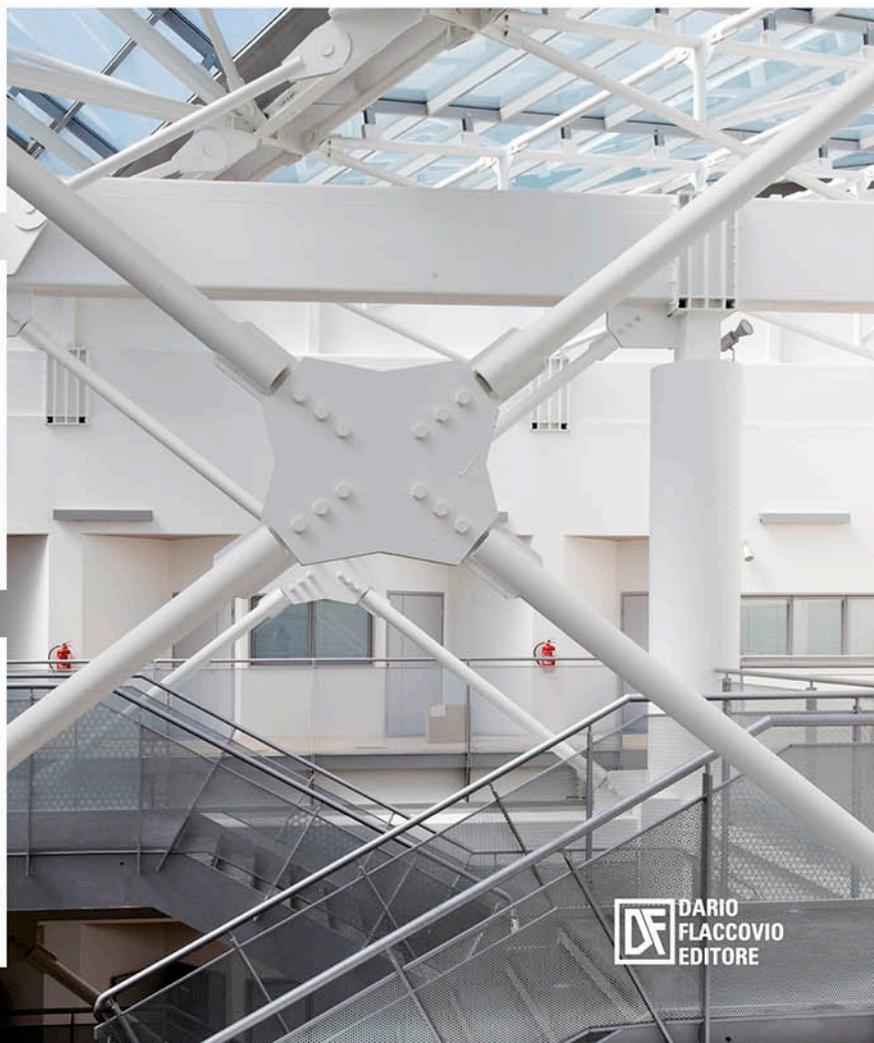
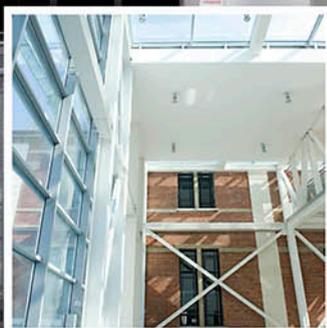


PROTEZIONE SISMICA DI EDIFICI ESISTENTI IN C.A. CON CONTROVENTI DISSIPATIVI IN ACCIAIO

Franco Braga, Francesca Buttarazzi, Andrea Dall'Asta, Walter Salvatore



Collana Acciaio

serie Monografie

11

PROTEZIONE SISMICA DI EDIFICI ESISTENTI IN C.A CON CONTROVENTI DISSIPATIVI IN ACCIAIO

a cura di
Franco Braga, Francesca Buttarazzi,
Andrea Dall'Asta, Walter Salvatore

A CURA DI

Franco Braga, Francesca Buttarazzi, Andrea Dall'Asta, Walter Salvatore

PROTEZIONE SISMICA DI EDIFICI ESISTENTI IN C.A.

CON CONTROVENTI DISSIPATIVI IN ACCIAIO

ISBN 9788857904542

© 2015 by Dario Flaccovio Editore s.r.l. - tel. 0916700686

www.darioflaccovio.it info@darioflaccovio.it

Prima edizione: aprile 2015

Stampa: Tipografia Priulla, Palermo, aprile 2015

Una pubblicazione di:



Fondazione Promozione Acciaio

Via Vivaio, 11

20122 Milano – Italia

Tel. 02.86313020

info@promozioneacciaio.it

www.promozioneacciaio.it

Redazione:



c/o Fondazione Promozione Acciaio

Via Vivaio, 11

20122 Milano – Italia

Tel. 02.86313020

info@promozioneacciaio.it

www.promozioneacciaio.it

In copertina

Istituto Scolastico “G. Falcone”, Gallarate (VA) - Studio Amati srl

Foto: Lorenzo De Simone - Fondazione Promozione Acciaio

Un particolare ringraziamento va a tutti i Soci di Fondazione Promozione Acciaio



Associazione Italiana Zincatura



ArcelorMittal



GRUPPO BELTRAME



BLM GROUP



COMMERCIALE SIDERURGICA BRESCIANA

Duferdofin INUCOR



gabrielli
steel service centre



Industeel



Ein Unternehmen der Salzgitter Gruppe



LAVORAZIONE LAMIERE
CARPENTERIA IN FERRO E ACCIAIO INOX

ROSA & C.



Il futuro è la nostra materia



Gruppo d'Acquisto Prodotti Siderurgici



STAHLBAU PICHLER



STEFANA spa



WWW.TTMLASER.COM



Unione
Produttori Italiani
Viteria e Bulloneria



Commercio Prodotti Siderurgici



PRODOTTI SIDERURGICI
TUBI STRUTTURALI



Wise House

INDICE GENERALE

<i>Prefazione a cura di Fondazione Promozione Acciaio</i>	pag. 11
<i>Nota al testo</i>	» 13

1. Introduzione

1.1. Premessa.....	» 15
1.2. Obiettivi della monografia	» 18
1.3. Ringraziamenti.....	» 19
1.4. Organizzazione del volume.....	» 19
1.5. Quadro normativo.....	» 21

2. Ipotesi generali e requisiti generali prestazionali di una costruzione in c.a.

2.1. Criteri generali di progettazione e cenni normativi	» 23
2.2. Vulnerabilità sismica degli edifici esistenti.....	» 28
2.3. Edifici in c.a.: tipologie strutturali e vulnerabilità sismica	» 34
2.4. Prestazioni richieste: strategia progettuale.....	» 38
2.5. Tecniche di intervento in zona sismica.....	» 42

3. Valutazione della capacità sismica di edifici in c.a.

3.1. Introduzione	» 45
3.2. Conoscenza dello stato di fatto del fabbricato	» 45
3.2.1. Analisi storico-critica.....	» 46
3.2.2. Rilievo geometrico e strutturale	» 46
3.2.3. Caratterizzazione meccanica del materiale	» 50
3.2.4. Definizione del livello di conoscenza	» 53
3.3. Caratterizzazione meccanica del suolo di fondazione.....	» 55
3.4. Valutazione delle azioni agenti sulla costruzione.....	» 57
3.5. Modellazione dell'edificio e analisi strutturale	» 60
3.5.1. Modellazione lineare delle strutture	» 61

4. Dispositivi per la dissipazione d'energia

4.1. Introduzione	»	69
4.2. Dispositivi viscosi e viscoelastici	»	70
4.2.1. Aspetti generali	»	70
4.2.2. Comportamento costitutivo e parametri caratteristici	»	74
4.2.3. Influenza sulla risposta dinamica	»	82
4.3. Dispositivi isteretici	»	86
4.3.1. Aspetti generali	»	86
4.3.2. Comportamento costitutivo e parametri caratteristici	»	92
4.3.3. Influenza sulla risposta dinamica	»	97
4.4. Controvento dissipativo	»	100
4.4.1. Configurazione	»	100
4.4.2. Deformabilità dei collegamenti	»	102
4.5. Qualifica, accettazione e manutenzione	»	105
4.5.1. Aspetti generali e quadro normativo	»	105

5. Miglioramento della risposta al sisma con controventi dissipativi

5.1. Generalità	»	109
5.2. Stato dell'arte delle procedure di progettazione	»	112
5.3. Progettazione del sistema di protezione con controventi dissipativi	»	114
5.3.1. Progettazione prestazionale	»	114
5.3.2. Caratterizzazione strutturale di telai con controventi elastici	»	116
5.3.2.1. Equazioni del moto del telaio senza controventi	»	117
5.3.2.2. Equazioni del moto del telaio con controventi elastici	»	118
5.3.2.3. Semplificazione del problema dinamico	»	119
5.3.2.4. Metodo della condensazione statica: sistema non smorzato	»	121
5.3.2.5. Metodo della condensazione statica: sistema smorzato classicamente	»	123
5.3.3. Procedura di ottimizzazione di un sistema di controventi elastici (dimensionale e topologica)	»	123
5.3.3.1. Variabili di progetto	»	124
5.3.3.2. Funzione obiettivo	»	129
5.3.3.3. Condizioni di vincolo	»	130
5.3.3.4. Formulazione del problema di ottimizzazione strutturale	»	132
5.3.3.5. Analisi delle sollecitazioni indotte nei pilastri	»	133
5.3.4. Procedura di ottimizzazione di un sistema di controventi dissipativi	»	133
5.3.4.1. Scelta del livello di smorzamento	»	136
5.3.4.2. Riduzione delle azioni sismiche	»	136

5.3.4.3.	Determinazione della rigidezza dei controventi	» 136
5.3.4.4.	Calcolo delle caratteristiche dissipative di ciascun controvento.....	» 137
5.3.5.	Confronto tra la soluzione elastica e la soluzione con dissipazione energetica	» 139
6. Esempio applicativo		
6.1.	Descrizione dell'edificio esistente	» 141
6.1.1.	Materiali e dettagli costruttivi	» 142
6.1.1.1.	Materiali	» 142
6.1.1.2.	Dettagli costruttivi	» 144
6.1.2.	Carichi ed azioni	» 147
6.1.2.1.	Carichi gravitazionali.....	» 147
6.1.2.2.	Azione sismica	» 150
6.2.	Valutazione della capacità	» 151
6.2.1.	Modellazione ed analisi della struttura.....	» 151
6.2.2.	Risultati dell'analisi statica non lineare e verifiche di vulnerabilità sismica	» 153
6.2.2.1.	Verifica degli elementi "duttili"	» 154
6.2.2.2.	Verifica degli elementi "fragili"	» 159
6.3.	Adeguamento sismico dell'edificio.....	» 160
6.3.1.	Adeguamento con controventi elastici.....	» 162
6.3.2.	Adeguamento con controventi dissipativi	» 168
6.3.3.	Confronto tra soluzione elastica e dissipativa.....	» 171
6.3.4.	Progetto dei dispositivi di dissipazione.....	» 173
6.4.	Conclusioni.....	» 176
	Bibliografia	» 179



Il presente volume, incentrato sull'adeguamento sismico di edifici esistenti in cemento armato attraverso l'utilizzo di controventi dissipativi in acciaio, intende fornire un utile strumento pratico rivolto ai professionisti, su un tema di imprescindibile importanza per il patrimonio costruito italiano e tuttavia scarsamente approfondito e trattato a livello accademico e nella *pratica* professionale. Sebbene i codici normativi vigenti per gli edifici in zona sismica contengano indicazioni sull'adeguamento del costruito attraverso interventi innovativi quali i sistemi di isolamento alla base, l'utilizzo di controventi dissipativi inseriti all'interno degli edifici esistenti risulta un argomento poco approfondito e trattato. L'opera è suddivisa nei seguenti capitoli che trattano in modo completo ed esaustivo la protezione degli edifici in c.a.: *Ipotesi generali e requisiti generali prestazionali di una costruzione in c.a.*; *Valutazione della capacità sismica di edifici esistenti in c.a.*; *Dispositivi per la dissipazione di energia*; *Miglioramento della risposta al sisma con controventi dissipativi*; *Esempio applicativo: adeguamento sismico di un edificio in c.a. di 6 piani fuori terra mediante l'utilizzo di controventi dissipativi*.

La monografia *Protezione sismica di edifici esistenti in c.a. con controventi dissipativi in acciaio* è distribuita in Italia quale undicesimo volume della collana "Acciaio" edita da Fondazione Promozione Acciaio e curata dalla Commissione Sismica per le Costruzioni in Acciaio.

Dal 2008 la Fondazione fornisce al professionista una serie di pubblicazioni tecniche dedicate alla progettazione in acciaio aggiornate alle più recenti normative. Fanno parte della medesima collana: *Acciai strutturali, prodotti e sistemi di unione*, *Analisi di una soluzione monopiano con il metodo plastico*, *Edifici monopiano in acciaio ad uso industriale*, *Progettazione di strutture in acciaio secondo le NTC e gli Eurocodici – basi concettuali ed esempi di calcolo*, *Progettazione di strutture composte acciaio – calcestruzzo secondo gli Eurocodici e le Norme Tecniche per le Costruzioni*, *Collegamenti in acciaio in edifici monopiano e multipiano – Eurocodice 3*, *Progettazione di giunzioni e strutture tubolari in acciaio*, *I pannelli coibentati in acciaio nella progettazione e realizzazione di strutture e involucro*, *Verifica e progetto di aste in acciaio – sforzo normale, flessione semplice e composta* e *Guida all'architettura multipiano in acciaio – manuale tecnico pratico*.

Il nostro auspicio è che la collana "Acciaio" possa contribuire ad una maggiore conoscenza delle opere in acciaio, capaci di distinguersi per gli elevati standard qualitativi oltre ad altri importanti vantaggi quali la sostenibilità ambientale, la rispondenza ai requisiti di antisismicità, la funzionalità, le potenzialità architettoniche, la rapidità costruttiva e la semplicità di messa in opera.

Consapevole che in Italia le quote di mercato delle costruzioni in acciaio sono molto inferiori rispetto alla media europea, principalmente per la limitata conoscenza del ma-

teriale e delle sue peculiarità, FPA si impegna nel promuovere costantemente la cultura dell'acciaio presso il proprio target di riferimento, costituito da professionisti e studi di progettazione, imprese di costruzione, committenti pubblici e privati, senza dimenticare di rivolgere uno sguardo al futuro, dedicando molta attenzione all'insegnamento nelle università.

Attraverso il sostegno dei maggiori produttori d'acciaio italiani ed europei e di altri importanti rappresentanti della filiera tra cui trasformatori, centri di servizio, costruttori metallici e progettisti, uniti nello scopo di promuovere l'impiego dell'acciaio nelle costruzioni ed infrastrutture, la Fondazione pone al servizio degli operatori del settore delle costruzioni italiano le competenze tecniche e scientifiche dei Soci, sviluppando un'azione costante di comunicazione ed informazione a supporto dei professionisti, degli studenti universitari, dei committenti pubblici e privati, sulle possibilità e i vantaggi offerti dalle soluzioni in acciaio.

La Fondazione Promozione Acciaio è attiva nel settore delle costruzioni e infrastrutture in acciaio attraverso quattro commissioni tecniche: *Commissione Sismica per le Costruzioni in Acciaio*, *Commissione per la Sicurezza delle Costruzioni in Acciaio in caso d'Incendio*, *Commissione per le Costruzioni in Acciaio Ecosostenibili*, *Gruppo di lavoro Normative*, che toccano temi prioritari per le costruzioni metalliche: l'efficienza dell'acciaio in zona sismica, la sicurezza di fronte all'incendio, la sostenibilità del materiale e le nuove responsabilità introdotte dalla normativa di settore.

Le commissioni hanno un ruolo di primo piano nell'insegnamento e nella promozione delle soluzioni costruttive in acciaio, curando la realizzazione delle predette monografie tecniche e l'organizzazione di qualificati corsi di formazione oltre al costante aggiornamento del portale www.promozioneacciaio.it.

FPA è anche un Ufficio Tecnico che fornisce assistenza tecnica, scientifica e normativa a chi già sviluppa e progetta costruzioni metalliche o anche solo a chi desidera ampliare le proprie conoscenze professionali.

I ringraziamenti da parte di Fondazione Promozione Acciaio vanno agli autori del volume, prof. Franco Braga, ing. Francesca Buttarazzi, prof. Andrea Dall'Asta e prof. Walter Salvatore; si desiderano inoltre ringraziare coloro che hanno contribuito alla realizzazione dei singoli capitoli: Silvia Caprili, Giuseppina Conti, Francesco Morelli, Laura Ragni, Enrico Tubaldi.

Un ringraziamento va inoltre ai Soci della Fondazione, per il costante supporto verso la *mission* di FPA: la diffusione e la divulgazione della cultura del progettare e del costruire in acciaio.

Simona Maura Martelli
Direttore Generale
Fondazione Promozione Acciaio

Nota al testo

Il presente volume è stato redatto secondo le Norme Tecniche per le Costruzioni del 2008 e successiva circolare esplicativa del Febbraio 2009 ed i riferimenti normativi che compaiono all'interno dei capitoli sono ad esse correlati.

È fondamentale precisare che i contenuti tecnici e progettuali del volume **sono in linea con la bozza di testo di revisione delle Norme Tecniche approvato dal Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici in data 14/11/2014** e che, al momento della stesura di questa monografia, sta attraversando l'iter burocratico che porterà alla pubblicazione del nuovo testo normativo.

1. Introduzione

1.1. Premessa

Alla luce degli ultimi eventi sismici che hanno interessato il territorio nazionale e del variegato panorama edilizio italiano, caratterizzato da un'elevata vulnerabilità sismica, la progettazione degli interventi sulle costruzioni esistenti assume un'importanza fondamentale ai fini della riduzione del rischio sismico nazionale.

Il comportamento degli edifici soggetti a terremoti di elevata intensità ha evidenziato come, anche nei casi in cui le strutture abbiano resistito alle sollecitazioni di natura sismica senza riportare danni estesi, si siano comunque registrati numerosi danni agli elementi non strutturali (architettonici e impiantistici).

Di conseguenza, le più recenti normative sismiche, oltre alle caratteristiche di resistenza degli organismi strutturali, da sempre ritenute di primaria importanza, hanno iniziato a prestare maggiore attenzione alle loro caratteristiche di deformabilità, specie quando in essi siano inserite le componenti non strutturali.

A tal proposito, riferendosi alla puntuale caratterizzazione degli elementi non strutturali presente nei documenti normativi americani (**FEMA 356 *Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings***), si rileva una rigidità di tali elementi elevata, generalmente maggiore di quella degli elementi strutturali, e la conseguente necessità di introdurre limiti più stringenti di deformabilità sulle strutture (v. **FEMA 356**, cap. 1.5.2 *Nonstructural Performance Levels*) per ridurre il danneggiamento degli elementi non strutturali, a seguito di un terremoto.

Se gli edifici esistenti non evidenziano un giusto equilibrio tra resistenza e deformabilità è molto probabile che possano verificarsi situazioni in cui, mentre sono salvaguardati i requisiti di Salvaguardia della Vita e di Prevenzione del Collasso grazie al corretto dimensionamento degli elementi strutturali e alla attenzione rivolta alla definizione dei dettagli costruttivi, i requisiti di Operatività e di Prevenzione del Danno non sempre siano rispettati, soprattutto quando ci si riferisce alle verifiche degli elementi non strutturali.

La Normativa Italiana (D.M. 14/01/2008 *Norme Tecniche per le Costruzioni*, nel seguito **NTC08**) nel capitolo 7 relativo alla progettazione per azioni sismiche fornisce i criteri di progettazione di elementi strutturali "secondari" ed elementi non struttura-

li, riportando il calcolo degli effetti dell'azione sismica (v. §7.2.3) e degli impianti (v. §7.2.4), oltre ad elencare una serie di accorgimenti per il corretto collegamento degli impianti alla struttura e per limitare il rischio di malfunzionamento degli stessi, soprattutto a causa degli spostamenti relativi tra costruzione e terreno.

In questo contesto, l'inserimento di controventi dissipativi come misura innovativa per il miglioramento/adequamento sismico di edifici esistenti rappresenta un'efficace soluzione al problema della riduzione del rischio sismico di edifici che non rispettino i requisiti prestazionali introdotti dalle **NTC08**. Tale tecnica, infatti, riduce drasticamente sia la deformabilità del sistema (grazie alla rigidità dei controventi) sia l'entità delle forze in gioco (grazie alla capacità dissipativa dei dispositivi inseriti nei controventi). Ciò comporta un evidente miglioramento del comportamento, sia dell'intero organismo strutturale, sia di tutti gli elementi non strutturali in esso contenuti (tamponature, elementi architettonici, componenti impiantistiche etc.).

In linea generale, si tratta d'interventi che richiedono una progettazione più impegnativa e più approfondite analisi di dettaglio rispetto alle tecniche d'intervento tradizionali e sono, pertanto, da preferire qualora si debba conseguire un miglioramento sostanziale della risposta al sisma della struttura. Solo in questo caso, infatti, il committente è disposto a sostenere i maggiori costi associati al progetto, alla produzione e all'installazione di controventi e dissipatori, anche se i costi sono spesso compensati da una riduzione degli interventi d'irrigidimento e/o irrobustimento delle strutture.

È utile confrontare brevemente gli effetti dell'inserimento dell'isolamento alla base con gli effetti dell'inserimento dei controventi dissipativi, ossia gli effetti delle due tecniche d'intervento oggi più innovative, per rendere più consapevole la loro adozione che, peraltro, non è alternativa e, spesso, può essere congiunta.

L'isolamento alla base, spostando i periodi propri della struttura in una zona dello spettro sismico a contenuto energetico più basso, riduce l'energia sismica in ingresso nella struttura esistente; gli isolatori forniscono inoltre una significativa dissipazione che determina un ulteriore abbattimento di sollecitazioni e spostamenti. Dunque si ha, contemporaneamente, riduzione dell'energia in ingresso e incremento della sua dissipazione.

L'inserimento di controventi e dispositivi di dissipazione energetica, spostando i periodi propri della struttura in una zona dello spettro sismico a contenuto energetico più alto, incrementa l'energia sismica in ingresso, ma la concentra nei controventi (riducendo la quantità d'energia che entra nella struttura esistente) per poi abatterla ulteriormente, grazie alla capacità dissipativa dei dispositivi.

Nell'ambito di un approccio progettuale prestazionale la scelta di sistemi di miglioramento/adequamento sismico innovativi deve essere legata agli obiettivi prestazionali che si vogliono raggiungere (come si vedrà nel capitolo 2). Per incoraggiare il progettista ad adottare l'isolamento e/o la dissipazione le **FEMA 356** indicano i livelli prestazionali per i quali la protezione tramite sistemi d'isolamento e/o di dis-

sipazione è una valida alternativa alle tecniche di intervento tradizionali. In particolare, l'isolamento alla base dovrebbe essere preso in considerazione per conseguire i requisiti di Immediata Occupabilità per gli elementi strutturali e di Operatività per gli elementi non strutturali (*Stati Limite di Esercizio* secondo le **NTC08**) ma non è pienamente soddisfacente se la strategia progettuale vuole conseguire il requisito di Prevenzione del Collasso.

L'intervento mediante isolamento fornisce una protezione significativa degli elementi strutturali, dei componenti non strutturali e di quanto contenuto nell'organismo edilizio ad un costo che, tuttavia, spesso ne preclude la applicazione quando le risorse economiche e gli obiettivi dell'intervento sono limitati.

Tabella 1.1. FEMA 356 (Table C9-1) Applicabilità di sistemi di protezione sismica con Isolamento e Dissipazione energetica

Livello prestazionale	Performance Range	Isolamento	Dissipazione energetica
Operatività	Controllo del danno	Molto probabile	Applicabilità limitata
Occupabilità Immediata		Probabile	Probabile
Salvaguardia della Vita	Sicurezza limitata	Applicabilità limitata	Probabile
Prevenzione del Collasso		Non consigliabile	Applicabilità limitata

L'intervento mediante controventi dissipativi è invece caratterizzato da un più esteso campo di applicazione. Per gli edifici in cui l'isolamento non può essere utilizzato data l'elevata flessibilità delle strutture esistenti (ad esempio gli edifici particolarmente alti), i sistemi di dissipazione energetica rappresentano una valida strategia progettuale quando l'obiettivo prestazionale è rappresentato dallo Stato Limite di Danno. E ancora, utilizzando dispositivi di dissipazione energetica non troppo sofisticati è possibile conseguire, ad un costo contenuto, il requisito della Salvaguardia della Vita.

In generale, i sistemi di dissipazione energetica sono considerati appropriati quando i Livelli Prestazionali che si vogliono conseguire sono appunto l'Immediata Occupabilità (SLD) e la Salvaguardia della Vita (SLV).

Ulteriori obiettivi progettuali possono inoltre influenzare la scelta di utilizzare dispositivi di dissipazione energetica, dal momento che l'inserimento di questi dispositivi e dei controventi può essere vantaggioso per il controllo della risposta della struttura a terremoti di intensità medio-bassa e/o ad altre azioni dinamiche quali ad esempio il vento o le vibrazioni dovute alla presenza di macchinari.

La grande versatilità della protezione tramite controventi dissipativi, la possibilità di migliorare la risposta della struttura non solo nei confronti delle azioni sismiche e la mancanza di riferimenti normativi nazionali per tale tipologia d'intervento sono tra le principali ragioni che hanno portato a dedicare a questo tema una monografia, limitando peraltro la trattazione al caso di edifici esistenti con struttura a telaio in cemento armato, per i motivi che saranno meglio evidenziati nel seguito.

1.2. Obiettivi della monografia

Obiettivo principale della monografia è fornire uno strumento di utilità pratica per i professionisti coinvolti in progetti di miglioramento/adeguamento sismico di edifici con struttura in cemento armato che prevedano l'inserimento di controventi dissipativi.

Allo stato attuale, infatti, mentre quasi tutti i codici normativi per edifici in zona sismica contengono indicazioni progettuali per interventi innovativi tramite isolamento alla base, spazio ancora limitato è dedicato alle regole progettuali utili per effettuare interventi con controventi dissipativi.

D'altra parte, sia l'isolamento alla base sia la dissipazione energetica sono metodologie d'intervento relativamente nuove e sofisticate che richiedono analisi più approfondite e complesse di quelle richieste dagli interventi di tipo tradizionale; è necessario valutare, infatti, oltre alla capacità degli elementi strutturali esistenti anche le modifiche delle caratteristiche dinamiche della struttura a seguito dell'introduzione dei sistemi di isolamento e/o di dissipazione, in funzione delle caratteristiche meccaniche dei dispositivi utilizzati.

Nell'ideare l'intervento non si può pertanto prescindere da un'esauriente conoscenza dei dispositivi attualmente in commercio e delle loro caratteristiche in termini di risposta ad azioni cicliche, durabilità delle proprietà meccaniche dei materiali impiegati, affidabilità nel comportamento.

Altro aspetto fondamentale per l'ideazione dell'intervento è quello della modellazione: verranno fornite le indicazioni specifiche necessarie per rappresentare correttamente l'inserimento dei sistemi di dissipazione energetica nella maglia strutturale, avendo ben presente che il modello dovrà includere gli elementi di collegamento alla struttura sia dei controventi sia di tutti gli elementi strutturali che lavorano in serie con essi e che, come si vedrà, modificano la rigidità e lo smorzamento effettivamente forniti dai sistemi dissipativi.

Prima di entrare nel vivo della progettazione d'interventi con controventi dissipativi (capitoli 4 e 5) e di riportare un esempio pratico di applicazione della procedura di progettazione proposta (capitolo 6), si esamineranno le caratteristiche degli edifici esistenti con struttura in cemento armato, le diverse tecniche di riabilitazione sismica e la loro diversa efficacia in funzione della tipologia strutturale, ripercorrendo le fasi previste dalle **NTC08** per la valutazione della capacità (capitoli 2 e 3).

La scelta di limitare la trattazione al caso di edifici con struttura a telaio in cemento armato è stata motivata dal fatto che un intervento con controventi dissipativi si adatta meglio a strutture 'puntiformi' (quali sono appunto, nella maggioranza casi, quelle con telai in c.a.) che a strutture 'lineari' (quali quelle in muratura o con pareti in c.a.). La distinzione tra struttura 'puntiforme' e struttura 'lineare' è motivata dal modo in cui l'organismo strutturale assorbe le azioni orizzontali di natura sismica e le convoglia agli elementi di fondazione.

Nella struttura 'puntiforme' le azioni sono assorbite da elementi puntuali, quali i

pilastrini, o al più da pochi elementi lineari, le pareti, utilizzati principalmente per resistere ad azioni orizzontali; in una struttura di questo tipo l'inserimento dei controventi, ovvero di ulteriori elementi puntuali di raccolta di sollecitazioni, rispetta la natura originaria dell'organismo strutturale semplificando la connessione di nuove strutture, i controventi, alle strutture esistenti e quindi assicurando l'efficacia dell'intervento.

Nella struttura 'lineare' la maggior parte delle azioni di natura sismica è assorbita da elementi bidimensionali (in muratura o in cemento armato), le pareti; l'inserimento di controventi comporta l'applicazione di forze concentrate che non sono assorbite facilmente da strutture a comportamento bidimensionale, non progettate per questo tipo di carichi; da qui la necessità di effettuare interventi invasivi sull'organismo strutturale esistente, con un aggravio in termini di costi non giustificato dal risultato conseguito.

1.3. Ringraziamenti

Gli Autori desiderano ringraziare per il contributo alla realizzazione del presente volume:

- ing. Silvia Caprili, ricercatore universitario presso l'Università degli Studi di Pisa, per i capitoli 2 e 3;
- ing. Giuseppina Conti, libero professionista, per i capitoli 5 e 6;
- ing. Francesco Morelli, ricercatore universitario presso l'Università degli Studi di Pisa, per il capitolo 6;
- ing. Laura Ragni, ricercatore universitario presso l'Università Politecnica delle Marche, per il capitolo 6;
- ing. Enrico Tubaldi, professore a contratto presso l'Università degli Studi di Camerino, per il capitolo 4.

1.4. Organizzazione del volume

Il volume è articolato nei seguenti capitoli:

CAPITOLO 1 – INTRODUZIONE

CAPITOLO 2 – IPOTESI GENERALI E REQUISITI GENERALI PRESTAZIONALI DI UNA COSTRUZIONE IN C.A.

Si individuano le principali cause di vulnerabilità sismica degli edifici esistenti in c.a., associandole alle tipologie strutturali; si definiscono le prestazioni strutturali richieste in fase di miglioramento/adeguamento di un edificio esistente e che sono funzione della strategia progettuale prescelta; si passano in rassegna le diverse tec-

niche di intervento su edifici in c.a. evidenziando le peculiarità dell'intervento con controventi dissipativi; si individuano infine le principali fasi che caratterizzano un intervento di adeguamento di un edificio esistente che saranno descritte nel capitolo 3.

CAPITOLO 3 – VALUTAZIONE DELLA CAPACITÀ SISMICA DI EDIFICI ESISTENTI IN C.A.

Si descrivono nel dettaglio le fasi del progetto di valutazione della capacità sismica di edifici esistenti c.a. i cui risultati sono preliminari per la progettazione dell'intervento di adeguamento sismico più efficace. Particolare attenzione viene data alla modellazione delle componenti strutturali e non strutturali e alla individuazione degli elementi di criticità.

CAPITOLO 4 – DISPOSITIVI PER LA DISSIPAZIONE DI ENERGIA

Si descrivono i dispositivi di dissipazione energetica suddivisi tra quelli basati su meccanismi dissipativi legati alla velocità (viscosi e viscoelastici) e quelli basati su meccanismi dissipativi legati agli spostamenti (isteretici). Per ogni tipologia di dispositivo si fornisce una esauriente descrizione dei parametri meccanici e del legame costitutivo. Particolare attenzione è data alla modellazione dei dispositivi, con particolare riferimento alla modellazione lineare equivalente utilizzata nella procedura progettuale presentata nel capitolo 5. Il capitolo si chiude con la descrizione delle procedure di qualifica, accettazione e manutenzione dei dispositivi che ne rendono possibile l'utilizzo nel processo costruttivo, con specifici riferimenti alle norme attualmente in vigore.

CAPITOLO 5 – MIGLIORAMENTO DELLA RISPOSTA AL SISMA CON CONTROVENTI DISSIPATIVI

Il capitolo è dedicato alla progettazione di interventi di adeguamento sismico di strutture in c.a. con controventi dissipativi; si presenta una procedura di progettazione prima per il caso dei controventi elastici e poi per quello dei controventi dissipativi. La procedura progettuale, sviluppata nell'ottica di un approccio prestazionale, si basa sulla ricerca del minimo vincolato di una funzione obiettivo che tenga in conto le molteplici variabili progettuali che caratterizzano il progetto di adeguamento sismico.

CAPITOLO 6 – ESEMPIO APPLICATIVO

Si sviluppa un progetto di adeguamento sismico con controventi elastici e dissipativi per un fabbricato di civile abitazione realizzato nel 1983, avente sei elevazioni fuori terra e copertura a padiglione. La struttura è intelaiata in c.a. con fondazioni superficiali su travi rovesce. L'esempio applicativo comprende una prima fase di valutazione della sicurezza dell'edificio allo stato attuale e una seconda fase relativa alla progettazione dell'intervento di adeguamento sismico tramite controventi elastici e controventi dissipativi.

1.5. Quadro normativo

Nel quadro normativo nazionale le **NTC08** raccolgono in un unico organico testo le norme ed i principi per il progetto, l'esecuzione ed il collaudo delle costruzioni. Il carattere innovativo di tali norme, che si allineano alle impostazioni dei più avanzati codici per la progettazione sismoresistente delle opere di ingegneria civile, ha comportato un profondo cambiamento nell'attività progettuale ed una inevitabile richiesta di approfondimenti, chiarimenti ed esemplificazioni soprattutto dei temi più complessi. A tal fine, nel 2009, sono state emanate le *Istruzioni per l'applicazione delle NTC-08* con l'intento di "fornire agli operatori indicazioni, elementi informativi ed integrazioni, per una più agevole ed univoca applicazione delle *Nuove norme tecniche per le costruzioni*"¹. Ciononostante, le numerose osservazioni alle **NTC08** ricevute dagli organi istituzionali (Ordini professionali, Consiglio Nazionale degli Ingegneri, Regioni etc.) hanno portato alla istituzione di un'apposita Commissione, attivata con Decreto del Presidente del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici n. 6403 del 18.05.2011, per "l'aggiornamento della classificazione e delle norme tecniche per le costruzioni".

È proprio di questi giorni la notizia dell'approvazione da parte dell'organo tecnico del Ministero delle Infrastrutture dell'aggiornamento delle **NTC08**; tale documento dovrà ora passare in Conferenza Stato-Regioni per poi confluire in un decreto interministeriale, redatto dal Ministero delle Infrastrutture, da quello degli Interni e dal Dipartimento della Protezione Civile, che sarà poi pubblicato in Gazzetta Ufficiale. Considerato pertanto che i tempi della pubblicazione della revisione alle **NTC08** non sono ancora noti e che, comunque, anche nel testo normativo aggiornato non sarà presente un capitolo dedicato alla progettazione di interventi con controventi dissipativi su strutture esistenti, si è deciso comunque di procedere con la pubblicazione della presente monografia. La consapevolezza di muoversi in un contesto normativo in continua evoluzione ha determinato la necessità di limitare il più possibile i riferimenti alle **NCT08** il cui aggiornamento, peraltro, non ne modificherà l'impianto generale.

Le **NTC08** dedicano un intero capitolo (cap. 8) alle costruzioni esistenti e, più in particolare, al tema della progettazione di interventi su edifici in zona sismica. Importanti commenti e integrazioni sono poi contenuti nel corrispondente capitolo e nelle appendici della Circolare Min. LL.PP. n.617 del 02/02/2009 *Istruzioni per l'applicazione delle Nuove norme tecniche per le costruzioni di cui al D.M. 14/01/2008* (nel seguito **Circolare**).

La Normativa Europea dedica all'argomento la parte 3, *Valutazione e adeguamento degli edifici* dell'Eurocodice 8 *Progettazione delle strutture per la resistenza sismica*. La progettazione d'interventi con controventi dissipativi non è allo stato attuale regolamentata da alcuna Normativa nazionale.

Nella parte 5.1.3. dell'Eurocodice 8 – parte 3 si cita la possibilità di intervenire con

¹ V. *Introduzione* alla Circolare 02/02/2009 n. 617 del C.S.LL.PP.

inserimento di controventi dissipativi ma senza indicare i riferimenti normativi da seguire nel caso in cui si scelga di adottare questa strategia di intervento.

Bisogna riferirsi ai documenti normativi americani per trovare prescrizioni relative agli interventi mediante dissipazione energetica. Nelle **FEMA 356** (che riguardano come già ricordato gli interventi di miglioramento/adeguamento sismico di edifici esistenti) è presente un capitolo contenente indicazioni progettuali e operative sull'implementazione di interventi con dispositivi di dissipazione, sulla loro modellazione, sui metodi di analisi e sulle metodologie di prova dei dispositivi.

Al documento **FEMA 356** è poi seguito il documento emesso dalla Società Americana degli Ingegneri Civili (*American Society of Civil Engineers, ASCE*) n. 41-06, dal titolo *Seismic Rehabilitation of Buildings*.

Sempre in ambito internazionale si segnala il documento **FEMA 547**, *Techniques for the Seismic Rehabilitation of Existing Buildings* (2006 Edition) che descrive le più comuni tecniche d'intervento per edifici esistenti in zona sismica, tecniche utilizzate nei documenti **FEMA** e di fatto recepite dalla Normativa Italiana.

Per quanto riguarda la normativa sui dispositivi di dissipazione si farà riferimento alla **EN 15129** (corrispondente Norma Nazionale di trasposizione: **UNI EN 15129**). Tale norma, pubblicata nella GUUE il 19 marzo 2010, è entrata in vigore il 1° agosto 2010 ed è obbligatoria dal 1° agosto 2011, dopo un anno di coesistenza con le norme precedentemente in vigore.

2. Ipotesi generali e requisiti generali prestazionali di una costruzione in c.a.

2.1. Criteri generali di progettazione e cenni normativi

Gli edifici con struttura in cemento armato, al fine di conseguire meccanismi di collasso duttili, adottano oggi i criteri della progettazione in capacità (*capacity design*); si realizzano così strutture caratterizzate da un comportamento globale duttile, capaci di dissipare, in un certo numero di cicli di isteresi, l'energia immessa in esse durante il terremoto localizzandone la dissipazione in corrispondenza di specifiche zone degli elementi strutturali dette, per l'appunto, *zone critiche* o *zone dissipative*. In particolare, il comportamento globale duttile della struttura, generalmente espresso in termini di spostamenti globali (μ_δ), dipende dalla capacità rotazionale degli elementi strutturali primari costituenti il sistema resistente, a sua volta legata alla capacità deformativa delle sezioni in c.a. e quindi alle caratteristiche dissipative dei materiali che le costituiscono (cemento e acciaio) (figura 2.1).

La duttilità strutturale globale è quindi dipendente dalla duttilità di ciascun elemento (μ_θ), dalla duttilità di ciascuna sezione (μ_χ) e, infine, dalla duttilità di ciascun materiale (μ_ϵ), requisiti che è necessario assicurare per conseguire un comportamento globalmente dissipativo della struttura e scongiurare il pericolo di collassi fragili (figura 2.2).

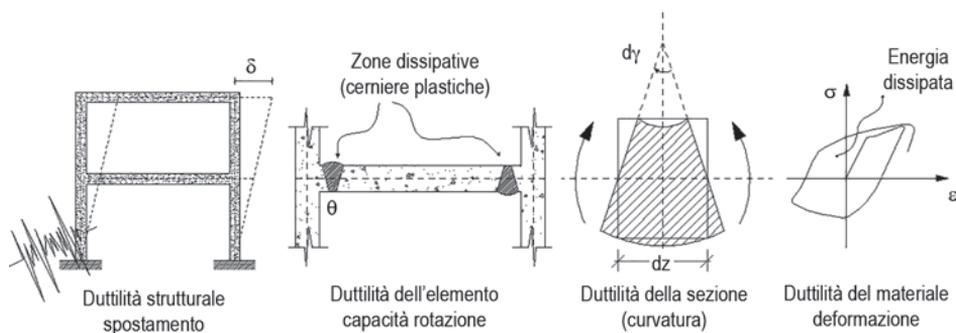


Figura 2.1. Diversi livelli di duttilità (struttura, elemento, sezione, materiale)

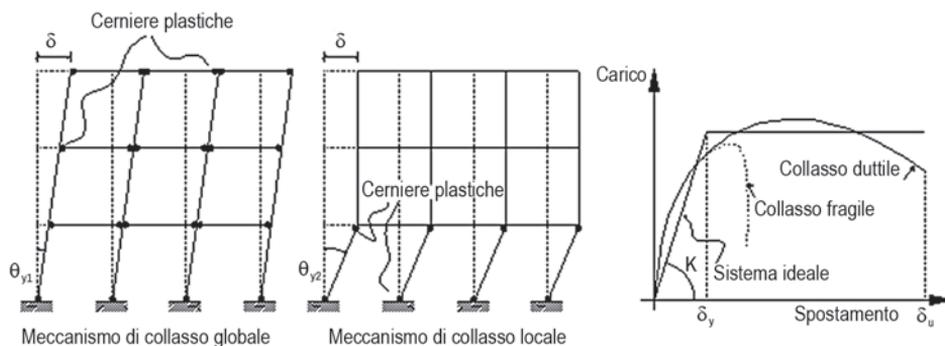


Figura 2.2. Meccanismi di collasso globali e locali per una struttura a telaio in c.a.

Il comportamento globalmente duttile degli edifici di nuova progettazione non è, in genere, riscontrabile negli edifici esistenti; l'osservazione e lo studio dei danni conseguenti a eventi sismici recenti ha evidenziato, infatti, carenze ricorrenti negli edifici esistenti con struttura in c.a., dovute essenzialmente ai criteri di progettazione utilizzati, privi di particolari accorgimenti antisismici, e alle modalità di realizzazione e di esecuzione, soprattutto per quanto riguarda la cura nei dettagli costruttivi e le caratteristiche meccaniche dei materiali impiegati.

Per ragioni legate alla zonazione sismica italiana, infatti, gli edifici con struttura a telaio in c.a. erano progettati per resistere, sostanzialmente fino agli anni '70, ai soli carichi verticali; in ragione di ciò, invece di conseguire un sistema strutturale a "travi deboli – pilastri forti", tipico della progettazione in capacità, si sono realizzate strutture a "travi forti – pilastri deboli", con conseguenze talvolta disastrose, come diversi eventi sismici hanno dimostrato nel corso degli anni.

L'Italia è, ad oggi, uno dei paesi europei caratterizzato dal maggior livello di vulnerabilità sismica, intendendo con tale termine e secondo la definizione fornita dal Dipartimento di Protezione Civile *la propensione di una struttura a subire un danno di un determinato livello a fronte di un evento sismico di una data intensità*.

L'elevata vulnerabilità sismica del patrimonio edilizio esistente è in parte legata all'assenza, almeno fino ai primi anni '80, di un'efficace valutazione dell'effettiva pericolosità sismica del territorio nazionale, in parte alla mancanza di specifici codici normativi in grado di portare alla realizzazione di fabbricati capaci di sopportare un livello di azione orizzontale commisurato alla reale pericolosità sismica.

A riprova di ciò è utile riferirsi al Regio Decreto-Legge 22 novembre 1937 n. 2105 (*Norme tecniche di edilizia con speciali prescrizioni per le località colpite dai terremoti*), una delle prime normative nazionali significative in materia di costruzioni in zona sismica. Esso individuava due possibili zone a intensità decrescente dell'azione sismica (zona sismica di 1° categoria e di 2° categoria) e, di conseguenza, attribuiva ad una delle due categorie il territorio dei comuni ritenuti sismici in forza di un'analisi dei danni conseguenti a terremoti avvenuti in passato, costituendo così un elenco

di comuni ritenuti sismici da aggiornare progressivamente per includere nuove aree colpite da eventi sismici successivi (figura 2.3a).

Per ciascuna categoria il R.D. 2105/1937 forniva specifiche prescrizioni in merito alle caratteristiche geometriche, dimensionali (numero e altezza massima dei piani) e di esecuzione dei fabbricati, precisando inoltre l'entità delle azioni da impiegare per il dimensionamento degli elementi strutturali. In particolare, oltre al peso proprio degli elementi strutturali e non strutturali e ai carichi accidentali, le azioni legate al sisma erano valutate come aliquota dei carichi verticali, in accordo con quanto di seguito riportato.

EDIFICI IN ZONA SISMICA DI 1° CATEGORIA

Per tenere conto dell'accelerazione sismica dipendente dal moto sussultorio si applicavano carichi verticali ottenuti incrementando del 40% la somma del peso proprio e di 1/3 del sovraccarico accidentale.

Per tenere conto dell'accelerazione sismica dipendente dal moto ondulatorio si applicavano, in corrispondenza delle masse delle varie parti dell'edificio, forze orizzontali (agenti secondo due direzioni ortogonali ed in entrambi i versi) aventi intensità pari al 10% dei pesi delle masse considerate, qualunque fosse l'altezza e il numero di piani dell'edificio.

EDIFICI IN ZONA SISMICA DI 2° CATEGORIA

Per tenere conto dell'accelerazione sismica dipendente dal moto sussultorio si applicavano carichi verticali ottenuti incrementando del 25% la somma del peso proprio e di 1/3 del sovraccarico accidentale.

Per tenere conto dell'accelerazione sismica dipendente dal moto ondulatorio si applicavano, in corrispondenza delle masse delle varie parti dell'edificio, forze orizzontali (agenti secondo due direzioni ortogonali ed in entrambi i versi) aventi intensità pari al 5% dei pesi delle masse considerate, qualunque fosse l'altezza e il numero di piani dell'edificio.

La metodologia progettuale sopra descritta ha portato alla realizzazione di edifici frequentemente caratterizzati da dettagli costruttivi carenti, anche se localizzati nelle zone sismiche, ossia in zone nelle quali si prevedevano specifiche accortezze nei confronti delle azioni sismiche.

Con la legge 2 febbraio 1974 n. 64 (*Provvedimenti per le costruzioni con particolari prescrizioni per le zone sismiche*) e il successivo D.M. 03/03/1975 (*Approvazione delle norme tecniche per le costruzioni in zone sismiche*) furono introdotte alcune ulteriori precisazioni per il calcolo delle strutture in zona sismica: gli effetti dell'azione sismica venivano valutati effettuando un'analisi statica con due sistemi di forze applicate, uno orizzontale parallelo alla direzione prevista per il sisma (eq. 2.1) e

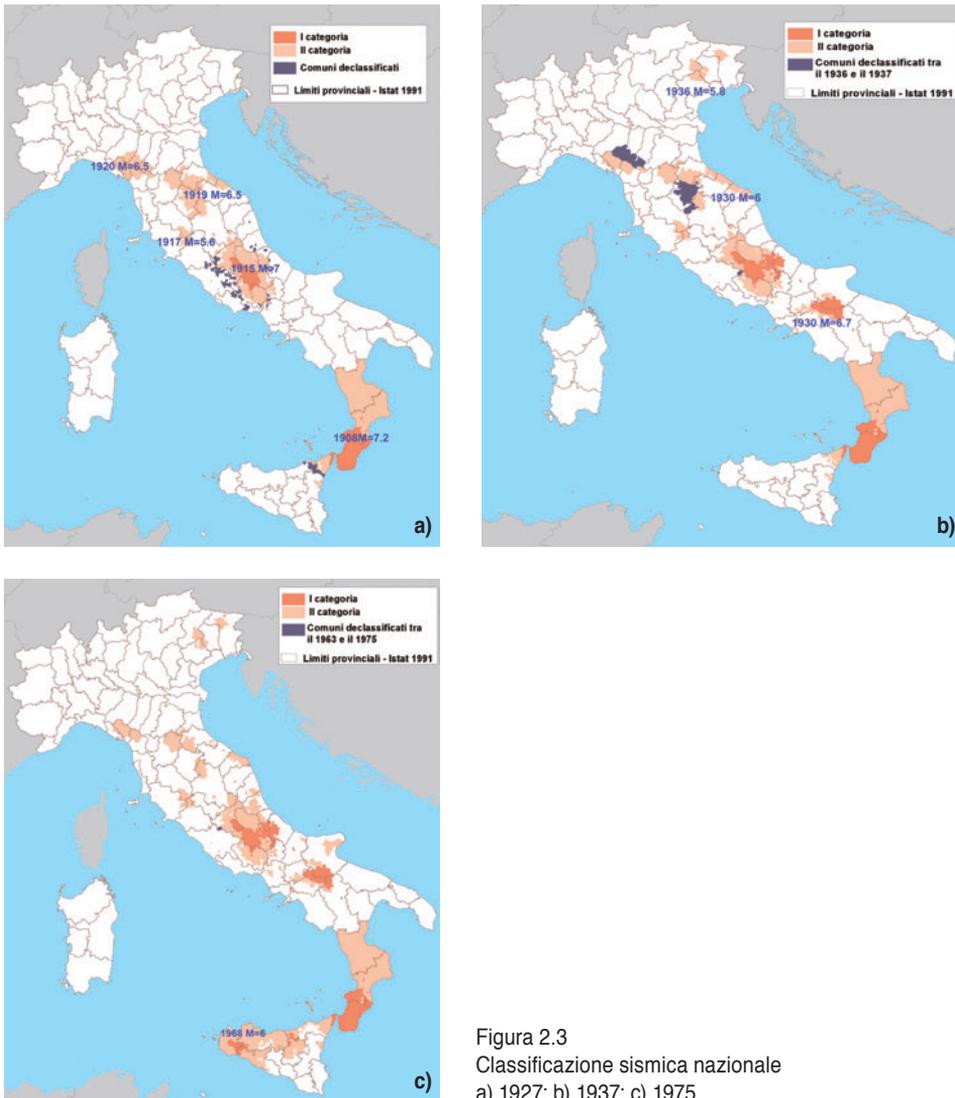


Figura 2.3
 Classificazione sismica nazionale
 a) 1927; b) 1937; c) 1975

uno verticale (eq. 2.2), entrambi proporzionali alle masse coinvolte, opportunamente corretti mediante l'applicazione di appositi coefficienti:

$$F_h = C \cdot R \cdot W \tag{2.1}$$

$$F_v = m \cdot C \cdot W^2 \tag{2.2}$$

² C è un coefficiente legato alla sismicità del sito su cui sorge la costruzione d'interesse, W è il peso complessivo della costruzione, R è il coefficiente di risposta per la direzione considerata e m è un coefficiente generalmente pari a 2.

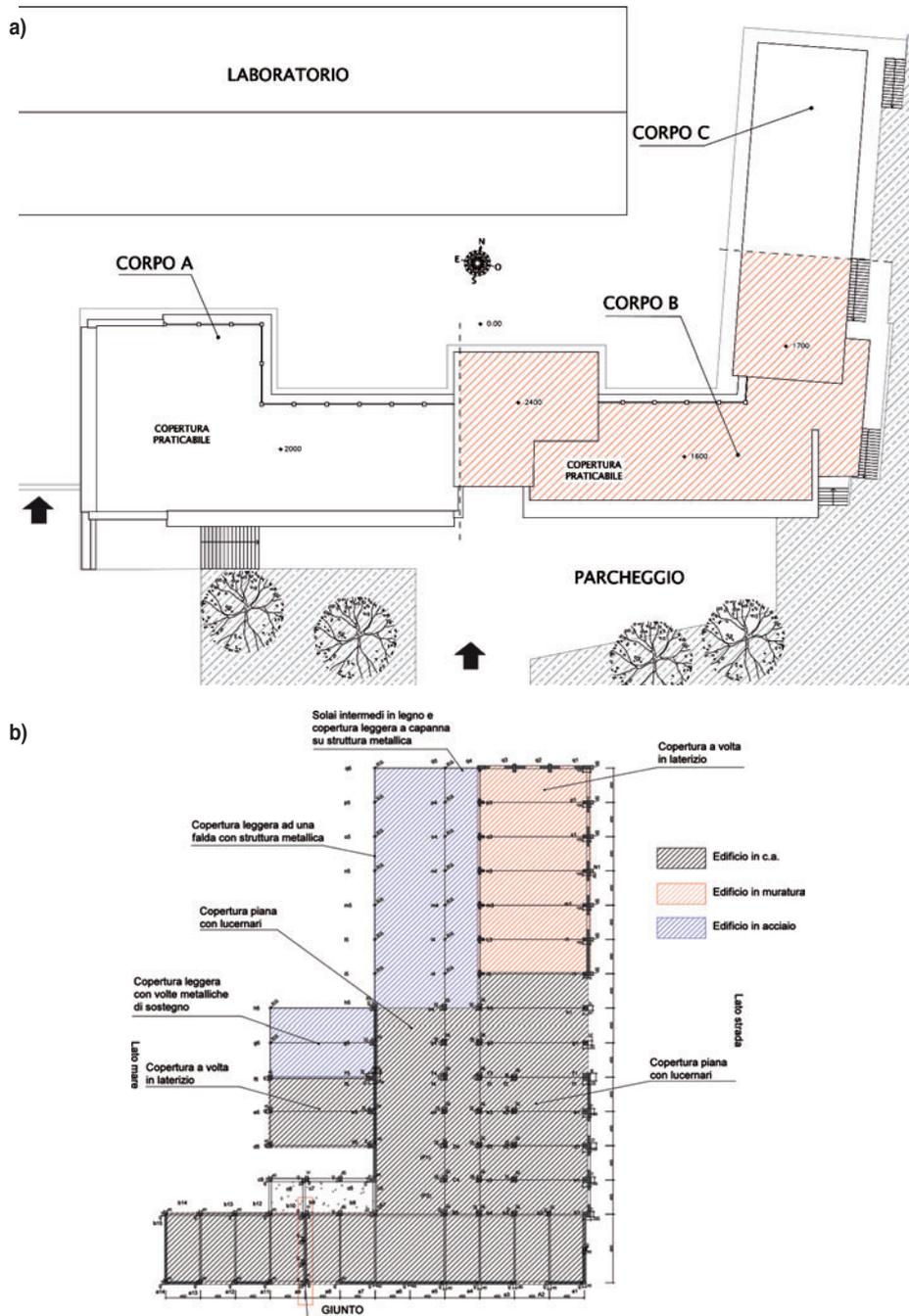
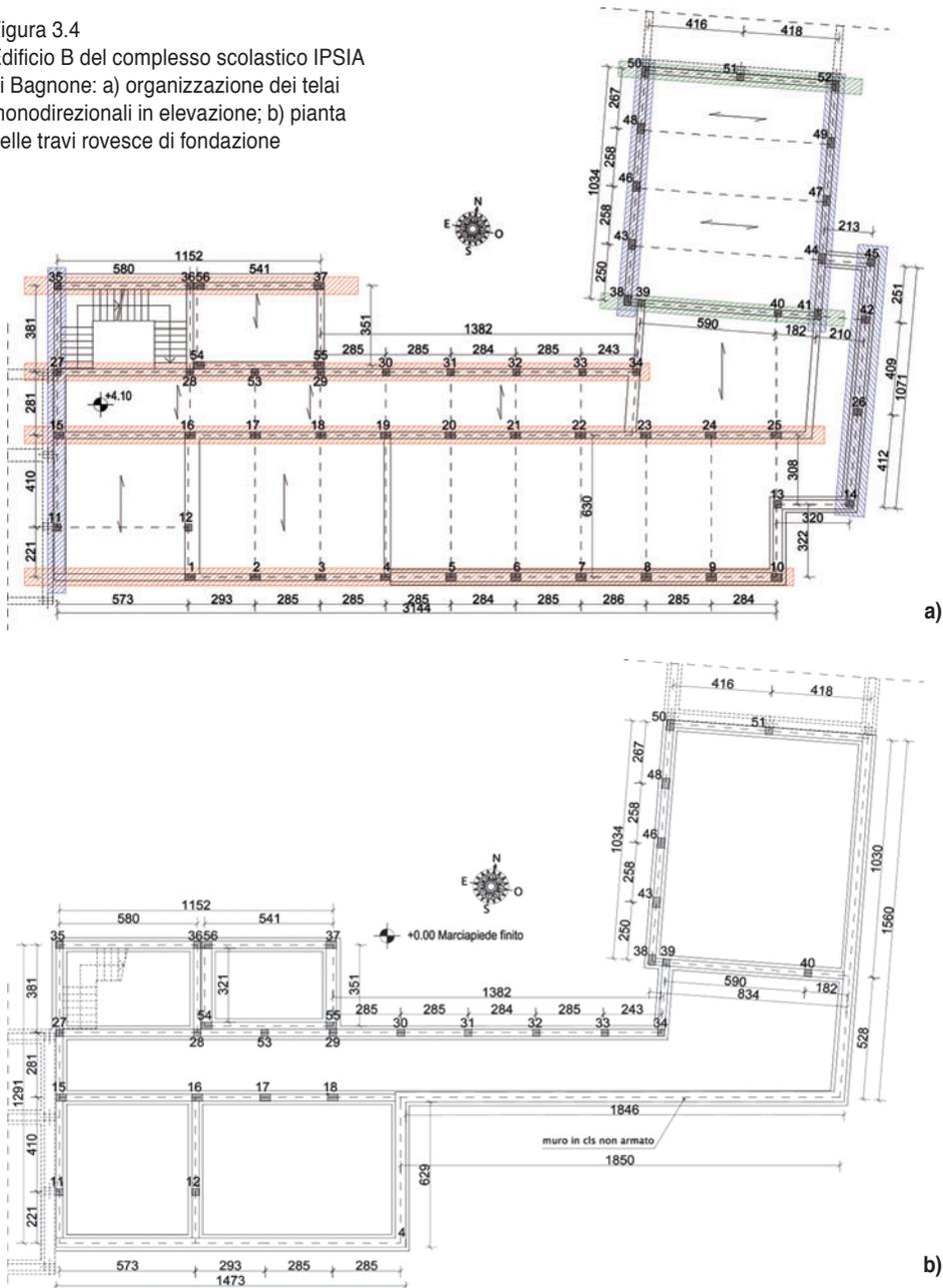


Figura 3.3. Individuazione di giunti tecnici e strutturali fra edifici adiacenti: a) complesso scolastico IPISIA Pacinotti, Bagnone (MS); b) edificio cloro liquido presso stabilimento Solvay di Rosignano Marittimo (LI)

Le fondazioni della struttura devono inoltre essere fedelmente rilevate; in particolare si deve individuare la presenza di fondazioni isolate (plinti di fondazione) o continue (travi rovesce o platee) e soprattutto l'esistenza di elementi di collegamento tra dette fondazioni, in entrambe le direzioni principali del fabbricato (figura 3.4).

Figura 3.4
Edificio B del complesso scolastico IPSIA di Bagnone: a) organizzazione dei telai monodirezionali in elevazione; b) pianta delle travi rovesce di fondazione



Il fattore di confidenza deve essere impiegato per la stima della resistenza a compressione del calcestruzzo e a trazione dell'acciaio di armatura da impiegare in sede di verifica. In particolare, nel caso di edifici in cemento armato, è necessario effettuare una ulteriore precisazione, distinguendo tra elementi “duttili” ed elementi “fragili”, in funzione del meccanismo di collasso attivabile.

Vengono definiti “elementi o meccanismi duttili” le travi in c.a. sottoposte a sollecitazioni flettenti e i pilastri a presso-flessione deviata in funzione del valore dello sforzo normale presente; sono indicati come “elementi o meccanismi fragili” le travi e i pilastri sottoposti a sollecitazioni di taglio.

La resistenza del materiale da impiegare nella verifica di elementi/meccanismi duttili si ottiene dividendo il valore medio ottenuto dalle prove per il fattore di confidenza adottato (eq. 3.1); nel caso di elementi/meccanismi fragili, invece, il valore medio ottenuto dalle prove deve essere diviso sia per il fattore di confidenza sia per il coefficiente parziale di sicurezza (eq. 3.2), al fine di garantire una maggiore sicurezza nei confronti dell'attivazione di meccanismi improvvisi:

$$f_c = \frac{f_m}{FC} \quad (3.1)$$

$$f_c = \frac{f_m}{FC \cdot \gamma_m} \quad (3.2)$$

3.3. Caratterizzazione meccanica del suolo di fondazione

L'analisi della vulnerabilità sismica di un fabbricato esistente richiede la conoscenza dettagliata delle caratteristiche del terreno su cui sorge la costruzione. Le informazioni relative al suolo di fondazione sono necessarie per due motivi principali:

1. la corretta valutazione dell'entità dell'azione sismica agente sul fabbricato in analisi e l'eventuale individuazione di effetti locali di amplificazione;
2. la modellazione dell'interazione tra terreno e struttura e l'inserimento di un vincolo capace di rappresentare la situazione effettiva nel modello di calcolo numerico impiegato nelle verifiche.

Esistono varie tipologie di prova per la caratterizzazione del suolo di fondazione: prove sismiche a rifrazione, prove di tipo MASW, prove down-hole e cross-hole e prove geotecniche.

Si possono eseguire campagne di indagine sismica “a rifrazione” impiegando onde P (longitudinali) e onde SH (trasversali), dalle quali viene valutata la velocità di propagazione nel sottosuolo; elaborando i dati ottenuti valutando il livello di compattezza dei vari strati fino ad arrivare al bedrock si può ottenere un profilo sismo stratigrafico lungo l'allineamento dei punti di misura. Questa metodologia è stata

ampiamente impiegata nell'ambito del Progetto Valutazione Effetti Locali (VEL) della Regione Toscana, permettendo la classificazione di buona parte del territorio a maggior rischio sismico della regione considerata, tra cui le aree della Garfagnana, Lunigiana, Mugello e Valtiberina (figura 3.7).

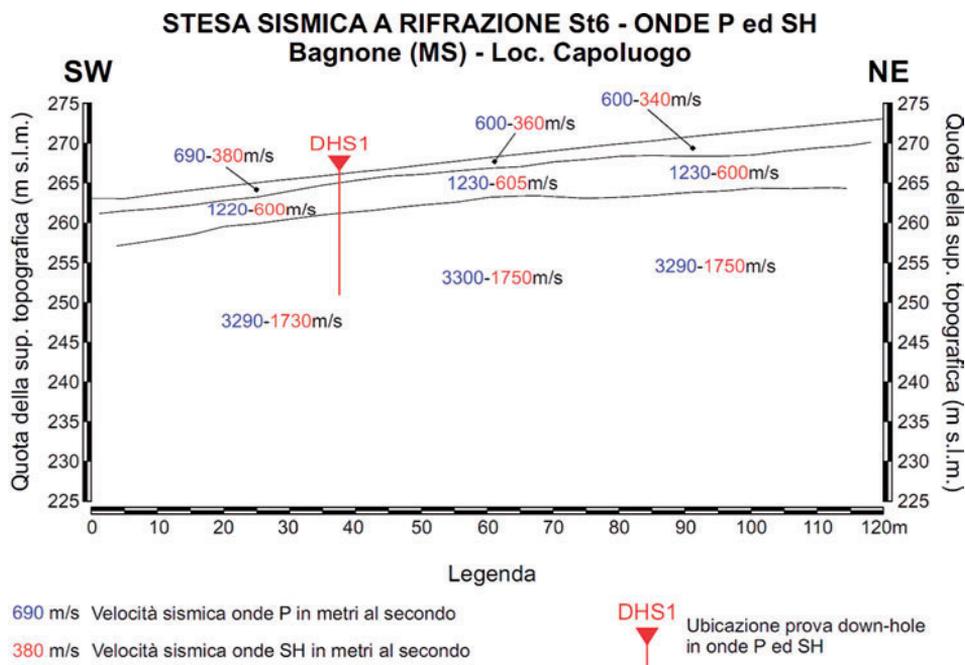


Figura 3.7. Sezione sismostratigrafica ottenuta per onde P e SH nel comune di Bagnone (MS) (fonte: www.rete.toscana.it)

L'indagine MASW (*Multi-Channel Analysis of Surface Waves*) si basa sullo studio della propagazione delle onde superficiali (onde di Rayleigh); esistono due diverse metodologie di analisi, definite metodo "attivo" e metodo "passivo": nel primo caso, le onde superficiali generate da una sorgente impulsiva posta in corrispondenza del piano di campagna vengono registrate da numerosi ricevitori generalmente allineati e a breve distanza l'uno dall'altro. Nel secondo caso, mantenendo sempre i punti di misura nella solita configurazione, si valutano gli effetti prodotti da rumore di fondo (di sorgenti naturali o meno: vento, traffico etc.). Le due metodologie vengono impiegate in modo solitamente combinato in quanto relative a bande di frequenza diverse e rispettivamente legate alla parte più superficiale (fino a 20-30 m di profondità) e più profonda del sottosuolo (oltre 30 m).

I dati delle registrazioni, opportunamente trattati, permettono quindi di ottenere dei profili sismo-stratigrafici del suolo e una stima del parametro della $V_{s,30}$ con conseguente classificazione del terreno al fine della progettazione o analisi sismica.

Una delle prove più attendibili e più accurate per la caratterizzazione meccanica dei terreni è la prova di tipo down-hole (Gasperini e Signanini 1983). Anche in questo caso, si determina la velocità di propagazione delle onde di compressione (onde P) e delle onde di taglio (onde S), opportunamente generate sulla superficie del terreno, attraverso la valutazione del tempo impiegato per raggiungere i ricevitori posti a distanza nota dalla sorgente.

Esistono inoltre prove di tipo cross-hole, simili a quelle precedentemente descritte (anche in questo caso è richiesta l'esecuzione di fori in profondità nel terreno) ma caratterizzate da una affidabilità ancora superiore nella stima dei profili di velocità delle onde P e SH.

Attraverso le prove finora descritte è possibile quindi stimare, concordemente a quanto richiesto da normativa, il parametro $V_{s,30}$ (velocità di propagazione delle onde di taglio entro 30 m di profondità), secondo l'espressione (3.3) e ricavare pertanto la corrispondente categoria di terreno (v. Tabella 3.2.II **NTC08**):

$$V_{s,30} = \frac{30}{\sum_{i=1,N} \frac{h_i}{V_{s,i}}} \quad [\text{m/s}] \quad (3.3)$$

Le indagini geotecniche di tipo penetrometrico standard (*SPT – Standard Penetration Test*) permettono di ricavare informazioni sulle caratteristiche di un terreno mediante l'infissione di un campionatore standardizzato fatto procedere mediante un certo numero di colpi dovuti alla caduta di un maglio di un determinato peso. Si effettuano misurazioni per 3 avanzamenti consecutivi di 15 cm ciascuno valutando il numero di colpi necessari (N_{spt}) a permettere ciascun avanzamento.

Con una prova di tipo SPT è possibile ottenere una stima della categoria di terreno (eq. 3.4) e della capacità portante del medesimo tramite opportune formule di correlazione (Bowles 1997):

$$N_{SPT,30} = \frac{\sum_{i=1,M} h_i}{\sum_{i=1,M} \frac{h_i}{N_{SPT,i}}} \quad [\text{m/s}] \quad (3.4)$$

3.4. Valutazione delle azioni agenti sulla costruzione

Concordemente a quanto previsto dalle **NTC08**, la valutazione delle azioni agenti sulla costruzione analizzata prevede il calcolo di:

- pesi propri di tutti gli elementi strutturali (G_1);
- pesi permanenti portati dagli elementi non strutturali (G_2);
- azioni variabili (carichi di esercizio, azioni del vento e della neve Q);
- azione sismica (E).

La combinazione delle azioni da impiegare per la valutazione della vulnerabilità sismica è quella riportata al paragrafo §2.5.3 delle **NTC08** e richiamata dall'espressione (3.5):

$$G_1 + G_2 + P + E + \sum_j \psi_{2j} Q_{kj} \quad (3.5)$$

La valutazione della risposta del fabbricato all'azione sismica deve essere effettuata unitamente a quella nei confronti degli stati limite ultimi (SLU), per carichi statici e gravitazionali, definita in accordo all'espressione (3.6):

$$\gamma_{G1} G_1 + \gamma_{G2} G_2 + \gamma_P P + \gamma_Q \psi_{01} Q_{k1} + \psi_{02} Q_{k2} + \psi_{03} Q_{k3} + \dots \quad (3.6)$$

Devono essere accuratamente valutati i carichi permanentemente gravanti sulla costruzione, derivanti dagli elementi strutturali tipo orizzontamenti e coperture, nonché quelli legati ad eventuali tramezzature e tamponamenti, impianti, massetti e pavimentazioni: questi infatti contribuiscono alla definizione della massa sismica dell'edificio da considerare nel caso in cui vengano eseguite analisi di tipo dinamico, e definite in accordo con l'espressione (3.7):

$$G_1 + G_2 + \sum_j \psi_{2j} Q_{kj} \quad (3.7)$$

A tal fine, risultano di fondamentale importanza i saggi e le indagini preventivamente eseguite per individuare le varie tipologie di orizzontamento (solai, coperture, volte, etc.) presenti.

È inoltre necessario definire con cura gli effettivi carichi accidentali gravanti sulla costruzione, specialmente nel caso in cui arredi, scaffalature, soppalchi e altro, per quanto inseriti ai fini della destinazione funzionale prevista, costituiscano di fatto un carico permanente, del quale si deve debitamente tenere conto in sede di analisi e verifica.

Per quanto riguarda la definizione dell'azione sismica, devono essere effettuate alcune precisazioni. Nel caso in cui la verifica di vulnerabilità sismica venga effettuata mediante analisi statica o dinamica lineare, l'azione sismica è definita mediante lo spettro di risposta in accelerazione, la cui formulazione è legata all'individuazione di una serie di parametri fondamentali.

L'azione sismica di progetto è definita in funzione della "pericolosità sismica di base" del sito su cui sorge la costruzione oggetto di analisi. "La pericolosità sismica è definita in termini di accelerazione orizzontale massima attesa a_g in condizioni di campo libero su sito di riferimento rigido con superficie orizzontale (di categoria A), nonché di ordinate dello spettro di risposta elastico in accelerazione ad essa corrispondente $S_e(T)$, con riferimento a prefissate probabilità di eccedenza P_{vr} nel periodo di riferimento V_r "⁷.

⁷ D.M. 14/01/2008, *Norme tecniche per le costruzioni*, cap. 3 "Azione sismica", par. 3.2.

Il periodo di riferimento V_r è definito mediante l'espressione (3.8) (v. §2.4.1 **NTC08**):

$$V_R = V_N \cdot C_U \quad (3.8)$$

in cui

V_R : periodo di riferimento dell'azione sismica

V_N : vita nominale della costruzione

C_U : coefficiente d'uso.

Il valore del coefficiente d'uso (C_U) dipende dalla classe d'uso della costruzione, come definita al §2.4.2 delle **NTC08**. La vita nominale (V_N) di un edificio è definita come il “numero di anni nel quale la struttura, purché soggetta alla manutenzione ordinaria, deve poter essere usata per lo scopo al quale è destinata”.

Il periodo di ritorno dell'azione sismica da considerare viene pertanto definito in base all'espressione (3.9), funzione della probabilità di superamento (P_{vr}) nel periodo di riferimento sopra definito, una volta individuato lo stato limite da verificare per la costruzione considerata:

$$T_R = - \frac{V_R}{\ln(1 - P_{VR})} \quad (3.9)$$

Nel caso di edifici esistenti, le **NTC08** prevedono che la valutazione della sicurezza, nonché l'eventuale progettazione degli interventi, vengano effettuate con riferimento ai soli Stati Limite Ultimi; le verifiche agli SLU possono essere eseguite rispetto alla condizione di Salvaguardia della Vita Umana SLV o, in alternativa, alla condizione del collasso SLC, avendo definito questi ultimi come:

- *Stato limite di Salvaguardia della Vita (SLV)*: a seguito di terremoto la costruzione subisce rotture e crolli dei componenti non strutturali ed impiantistici e significativi danni dei componenti strutturali cui si associa una perdita significativa di rigidità nei confronti delle azioni orizzontali; la costruzione conserva invece una parte della resistenza e della rigidità per azioni verticali e un margine di sicurezza nei confronti del collasso per azioni sismiche orizzontali;
- *Stato limite di Collasso (SLC)*: a seguito del terremoto la costruzione subisce gravi rotture e crolli dei componenti non strutturali ed impiantistici e danni molto gravi dei componenti strutturali; la costruzione conserva ancora un margine di sicurezza per azioni verticali ed un esiguo margine di sicurezza nei confronti del collasso per azioni orizzontali.

Alcuni dei parametri necessari a definire lo spettro di risposta elastico in termini di accelerazione sono forniti direttamente in relazione al luogo su cui sorge l'oggetto di intervento e al periodo di ritorno sopra definito (F_0, a_g, T_c^*), per gli altri sono fornite specifiche indicazioni all'interno delle **NTC08**.

Dallo spettro di risposta elastico si ricava lo spettro di progetto, il quale tiene conto

4. Dispositivi per la dissipazione d'energia

4.1. Introduzione

Il capitolo è dedicato alla descrizione dei sistemi di dissipazione di energia più diffusi nel miglioramento delle prestazioni sismiche di edifici esistenti a telaio. La trattazione non intende quindi fornire una panoramica esaustiva dei diversi sistemi di protezione sismica basati sulla dissipazione di energia, per la quale si rimanda alla lettura di testi dedicati (NIST 1996, Soong e Dargush 1997, Christopoulos e Filiatrault 2006, Symans et al. 2008), ma presenta gli aspetti di maggior interesse progettuale per alcune soluzioni efficaci ed applicabili nell'ambito della normativa nazionale.

Nella descrizione delle caratteristiche di una famiglia piuttosto ampia di dispositivi si propone una suddivisione tra quelli basati su meccanismi dissipativi legati alla velocità (viscosi e viscoelastici) e quelli basati su meccanismi dissipativi legati agli spostamenti (isteretici). Per i diversi sistemi si fornisce inizialmente una descrizione qualitativa della risposta accompagnata da considerazioni generali su vantaggi e limiti nel loro utilizzo per la protezione sismica di edifici esistenti. Si rimanda al capitolo successivo per indicazioni più puntuali sui metodi di progetto e dimensionamento degli interventi.

Il comportamento costitutivo e le caratteristiche di risposta sono successivamente discusse sulla base di modelli reologici estremamente semplici con l'intento di evidenziare le differenze di comportamento e sintetizzare i parametri fondamentali che ne caratterizzano la risposta ciclica e dinamica. Si forniscono inoltre alcune indicazioni per la definizione di modelli più raffinati che tengano conto di aspetti secondari ma comunque rilevanti per la valutazione di dettaglio della risposta sismica. Il capitolo è completato da una parte dedicata alle procedure di qualifica, accettazione e manutenzione che ne rendono possibile l'utilizzo nel processo costruttivo, con specifici riferimenti alle norme attualmente in vigore.

4.2. Dispositivi viscosi e viscoelastici

4.2.1. Aspetti generali

I dispositivi viscosi e viscoelastici si basano su un meccanismo elementare, rappresentato in figura 4.1a, in cui la forza reattiva F_d è proporzionale alla velocità di deformazione $\dot{x}(t)$. La sua natura dissipativa può essere chiarita immaginando di applicare ad un dispositivo di questo tipo una forza esterna variabile nel tempo $F_d(t)$. Durante l'applicazione della forza si misurerà una deformazione $x(t)$, corrispondente al moto relativo tra i punti di estremità del dispositivo, e una velocità di deformazione $\dot{x}(t)$ sempre nella direzione della forza applicata, al termine dell'applicazione della forza ($F_d = 0$) il dispositivo si fermerà in corrispondenza della posizione finale. La potenza $F_d \dot{x}$ del lavoro fatto dall'esterno ha sempre lo stesso segno durante tutto il percorso e l'energia in ingresso risulta completamente persa (dissipata) al termine del processo. Pur nella sua semplicità, questo meccanismo dissipativo risulta particolarmente efficace nella descrizione approssimata di situazioni complesse ed è ampiamente utilizzato nello studio della risposta sismica.

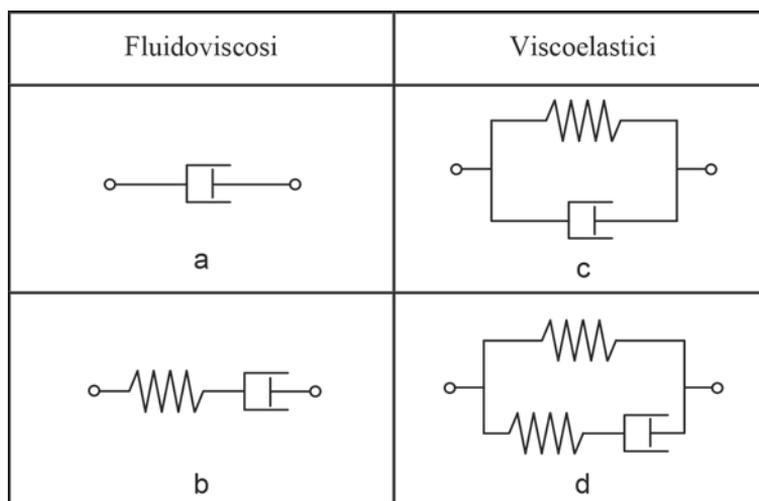


Figura 4.1. Modelli reologici del comportamento di sistemi dipendenti dalla velocità: a) modello viscoso di Newton; b) modello viscoso di Maxwell; c) modello elasto-viscoso di Kelvin; d) modello elasto-viscoso a tre elementi

Sistemi viscosi idonei alla protezione sismica sono stati realizzati sfruttando la resistenza al movimento di fluidi viscosi. I sistemi più semplici sono stati ottenuti immergendo una lamina all'interno di una parete riempita con fluido-viscoso; in figura 4.2 è descritto il sistema prodotto dalla Sumitomo Construction Company utilizzato negli anni '90 in Giappone e oggetto di diversi studi teorici e sperimentali (Arima 1988, Miyazaki Mitsusaka 1992). Dispositivi più sofisticati, che permettono un mag-

gior controllo della risposta al variare dell'ampiezza e della temperatura, sono stati derivati dall'industria meccanica (figura 4.2). Tali sistemi, diffusi inizialmente dalla Taylor Devices e oggetto di studi dagli inizi degli anni '90 (Constantinou and Symans 1992, Constantinou et al 1993), sono costituiti da un cilindro riempito con un fluido viscoso, nel caso citato olio silconico, all'interno del quale scorre un pistone dotato di orifizio che permette il passaggio del fluido.

Le caratteristiche del fluido e la geometria dell'orifizio determinano la relazione di proporzionalità. Mediante opportuni accoppiamenti fluido-orifizio si possono ottenere risposte non lineari in cui la forza è proporzionale ad una potenza della velocità:

$|F_d| \propto |\dot{x}|^\alpha$ (4.1) ottenendo le relazioni forza-velocità descritte in figura 4.3.

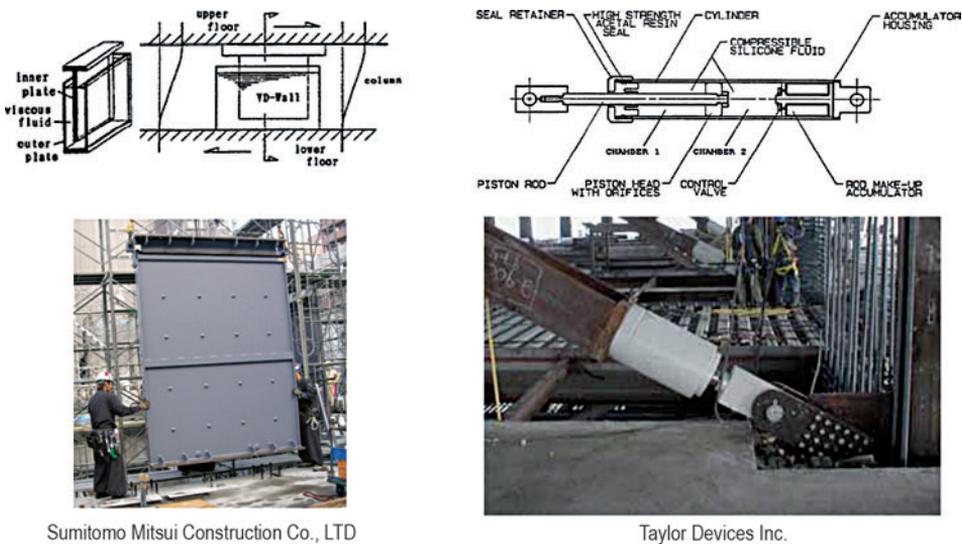


Figura 4.2. Dissipatori sismici viscosi

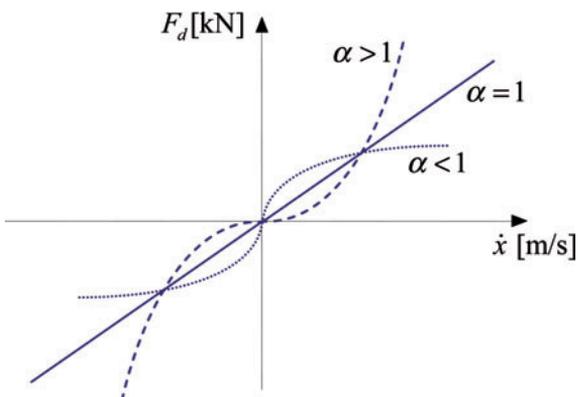


Figura 4.3
Relazioni forza e velocità per dissipatori viscosi non lineari con diversi valori del coefficiente α