

Breve guida alla progettazione pratica
di sistemi di isolamento ad isolatori elastomerici
con l'utilizzo del metodo lineare equivalente

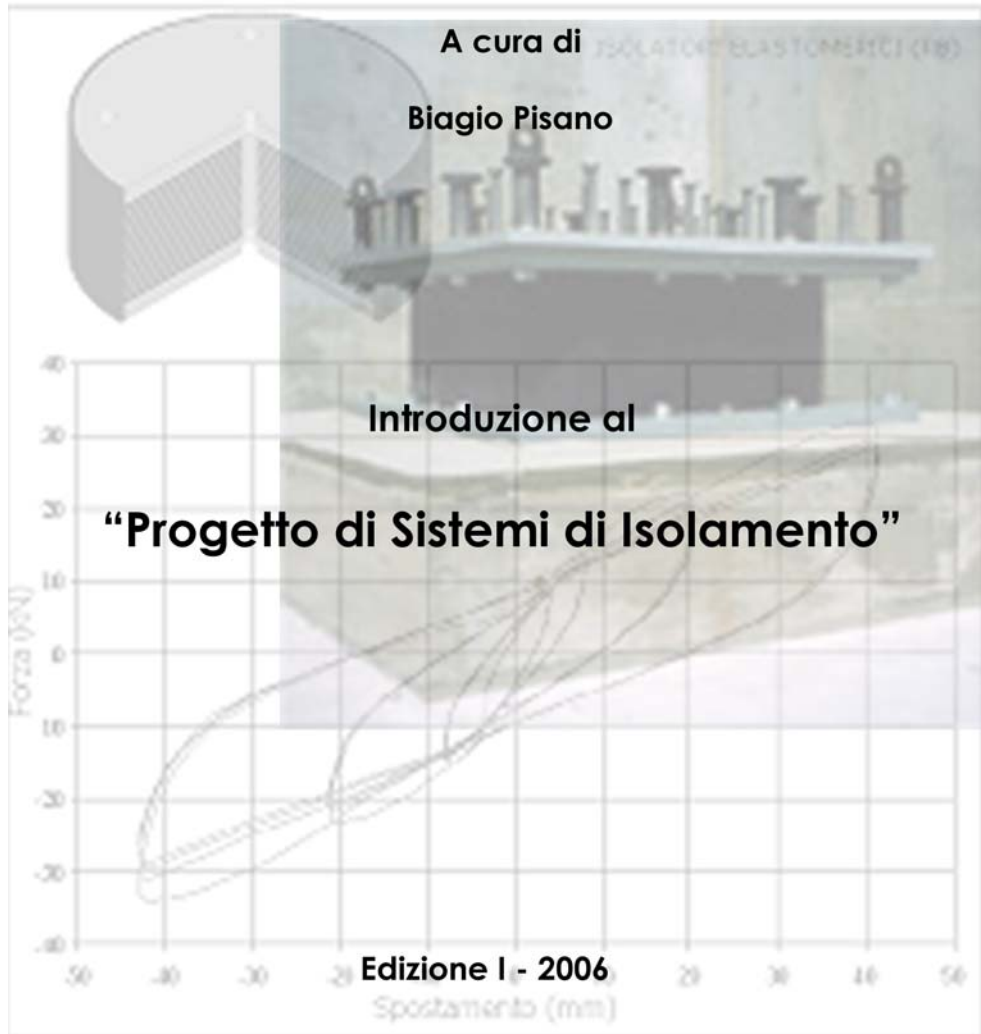
A cura di

Biagio Pisano

Introduzione al

“Progetto di Sistemi di Isolamento”

Edizione I - 2006



STACEC s.r.l. – Software e servizi per l'ingegneria

INTRODUZIONE.

L'isolamento sismico degli edifici nasce verso l'inizio degli anni '80 come una tecnica fortemente innovativa del settore dell'Ingegneria Antisismica, orientata ad ottenere prestazioni strutturali notevolmente superiori a quelle conseguibili in costruzioni progettate secondo i criteri antisismici ordinari. Nel corso degli anni '80 e nei primi anni '90 si è avuto un significativo sviluppo sia di studi e ricerche teoriche che di applicazioni ad edifici, essenzialmente di nuova costruzione.

Numerose strutture isolate sono state realizzate negli USA, in Giappone e in Nuova Zelanda. In Italia, pur essendo molto vivo il dibattito scientifico, le applicazioni realizzate sono ancora poche (circa una ventina).

Un vero collaudo in sito, che ha dato un impulso all'utilizzo dei sistemi di isolamento, si è avuto nei recenti eventi sismici di Northridge (1994) e Kobe (1995). In questi casi i risultati ottenuti sono stati esaltanti.

Oltre all'isolamento sismico esistono altre tecniche di protezione sismica. Tra le tante ricordiamo le seguenti famiglie:

- Controllo attivo;
- Controllo passivo;
- Controllo ibrido;

La prima famiglia è basata sull'utilizzo di dispositivi meccanici collegati a sensori elettronici in modo da applicare forze dinamiche alla struttura al fine di bilanciare l'azione sismica. Alla seconda fanno parte l'isolamento sismico (oggetto di approfondimento nel presente

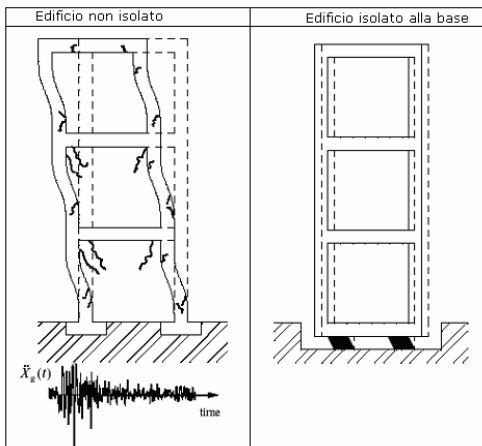


testo) e la dissipazione di energia. La terza famiglia è una combinazione delle precedenti.

Oltre agli isolatori elastomerici (che tratteremo) ricordiamo gli affascinanti dispositivi basati sulle leghe a memoria di forma (LMF). Questi materiali, costituiti tipicamente da leghe nichel-titanio, presentano la capacità, di ripristinare la propria forma originale attraverso una trasformazione della struttura cristallina che si verifica all'interno della lega. Tali dispositivi posseggono buone capacità dissipative e capacità di ricentraggio del sistema anche dopo eventi sismici impegnativi.

ISOLAMENTO SISMICO: CONTROLLO STRUTTURALE PASSIVO.

Per isolamento sismico (sistema di controllo “passivo”) di un edificio si intende l’inserimento tra la struttura e le sue fondazioni di opportuni dispositivi molto flessibili orizzontalmente, anche se rigidi in direzione verticale. In tal caso il sistema di isolamento viene definito “isolamento alla base”.

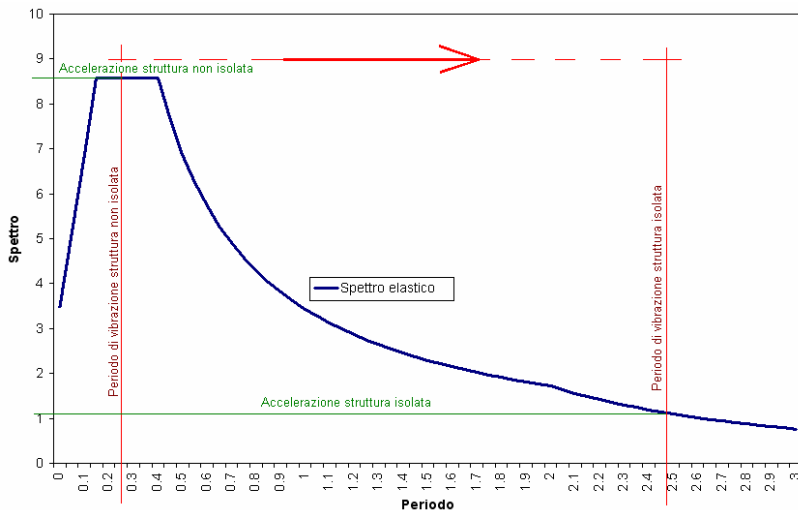


In pratica, l’isolamento sismico alla base consente di ridurre la trasmissione del moto del suolo alla struttura in elevazione disaccoppiando il moto della sovrastruttura da quello del terreno. In tal modo la sovrastruttura rimane in campo elastico, per cui sarebbe



inopportuno progettare utilizzando la classe di duttilità alta (CD"A"), caratteristica del sistema di protezione sismica chiamato "criterio di gerarchia delle resistenze".

Di solito i dispositivi utilizzati per la realizzazione del sistema di isolamento sono isolatori in gomma armata, costituiti cioè da strati alterni di gomma (elastomero) ed acciaio solidarizzati mediante vulcanizzazione. L'inserimento degli isolatori consente di ottenere l'aumento del periodo proprio di vibrare della struttura per allontanarlo dalla zona dello spettro di risposta con maggiori accelerazioni.



L'utilizzo degli isolatori sismici porta alla struttura interessata i seguenti benefici:

- la sensibile riduzione delle accelerazioni trasmesse dal sisma alla struttura, e quindi:
- a. minori forze sulla struttura: la struttura si lascia "spostare" quasi come un blocco rigido, così si evita non solo il collasso dell'edificio, ma anche il danneggiamento degli elementi strutturali, soprattutto pilastri;



- b. le minori accelerazioni subite consentono di evitare danni a ciò che è contenuto all'interno dell'edificio, e quindi di mantenerne la funzionalità anche a seguito di un terremoto violento;
- la riduzione degli spostamenti d'interpiano:
 - a. sotto l'azione del sisma l'edificio si muove come un blocco rigido al di sopra degli isolatori, nei quali viene concentrata quasi tutta la deformazione. Ciò consente di evitare il danno non solo agli elementi strutturali, ma anche agli elementi non strutturali, come, ad esempio, le tamponature.

Inoltre, c'è da considerare che le comuni regole di progettazione antisismica, basate sulla "Gerarchia delle resistenze", hanno come obiettivo preservare la vita umana, ma ammettono la possibilità di avere danni sulla struttura, in quanto la richiesta di totale assenza di danno porterebbe ad un costo della struttura enormemente elevato e antieconomico.

Altri vantaggi si presentano nei riguardi della funzionalità della costruzione, che con l'utilizzo dei sistemi di isolamento non porterebbe interruzioni d'uso. C'è da aggiungere che la minore accelerazione è accompagnata dalla minore percezione dell'evento sismico all'interno dell'edificio .

La maggiore peculiarità dell'isolamento alla base degli edifici è dunque la possibilità di eliminare completamente, o quantomeno ridurre sensibilmente, i danni a tutte le parti strutturali e non strutturali degli edifici e a tutto ciò che gli edifici contengono.

Quest'ultimo aspetto è importantissimo per gli edifici che devono rimanere operativi dopo un violento terremoto, ad esempio gli ospedali o i centri operativi per la gestione dell'emergenza (ad esempio caserme dell'Esercito e dei Vigili del Fuoco, ecc.), oppure per tutti quegli edifici il cui contenuto ha un valore molto superiore a quello degli edifici stessi (ad esempio musei, ecc.).

Ampiamente noto è l'esempio dell'ospedale USC di Los Angeles, dove non solo l'edificio (ovviamente isolato alla base) non riportò danni strutturali, ma durante l'evento sismico non si ruppe neanche una bottiglia, mentre un altro ospedale a qualche chilometro riportò seri danni alle attrezzature contenute.



E' importante notare che in un edificio isolato alla base è importante realizzare un giunto sismico intorno all' edificio per consentirne gli spostamenti orizzontali (che possono superare i 20 cm), quindi è opportuno che non ci siano altri edifici adiacenti a quello con isolatori.

Tra i tipi di isolatori ricordiamo quelli elastoplastici, a scorrimento ed elastomerici. Gli isolatori elastoplastici sono studiati per mantenersi in campo elastico nei riguardi dei soli carichi verticali, mentre si plasticizzano ad una soglia prefissata di azioni orizzontali. Quelli a scorrimento sono apparecchi di appoggio scorrevoli che sostengono i carichi verticali trasmessi dalla struttura, consentendo nel contempo gli spostamenti orizzontali. Normalmente tali tipi di isolatori sono sempre accoppiati a dispositivi ausiliari (dispositivi isteretici, ammortizzatori viscosi) in modo tale da riunire in un unico dispositivo la duplice funzione di sostenere i carichi verticali e di dissipare l'energia sismica.

Gli isolatori elastomerici armati sono di gran lunga i dispositivi più diffusi per l'isolamento passivo. Sono costituiti da strati in elastomero (aventi la funzione di dissipare, disaccoppiare il moto e mantenere spostamenti accettabili) alternati a lamine in acciaio (aventi la funzione di mantenere una buona resistenza allo schiacciamento), che ne rendono trascurabile la deformabilità in direzione verticale. Gli strati in elastomero manifestano una bassa rigidità nei confronti degli spostamenti orizzontali, data da:

$$K_o = \frac{GA}{h}$$

G : modulo di taglio

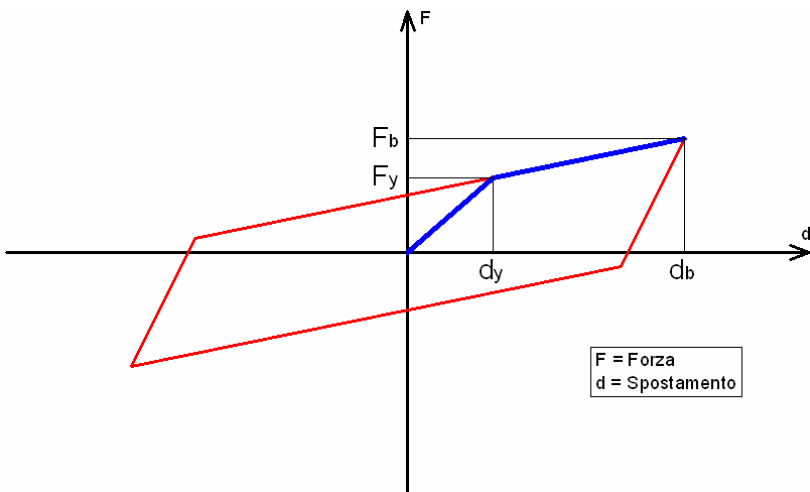
A : area di base

h : altezza complessiva degli strati

Gli elastomeri che costituiscono gli isolatori sono composti da catene polimeriche fortemente allungabili a comportamento isteretico, collegate trasversalmente in modo da consentire il recupero quasi completo della deformazione.

Il modello isteretico relativo al comportamento dell'isolatore, può essere schematizzato attraverso dei tratti lineari.





I cicli forza-deformazione degli isolatori riproducono il comportamento bilineare degli elastomeri e sono perfettamente noti se si conosce il carico di snervamento F_y ed il corrispondente spostamento d_y , nonché i valori limite F_b e d_b .

Di norma d_b corrisponde ad uno scorrimento vicino al 200%, oltre il quale il materiale subisce un brusco incrudimento.

Il tratto incrudente non viene preso in considerazione nella progettazione, in quanto l'aumento di rigidità che ne consegue porta un aggravio di sollecitazioni sulla sovrastruttura, in quanto le forme modali superiori al primo hanno un aumento di partecipazione nella risposta sismica.

La modellazione bilineare rispecchia in modo coerente il comportamento degli isolatori, ma richiede l'adozione di tecniche di integrazione al passo.

La normativa italiana consente di adottare un modello lineare semplificato, basato sull'adozione di una rigidità equivalente K_b e di uno smorzamento equivalente ν_b .

K_b è la rigidità secante, data da:

$$K_b = \frac{F_b}{d_b}$$



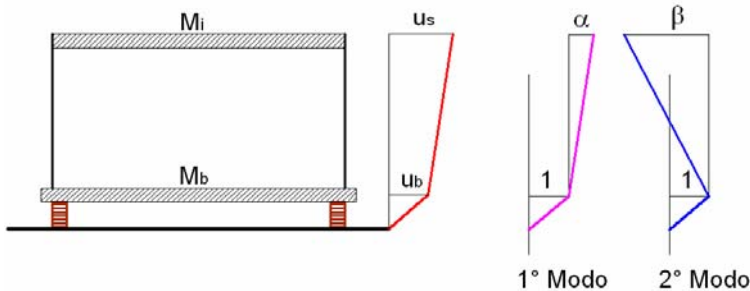
a cui corrisponde una frequenza equivalente:

$$\omega_b = \sqrt{\frac{K_b}{M}}$$

dove M è la massa gravante sull'isolatore, e il periodo:

$$T = \frac{2\pi}{\omega_b}$$

Effettuando un'analisi dinamica (semplificata) di una struttura regolare su isolatori si perviene ad alcune considerazioni. Partiamo analizzando un semplice telaio composto da due colonne e un traverso rigido in modo da schematizzare il tutto con un modello shear-type:



Ricavando i primi due modi di vibrare sottoforma di autovettori:

$$\Phi_1 = \begin{bmatrix} 1 \\ \alpha \end{bmatrix} \Rightarrow \begin{bmatrix} u_{b1} \\ u_{s1} \end{bmatrix}$$

$$\Phi_2 = \begin{bmatrix} 1 \\ \beta \end{bmatrix} \Rightarrow \begin{bmatrix} u_{b2} \\ u_{s2} \end{bmatrix}$$

Analizzando il primo modo notiamo come lo spostamento relativo normalizzato α sia inversamente proporzionale al grado di isolamento (dato dal rapporto tra il periodo del sistema di isolamento



e il periodo della struttura non isolata), quindi ad un grado elevato corrisponde un valore di spostamento relativo piccolo.

Per cui la sovrastruttura si comporta quasi come un blocco rigido che “scivola” sulla sottostruttura mediante il sistema di isolamento.

Come si può notare, il secondo modo di vibrare comporta come conseguenza, un deciso spostamento relativo tra i due impalcati ma, c'è da aggiungere, che all'aumentare del grado di isolamento il “fattore di partecipazione” del secondo modo tende a zero, per cui tale modo (e tutti gli altri superiori) risulta trascurabile.

Dopo tale analisi i vantaggi offerti dall'uso dei sistemi di isolamento risulta evidente, in particolare:

- bassa deformazione della struttura (con conseguente riduzione dello stato sollecitazionale);
- aumento del periodo della struttura (con conseguente progettazione in una zona dello spettro con minore accelerazione e quindi sollecitazioni).

Il raggiungimento di un grado di isolamento soddisfacente è problematico se la struttura da isolare presenta elevata flessibilità alle deformazioni orizzontali durante l'evento sismico.

Ciò perché si rendono necessari isolatori di rigidezza molto basse (alle volte esigua), inoltre l'elevata flessibilità comporta l'aumento significativo di partecipazione dei modi torsionali, difficilmente controllabili.

Queste osservazioni rendono poco plausibile l'utilizzo dell'isolamento sismico su strutture alte e snelle, spesso di per sé dotato di un periodo di vibrazione alto.

PROGETTAZIONE DEL SISTEMA DI ISOLAMENTO.

La definizione delle caratteristiche dei dispositivi di isolamento (ovvero rigidezza, smorzamento e resistenza) è il primo passo nella progettazione delle strutture isolate.

Tutte le deformazioni della struttura durante l'evento sismico vengono concentrate alla base della sovrastruttura (e quindi



nell'isolatore), in modo da assorbire l'energia del sisma senza farla gravare sulla sovrastruttura.

A tale proposito un parametro di progetto fondamentale è lo spostamento alla base della struttura isolata. Bisogna evitare di ottenere spostamenti alla base eccessivi in quanto sarebbe eccessivamente costoso (soprattutto dal punto di vista economico) realizzare giunti tecnici in grado di contenere tali spostamenti.

Indicativamente un valore limite nella progettazione dei sistemi di isolamento può essere posto pari a circa 25 cm

Per ottenere un giusto compromesso tra le due esigenze di massima filtrazione del moto sismico e di spostamenti non eccessivi alla base della struttura, è opportuno contenere entro certi limiti il periodo principale della struttura isolata.

Da analisi teoriche e sperimentali si è evidenziato che valori ottimali (tali da fondere esigenze pratiche di realizzazione e richiesta di prestazioni) del periodo di oscillazione della struttura isolata si attestano tra 1.5 e 3 sec.

La progettazione di un dispositivo di isolamento sismico parte dalla definizione di uno spostamento di progetto, valutato sulla base di indicazioni normative, in base alla sismicità ed alle caratteristiche geologiche del sito, in funzione del periodo che si intende conferire al complesso strutturale isolato alla base e dello smorzamento dell'elastomero impiegato per il dispositivo stesso.

Una volta definito il periodo della struttura isolata si ricava la rigidità orizzontale del sistema, per poi definire le caratteristiche di rigidità del singolo isolatore, nonché le dimensioni.

Nella progettazione di queste ultime intervengono alcuni vincoli, essenzialmente legati alla deformazione orizzontale ammissibile per l'elastomero ed alla tensione verticale di lavoro dello stesso; inoltre la necessità di rispettare adeguate limitazioni sul rapporto larghezza/altezza del dispositivo orientate ad assicurare un sufficiente margine di sicurezza nei confronti di fenomeni di instabilità e del ribaltamento del dispositivo introducono ulteriori vincoli.

Oltre alle caratteristiche di isolamento, il sistema deve riuscire a contenere gli spostamenti a livelli accettabili. Questo viene effettuato



associando alla elevata deformabilità caratteristiche smorzanti al sistema attraverso il rapporto di smorzamento equivalente v .

Queste caratteristiche sono contemplate negli appoggi elastomerici ad alto smorzamento che consentono contemporaneamente sia di controllare efficacemente lo spostamento alla base sia di rendere uniforme la risposta della parte in elevazione.

Per cui un altro dato importante per la definizione del sistema di isolamento alla base è lo smorzamento

Equivalente. Un valore ottimale di smorzamento può essere pari al 15%, in quanto si è visto (da analisi numeriche e sperimentali) che per valori più alti non si hanno sostanziali benefici nei riguardi della limitazione degli spostamenti.

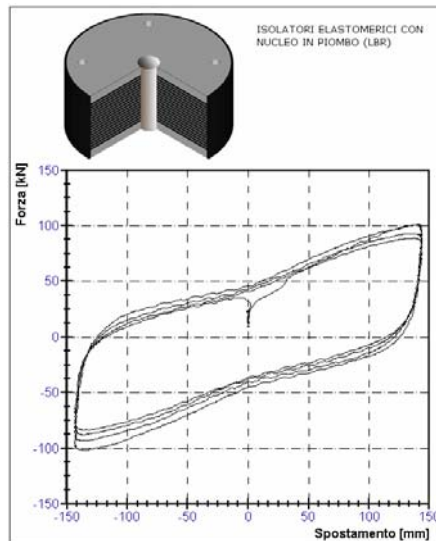
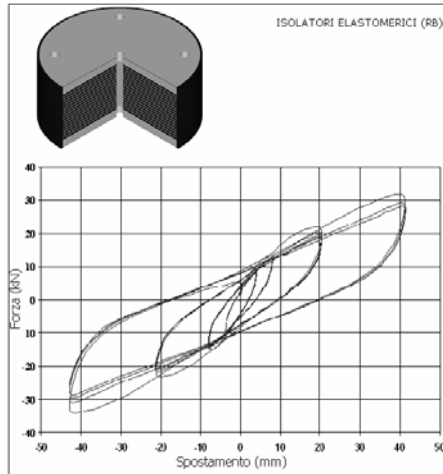
Comunque un valore troppo alto dello smorzamento può limitare l'efficacia dell'isolamento e portare comunque dei valori di spostamenti di interpiano non tollerabili ai fini del danneggiamento della struttura e dei suoi elementi non strutturali. In sintesi, mentre uno smorzamento elevato è sicuramente benefico per lo spostamento alla base, esso potrebbe sortire l'effetto contrario nei riguardi dello spostamento di interpiano.

Concludendo si può affermare che un valore di smorzamento compreso tra il 10 ed il 15% possa considerarsi un valore obiettivo ottimale, consentendo la riduzione dello spostamento alla base a valori tali da rendere sempre possibile la realizzazione tecnica dei giunti senza tuttavia dar luogo a riduzioni del livello prestazionale della sovrastruttura.

È da ricordare che i normali dispositivi di appoggio elastomerici hanno uno smorzamento equivalente compresi tra il 7.5 e il 16%, quindi per ottenere valori più elevati è necessario adoperare anche altri sistemi appositamente creati per la funzione di smorzamento.

La progettazione del sistema di isolamento alla base di una struttura prevede in primo luogo la selezione del tipo di dispositivo di isolamento da adottare. Esistono vari tipi di isolatori, tra i quali ricordiamo gli isolatori elastomerici (RB – Rubber Bearing), gli isolatori elastomerici con nucleo in piombo (LRB – Lead Rubber Bearing), di cui riportiamo i diagrammi ciclici forza-spostamento.





La funzione del nucleo in piombo è quella di dissipare energia mediante la plasticizzazione del piombo, e per la mescola elastomerica utilizzata, che solitamente è a basso smorzamento.



Il processo di progettazione del sistema di isolamento alla base di una struttura prevede la definizione dei seguenti parametri:

Periodo di isolamento T_{is} ;
Spostamento di progetto d_b ;
Smorzamento ν
Carico di lavoro σ_v ;

Devono inoltre essere controllati i valori di due parametri di sicurezza dell'isolatore. Il primo è il fattore di sicurezza nei confronti dell'instabilità dell'isolatore che dipende dal carico totale agente sul dispositivo. Il secondo è il fattore di sicurezza nei confronti del ribaltamento che dipende dal minimo carico agente sull'isolatore. A tale scopo è necessario definire allora le seguenti quantità:

1. Dimensioni in pianta dell'isolatore;
2. Spessore totale dell'elastomero t_e (valutata incrementando i due spessori estremi per 1.4);
3. Spessore del singolo strato di elastomero t_i ;
4. Numero degli strati di gomma n ;
5. Modulo di taglio G dell'elastomero;
6. Altezza totale dell'isolatore h_i .

Note queste quantità è possibile definire i due fattori di forma del singolo dispositivo che caratterizzano la sicurezza nei confronti dell'instabilità e del ribaltamento:

7. Fattore di forma primario $S_1 = \frac{A'}{L}$, dove A' è l'area della superficie di contatto acciaio-elastomero depurata da fori;
8. Fattore di forma secondario $S_1 = \frac{D}{t_e}$, dove D è il diametro o la dimensione (nel caso di rettangolare) nella direzione considerata ;
9. Rigidezza orizzontale dell'isolatore $\frac{G \cdot A_i}{h_i}$.



Nei successivi paragrafi verranno illustrati i parametri di definizione del sistema di isolamento.

PERIODO DI ISOLAMENTO T_{iso} .

Dopo aver effettuato una analisi dinamica in modo da calcolare i modi di vibrare della struttura e i relativi periodi, bisogna definire il periodo di isolamento. Tale periodo, che deve essere indicativamente compreso tra 1.5 e 3 sec, rappresenta un dato essenziale nei riguardi dell'azione sismica. È importante notare come per strutture che già hanno un periodo alto, il problema assume un aspetto più delicato, soprattutto nei riguardi della scelta della rigidità orizzontale dei dispositivi di isolamento.

Il range di valori definiti per il periodo di isolamento è definito in modo da tenere conto che il sistema di isolamento deve riuscire a ridurre sensibilmente l'energia trasmessa alla sovrastruttura, ma nello stesso tempo deve riuscire a mantenere il massimo spostamento orizzontali entro valori tecnicamente accettabili, come precedentemente descritto.

SPOSTAMENTO DI PROGETTO d_b .

Dopo aver definito il periodo principale di vibrazione del sistema isolato, scelto lo spettro di progetto ed in funzione del tipo di terreno di fondazione, resta definito anche il massimo spostamento alla base d_b .

Riferendosi allo spettro elastico dello spostamento definito nell'OPCM 3274, utilizzando un valore del periodo di isolamento pari a 2.5 sec. si ottengono i seguenti valori di spostamento massimo:

Suolo	a_g	S	ζ	η	T_c [s]	T_d [s]	T [s]	d_b [cm]
A	0.35 g	1.00	15%	0.707	0.4	2.5	2.5	15.38
B,C,E	0.35 g	1.25	15%	0.707	0.5	2.5	2.5	24.04
D	0.35 g	1.35	15%	0.707	0.8	2.5	2.5	41.54



È importante notare che la stessa OPCM 3274 consente di progettare gli elementi della sovrastruttura dividendo l'azione sismica per il fattore q , in modo da considerare una piccola soglia di duttilità della sovrastruttura:

$$q = 1.15 \frac{\alpha_u}{\alpha_1}$$

SMORZAMENTO ζ .

Lo smorzamento si è detto, che deve essere contenuto tra il 10 ed il 15% al fine di limitare il massimo spostamento alla base della struttura e contemporaneamente anche gli spostamenti di interpiano, valori più alti non portano sostanziali variazioni di energia assorbita.

RIGIDEZZA TOTALE DEL SISTEMA DI ISOLAMENTO.

La rigidezza totale nella componente orizzontale viene calcolata in modo banale, assimilando il sistema come un oscillatore semplice di massa M e rigidezza $K_{o,tot}$ (questo modello è utilizzabile se il periodo della struttura isolata è maggiore di almeno due volte di quello della struttura non isolata) conoscendo la massa totale della sovrastruttura e il periodo di vibrazione di progetto:

$$T_{iso} = 2\pi \sqrt{\frac{M}{K_{o,tot}}} \quad \Rightarrow \quad K_{o,tot} = \frac{4\pi^2}{T_{iso}^2} M$$

Una volta calcolata la rigidezza totale si può opera seguendo due diverse strade:

Calcolare il numero di isolatori conoscendo la rigidezza del tipo di isolatori usato.

Calcolare approssimativamente la rigidezza del singolo isolatore in funzione del numero di isolatori inseribili.



Il calcolo avviene basandosi sulla seguente relazione:

$$K_{o,tot} = n_{iso} \cdot K_{o,iso}$$

dove:

n_{iso} : numero di isolatori.

$K_{o,iso}$: rigidezza del singolo isolatore.

È consigliabile utilizzare isolatori con la stessa rigidezza in entrambe le direzioni principali della struttura, in modo da evitare eccentricità nei riguardi di modi di vibrazione torsionali.

DIMENSIONI GEOMETRICHE DEL SINGOLO ISOLATORE.

Le dimensioni geometriche (diametro se circolare, lati se rettangolare) vengono fissate conoscendo il carico verticale massimo (o la tensione massima) sopportabili dal singolo isolatore.

I vari produttori di isolatori forniscono tali valori in funzione del modello di isolatore utilizzato.

Secondo l'OPCM 3274 dovrà essere verificata anche la massima tensione negli inserti di acciaio in base alla seguente formula di verifica:

$$\sigma_s = 1.3 \cdot V \frac{2 \cdot t_i}{A_r \cdot t_s} \leq f_{yk}$$

Per il significato dei parametri si rimanda alle indicazioni contenute nell'allegato 10.A del capitolo 10 dell'allegato 2 dell'OPCM 3274.

MODULO DI ELASTICITÀ TANGENZIALE G.

Il modulo di elasticità tangenziale G è un dato fornito dal produttore dell'isolatore. Per i tipi di elastomeri attualmente in commercio i valori sono compresi tra 0.4 e 1.4 MPa.



ALTEZZA TOTALE DI ELASTOMERO.

L'altezza totale degli strati di elastomero viene calcolata partendo dalla rigidezza orizzontale del singolo isolatore utilizzando la seguente formula:

$$K_{o,iso} = G \frac{A_{iso}}{h_r} \quad \Rightarrow \quad h_r = G \frac{A_{iso}}{K_{o,iso}}$$

VERIFICHE DI INSTABILITA'.

La scelta dell'isolatore riguarda anche le sue caratteristiche di risposta nei riguardi dell'instabilità. In merito è possibile seguire due metodologie di verifica.

La prima viene dettata dall'OPCM 3274 e viene effettuata considerando che il carico verticale massimo agente sul singolo isolatore, deve essere inferiore al carico critico calcolato come:

$$V_{cr} = \frac{G \cdot A_{iso} \cdot S_1 \cdot b_{min}}{t_e}$$

Il parametro t_e viene definito come la somma degli spessori dei singoli strati di elastomero maggiorando lo spessore dei due più estremi del fattore 1.4 (se maggiori di 3 mm). Il parametro S_1 , definito "fattore di forma primario", viene calcolato dividendo l'area trasversale di contatto elastomero-acciaio per la superficie laterale del singolo strato di elastomero.

È importante notare che il coefficiente di sicurezza della verifica deve essere almeno pari a 2.

Più grossolanamente la stessa verifica di instabilità può essere soddisfatta valutando solo il valore del "fattore di forma primario" in modo che sia compreso tra i valori 3 e 5. Più alto è il "fattore di forma primario" e più tozzo sarà l'isolatore impiegato.

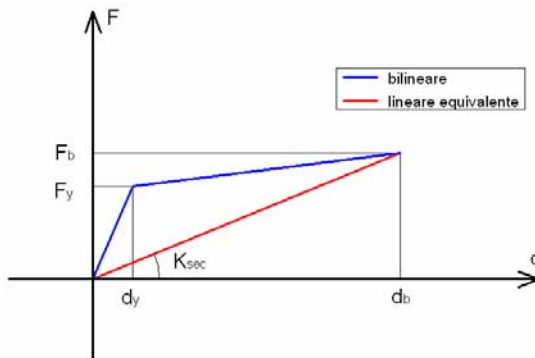


MODELLAZIONE E METODI DI ANALISI.

Come ogni problema strutturale, i tipi di modellazione utilizzati sono molto vari. In linea di principio, la sovrastruttura e la sottostruttura devono rimanere in campo elastico, per cui utilizzare modello complesso sarebbe un aggravio di lavoro non richiesto dal problema. L'OPCM 3274 in merito a ciò impone di modellare sovrastruttura e sottostruttura come sistemi a comportamento elastico-lineare.

Per quanto riguarda il sistema di isolamento, può essere modellato considerando un comportamento visco-elastico lineare o non lineare. La normativa consente, verificando alcune condizioni, di utilizzare anche una analisi elastico-lineare.

In questo caso, dovrà essere adottata la rigidità secante riferita allo spostamento di totale progetto.



È importante precisare che i parametri utilizzati alla definizione del problema devono essere riferiti alla vita utile dei dispositivi di isolamento, in quanto rigidità, deformabilità e velocità di deformazione, smorzamento, resistenza sono variabili in funzione dell'età del dispositivo.

Sarebbe opportuno utilizzare diversi modelli in quanto attribuendo i valori minimi di rigidità si otterranno gli spostamenti massimi, mentre utilizzando i valori massimi si otterranno i massimi valore di deformazione e tensioni nella struttura.



Si rimanda al punto 10.7.2 dell'OPCM 3274 per visionare le limitazioni sull'utilizzo del comportamento lineare per il sistema di isolamento.

I metodi di analisi consentiti sono:

- Statica lineare;
- Dinamica lineare;
- Dinamica non lineare.

Data la natura stessa dei metodi di isolamento, risulta inopportuno utilizzare il metodo statico lineare, in quanto lo studio del sistema è fondamentalmente basato sulle interazioni dinamiche degli elementi, in più il calcolo del periodo di prima vibrazione calcolato in modo approssimato risulta corrotto da numerosi parametri che restringono il campo di validità delle varie formulazioni.

Per quanto riguarda l'analisi dinamica lineare, è ammessa se è possibile definire il comportamento dell'isolatore attraverso un modello elastico equivalente. Il suo utilizzo è legato alle limitazioni del punto 10.7.2 dell'OPCM 3274.

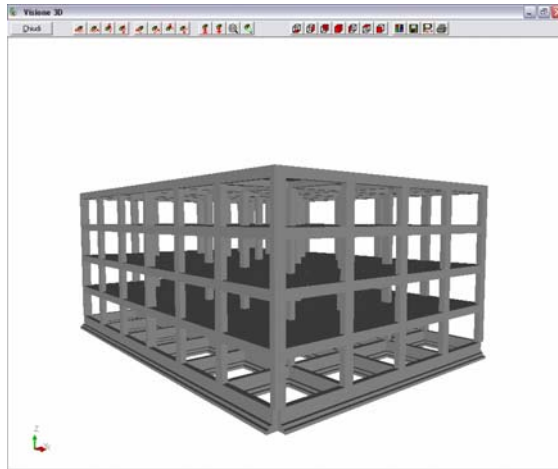
L'analisi dinamica non lineare è il metodo più generico (utilizzabile senza limitazioni) che si possa utilizzare, ma ha l'inconveniente di richiedere un numero elevato di operazioni, e l'analisi all'elaboratore deve essere supportata da una notevole esperienza, in modo da analizzare i risultati ottenuti con occhio critico ed esperto.

ESEMPIO APPLICATIVO: PROGETTO DI UN SISTEMA ISOLATO

Per una migliore comprensione dei concetti precedentemente esposti, si riporta un esempio applicativo di progetto del sistema di isolamento sismico, utile a valutare l'impatto del sistema sui risultati di calcolo.

Prendiamo come esempio la seguente struttura regolare a telaio (sismo-resistente per dissipazione di energia), composta da quattro piani fuori terra, quattro campate in direzione y e sei campate in direzione x:





Come si può visionare del riepilogo dei “dati tipo ai piani” di FaTAe, la struttura in c.a. in esame è costituita da solai in latero-cemento del peso di 259 kg/m^2 su cui gravano, 100 kg/m^2 di carico permanente, 120 kg/m^2 di incidenza tramezzi, e 300 kg/m^2 di carico accidentale. Oltre all'area di solaio competente, sulle travi perimetrali sono stati aggiunti i tamponamenti considerati come carico distribuito di 750 kg/m (dati dall'altezza pari a 300 cm e il peso per unità di superficie della parete pari a 250 kg/m^2).

Dati tipo ai piani

	Hst	PMur	Tipo solai	PSol	Tipo balcone	PBal	PSca	ITram	S.perm	CE sol	CE bal	CE sca	Fi
Imp. 0	300.00	250	SLC_default	259	SLC_default	259	400	120	100	300	400	400	0.50
Imp. 1	300.00	250	SLC_default	259	SLC_default	259	400	120	100	300	400	400	0.50
Imp. 2	300.00	250	SLC_default	259	SLC_default	259	400	120	100	300	400	400	0.50
Imp. 3	300.00	250	SLC_default	259	SLC_default	259	400	120	100	300	400	400	0.50
Imp. 4	0.00	0	SLC_default	259	SLC_default	259	400	0	100	300	400	400	1.00

Le sezioni strutturali (tutte di forma rettangolare) sono pari a $40 \times 70 \text{ cm}$ e $50 \times 50 \text{ cm}$ per le colonne e $30 \times 60 \text{ cm}$ per le travi.

Le travi di fondazione sono a “T” rovesce di altezza totale pari a 100 cm , larghezza delle ali pari a 80 cm e spessore pari a 20 .

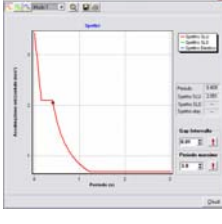
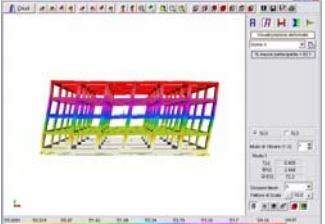
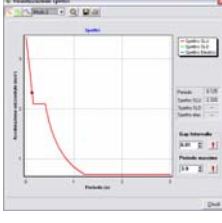
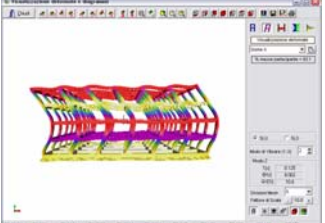
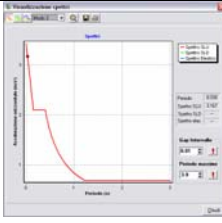
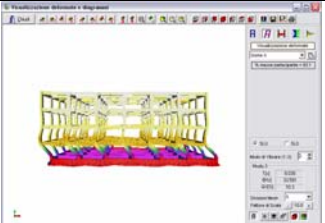
Il fattore di struttura è posto pari a 4.09 , valore per telai a più piani e più campate.

Il progetto del sistema di isolamento sismico parte dallo studio dei modi di vibrare principali della struttura nelle direzioni considerate.

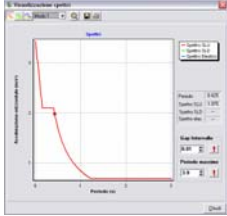
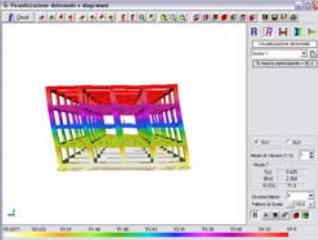
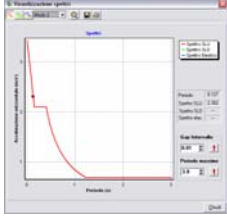
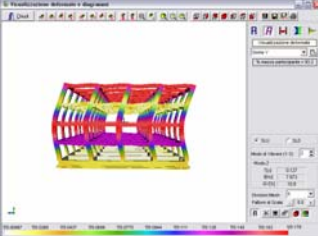
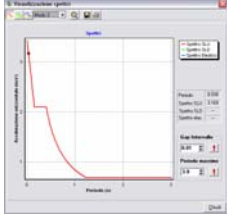
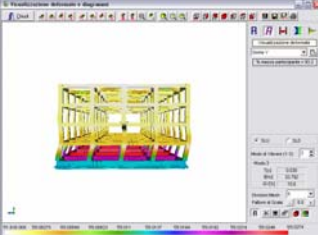


Lungo x, abbiamo che la percentuale di massa stabilita dalla normativa viene raggiunta utilizzando 3 modi di vibrare.

Riportiamo, riferendoci ai risultati di calcolo relativi a FaTAe, i valori di periodo, percentuale di massa partecipante, spostamento massimo, accelerazione orizzontale, relativi all'analisi dinamica modale, effettuate secondo l'ipotesi di matrice di massa di tipo "consistent".

<p>Modo 1</p> <p>$T = 0.409 \text{ s}$ $G_x = 72.3 \%$ $s_{\max} = 4.610 \text{ cm}$ $a_g = 2.051 \text{ m/s}^2$ 0.21 g</p>		
<p>Modo 2</p> <p>$T = 0.125 \text{ s}$ $G_x = 10.6 \%$ $s_{\max} = 0.171 \text{ cm}$ $a_g = 2.320 \text{ m/s}^2$ 0.24 g</p>		
<p>Modo 3</p> <p>$T = 0.030 \text{ s}$ $G_x = 10.3 \%$ $s_{\max} = 0.027 \text{ cm}$ $a_g = 3.167 \text{ m/s}^2$ 0.32 g</p>		

Analogamente per la direzione y abbiamo altri 3 modi di vibrare principali.

<p>Modo 1</p> <p>$T = 0.425 \text{ s}$ $G_x = 71.9 \%$ $s_{\max} = 4.80 \text{ cm}$ $a_g = 1.975 \text{ m/s}^2$ 0.20 g</p>		
<p>Modo 2</p> <p>$T = 0.127 \text{ s}$ $G_x = 10.8 \%$ $s_{\max} = 0.179 \text{ cm}$ $a_g = 2.302 \text{ m/s}^2$ 0.23 g</p>		
<p>Modo 3</p> <p>$T = 0.030 \text{ s}$ $G_x = 10.6 \%$ $s_{\max} = 0.027 \text{ cm}$ $a_g = 3.169 \text{ m/s}^2$ 0.32 g</p>		

Analizzando le forme modali notiamo che, come si aspettava, la prima forma modale è la predominante, e le altre non presentano torsioni di piano. In questo caso il progetto del sistema di isolamento risulta più semplice, in quanto è possibile assimilare il sistema isolatore-edificio come un oscillatore semplice di rigidezza K e massa totale M .

Nel caso in cui le caratteristiche geometriche e di massa della struttura fossero tali da complicare le forme modali, sarebbe corretto approfondire il metodo di progettazione, in modo da utilizzare il sistema di isolamento per "aggiustare" la risposta della struttura all'evento sismico.

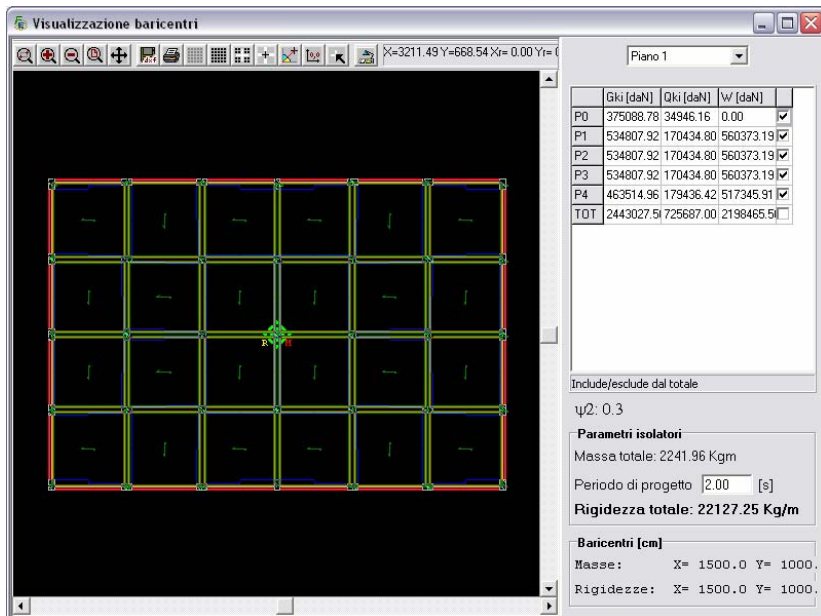


Il primo passo, come abbiamo prima descritto, è scegliere il periodo che la struttura deve raggiungere una volta inserito il sistema di isolatori.

Il primo periodo di oscillazione della struttura in direzione x è pari a 0.409 s, mentre in direzione y è pari a 0.425 s. Fissiamo come valore di progetto un valore pari a 2.0 s.

Tale valore dovrà essere confermato dalla verifica a spostamento massimo relativo supportabile dall'isolatore.

Il calcolo della massa totale viene effettuato automaticamente da FaTAe nell'ambiente di visualizzazione dei baricentri:



Selezionando dall'apposita casella gli impalcati relativi alla sovrastruttura viene riportato il peso e la massa totale:



	Gki [daN]	Qki [daN]	W [daN]	
P0	375088.78	34946.16	0.00	<input checked="" type="checkbox"/>
P1	534807.92	170434.80	560373.19	<input checked="" type="checkbox"/>
P2	534807.92	170434.80	560373.19	<input checked="" type="checkbox"/>
P3	534807.92	170434.80	560373.19	<input checked="" type="checkbox"/>
P4	463514.96	179436.42	517345.91	<input checked="" type="checkbox"/>
TOT	2443027.51	725687.00	2198465.51	<input type="checkbox"/>

Nell'esempio in esame la massa totale ha come valore 2241.96 kgM. Per il calcolo della rigidezza totale del sistema di isolamento utilizziamo la nota formula descritta in precedenza:

$$K_{o,tot} = \frac{4\pi^2}{T_{iso}^2} M$$

Tale operazione viene automaticamente effettuata dal tool di FaTae in funzione del periodo di progetto del sistema di isolamento. Il valore riportato è pari a 22127.25 daN/cm.

Parametri isolatori
 Massa totale: 2241.96 KgM
 Periodo di progetto [s]
Rigidezza totale: 22127.25 daN/cm

Adesso in funzione dei dati di targa dell'isolatore, forniti dal produttore, si calcola il numero di isolatori da introdurre. A tale scopo, nel nostro esempio, ipotizziamo di utilizzare un isolatore con delle prefissate caratteristiche che calcoliamo con delle ipotesi realistiche.

Nel seguente prospetto vengono riportati dei valori tipici delle grandezze, e a fianco viene riportato il valore scelto:



	$B_x = 70 \text{ cm}$
	$B_y = 70 \text{ cm}$
$G = 4 - 12 \text{ daN/cm}^2$	$G = 11 \text{ daN/cm}^2$
	$A = 70 \times 70 = 4900 \text{ cm}^2$
	$h = 50 \text{ cm}$
$K = G A / h$	$K = 1078 \text{ daN/cm}$
$\sigma_v = 30 - 100 \text{ daN/cm}^2$	$\sigma_v = 70 \text{ daN/cm}^2$
$N_{\max} = A \sigma_v$	$N_{\max} = 343000 \text{ daN}$
	$t_{\text{ela}} = 14 \text{ mm}$
	$t_{\text{acc}} = 8 \text{ mm}$
	$\gamma^* = 3$
	$E_s = 15000 \text{ daN/cm}^2$
	$\zeta = 10\%$
	$s_u = 25 \text{ cm}$

Il calcolo del numero di isolatori da impiegare viene effettuato banalmente dalla relazione:

$$K_{o,tot} = n_{iso} \cdot K_{o,iso}$$

Nel nostro esempio il numero di isolatori necessari sarà pari a 21. È da notare che la struttura in esame presenta più di 21 colonne, per cui, considerando anche le luci delle travi, risulta opportuno introdurre sotto le colonne prive di isolatori degli appoggi “slider” (o “scivolatori”), in modo da contrastare i carichi verticali senza introdurre variazioni di rigidezza orizzontale.

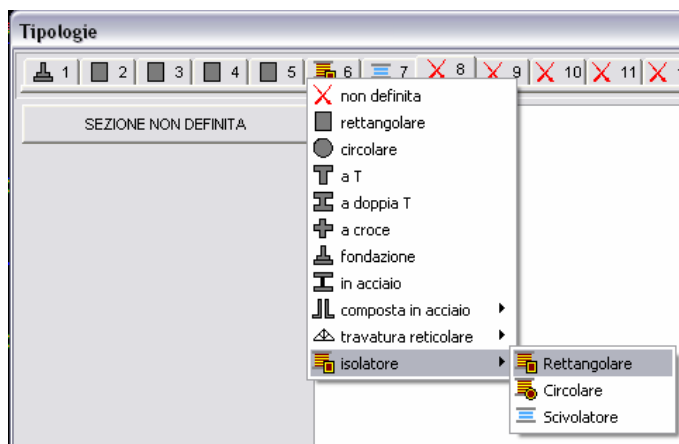
Il primo passo nella realizzazione del modello in FaTAe è creare la tipologia di isolatore voluta. A tal proposito l'isolatore viene trattato come una sezione a cui sono assegnate delle proprietà particolari utili allo scopo.

Dall'input grafico FaTAe, si introduce una nuova tipologia di sezione dal pulsante:

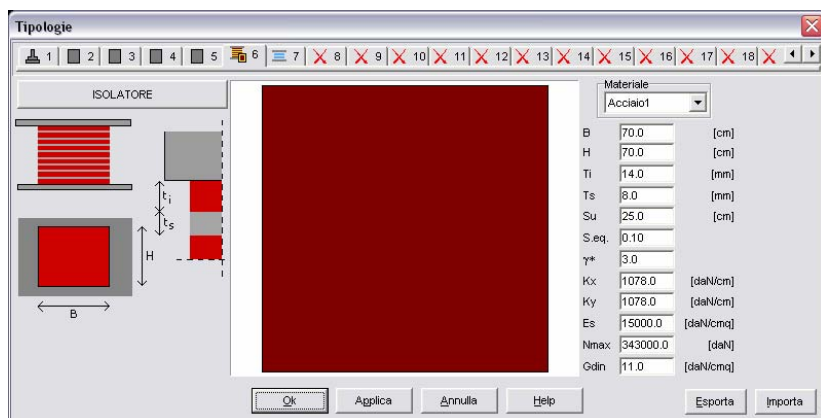


Dalle tipologie possibili scegliamo “isolatore rettangolare”:



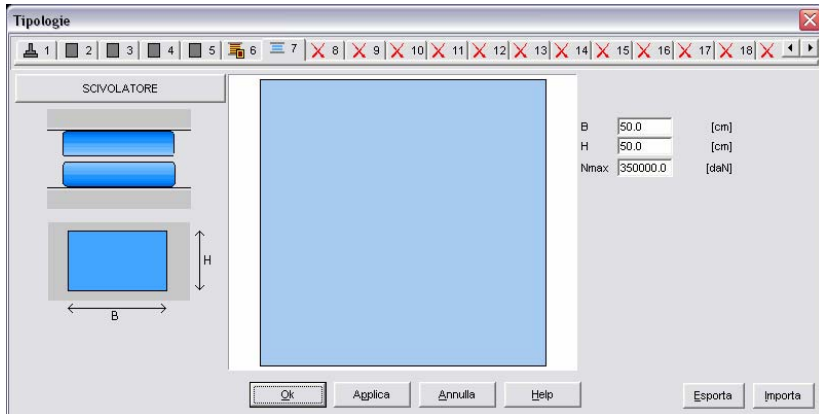


Introduciamo nella seguente maschera i parametri precedentemente descritti:

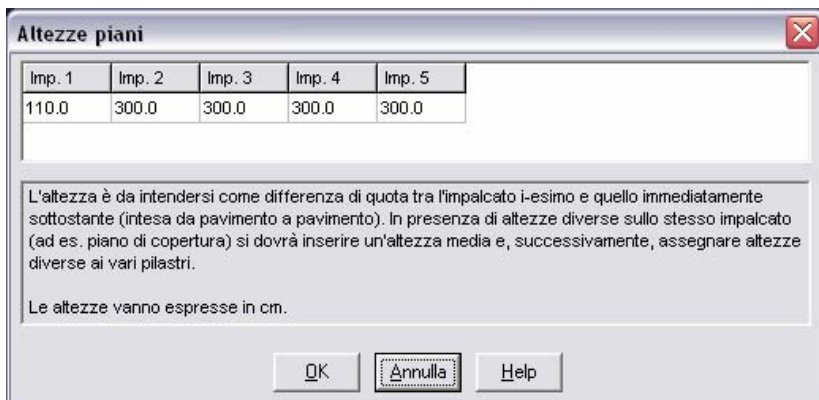


Con le stesse operazioni impostiamo anche una sezione di tipo scivolatore:





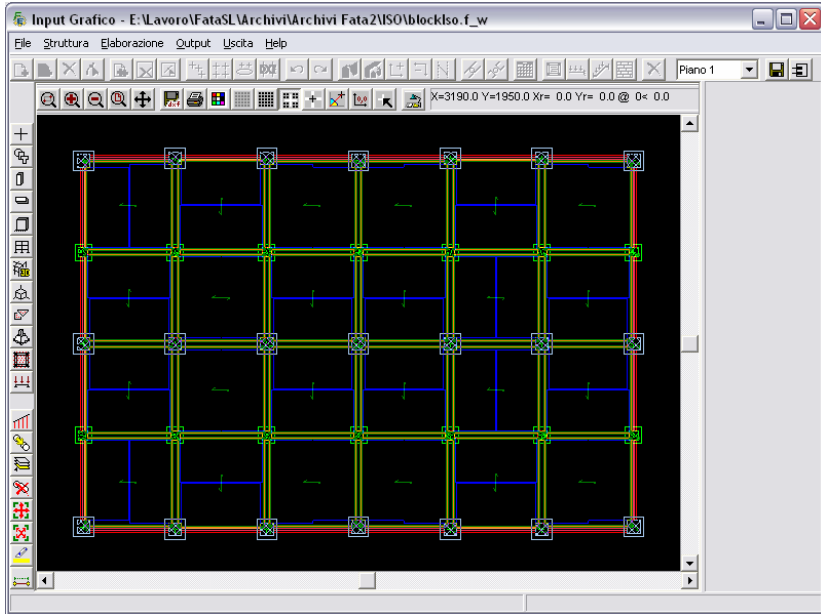
Per poter introdurre gli isolatori è opportuno aggiungere un piano senza copiarne nessuno esistente e attraverso la maschera “altezza ai piani” inserire l’altezza del piano. Il valore da inserire è relativa alla somma dell’altezza dell’isolatore e della trave. Ad esempio nel caso in esame inseriamo altezza piano pari a 110, dato da 60 (trave) e da 50 (isolatore).



Ai fini dell’analisi è opportuno definire il fattore di struttura. Nel nostro esempio utilizziamo un valore pari ad 1 (valore più cautelativo), anche se in base alle indicazioni dell’OPCM 3274 (pubblicate nell’OPCM 3431), è possibile utilizzare valori superiori relativamente alla sovrastruttura.



L'inserimento degli isolatori avviene posizionandosi al "piano 1" dell'input grafico per impalcati e cliccando (o come box) sui fili fissi, allo stesso modo dell'inserimento pilastri. Per facilitare la comprensione dell'input, gli isolatori sono contrassegnati da un colore diverso dagli scivolatori.



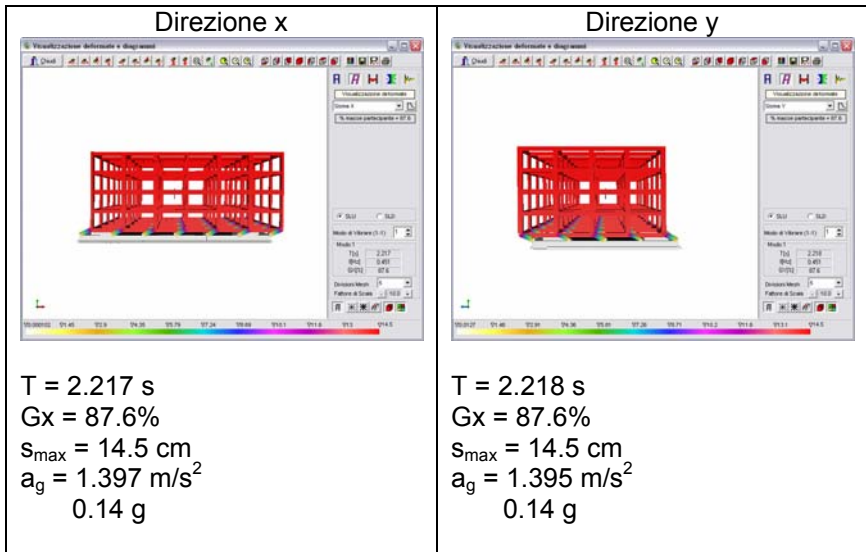
Per una corretta modellazione, è consigliato utilizzare esclusivamente il filo fisso di tipo 5 (centrale), in quanto elementi modellati in modo non verticale portano sollecitazioni di trazione sull'isolatore non coerenti con il comportamento reale.

Dopo aver effettuato l'analisi (esclusivamente di tipo "dinamica lineare") controlliamo i valori di output del calcolo.

È importante notare che la presenza di isolatori ha portato il numero dei modi di vibrare utili pari ad 1 (contro i 3 della struttura non isolata), con fattore di partecipazione delle masse pari a 87.6%. Dalla colormap degli spostamenti si può vedere come la sovrastruttura presenta la stessa colorazione (corrispondente all'incirca al valore 14.5 cm) a tutti i livelli della struttura. Si nota in modo chiaro che la sovrastruttura si comporta come un corpo rigido adagiato sugli isolatori.



Lo stesso fenomeno si può evidenziare anche in direzione y.
Si riportano i risultati che caratterizzano i modi di vibrare.



Dalla comparazione dei dati della struttura non isolata otteniamo le seguenti considerazioni:

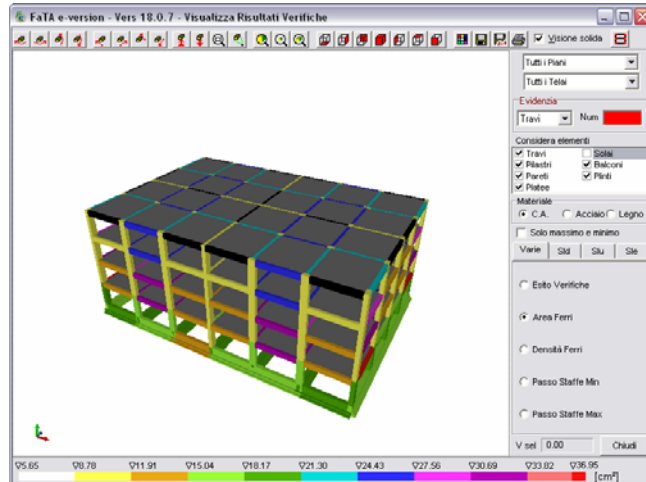
- Modi di vibrare superiori al primo non influenti sul comportamento della struttura;
- Periodo della struttura superiore a quello di progetto. Ciò è dovuto alle semplificazioni del modello ad oscillatore semplice;
- Accelerazione massima orizzontale (riferita al primo modo di vibrare della struttura non isolata) ridotta del 32% in direzione x del 30% in direzione y;
- Spostamento massimo più grande del 314% in direzione x e del 302% in direzione y.

Un'interessante confronto può essere effettuato in termini di armature presenti (quindi implicitamente sulle sollecitazioni di calcolo) nella struttura. Ciò può essere effettuato utilizzando la

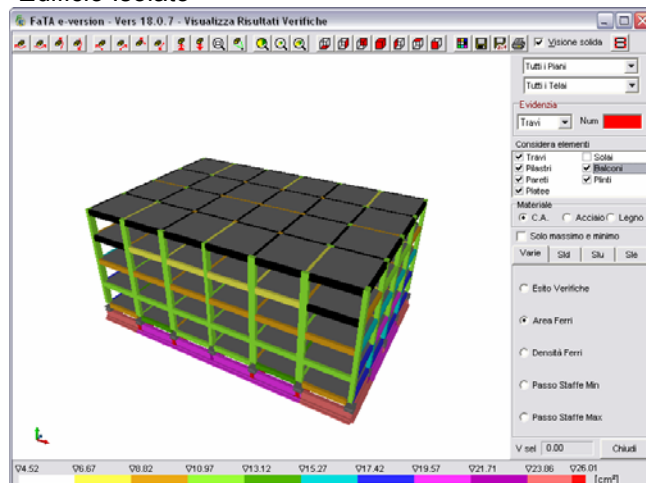


funzione “edificio esistente” di FaTAe, che consente di progettare le sezioni introducendo le armature esclusivamente necessarie, senza considerare i minimi di normativa.

“Edificio non isolato”



“Edificio Isolato”



Visualizzando le due strutture con in evidenza l'area di armature longitudinali in acciaio, riscontriamo grandi differenze in termini di quantità. Si riportano sinteticamente tali diversità:

	Non isolato	Isolato	Variazione
Valore max totale	36.95 cm ²	26.01 cm ²	Rid. 30%
Valore max pilastri	20.36 cm ²	15.83 cm ²	Rid. 22%
Valore max travi fond.	20.36 cm ²	26.01 cm ²	Aum. 28%
Valore max travi elev.	33.80 cm ²	20.01 cm ²	Rid. 41%
Valore max tensioni terreno	3.31 cm ²	1.95 cm ²	Rid. 41%

Un'ulteriore confronto può essere effettuato in termini di quantità totale di acciaio in barre presente nella struttura. Tale operazione può essere effettuata rapidamente utilizzando le funzioni di computo di FaTAe.

Struttura isolata		
Ø [mm]	Sviluppo [ml]	Peso [Kg]
8	34255.5	13516.7
12	23518.5	20880.0
14	1113.0	1345.0
Totale	58887.0	35741.7

Struttura non isolata		
Ø [mm]	Sviluppo [ml]	Peso [Kg]
8	31665.7	12494.8
12	15370.7	13646.3
20	3590.8	8855.4
24	3855.4	13691.4
Totale	54482.5	48687.9

Dal confronto risulta che la riduzione di armatura presente nella struttura isolata è del 22%, tenendo conto anche che la struttura con isolatori presenta un'impalcato aggiuntivo rispetto alla struttura originaria.

È buona regola progettare una fondazione molto rigida rispetto alla struttura non isolata, in modo da poter ripartire il sisma. La richiesta di rigidezza è confermata dall'aumento di armatura necessaria presente nella struttura isolata.



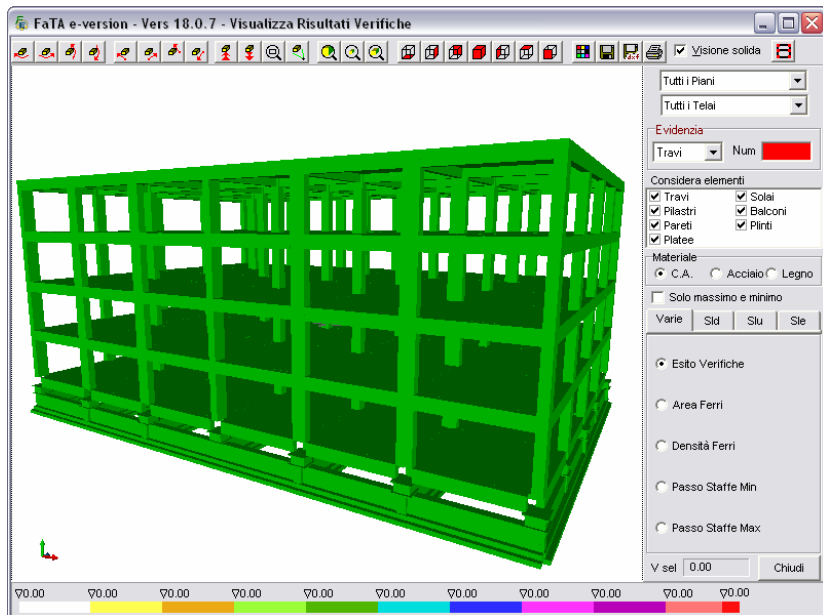
Dopo aver effettuato il calcolo, è opportuno verificare che l'isolatore lavori nei limiti stabiliti dalla tecnologia e dalla normativa.

Ciò viene effettuato automaticamente lanciando le verifiche di

FaTAe. Tale operazione viene effettuata cliccando sul pulsante .

Il software provvede, in sequenza, a verificare (o progettare) gli elementi strutturali presenti. Alla fine di questa operazione è possibile visualizzare i risultati delle verifiche cliccando direttamente

sul modello visualizzato nell'ambiente richiamato dal pulsante .



Cliccando su ogni isolatore è possibile visualizzare i risultati relativi alle verifiche in termini di resistenza e deformazione precedentemente descritte:

Visualizza Risultati Isolatore sismico

Testa P=1 F=26 Tipo 6 Piede P=0 F=26

Altezza 50 cm

Carico verticale

Nd max [Kg] Nd lim [Kg] S

-122854.45 343000.00 2.79

Verifica superata.

Fattori di forma

S1 S2x S2y

12.50 2.10 2.10

Deformazione di taglio massima

γ^* $\gamma_t \leq 5$ $\gamma_s \leq \gamma^*/1,5 \leq 2$

3.00 1.14 0.58

Verifica superata.

Spostamento massimo

So max [cm] So lim [cm] S

19.23 25.00 1.30

Tensione inserti acciaio

Nd max [Kg] σ_s max [Kg/cm²] fyk [Kg/cm²] S

-122854.45 -201.76 2350.00 11.65

Verifica superata.

Instabilità

Nd max [Kg] Vcr [Kg] S

-122854.45 800315.63 6.51

Verifica superata.

Chiudi

Gli stessi risultati sono riportati nella relazione di calcolo creata da FaTAe.

L'ultimo confronto da effettuare riguarda la verifica allo stato limite di danno. Come ci si aspettava, con l'introduzione degli isolatori, la struttura presenta esigui spostamenti relativi tra gli impalcati (indice del danno) rispetto alla struttura non isolata. Come consuetudine si riportano i valori relativi agli spostamenti di interpiano.

Piano	Struttura non isolata	Struttura isolata	Variazione
1	0.3937	0.1006	Rid. 74%
2	0.4980	0.0965	Rid. 80%
3	0.3566	0.1006	Rid. 72%
4	0.2751	0.0414	Rid. 85%



