

CONSULTA LA SCHEDA DEL LIBRO

Dora Foti ~ Michele Mongelli



Dario Flaccovio Editore

Isolatori sismici

per edifici esistenti e di nuova costruzione

Principi fondamentali - Criteri di progettazione -
Dettagli costruttivi



- Rischio sismico e controllo strutturale, sistemi di isolamento sismico ✓
- Comportamento degli edifici isolati alla base ✓
- Concezione strutturale nell'impiego degli isolatori sismici ✓
- Esempi di applicazione, studi preliminari, esame delle prescrizioni normative ✓

Dora Foti Michele Mongelli

**ISOLATORI SISMICI
PER EDIFICI ESISTENTI
E DI NUOVA COSTRUZIONE**

PRINCIPI FONDAMENTALI - CRITERI DI PROGETTAZIONE - DETTAGLI COSTRUTTIVI



Dario Flaccovio Editore

Dora Foti - Michele Mongelli

ISOLATORI SISMICI PER EDIFICI ESISTENTI E DI NUOVA COSTRUZIONE

ISBN 978-88-579-0100-8

© 2011 by Dario Flaccovio Editore s.r.l. - tel. 0916700686

www.darioflaccovio.it info@darioflaccovio.it

Prima edizione: settembre 2011

Foti, Dora <1962>

Isolatori sismici per edifici esistenti e di nuova costruzione : principi fondamentali, criteri di progettazione,

dettagli costruttivi / Dora Foti, Michele Mongelli - Palermo : D. Flaccovio, 2011

ISBN 978-88-579-0100-8

1. Costruzioni antisismiche. I. Mongelli, Michele <1979>.

624.1762 CDD-22

SBN Pal0235579

CIP - Biblioteca centrale della Regione siciliana "Alberto Bombace"

Stampa: Tipografia Priulla, Palermo, settembre 2011

Nomi e marchi citati sono generalmente depositati o registrati dalle rispettive case produttrici.

L'editore dichiara la propria disponibilità ad adempiere agli obblighi di legge nei confronti degli aventi diritto sulle opere riprodotte.

La fotocopiatura dei libri è un reato.

Le fotocopie per uso personale del lettore possono essere effettuate nei limiti del 15% di ciascun volume/fascicolo di periodico dietro pagamento alla SIAE del compenso previsto dall'art. 68, commi 4 e 5, della legge 22 aprile 1941 n. 633. Le riproduzioni effettuate per finalità di carattere professionale, economico o commerciale o comunque per uso diverso da quello personale possono essere effettuate solo a seguito di specifica autorizzazione rilasciata dagli aventi diritto/dall'editore.

INDICE

Preface.....	pag.	7
Prefazione	»	9

PARTE PRIMA Quadro teorico di riferimento

1. Rischio sismico e controllo strutturale

1.1. Valutazione e mitigazione del rischio sismico.....	»	13
1.2. Controllo attivo, passivo, semi-attivo, ibrido	»	18
1.2.1. Controllo attivo.....	»	19
1.2.2. Controllo passivo.....	»	22
1.2.3. Controllo semi-attivo.....	»	23
1.2.4. Controllo ibrido	»	25
1.3. Principi di base e implicazioni progettuali dell'isolamento sismico delle strutture	»	29
1.4. Cenni storici sullo sviluppo dei sistemi di isolamento	»	36
1.5. Applicazioni particolari dell'isolamento sismico	»	44

2. Sistemi di isolamento sismico: tecnologia e modellazione

2.1. Classificazione degli isolatori	»	51
2.2. Caratteristiche meccaniche e parametri progettuali.....	»	69
2.2.1. Isolatori elastomerici	»	69
2.2.2. Isolatori elastomerici con nucleo in piombo (LRB)	»	85
2.2.3. Isolatori a pendolo scorrevole (FPS)	»	87
2.2.4. Nota sulle prestazioni degli isolatori a scorrimento	»	90
2.3. Modellazione del comportamento sperimentale	»	90
2.3.1. Modello lineare equivalente	»	91
2.3.2. Modello non-lineare	»	94

3. Il comportamento degli edifici isolati alla base

3.1. Dinamica delle strutture isolate alla base	»	101
3.2. Criteri di applicazione dei metodi di analisi strutturale.....	»	117
3.3. Valutazione delle sollecitazioni indotte dal sisma	»	125

4. La concezione strutturale nell'impiego dell'isolamento sismico

4.1. Criteri di progettazione	»	135
4.2. Valutazioni economiche sulla protezione sismica delle nuove costruzioni	»	144
4.3. Considerazioni sulle tecniche di riabilitazione sismica	»	147
4.4. Criteri di intervento per l'adeguamento sismico di edifici esistenti	»	157

PARTE SECONDA Esperienze applicative

5. L'isolamento sismico per la realizzazione del plesso scolastico "A. Manzoni" a Monteleone di Puglia (FG)

5.1. Descrizione generale dell'edificio	»	163
5.2. Descrizione della sovrastruttura	»	169
5.3. Analisi dei carichi	»	178

5.4.	Dimensionamento del sistema di isolamento	»	191
5.5.	Verifiche strutturali e dettagli costruttivi	»	209
5.6.	Il cantiere e gli aspetti particolari	»	224

6. L'isolamento sismico per il retrofit della scuola elementare "Quasimodo" a Riposto (CT)

a cura di Fabio Neri

6.1.	L'edificio e gli studi preliminari	»	231
6.1.1.	L'edificio scolastico oggetto di intervento.....	»	231
6.1.2.	Sismicità del luogo	»	232
6.1.3.	Quadro normativo di riferimento.....	»	236
6.2.	Progetto dell'intervento	»	236
6.2.1.	Geometria	»	236
6.2.2.	Materiali, dettagli costruttivi e degradi	»	238
6.2.2.1.	Caratteristiche dei materiali	»	238
6.2.2.2.	Dettagli costruttivi	»	239
6.2.2.3.	Degradi.....	»	239
6.2.3.	Carichi e azioni.....	»	240
6.2.3.1.	Analisi dei carichi	»	240
6.2.3.2.	Azione sismica	»	242
6.2.3.3.	Combinazione dell'azione sismica con altre azioni.....	»	243
6.2.3.4.	Masse ed azione sismica	»	243
6.2.4.	Analisi stato di fatto	»	245
6.2.5.	Predimensionamento	»	247
6.2.5.1.	Generalità	»	247
6.2.5.2.	Scelta del periodo e dello smorzamento	»	248
6.2.5.3.	Valutazione e distribuzione delle rigidezze.....	»	252
6.2.5.4.	Sottostruttura.....	»	254
6.2.6.	Modellazione e verifiche della struttura isolata.....	»	255
6.2.7.	Verifiche dei dispositivi	»	259
6.2.7.1.	Stato limite di danno (SLD) e stato limite ultimo (SLU)	»	259
6.2.8.	Giunti e connessioni non strutturali.....	»	262
6.2.8.1.	Stato limite di danno (SLD)	»	262
6.2.8.2.	Stato limite ultimo (SLU).....	»	262
6.3.	Esecuzione	»	264
6.3.1.	Il sistema di isolamento	»	264
6.3.2.	Giunti e collegamenti	»	266
6.4.	Bibliografia	»	276
	BIBLIOGRAFIA	»	277

PREFACE

Seismic isolation is now playing an increasing role in the design of earthquake resistant structures in many parts of the world but there is even now, a reluctance on the part of many structural engineers to venture into what is perceived to be a new and perhaps complicated design procedure. The intention of this book by Professor Dora and Dr. Michele is to show the professional structural engineer that seismic isolation is a simplification of the seismic design process. If used properly it will lead to better buildings with simpler structural systems and although at the present time, design codes do not permit the cost savings that are possible when isolation is used, when codes evolve with more familiarity in the technology, it will eventually lead to less costly structures.

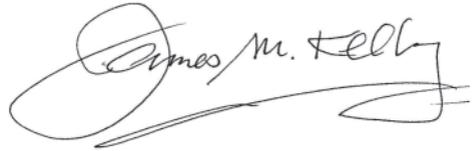
In conventional building types the ground motion in an earthquake is amplified by the structure but in an isolated structure there is a de-amplification of acceleration which means that the structural system can be economically designed to be elastic thus eliminating ductile detailing of structural components. The deformation of the structural system above the isolators is greatly reduced making isolation particularly valuable for buildings that house sensitive and expensive equipment. Relative drift between stories is also reduced thus protecting non-structural components. Seismic isolation is thus very attractive for hospitals, schools and industrial buildings. In many recent earthquakes there have examples where hospitals that experienced little structural damage were rendered unusable by internal damage.

Seismic isolation was first applied more than twenty years ago using natural rubber isolation systems but now there are many types of isolators available and in use in the field. In fact, in most isolation systems that use rubber bearings these are only part of the system and they are combined with steel bars, lead plugs, or other types of damping devices. However, the field is undergoing rapid changes and other systems may emerge.

This text has been written for the professional structural engineer with a background in structural dynamics and an interest in seismic design. Much of the analysis in the text may be applied to all types of isolation systems and code requirements. The technology presented in this book is ideal for the structural engineer who is looking for a cost-effective, reliable strategy for mitigating damage from severe earthquakes for critical structures such as hospitals, emergency operation centers, and nuclear power plants. In addition, recent projects have proved that base isolation has tremendous potential for use in housing projects and schools in highly seismic areas.

The authors have been very effective in gathering together design information on the most useful of the many types of isolation system now in use. The effort that creating this technical monograph has involved has been considerable and the authors must be commended for their work. If this book succeeds in dispelling a prejudice against seismic isolation by many structural engineers, and, in addition, encourages them to adopt this new and innovative technology for mitigating earthquake damage to structures, it will have served its purpose.

James Marshall Kelly
(Professor Emeritus –
University of California at Berkeley)

A handwritten signature in black ink that reads "James M. Kelly". The signature is written in a cursive style with a large, looping initial "J" and a long horizontal stroke at the end.

Prefazione

In molte parti del mondo è possibile rilevare che, mentre da un lato l'isolamento sismico assume un ruolo sempre più importante nella progettazione di strutture sismo-resistenti, al contempo si riscontra una certa riluttanza da parte di molti ingegneri strutturisti nell'avventurarsi in quello che viene percepito come un nuovo approccio progettuale che complica le procedure di calcolo. L'intento degli autori del lavoro è quello di dimostrare che, se l'isolamento sismico è impiegato correttamente, esso costituisce una semplificazione del processo di progettazione antisismica, consentendo di realizzare sistemi strutturali più semplici.

Normalmente, negli edifici tradizionali il moto del suolo è amplificato dalla struttura; nel caso di strutture isolate sismicamente si manifesta invece una riduzione dell'accelerazione che consente una progettazione strutturale in campo elastico, dato che vengono meno le richieste di duttilità delle componenti strutturali. Inoltre, poiché la deformazione della sovrastruttura si riduce notevolmente, l'isolamento sismico risulta particolarmente prezioso per gli edifici che ospitano apparecchiature sensibili e costose. Anche gli spostamenti relativi fra i piani vengono ridotti, proteggendo così i componenti non strutturali.

L'isolamento sismico è quindi auspicabile per strutture di notevole rilevanza quali ospedali, scuole e edifici industriali. A seguito di molti terremoti, ad esempio, ci sono casi in cui gli ospedali, pur avendo subito danni strutturali limitati, sono rimasti inutilizzabili per i gravi danni subiti dalle finiture o dalle apparecchiature. L'isolamento sismico è stato applicato per la prima volta più di venti anni fa, utilizzando dispositivi di isolamento in gomma naturale; attualmente ci sono molti tipi di isolatori disponibili e in uso nel settore. In realtà, nella maggior parte dei sistemi di isolamento che utilizzano appoggi in gomma, questi ultimi costituiscono soltanto una parte dell'intero sistema, essendo spesso combinati con barre di acciaio, spinotti di piombo o altri tipi di dispositivi di protezione sismica. Va poi sottolineato che questo campo di ricerca vive una fase di rapida evoluzione e possono emergere di continuo nuove tecnologie.

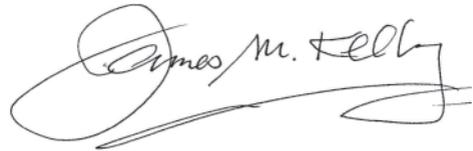
Questo testo è destinato all'ingegnere strutturista professionista con un *background* in dinamica strutturale e interessato alla progettazione antisismica. Gran parte delle analisi nel testo possono essere applicate a tutti i sistemi di isolamento e alle prescrizioni di normativa. La tecnologia presentata in questo libro è l'ideale per l'ingegnere che è alla ricerca di un basso rapporto costo/efficacia e di una strategia affidabile in grado di limitare i danni dovuti a terremoti di intensità rilevante che colpiscono strutture critiche quali ospedali, centri operativi di emergenza e centrali nucleari. Inoltre, i progetti recentemente sviluppati hanno

dimostrato che l'isolamento di base ha un enorme potenziale se applicato all'edilizia residenziale e scolastica in zone a sismicità elevata.

In conclusione, gli autori hanno fatto un ottimo lavoro nel riunire le informazioni più utili per il progetto dei differenti tipi di sistemi di isolamento ora in uso. Lo sforzo profuso nella redazione di questo libro tecnico è stato notevole e gli autori devono essere lodati per il loro lavoro. Se questo libro riesce a fugare ogni pregiudizio contro l'isolamento sismico e, soprattutto, incoraggia molti progettisti ad adottare questa nuova e innovativa tecnologia al fine di mitigare i danni alle strutture dovuti ai terremoti, avrà raggiunto il suo scopo.

James Marshall Kelly

(Professor Emeritus –
University of California at Berkeley)

A handwritten signature in black ink that reads "James M. Kelly". The signature is stylized with a large, looping initial "J" and a long horizontal stroke at the bottom.

PARTE PRIMA
Quadro teorico di riferimento

1. RISCHIO SISMICO E CONTROLLO STRUTTURALE

1.1. Valutazione e mitigazione del rischio sismico

Il corrente approccio metodologico al problema della sicurezza sismica delle costruzioni civili si basa sui concetti e sulle definizioni di teoria dei fenomeni aleatori e analisi del rischio contenuti nel glossario dell'Istituto internazionale per la ricerca in Ingegneria sismica (EERI, Earthquake Engineering Research Institute). Tale documento, seppure datato (la prima edizione risale al 1984), viene ancora considerato come un riferimento univoco e autorevole, da cui trarre spunto per le proposte di nuovi glossari.

Il rischio è ivi definito come la probabilità che le perdite attese (sia in termini di vite umane che di danni agli immobili o alle attività economiche) a seguito di un fenomeno accidentale (hazard), in un determinato sito e per un fissato intervallo temporale di esposizione, superino una soglia prestabilita. L'hazard, in particolare, è inteso come un qualsiasi fenomeno fisico (evento tellurico, frana, uragano, etc.) in grado di produrre effetti negativi (danni) sulle attività e sugli insediamenti dell'uomo. In sostanza l'hazard rappresenta la pericolosità del sito. In tale contesto vengono definite vulnerabili tutte quelle componenti (edifici, beni materiali, popolazione, etc.) che, esposte a un hazard di una data severità, esibiscono un'elevata propensione a essere danneggiate. In termini equivalenti, la vulnerabilità è definita come il grado di perdita attesa, a seguito di un determinato livello di hazard, per un dato elemento a rischio.

La stima del rischio, intesa come valutazione delle perdite attese derivanti da tutti i livelli di hazard (ciascuno associato alla sua effettiva probabilità di accadimento), rappresenta un'informazione molto importante ai fini della pianificazione delle attività orientate alla prevenzione e alla mitigazione. Nel caso dei terremoti, ad esempio, la possibilità di valutare le perdite sulla base di un'opportuna simulazione degli eventi tellurici può spingere le pubbliche amministrazioni a un adeguato stanziamento di risorse economiche e tecniche per lo sviluppo di specifici piani per la prevenzione e la riduzione dei danni.

La stima del rischio connesso a un determinato evento comporta, usualmente, due ordini di considerazioni: è necessario, infatti, dapprima valutare l'hazard in ter-

mini probabilistici, ossia determinare la probabilità che il fenomeno si verifichi in una certa area, con una data intensità e in un certo periodo di tempo; successivamente, occorre effettuare l'analisi della vulnerabilità, ossia determinare, mediante opportuni modelli, la risposta degli elementi a rischio nei confronti dell'evento considerato e l'entità dei danni che ne conseguono.

Dalle definizioni date si comprende come il problema sia intrinsecamente aleatorio. La misura delle perdite, ad esempio, dipende dal particolare elemento a rischio considerato: nel caso della popolazione di un dato territorio, essa può essere rappresentata dal numero delle vittime rispetto al numero totale degli abitanti; nel caso dei manufatti edilizi, invece, la vulnerabilità può essere definita in termini di numero di elementi che si prevede subiranno un determinato livello di danno. Il legame esistente tra rischio, hazard e vulnerabilità può essere efficacemente espresso, in termini probabilistici, attraverso la seguente espressione simbolica:

$$\text{Rischio} = \text{Hazard} \cdot \text{Vulnerabilità} \cdot \text{Esposizione}$$

Da tale relazione si comprende come al contemporaneo incremento dell'hazard, ossia della probabilità che l'evento considerato (terremoto, uragano, etc.) si verifichi con una forte intensità, della vulnerabilità e dell'importanza (esposizione) degli elementi in esame, corrisponda una maggiore probabilità che l'evento dia luogo a significative perdite.

Il caso del potenziale crollo di un edificio in seguito a un sisma può servire a illustrare meglio i concetti: il rischio (crollo) è tanto più grande quanto più severo è l'hazard (intensità del terremoto atteso); a parità di hazard (stessa ubicazione), il rischio è tanto più grande quanto più elevata è la propensione dell'edificio a essere danneggiato dal sisma (vulnerabilità); infine, a parità di hazard e vulnerabilità, le perdite causate dal terremoto (in termini di vite umane, di valuta, di valenza artistica, di organizzazione dei soccorsi, etc.) sono tanto maggiori quanto maggiore è la rilevanza sociale della costruzione, ossia quanto più elevata è la sua esposizione (importanza strategica).

Da questo punto di vista si può senz'altro convenire come l'Italia sia un paese a elevato rischio sismico. Infatti, sulla base della frequenza e dell'intensità degli eventi sismici registrati in passato, si deduce che l'Italia è caratterizzata da un livello di pericolosità medio-alto. Allo stesso tempo, a differenza di altri paesi caratterizzati da pericolosità più elevate (Giappone, Nuova Zelanda, California), l'Italia presenta una vulnerabilità molto elevata a causa della notevole fragilità del suo patrimonio edilizio e del sistema infrastrutturale. Infine, l'Italia presenta elevati valori di esposizione, sia in termini di vite umane (a causa dell'alta densità abitativa, soprattutto nei centri storici), sia per la presenza di un rilevante patrimonio artistico.

Un altro fattore di rischio è rappresentato dalla presenza di elementi, quali l'assetto stratigrafico e la presenza di faglie, capaci di influenzare negativamente la risposta sismica locale. A tal fine va osservato che l'Italia, a partire dalla punta occidentale della Sicilia fino al Friuli (passando per la catena appenninica e quella alpina) viene attraversata dalla faglia "Gloria" (figura 1.1). Tale faglia, che rappresenta la frattura di contatto a confine tra la placca europea e quella africana, nasce all'incirca a metà dell'Oceano Atlantico – in corrispondenza dello Stretto di Gibilterra – per poi propagarsi nel Mediterraneo. Essa è caratterizzata da una lenta ma continua evoluzione, che si esplica in circa sette millimetri di spostamento all'anno: proprio questa attività è la principale responsabile della sismicità di tutto il bacino mediterraneo e dei terremoti che periodicamente colpiscono il territorio italiano (30.000 negli ultimi 3500 anni).



Figura 1.1
Andamento della faglia Gloria nel bacino mediterraneo

Si è visto che, per un determinato livello di hazard, ossia di un terremoto di intensità prestabilita, al crescere della vulnerabilità cresce la probabilità che il verificarsi dell'evento calamitoso si tramuti in un disastro. Poiché, ovviamente, non è possibile ridurre l'hazard, ovvero l'intensità del sisma che colpisce gli elementi a rischio, ma solo prevederlo attraverso una opportuna modellazione, l'unica strada percorribile per mitigare le perdite è mitigare la vulnerabilità, valutandone il

livello per le diverse classi di elementi a rischio e scegliendo, su tale base, gli interventi di riabilitazione più efficaci. Questo tipo di approccio si inserisce nel quadro più generale di una politica di prevenzione: si tende a mitigare il danno potenzialmente atteso prima ancora che questo accada. Tale aspetto riguarda non solo le costruzioni esistenti con livelli di comportamento inadeguati alle prestazioni richieste dalla normativa, ma anche i criteri di progettazione antisismica per le costruzioni di nuova edificazione.

La ricerca di metodi di analisi in grado di consentire una quantificazione economica dei danni a livello preventivo ha portato, negli ultimi anni, allo sviluppo e alla codifica procedurale della cosiddetta *progettazione secondo prestazione* (*performance based design*, PBD), basata sul rispetto di standard prestazionali predefiniti in funzione del tipo di terremoto e del rischio sismico di riferimento. Questa nuova filosofia di progetto si traduce nel dimensionare gli elementi strutturali e quelli non strutturali in modo tale che, in corrispondenza dei diversi sismi, ciascuno con differente probabilità di verificarsi in un certo sito, la loro risposta fornisca delle prestazioni tali da garantire la salvaguardia della vita umana e minimizzare i danni materiali.

Il tradizionale approccio alla progettazione in zona sismica consiste, invece, in una *progettazione secondo resistenza* (*force based design*, FBD), ovvero in una valutazione degli stati di sollecitazione indotti dalle azioni sismiche di progetto seguita da un confronto con le sollecitazioni resistenti proprie di ciascuna sezione, in funzione delle caratteristiche dei materiali. In una seconda fase, introducendo i corrispondenti legami costitutivi, si procede alla verifica degli stati di deformazione subiti dalla struttura, accertandosi che siano inferiori ai valori di normativa. In tale contesto, quindi, lo spostamento assume un ruolo di parametro di verifica piuttosto che di progetto, indicando solamente una maggiore o minore adeguatezza della rigidità della struttura nei confronti delle azioni orizzontali.

Il *performance based design* inverte il tradizionale processo di progettazione: le strutture vengono progettate sulla base dei valori assunti da opportuni parametri di controllo (spostamenti, scorrimenti, accelerazioni, etc.) in corrispondenza di azioni sismiche di differente intensità, imponendo che tali valori siano inferiori a dei limiti prestabiliti (standard prestazionali). Questo approccio consente di lavorare con livelli prestazionali differenziati, permettendo di definire diversi livelli di risposta e di operare delle limitazioni dirette sul tipo di risorse da impiegare a ogni livello.

Diviene così possibile stabilire, ad esempio, la domanda di taglio alla base (e, quindi, i valori dell'accelerazione di picco orizzontale del terreno) corrispondente a diversi livelli prestazionali di una struttura, attraverso il confronto dello spostamento laterale subito con dei limiti prefissati, che segnano il passaggio tra i diversi livelli di funzionamento (figura 1.2).

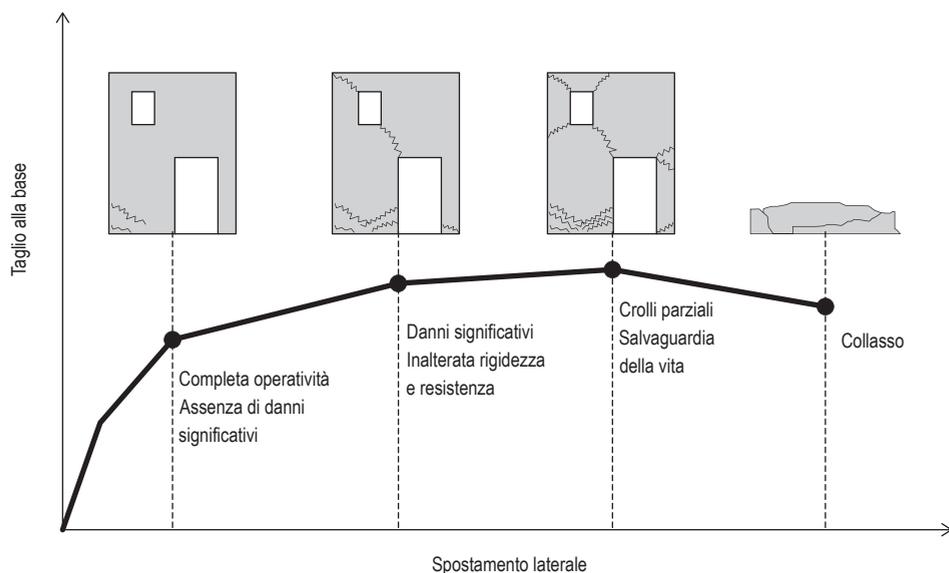


Figura 1.2
Livelli di performance qualitativa di un edificio soggetto all'azione sismica
(rielaborazione da Whittaker et al., 2003)

Le usuali verifiche di sicurezza si basano sulla valutazione del rapporto capacità/domanda, ovvero resistenza/azione. Pertanto, con particolare riferimento all'azione sismica, all'aumentare delle accelerazioni del terreno, ossia all'aumentare della domanda, la resistenza (capacità) dell'edificio deve aumentare per evitare che si verifichi il danno strutturale. Tuttavia, aumentare la resistenza in modo indefinito non è conveniente dal punto vista economico. Inoltre, in tal caso, le vibrazioni prodotte dal sisma verrebbero comunque trasmesse alla struttura, con un danno agli elementi non strutturali tanto più elevato quanto più rigida è la struttura resistente e con una maggiore probabilità di rovina dei contenuti, spesso di valore molto più elevato di quello delle strutture.

Per evitare questi inconvenienti, piuttosto che aumentare la capacità si cerca, quindi, di diminuire la domanda sulla struttura. Su questo principio si fonda la progettazione antisismica tradizionale degli edifici, il cui obiettivo principale è quello di dissipare, attraverso la duttilità degli elementi resistenti, una parte dell'energia indotta dal sisma. La duttilità strutturale si esplica attraverso la plasticizzazione locale degli elementi resistenti, soprattutto in corrispondenza degli estremi delle travi, laddove è più facile ed efficace realizzare quei particolari costruttivi che assicurano elevate capacità deformative.

Pertanto, un progetto antisismico razionale garantisce che, per una determinata richiesta di duttilità strutturale globale, non si superi in alcuna sezione la capacità di duttilità. Va però osservato che, per la maggior parte dei materiali strutturali,

la duttilità coincide con il danno strutturale. Le deformazioni permanenti, ottenute come risultato del processo di dissipazione dell'energia, possono richiedere interventi di consolidamento (o addirittura di demolizione e ricostruzione) importanti e onerosi, oltre a rendere la struttura più vulnerabile nei confronti di eventi successivi.

Una più moderna ed efficace strategia di prevenzione e mitigazione del rischio sismico è rappresentata dal controllo strutturale. Con tale termine si suole indicare l'insieme dei concetti e dei dispositivi in grado di modificare la risposta di una struttura soggetta a carichi dinamici brevi e intensi (di natura sismica e/o aerodinamica) al fine di attenuare le vibrazioni su di essa indotte e proteggerne lo stato di servizio. Il controllo del comportamento strutturale viene ottenuto inserendo in maniera opportuna, nella costruzione, dei sistemi ausiliari in grado di modificare, nel pur breve intervallo di durata dell'azione dinamica, le caratteristiche strutturali, essenzialmente la rigidezza e lo smorzamento.

1.2. Controllo attivo, passivo, semi-attivo, ibrido

Per comprendere i criteri di intervento attraverso cui è possibile controllare l'amplificazione dinamica di una struttura è opportuno fare riferimento all'equazione del moto di una struttura ad N gradi di libertà soggetta a una forzante variabile nel tempo (figura 1.3):

$$\mathbf{M}\ddot{\underline{x}}(t) + \mathbf{C}\dot{\underline{x}}(t) + \mathbf{K}\underline{x}(t) = \underline{F}(t) \quad (1.1)$$

In tale equazione, $\underline{x}(t)$ rappresenta il vettore degli n spostamenti orizzontali a livello dei vari impalcati; $\dot{\underline{x}}(t)$ e $\ddot{\underline{x}}(t)$ sono le corrispondenti leggi orarie di velocità e accelerazione; $\underline{F}(t)$ è il vet-

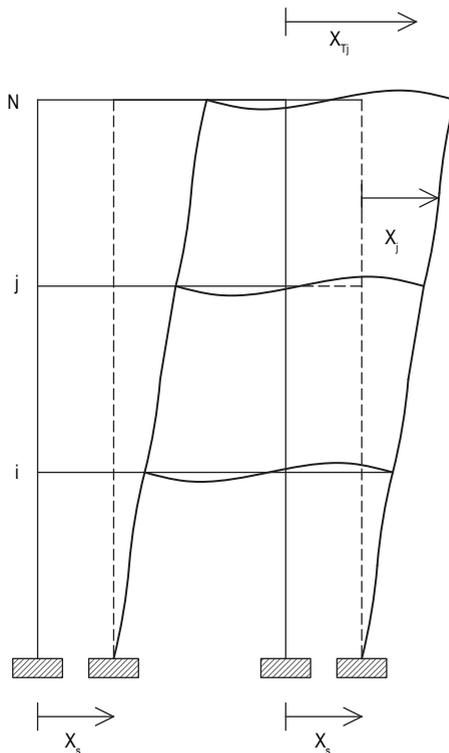


Figura 1.3
Telaio a N gradi di libertà
soggetto a spostamento sismico x_s

tore delle forzanti esterne agenti ai vari piani; infine, le matrici \mathbf{M} , \mathbf{C} e \mathbf{K} rappresentano, rispettivamente, la matrice di massa, smorzamento e rigidità della struttura.

La forzante $\underline{F}(t)$ può essere dovuta sia ad azioni aerodinamiche sulle masse (forzante eolica) sia ad azioni di inerzia indotte dal moto della base $x_s(t)$. Nel caso sismico, in particolare, il formalismo della (1.1) è ancora valido a patto di considerare una distribuzione di forze di inerzia $\underline{F}(t) = -M\ddot{x}_s(t)$ applicate ai vari impalcati. In tal caso la (1.1) può essere riscritta in termini energetici:

$$E_c = E_e + E_d + E_{in} \quad (1.2)$$

avendo posto

$$E_c = \int \mathbf{M} \underline{\dot{x}} \underline{\dot{x}} dx, \text{ energia cinetica del sistema}$$

$$E_e = \int -\mathbf{K} \underline{x} \underline{x} dx, \text{ lavoro elastico}$$

$$E_d = \int -\mathbf{C} \underline{\dot{x}} \underline{\dot{x}} dx, \text{ lavoro dissipativo}$$

$$E_{in} = -\int \mathbf{M} \ddot{x}_s dx, \text{ lavoro esterno (energia in ingresso)}.$$

Dall'analisi della (1.2) derivano i tre diversi approcci al problema del controllo strutturale:

- impiego di dispositivi ausiliari per dissipare l'energia in ingresso;
- impiego di dispositivi ausiliari per attenuare l'energia sismica in ingresso;
- impiego di sistemi ibridi, combinazione dei due precedenti.

In ciascuno dei tre casi è possibile impiegare sistemi attivi, ossia azionati da energia esterna, e passivi, che non necessitano di energia per operare.

1.2.1. Controllo attivo

Il controllo attivo si esplica attraverso sistemi in grado di intervenire – grazie all'apporto di potenze meccaniche esterne – nel processo dinamico in atto, con un'azione variabile a seconda dello stato indotto dalle forze applicate. Il funzionamento avviene secondo uno schema ad anello chiuso (figura 1.4): sono presenti sia sensori di misura del moto del suolo sia sensori di misura della risposta strutturale, entrambi collegati a una centralina elettronica in modo tale da dar luogo a meccanismi anticipativi (feedforward) e correttivi (feedback) per l'erogazione adattiva delle forze di controllo (generate, di solito, attraverso attuatori oleodinamici ad azionamento elettrico).

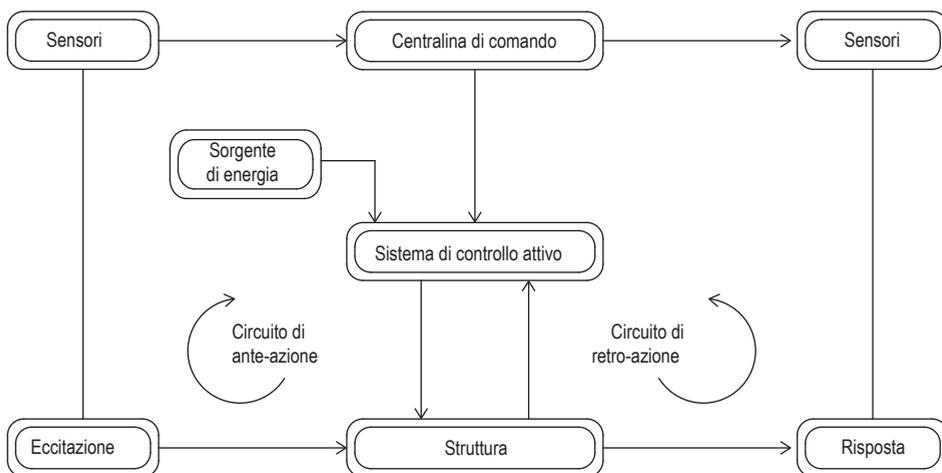


Figura 1.4
Schema di funzionamento di un sistema di controllo attivo

Indicata con $\underline{u}(t)$ la distribuzione delle forze di controllo (applicate a un numero di piani $r \leq N$), la (1.1) può essere riscritta nel seguente modo:

$$\mathbf{M}\ddot{\underline{x}}(t) + \mathbf{C}\dot{\underline{x}}(t) + \mathbf{K}\underline{x}(t) = \mathbf{D}\underline{F}(t) + \mathbf{E}\underline{u}(t) \quad (1.3)$$

avendo indicato con \mathbf{D} ed \mathbf{E} le matrici che definiscono, rispettivamente, i punti di applicazione delle forze esterne e delle forze di controllo. La legge di controllo che consente l'implementazione delle suddette forze è una combinazione lineare dei segnali di spostamento, velocità ed eccitazione esterna:

$$\underline{u}(t) = \mathbf{G}_x \underline{x}(t) + \mathbf{G}_v \dot{\underline{x}}(t) + \mathbf{G}_f \underline{F}(t) \quad (1.4)$$

dove \mathbf{G}_x , \mathbf{G}_v e \mathbf{G}_f sono matrici a elementi costanti; in particolare, \mathbf{G}_x e \mathbf{G}_v sono dette *guadagni di retro-azione* (feedback gains), mentre \mathbf{G}_f è detta *guadagno di ante-azione* (feedforward gain). Sostituendo la (1.4) nella (1.3) si ottiene l'equazione del moto ad anello chiuso:

$$\mathbf{M}\ddot{\underline{x}}(t) + (\mathbf{C} - \mathbf{E}\mathbf{G}_v)\dot{\underline{x}}(t) + (\mathbf{K} - \mathbf{E}\mathbf{G}_x)\underline{x}(t) = (\mathbf{D} + \mathbf{E}\mathbf{G}_f)\underline{F}(t) \quad (1.5)$$

Dalla (1.5) si evince come l'effetto del circuito di retro-azione consista in una modifica della rigidità e dello smorzamento della struttura, mentre l'effetto del circuito di ante-azione consista in una modifica dell'eccitazione. Complessivamente, l'energia cinetica (1.2) del sistema diminuisce.

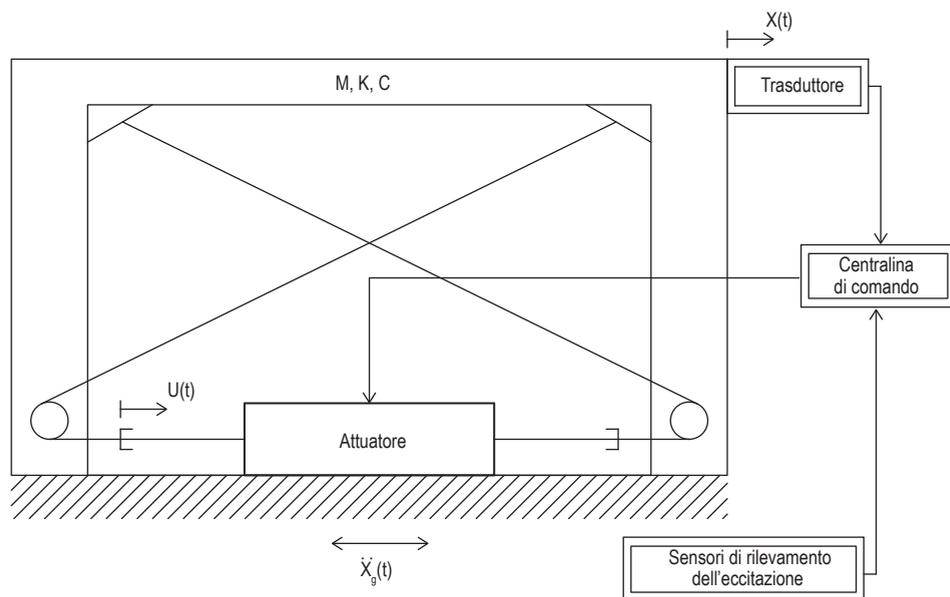


Figura 1.5
Protezione sismica degli edifici: controllo della risposta mediante controventi attivi
(rielaborazione da Cheng et al., 2008)

In figura 1.5 è riportata, per una semplice struttura monopiano e monocampata, una possibile implementazione tecnologica del diagramma a blocchi di figura 1.4, basata sull'impiego di controventi attivi.

Un aspetto molto delicato del controllo attivo è la differenza di fase esistente tra la dinamica degli attuatori e la dinamica della struttura. In tutti i circuiti di controllo, infatti, tra l'emissione del segnale da parte dei trasduttori e l'azionamento degli attuatori intercorre un certo lasso di tempo. Se questo ritardo è tale da innescare inversioni di fase nelle forze, dando luogo a forze in fase con la velocità o con lo spostamento (anziché in controfase, come richiesto dalla (1.5)), il sistema diventa instabile, ossia viene fornita energia alla costruzione anziché dissiparla o attenuarla.

È necessaria, pertanto, un'adeguata robustezza nei confronti della stabilità, ossia il sistema deve essere in grado di assorbire un adeguato ritardo d'anello senza che si verifichi l'amplificazione del moto.

Un'altra limitazione all'impiego dei sistemi di controllo attivo consiste nella necessità di una sorgente di energia esterna per il loro azionamento. Questa esigenza rende tali sistemi molto vulnerabili alle interruzioni del flusso elettrico, soprattutto in occasione dei sismi più violenti.

1.2.2. Controllo passivo

I sistemi di protezione dalle vibrazioni che non necessitano di energia per essere operativi prendono il nome di *sistemi di controllo passivo*. Il loro funzionamento si basa sul moto proprio della struttura, secondo una tipica strategia di controllo a ciclo aperto (figura 1.6): le deformazioni strutturali vengono utilizzate per sviluppare il controllo delle forze agenti, attraverso moti relativi o conversione dell'energia in calore.

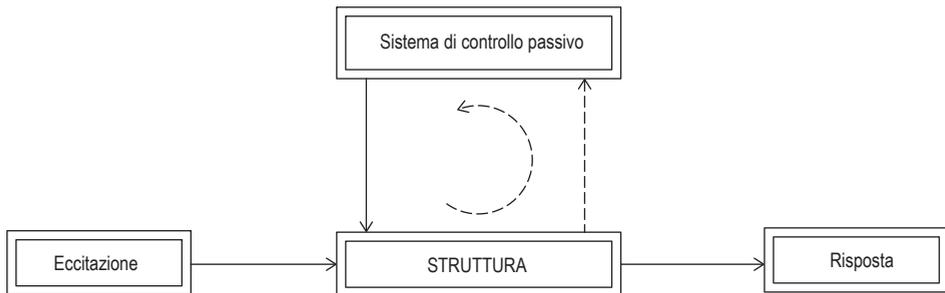


Figura 1.6
Schema di funzionamento di un sistema di controllo passivo

L'isolamento sismico e la dissipazione di energia sono le due tecniche di controllo passivo che negli ultimi anni hanno trovato maggiore applicazione anche per il controllo della risposta sismica. Più avanti nel testo si tratta diffusamente delle varie tipologie di dispositivi e dei relativi criteri progettuali e di inserimento. Limitandosi ora soltanto a una descrizione del principio di funzionamento, si può dire che l'isolamento sismico (figura 1.7b) prevede l'interposizione tra la struttura e la fondazione di elementi aventi bassa rigidezza in direzione orizzontale, al fine di disaccoppiare il moto del terreno da quello della sovrastruttura e deflettere l'energia sismica in ingresso. La dissipazione di energia (figura 1.7c) consiste, invece, nell'inserire nella struttura degli elementi in grado di dissipare per isteresi del materiale – per attrito tra superfici a contatto o per il comportamento viscoso di elastomeri e fluidi – buona parte dell'energia ceduta dal sisma alla struttura.

Per completezza di esposizione, tra i sistemi di protezione passiva si citano anche i sistemi a massa smorzante accordata (*tuned mass damper*, TMD). Essi si basano sull'inserimento di un sistema massa-molla-smorzatore, in genere posizionato sulla sommità dell'edificio da proteggere (figura 1.7d). Le proprietà di questo dispositivo vengono accordate alla frequenza naturale dell'edificio, in modo da ottenere un sistema che attenua rapidamente il moto indotto nella struttura. L'effetto di un TMD può essere interpretato come una variazione della capacità di smorzamento della struttura.

Anche i sistemi di controllo passivo della risposta sismica consentono un'efficace

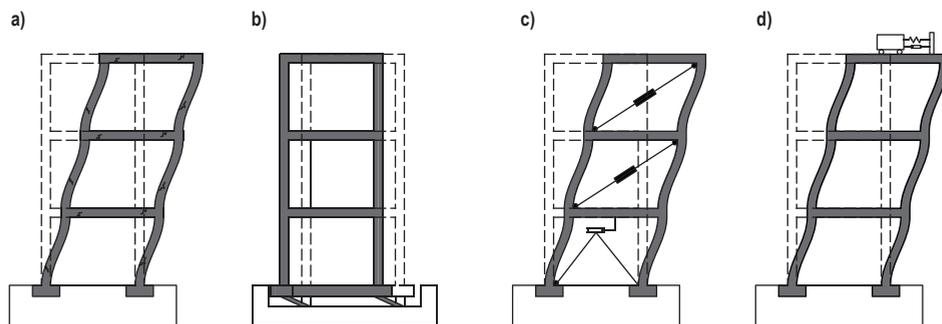


Figura 1.7

Sistemi passivi di protezione sismica: a) struttura non protetta; b) isolamento di base; c) dissipazione di energia; d) massa accordata

riduzione del danno strutturale, facendo in modo che la struttura non attinga alle proprie risorse di duttilità e limitando le sue escursioni in campo plastico. È evidente la differenza con i criteri tradizionali di progettazione antisismica (figura 1.7a), basati sull'implicita accettazione delle deformazioni anelastiche.

1.2.3. Controllo semi-attivo

Il controllo semi-attivo si esplica attraverso sistemi in grado di regolare, in tempo reale, i parametri meccanici dei dispositivi di protezione, i quali, per il resto, interagiscono passivamente con la struttura, senza introdurre in essa aliquote di energia di controllo. Le modalità di regolazione sono determinate sulla base di un prescelto algoritmo di controllo, in funzione dell'eccitazione e/o della risposta strutturale. Il principio di funzionamento è analogo a quello illustrato in figura 1.4 e prevede, come per il controllo attivo, la presenza di sensori, centraline e attuatori. A differenza del controllo attivo, però, l'energia esterna richiesta è minima, in quanto le azioni di controllo sono generate derivando l'energia necessaria direttamente dal moto della struttura. L'energia richiesta, in particolare, è solo quella necessaria per l'attivazione dei dispositivi capaci di variare i parametri strutturali e può essere fornita, ad esempio, da una semplice batteria.

La variazione dei parametri strutturali può riguardare sia la rigidezza (*active variable stiffness*, AVS) sia lo smorzamento (*active variable damping*, AVD). Tra i dispositivi AVS, particolarmente efficaci sono i dissipatori a fluido con orifizio variabile (*variable-orifice dampers*, VOD): tali dispositivi, solitamente installati all'interno dei controventi (figura 1.8), sono costituiti da sistemi idraulici dotati di una valvola elettromeccanica in grado di facilitare o impedire il passaggio del fluido contenuto. Quando la valvola è aperta, il fluido scorre liberamente e disimpegna la connessione trave-controvento, riducendo la rigidezza strutturale.

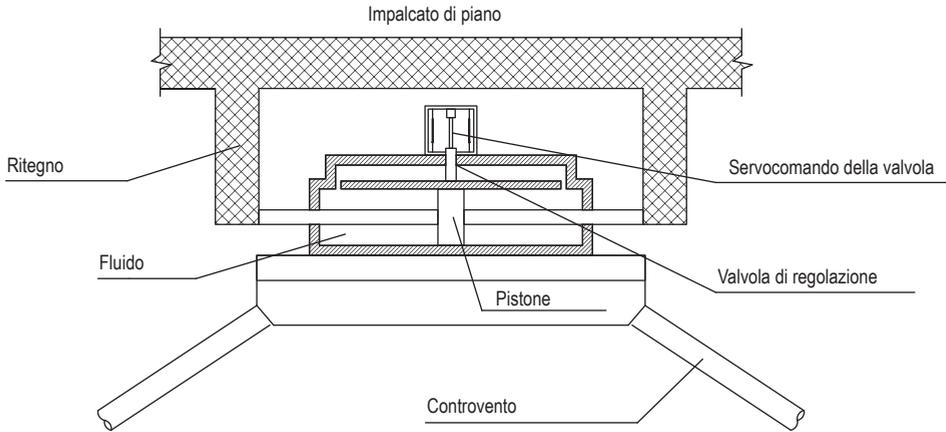


Figura 1.8
Dissipatore a fluido con orificio variabile (rielaborazione da Cheng et al., 2008)

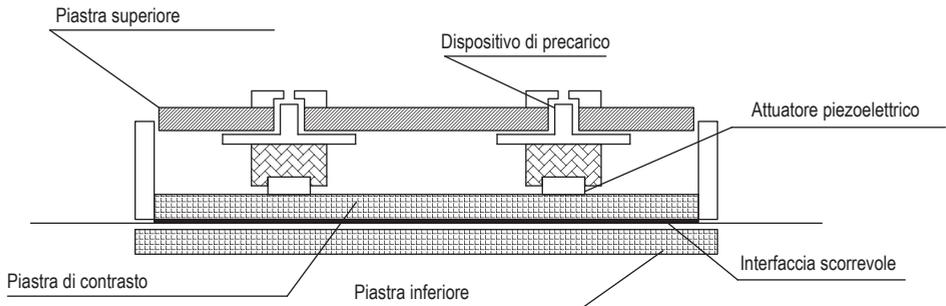


Figura 1.9
Dissipatore ad attrito variabile (rielaborazione da Cheng et al., 2008)

Ovviamente, poi, quando la valvola è chiusa, la rigidità aumenta notevolmente. Quindi, agendo sulla regolazione della valvola, si può modificare la rigidità della struttura e, di conseguenza, la sua frequenza naturale, in modo da abbattere le forze sismiche in ingresso.

Tra i dispositivi AVD si citano i dissipatori ad attrito variabile (*variable friction dampers*, VFD), in grado di fornire un'azione di controllo sfruttando le forze attrittive che si generano tra superfici più o meno a contatto. Tali dispositivi (figura 1.9) si basano sull'impiego di attuatori elettromagnetici o piezoelettrici per variare lo sforzo normale da trasferire al controvento interfacciato al dispositivo. Poiché la forza di attrito è proporzionale allo sforzo normale, il controllo dell'attrito consente di avere il controllo dello smorzamento.