



REGIONE MOLISE
PRESIDENTE DELLA REGIONE
COMMISSARIO DELEGATO
STRUTTURA DEL COORDINATORE ATTIVITÀ POST SISMA



Consiglio Nazionale delle Ricerche
DIPARTIMENTO ATTIVITÀ SCIENTIFICHE E
TECNOLOGICHE
UNITÀ OPERATIVA INGEGNERISTICO GEOLOGICO – L'AQUILA

***Studio per la vulnerabilità sismica degli edifici pubblici, strategici
e di culto nei Comuni colpiti dal sisma del 31 ottobre 2002***

Decreto del Commissario delegato n.29 del 6.8.03

LINEE GUIDA PER LA VALUTAZIONE DELLA
VULNERABILITA'
DEGLI
EDIFICI SCOLASTICI

Novembre 2003

Gruppo di lavoro coordinato dal CNR - DIPARTIMENTO ATTIVITA' SCIENTIFICHE E TECNOLOGICHE
UNITÀ OPERATIVA INGEGNERISTICO GEOLOGICO – L'AQUILA
OTTOBRE-NOVEMBRE 2003

Documento redatto da:

Prof. Mauro Dolce *Ordinario di Costruzioni in zona sismica
Direttore del Laboratorio Prove Materiali e Strutture
Dipartimento di Strutture, Geotecnica, Geologia applicata all'ingegneria
Università della Basilicata*

Con la collaborazione di:

Prof. Angelo Masi *Associato di Tecnica delle Costruzioni
Dipartimento di Strutture, Geotecnica, Geologia applicata all'ingegneria
Università della Basilicata*

Ing. Claudio Moroni *Dipartimento di Strutture, Geotecnica, Geologia applicata all'ingegneria
Università della Basilicata*

Ing. Antonio Martinelli *Ricercatore CNR-DAST/VOIG-L'Aquila*

Ing. Giandomenico Cifani *Ricercatore CNR-DAST/VOIG-L'Aquila*

Arch. Giovanni Cialone *Tecnologo CNR-DAST/VOIG-L'Aquila*

Ing. Alberto Lemme *Libero professionista*

LINEE GUIDA PER LA VALUTAZIONE DELLA VULNERABILITA' DEGLI EDIFICI SCOLASTICI

La definizione dei criteri e delle metodologie contenute nel presente documento derivano dall'incarico affidato dal Presidente della Regione - Commissario delegato al CNR, con Decreto n. 29 del 06 agosto 2003, concernente lo studio per la valutazione della vulnerabilità sismica degli edifici pubblici, strategici e speciale della provincia di Campobasso, interessati dal sisma del 31 ottobre 2002.

In particolare una delle attività previste dall'incarico riguarda il coordinamento dello svolgimento delle prestazioni professionali, di cui al punto A della Deliberazione n.183 del 11.02.2003, finalizzate in particolare, alla valutazione della vulnerabilità degli edifici scolastici della provincia di Campobasso, attraverso la definizione di criteri e indicazioni per il conseguimento di detta valutazione.

Come meglio specificato nel seguito, i criteri contenuti nel documento sono stati definiti con riferimento alle sopracitate finalità, ma fanno anche esplicito riferimento ad alcune indicazioni contenute nelle recenti norme per le costruzioni in zona sismica introdotte, come noto, dalla recente Ordinanza della PCM 3274 del 20 marzo 2003.

PREMESSA

L'obiettivo fondamentale delle indagini e delle analisi da svolgere è la determinazione della vulnerabilità sismica, intesa come danneggiabilità dell'edificio per effetto di un terremoto, o meglio come determinazione dell'intensità del terremoto che può verosimilmente produrre il collasso (danneggiamento molto grave o il crollo) della struttura. Con tale finalità dovranno essere svolte una serie di attività, tra cui la ricerca dei documenti progettuali, esecutivi e di collaudo, rilievi e prove, per poter definire, in maniera per quanto possibile completa e dettagliata, le caratteristiche della struttura e delle parti non strutturali che possono fornire un contributo significativo alla resistenza sismica.

Il modello adottato per la valutazione quantitativa della vulnerabilità sismica, stante la limitata disponibilità economica, può essere un modello semplificato, ossia un modello descrivibile anche con un rilievo non dettagliato, ma che permette una valutazione relativamente affidabile della "reale" resistenza sismica. Infatti nella definizione delle resistenze dei materiali non si adotta alcun coefficiente di sicurezza riduttivo, ed anzi si assumono direttamente valori medi o nominali o ancora desunti dalla letteratura, anziché valori caratteristici. Inoltre, nel caso delle strutture in c.a., si mettono in conto, direttamente o indirettamente, anche i possibili contributi positivi che gli elementi non strutturali (tamponature e tramezzature) possono offrire, contributi che, invece, non possono essere portati in conto in una valutazione della sicurezza secondo normativa. Tutto ciò al fine di ottenere, al di là delle approssimazioni e dei limiti del modello, una stima della reale resistenza sismica, o meglio di quella più probabile, delle costruzioni in esame. È opportuno chiarire e sottolineare che il valore della resistenza sismica ottenuto non corrisponde alla resistenza calcolata a norma di regolamento sismico, che risulterà in generale più bassa.

Tuttavia, stante il livello di conoscenza (v. Ordinanza PCM N. 3274, all.2, cap. 11) che si acquisirà per ciascuna opera, una verifica della resistenza sismica ai sensi della vigente normativa sismica, non prevista nell'ambito della presente attività, richiederà, in generale, solamente l'adozione di un modello di calcolo più dettagliato e, solo nel caso sia necessario migliorare il livello di conoscenza conseguito, ulteriori saggi e prove sui materiali.

Ai fini di una valutazione complessiva della vulnerabilità, si ritiene, inoltre, necessario esaminare, pur se solo in forma qualitativa, alcuni aspetti non presi in conto nel modello di calcolo semplificato, ma in grado di influenzare il comportamento sismico del singolo edificio, e formulare dei giudizi che possono modificare, almeno parzialmente, i risultati che scaturiscono dalle analisi semplificate. Si sono individuate quattro categorie di informazioni che, in vario modo, possono influenzare la vulnerabilità dell'opera e modificare la valutazione quantitativa fornita dal modello di calcolo. Tali informazioni sono relative alla qualità strutturale globale, all'adeguatezza del modello di calcolo, alla qualità delle informazioni e assunzioni fatte, alla vulnerabilità delle parti non strutturali.

Nonostante i limiti del modello di calcolo, il livello di definizione della vulnerabilità ottenibile dalle indagini e dalla procedura applicata è superiore a quello ottenuto dall'indagine del Dipartimento della Protezione Civile nel 1996, in quanto le specificità dell'opera vengono prese in considerazione in maniera diretta, grazie all'esame degli elaborati progettuali, alle accurate indagini a vista, ai saggi eseguiti, alle prove sperimentali, ad un rilievo sufficientemente esteso. La valutazione che ne scaturisce non è pertanto soggetta alle incertezze statistiche tipiche delle valutazioni di vulnerabilità di 1° e 2° livello effettuate con schede GNDT.

Si prevede comunque la valutazione con la scheda di 1° e 2° livello GNDT in quanto i risultati che si possono ottenere dal confronto con precedenti rilevazioni e, soprattutto, con quelli derivanti dalle indagini approfondite, consentono di tarare la procedura GNDT che si intende utilizzare come base per le indagini di vulnerabilità previste dalla Regione sul restante patrimonio edilizio pubblico.

Le attività previste nelle seguenti fasi di indagine hanno per oggetto i plessi scolastici, che possono essere costituiti da singoli edifici o da complessi di edifici (Esempi: Scuola elementare composta da un solo corpo; oppure Scuola superiore composta da: edificio delle aule, palestra, edificio dei laboratori, ecc.) Pertanto è necessario, nel secondo caso, individuare i singoli corpi di fabbrica del complesso scolastico, i quali devono essere considerati singolarmente come oggetti dell'indagine di vulnerabilità. In alcuni casi, la presenza di un giunto tecnico costituisce elemento di separazione tra corpi.

FASE 1

1.1 Raccolta dei dati amministrativi, tecnici e geologici relativi all'edificio

Si raccoglieranno tutti i documenti progettuali, costruttivi e di collaudo reperibili, atti a fornire notizie sulle caratteristiche della struttura. Saranno prese in esame anche le informazioni sulle parti non strutturali che possono contribuire alla resistenza sismica dell'edificio (ad esempio le tamponature e le tramezzature in muratura negli edifici in c.a.).

Sono documenti di particolare interesse: il progetto architettonico e quello strutturale (elaborati grafici, relazioni geologica e geotecnica, relazione di calcolo delle strutture), eventuali varianti in corso d'opera, computi metrici, libretti delle misure, certificati di prove sui materiali, relazione e certificato di collaudo, foto del cantiere e dei dettagli costruttivi, elaborati progettuali di ristrutturazione funzionale e architettonica, progetti di riattazione / miglioramento / adeguamento sismico e relativi documenti di esecuzione e collaudo.

In caso di impossibilità di reperimento dei documenti di cui sopra, è comunque importante stabilire la data di progettazione e quella di completamento, sulla base di testimonianze dirette. Da queste informazioni, infatti, si possono identificare le normative vigenti all'epoca e, in base all'eventuale classificazione del sito in zona sismica di I, II o III categoria all'epoca della costruzione, effettuare progettazioni simulate con riferimento sia alle normative allora vigenti che alla consuetudini progettuali e costruttive dell'epoca.

È importante sottolineare come questa fase sia di fondamentale importanza ai fini della determinazione delle caratteristiche strutturali dell'opera e possa sensibilmente ridurre i costi delle indagini successive e/o migliorare il livello di conoscenza dell'opera.

1.2 Stesura di una relazione con riferimento all'epoca della realizzazione dei singoli interventi costruttivi succedutisi nel tempo e alla disciplina vigente all'epoca della realizzazione (sismica o no)

Occorre sintetizzare le seguenti informazioni minime, tratte dai documenti e dalle testimonianze di cui al punto 1.1, specificandone la fonte.

1. Descrizione generale dell'opera;
2. individuazione degli eventuali corpi di fabbrica che compongono il complesso edilizio, costruiti anche per lotti successivi;
3. per ogni edificio (corpo di fabbrica):
 - a) descrizione della struttura (geometria generale, tipologia della struttura, materiali costituenti le strutture verticali e orizzontali);
 - b) anno o epoca di progettazione,
 - c) anno o epoca di inizio lavori,
 - d) anno o epoca di completamento lavori;
 - e) anno e tipo degli interventi successivi al completamento dell'opera, con particolare attenzione agli interventi che hanno variato la struttura, rafforzandola (riattazione, miglioramento, adeguamento sismico) o indebolendola (sopraelevazioni, riorganizzazione delle aperture nelle pareti murarie, apertura di vani nelle pareti murarie portanti, etc.).

1.3 Ricognizione visiva sull'edificio al fine di evidenziare dissesti in atto o potenziali

La ricognizione visiva dovrà riguardare sia la geometria dell'opera, sia la presenza di eventuali dissesti in atto. Molte delle informazioni saranno sintetizzate attraverso la compilazione delle schede di I e II livello GNDT e AeDES riportate nell'allegato 1.

Riguardo alla geometria dell'opera, si avrà cura di verificare le informazioni raccolte attraverso i documenti di cui al punto 1.1 o rilevare le difformità rispetto agli elaborati progettuali o ancora, nel caso di irreperibilità del progetto, identificare le caratteristiche generali dell'opera.

Riguardo ai dissesti in atto o conseguenti al terremoto, l'attenzione sarà rivolta all'eventuale presenza di quadri fessurativi determinati da:

- danni dovuti a sismi precedenti (specificare il sisma, il tipo e l'entità del danno, con riferimento alla classificazione della scheda AeDES);
- cedimenti di fondazione (specificare il tipo e l'entità del danno, con riferimento alla classificazione della scheda AeDES);
- inadeguatezza degli orizzontamenti (solai e travi) ai carichi verticali (manifestata da lesioni nelle strutture o lesioni indotte negli elementi non strutturali, deformazioni eccessive);
- inadeguatezza di pilastri e pareti ai carichi verticali (ad esempio: presenza di lesioni verticali, schiacciamenti, spancamenti nelle pareti murarie, etc.);
- degrado e difetti costruttivi (ad esempio: distacchi del copriferro, corrosione delle armature, nidi di ghiaia e lesioni da ritiro nel c.a., fuori piombo costruttivi, degrado delle malte e/o degli inerti costituenti la muratura, etc.)

PRODOTTI DELLA FASE 1

Il prodotto principale della fase 1 è una relazione che darà conto degli elementi emersi nello svolgimento delle attività 1.1, 1.2, 1.3. La relazione potrà avere, salvo diverse esigenze legate alle specificità dei singoli casi, l'indice di seguito riportato.

RELAZIONE FASE 1

Indice

1. Descrizione generale dell'opera

Sintetizza quanto appreso sia dai documenti disponibili che dai sopralluoghi effettuati, sulle caratteristiche geometriche e d'uso dell'opera e di sue singole parti.

In questo stesso capitolo occorre anche fornire l'elenco completo dei documenti reperiti e il tipo di informazioni da essi estraibili, utili ai fini delle valutazioni successive sulla vulnerabilità sismica dell'opera (ad esempio, carpenteria del c.a., tabella dei pilastri, relazione di calcolo, computo metrico, etc.)

2. Descrizione della struttura

Descrizione della geometria generale (forma in pianta, in elevazione, coperture, dimensioni, presenza di giunti di separazione, etc.), della tipologia della struttura (materiali costituenti le strutture verticali e orizzontali), con indicazione di:

a) anno o epoca di progettazione,

b) anno o epoca di inizio lavori,

c) anno o epoca di completamento lavori;

d) anno e tipo degli interventi successivi al completamento dell'opera, con particolare attenzione agli interventi che hanno variato la struttura, rafforzandola (riattazione, miglioramento, adeguamento sismico) o indebolendola (sopraelevazioni, riorganizzazione delle aperture nelle pareti murarie, apertura di vani nelle pareti murarie portanti, etc.);

Descrizione dello stato generale di conservazione e, eventualmente, del quadro fessurativo rilevato.

3. Compilazione delle schede AeDES e I e II livello GNDT

Compilazione della scheda AeDES con particolare attenzione alla descrizione dell'eventuale danno presente e della scheda GNDT sulla base delle informazioni raccolte e della ricognizione visiva, tenendo conto che alcune potranno essere meglio precisate anche a seguito delle indagini delle fasi successive.

ALLEGATO A

Copie dei documenti reperiti utili ai fini dell'indagine.

ALLEGATO B

Documentazione fotografica ordinata e con indicazione su pianta dei punti di vista delle diverse fotografie.

ALLEGATO C

Schede AeDES. Riportare sia la scheda compilata dalle squadre di rilevamento post-sisma, sia la scheda riportata in all. I ricompilata.

ALLEGATO D

Scheda di I e II livello del GNDT

FASE 2

La fase 2 è finalizzata a conseguire una conoscenza dettagliata, compatibilmente con i tempi ed i costi disponibili per l'esecuzione delle operazioni necessarie, ai fini sia delle valutazioni di vulnerabilità sismica e delle indicazioni progettuali di cui alla fase 3, sia della valutazione della sicurezza ai sensi dell'Ordinanza 3274 / 2003 e dell'eventuale progettazione esecutiva. Per conseguire il secondo obiettivo, occorre tenere presente il dettato della suddetta Ordinanza, nelle parti specifiche (cap. 11 dell'all. 2) relative agli edifici esistenti. A tale scopo, si riportano di seguito alcuni stralci del cap. 11 dell'allegato 2 all'Ordinanza 3274 / 2003, concernenti i livelli di conoscenza da conseguire per le verifiche di sicurezza e i progetti di intervento sugli edifici esistenti.

11.1 Generalità

Gli edifici esistenti si distinguono da quelli di nuova progettazione per gli aspetti seguenti:

- *Il progetto riflette lo stato delle conoscenze al tempo della loro costruzione.*
- *Il progetto può contenere difetti di impostazione concettuale e di realizzazione non immediatamente visibili.*

Tali edifici possono essere stati soggetti a terremoti passati o di altre azioni accidentali i cui effetti non sono manifesti.

Di conseguenza la valutazione della sicurezza ed il progetto degli interventi sono normalmente affetti da un grado di incertezza diverso da quello degli edifici di nuova progettazione. Ciò comporta l'impiego di coefficienti di sicurezza parziali adeguatamente modificati, come pure metodi di analisi e di verifica appropriati alla completezza e all'affidabilità dell'informazione disponibile.

.....

11.2.3.3 Livelli di conoscenza

Ai fini della scelta del tipo di analisi e dei valori dei coefficienti parziali di sicurezza vengono definiti i tre livelli di conoscenza seguenti:

- *LC1: Conoscenza Limitata;*
- *LC2: Conoscenza Adeguata;*
- *LC3: Conoscenza Accurata.*

Gli aspetti che definiscono i livelli di conoscenza sono: geometria, le caratteristiche geometriche degli elementi strutturali, dettagli strutturali, quantità e disposizione delle armature (c.a.), collegamenti (acciaio), collegamenti tra elementi strutturali diversi, consistenza degli elementi non strutturali collaboranti, materiali, proprietà meccaniche dei materiali.

Il livello di conoscenza acquisito determina il metodo di analisi, i valori caratteristici da adottare per le proprietà dei materiali e i valori dei coefficienti parziali di sicurezza. Le procedure per ottenere i dati richiesti sulla base dei disegni di progetto e/o di prove in-situ sono descritte nel seguito per gli edifici in c.a. e acciaio e nel punto 11.5 per gli edifici in muratura.

La relazione tra livelli di conoscenza, metodi di analisi e coefficienti parziali di sicurezza è illustrata nella tabella seguente. La definizione dei termini "visivo", "completo", "limitato", "estensivo", "esaustivo", "aumentato" e "diminuito" contenuti nella tabella è fornita nel seguito.

Tabella 11.1 – Livelli di conoscenza in funzione dell'informazione disponibile e conseguenti metodi di analisi ammessi e coefficienti parziali di sicurezza dei materiali

Livello di Conoscenza	Geometria (carpenterie)	Dettagli strutturali	Proprietà dei materiali	Metodi di analisi	γ_m
LC1	Da disegni di carpenteria originali con rilievo visivo a campione oppure rilievo ex-novo completo	Progetto simulato in accordo alle norme dell'epoca e limitate verifiche in-situ	Valori usuali per la pratica costruttiva dell'epoca e limitate prove in-situ	Analisi lineare statica o dinamica	Aumentati
LC2		Disegni costruttivi incompleti + limitate verifiche in situ oppure estese verifiche in-situ	Dalle specifiche originali di progetto + limitate prove in-situ oppure estese prove in-situ	Tutti	Invariati
LC3		Disegni costruttivi completi + limitate verifiche in situ oppure esaustive verifiche in-situ	Dai certificati di prova originali + limitate prove in situ oppure esaustive prove in-situ	Tutti	Diminuiti

LC1: Conoscenza limitata

Geometria: la geometria della struttura è nota o in base a un rilievo o dai disegni originali. In quest'ultimo caso un rilievo visivo a campione dovrà essere effettuato per verificare l'effettiva corrispondenza del costruito ai disegni. I dati raccolti sulle dimensioni degli elementi strutturali saranno tali da consentire la messa a punto di un modello strutturale idoneo ad un'analisi lineare.

Dettagli costruttivi: i dettagli non sono disponibili da disegni costruttivi e devono venire ricavati sulla base di un progetto simulato eseguito secondo la pratica dell'epoca della costruzione. E' richiesta una limitata verifica in-situ delle armature e dei collegamenti presenti negli elementi più importanti. I dati raccolti saranno tali da consentire verifiche locali di resistenza.

Proprietà dei materiali: non sono disponibili informazioni sulle caratteristiche meccaniche dei materiali, né da disegni da costruttivi né da certificati di prova. Si adotteranno valori usuali della pratica costruttiva dell'epoca convalidati da limitate prove in-situ sugli elementi più importanti.

La valutazione della sicurezza nel caso di conoscenza limitata verrà eseguita mediante metodi di analisi lineare statici o dinamici. I fattori parziali di sicurezza dei materiali saranno aumentati secondo le indicazioni contenute nei capitoli relativi alle diverse tipologie costruttive.

LC2: Conoscenza adeguata

Geometria: la geometria della struttura è nota o in base a un rilievo o dai disegni originali. In quest'ultimo caso un rilievo visivo a campione dovrà essere effettuato per verificare l'effettiva corrispondenza del costruito ai disegni. I dati raccolti sulle dimensioni degli elementi strutturali, insieme a quelli riguardanti i

dettagli strutturali, saranno tali da consentire la messa a punto di un modello strutturale idoneo ad un'analisi lineare o non lineare.

Dettagli costruttivi: i dettagli sono noti da un'estesa verifica in-situ oppure parzialmente noti dai disegni costruttivi originali incompleti. In quest'ultimo caso è richiesta una limitata verifica in-situ delle armature e dei collegamenti presenti negli elementi più importanti. I dati raccolti saranno tali da consentire, nel caso si esegua un'analisi lineare, verifiche locali di resistenza, oppure la messa a punto di un modello strutturale non lineare.

Proprietà dei materiali: informazioni sulle caratteristiche meccaniche dei materiali sono disponibili o in base a i disegni costruttivi o da estese verifiche in-situ. Nel primo caso dovranno anche essere eseguite limitate prove in-situ. I dati raccolti saranno tali da consentire, nel caso si esegua un'analisi lineare, verifiche locali di resistenza, oppure la messa a punto di un modello strutturale non lineare.

La valutazione della sicurezza nel caso di conoscenza adeguata verrà eseguita mediante metodi di analisi lineare o non lineare, statici o dinamici. I fattori parziali di sicurezza dei materiali sono quelli previsti dalla normativa per gli edifici di nuova costruzione.

LC3: Conoscenza accurata

Geometria: la geometria della struttura è nota o in base a un rilievo o dai disegni originali. In quest'ultimo caso un rilievo visivo a campione dovrà essere effettuato per verificare l'effettiva corrispondenza del costruito ai disegni.. I dati raccolti sulle dimensioni degli elementi strutturali, insieme a quelli riguardanti i dettagli strutturali, saranno tali da consentire la messa a punto di un modello strutturale idoneo ad un'analisi lineare o non lineare.

Dettagli costruttivi: i dettagli sono noti o da un'esauriva verifica in-situ oppure noti dai disegni costruttivi originali. In quest'ultimo caso è comunque richiesta una limitata verifica in-situ delle armature e dei collegamenti presenti negli elementi più importanti. I dati raccolti saranno tali da consentire, nel caso si esegua un'analisi lineare, verifiche locali di resistenza, oppure la messa a punto di un modello strutturale non lineare.

Proprietà dei materiali: informazioni sulle caratteristiche meccaniche dei materiali sono disponibili o in base a i disegni costruttivi o da esaurive verifiche in-situ. Nel primo caso dovranno anche essere eseguite limitate prove in-situ. I dati raccolti saranno tali da consentire, nel caso si esegua un'analisi lineare, verifiche locali di resistenza, oppure la messa a punto di un modello strutturale non lineare.

La valutazione della sicurezza nel caso di conoscenza adeguata verrà eseguita mediante metodi di analisi lineare o non lineare, statici o dinamici. I fattori parziali di sicurezza dei materiali saranno ridotti rispetto a quelli previsti dalla normativa per gli edifici di nuova costruzione secondo le indicazioni contenute nei capitoli relativi alle diverse tipologie costruttive.

Geometria (carpenterie)

Disegni originali di carpenteria: descrivono la geometria della struttura, gli elementi strutturali e le loro dimensioni, e permettono di individuare l'organismo strutturale resistente alle azioni orizzontali e verticali.

Disegni costruttivi o esecutivi: descrivono la geometria della struttura, gli elementi strutturali e le loro dimensioni, e permettono di individuare l'organismo strutturale resistente alle azioni orizzontali e verticali. In aggiunta essi contengono la descrizione della quantità, disposizione e dettagli costruttivi di tutte le armature, nonché le caratteristiche nominali dei materiali usati.

Rilievo visivo: serve a controllare la corrispondenza tra l'effettiva geometria della struttura e i disegni originali di carpenteria disponibili. Comprende il rilievo a campione della geometria di alcuni elementi. Nel caso di modifiche non documentate intervenute durante o dopo la costruzione, sarà eseguito un rilievo completo descritto al punto seguente.

Rilievo completo: serve a produrre disegni completi di carpenteria nel caso in cui quelli originali siano mancanti o si sia riscontrata una non corrispondenza tra questi ultimi e l'effettiva geometria della struttura. I disegni prodotti dovranno descrivere la geometria della struttura, gli elementi strutturali e le loro dimensioni, e permettere di individuare l'organismo strutturale resistente alle azioni orizzontali e verticali con lo stesso grado di dettaglio proprio di disegni originali.

Dettagli costruttivi

Progetto simulato: serve, in mancanza dei disegni costruttivi originali, a definire la quantità e la disposizione dell'armatura in tutti gli elementi con funzione strutturale o le caratteristiche dei collegamenti. Deve essere eseguito sulla base delle norme tecniche in vigore e della pratica costruttiva caratteristica all'epoca della costruzione.

Verifiche in-situ limitate: servono per verificare la corrispondenza tra le armature o le caratteristiche dei collegamenti effettivamente presenti e quelle riportate nei disegni costruttivi, oppure ottenute mediante il progetto simulato. Richiedono che i controlli vengano effettuati su almeno il 15% degli elementi strutturali primari per ciascun tipologia di elemento (travi, pilastri, pareti...). Sono ammessi metodi di indagine non distruttiva di documentata affidabilità.

Verifiche in-situ estese: servono quando non sono disponibili i disegni costruttivi originali come alternativa al progetto simulato seguito da verifiche limitate, oppure quando i disegni costruttivi originali sono incompleti. Richiedono che i controlli vengano effettuati su almeno il 35% degli elementi strutturali primari per ciascun tipologia di elemento (travi, pilastri, pareti...). Sono ammessi metodi di indagine non distruttiva di documentata affidabilità.

Verifiche in-situ esaustive: servono quando non sono disponibili i disegni costruttivi originali e si desidera un livello di conoscenza accurata (LC3). Richiedono che i controlli vengano effettuati su almeno il 50% degli elementi strutturali primari per ciascun tipologia di elemento (travi, pilastri, pareti...). Sono ammessi metodi di indagine non distruttiva di documentata affidabilità.

Proprietà dei materiali

Calcestruzzo: la misura delle caratteristiche meccaniche si ottiene mediante estrazione di campioni ed esecuzione di prove di compressione fino a rottura.

Acciaio: la misura delle caratteristiche meccaniche si ottiene mediante estrazione di campioni ed esecuzione di prove a trazione fino a rottura con determinazione della resistenza a snervamento e della resistenza e deformazione ultima.

Unioni di elementi in acciaio: la misura delle caratteristiche meccaniche si ottiene mediante estrazione di campioni ed esecuzione di prove a trazione fino a rottura con determinazione della resistenza a snervamento e della resistenza e deformazione ultima.

Metodi di prova non distruttivi: non possono essere impiegati in sostituzione di quelli sopra descritti.

Verifiche in-situ limitate: servono a completare le informazioni sulle proprietà dei materiali ottenute o dalle normative in vigore all'epoca della costruzione, o dalle caratteristiche nominali riportate sui disegni costruttivi, o da certificati originali di prova. Le prove richieste sono indicate nella seguente tabella 11.3.

Verifiche in-situ estese: servono per ottenere informazioni in mancanza sia dei disegni costruttivi, che dei certificati originali di prova. Le prove richieste sono indicate nella seguente tabella 11.3.

Verifiche in-situ esaustive: servono per ottenere informazioni in mancanza sia dei disegni costruttivi, che dei certificati originali di prova, e si desidera un livello di conoscenza accurata (LC3). Le prove richieste sono indicate nella seguente tabella 11.3.

Tabella 11.3a – Definizione dei livelli di rilievo e prove per edifici in c.a.

	<i>Rilievo (dei dettagli costruttivi)</i>	<i>Prove (sui materiali)</i>
	<i>Per ogni tipo di elemento "primario" (trave, pilastro...)</i>	
<i>Verifiche limitate</i>	<i>La quantità e disposizione dell'armatura è verificata per almeno il 15% degli elementi</i>	<i>1 provino di cls. per piano dell'edificio, 1 campione di armatura per piano dell'edificio</i>
<i>Verifiche estese</i>	<i>La quantità e disposizione dell'armatura è verificata per almeno il 35% degli elementi</i>	<i>2 provini di cls. per piano dell'edificio, 2 campioni di armatura per piano dell'edificio</i>
<i>Verifiche esaustive</i>	<i>La quantità e disposizione dell'armatura è verificata per almeno il 50% degli elementi</i>	<i>3 provini di cls. per piano dell'edificio, 3 campioni di armatura per piano dell'edificio</i>

Tabella 11.3b – Definizione dei livelli di rilievo e prove per edifici in acciaio

	<i>Rilievo (dei collegamenti)</i>	<i>Prove (sui materiali)</i>
	<i>Per ogni tipo di elemento "primario" (trave, pilastro...)</i>	
<i>Verifiche limitate</i>	<i>Le caratteristiche dei collegamenti sono verificate per almeno il 15% degli elementi</i>	<i>1 provino di acciaio per piano dell'edificio, 1 campione di bullone o chiodo per piano dell'edificio</i>
<i>Verifiche estese</i>	<i>Le caratteristiche dei collegamenti sono verificate per almeno il 35% degli elementi</i>	<i>2 provini di acciaio per piano dell'edificio, 2 campioni di bullone o chiodo per piano dell'edificio</i>
<i>Verifiche esaustive</i>	<i>Le caratteristiche dei collegamenti sono verificate per almeno il 50% degli elementi</i>	<i>3 provini di acciaio per piano dell'edificio, 3 campioni di bullone o chiodo per piano dell'edificio</i>

2.1 Indagine diretta sul fabbricato (saggi) per un utile confronto con le informazioni assunte e per la verifica delle condizioni post-sisma

I saggi sulla struttura e sui principali elementi non strutturali sono finalizzati a definire nel massimo dettaglio le loro caratteristiche geometriche esterne e interne, la tipologia strutturale, l'efficacia dei collegamenti, la presenza e le dimensioni di giunti di separazione strutturale, le caratteristiche di un eventuale quadro fessurativo conseguente al terremoto o ad altre azioni, etc..

Nel definire numero e tipo di saggi ci si riferirà fondamentalmente alle norme sismiche di cui all'Ordinanza del PCM 3274/03, G.U. 08.05.2003, allegato 2, cap. 11, cercando di conseguire il livello di conoscenza LC2, nel caso di reperibilità del progetto, o LC1 in assenza di alcun documento progettuale o costruttivo delle strutture.

Indicativamente si possono seguire le seguenti raccomandazioni.

Strutture in c.a.

Il numero di saggi sarà commisurato al grado di conoscenza conseguibile dal progetto e deriverà dalle seguenti considerazioni:

- a) è fondamentale una buona conoscenza della geometria dei singoli elementi strutturali e delle loro armature longitudinali e trasversali; si privilegeranno (quanto a numero di elementi indagati ed accuratezza dell'indagine) i pilastri rispetto alle travi;
- b) in caso di disponibilità degli elaborati progettuali, i saggi saranno finalizzati a verificare la rispondenza del realizzato al progetto; si catalogheranno gli elementi strutturali, particolarmente i pilastri, con caratteristiche uguali, per geometria e armatura, e si effettueranno saggi su almeno un paio di essi, scoprendo con una traccia orizzontale l'elemento strutturale (per determinarne le dimensioni effettive) e le barre d'acciaio longitudinali su due lati ortogonali. Con una traccia verticale si verificherà la presenza e il diametro delle staffe. La determinazione delle armature potrà essere agevolata dall'uso di un pacometro, ma in ogni caso occorrerà asportare il copriferro per scoprire i ferri ed effettuare una misura diretta del diametro.
- c) in caso di indisponibilità degli elaborati progettuali, occorrerà cercare di individuare la struttura, attraverso una prima ricognizione a vista e alcuni saggi sull'intonaco, anche con l'ausilio di un pacometro. Si individueranno quindi le caratteristiche di ripetitività della struttura (ad esempio telai trasversali paralleli a interasse costante), definendo così un criterio di indagine che permetterà di ridurre sensibilmente il numero di saggi volti alla determinazione delle armature; si procederà poi all'effettuazione dei saggi come specificato al precedente punto b).
- d) particolare attenzione verrà rivolta all'approfondimento delle cause dei dissesti, già presi in esame nell'attività 1.3, scoprendo la struttura in corrispondenza di fessure e lesioni ed effettuando saggi anche estesi, volti a rilevare le effettive armature presenti e lo stato di degrado (verificando che eventuali lesioni o distacchi di copriferro non siano conseguenti alla corrosione dell'acciaio).
- e) per quanto riguarda le fondazioni, particolarmente in mancanza di elaborati progettuali e nel caso di evidenza di cedimenti fondali, si consiglia di effettuare almeno un saggio in fondazione, che consenta di verificare: profondità del piano di posa, tipologia e caratteristiche geometriche della struttura di fondazione. Nei casi in cui si presuma che le caratteristiche delle strutture di fondazione non siano uniformi, va incrementato opportunamente il numero di saggi.
- f) i saggi sulle tamponature saranno volti a determinarne la geometria interna (presenza di intercapedine) e le caratteristiche dei materiali (mattoni pieni, forati, blocchetti di calcestruzzo, etc.); analoga indagine verrà svolta sulle tramezzature di spessore superiore ai 10 cm e prive di aperture; anche per gli elementi non strutturali si procederà per tipi, così da limitare il numero di saggi.
- g) si raccomanda l'esecuzione di almeno un saggio sul solaio per ogni piano, per verificarne, anche ai fini dell'analisi dei carichi, la geometria (spessore totale e della soletta, dimensioni dei travetti e delle pignatte di alleggerimento), e la presenza ed entità delle armature nei travetti e nella soletta in c.a..
- h) in caso di presenza di lesioni visibili sull'intonaco, se ne verificherà l'effettiva consistenza nella struttura in c.a., approfondendo eventualmente i saggi, per verificare le ipotesi fatte in fase 1 (attività 1.3).

Strutture in muratura

Gli elaborati progettuali sono, spesso, di difficile reperibilità. Le indagini mediante saggi saranno essenzialmente finalizzate a:

- a) definire la geometria (spessori) delle pareti portanti, individuando la presenza di tramezzature non strutturali;
- b) definire i materiali (laterizi pieni o forati, blocchetti di calcestruzzo, valutando l'entità dei vuoti del singolo blocco di laterizio o di calcestruzzo, pietra squadrata, pietra non squadrata, etc.) e la tessitura della muratura (muratura piena, muratura a due paramenti non o scarsamente ammorsati tra loro, muratura a sacco, con definizione di tipologia e spessore dei singoli paramenti e del riempimento, etc.) [v. manuale scheda AEDES per una classificazione delle murature e Scheda delle tipologie murarie]; si raccomanda di eseguire almeno due saggi a tutto spessore per ogni piano, rispettivamente su un muro longitudinale e trasversale. Se l'edificio presenta muri di diverse caratteristiche (per materiali o apparecchio murario), il numero di saggi va incrementato opportunamente;
- c) individuare la presenza e definire le caratteristiche di precedenti interventi di rafforzamento della struttura muraria (ristilatura dei giunti, iniezioni di legante, intonaco cementizio armato e non su uno o entrambi i lati, iniezioni armate di cucitura, etc.);
- d) verificare il grado di ammorsamento tra murature ortogonali;
- e) individuare la presenza di cordoli di c.a. in corrispondenza dei solai, o di catene/tiranti, di cui si verificherà l'integrità e l'efficacia (messa in forza rispetto al capochiave);
- f) verificare la presenza e definire le caratteristiche degli architravi o delle piattabande in corrispondenza di porte e finestre;
- g) verificare la tipologia e la geometria dei solai: spessore totale e di soletta, dimensioni di travetti e laterizi (anche ai fini dell'analisi dei carichi) o di travi in legno o in acciaio, presenza ed entità delle armature nei travetti e nella soletta in c.a.; si raccomanda l'esecuzione di almeno un saggio per ogni piano;
- h) per quanto riguarda le fondazioni, verificare (particolarmente in mancanza di elaborati progettuali e nel caso di evidenza di cedimenti fondali): profondità del piano di posa, tipologia, materiale e caratteristiche geometriche della struttura di fondazione. Nei casi in cui si presuma che le caratteristiche delle strutture di fondazione non siano uniformi, va incrementato opportunamente il numero di saggi.
- i) in caso di presenza di lesioni, verificarne la continuità e l'entità nella muratura.

Particolare attenzione verrà rivolta all'approfondimento delle cause di dissesto, di cui al punto 1.3, mediante saggi ad hoc, con riferimento alle voci g) ed h).

A titolo indicativo, si riporta di seguito il par. 11.5.2.2 dell'Ordinanza 3274, successivamente modificata dall'Ordinanza 3316 del PCM, relativo al rilievo dei dettagli costruttivi nelle costruzioni in muratura.

11.5.2.2 Dettagli costruttivi

I dettagli costruttivi da esaminare sono relativi ai seguenti elementi:

- a) qualità del collegamento tra pareti ortogonali
- b) qualità del collegamento tra solai e pareti ed eventuale presenza di cordoli di piano
- c) esistenza di architravi dotate di resistenza flessionale al di sopra delle aperture
- d) presenza di elementi strutturali spingenti e di eventuali elementi atti ad eliminare la spinta
- e) presenza di elementi, anche non strutturali, ad elevata vulnerabilità
- f) tipologia e qualità della muratura (a un paramento, a due o più paramenti, con o senza collegamenti trasversali), eseguita in mattoni o in pietra (regolare, irregolare)
- g) presenza e rappresentazione dell'eventuale quadro fessurativo.

2.2 Effettuazione di rilievi, prove ed indagini strutturali, geologiche e geotecniche, ritenute necessarie

I rilievi, le prove e le indagini sono finalizzati al completamento dei dati di riferimento per la messa a punto di un modello di valutazione della vulnerabilità sismica.

I rilievi saranno svolti a completamento delle attività 2.1, e consisteranno nelle misurazioni atte a definire la geometria delle parti resistenti.

Le prove saranno finalizzate a definire le caratteristiche di rigidità e resistenza dei materiali delle parti resistenti. Nel definire numero e tipo di prove ci si riferirà fondamentalmente alle norme sismiche di cui all'Ordinanza del PCM 3274/03, G.U. 08.05.2003, allegato 2, cap. 11, cercando di conseguire il livello di conoscenza assunto nella precedente attività 2.1. Oltre alle prove distruttive previste nella citata ordinanza, si raccomanda l'esecuzione di prove non distruttive finalizzate a verificare l'omogeneità delle caratteristiche meccaniche in tutta la struttura. Indicativamente si possono seguire le seguenti raccomandazioni.

Strutture in c.a.

Le prove sulla struttura saranno finalizzate a determinare, soprattutto, le caratteristiche di resistenza del calcestruzzo, come di seguito specificato. Nel caso di evidenza di cedimenti di fondazione, si effettueranno anche prove sui terreni di fondazione.

- a) Al fine di determinare la classe Rck del calcestruzzo, il numero di prelievi e di indagini non distruttive va commisurato alle informazioni acquisibili mediante la documentazione di progetto e collaudo reperita e al livello di conoscenza che si vuole conseguire, in accordo con le norme sismiche (Ordinanza 3274/2003 del PCM) e alle dimensioni dell'edificio. In ogni caso si raccomanda di eseguire non meno di:
2 prelievi di carote da sottoporre a prove a rottura di compressione in laboratorio, per ogni piano dell'edificio;
6 punti di misura combinata sclerometrica-ultrasonica (SONREB) su travi e pilastri, per ogni livello, calibrando la resistenza sulla base delle prove sulle carote estratte (ossia due punti di misura saranno in corrispondenza dei punti di prelievo delle carote, e le misure saranno effettuate prima del carotaggio stesso);
- b) In caso di incerta determinazione delle caratteristiche o dello stato di conservazione dei solai, si consiglia di eseguire una o più prove di carico, in relazione alle singole situazioni, privilegiando i solai di luce maggiore e/o quelli che presentano condizioni di degrado o di danno più evidenti.

In caso di incerta determinazione delle caratteristiche delle armature di acciaio, ottenibile in base al tipo di barra (liscia o nervata), ai documenti progettuali, esecutivi, di collaudo e/o alla normativa dell'epoca, si preleveranno almeno due campioni di armatura da sottoporre a prove di trazione.

Strutture in muratura

Si suggerisce di effettuare prove con martinetti piatti (singolo e doppio) in numero almeno pari al numero di tipologie di muratura significativamente presenti nell'edificio, preferibilmente al primo livello, per determinare lo stato tensionale e la resistenza della muratura.

Si raccomanda, inoltre, di verificare l'omogeneità di caratteristiche della malta sull'intero edificio, ad esempio attraverso prove penetrometriche e/o prove chimiche sulla malta.

In mancanza di dati affidabili relativi ad indagini precedenti, e soprattutto in presenza di evidenze di cedimenti fondali, si consiglia di effettuare almeno un sondaggio nel terreno, e comunque in numero adeguato alle dimensioni dell'edificio, con estrazione di campioni indisturbati e analisi di laboratorio e/o prove penetrometriche.

Identificazione dinamica

Accanto alle prove dette, volte a determinare le caratteristiche di resistenza dei materiali, si effettueranno anche misurazioni delle vibrazioni dell'edificio ai fini dell'identificazione del suo comportamento dinamico, ossia delle caratteristiche dinamiche fondamentali della struttura. Sarà necessario determinare con buona affidabilità i periodi dei primi tre modi di vibrare della struttura.

Le misure andranno eseguite utilizzando un numero adeguato di sensori disposti orizzontalmente, secondo due direzioni ortogonali. Il numero di sensori e la loro localizzazione sarà definito in relazione alle caratteristiche dimensionali e strutturali dell'edificio stesso. Nel caso di edifici in c.a. di forma compatta, sarà sufficiente disporre tre sensori sul piano più alto accessibile, di cui due alle estremità dell'edificio, ortogonalmente alla dimensione maggiore, il terzo in posizione possibilmente baricentrica, disposto nella direzione della dimensione maggiore.

Nel caso di edifici in c.a. con una dimensione nettamente prevalente sull'altra, sarà opportuno disporre di almeno quattro sensori, sul piano più alto accessibile, di cui due alle estremità dell'edificio ed uno in posizione intermedia, disposti ortogonalmente alla dimensione maggiore, il quarto in posizione possibilmente baricentrica, disposto parallelamente alla direzione della dimensione maggiore.

Nel caso di edifici in muratura con solai rigidi (laterocementizi o comunque dotati di soletta in c.a.) si possono adottare gli stessi criteri descritti per gli edifici in c.a.. Nel caso di edifici in muratura con solai deformabili, occorrerà disporre un numero maggiore di sensori, disposti direttamente sulle pareti portanti e parallelamente ad esse, ancora al livello più alto.

È opportuno aumentare il livello di eccitazione delle masse strutturali con azioni di tipo impulsivo, ad esempio mediante masse battenti o con il passaggio di mezzi pesanti, disponendo piccoli ostacoli lungo il percorso, così da determinare vibrazioni che dal terreno si trasmettano alla struttura. È da evitare, in ogni caso, l'uso di macchine che determinino eccitazioni a carattere periodico. In alternativa si può ovviamente utilizzare una vibrodina o altro eccitatore in grado di esplicitare un'azione di tipo armonico a frequenza variabile.

Si effettueranno più registrazioni e verranno elaborati i risultati relativi ad almeno tre registrazioni. Per ciascuna registrazione si fornirà, per ciascun modo di vibrare, il valore del periodo proprio ed i rapporti tra le ampiezze spettrali dei diversi sensori.

La relazione comprenderà un elaborato grafico che indichi l'esatta posizione degli strumenti, una descrizione della strumentazione utilizzata, i grafici delle trasformate di Fourier delle ampiezze e delle fasi, le modalità di eccitazione ausiliaria.

2.3 Ricostruzione dello schema strutturale dell'edificio per il quale non è stato possibile reperire il progetto strutturale

Sulla base dei saggi e dei rilievi svolti, nel caso di impossibilità di reperire i documenti di progetto, di esecuzione e collaudo, sarà possibile ricostruire lo schema della struttura, che verrà sempre restituito graficamente su CAD, producendo file in formato DWG. Nei disegni dovranno essere riportati tutti gli elementi necessari all'esecuzione delle valutazioni di vulnerabilità descritte in 2.5.

In particolare, per gli edifici in muratura, dovranno essere riportate le piante schematiche con, almeno, tutte le pareti murarie strutturali, portanti e/o efficaci ai fini della resistenza sismica, il loro spessore, le caratteristiche tipologiche, le altezze di interpiano e le altezze delle aperture, le caratteristiche geometriche delle parti sotto e sopra finestra, la tessitura dei solai e le caratteristiche dimensionali e tipologiche dei solai di calpestio e di copertura, la presenza di cordoli od altri elementi di collegamento (tiranti, etc.), la presenza di discontinuità nella muratura. Verrà anche prodotta almeno una sezione verticale, con indicate le quote dei solai.

Per gli edifici in c.a., dovranno essere riportate le piante schematiche di carpenteria con, almeno, tutti i pilastri nelle dimensioni reali, indicandone le armature, le dimensioni delle travi, le altezze di interpiano, lo spessore e la tipologia delle tamponature, la tessitura dei solai e le caratteristiche dimensionali e tipologiche dei solai di calpestio e di copertura. Verrà anche prodotta almeno una sezione verticale, con indicate le quote dei solai.

Per entrambe le tipologie strutturali saranno indicati in pianta gli elementi sottoposti a prove in situ, carotaggi e saggi.

2.4 Valutazione degli effetti di amplificazione locale basata su eventuali studi disponibili, misure geofisiche ad hoc, mappe geologiche, sondaggi effettuati nel passato o da effettuarsi ex-novo

Gli ultimi strati dei terreni di fondazione possono modificare in maniera sostanziale l'onda sismica che sale in superficie determinando differenti caratteristiche del moto del suolo a contatto con la struttura, sia per intensità (amplificazione), che per contenuto in frequenza (forma spettrale).

Il problema è, in generale, molto complesso, e sono necessari indagini e studi approfonditi per arrivare a definire in maniera dettagliata ed affidabile le caratteristiche e l'entità degli effetti di amplificazione locale. Contribuiscono a determinare tali effetti sia la morfologia superficiale, ad esempio attraverso effetti di cresta, sia la morfologia degli strati sotterranei, sia, spesso in maniera preponderante, la natura dei terreni di fondazione. La determinazione richiede la conoscenza della geologia di superficie e delle caratteristiche geotecniche dei terreni, conoscenza alla quale si perviene solo attraverso sondaggi, prove geotecniche e misure geofisiche. A titolo di riferimento si riporta di seguito quanto contenuto nella normativa sismica italiana, al par. 3.1 dell'allegato 2 all'ordinanza 3274, paragrafo concernente le "Categorie di suolo di fondazione".

3.1 Categorie di suolo di fondazione

Ai fini della definizione della azione sismica di progetto si definiscono le seguenti categorie di profilo stratigrafico del suolo di fondazione (le profondità si riferiscono al piano di posa delle fondazioni):

- A - *Formazioni litoidi o suoli omogenei molto rigidi* caratterizzati da valori di V_{S30} superiori a 800 m/s, comprendenti eventuali strati di alterazione superficiale di spessore massimo pari a 5 m.
- B - *Depositi di sabbie o ghiaie molto addensate o argille molto consistenti*, con spessori di diverse decine di metri, caratterizzati da un graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di V_{S30} compresi tra 360 m/s e 800 m/s (ovvero resistenza penetrometrica $N_{SPT} > 50$, o coesione non drenata $c_u > 250$ kPa).
- C - *Depositi di sabbie e ghiaie mediamente addensate, o di argille di media consistenza*, con spessori variabili da diverse decine fino a centinaia di metri, caratterizzati da valori di V_{S30} compresi tra 180 e 360 m/s ($15 < N_{SPT} < 50$, $70 < c_u < 250$ kPa).
- D - *Depositi di terreni granulari da sciolti a poco addensati oppure coesivi da poco a mediamente consistenti*, caratterizzati da valori di $V_{S30} < 180$ m/s ($N_{SPT} < 15$, $c_u < 70$ kPa).
- E - *Profili di terreno costituiti da strati superficiali alluvionali*, con valori di V_{S30} simili a quelli dei tipi C o D e spessore compreso tra 5 e 20 m, giacenti su di un substrato di materiale più rigido con $V_{S30} > 800$ m/s.

In aggiunta a queste categorie, per le quali nel punto 3.2 vengono definite le azioni sismiche da considerare nella progettazione, se ne definiscono altre due, per le quali sono richiesti studi speciali per la definizione dell'azione sismica da considerare:

- S1 - Depositi costituiti da, o che includono, uno strato spesso almeno 10 m di argille/limi di bassa consistenza, con elevato indice di plasticità ($PI > 40$) e contenuto di acqua, caratterizzati da valori di $V_{S30} < 100$ m/s ($10 < c_u < 20$ kPa)
- S2 - Depositi di terreni soggetti a liquefazione, di argille sensitive, o qualsiasi altra categoria di terreno non classificabile nei tipi precedenti

Nelle definizioni precedenti V_{S30} è la velocità media di propagazione entro 30 m di profondità delle onde di taglio e viene calcolata con la seguente espressione:

$$V_{S30} = \frac{30}{\sum_{i=1,N} \frac{h_i}{V_i}}$$

dove h_i e V_i indicano lo spessore (in m) e la velocità delle onde di taglio (per deformazioni di taglio $\gamma < 10^{-6}$) dello strato i -esimo, per un totale di N strati presenti nei 30 m superiori.

Il sito verrà classificato sulla base del valore di V_{S30} , se disponibile, altrimenti sulla base del valore di N_{SPT} .

Come si vede, i parametri fondamentali per definire il profilo di suolo e, conseguentemente, l'amplificazione e la forma spettrale, sono costituiti dalla velocità di propagazione delle onde di taglio, o onde S, e il numero di colpi di una prova penetrometrica standard (SPT = Standard Penetration Test). Si rimanda all'apposito documento stilato dal Gruppo di Lavoro per la microzonazione (BU della Regione Molise ...) per ulteriori dettagli sulle indagini da effettuare.

Gli studi di microzonazione avviati dalla Regione dovrebbero portare in breve tempo a definire, per ogni territorio comunale della provincia di Campobasso, entità e caratteristiche degli effetti di amplificazione locale.

Dovendo procedere alla determinazione della vulnerabilità sismica e/o alla progettazione prima che tali studi siano disponibili, sarà necessario utilizzare tutte le informazioni già disponibili, derivanti da studi precedenti, non finalizzati allo studio degli effetti locali, per assegnare alle condizioni specifiche del sito in esame uno dei profili previsti dalle norme (A, B, C, D, E, S1, S2), sulla base dei parametri detti e delle eventuali correlazioni riscontrabili in letteratura.

Una volta definito il profilo di riferimento del suolo, le norme stesse permettono di assegnare un preciso coefficiente di amplificazione S ed il corrispondente spettro di risposta elastico. Di seguito si riportano i par. 3.2.2 e 3.2.3 delle norme in cui è descritta l'azione sismica.

3.2.2 Descrizione dell'azione sismica

Il modello di riferimento per la descrizione del moto sismico in un punto della superficie del suolo è costituito dallo spettro di risposta elastico di cui al punto 3.2.3.

Per applicazioni particolari, il moto del suolo può essere descritto mediante accelerogrammi, secondo quanto indicato al punto 3.2.7.

Il moto orizzontale è considerato composto da due componenti ortogonali indipendenti, caratterizzate dallo stesso spettro di risposta.

In mancanza di documentata informazione specifica, la componente verticale del moto sismico si considera rappresentata da uno spettro di risposta elastico diverso da quello delle componenti orizzontali, come specificato in 3.2.3.

3.2.3 Spettro di risposta elastico

Lo spettro di risposta elastico è costituito da una forma spettrale (spettro normalizzato), considerata indipendente dal livello di sismicità, moltiplicata per il valore della accelerazione massima ($a_g S$) del terreno che caratterizza il sito.

Lo spettro di risposta elastico della componente orizzontale è definito dalle espressioni seguenti:

$$\begin{aligned} 0 \leq T < T_B & S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \left(1 + \frac{T}{T_B} \cdot (\eta \cdot 2,5 - 1) \right) \\ T_B \leq T < T_C & S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot 2,5 \\ T_C \leq T < T_D & S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot 2,5 \cdot \left(\frac{T_C}{T} \right) \\ T_D \leq T & S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot 2,5 \cdot \left(\frac{T_C T_D}{T^2} \right) \end{aligned} \quad (3.2)$$

nelle quali:

S fattore che tiene conto del profilo stratigrafico del suolo di fondazione (vedi punto 3.1);

η fattore che tiene conto di un coefficiente di smorzamento viscoso equivalente ξ , espresso in punti percentuali, diverso da 5 ($\eta=1$ per $\xi=5$):

$$\eta = \sqrt{10/(5 + \xi)} \geq 0,55 \quad (3.3)$$

T periodo di vibrazione dell'oscillatore semplice;

T_B, T_C, T_D periodi che separano i diversi rami dello spettro, dipendenti dal profilo stratigrafico del suolo di fondazione.

I valori di T_B, T_C, T_D e S da assumere, salvo più accurate determinazioni, per le componenti orizzontali del moto e per le categorie di suolo di fondazione definite al punto 3.1, sono riportati nella Tabella 3.1.

Tabella 3.1 - Valori dei parametri nelle espressioni (3.2) dello spettro di risposta elastico delle componenti orizzontali

Categoria suolo	S	T_B	T_C	T_D
A	1,0	0,15	0,40	2,0
B, C, E	1,25	0,15	0,50	2,0
D	1,35	0,20	0,80	2,0

Ai fini di una verifica delle caratteristiche dinamiche della risposta del terreno, è utile la determinazione del periodo proprio del sottosuolo mediante la tecnica dei rapporti spettrali H/V, secondo il metodo di Nakamura. Si richiede l'effettuazione di minimo quattro misure in campo libero in aree adiacenti l'edificio. La strumentazione deve essere composta da un sensore sismometrico con frequenza propria non superiore ad 1 Hz. La conversione analogico-digitale deve essere effettuata a 24 bit. La strumentazione deve essere alloggiata in contenitori che evitino l'interferenza delle condizioni meteo-ambientali su cablaggi esterni. Ciascuna misura di rumore ambientale deve essere composta di almeno 5 misure indipendenti da 1 minuto. I segnali devono essere campionati a 125 Hz ed elaborati nell'intervallo 0.1 - 20 Hz. Deve essere prevista la possibilità di elaborazione immediata per eventualmente ripetere misure che presentassero problemi nell'acquisizione.

Nell'individuazione della frequenza fondamentale del terreno deve essere effettuato un test statistico (t-test o binomiale). Dovranno essere restituiti su supporto informatico:

- I dati originali non elaborati
- Gli spettri di Fourier delle singole componenti
- Il rapporto orizzontale verticale di Nakamura
- L'ubicazione in pianta delle misure

2.5 Valutazione della vulnerabilità, per la determinazione del livello di intensità sismica sostenibile da ciascun edificio scolastico o edificio pubblico temporaneamente adibito a scuola

La finalità dello studio è la valutazione della reale vulnerabilità sismica dell'edificio, qui intesa come stima dell'intensità del terremoto per la quale l'edificio potrebbe subire danni gravissimi e/o collassi parziali o totali. Tale finalità viene raggiunta attraverso una metodologia che utilizza, tra l'altro, un modello di calcolo semplificato per la valutazione della resistenza sismica dell'organismo strutturale. Attraverso un'analisi preliminare dei possibili meccanismi di collasso, viene individuato il meccanismo più probabile per la costruzione in esame, in relazione alle sue caratteristiche costruttive e sulla base di calcoli semplificati, dell'esperienza dei passati terremoti, dei risultati presenti nella letteratura tecnico-scientifica. Viene, quindi, messo a punto un modello capace di cogliere il meccanismo di collasso individuato ed effettuati i calcoli per la valutazione della resistenza sismica.

La metodologia di elaborazione per la stima della vulnerabilità sismica dell'opera si compone dei seguenti passi:

1. analisi dei possibili meccanismi di collasso e individuazione del o dei meccanismi di collasso più probabili;
2. messa a punto di un modello semplificato in grado di quantificare la resistenza sismica dell'opera per il o i meccanismi di collasso sopra individuati;
3. esecuzione dei calcoli per la determinazione della resistenza (vulnerabilità) sismica del modello adottato;
4. sintesi dei risultati ottenuti e valutazione del rischio;
5. analisi di ulteriori fattori che possono influenzare la vulnerabilità della singola costruzione, non considerati nel modello semplificato.

I primi quattro passi vengono trattati nei seguenti sottoparagrafi e costituiscono una procedura integrata che permette di giungere ad una valutazione numerica della vulnerabilità e del rischio, riferita al collasso della struttura. L'adozione di numerose assunzioni e di un modello semplificato, rese necessarie dalle condizioni temporali-economiche dell'indagine, limita, ovviamente, l'affidabilità del risultato ottenuto riguardo alla vulnerabilità. Con i limiti detti, tuttavia, l'applicazione della medesima procedura quantitativa di valutazione della vulnerabilità e del rischio permette di raffrontare in maniera diretta le condizioni dei diversi edifici e delle diverse scuole, con la possibilità di evidenziare situazioni assolutamente precarie, differenziandole da situazioni di maggiore tranquillità.

Il quinto passo è finalizzato a definire, almeno in termini orientativi, l'affidabilità dei risultati ottenuti con la procedura di calcolo, fornire indicazioni sulla direzione verso cui orientare ulteriori indagini e valutazioni, nonché individuare gli elementi non strutturali fortemente vulnerabili, la cui pericolosa caduta potrebbe avvenire anche per terremoti di intensità medio-bassa. Queste ultime indicazioni possono risultare particolarmente utili per adottare efficaci contromisure, facilmente attuabili con costi molto contenuti in un programma di manutenzione straordinario, per ottenere una significativa riduzione del rischio connesso. Il quinto passo viene trattato, in un apposito paragrafo, successivamente alla descrizione della procedura di valutazione quantitativa.

A Individuazione del o dei meccanismi di collasso possibili

A.1 Edifici in c.a.

Le strutture intelaiate in c.a. sono caratterizzate da un comportamento sotto sismi violenti nel quale le deformazioni in campo anelastico si concentrano alle estremità dei pilastri e delle travi, in zone dette cerniere plastiche, con un coinvolgimento eventuale del nodo, in relazione ai quantitativi di armature longitudinali degli elementi strutturali che convergono nel nodo stesso. La presenza di notevoli percentuali di armatura longitudinale e la contemporanea eventuale scarsità di armatura trasversale (staffe) può determinare la prevalenza di una rottura fragile a taglio prima o insieme alla plasticizzazione duttile a flessione. I meccanismi di rottura più favorevoli sono quelli in cui sono evitate rotture fragili dei nodi e degli elementi strutturali per taglio e che coinvolgono il maggior numero possibile di cerniere plastiche, dunque meccanismi determinati dalla plasticizzazione delle travi a tutti i piani e dei pilastri al solo piano terra (travi deboli – colonne forti). La realizzazione di un tale meccanismo richiede, però, un'accurata progettazione che fa ricorso al principio di gerarchia delle resistenze, o "Capacity Design" [EC8], in Italia non presente in normativa sino alla recente ordinanza del PCM N. 3274 del 20.03.03. È quindi più probabile che, in un edificio esistente, si realizzi un meccanismo di collasso di piano, ossia un meccanismo che coinvolge prevalentemente i pilastri di un piano, salvo sporadiche plasticizzazioni in alcune travi e in qualche pilastro degli altri piani, provocando la formazione di cerniere plastiche alle loro estremità (travi forti – colonne deboli) [P. Park, T. Paulay, "Reinforced Concrete Structures, Wiley, 1975]. Il coinvolgimento di un numero ridotto di elementi strutturali di un unico piano alla dissipazione di energia e, in particolare, di pilastri soggetti, per la funzione che svolgono, a sforzi di compressione che ne riducono la duttilità, determina limitate duttilità e capacità dissipative d'insieme della struttura. Finalizzata alla valutazione delle capacità duttili dei pilastri, oltre che alla valutazione dei momenti resistenti, è stata la determinazione preventiva della tensione di compressione media presente nei pilastri a piano terra. Valori bassi rispetto alla resistenza a

compressione assunta, forniscono buone garanzie sul comportamento sufficientemente duttile dei pilastri, valori elevati, invece, possono indurre rotture fragili per schiacciamento e favorire un collasso anticipato della struttura.

Le strutture in c.a. esistenti, spesso progettate per soli carichi verticali sono in generale caratterizzate da bassi quantitativi di armatura longitudinale nei pilastri e nelle travi emergenti. Tutto ciò porta, salvo particolari situazioni, ad escludere un impegno elevato nei nodi, ma porta anche a supporre che il meccanismo di collasso più probabile sia quello che vede la plasticizzazione prevalente dei pilastri di un solo piano e, perciò, la formazione di un meccanismo a colonne deboli e travi forti. Il meccanismo di collasso cui si farà riferimento nella messa a punto del modello semplificato sarà perciò caratterizzato dalla formazione di cerniere plastiche ad almeno un'estremità di tutti i pilastri dei singoli piani.

Sebbene nella progettazione degli edifici nuovi il contributo positivo alla resistenza sismica della struttura di tamponature e tramezzature consistenti debba essere trascurato, a causa della scarsa controllabilità delle loro caratteristiche e delle possibili variazioni nel tempo, nella realtà tale contributo è spesso decisivo nell'impedire il collasso della costruzione o ridurre sensibilmente i danni alla struttura. Questo contributo è peraltro riconosciuto anche dalla normativa sismica italiana nelle applicazioni agli edifici esistenti. La circolare applicativa del D.M. LL.PP. 16.01.96 fornisce le formule per la valutazione del contributo delle tamponature alla resistenza della struttura.

A.2 Edifici in muratura

Le strutture murarie degli edifici sollecitate da azioni sismiche sono caratterizzate da comportamenti estremamente differenziati, dipendenti principalmente dalle caratteristiche dei collegamenti esistenti tra pareti ortogonali e tra le pareti portanti e le strutture orizzontali (solai di calpestio e coperture). Fondamentalmente, si possono individuare due importanti categorie di meccanismi di collasso. I meccanismi appartenenti alla prima categoria sono caratterizzati da rotture e ribaltamenti per azioni fuori del piano, ossia ortogonali al piano medio della parete. Quelli appartenenti alla seconda categoria sono invece caratterizzati da rotture, principalmente a taglio, per azioni nel piano della parete, ossia parallele al piano medio della parete. I meccanismi della prima categoria sono generalmente i più pericolosi e si manifestano per basse intensità sismiche, quando i collegamenti sono inadeguati e/o quando i solai sono eccessivamente deformabili nel proprio piano. Negli edifici scolastici, in generale e particolarmente in quelli in esame, tali condizioni raramente sussistono. Essi sono più spesso caratterizzati da buoni ammorsamenti tra pareti ortogonali, da buoni collegamenti tra pareti e solaio, realizzati attraverso cordoli in c.a., nonché da solai adeguatamente rigidi. Pertanto, al fine di determinare la vulnerabilità sismica degli edifici, nel seguito si prenderanno in esame unicamente i meccanismi di collasso per azioni nel piano. Resta peraltro sempre da verificare le condizioni di validità delle ipotesi assunte, altrimenti occorrerà effettuare un calcolo ad hoc, con riferimento alle regole fornite nell'Ordinanza 3274/2003, all.2 capp. 8 e 11.

Per la individuazione dei probabili meccanismi di collasso sono anche d'ausilio i dati tipologico-costruttivi ed i parametri di vulnerabilità che sono contenuti nella scheda di I e II livello GNDT (i parametri del II livello 1, 5 e 9, in primo luogo; il parametro 2 relativo alla qualità della muratura e i parametri 6,7,8 riguardanti le caratteristiche di regolarità).

B. Modello semplificato

B.1 Edifici in c.a.

In base al meccanismo di collasso definito in precedenza, il modello deve essere in grado di mettere in conto correttamente la plasticizzazione dei pilastri e di determinare il taglio complessivo da essi portato conseguente a tale plasticizzazione.

Si definisce con m_{yi} il momento resistente del pilastro i -esimo, ottenuto attraverso le usuali procedure di valutazione del dominio di resistenza di un pilastro soggetto a sollecitazione composta di presso-flessione, assumendo per il calcestruzzo la resistenza cilindrica ultima derivata dalle indagini svolte. Tale resistenza, anche tenendo conto del passaggio da valore cilindrico a valore cubico, può risultare diversa da quella riportata negli elaborati di progetto.

Definita con h_j l'altezza interpiano e con $\alpha_i \cdot h_j$ ($\alpha_i \geq 0.5$) la quota in cui si localizza il punto di flesso (momento nullo) della deformata del pilastro, il taglio resistente complessivo V_{tot} valutato alla base dei pilastri del piano in esame j -esimo sarà pari, per ciascuna delle due direzioni ortogonali considerate, a:

$$V_{tot\ pil\ j} = \sum_i \frac{m_{yi}}{\alpha_i \cdot h_j}$$

In presenza di interpiano di altezza variabile (ad es. nel caso di ultimo livello con copertura a falde e privo di solaio di sottotetto) si assumerà il valore di h_j del singolo pilastro. Una particolare considerazione richiedono i pilastri "corti", legati alla presenza di travi scala o di finestrate a nastro con tamponatura robusta. La riduzione di h_j determina un'incremento del taglio sul pilastro, che potrebbe portare alla rottura dell'elemento secondo modalità fragili.

Per α_i si possono assumere, al piano terra, i valori 0.55 e 0.8, rispettivamente nella direzione in cui è presente o assente una trave emergente, e ai piani superiori il valore 0.5 in entrambe le direzioni. In caso di configurazioni particolari, sarà necessario adottare un valore ad hoc, derivato da considerazioni sulla geometria della struttura e sul grado di vincolo che gli elementi strutturali connessi ai pilastri forniscono loro.

Il contributo delle murature non strutturali (tamponature o tramezzature) viene messo in conto solo nei casi in cui esse sono inserite in una maglia strutturale, hanno spessore effettivo (escluse camere d'aria e intonaco) maggiore di 10 cm e non hanno aperture (porte o finestre).

La resistenza può essere valutata, ad esempio, mediante le formule contenute nella circolare del Min.LL.PP. del 10.04.97 n. 65. In mancanza di dati più precisi o accertamenti specifici, per tramezzi e tamponature in laterizi forati si consiglia di assumere $f_{vk0} = 0.1$ MPa, $f_k = 1.2$ MPa.

Indicando con v_i il taglio resistente dell'elemento murario i -esimo, nella direzione in esame, il taglio resistente complessivo delle murature non strutturali al piano j -esimo vale:

$$V_{tot\ mur\ j} = \sum_i v_i$$

La resistenza complessiva, che tiene conto contemporaneamente del contributo resistente dei pilastri e delle murature non strutturali, è pari alla combinazione dei due contributi. Data la scarsa duttilità delle murature, che per prime raggiungerebbero la condizione di collasso, la somma rappresenterebbe un limite superiore della effettiva resistenza della struttura. Pertanto, al contributo delle murature non strutturali si sommerà un valore ridotto della resistenza dei pilastri, per cui il taglio resistente totale risulta pari a:

$$V_{tot} = MAX(V_{tot\ mur\ j} + \beta \cdot V_{tot\ pil\ j}, V_{tot\ pil\ j})$$

In cui β può essere assunto pari a 0.8.

Quando le tamponature risultano avere ampie finestrate a nastro ed i tramezzi sono costituiti da murature di forati in foglio, il loro contributo alla resistenza al sisma non viene messo in conto direttamente, ma attraverso un generico incremento dello smorzamento, per la dissipazione di energia che il loro danneggiamento comunque comporta, e la corrispondente riduzione dell'ordinata spettrale, come meglio specificato nel seguito. La stessa valutazione viene effettuata, a scopo di confronto, anche per gli edifici nei quali viene calcolato e portato in conto il contributo diretto delle murature non strutturali. In quest'ultimo caso il maggiore tra i valori ottenuti nelle due ipotesi verrà assunto come resistenza sismica del piano in esame.

B.2 Edifici in muratura

In base al meccanismo di collasso definito per gli edifici in muratura, il modello deve essere in grado di mettere in conto correttamente le modalità di plasticizzazione e rottura per taglio e/o flessione dei maschi murari sollecitati nel proprio piano e di determinare il taglio complessivo portato dalla struttura.

La resistenza all'azione orizzontale dei maschi murari sollecitati nel proprio piano viene valutata considerando la loro resistenza unitaria a taglio, così come formulata da Turnsek-Cacovic [V. Turnsek, F. Cacovic, "Some Experimental Results on the Strength of Brick Masonry Walls", 2nd International Brick Masonry Conference, Stock on Trent, 1970]:

$$H_i = A_i \cdot \tau_{k,i} \cdot \sqrt{1 + \frac{\sigma_{0,i}}{1.5 \cdot \tau_{k,i}}}$$

In cui H_i è la resistenza a taglio del maschio murario i -esimo, σ_{0i} è la tensione di compressione agente sullo stesso maschio murario, τ_{ki} è la sua resistenza a taglio unitaria, funzione della tipologia e qualità della muratura. Questa formula, ben collaudata sperimentalmente, esprime bene la resistenza di un maschio murario quando la rottura avviene per taglio, mentre ne fornisce una sovrastima quando il maschio murario è snello e soggetto a una tensione di compressione bassa, a causa del sopraggiungere della crisi per flessione, prima che si determini la crisi per taglio. Per tener conto di questa eventualità, si può applicare un fattore riduttivo della resistenza specifica tangenziale (τ_k), [M. Dolce, "Schematizzazione e modellazione degli edifici in muratura soggetti ad azioni sismiche". L'Industria delle Costruzioni, Dicembre 1991, Roma], funzione della snellezza e della tensione di compressione media, oppure escludere dal conteggio il contributo dei maschi murari con rapporto di snellezza superiore a 3.

La valutazione della resistenza complessiva dell'edificio richiede la determinazione delle aree di muratura resistente nelle due direzioni, escludendo naturalmente le aperture di porte e finestre, valutando per ciascun allineamento la snellezza media e la tensione media di compressione, così da determinare il fattore riduttivo da applicare alla resistenza unitaria a taglio. La resistenza complessiva in ciascuna direzione è ottenuta moltiplicando l'area di muratura per la resistenza unitaria a taglio corretta.

C. Vulnerabilità sismica

Per valutare la vulnerabilità in termini di accelerazione, occorre ancora determinare il taglio prodotto ai vari piani da un dato valore di accelerazione spettrale e confrontarlo con le resistenze di piano. A tale scopo si utilizza il metodo dell'analisi statica equivalente, che definisce i coefficienti di piano da applicare alle accelerazioni, in relazione ad una prefissata forma semplificata (lineare) del primo modo di vibrare della struttura. Definiti i coefficienti di piano e fissato un valore unitario dell'accelerazione spettrale, è immediato ottenere i tagli ai vari piani e confrontarli con i valori resistenti ottenuti ai piani corrispondenti. I diversi rapporti così ottenuti permettono di individuare il piano più debole e di definire la resistenza dell'edificio in termini di accelerazione spettrale. Questo modo di procedere può risultare inadeguato nei casi in cui un piano sia molto più deformabile degli altri, come ad esempio quando sono state eseguite sopraelevazioni in c.a. o in acciaio su di una struttura in muratura.

L'ultimo passaggio da compiere per arrivare a definire l'intensità del sisma cui la struttura può resistere senza collassare consiste nel tradurre il valore spettrale dell'accelerazione al valore dell'accelerazione massima del terreno (PGA), parametro che definisce l'intensità del terremoto.

Tenendo conto che il valore di accelerazione spettrale calcolato è un valore di tipo statico lineare, la relazione che lega S_a e PGA è la seguente:

$$S_a = \text{PGA} * \alpha_{\text{PM}} * \alpha_{\text{AD}} * \alpha_{\text{DS}} * (1/\alpha_{\text{DUT}})$$

dove:

- α_{PM} è il coefficiente di partecipazione modale da considerare nel passaggio dal calcolo statico a quello dinamico, che può essere assunto pari a 0.8 per gli edifici con più di tre piani, 0.9 per gli edifici di due piani, 1 per gli edifici ad un solo piano (escludendo dal computo dei piani i torrioni od altre sopraelevazioni di superficie inferiore a 1/3 della superficie coperta);
- α_{AD} è l'amplificazione spettrale che, per le frequenze tipiche degli edifici in esame, è dell'ordine di 2.5;
- α_{DS} è il coefficiente che tiene conto delle capacità dissipative dell'edificio. Per gli edifici in c.a. esso viene posto pari a 1 oppure a 0.8, rispettivamente nel caso in cui il contributo degli elementi non strutturali venga o non venga direttamente messo in conto nella resistenza della struttura; infatti, nel secondo caso, per tener comunque conto della dissipazione di energia che tali elementi determinano, si considera un incremento del rapporto di smorzamento equivalente dal 5 al 10% da cui scaturisce un coefficiente riduttivo delle azioni pari a 0.8. Per gli edifici in muratura esso viene sempre posto pari a 1.0.
- α_{DUT} è il cosiddetto fattore di struttura, che tiene conto della presenza di una certa duttilità strutturale. Per gli edifici in c.a. tale duttilità, seppur limitata, anche in considerazione della presenza di irregolarità di forma in pianta, permette di assumere un valore prudenziale di α_{DUT} pari a 2 (nelle strutture intelaiate di nuova progettazione tale coefficiente assume valori notevolmente superiori, compresi tra 3 e 6.75 secondo l'Ord. 3274/2003). Per gli edifici in muratura si assume un valore pari a 1.5.

In definitiva, considerando i diversi coefficienti in gioco, il valore dell'accelerazione del terreno che produce il collasso degli edifici in c.a. con 3 o più piani è assunto pari al valore dell'accelerazione spettrale S_a , oppure pari a 1.25 S_a nel caso in cui il contributo degli elementi non strutturali non venga direttamente messo in conto nella resistenza della struttura. Per edifici di uno o due piani tale valore va ancora moltiplicato, rispettivamente, per 0.8/1 o 0.8/0.9.

Per gli edifici in muratura, il valore dell'accelerazione del terreno che produce il collasso strutturale è assunto pari al valore dell'accelerazione spettrale moltiplicato per il rapporto $1.5/([0.8 \div 1] * 1.0 * 2.5) = 0.60$ (1 piano), 0.67 (2 piani), 0.75 (3 o più piani).

Nella procedura descritta è stata assunta l'ipotesi che il periodo della struttura sia abbastanza basso da ricadere al di sotto del valore T_C (compreso tra 0.4 e 0.8 s) oltre il quale si ha una riduzione dell'accelerazione spettrale (v. par. 3.2.3 dell'all. 2 dell'ord. 3274/2003). Tale ipotesi è valida per edifici di pochi piani, come quasi sempre accade per gli edifici scolastici, e comunque porta a stime in sicurezza per edifici più alti. Nel caso di edifici alti (4-8 piani, in funzione del tipo di spettro), sarà opportuno tener conto della forma effettiva dello spettro, determinata dalle caratteristiche dei terreni di fondazione, per ottenere una valutazione più accurata della vulnerabilità sismica.

E. Rischio di collasso

Una volta valutata la vulnerabilità reale della struttura, ottenuta selezionando il valore più basso nelle due direzioni orizzontali principali (direzione critica) e ai diversi piani (piano critico), espressa in termini di accelerazione massima a terra del terremoto che produce il collasso, tale accelerazione può essere espressa anche in termini di intensità della scala macrosismica Mercalli-Cancani-Sieberg, attraverso una legge di

trasformazione, quale ad esempio quella riportata in [Margottini et al., “Intensity vs. acceleration: Italian Data”, ENEA-IAEA]:

$$I_{MCS} = 1/0.179 * LOG_{10}[(PGA/g) \cdot (981/4.864)]$$

Con PGA espresso in cm/s^2 .

Utilizzando le due relazioni precedenti si ottengono i valori riportati nella tab. 1.

PGA [g]	0.05	0.07	0.10	0.15	0.20	0.25	0.30	0.40	0.50
I _{MCS}	V-VI	VI	VII	VIII	IX	IX-X	X	X-XI	XI

Tab. 1 – Corrispondenza approssimativa tra PGA e intensità macrosismica MCS secondo Margottini et al.

La stessa accelerazione a terra consente di definire il rischio di collasso, espresso attraverso il periodo di ritorno del terremoto corrispondente all'accelerazione di picco trovata, nel sito.

In relazione all'assegnazione del profilo di terreno ottenuto attraverso le indagini di microzonazione o attraverso le indagini ad hoc svolte, è stato definito il coefficiente S (v. attiv. 2.4). L'accelerazione al suolo di collasso, dovrà essere scalata con tale coefficiente, per arrivare a definire l'accelerazione di picco su roccia, parametro di riferimento degli studi di pericolosità disponibili.

Dagli studi della pericolosità sismica italiana del SSN, si possono ottenere i periodi di ritorno corrispondenti alle accelerazioni su roccia ottenute, per le due diverse relazioni di attenuazione adottate in tali studi: attenuazione media e attenuazione media più una deviazione standard, come riportato nell'allegato 2.

In sintesi, nota l'accelerazione di picco corrispondente al collasso, PGA, si determinerà l'accelerazione massima su roccia corrispondente a_g :

$$a_g = PGA / S$$

Da cui, con riferimento ai valori riportati in allegato 1, si ottiene il periodo di ritorno:

$$T = K e^{[\alpha \ln(a_g)]}$$

In cui:

α e K sono due coefficienti i cui valori sono forniti in allegato 2, per due ipotesi di curva di attenuazione, T è il periodo di ritorno cercato, a_g è l'accelerazione massima al suolo.

F. Altri elementi di giudizio della vulnerabilità e del rischio

I risultati scaturiti dalle analisi quantitative svolte nel paragrafo precedente vanno riferiti al contesto generale dell'intera indagine ed ai relativi limiti, legati alla semplificazione del modello matematico ed all'incompletezza delle informazioni sulla geometria della struttura e sulle resistenze dei materiali. È opportuno precisare, inoltre, che il modello matematico adottato non tiene conto di eventuali effetti torsionali, conseguenti ad una sfavorevole distribuzione in pianta degli elementi resistenti, e produce una valutazione della vulnerabilità al collasso strutturale d'insieme, ma non tratta la vulnerabilità delle parti non strutturali. In particolare non viene valutato il pericolo di crollo di elementi di tamponatura e tramezzatura, nonché di eventuali appendici a mensola (camini, cornicioni, etc.), spesso caratterizzate da fragilità e bassa resistenza, che possono determinare condizioni di pericolo per le persone.

A completamento delle valutazioni quantitative dette, si è ritenuto, perciò, necessario effettuare un'analisi qualitativa di alcuni aspetti che possono incidere sia sulla valutazione numerica della vulnerabilità d'insieme, sia sulla vulnerabilità delle parti non strutturali, così da fornire un quadro di giudizio più completo della vulnerabilità dell'opera. Il primo gruppo di fattori riguarda la qualità strutturale globale e la rispondenza del modello all'effettivo comportamento sismico dell'edificio, in conseguenza sia delle caratteristiche strutturali non messe in conto nel modello, sia delle necessariamente limitate indagini eseguite. Il secondo gruppo di fattori è relativo alle caratteristiche rilevabili, essenzialmente geometriche, delle parti non strutturali pericolose. Si sono, pertanto, individuate quattro categorie di informazioni che, in vario modo, possono influenzare la vulnerabilità complessiva dell'opera e modificare la valutazione quantitativa fornita dal modello di calcolo. Di seguito sono descritte le diverse categorie ed elencati i principali fattori presi in esame.

1) Fattori che influiscono sulla qualità strutturale globale

Comprendono caratteristiche della costruzione e indicatori più o meno diretti della qualità costruttiva, dello stato di conservazione ed altri elementi che possono influenzare negativamente il comportamento della costruzione, come ad esempio:

- Età di costruzione
- Stato di degrado
- Danno preesistente (quadro fessurativo)
- Destinazione d'uso originaria diversa
- Tensione nei pilastri al piano terra e al piano critico ($\sigma_{vert,max} > 0.3 f_c$, $\sigma_{vert,med} > 0.15 f_c$) [solo c.a.]
- Giunti strutturali inadeguati
- Evidenza di cedimenti fondali
- Solai di caratteristiche non adeguate alla luce e all'utilizzo (aule, palestre, ecc.) e/o con evidenti inflessioni o lesioni
- Muratura di scarsa qualità (di pietrame a sacco o in laterizio), soggetta a comportamenti fragili per instabilità o per costituzione dei materiali e dell'apparecchio murario.

2) Fattori che influiscono sull'adeguatezza del modello di calcolo

Comprendono caratteristiche morfologiche della costruzione che possono influenzare negativamente il comportamento della costruzione, rispetto a quanto ipotizzato nel modello di calcolo, come ad esempio:

- Irregolarità di forma in pianta (pianta non compatta, non simmetrica) con eccentricità di massa
- Irregolarità di rigidezza e/o resistenza in pianta (distribuzione disuniforme in pianta delle tamponature, presenza di nuclei ascensori o setti strutturali in c.a. in posizione eccentrica)
- Irregolarità di forma in elevazione (rastremazioni in elevazione)
- Irregolarità di rigidezza e/o resistenza in elevazione (distribuzione disuniforme in elevazione delle tamponature – piano soffice, brusca interruzione di elementi strutturali con riduzione verso il basso, rastremazione dei pilastri)
- Tamponature con finestrate a nastro o tali da determinare “pilastri corti” [solo c.a.]
- Disposizione irregolare delle aperture e presenza di piccole aperture e nicchie nelle strutture murarie che possono influenzare il comportamento sismico [solo murature]
- Presenza di spinte statiche (tetti, volte, archi, terreno, ecc.)
- Presenza di pareti intersecate da pareti trasversali ad interasse elevato ($>7m$) [solo muratura]
- Elevata snellezza dell'edificio
- Elevata snellezza delle strutture verticali

3) Qualità delle informazioni e assunzioni fatte

Comprendono indicazioni sulla qualità delle informazioni e sul grado di conoscenza acquisito attraverso i sopralluoghi, saggi e documentazione disponibile, come ad esempio:

- Disponibilità del progetto o del rilievo architettonico
- Disponibilità del progetto strutturale o di altri elaborati (anche in percentuale) di carpenteria, dettagli di armature e calcoli
- Numero di saggi effettuati sugli elementi strutturali (per individuazione delle armature e verifica delle dimensioni o per determinazione delle caratteristiche delle murature e dell'apparecchio murario)
- Numero di indagini distruttive e non distruttive effettuate sugli elementi strutturali per valutare le caratteristiche meccaniche dei materiali
- Ripetitività degli elementi strutturali (di telai piani, di pilastri, di travi)
- Numero di saggi effettuati sugli elementi non strutturali (tamponature e tramezzature).

4) Vulnerabilità delle parti non strutturali

Comprende informazioni sulle caratteristiche delle parti non strutturali maggiormente soggette a danni, anche per terremoti di bassa intensità e a cadute pericolose di elementi pesanti, come ad esempio:

- Interpiano superiore ai 3.5 m senza cordoli rompitratta intermedi o altri provvedimenti atti a ridurre il rischio di ribaltamento delle tamponature e dei tramezzi
- Tamponature totalmente fuori dalla maglia strutturale
- Tamponature a cassetta con un paramento (generalmente l'esterno) fuori dalla maglia strutturale
- Tamponature su struttura a sbalzo (esterne alla maglia strutturale) o di bow-window
- Tramezzature a foglio (spessore inferiore a 10 cm) su altezze superiori a 3.00 m
- Rivestimenti pesanti in cattivo stato di manutenzione (in pietra o intonaci spessi distaccati)
- Controsoffittature pesanti
- Camini in muratura
- Cornicioni in muratura
- Balconi o pensiline di grandi luci
- Altri elementi funzionanti a mensola

Nelle relazioni sulla vulnerabilità dei singoli edifici scolastici vengono evidenziati principalmente gli aspetti peggiorativi rispetto alla valutazione che scaturisce dal modello di calcolo, fornendo, infine, per le quattro categorie sopra descritte (congiuntamente per la seconda e la terza) un giudizio qualitativo complessivo sui diversi aspetti esaminati.

Ai fini di una corretta utilizzazione dei risultati di questa valutazione di vulnerabilità e rischio, si ritiene opportuno chiarire e sottolineare che il valore della resistenza sismica fornito non equivale a quello calcolato a norma di regolamento sismico, che risulterà in generale più basso, a parità di ipotesi sui materiali. Infatti nell'assegnazione delle resistenze dei materiali per la determinazione della vulnerabilità sismica non si adotta alcun coefficiente di sicurezza, ed anzi si assumono direttamente valori medi o nominali o ancora desunti dalla letteratura. Inoltre, nel caso delle strutture in c.a., si mettono in conto, direttamente o indirettamente, anche i contributi positivi che gli elementi non strutturali possono offrire, contributi che non possono essere portati in conto in una valutazione della sicurezza secondo normativa.

FASE 3

3.1 Dovrà essere costituita una “carta d’identità” che conterrà le seguenti informazioni:

- 1) **Rilevo fotografico dell’edificio**
- 2) **Storia tecnico-amministrativa dell’edificio**
- 3) **Copia del progetto**
- 4) **Dati progettuali di sintesi**
- 5) **Caratteristiche dei materiali**
- 6) **Valutazione statica per carichi verticali**
- 7) **Identificazione del comportamento dinamico dell’edificio**
- 8) **Valutazione della vulnerabilità**

La “carta d’identità” è un fascicolo di fabbricato che contiene una serie di informazioni utili alla descrizione dell’edificio nella situazione attuale, all’approfondimento delle indagini, alla esecuzione di valutazioni della sicurezza sismica più accurata e alla progettazione di un intervento di rafforzamento, ai sensi della normativa vigente, al monitoraggio nel tempo dell’opera.

Essa conterrà le seguenti informazioni, alcune delle quali già presenti nella relazione richiesta al termine della fase 1:

- 1) **Rilevo fotografico dell’edificio:** dovrà comprendere: foto dei prospetti, di alcuni interni significativi, di eventuali quadri fessurativi, di zone degradate della struttura, dei saggi effettuati, con ubicazione dei punti di ripresa;
- 2) **Storia tecnico-amministrativa dell’edificio:** Storia tecnico-amministrativa dell’edificio (v. p.1.1 e p.1.2)
- 3) **Copia del progetto:** Copia su supporto digitale dei documenti progettuali, esecutivi e di collaudo significativi ai fini delle analisi di vulnerabilità.
- 4) **Dati progettuali di sintesi:** Dati progettuali di sintesi raccolti in apposite schede: scheda AeDES, Scheda vulnerabilità di 1° livello per muratura e c.a., scheda vulnerabilità di 2° livello per la muratura, scheda di progetto.
- 5) **Caratteristiche dei materiali:** Vengono riportati i risultati delle prove, distruttive e non distruttive, eseguite sui materiali strutturali (calcestruzzo, acciaio, muratura, legno, etc.), descrivendo preliminarmente le modalità di prova e la strumentazione utilizzata. I punti di prelievo dei campioni, così come i punti di misura delle prove non distruttive, debbono essere localizzati in pianta, in appositi elaborati grafici.
- 6) **Valutazione statica per carichi verticali:** La valutazione statica per carichi verticali verrà effettuata attraverso verifiche delle sollecitazioni nei solai.
- 7) **Identificazione del comportamento dinamico dell’edificio:** Si riportano i risultati relativi alle misurazioni delle vibrazioni ambientali per la determinazione delle caratteristiche dinamiche fondamentali della struttura. Verranno forniti i punti di misura riportati sulla pianta dell’edificio, le trasformate di Fourier dell’ampiezza delle principali registrazioni effettuate, i periodi dei primi tre modi di vibrare della struttura.
- 8) **Valutazione della vulnerabilità:** Si riportano i risultati di cui al punto 2.5, sintetizzati attraverso l’accelerazione spettrale di collasso ai vari piani, l’accelerazione di collasso a terra dell’edificio, il periodo di ritorno con riferimento alle due diverse ipotesi di curve di attenuazione. Giudizio di sintesi qualitativo derivante dall’analisi degli altri fattori che influiscono sulla valutazione di vulnerabilità e sul rischio di cui al punto F del paragrafo 2.5; fattori che condizionano sia la vulnerabilità d’insieme che quella delle parti non strutturali, così da fornire un quadro di giudizio più completo della vulnerabilità dell’opera.

3.2 Definizione della tipologia di intervento per l'edificio in esame per consentirne le finalità di cui all'art.1 comma 3 della Legge 286/2002

Sulla base dei risultati delle indagini e delle valutazioni effettuate, si saranno individuate le principali carenze strutturali dell'edificio, sulla base delle quali sarà possibile fornire indicazioni sulla tipologia di intervento più adatta alla situazione in esame.

In particolare si individuano le seguenti principali categorie di carenze:

- Carenze per carichi verticali delle strutture orizzontali
- Carenze per carichi verticali delle strutture verticali (pilastri, pareti murarie)
- Cedimenti fondazionali
- Carenza del sistema resistente alle azioni sismiche per
 - Irregolarità strutturale in pianta o in elevazione
 - Martellamento
 - Debolezza strutturale
 - Stato di degrado e/o scarse caratteristiche dei materiali
- Carenze indotte da danni dovuti al terremoto

Per le tipologie di intervento si possono individuare le seguenti categorie:

- Riduzione dei carichi e delle masse (cambiamento destinazione d'uso, ad esempio da archivio ad aula, demolizione di uno o più piani)
- Rafforzamento dei solai
- Rafforzamento delle travi
- Cerchiatura e/o rafforzamento dei pilastri
- Ampliamento della fondazione
- Sottofondazione con pali o micropali
- Rafforzamento rispetto al sisma, distinguendo gli edifici in muratura dagli edifici in c.a.:

c.a.:

- riduzione delle irregolarità mediante creazione di giunti o collegamenti tra corpi separati
- interventi di ampliamento dei giunti
- rafforzamento diffuso di pilastri e nodi mediante incamiciatura, cerchiatura, placcaggio
- inserimento di nuovi elementi strutturali (ad es. pareti) capaci di assorbire gran parte delle forze sismiche
- inserimento di controventi in acciaio tradizionali
- inserimento di controventi in acciaio dissipativi e/o ricentranti
- isolamento sismico mediante sottofondazione
- isolamento sismico immediatamente sopra le fondazioni
- isolamento sismico a un piano intermedio

muratura:

- riduzione delle irregolarità mediante creazione di giunti o collegamenti tra corpi separati
- interventi di ampliamento dei giunti
- miglioramento dei collegamenti tra strutture verticali e tra queste e gli orizzontamenti
- irrigidimento dei solai
- rafforzamento delle strutture murarie (incamiciatura, iniezioni, tirantature)
- inserimento di nuovi elementi strutturali (ad es. pareti) capaci di assorbire parte delle forze sismiche
- contenimento delle spinte sulle strutture verticali o eliminazione delle strutture spingenti, in particolare quelle di copertura
- isolamento sismico

A completamento del quadro di riferimento si riporta di seguito il contenuto dei paragrafi di norma (Ordinanza 3274/2003) relativi ai provvedimenti per l'adeguamento sismico del c.a. e della muratura.

11.3 Edifici in cemento armato

11.3.1 Criteri per la scelta dell'intervento

11.3.1.1 Indicazioni generali

La scelta del tipo, della tecnica, dell'entità e dell'urgenza dell'intervento dipende dai risultati della precedente fase di valutazione, tenendo inoltre conto degli aspetti seguenti:

- *nel caso di edifici fortemente irregolari (in termini di resistenza e/o rigidezza) l'intervento deve mirare a correggere tale sfavorevole situazione;*
- *una maggiore regolarità può essere ottenuta tramite il rinforzo di un ridotto numero di elementi o con l'inserimento di elementi aggiuntivi;*
- *sono sempre opportuni interventi volti a migliorare la duttilità locale;*
- *è necessario verificare che l'introduzione di rinforzi locali non riduca la duttilità globale della struttura.*

11.3.1.2 Tipo di intervento

L'intervento può appartenere a una delle seguenti categorie generali o a particolari combinazioni di esse:

- *rinforzo o ricostruzione di tutti o parte degli elementi;*
- *modifica dell'organismo strutturale: aggiunta di nuovi elementi resistenti come, ad esempio, pareti in c.a., pareti di controvento in acciaio, cordoli di incatenamento in c.a. per strutture murarie...*
- *modifica dell'organismo strutturale: saldatura di giunti tra corpi fabbrica, ampliamento dei giunti, eliminazione di elementi particolarmente vulnerabili, eliminazione di eventuali piani "deboli"...*
- *introduzione di un sistema strutturale aggiuntivo in grado di resistere per intero all'azione sismica di progetto;*
- *eventuale trasformazione di elementi non strutturali in elementi strutturali, ad esempio con incamicatura in c.a. di pareti in laterizio;*
- *introduzione di una protezione passiva mediante strutture di controvento dissipative e/o isolamento alla base;*
- *riduzione delle masse;*
- *limitazione o cambiamento della destinazione d'uso dell'edificio;*
- *demolizione parziale o totale.*

11.3.1.3 Elementi non strutturali ed impianti

Interventi su parti non strutturali ed impianti sono necessari quando, in aggiunta a motivi di funzionalità, la loro risposta sismica può mettere a rischio la vita degli occupanti o produrre danni ai beni contenuti nell'edificio.

Per il progetto di interventi atti ad assicurare l'integrità di tali parti valgono le prescrizioni di cui ai punti 4.9 e 4.10.

11.5 Edifici in muratura

.....

11.5.6 Criteri per la scelta dell'intervento

11.5.6.1 Indicazioni generali

La scelta del tipo, della tecnica, dell'entità e dell'urgenza dell'intervento dipende dai risultati della precedente fase di valutazione, tenendo inoltre conto degli aspetti seguenti:

- *Nel caso in cui siano state evidenziate inadeguatezze in uno o più dei dettagli di cui al punto 11.5.2.2 è necessario intervenire specificamente. In particolare, architravi non resistenti a flessione, spinte orizzontali, collegamenti inadeguati tra solai e pareti, elementi a forte vulnerabilità, vanno in ogni caso eliminati. Collegamenti inadeguati tra pareti ortogonali possono essere mantenuti, a condizione che vengano tenuti opportunamente in conto nel calcolo.*
- *Nel caso di edifici fortemente irregolari (in termini di resistenza e/o rigidità) l'intervento deve mirare a correggere tale sfavorevole situazione.*
- *Una maggiore regolarità può essere ottenuta tramite il rinforzo di un ridotto numero di elementi o con l'inserimento di elementi aggiuntivi.*
- *La trasformazione di solai flessibili in solai rigidi comporta una diversa distribuzione delle azioni agenti sulle pareti, che può rilevarsi favorevole o sfavorevole in funzione della geometria della struttura.*
- *Sono sempre opportuni interventi volti a migliorare la capacità deformativa di singoli elementi.*
- *È necessario verificare che l'introduzione di rinforzi locali non riduca la duttilità globale della struttura.*

11.5.6.2 Tipo di intervento

L'intervento può appartenere a una delle seguenti categorie generali o a particolari combinazioni di esse:

- *Rinforzo, sostituzione o ricostruzione di parte degli elementi.*
- *Modifica dell'organismo strutturale: aggiunta di nuovi elementi resistenti come, ad esempio, nuovi setti murari, pareti in c.a., pareti di controvento in acciaio, cordoli di incatenamento in c.a. per strutture murarie, incatenamenti di volte o di strutture spingenti, ...*
- *Modifica dell'organismo strutturale: saldatura di giunti tra corpi fabbrica, ampliamento dei giunti, eliminazione di elementi particolarmente vulnerabili, eliminazione di eventuali piani "deboli", irrigidimento di solai, ...*
- *Introduzione di un sistema strutturale aggiuntivo in grado di resistere per intero all'azione sismica di progetto.*
- *Eventuale trasformazione di elementi non strutturali in elementi strutturali, ad esempio con incamiciatura in c.a. di tamponature non portanti;*
- *Introduzione di una protezione passiva mediante strutture di controvento dissipative e/o isolamento alla base.*
- *Riduzione delle masse.*
- *Limitazione o cambiamento della destinazione d'uso dell'edificio.*
- *Demolizione parziale o totale.*

11.5.6.3 Elementi non strutturali ed impianti

Interventi su parti non strutturali ed impianti sono necessari quando, in aggiunta a motivi di funzionalità, la loro risposta sismica può mettere a rischio la vita degli occupanti o produrre danni ai beni contenuti nell'edificio.

Per il progetto di interventi atti ad assicurare l'integrità di tali parti valgono le prescrizioni di cui ai punti 4.9 e 4.10.

3.3 Redazione della certificazione riassuntiva di quanto accertato, anche al punto 5 della fase 2, allo scopo di fornire idonea base conoscitiva per le finalità di cui all'art. 1 comma 3 della Legge Regionale n. 38/2002

ELENCO ALLEGATI

Allegato 1: Scheda AeDES versione SG e relative Istruzioni

Allegato 2: Zonazione sismica e calcolo del periodo di ritorno dell'intensità del terremoto espressa in accelerazione massima al suolo

Allegato 3: Scheda di vulnerabilità 1° livello GNNT

Allegato 4: Scheda di vulnerabilità 2° livello GNNT

Allegato 5: Scheda murature