la componente WE, AQV e NCR si alternano mantenendo valori paragonabili. Per la componente UP invece, i valori di picco di AQV sono quasi il doppio di quelli di NCR. Da sottolineare che i picchi di AQV si sono avuti, per tutte e tre le componenti, per periodi inferiori a 0.50 s, quindi andando ad interessare strutture rigide, ovvero, come poi constatato sul campo, strutture in muratura o strutture in c.a. a telaio, irrigidite dalla presenza di pareti in c.a.

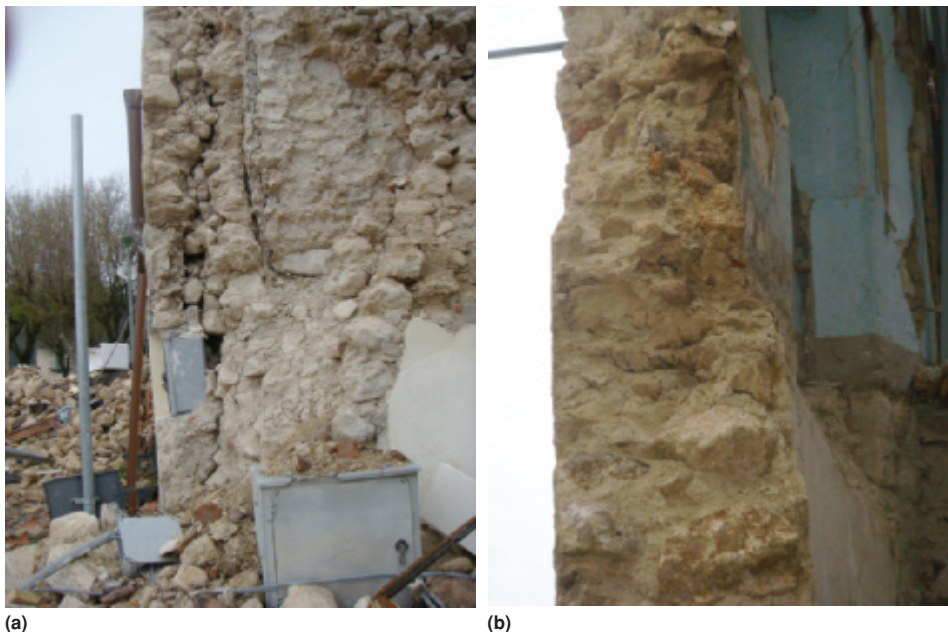


Figura 33 - Sezioni murarie.

La sovrapposizione con gli spettri delle NTC 2008 evidenzia in maniera inequivocabile che il terremoto de L'Aquila ha avuto dei picchi superiori a quelli previsti nel tratto orizzontale (tra  $T_B$  e  $T_C$ ), anche per un terremoto con  $T_R$  di 2475 anni. Nel caso delle componenti orizzontali il valore di picco di AQV è 1.55 volte superiore del valore massimo dello spettro per  $T_R$  di 2475 anni e 2.85 volte superiore del valore massimo dello spettro per  $T_R$  di 475 anni. Gli spettri delle NTC 2008 coprono ampiamente gli spettri di AQV quando si supera  $T_C$ . Per la componente UP il valore di picco di AQV è 2.35 volte superiore del valore massimo dello spettro per  $T_R$  di 2475 anni e 3.90 volte superiore del valore massimo dello spettro per  $T_R$  di 475 anni. In questo caso i valori di picco si concentrano su periodi inferiori a  $T_B$ , ovvero inferiori mediamente a 0.20 s, per poi arrivare rapidamente al di sotto degli spettri delle NTC 2008. Queste differenze non vengono compensate anche mettendo in conto l'amplificazione topografica massima prevista dalla Normativa per effetto di cresta ( $S_T = 1.40$ ).

## 5. CONCLUSIONI SULLA RISPOSTA DEL COSTRUITO

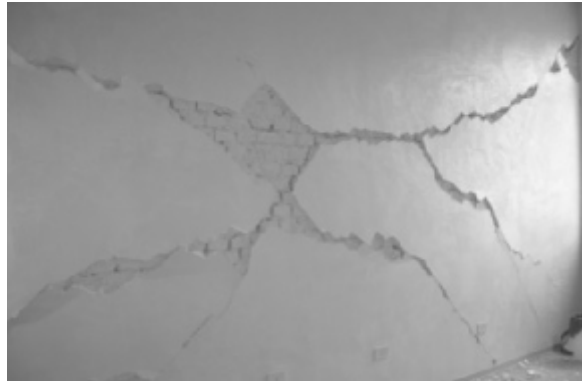
Tutto il territorio italiano è contraddistinto da tipologie edilizie diverse, con caratteri che possono essere, per quanto riguarda le costruzioni in muratura, marcatamente regionali, in termini di materiali e tecnologie adottati. Nella Provincia de L'Aquila centri storici in muratura di pietrame, più o meno estesi, convivono con ampliamenti urbani relativamente recenti in c.a., muratura di mattoni pieni o blocchi di cemento. Ad eccezione delle città più importanti, dove gli edifici in muratura sono utilizzati abitualmente ed in normali condizioni di manutenzione, in numerose piccole località, spesso arroccate, non è raro trovare vecchi agglomerati in stato di abbandono. La distribuzione spaziale di queste tipologie edilizie è molto variabile: gli edifici di nuova realizzazione possono rappresentare la semplice espansione circolare del nucleo abitato originale oppure una sua diramazione in una direzione preferenziale o ancora possono essere dislocati in una zona adiacente ma nettamente separata.

Dai sopralluoghi effettuati nell'ambito delle verifiche di agibilità è emerso in modo chiaro che l'evento sismico del 06/04/2009 ha prodotto i danni maggiori, per quantità ed entità, sugli edifici in muratura. Si ritiene che ciò debba essere ricondotto a due ordini di problemi. In primo luogo la cattiva qualità dei materiali, delle tessiture murarie ed in generale dei dettagli costruttivi. In secondo luogo l'intensità e la natura delle forze associate alla sequenza sismica.

Le murature visionate sono per lo più a sacco, quindi a doppio paramento con materiale incoerente all'interno, di spessore consistente (mediamente superiore ai 60 cm) ma senza collegamenti trasversali. I due paramenti sono in pietrame murato con legante mediocre, di solito non squadrato, di pezzatura e geometria molto irregolare, senza ricorsi o listature. Questa è la tipologia muraria rilevata a Castelnuovo



(a)



(b)

Figura 34 - Aggregato 8800216 Castelnuovo, Frazione di San Pio delle Camere (AQ).

(Figura 33), nel cui borgo fortificato si sono verificati crolli di interi edifici o di porzioni di essi, a volte coinvolgenti il singolo paramento esterno. In pochi casi si sono innescate tipiche lesioni da azioni orizzontali sui pannelli murari (Figura 34 e Figura 35.a) o attivazione di meccanismi locali di collasso. In presenza di una muratura così povera, infatti, anche gli interventi volti a favorire il funzionamento delle pareti murarie nel proprio piano o ad impedire moti rigidi fuori piano, come l'inserimento di catene metalliche, risultano del tutto influenti, (Figura 36). Non a caso sono rimasti illesi edifici consolidati con betoncino armato, cioè con una tecnica che comporta un incremento delle caratteristiche meccaniche della muratura, (Figura 35.b).

Dall'analisi degli spettri di risposta ottenuti partendo dalle registrazioni accelerometriche del 06/04/2009 emerge che i valori di picco delle tre componenti (NS, WE, UP) sono ampiamente superiori a quelli previsti dalla attuale Normativa [3], anche per un  $T_R$  di 2475 anni, cosa che porta necessariamente ad affermare l'eccezionalità di questo evento sismico. Lo scarto è molto marcato (2.35 volte) nel caso della componente verticale. I valori di picco inoltre si concentrano per periodi sotto i 0.50 s, andando dunque ad interessare strutture con periodi propri in quel range, come appunto le costruzioni in muratura. Non ultimo è ragionevole pensare che siano entrati in gioco effetti amplificativi locali dovuti alla particolare conformazione del territorio abruzzese e alla



(a)

Figura 35 - Abitazioni a Castelnuovo.



(b)



(a)

Figura 36 - Catene metalliche.



(b)



(a)

Figura 37 - Sistema di cavità ipogee a Castelnuovo.



(b)

stratificazione geologica dei siti di costruzione (Figura 37), con effetti rovinosi in presenza di un'edilizia comunque povera. A questo proposito si noti che le NTC 2008 prevedono per effetti di cresta un'amplificazione topografica fino a 1.40.

Pur avendo avuto la possibilità di ispezionare un campione ristretto di fabbricati in c.a., si può di certo dire che con calcestruzzo di buona qualità ed una corretta progettazione, anche solo per carichi verticali, queste strutture hanno risposto in maniera soddisfacente, riportando danni a volte gravi agli elementi non strutturali (tamponamenti esterni, tramezzature interne, controsoffitti) ma non a quelli strutturali (Figura 38).

Infine le strutture in c.a.p. controllate hanno mostrato un buon comportamento nei confronti del sisma, risentendo per lo più della forte componente verticale che ha contrassegnato la scossa del 06/04/2009.

## 6. BIBLIOGRAFIA

- [1] <http://www.beniculturali.it/mibac/export/MiBAC/index.html>  
 [2] *Linee Guida per la Valutazione e Riduzione del Rischio Sismico del Patrimonio Culturale con Riferimento alle Norme*

- Tecniche per le Costruzioni*, Testo allegato al parere N. 66 dell'Assemblea Generale del Consiglio Superiore dei LL.PP. reso nella seduta del 21/07/2006.  
 [3] NTC 2008, *Norme Tecniche per le Costruzioni di cui al D.M. LL.PP. del 14/01/2008*.  
 [4] C.M. LL.PP. N. 617 del 02/02/2009, *Istruzioni per l'Applicazione delle NTC 2008, Norme Tecniche per le Costruzioni di cui al D.M. LL.PP. del 14/01/2008*.  
 [5] Gruppo Nazionale per la Difesa dai Terremoti (GNdT), *Manuale per la Compilazione della Scheda di 1° Livello di Rilevamento Danno, Pronto Intervento e Agibilità per Edifici Ordinari nell'Emergenza Post-Sismica (AeDES)*, Roma, 2002.  
 [6] Di Piero P., Annibaldi S., *Il Borgo Fortificato di Castelnuovo*, Edizioni Terranostra Abruzzo, L'Aquila, 1990.  
 [7] Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV), (2009). *La Sequenza Sismica de L'Aquilano – Aprile 2009*, <http://www.ingv.it>.  
 [8] Stucchi M., Camassi R., Rovida A., Locati M., Ercolani M., Meletti C., Migliavacca P., Bernardini F. e Azzaro R., (2007). *DBMI04, il Database delle Osservazioni Macrosismiche dei Terremoti Italiani Utilizzate per la Compilazione del Catalogo Parametrico CPTI04*. <http://emidius.mi.ingv.it/DBMI04/>. Quaderni di Geofisica, Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV), Vol. 49, pp. 38.  
 [9] Working Group ITACA, (2008), *Data Base of the Italian Strong Motion Data*: <http://itaca.mi.ingv.it>, Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV).  
 [10] UNI ENV 1998-1-1, *Eurocodice 8. Indicazioni progettuali per la resistenza sismica delle strutture. Parte 1-1: Regole generali - Azioni sismiche e requisiti generali per le strutture*.

Andrea VIGNOLI, nato nel 1950, si è laureato in Ingegneria Civile presso l'Università di Firenze, nel 1975. È Professore Ordinario di Scienza delle costruzioni presso la Facoltà di Ingegneria dell'Università di Firenze, Direttore del Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale dal 2004. Dal 1985 tiene i Corsi di Dinamica delle strutture e Ingegneria sismica. Si interessa di progettazione strutturale occupandosi delle tematiche della dinamica delle strutture, dell'ingegneria sismica e della sperimentazione strutturale.

Emanuele DEL MONTE, nato nel 1977 a Bibbiena, si è laureato in Ingegneria Civile con indirizzo Strutture presso l'Università degli Studi di Firenze nel 2003, attualmente è Dottorando di ricerca in Ingegneria Civile; campo di interessi orientato alla dinamica strutturale, all'ingegneria sismica e la diagnostica strutturale.

Barbara ORTOLANI, nata nel 1976 a Pieve Santo Stefano, si è laureata in Ingegneria Civile con indirizzo Strutture presso l'Università degli Studi di Firenze nel 2005, attualmente è Dottoranda di ricerca in Ingegneria Civile; campo di interessi orientato alla dinamica strutturale, all'ingegneria sismica e la diagnostica strutturale.



(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 38 - Attività Produttiva, Zona Artigianale le Pile L'Aquila.