

**INDICE**

- 1. DEFINIZIONI E SIMBOLI**
- 2. METODI PER RIDURRE LA RISPOSTA SISMICA DELLE STRUTTURE**
- 3. ISOLAMENTO DEGLI EDIFICI**
  - 3.1. REQUISITI DI SICUREZZA
  - 3.2. AZIONE SISMICA
    - 3.2.1. *Intensità*
    - 3.2.2. *Coefficiente di importanza*
    - 3.2.3. *Contenuto in frequenza*
    - 3.2.4. *Categorie di sottosuolo*
    - 3.2.5. *Impiego di accelerogrammi*
  - 3.3. COMBINAZIONE DELLA AZIONE SISMICA CON LE ALTRE AZIONI
  - 3.4. INDICAZIONI PROGETTUALI
  - 3.5. REQUISITI DEGLI ISOLATORI
  - 3.6. CARATTERISTICHE E CRITERI DI ACCETTAZIONE DEGLI ISOLATORI
    - 3.6.1. *Isolatori in materiale elastomerico ed acciaio*
    - 3.6.2. *Isolatori elastoplastici*
    - 3.6.3. *Isolatori a scorrimento o rotolamento*
  - 3.7. MODELLO STRUTTURALE
    - 3.7.1. *Struttura*
    - 3.7.2. *Sistema isolante*
  - 3.8. METODI DI ANALISI
    - 3.8.1. *Analisi dinamica lineare*
    - 3.8.2. *Analisi dinamica non lineare*
  - 3.9. VERIFICHE
    - 3.9.1. *Stato Limite di Danno (SLD)*
    - 3.9.2. *Stato Limite Ultimo (SLU)*
- 4. ISOLAMENTO DEI PONTI STRADALI**
  - 4.1. REQUISITI DI SICUREZZA
  - 4.2. AZIONE SISMICA
    - 4.2.1. *Componenti sismiche da considerare e loro combinazione*
  - 4.3. COMBINAZIONE DELLA AZIONE SISMICA CON LE ALTRE AZIONI
  - 4.4. INDICAZIONI PROGETTUALI
  - 4.5. REQUISITI DEGLI ISOLATORI
  - 4.6. CRITERI DI ACCETTAZIONE
  - 4.7. MODELLO STRUTTURALE
  - 4.8. METODI DI ANALISI
    - 4.8.1. *Analisi modale con spettro di risposta*
    - 4.8.2. *Analisi dinamica con integrazione al passo*
  - 4.9. VERIFICHE
    - 4.9.1. *Stato Limite di Danno (SLD)*
    - 4.9.2. *Stato Limite Ultimo (SLU)*
- 5. ASPETTI COSTRUTTIVI, MANUTENZIONE, SOSTITUIBILITA'**
- 6. COLLAUDO**

*Linee guida per progettazione,  
esecuzione e collaudo  
di strutture isolate dal sisma*

**1. DEFINIZIONI E SIMBOLI**

Le dimensioni utili degli isolatori in elastomero ed acciaio sono valutate depurando le dimensioni del dispositivo della parte di elastomero eccedente le dimensioni delle piastre in acciaio; tale parte, infatti, ha funzioni di protezione e ricoprimento ma non strutturali, perché non confinata.

Si individuano i seguenti tipi di prova:

**"elastica preliminare":** Si impongono all'isolatore elasto - plastico prototipo almeno 2 cicli completi di deformazioni alternate, con ampiezza massima non inferiore a  $\pm 0,9 d_1$  (valore nominale dello spostamento  $d_1$ );

**"elasto - plastica quasi statica"**: Si impongono all'isolatore elasto - plastico prototipo almeno 10 cicli completi di deformazioni alternate, con ampiezza massima pari a  $\pm d_2$ ;

**"elasto - plastica dinamica"**: Si impongono all'isolatore elasto - plastico prototipo almeno 5 cicli completi di deformazioni alternate, con ampiezza massima pari a  $\pm d_2$ , applicando le deformazioni imposte con una velocità media pari a quella che si può verificare nel caso del terremoto di progetto relativo allo stato limite di danno ed assimilabile, in mancanza di specifiche valutazioni, a quella corrispondente ad una frequenza di 0,5 Hz per ogni ciclo completo di ampiezza massima  $\pm d_2$ .

Si individuano i seguenti stati limite:

**SLD**: Stato Limite di Danno;

**SLU**: Stato Limite Ultimo;

$a^2 = (\alpha_x b_x^2 + \alpha_y b_y^2)$ : Dimensione equivalente, usata per valutare la deformazione di taglio per rotazione in un isolatore rettangolare di dimensioni  $b_x$ ,  $b_y$  e rotazioni  $a_x$ ,  $a_y$ ;

$a^2 = 3 \alpha D^2/4$ : Dimensione equivalente, utilizzata per valutare la deformazione di taglio per rotazione in un isolatore circolare;

$A'$ : Superficie della singola piastra d'acciaio depurata degli eventuali fori (se non riempiti successivamente);

$A_r$ : Area ridotta efficace dell'isolatore, valutata come  $A_r = A' (1 - d_{Ex}/b_x - d_{Ey}/b_y)$ , per isolatori rettangolari e come  $A_r = A'(1 - d_E/D)$  per isolatori circolari;

$a_g$  :

$b_x$ ,  $b_y$  : Dimensioni in pianta, secondo x ed y, della singola piastra di acciaio di un isolatore elastomerico rettangolare;

$b_{\min} = \min (b_x, b_y)$

$d$ : Spostamento generalizzato massimo raggiunto dall'isolatore in un ciclo di carico;

$d_1$ : Spostamento corrispondente allo **SLD**;

$d_2$ : Spostamento massimo di progetto, corrispondente allo **SLU**;

$d_{el}$ : Spostamento generalizzato per il quale l'isolatore elasto - plastico accusa uno spostamento residuo allo scarico pari a 0,02  $d_{el}$ ;

$d_{ex}$ ,  $d_{ey}$  : Spostamenti relativi tra le due facce (superiore e inferiore) degli isolatori, prodotti dalla azione sismica agente nelle direzioni x e y, nonché dalle azioni di ritiro, fluage e termiche (ridotte al 50%), ove rilevanti;

$d_E = (d_{Ex}^2 + d_{Ey}^2)^{1/2}$

$d_g$ : Spostamento di picco del suolo;

$D$ : Diametro della singola piastra di acciaio negli isolatori circolari o dimensione in pianta, misurata parallelamente all'azione orizzontale agente, della singola piastra di acciaio;

$E_g$ : Modulo di Young del suolo;

$F_{el}$ : Forza generalizzata cui corrisponde lo spostamento generalizzato  $d_{el}$ ;

$F_1$ : Forza generalizzata corrispondente alla soglia di plasticizzazione o limite del comportamento elastico dell'isolatore elasto - plastico;

$F_2$ : Forza generalizzata corrispondente al massimo valore dello spostamento generalizzato letto in corrispondenza dell'isolatore elasto - plastico;

**g**: Accelerazione di gravità;

**G**: Modulo di taglio, convenzionalmente definito come il modulo secante tra le deformazioni di taglio corrispondenti agli spostamenti  $0,27 t_e$  e  $0,58 t_e$ ;

**G<sub>g</sub>**: Modulo di taglio del suolo;

**G<sub>din</sub>**: Modulo dinamico equivalente a taglio, valutato come  $G = 2W_e t_e / (A'd^2)$  in corrispondenza di  $d = t_e$ ;

**G<sub>K</sub>**: Carichi permanenti al loro valore caratteristico;

**h**: Altezza del generico piano di un edificio;

**H<sub>x,y</sub>**: Forza massima orizzontale trasmessa dagli isolatori in direzione x o y;

**I**: Coefficiente di importanza della struttura considerata;

**I-E**: Azione sismica corrispondente allo stato - limite in esame;

**k<sub>1</sub>, k<sub>2</sub>**: Esponenti utilizzati per descrivere i due rami discendenti dello spettro di risposta;

**K<sub>e</sub> = 2 W<sub>e</sub>/d<sup>2</sup> = G<sub>din</sub> A'/t<sub>e</sub>** = Rigidezza equivalente in un singolo ciclo di carico;

**K<sub>1</sub> = F<sub>el</sub>/d<sub>el</sub>**: Rigidezza elastica dell'isolatore elasto - plastico;

**L**: Superficie laterale libera del singolo strato di elastomero maggiorata della superficie laterale degli eventuali fori (se non riempiti successivamente);

**M**: Massima dimensione dell'edificio in pianta;

**N<sub>spt</sub>**: Indice ricavato sulla base dello **Standard Penetrometric Test**;

**P<sub>K</sub>**: Valore caratteristico dell'azione di precompressione a cadute di tensione avvenute;

**Q<sub>ki</sub>**: Valore caratteristico della azione variabile **Q<sub>i</sub>**;

**s**: Fattore che tiene conto delle condizioni stratigrafiche e geotecniche del sito;

**S**: Livello di sismicità del sito (6, 9, 121);

**S<sub>e</sub>**: Spettro elastico di risposta in termini di accelerazione;

**S<sub>1</sub> = A'/L**: Fattore di forma primario;

**S<sub>2</sub> = D/t<sub>e</sub>**: Fattore di forma secondario;

**t<sub>i</sub>**: Spessore del singolo strato di elastomero;

**t<sub>e</sub>**: Somma dello spessore dei singoli strati di elastomero valutata maggiorando lo spessore dei due strati esterni, se maggiore di 3 mm, del fattore 1,4;

**t<sub>1</sub>, t<sub>2</sub>**: Spessore dei due strati di elastomero direttamente a contatto con la piastra considerata;

**t<sub>s</sub>**: Spessore della piastra generica;

**T**: Periodo generico;

**T<sub>B</sub>, T<sub>C</sub>, T<sub>D</sub>**: Valori dei periodi che separano i diversi rami dello spettro tra loro, valori dipendenti dalle caratteristiche geotecniche -

stratigrafiche locali;

$T_{bf}$ : Primo periodo proprio della struttura a base fissa, valutato per difetto;

$T_i$ : Primo periodo proprio della struttura isolata, valutato per eccesso;

$T_R$ : Periodo medio di ritorno del terremoto di progetto, pari ad almeno 150 anni per lo **SLD**, ad almeno 500 anni per lo **SLU**;

$T_R(15^\circ), T_R(300), T_R(500), T_R(750), T_R(1000)$ : Periodo di ritorno del terremoto di progetto pari rispettivamente a 150, 300, 500, 750, 1000 anni;

$V$ : Carico verticale di progetto agente sull'isolatore in presenza di sisma;

$V_{max}$ : Valore massimo di  $V$ ;

$V_{min}$ : Valore minimo di  $V$ ;

$V_g$ : Velocità di picco del suolo;

$V_p$ : Velocità di propagazione delle onde di compressione;

$V_s$ : Velocità di propagazione delle onde di taglio, per deformazioni di taglio  $\gamma \leq 10^{-6}$ ;

$W_e$ : Energia di deformazione elastica corrispondente allo spostamento  $d$ ;

$W_d$ : Energia dissipata in un ciclo completo di carico;

$X$ : Distanza tra i punti considerati;

$\alpha_x, \alpha_y$ : Rotazioni rispettivamente attorno alle direzioni  $x$  ed  $y$ ;

$$\alpha = (\alpha_x^2 + \alpha_y^2)^{1/2};$$

$\beta_o$ : Fattore che misura la amplificazione dinamica della risposta;

$\gamma$ : Deformazione di taglio generica;

$\gamma_{Rd}$ : Fattore di sovraresistenza;

$\gamma_c = 1,5 V/S_1/A_r$ : Deformazione di taglio dell'elastomero prodotta dalla compressione;

$\gamma_s = d_E/t_e$ : Deformazione di taglio dell'elastomero prodotta dallo spostamento sismico totale, inclusi gli effetti torsionali;

$\gamma_a = a^2/2t_i t_e$ : Deformazione di taglio dell'elastomero dovuta alla rotazione angolare;

$\gamma_t = \gamma_c + \gamma_s + \gamma_a$ : Deformazione totale di taglio;

$\eta = \sqrt[3]{7/(2 + \xi)}$ : Fattore che tiene conto di un coefficiente di smorzamento viscoso equivalente  $\xi$ , diverso dal 5% ( $\eta = 1$  per  $\xi = 0,05$ );

$\delta = b_{min}/t_e$ : Nel caso di isolatori rettangolari;

$\delta = D/t_e$ : Nel caso di isolatori circolari;

$\Delta$ : Durata minima della parte stazionaria degli accelerogrammi generati artificialmente;

$\lambda = v_g E_g / (1 - v_g) / (1 - 2v_g)$  : Costante elastica del suolo;

$v_g$  : Coefficiente di Poisson del suolo;

$\xi = W_d / (4\pi W_e)$ : Coefficiente di smorzamento viscoso equivalente;

$\rho$  : Densità di massa del suolo;

$\phi$  : Fattore che tiene conto della indipendenza dei carichi tra loro (v. par. 3.3);

$\Psi_{2i}$  : Coefficiente di combinazione che fornisce il valore quasi permanente della azione  $Q_i$ ;

$\Psi_{Ei}$  : Coefficiente di combinazione della azione  $Q_i$  funzione della probabilità che tutti i carichi  $Q_{ki}$  siano presenti sulla intera struttura in occasione del sisma, pari al prodotto  $\Psi_{2i} \cdot \phi$ .

## 2. METODI PER RIDURRE LA RISPOSTA SISMICA DELLE STRUTTURE

Nell'ultimo trentennio, grazie alla diffusione degli accelerometri ed alla sempre maggiore disponibilità delle relative registrazioni, anche per regioni di media sismicità quali l'Italia si è presa chiara coscienza della elevata entità delle accelerazioni raggiunte dal terreno in occasione di terremoti violenti e della conseguente impossibilità di realizzare, almeno in termini economicamente accettabili, strutture antisismiche che si mantengano in campo elastico in presenza dei terremoti suddetti. Logica conseguenza di ciò è stata l'affermazione di una filosofia di progettazione che considera accettabile l'entrata in campo plastico della struttura per effetto di detti terremoti e utilizza la plasticizzazione come tecnica di protezione dal sisma; la riduzione della rigidità che accompagna la plasticizzazione, unita all'incremento di energia dissipata per comportamenti isteretici, concorrono infatti ambedue a ridurre l'entità delle accelerazioni sismiche sperimentate dalla struttura e l'entità delle conseguenti forze d'inerzia. È dunque possibile ridurre l'entità delle azioni di progetto purché la struttura sia capace di entrare significativamente in campo plastico senza peraltro collassare, ossia purché la struttura sia "duttile".

In alternativa a tale filosofia progettuale, nell'ultimo periodo sono state individuate numerose tecniche costruttive finalizzate a ridurre l'entità della entrata in campo plastico delle strutture antisismiche, al limite eliminandola; tali tecniche vengono complessivamente individuate con il termine di "tecniche di protezione passiva". L'aggettivo "passiva", attribuito alla protezione, sottolinea il fatto che le tecniche in questione riducono la risposta sismica della struttura attraverso un comportamento costante e predeterminato, dunque sono incapaci di correzioni contestuali al verificarsi del terremoto, non si adattano interattivamente ad esso bensì lo subiscono "passivamente". Accanto alle "tecniche di protezione passiva", ma più recentemente, sono state sviluppate anche "tecniche di protezione attiva", tali tecniche, che peraltro non costituiscono l'oggetto delle presenti linee guida, operano attivamente, attraverso opportune apparecchiature (spesso attuatori idraulici), per modificare istantaneamente le caratteristiche meccaniche della struttura così da ridurre la risposta sismica. Non rientrano infine nell'ambito di applicazione delle presenti linee guida i "ritegni antisismici", con ciò intendendosi i dispositivi che riducono, e al limite annullano, gli spostamenti relativi di origine sismica tra strutture contigue e all'interno della stessa struttura.

Le "tecniche di protezione passiva" possono suddividersi in tre grandi categorie e precisamente:

- tecniche di isolamento sismico,
- tecniche di dissipazione di energia,
- tecniche miste.

Le tecniche di isolamento sismico consistono, sostanzialmente, nell'introdurre, lungo lo sviluppo verticale della struttura da isolare, una o più discontinuità che separano la struttura in due o più parti e cioè la sottostruttura, collegata alle fondazioni, e le sovrastrutture; se la prima discontinuità è situata alla base della struttura si parla di isolamento alla base, diversamente di isolamento. Tra sottostruttura e sovrastruttura e fra due sovrastrutture successive vengono interposti degli "isolatori", ossia apparecchi d'appoggio dotati di elevata rigidità per carichi verticali e limitata rigidità per carichi orizzontali. Con l'inserimento degli "isolatori" si consegue un sostanziale disaccoppiamento, o filtro, tra moto della sottostruttura (strettamente legato al moto del terreno) e moto della sovrastruttura, così da ridurre la trasmissione alla sovrastruttura o alle sovrastrutture, della energia cinetica che il sisma fornisce alla sottostruttura. L'isolamento si applica sia agli edifici che ai ponti; *nel seguito le due tipologie strutturali dette saranno trattate separatamente e precisamente gli edifici nel Cap. 3., i ponti nel Cap. 4.*

Una classificazione dei sistemi di isolamento può farsi sulla base del metodo utilizzato per conseguire la limitata rigidità per carichi orizzontali necessaria a garantire il disaccoppiamento sopra illustrato; si individuano sostanzialmente tre tipi di isolatori, corrispondenti a tre metodologie costruttive diverse:

- isolatori in materiale elastomerico ed acciaio,
- isolatori elastoplastici,
- isolatori a scorrimento o a rotolamento.

Gli isolatori in materiale elastomerico ed acciaio sono costituiti da strati alternati di materiale elastomerico (gomma naturale o materiali artificiali idonei) e di acciaio; l'acciaio svolge una funzione di confinamento dell'elastomero riducendone la deformabilità per carichi ortogonali alla giacitura degli strati (carichi verticali), lasciandolo invece fortemente deformabile per carichi paralleli alla giacitura degli strati (carichi orizzontali). Gli isolatori elastoplastici sono costituiti da elementi che si mantengono in campo elastico in presenza di soli carichi verticali ed invece plasticizzano in presenza di azioni orizzontali superiori ad una soglia prefissata. Infine gli isolatori a scorrimento o a rotolamento sono costituiti rispettivamente da appoggi a scorrimento (acciaio - teflon) o a rotolamento (su rulli o sfere), caratterizzati tutti da bassi valori delle resistenze per attrito.

Per contenere l'entità degli spostamenti subiti dalla sovrastruttura isolata, è sempre necessario garantire la presenza di un significativo smorzamento (>5% dello smorzamento critico). Nel caso degli isolatori in materiale elastomerico ed acciaio e degli isolatori elasto - plastici, il comportamento fortemente isteretico del materiale elastomerico o dell'acciaio plasticizzato è spesso sufficiente ad assicurare l'esistenza dello smorzamento detto, laddove invece, nel caso degli isolatori a scorrimento o a rotolamento, è necessario disporre, in parallelo agli isolatori, opportuni dissipatori di energia.

Le tecniche di dissipazione di energia consistono, sostanzialmente, nel collegare alla struttura, ad esempio attraverso controventi, dei "dissipatori", ossia apparecchi capaci, all'atto del sisma, di assorbire grandi quantità di energia. Con l'inserimento dei "dissipatori" resta immutata, a differenza di quanto avveniva con gli isolatori, l'energia cinetica fornita dal sisma al complesso costruzione più "dissipatori", ma la maggior parte di essa viene assorbita dai "dissipatori" stessi, con conseguente significativa riduzione delle sollecitazioni e degli spostamenti richiesti alla struttura e dunque dell'entrata in campo plastico.

Una classificazione dei sistemi di dissipazione di energia può farsi sulla base del metodo utilizzato per conseguire la dissipazione, si individuano sostanzialmente tre tipi di dissipatori, corrispondenti a tre metodologie costruttive diverse:

- dissipatori visco - elastici;
- dissipatori elasto - plastici;
- dissipatori ad attrito.

I dissipatori visco - elastici sfruttano il comportamento viscoelastico di taluni materiali (solitamente materie plastiche, oli minerali, silicone) per dissipare energia con un comportamento di tipo viscoso; i dissipatori elasto - plastici sfruttano la plasticizzazione di materiali metallici (acciaio, piombo) per dissipare energia in cicli di isteresi; i dissipatori ad attrito dissipano energia sfruttando i fenomeni di attrito che nascono tra superfici metalliche, opportunamente trattate, in scorrimento relativo tra loro.

Nel seguito le strutture dotate di dissipatori non verranno esaminate, rimandando, per esse ad altro documento.

Si sottolinea infine che, trattandosi di apparecchiature che entrano in funzione dopo lunghissimi periodi di inattività, per garantire un impiego affidabile sia degli isolatori che dei dissipatori, è fondamentale assicurare la loro costanza di comportamento nel tempo.

### **3. ISOLAMENTO DEGLI EDIFICI**

#### **3.1. REQUISITI DI SICUREZZA**

Le costruzioni dotate di dispositivi di isolamento devono essere progettate con riferimento ai requisiti seguenti:

##### **a) requisiti concernenti i danni**

- l'insieme costituito dai dispositivi isolanti, da sottostruttura e sovrastruttura, dalle parti non strutturali dell'edificio, dalle apparecchiature in esso contenute, ove rilevanti, e dai collegamenti dell'edificio con l'esterno, possiede un prefissato livello di protezione nei confronti dei danni, intesi come limitazione anche parziale d'uso o necessità di interventi di riparazione;

##### **b) requisiti concernenti il collasso**

- l'insieme costituito dai dispositivi isolanti e dalle strutture dell'edificio possiede un prefissato livello di protezione nei confronti della capacità ultima degli isolatori e della capacità portante delle strutture;
- il sistema di isolamento e la sottostruttura, ivi comprese le fondazioni, posseggono un livello di protezione superiore a quello della sovrastruttura.
- Ai fini delle presenti linee guida, i requisiti suddetti si intendono soddisfatti se sono rispettate le condizioni seguenti:

**Stato Limite di Danno (SLD)**

- per un evento sismico caratterizzato da un assegnato periodo medio di ritorno  $T_R$  la risposta dell'insieme isolatore - struttura si mantiene entro il campo lineare elastico, secondo i criteri di verifica e con i limiti indicati al par. 3.9. **Verifiche**;
- per gli edifici la cui destinazione richiede il mantenimento della funzionalità durante e dopo il verificarsi di un evento sismico di assegnato periodo medio di ritorno  $T_R$ , l'insieme delle apparecchiature rilevanti alla funzione dell'edificio conserva la propria capacità operativa.

**Stato Limite Ultimo (SLU);**

- per un evento sismico caratterizzato da un assegnato periodo medio di ritorno  $T_R$ , superiore al precedente, il dispositivo isolante raggiunge le sue condizioni limite di funzionamento e la struttura subisce danni strutturali e non strutturali di entità controllata;
- nessun danno strutturale si verifica nelle strutture sotto il piano di isolamento ed il comportamento delle fondazioni (strutture e terreno) rimane entro il campo elastico;
- le modalità di verifica dello **SLU** sopra definito sono indicate al par. 3.9. **Verifiche**.

### 3.2. AZIONE SISMICA

#### 3.2.1. Intensità

L'intensità dell'azione sismica è definita in termini di accelerazione massima del terreno  $a_g$ . I valori di  $a_g$  da adottare per i due stati limite, di danno **SLD** ed ultimo **SLU**, sono caratterizzati da periodi medi di ritorno non inferiori rispettivamente a 150 e 500 anni. Tali valori possono essere ottenuti con una analisi di pericolosità sismica specifica per il sito di costruzione dell'opera e, in ogni caso, non inferiori a quelli indicati nella successiva Tabella 1.

Ove tale analisi non venga eseguita, si farà riferimento alla zonazione in vigore, attribuendo ad  $a_g/g$  ( $g$  = accelerazione di gravità) i valori riportati nella tabella seguente:

TABELLA 1  
Valori di  $a_g/g$ , per i due stati - limite, in funzione del livello di sismicità **S**

<b>S</b>	<b><math>a_g/g</math> (SLD)</b>	<b><math>a_g/g</math> (SLU)</b>
6	0,04	0,15
9	0,07	0,25
12	0,10	0,35

#### 3.2.2. Coefficiente di importanza

Per aumentare il livello di protezione nei confronti dei due stati limite (di danno **SLD** ed ultimo **SLU**), i valori dell'intensità sismica definiti al punto 3.2.1 possono venire maggiorati per mezzo di un fattore, denominato fattore di importanza **I**. Ove possibile, il valore di **I** sarà determinato in modo che l'accelerazione  $I \cdot a_g$  sia caratterizzata dal periodo medio di ritorno  $T_R$  ritenuto appropriato per l'opera in questione, e comunque maggiore di 150 e 500 anni rispettivamente per lo **SLD** e per lo **SLU**. In mancanza di una valutazione esplicita si potrà far riferimento ai valori di seguito indicati:

- $I = 1,4$  per il passaggio da  $T_R$  (150) a  $T_R$  (300) e da  $T_R$  (500) a  $T_R$  (1000);
- $I = 1,2$  per il passaggio da  $T_R$  (500) a  $T_R$  (750).

#### 3.2.3. Contenuto in frequenza

Il contenuto in frequenza del moto sismico è definito mediante uno spettro di risposta elastico, normalizzato ad  $a_g = 1$ ; tale spettro sarà assunto uguale per le due componenti di traslazione orizzontali, che si considerano statisticamente indipendenti tra loro.

Per la componente verticale, salvo diverse indicazioni fornite da studi specifici per il sito, la forma dello spettro sarà analoga a quella relativa al moto orizzontale, ma con le ordinate modificate come segue:

- per  $T \leq 0,15$  sec. ridotte di un fattore 0,7;
- per  $T > 0,50$  sec. ridotte di un fattore 0,5;
- per  $0,15 \text{ sec} < T \leq 0,50 \text{ sec}$ . ridotte di un fattore ricavato per interpolazione lineare tra 0,7 e 0,5.

Lo spettro di risposta elastico normalizzato, riferito ad uno smorzamento del 5%, è dato dalle espressioni seguenti:

$$\begin{aligned}
 0 \leq T < T_B & \quad S_e(T) = s \left\{ 1 + \left[ T/T_B (\eta\beta_0 - 1) \right] \right\} \\
 T_B \leq T < T_C & \quad S_e(T) = s\eta\beta_0 \\
 T_C \leq T < T_D & \quad S_e(T) = s\eta\beta_0 (T_C/T)^{k_1} \\
 T_D \leq T & \quad S_e(T) = s\eta\beta_0 (T_C/T)^{k_1} (T_D/T)^{k_2}
 \end{aligned}$$

nelle quali:

**s** fattore che tiene conto delle condizioni stratigrafiche e geotecniche del sito (v. par. 3.2.4.);

$\eta = \sqrt[3]{7/(2 + \xi)} \geq 0,7$  fattore che tiene conto di un coefficiente di smorzamento viscoso equivalente  $\xi$ , diverso dal 5% ( $\eta = 1$  per  $\xi = 5\%$ );

$\beta_0$  fattore che misura la amplificazione dinamica della risposta;

$T_B, T_C, T_D$  valori dei periodi che separano i diversi rami dello spettro, dipendenti dalle caratteristiche geotecnico - stratigrafiche locali;

$k_1, k_2$  esponenti utilizzati per descrivere i due rami discendenti dello spettro.

I valori dei parametri  $\beta_0, T_B, T_C, T_D, k_1, k_2$  per le tre categorie di sottosuolo definito al par. 3.2.4., sono riportate nella Tabella 2.

TABELLA 2  
Valori dei parametri dello spettro di risposta elastico normalizzato

CAT. SUOLO	s	$\beta_0$	$T_B$	$T_C$	$T_D$	$K_1$	$K_2$
<b>A</b>	1	2,5	0,10	0,40	3,0	1	2
<b>B</b>	1	2,5	0,15	0,60	3,0	1	2
<b>C</b>	0,9	2,5	0,20	0,80	3,0	1	2

In alternativa all'impiego della forma spettrale standard associata al valore di  $a_g$ , fornito dalla Tabella 1 del par. 3.2.1., è consentito l'impiego di spettri di risposta specifici per il sito considerato, caratterizzati dal periodo medio di ritorno richiesto per ciascuno dei due stati limite, ricavati direttamente sulla base di conoscenze geosismotettoniche e geotecniche, oppure da dati statistici applicabili alla situazione in esame.

Ai fini del progetto eseguito con uso dello spettro di risposta specifico per il sito, le ordinate di tali spettri, in corrispondenza dei periodi propri di interesse per il sistema, non potranno essere assunte inferiori alle ordinate dello spettro standard applicabile, calcolate ponendo in esso  $k_1 = 1, k_2 = 2$ .

#### 3.2.4. Categorie di sottosuolo

Le condizioni di sottosuolo per le quali è consentito il progetto di edifici isolati sono distinte nelle tre categorie seguenti (le profondità si riferiscono al piano di posa delle fondazioni):

**A** - Formazioni litoidi o terreni omogenei caratterizzati da valori di  $V_s$  ( $V_s$  = velocità delle onde di taglio per deformazioni di taglio  $\gamma \leq 10^{-6}$ ) superiori a 800 m/sec oppure da  $N_{spt} \geq 80$ , salvo in strati superficiali di spessore massimo pari a 5 m.

Depositi di sabbie, ghiaie, argille consolidate ad elevate caratteristiche meccaniche, con spessori di diverse decine di metri, caratterizzati da valori di  $V_s$  crescenti con la profondità, a partire da  $V_s \geq 400$  m/sec ( $N_{spt} \geq 30$ ) alla profondità di 10m.

**B** - Depositi di sabbie e ghiaie mediamente addensate, o di argille di media rigidezza, con spessori variabili da diverse decine fino a centinaia di metri, caratterizzati da valori di  $V_s$  crescenti con la profondità, a partire da  $V_s \geq 200$  m/sec ( $N_{spt} \geq 2151$  alla profondità di 10 m e pari ad almeno  $V_s = 450$  m/sec ( $N_{spt} \geq 35$ ) alla profondità di 50 m.

**C** - Depositi di terreni non coesivi, con o senza intercalazioni di terreni soffici coesivi, caratterizzati da valori di  $V_s$  crescenti con la profondità senza discontinuità marcate, a partire da  $V_s \geq 150$  m/sec ( $N_{spt} \geq 10$ ) alla profondità di 20 m.

Depositi di terreni coesivi a caratteristiche di rigidezza da bassa a media, con variazione di  $V_s$  (o di  $N_{spt}$ ) come al punto precedente.

Per condizioni di suolo intermedie tra due delle categorie descritte, si farà riferimento a quella più gravosa. **Non è consentita la realizzazione di edifici isolati su terreni di caratteristiche meccaniche inferiori a quelle della categoria C.**

#### 3.2.5. Impiego di accelerogrammi

Gli accelerogrammi dovranno essere coerenti con lo spettro di risposta adottato, sia esso quello tipo, definito al par 3.2.3., oppure uno specifico per il sito. La durata degli accelerogrammi deve essere coerente con la magnitudo e con gli altri parametri fisici relativi agli eventi che determinano la scelta del valore di  $a_g$ . In assenza di studi specifici la durata minima  $\Delta$  della parte stazionaria degli accelerogrammi assumerà i valori indicati nella Tabella 4.

La parte stazionaria deve essere preceduta e seguita da tratti ad intensità crescente da zero e decrescente a zero, di durata non inferiore rispettivamente a 4 e 3 sec. per  $\Delta = 15$  sec. Per valori diversi di  $\Delta$  è consentita una interpolazione lineare.

TABELLA 4  
Durata della parte stazionaria  $\Delta$  degli accelerogrammi

$a_g/g$	0,10	0,20	0,30	0,40
$\Delta$ (sec)	10	15	20	25

Il numero di accelerogrammi da adottare deve essere almeno pari a 4 e comunque tale da dar luogo ad una stima stabile del valore medio della risposta. La coerenza con gli spettri di riferimento è da verificare in base alla media delle ordinate spettrali ottenute con i diversi accelerogrammi, per un coefficiente di smorzamento viscoso equivalente  $\xi$ , del 5%.

Nel campo  $T_{bf} \div 1,2T_i$ , ove  $T_{bf}$  rappresenta la stima inferiore del primo periodo proprio della struttura a base fissa e  $T_i$ ;



rappresenta la stima superiore del primo periodo proprio della struttura isolata, la media delle ordinate spettrali, in corrispondenza di ogni periodo, deve risultare non inferiore al 90% delle ordinate spettrali di riferimento. Comunque, nel campo di periodi compreso tra 0,15 sec e 3,00 sec. la stessa media non deve risultare inferiore all'80% delle ordinate spettrali di riferimento.

3.3. COMBINAZIONE DELIA AZIONE SISMICA CON LE ALTRE AZIONI

Le verifiche nei confronti dei due stati limite, di danno **SLD** ed ultimo **SLU**, saranno eseguite per la seguente combinazione di azioni:

$$I \cdot E + G_k + P_k + \sum_i (\Psi_{2i} \cdot Q_{Ki})$$

- I · E** azione sismica per lo stato - limite in esame;
  - G<sub>k</sub>** carichi permanenti al loro valore caratteristico;
  - P<sub>k</sub>** valore caratteristico della azione di precompressione, a cadute di tensione avvenute;
  - Ψ<sub>2i</sub>** coefficiente di combinazione che fornisce il valore quasi - permanente della azione variabile **Q<sub>i</sub>**;
  - Q<sub>Ki</sub>** valore caratteristico della azione variabile **Q<sub>i</sub>**.
- Gli effetti dell'azione sismica saranno valutati tenendo conto dei seguenti carichi gravitazionali:

$$G_k + \sum_i (\Psi_{Ei} \cdot Q_{Ki})$$

dove **Ψ<sub>Ei</sub>** coefficiente di combinazione della azione **Q<sub>i</sub>**; che tiene conto della probabilità che tutti i carichi **Ψ<sub>2i</sub> Q<sub>Ki</sub>**; siano presenti sulla intera struttura in occasione del sisma e si ottiene moltiplicando **Ψ<sub>2i</sub>** per **φ**.

I valori dei coefficienti **Ψ<sub>2i</sub>** e **φ** sono riportati nelle successive Tabelle.

TABELLA 5  
Fattori **Ψ<sub>2i</sub>** per varie destinazioni d'uso

DESTINAZIONE D'USO	Ψ <sub>2i</sub>
Abitazioni, Uffici	0,3
Uffici aperti al pubblico, Scuole, Negozi, Autorimesse	0,6
Tetti e coperture con neve	0,35
Magazzini, Archivi	0,8
Vento	0

TABELLA 6  
Fattori **φ** per edifici

CARICHI AI PIANI		φ
Carichi indipendenti	Ultimo piano	1,0
	Altri piani	0,5
Carichi correlati ad alcuni piani	Ultimo piano	1,0
	Piani con carichi correlati	0,8
	Altri piani	0,5

3.4. INDICAZIONI PROGETTUALI

Come già detto l'isolamento sismico consiste, sostanzialmente, nell'introdurre, lungo lo sviluppo verticale della struttura da isolare, una o più discontinuità che separano la struttura in due o più parti e cioè la sottostruttura, collegata alle fondazioni, e le sovrastrutture, se la prima discontinuità è situata alla base della struttura si parla di isolamento alla base, diversamente di isolamento. Tra sottostruttura e sovrastruttura e fra due sovrastrutture successive vengono inseriti gli isolatori, dispositivi di caratteristiche adeguate al livello di protezione previsto, tenuto conto:

- della destinazione d'uso;
- della tipologia strutturale;
- della geometria della costruzione;
- dello stato di conservazione (per edifici esistenti).

Premesso che le parti strutturali sopra e sotto il piano dei dispositivi devono essere dimensionate e progettate nel rispetto delle vigenti normative per le costruzioni in zone sismiche, salvo s'intende le condizioni più restrittive contenute nelle presenti istruzioni, per le strutture di nuova costruzione si sottolineano i seguenti criteri di progetto:

- Semplicità delle forme strutturali sia in pianta che in elevazione;
- Analisi basate su modelli di calcolo realistici e tali, se necessario, da mettere in conto l'influenza degli elementi non strutturali;
- Sostanziale coincidenza fra la proiezione del centro di massa dell'edificio sul piano degli isolatori ed il centro di rigidezza degli isolatori stessi;
- Interassi della maglia strutturale scelti in modo tale che il carico verticale **V** di progetto agente sul singolo isolatore in

presenza di sisma, somma dei carichi verticali dovuti a permanenti ed accidentali moltiplicati per gli opportuni coefficienti in precedenza precisati ed alle eventuali azioni concomitanti (forze orizzontali, spostamenti e rotazioni), risulti essere sempre di compressione o, al più, nullo;

5. Strutture del piano di posa degli isolatori e del piano su cui appoggia la struttura in elevazione dimensionate in modo da assicurare un comportamento rigido nel piano suddetto, nonché dotate di rigidità adeguata anche in direzione ortogonale al loro piano, così da limitare gli effetti dei cedimenti differenziali delle fondazioni;
6. Impiego di dispositivi che abbiano un comportamento meccanico chiaramente definito.

L'alloggiamento degli isolatori ed il loro collegamento alla struttura devono essere concepiti in modo tale da assicurarne l'accesso e rendere gli isolatori stessi ispezionabili e sostituibili. È necessario anche prevedere adeguati sistemi di contrasto, idonei a consentire l'eventuale ricentraggio degli isolatori stessi qualora, a seguito di un sisma, si abbiano spostamenti residui.

Gli isolatori vanno protetti dall'azione dell'incendio, ove necessario, o, in alternativa, occorre prevedere dispositivi che, in caso di distruzione degli isolatori, siano idonei a sopportare il corrispondente carico verticale.

Le connessioni, strutturali e non, fra la struttura isolata e il terreno o le parti di strutture non isolate devono essere progettate in modo tale da assorbire, con ampio margine di sicurezza, gli spostamenti relativi previsti dal calcolo. Particolare attenzione, a tale proposito, deve essere posta negli impianti. Occorre anche attuare adeguati accorgimenti affinché l'eventuale malfunzionamento delle connessioni a cavallo dei giunti non possa compromettere l'efficienza dell'isolamento, ad esempio attraverso l'intervento di significativi contrasti in corrispondenza dei giunti stessi e tali da impedire, durante l'evento sismico, le libere oscillazioni della struttura.

### 3.5. REQUISITI DEGLI ISOLATORI

Gli isolatori saranno progettati, realizzati, messi in opera ed utilizzati garantendo, con adeguato livello di affidabilità, il possesso dei requisiti di cui al precedente par. 3.1., punti a) e b). Per un corretto funzionamento della costruzione isolata si sottolinea l'importanza di una piena rispondenza tra le prestazioni dichiarate dal fornitore e quelle effettive della fornitura, in particolare per quanto riguarda l'omogeneità e la conservazione nel tempo delle caratteristiche fisiche e meccaniche correlate al periodo di utilizzo previsto. Ai fini delle presenti linee guida i requisiti detti si intendono posseduti se, per le diverse tipologie di dispositivi, vengono rispettate le regole di dettaglio definite al par. 3.6. e sono soddisfatte le verifiche definite al par 3.9.

Debbono inoltre essere rispettate le condizioni seguenti:

#### **Stato Limite di Danno (SLD)**

- I dispositivi saranno accompagnati da una relazione che illustri il comportamento meccanico sia di insieme che dei singoli componenti, così da minimizzare la possibilità del verificarsi di comportamenti non previsti.
- La definizione del comportamento meccanico del dispositivo sotto azioni orizzontali (sisma, vento, ecc.) sia ai fini della risposta del sistema strutturale che lo contiene che ai fini del dimensionamento del dispositivo stesso, sarà basata su un modello strutturale sufficientemente realistico (non lineare, dipendente dallo sforzo assiale, ecc.) e su prove di laboratorio effettuate in condizioni il più aderenti possibile alle condizioni reali in termini di accelerazione, velocità e spostamento. Eventuali modifiche di tale comportamento, sia in fase di costruzione che di messa in opera e nella successiva vita utile del dispositivo, possono essere ammesse solo con adeguate giustificazioni e verifiche, incluso il controllo che non siano state introdotte sfavorevoli sovraresistenze e sovrarigidità rispetto alle richieste di progetto.

Nell'ambito del progetto si dovrà redigere un piano di qualità riguardante sia la progettazione del dispositivo, che la costruzione, la messa in opera, la manutenzione e le relative verifiche analitiche e sperimentali. La scelta dei materiali e le tecniche di costruzione saranno in accordo con le ipotesi di progetto. I documenti di progetto indicheranno i dettagli, le dimensioni e le prescrizioni sulla qualità, come pure eventuali dispositivi di tipo speciale e le tolleranze concernenti la messa in opera. Elementi di elevata importanza, che richiedano particolari controlli durante le fasi di costruzione e messa in opera, saranno indicati negli elaborati grafici di progetto. In tali casi dovranno essere indicati anche i metodi di controllo da adottare.

#### **Stato Limite Ultimo (SLU);**

- Si dovrà verificare che i dispositivi ed i relativi collegamenti con la struttura abbiano la resistenza e la deformabilità necessarie per sostenere le azioni definite al par. 3.3.;
- nelle verifiche dette si terrà conto degli effetti indotti dallo spostamento dei punti di applicazione dei carichi;
- nella determinazione delle sollecitazioni agenti sui dispositivi e sugli elementi strutturali ad essi collegati si dovrà tenere conto della effettiva capacità di resistenza e della effettiva rigidità del dispositivo che trasmette l'azione.

### 3.6. CARATTERISTICHE E CRITERI DI ACCETTAZIONE DEGLI ISOLATORI

La conformità dei prodotti ai requisiti delle presenti linee guida, la cui responsabilità è del Produttore, sarà accertata attraverso un "Certificato di conformità del prodotto", rilasciato dal Servizio Tecnico Centrale del Consiglio Superiore dei LL.PP., anche ai sensi dell'art 8, comma 3, del D.P.R. 21 aprile 1993, n. 246.

Ai fini delle presenti disposizioni, i dispositivi di isolamento si dividono in:

- isolatori in materiale elastomerico ed acciaio;
- isolatori elasto - plastici;
- isolatori a scorrimento o rotolamento.

#### **3.6.1. Isolatori in materiale elastomerico ed acciaio**

Gli isolatori in materiale elastomerico ed acciaio sono costituiti da strati di materiale elastomerico (gomma naturale o materiali artificiali idonei) alternati a piastre di acciaio aventi prevalente funzione di confinamento dell'elastomero, e vengono disposti nella struttura in modo da sopportare le azioni e deformazioni orizzontali di progetto trasmesse (sisma, vento, dilatazioni termiche, viscosità, ecc.) mediante azioni parallele alla giacitura degli strati di elastomero ed i carichi permanenti ed accidentali verticali mediante azioni perpendicolari agli strati stessi. Le piastre di acciaio saranno conformi alla EN 10025: 1990 grade E235 o equivalente con un'allungamento minimo a rottura del 18% e spessore minimo pari a 2 mm per le piastre interne e a 20 mm per le piastre esterne.

Gli isolatori debbono avere pianta quadrata o circolare, così da presentare un comportamento il più possibile indipendente dalla direzione dell'azione orizzontale agente. Le loro dimensioni utili debbono sempre essere valutate depurando le dimensioni esterne del dispositivo della parte di elastomero eccedente le dimensioni delle piastre in acciaio; tale elastomero, infatti, svolge funzioni di protezione e ricoprimento ma non strutturali, in quanto mancante di un confinamento significativo da parte delle piastre d'acciaio. Si definiscono due fattori di forma:

**S<sub>1</sub>**, fattore di forma primario, rapporto tra la superficie **A'** comune al singolo strato di elastomero ed alla singola piastra d'acciaio, depurata degli eventuali fori (se non riempiti successivamente), e la superficie laterale libera **L** del singolo strato di elastomero, maggiorata della superficie laterale degli eventuali fori (se non riempiti successivamente) ossia **S<sub>1</sub> = A'/L**;

**S<sub>2</sub>**, fattore di forma secondario, rapporto tra la dimensione in pianta **D** della singola piastra in acciaio, parallelamente all'azione orizzontale agente, e lo spessore totale **t<sub>e</sub>** degli strati di elastomero (**t<sub>e</sub>** è ottenuto come somma dello spessore dei singoli strati, maggiorando lo spessore dei due strati esterni, se maggiore di 3 mm, del fattore 1,4) ossia **S<sub>2</sub> = D/t<sub>e</sub>**.

Si consiglia di non far scendere il valore di **S<sub>1</sub>** al disotto di 12, per ridurre la deformabilità verticale degli isolatori, il valore di **S<sub>2</sub>** al disotto di 4, per ridurre il rischio di instabilità dell'isolatore.

Si dovrà tener conto della deformabilità verticale degli isolatori solo qualora si ecceda il limite detto su **S<sub>1</sub>**; le verifiche specifiche nei confronti dell'instabilità si dovranno invece effettuare sempre (v. par. 3.9.).

Gli isolatori in materiale elastomerico ed acciaio sono individuati attraverso le loro curve caratteristiche forza - spostamento, generalmente non lineari, tramite i due parametri sintetici:

- rigidità equivalente **K<sub>e</sub>**,
- coefficiente di smorzamento viscoso equivalente  $\xi$ .

La rigidità equivalente **K<sub>e</sub>**, relativa ad un ciclo di carico, si definisce come rapporto tra il doppio dell'energia di deformazione elastica **W<sub>e</sub>** corrispondente allo spostamento massimo **d** raggiunto in quel ciclo ed il quadrato di tale spostamento (**K<sub>e</sub> = 2W<sub>e</sub>/d<sup>2</sup>**) e si valuta come prodotto del modulo dinamico equivalente a taglio **G<sub>din</sub>** per **A'/t<sub>e</sub>**.

Il coefficiente di smorzamento viscoso equivalente  $\xi$ , si definisce come rapporto tra l'energia dissipata in un ciclo completo di carico **W<sub>d</sub>** e  $4\pi$  volte **W<sub>e</sub>**, ossia  $\xi = W_d / (4\pi W_e)$ .

Le caratteristiche meccaniche (**K<sub>e</sub>** e  $\xi$ ) dei dispositivi reali, valutate in corrispondenza dello spostamento massimo di progetto **d<sub>2</sub>**, dovranno avere variazioni limitate come segue:

- nell'ambito della singola fornitura le differenze, rispetto al valore di progetto, non possono superare un valore massimo del  $\pm 15\%$  ed un valore medio del  $\pm 5\%$ ;
- le variazioni legate all'invecchiamento dell'elastomero, valutate come indicato nel seguito, non dovranno superare il 10% del valore iniziale;
- le variazioni dovute a fattori ambientali (temperatura), valutate per condizioni estreme dei fattori stessi e con riferimento al valore misurato in condizioni medie di tali fattori, non dovranno superare il  $\pm 15\%$ ;
- le variazioni dovute al carico verticale, valutate come differenza tra i valori corrispondenti al carico verticale massimo ed a quello minimo, non dovranno superare il 10% del valore di progetto. La progettazione sarà effettuata tenendo conto dei valori minimi e massimi delle caratteristiche dei dispositivi, valori conseguenti alle variazioni suddette. Si potrà fare riferimento ai valori medi di dette caratteristiche solo se valore massimo e minimo differiscono tra loro di meno del 20%, ossia se (**K<sub>e max</sub> - K<sub>e</sub>**

**K<sub>e min</sub>**)/**K<sub>e min</sub>** < 0,2 e ( $\xi_{max} - \xi_{min}$ )/ $\xi_{min}$  < 0,2

I dispositivi devono inoltre essere in grado di sopportare, sotto spostamento massimo impresso pari a 1,25 **d<sub>2</sub>**, almeno 10 cicli di carico e scarico. I cicli si riterranno favorevolmente sopportati se saranno soddisfatte le seguenti condizioni:

- i diagrammi forza - spostamento mostreranno sempre un incremento di carico al crescere dello spostamento;
- le caratteristiche meccaniche dei dispositivi (**K<sub>e</sub>** e  $\xi$ ) non varieranno di più del 15% rispetto alle caratteristiche riscontrate durante il primo ciclo, ossia (**K<sub>ei</sub> - K<sub>e1</sub>**) / **K<sub>e1</sub>** < 0,15 e ( $\xi_i - \xi_1$ ) < 0,15, avendo contrassegnato con il pedice **i** le caratteristiche valutate all'i-esimo ciclo e con il pedice **1** le caratteristiche valutate al primo ciclo.

L'idoneità all'impiego deve essere accertata mediante le seguenti prove sui materiali e sui dispositivi, eseguita da laboratori ufficiali, ai sensi dell'art. 20 della legge 1086/71, dotati delle necessarie attrezzature e della specifica competenza ed operanti in regime di qualità.

### Prove di accettazione sui materiali.

Per le prove di accettazione sui materiali sono quelle previste dalla CNR 10018, con le seguenti variazioni ad aggiunte:

- le prove di invecchiamento vanno effettuate per 21 giorni a 70°C; la variazione del modulo **G** deve essere contenuta entro il 10% del valore iniziale;
- il modulo **G** deve essere determinato anche per una deformazione tangenziale pari a  $\pm 10$ .

### Prove di qualificazione sui dispositivi.

Le prove di qualificazione sui dispositivi, che possono essere estese a tutti i dispositivi geometricamente simili (rapporti di scala compresi tra 0,5 e 2) e prodotti con gli stessi materiali di quelli provati, vengono effettuate alla temperatura di 23°C  $\pm$  2° C, a non meno di due giorni di distanza dalla vulcanizzazione, così da avere una temperatura uniforme sull'intero dispositivo (i giorni salgono a quattro per dispositivi di dimensioni maggiori di 700mm), e sono le seguenti:

- determinazione statica della rigidità a compressione tra il 30% e il 100% del carico verticale **V** di progetto in presenza di sisma (v. par. 3.3.), somma dei carichi verticali dovuti a permanenti ed accidentali moltiplicati per opportuni coefficienti ed alle eventuali azioni concomitanti (forze orizzontali, spostamenti e rotazioni);
- determinazione statica, sotto compressione costante e pari a 6 MPa, del modulo statico di taglio **G**, convenzionalmente definito come il modulo secante tra le deformazioni di taglio corrispondenti agli spostamenti 0,27 **t<sub>e</sub>** e 0,58 **t<sub>e</sub>**; è opportuno che **G** ricada nell'intervallo 0,40 ÷ 1,40 Mpa;
- determinazione dinamica, sotto compressione costante e pari a 6 Mpa, del modulo dinamico di taglio **G<sub>din</sub>** e dello smorzamento  $\xi$  mediante prove cicliche sinusoidali alla frequenza di 0,5 Hz ed in corrispondenza del 5° ciclo, valutato **G<sub>din</sub> = 2W<sub>e</sub>t<sub>e</sub>/(A'd<sup>2</sup>)** come modulo secante in corrispondenza di **d/t<sub>e</sub> = 1**, con l'obbligo per **G<sub>din</sub>** di ricadere nell'intervallo 0,40 ÷ 1,40 Mpa;
- determinazione delle curve **G-γ** e  $\xi$ - $\gamma$  mediante le prove dinamiche cicliche precedentemente descritte e per i seguenti valori

di  $\gamma$ : 0,05 - 0,5 - 0,7 - 1,0 - 2,0;

- determinazione delle caratteristiche di creep mediante prove di compressione sotto carico costante e pari a  $V$ , della durata di almeno 7 giorni (la determinazione verticale per creep deve essere inferiore al 20% della deformazione statica sotto il carico  $V$ );
- determinazione delle variazioni di rigidità verticale ed orizzontale conseguenti ad un invecchiamento artificiale atto a simulare un periodo di 60 anni (il valore di  $G$  dopo l'invecchiamento non deve superare 1,15 volte il valore di  $G$  prima dell'invecchiamento);
- valutazione della stabilità del dispositivo sotto compressione e taglio, effettuata accertandosi che il dispositivo rimanga stabile se assoggettato ad uno spostamento orizzontale pari ad  $1,8 t_g$  in presenza di un carico verticale pari sia ad  $1,5 V_{max}$  che a  $0,5 V_{min}$  (indicando con  $V_{max}$  e  $V_{min}$  rispettivamente i valori massimo e minimo di  $V$ );
- valutazione di efficacia dell'aderenza elastomero - acciaio, effettuata sottoponendo l'isolatore, sotto compressione costante e pari a 6 Mpa, a una deformazione  $\gamma \geq 2,5$  senza che si verifichino danni.

#### Prove di accettazione sui dispositivi

Le prove di accettazione su i dispositivi, che saranno effettuate con le modalità già viste per le prove di qualificazione e si riterranno superate se i risultati ottenuti non differiranno da quelli delle prove di qualificazione di oltre il  $\pm 10\%$ , sono le seguenti:

- misura della geometria esterna che dovrà rispettare le tolleranze prescritte dalla CNR 10018, con l'unica deroga dei dispositivi di altezza superiore a 100 mm per i quali la tolleranza sulle altezze è compresa tra 0 e 6 mm;
- determinazione statica della rigidità verticale tra il 20% e il 100% del carico  $V$ ;
- determinazione statica del modulo  $G$ ;
- determinazione dinamica del modulo  $G$  e dello smorzamento  $\xi$ ;
- valutazione di efficacia dell'aderenza elastomero - acciaio.

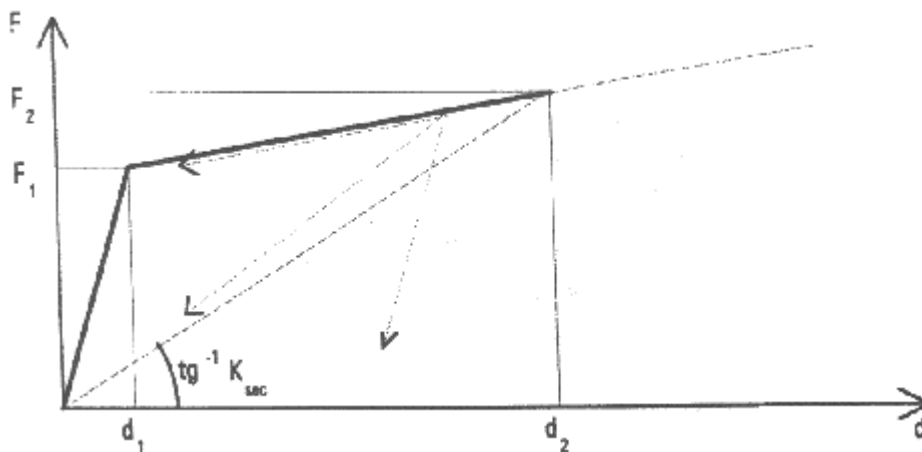
Le prove di accettazione devono essere effettuate su tutti i dispositivi.

#### 3.6.2. Isolatori elasto - plastici

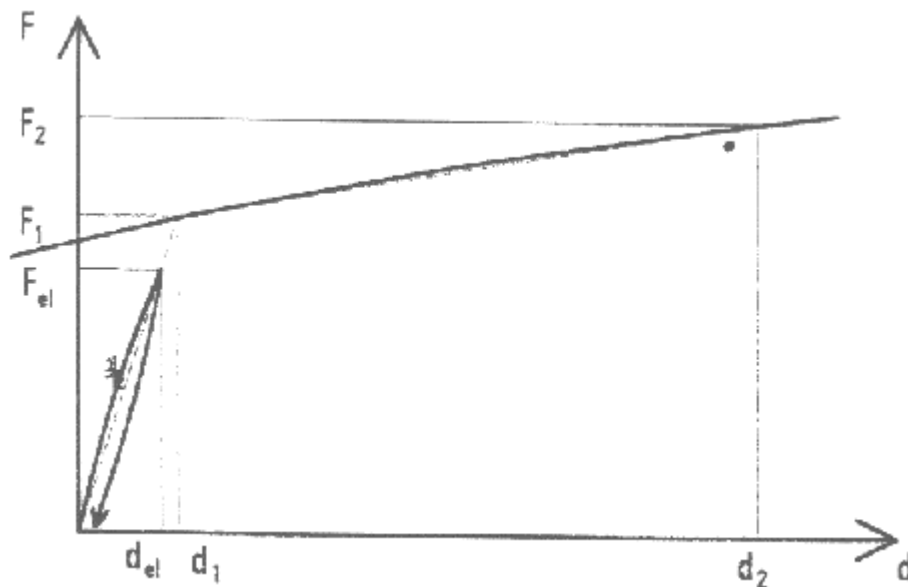
A differenza di quanto avviene negli isolatori in materiale elastomerico ed acciaio per i quali un solo dispositivo assicura la trasmissione, tra sovrastruttura e sottostruttura, sia delle azioni verticali che di quelle orizzontali, gli isolatori elasto - plastici non trasmettono, in generale, azioni verticali, limitandosi a trasmettere soltanto azioni orizzontali; la trasmissione delle azioni verticali viene delegata ad appositi apparecchi d'appoggio, dotati di elevata rigidità verticale e trascurabile rigidità orizzontale (appoggi a rotolamento o strisciamento), funzionanti in parallelo agli isolatori elastoplastici che manifestano invece trascurabile rigidità ai carichi verticali e rigidità significativa per i carichi orizzontali.

Gli isolatori elasto - plastici sono costituiti da elementi che si mantengono in campo elastico in presenza di azioni orizzontali di ridotta entità (vento) ed invece plasticizzano in presenza di azioni orizzontali di entità superiore ad una soglia prefissata. Essi sono caratterizzati da:

- sostanziale indipendenza tra forza massima orizzontale trasmessa e massimo spostamento orizzontale subito;
- elevata capacità di dissipare energia meccanica per deformazioni plastiche alternate, sostanzialmente costante al ripetersi delle deformazioni;
- curva caratteristica forza generalizzata - spostamento generalizzato, sostanzialmente indipendente dalla velocità di percorrenza.



Gli isolatori elasto - plastici sono individuati dalla curva caratteristica che lega la forza generalizzata (forza orizzontale o momento) trasmessa dal dispositivo di isolamento al corrispondente spostamento generalizzato (spostamento orizzontale o rotazione) letto in corrispondenza del dispositivo di isolamento, tali curve caratteristiche sono, in generale, schematizzabili con delle bilineari e dunque sono definite dalle coordinate  $(F_1, d_1)$  corrispondenti alla soglia di plasticizzazione o limite del comportamento elastico del dispositivo e dalle coordinate  $(F_2, d_2)$  corrispondenti al massimo valore dello spostamento generalizzato letto in corrispondenza del dispositivo di isolamento.



La schematizzazione dell'effettivo comportamento dell'isolatore attraverso un comportamento bilineare (elastico - plastico con incrudimento) viene fatta con le modalità indicate schematicamente nelle figure precedenti. Più in dettaglio la rigidezza di primo ramo o "elastica" si valuta convenzionalmente con riferimento alla retta di compenso (ramo elastico convenzionale) individuata nel corso del quinto ciclo della prova "elastica preliminare" successivamente illustrata, la rigidezza di secondo ramo o "plastica" si valuta convenzionalmente con riferimento alla retta di compenso (ramo plastico convenzionale) individuata nel corso del quinto ciclo della prova "elasto - plastica dinamica" successivamente illustrata. Il valore della rigidezza elastica  $K_1$  si ricava dal rapporto  $F_{el}/d_{el} = F_1/d_1$  essendo  $d_1$  lo spostamento per il quale il dispositivo accusa uno spostamento residuo pari a  $0,02 d_{el}$ . Il valore di  $d_1$  si ricava come ascissa della intersezione della retta avente pendenza  $K_1$  e passante per l'origine, con la curva isteretica sperimentale individuata nel quinto ciclo della prova "elasto - plastica dinamica".

Le curve caratteristiche degli isolatori elasto - plastici, valutate in corrispondenza dello spostamento di plasticizzazione  $d_1$  ed in corrispondenza dello spostamento massimo  $d_2$ , potranno accusare, nell'ambito della singola fornitura e rispetto al valore di progetto, variazioni che non possono superare un valore massimo del  $\pm 15\%$  ed un valore medio del  $\pm 5\%$ .

Ai dispositivi di appoggio a rotolamento o strisciamento delegati alla trasmissione dei carichi verticali ed operanti in parallelo agli isolatori, si richiederà poi che il coefficiente d'attrito abbia valori compresi tra 0 e 3% e che l'attrito valutato in corrispondenza dello spostamento massimo di progetto  $d_2$ , abbia variazioni limitate come segue:

- nell'ambito della singola fornitura le differenze rispetto al valore di progetto non potranno superare un valore massimo del  $\pm 15\%$  ed un valore medio del  $\pm 5\%$ ;
- le variazioni legate all'invecchiamento, valutate come indicato nel seguito, non dovranno superare il 10% del valore iniziale;
- le variazioni dovute a fattori ambientali (temperatura), valutate per condizioni estreme dei fattori stessi e con riferimento al valore misurato in condizioni medie di tali fattori, dovranno variare di non più del  $\pm 15\%$ ,
- le variazioni dovute al carico verticale, valutate come differenza tra i valori corrispondenti al carico verticale massimo ed a quello minimo, non dovranno superare il 10% del valore di progetto. In generale la progettazione dovrà essere effettuata tenendo conto dei valori minimi e massimi delle caratteristiche dei dispositivi, conseguenti alle variazioni suddette. Si potrà fare riferimento ai valori medi di dette caratteristiche solo se il valore massimo e minimo differiscono tra loro di meno del 20%.

I dispositivi di isolamento elasto - plastici devono inoltre essere in grado di sopportare, sotto spostamento massimo impresso pari a  $1,5 d_2$ , almeno 10 cicli di carico e scarico. I cicli si intendono favorevolmente sopportati se saranno soddisfatte le seguenti condizioni:

- i diagrammi forza - spostamento mostrano sempre un incremento di carico al crescere dello spostamento;
- le curve caratteristiche non variano di più del 5% rispetto alle caratteristiche riscontrate durante il primo ciclo, ossia  $|F_i - F_1|/d_1 < 0,05 |F_1|/d_1$ , avendo contrassegnato con il pedice i le caratteristiche valutate all'i-esimo ciclo e con il pedice 1 le caratteristiche valutate al primo ciclo.

I dispositivi devono soddisfare i seguenti requisiti di progetto:

- il valore  $d_1$  dello spostamento non deve essere superato da quello richiesto dal terremoto di progetto definito per lo stato limite di danno;
- il valore  $d_2$  dello spostamento non deve essere superato da quello richiesto dal terremoto di progetto definito per lo stato limite ultimo;
- La parte strutturale degli isolatori che non è destinata a produrre il comportamento elastoplastico deve essere capace di sopportare le massime sollecitazioni di progetto rimanendo in campo elastico e con un opportuno coefficiente di sicurezza;

- spostamenti pari ad  $1,5 d_2$  debbono essere sopportati senza che il dispositivo, e gli apparecchi di appoggio delegati alla trasmissione dei carichi verticali, subiscano danni o comunque fuoriuscite dei dispositivi stessi o di loro parti dalle configurazioni di funzionamento previste.

L'idoneità all'impiego deve essere accertata mediante le seguenti prove sui materiali e sui dispositivi, eseguita e certificata da laboratori ufficiali, ai sensi dell'art. 20 della legge 1086/71, dotati delle necessarie attrezzature e della specifica competenza ed operanti in regime di qualità.

### **Prove di accettazione sui materiali**

Le prove di accettazione sui materiali sono quelle previste dalla vigente normativa italiana e finalizzate ad accertare la tensione di snervamento, la tensione di rottura, l'allungamento a snervamento e l'allungamento a rottura del materiale costituente gli elementi elasto - plastici dell'isolatore. Esse sono finalizzate ad individuare i valori medi e quelli caratteristici delle quantità suddette e la prevedibile costanza di comportamento del materiale considerato e debbono permettere di estrapolare il comportamento del materiale a quello del dispositivo e di verificare la sostanziale invariabilità del comportamento del dispositivo rispetto alle variazioni ambientali, la temperatura interna, l'invecchiamento. Il tipo e le modalità di prova verranno stabiliti di volta in volta dal produttore, in relazione al tipo di materiale, e verranno giustificati con una relazione, di cui il produttore si assumerà piena e completa responsabilità, che chiarisca in ogni dettaglio il rapporto tra comportamento del materiale e comportamento del dispositivo. Per i dispositivi di appoggio le prove di accettazione sui materiali sono quelle previste dalla CNR 10018

### **Prove di qualificazione sui dispositivi**

Le prove di qualificazione sui dispositivi, che possono essere estese a tutti i dispositivi geometricamente simili (rapporti di scala compresi tra 0,5 e 2) e prodotti con gli stessi materiali di quelli provati, sono le seguenti:

- prova "elastica preliminare", condotta imponendo al prototipo almeno 2 cicli completi di deformazioni alternate, con ampiezza massima non inferiore a  $\pm 0,9 d_1$  (valore nominale dello spostamento  $d_1$ );
- prova "elasto - plastica quasi statica", condotta imponendo al prototipo almeno 10 cicli completi di deformazioni alternate, con ampiezza massima pari a  $\pm d_2$ ;
- prova "elasto - plastica dinamica", condotta imponendo al prototipo almeno 5 cicli completi di deformazioni alternate, con ampiezza massima pari a  $\pm d_2$ , applicando le deformazioni imposte con una velocità mediamente pari a quella che si può verificare nel caso del terremoto di progetto relativo allo stato limite di danno ed assimilabile, in mancanza di specifiche valutazioni, a quella corrispondente ad una frequenza di 0,5 Hz per ogni ciclo - completo di ampiezza massima  $\pm d_2$ .

Sui dispositivi di appoggio delegati alla trasmissione dei carichi verticali, operanti in parallelo agli isolatori, si effettueranno le seguenti prove di qualifica:

- determinazione statica, sotto compressione costante e pari al carico verticale **V** di esercizio, del coefficiente d'attrito;
- determinazione dinamica, sotto compressione costante e al carico verticale **V** di esercizio, del coefficiente d'attrito;
- determinazione delle variazioni del coefficiente d'attrito conseguenti ad un invecchiamento artificiale atto a simulare un periodo di 60 anni (il valore del coefficiente d'attrito dopo l'invecchiamento non deve superare 1,15 volte il valore del coefficiente d'attrito prima dell'invecchiamento).

Le prove di qualificazione devono essere effettuate su almeno il 5% dei dispositivi.

### **Prove di accettazione sui dispositivi**

Le prove di accettazione sui dispositivi, che saranno effettuate con le modalità già viste per le prove di qualificazione e si riterranno superate se i risultati ottenuti non differiranno da quelli delle prove di qualificazione di oltre il  $\pm 10\%$ , sono le seguenti:

- misura della geometria esterna;
- prova elastica preliminare;
- determinazione statica, sotto compressione costante e pari al carico verticale **V** di esercizio, del coefficiente d'attrito (prova limitata ai soli dispositivi d'appoggio).

Gli isolatori elasto - plastici modificano favorevolmente il comportamento dei sistemi strutturali nei quali vengono inseriti attraverso meccanismi (riduzione della rigidità secante e aumento del coefficiente di smorzamento) analoghi a quelli che si evidenziano nell'impiego di isolatori in materiale elastomerico e acciaio, mostrando peraltro, rispetto a questi ultimi, una dissipazione di energia molto più elevata. Gli spostamenti massimi subiti dalla tipologia di isolatori in esame sono dunque, in generale, più ridotti di quelli registrati dalla tipologia di isolatori esaminata in precedenza; tale favorevole comportamento è peraltro bilanciato dal fatto che gli isolatori elastoplastici accusano, in generale, spostamenti residui maggiori di quelli propri degli isolatori in materiale elastomerico e acciaio. Rispetto a questi ultimi, infine, gli isolatori elasto - plastici manifestano una apprezzabile costanza di comportamento sia al trascorrere del tempo che al variare della frequenza propria dell'azione dinamica agente.

Le prove di accettazione devono essere effettuate su tutti i dispositivi.

### **3.6.3. Isolatori a scorrimento o rotolamento.**

Gli isolatori a scorrimento o rotolamento sono costituiti rispettivamente da appoggi a scorrimento (acciaio - teflon) o a rotolamento (su rulli o sfere) caratterizzati tutti da bassi valori delle resistenze per attrito. Si segnala la necessità di assicurare, attraverso un apposito modello di calcolo e l'adozione degli opportuni elementi dissipativi, che il sistema di isolamento garantisca un corretto funzionamento meccanico proprio e della struttura portata.

### **3.7. MODELLO STRUTTURALE**

Il modello dell'insieme sistema isolante - struttura deve contenere tutti gli elementi, di natura strutturale e non strutturale, le cui caratteristiche di massa e/o rigidità possano influenzare la risposta dell'edificio isolato.

In generale il modello sarà di tipo tridimensionale. È consigliabile che siano soddisfatte le condizioni seguenti:

- la distanza tra il centro di rigidità alla traslazione degli isolatori e la proiezione sul piano degli isolatori del centro di gravità dell'intero edificio è minore di  $0,05 M$ , essendo  $M$  la massima dimensione dell'edificio in pianta;

- la rigidezza dei solai nel loro piano è, a tutti i piani, tale da poterli considerare indeformabili;
- la struttura non isolata possiede almeno due modi di vibrazione (1<sup>a</sup> e 2<sup>a</sup> forma modale) contenuti in ciascuno dei due piani principali, senza apprezzabile accoppiamento tra i modi nei due piani e tra loro e modi torsionali;
- il periodo del 1° modo torsionale risulta non superiore a  $0,7 T_{\min}$ , essendo  $T_{\min}$  il più piccolo dei periodi dei secondi modi nei due piani.

### 3.7.1. Struttura

La parte di struttura sottostante il sistema di isolamento, fondazioni comprese, è modellata con elementi a comportamento elastico lineare.

La sovrastruttura è anche essa modellata, in generale, con elementi a comportamento elastico lineare. Modelli non lineari per la sovrastruttura sono ammessi, purché la loro rispondenza all'effettivo comportamento sia adeguatamente documentata. Le analisi eseguite con tali modelli, tuttavia, hanno carattere di verifica del riuscito isolamento e/o di controllo del danno strutturale, ma non possono essere utilizzate per ridurre le richieste di resistenza derivanti dall'uso dei modelli elastici.

### 3.7.2. Sistema isolante

Il sistema isolante può essere modellato con elementi a legame visco - elastico lineare, quando si abbia a che fare con isolatori in materiale elastomerico e acciaio (v. par. 3.6.1.) e siano rispettate le due condizioni appresso indicate, con elementi a legame bilineare isteretico, quando si abbia a che fare con isolatori elasto - plastici (v. par. 3.6.2.).

#### Isolatori in materiale elastomerico e acciaio

In generale dovrà essere introdotto l'effettivo legame non lineare del sistema isolante, quale risulta dalle prove di cui al par. 3.6.1., tale legame potrà essere adeguatamente rappresentato con un legame visco - elastico lineare quando siano rispettate le due condizioni seguenti:

- il coefficiente di smorzamento viscoso equivalente  $\xi$  per uno spostamento di entità pari a quello di progetto  $d_2$  relativo allo SLU, è  $\leq 10\%$ ;
- il ciclo Forza Spostamento, nell'intervallo  $\pm d_2$ , risulta compreso tra due rette parallele distanti tra loro non più del 40% della forza  $F$  corrispondente a  $d_2$ .

La rigidezza da adottare nella analisi è la rigidezza equivalente  $K_e$ , definita al par. 3.6.1., valutata per i due valori dello spostamento relativi rispettivamente allo SLD ( $d_1$ ) ed allo SLU ( $d_2$ ), il coefficiente di smorzamento viscoso equivalente  $\xi$ , è dato dall'espressione riportata al par. 3.6.1. In generale l'analisi dovrà essere eseguita per i valori massimi e minimi della rigidezza  $K_e$  e del coefficiente di smorzamento viscoso equivalente  $\xi$  ottenuti nelle prove di cui par. 3.6.1. Si potrà fare riferimento ai soli valori medi unicamente quando lo scarto tra valore massimo e minimo, riferito al valore minimo, non superi il 20%.

Quando il valore del Fattore di forma primario  $S_1$  (vedi par. 3.6.1.) risulta inferiore a 15, deve essere presa in conto la deformabilità verticale del sistema isolante.

#### Isolatori elasto - plastici

Gli isolatori del tipo denominato "elasto - plastico" possono essere modellati attraverso legami bilineari isteretici, con le rigidezze relative ai tratti di scarico ed inversione del carico ricavate dalle prove previste al par. 3.6.2.

Nel definire il ciclo bilineare equivalente sulla base delle prove di cui sopra dovranno essere rispettate le seguenti condizioni (con tolleranza  $\pm 10\%$ ):

- coincidenza, tra legame sperimentale e modello bilineare, dei punti corrispondenti allo spostamento  $\pm d_2$ ;
- uguaglianza della rigidezza post - elastica nei diversi rami;
- uguaglianza della energia dissipata nel ciclo allo spostamento  $\pm d_2$ .

Ove le rigidezze post - elastiche nei diversi rami risultino di incerta valutazione si dovranno considerare per esse due valori limite, superiore ed inferiore.

Quando il rapporto tra rigidezza verticale ed orizzontale (allo spostamento  $d_2$ ) è inferiore a 800, deve essere presa in conto la deformabilità verticale del sistema isolante.

## 3.8. METODI DI ANALISI

### 3.8.1. Analisi dinamica lineare

La analisi dinamica lineare è ammessa quando risulta possibile modellare elasticamente il comportamento del sistema isolante, nel rispetto delle condizioni di cui al par. 3.7. In questo caso il sistema complessivo, formato dalla sottostruttura, dal sistema isolante e dalla soprastruttura, ha comportamento elastico lineare.

Il coefficiente di smorzamento viscoso equivalente  $\xi$ , del sistema complessivo è pari a quello del sistema isolante e può essere assunto costante per tutto il campo di periodi  $T \geq 0,8 T_1$ , ove  $T_1$  è il periodo fondamentale del sistema isolato.

L'analisi dinamica lineare può essere eseguita con la tecnica della analisi modale, oppure mediante integrazione al passo del sistema completo delle equazioni del moto. Nel primo caso il numero di modi considerati deve essere tale da soddisfare, per ciascuna direzione di applicazione della azione sismica, almeno una delle due condizioni seguenti:

- la somma delle masse modali relative ai modi considerati è almeno pari al 90% della massa totale della sovrastruttura;
- vengono considerati tutti i modi con massa superiore al 5% della massa totale della sovrastruttura.

Quando si impiega il metodo della analisi modale con spettro di risposta, le risposte massime modali relative a due modi  $i$  e  $j$  possono considerarsi indipendenti quando i rispettivi periodi  $T_i$  e  $T_j$ ; soddisfano la condizione  $T_i < 0,9 T_j$ . Se tale condizione è rispettata per tutti i modi, la risposta massima può ottenersi come radice quadrata della somma dei quadrati delle risposte modali. Diversamente è necessario adottare regole di combinazione in grado di tenere conto della correlazione esistente tra i modi.

Una regola accettabile in tale caso è data dall'espressione  $R = (\sum_i \sum_j R_i r_{ij} R_j)^{1/2}$  dove  $R$  rappresenta la risposta complessiva,  $R_{ij}$  la generica grandezza di risposta relativa al modo  $i, j$ ,  $r_{ij}$  è un coefficiente di combinazione  $\leq 1$ ,  $i$  e  $j$  sono indici variabili nell'intervallo  $1 \div n$ .

Quando si adotta la integrazione al passo è necessario verificare che il coefficiente di smorzamento viscoso equivalente  $\xi$ , soddisfi la condizione indicata in precedenza (essere  $\leq 10\%$  ? ). Ciò si ottiene, quando si opera sulle singole equazioni modali disaccoppiate, assegnando a ciascuna equazione modale l'appropriato valore del coefficiente di smorzamento viscoso equivalente  $\xi$ , quando si opera sul sistema completo, definendo in modo opportuno la matrice di smorzamento del sistema.

Nel caso di analisi lineari con integrazione al passo si può adottare un solo accelerogramma, purché esso rispetti le condizioni di coerenza con lo spettro di partenza specificate, al par. 3.2.6., relativamente alla media delle ordinate spettrali ottenute con più accelerogrammi.

### 3.8.2. Analisi dinamica non lineare

Per ognuna delle direzioni considerate per l'azione sismica, l'analisi deve essere ripetuta usando la serie di accelerogrammi di cui al par. 3.2.5., deve essere utilizzata l'intera serie anche quando si considerino, per le caratteristiche meccaniche degli isolatori e/o della sovrastruttura, diversi valori.

Quali grandezze di risposta da considerare ai fini delle verifiche, si assumeranno rispettivamente i valori medi per la sottostruttura e per la sovrastruttura, i valori medi più una deviazione standard per il sistema di isolamento. Quando per i parametri meccanici del sistema si considerino diversi valori, i valori delle risposte da assumere ai fini delle verifiche saranno, per ciascuna delle grandezze da verificare, quelli più sfavorevoli.

Il coefficiente di smorzamento viscoso equivalente  $\xi$ , della struttura, relativo alle capacità dissipative in campo elastico, non deve risultare superiore al 5% in corrispondenza del primo modo di vibrazione.

## 3.9. VERIFICHE

### 3.9.1. Stato limite di danno (SLD)

#### Sottostruttura e fondazioni

Il livello di protezione richiesto per le parti sopra indicate nei confronti dello **SLD** è da ritenere conseguito se sono soddisfatte le relative verifiche nei confronti dello **SLU**, di cui al par. 3.9.2.

## 4. ISOLAMENTO DEI PONTI STRADALI

Il presente Capitolo contiene linee guida per il progetto di ponti stradali sismicamente isolati. Gli aspetti comuni al progetto di edifici ed al progetto di ponti isolati, sono stati trattati nel Cap. 3 relativo agli edifici; ove se ne ravvisi l'opportunità, pur trattando di ponti, si farà riferimento a tali prescrizioni.

### 4.1. REQUISITI DI SICUREZZA

I ponti provvisti di dispositivi di isolamento devono soddisfare i due requisiti seguenti:

#### Stato Limite di Danno (SLD)

- per un evento sismico caratterizzato da un assegnato periodo medio di ritorno  $T_R$  la risposta di tutte le parti strutturali, compresi i dispositivi di isolamento, deve mantenersi in campo elastico lineare, secondo i criteri di verifica e con i limiti indicati al par. 4.9. Verifiche.

#### Stato Limite Ultimo (SLU),

- per un evento sismico caratterizzato da un assegnato periodo medio di ritorno  $T_R$ , superiore al precedente, il dispositivo isolante può raggiungere le sue condizioni limite di funzionamento mentre le rimanenti parti strutturali (impalcato, pile, spalle, fondazioni) si mantengono in campo elastico;
- nessun danno strutturale si verifica nelle strutture sotto il piano di isolamento ed il comportamento delle fondazioni (strutture e terreno) rimane entro il campo elastico;
- le modalità di verifica dello **SLU** sopra definito sono indicate al par. 4.9. Verifiche.

### 4.2. AZIONE SISMICA

La azione sismica da utilizzare per la verifica dei due stati limite definiti al par. 4.2. è definita al par. 3.2.

#### 4.2.1. Componenti sismiche da considerare e loro combinazione

La struttura è da considerare soggetta simultaneamente alle azioni di tre componenti di moto del suolo, due nel piano orizzontale ed una in quello verticale, mutuamente indipendenti.

Nei casi in cui gli effetti del sisma possono essere valutati separatamente nelle tre direzioni ortogonali, l'effetto combinato può ottenersi considerando la più sfavorevole delle condizioni seguenti:

$$E_x + 0,3E_y + 0,3E_z$$

$$0,3E_x + E_y + 0,3E_z$$

$$0,3E_x + 0,3E_y + E_z$$

Nei casi in cui la separazione degli effetti non sia possibile o consentita (comportamento non lineare modelli strutturali tridimensionali, ecc.) l'effetto combinato massimo è fornito direttamente dalla analisi della struttura soggetta alle tre componenti di moto alla base di ciascun appoggio, in accordo con le indicazioni contenute nel par. 3.2.

### 4.3. COMBINAZIONE DELL'AZIONE SISMICA CON LE ALTRE AZIONI

La combinazione dell'azione sismica con le altre azioni è definita al par. 3.3. Il valore del coefficiente  $\Psi_{2i}$  che fornisce l'intensità dell'azione quasi permanente del traffico, può essere assunto uguale a zero, salvo specifiche diverse indicazioni.

### 4.4. INDICAZIONI PROGETTUALI



I ponti posseggono caratteristiche strutturali che, in molti casi, favoriscono e rendono particolarmente vantaggioso il ricorso all'isolamento. Tra queste:

- le strutture dei ponti sono in generale semplici, prive di elementi non strutturali e con un comportamento statico chiaro, sono quindi modellabili con facilità;
- nel caso frequente e sfavorevole di pile di diversa altezza, l'inserimento di dispositivi di isolamento/dissipazione tra testa pila ed impalcato permette di uniformare la rigidità del complesso pila - isolatore, quindi di ottenere una risposta uniforme anche in termini di spostamento complessivo dell'impalcato;
- i ponti non hanno, o hanno in misura molto ridotta, problemi di compatibilità degli spostamenti relativi tra parte isolata e parte non isolata nei riguardi degli impianti; è peraltro importante sottolineare che i giunti di impalcato devono essere dimensionati in modo da consentire il libero funzionamento dei dispositivi di isolamento/dissipazione con un adeguato margine rispetto alle escursioni di progetto;
- i ponti sono caratterizzati, in genere, da periodi propri abbastanza elevati e quindi anche da spostamenti di origine sismica elevati; l'aggiunta di un sistema di isolamento non modifica l'ordine di grandezza degli spostamenti, al contrario di quanto avviene per gli edifici;
- i dispositivi di isolamento/dissipazione sono quasi sempre collocati al posto degli apparecchi di appoggio ordinari, per i quali gli aspetti relativi all'ispezione, manutenzione e sostituibilità sono ordinariamente previsti in sede di progetto non costituendo quindi un problema ulteriore.

Nella decisione di isolare o meno un ponte, a parte eventuali problemi di "regolarizzazione" in presenza di pile di altezze molto diverse, il fattore principale è il periodo proprio del ponte non isolato. Il vantaggio, in termini di riduzione di forze, è particolarmente sensibile se si parte da periodi di  $0,5 \div 1,0$  secondi, diviene quasi trascurabile al di sopra dei 2 secondi. Ad esempio, con riferimento allo spettro di risposta per la categoria di sottosuolo B, un aumento del periodo da 0,7 a 1,2 secondi comporta una riduzione delle forze elastiche del 40%, mentre un aumento da 2,0 a 2,5 secondi ne comporta una del 20%, che rappresenta poi soltanto il 17% della riduzione che si ottiene nel primo caso.

La risposta in termini di spostamento cresce invece nei due casi della stessa quantità.

#### 4.5. REQUISITI DEGLI ISOLATORI

Sono definiti al par 3.5.

#### 4.6. CRITERI DI ACCETTAZIONE

Sono definiti al par. 3.6.

#### 4.7. MODELLO STRUTTURALE

- a. Il modello strutturale deve poter descrivere tutti i gradi di libertà significativi caratterizzanti la risposta dinamica, deve riprodurre fedelmente le caratteristiche di inerzia e di rigidità della struttura e del terreno, le leggi costitutive dei dispositivi di isolamento, le azioni di attrito negli apparecchi di appoggio, il comportamento di eventuali dispositivi di fine corsa.
- b. Nei casi in cui sia ammessa una analisi di tipo elastico lineare (v. par. 4.8.) è in generale possibile utilizzare due modelli distinti, uno per le analisi in direzione longitudinale, l'altro per quelle in direzione trasversale.
- c. la rigidità degli elementi in c.a. deve essere valutata tenendo conto dello stato di fessurazione, che può essere diverso per i diversi elementi (ad es. impalcati e pile) ed è in generale diverso in funzione dello stato limite che si considera.
- d. La deformabilità del terreno di fondazione, e più in generale gli effetti di interazione terreno - struttura, devono venire considerati quando il contributo di tale deformabilità allo spostamento massimo dell'impalcato uguaglia o supera il 30% del totale.
- e. Nei casi in cui le caratteristiche del terreno sono di determinazione incerta, si stimeranno per esse valori limite superiore ed inferiore e si ripeteranno le analisi con due modelli diversi, caratterizzati ciascuno da uno dei due insiemi di parametri, assumendo per le grandezze di interesse i risultati più cautelativi.
- f. I legami costitutivi da adottare per i diversi dispositivi di isolamento saranno determinati con riferimento ai valori ottenuti nelle prove di qualifica ed accettazione di cui ai par. 3.5. e 3.6. e secondo i criteri riportati nel par. 3.7.
- g. Nei dispositivi a scorrimento occorre determinare i valori limite superiore ed inferiore per l'attrito e quindi ripetere le analisi con le modalità indicate al punto e).

#### 4.8. METODI DI ANALISI

Sono previsti due metodi di analisi:

- analisi modale con spettro di risposta,
- analisi dinamica con integrazione al passo.

##### 4.8.1. Analisi modale con spettro di risposta

Questo metodo di analisi è accettabile per le verifiche allo stato limite di danno (SLD); per le verifiche allo stato limite ultimo (SLU) esso è accettabile se sono verificate le condizioni seguenti:

- il coefficiente di smorzamento  $\xi$  dei singoli dispositivi di isolamento non supera il 10% per uno spostamento di entità pari a quello  $d_2$  di progetto;
- il ciclo forza - spostamento compreso tra il valore positivo o negativo dello spostamento di progetto risulta compreso tra due rette parallele distanti tra loro non più del 40% della forza corrispondente allo spostamento di progetto.

Ciascun modo di vibrazione del sistema sarà caratterizzato da un valore complessivo del coefficiente di smorzamento  $\xi$ , che terrà conto dello smorzamento proprio dei singoli elementi (terreno, struttura, dispositivi) e della entità delle deformazioni di tali elementi nel modo considerato.

Le ordinate dello spettro di risposta elastico di progetto saranno modificate in funzione dell'effettivo smorzamento nel modo

indicato al par. 3.2.3.

4.8.2. Analisi dinamica con integrazione al passo  
Si applica quanto indicato al par. 3.8.2.

4.9. VERIFICHE

4.9.1. Stato Limite di Danno (SLD)

La verifica allo **SLD** è richiesta per i soli dispositivi di isolamento; per le parti strutturali essa è infatti da ritenersi automaticamente soddisfatta se è soddisfatta la verifica allo **SLU**. Per effetto della combinazione delle azioni definita al par. 3.3. devono essere rispettate le condizioni appresso indicate.

Isolatori in materiale elastomerico e acciaio

All'annullarsi delle azioni non si debbono avere spostamenti residui superiori al 2% dello spostamento massimo di progetto  $d_2$ .

Isolatori elasto - plastici

All'annullarsi delle azioni non si debbono avere spostamenti residui superiori allo spostamento elastico di progetto  $d_1$ , diviso per un fattore pari ad 1,2.

4.9.2. Stato Limite Ultimo (SLU)

Struttura

Per effetto delle combinazioni delle azioni definite al par. 3.3. tutti gli elementi strutturali dovranno soddisfare le verifiche allo **SLU** effettuate come previsto, per i materiali adottati, dalle norme vigenti per le situazioni non sismiche.

Ai soli fini delle verifiche delle pile e delle spalle, le azioni orizzontali trasmesse dai dispositivi isolanti saranno amplificate, rispetto ai valori ottenuti dalle analisi, del fattore 1,35.

Dispositivi di isolamento

Valgono in generale le prescrizioni contenute nel par. 3.9.2. Per il calcolo dello spostamento relativo massimo dei dispositivi di isolamento, in aggiunta a quanto indicato al par. 3.9.2., è da considerare il contributo dovuto allo spostamento relativo delle fondazioni che si manifesta nel corso dell'evento sismico.

In mancanza di studi specifici, lo spostamento relativo può essere valutato con l'espressione:

$$d_r = X V_g / V_p \leq \sqrt{2} d_g$$

dove:

**X** Distanza tra i punti considerati,

**V<sub>g</sub>** Velocità di picco del suolo,

**d<sub>g</sub>** Spostamento di picco del suolo,

**V<sub>p</sub>** Velocità di propagazione nel suolo delle onde di compressione (per  $\varepsilon \leq 10^{-6}$ ).

I valori di **V<sub>g</sub>** e **d<sub>g</sub>** per le tre categorie di sottosuolo definite al par. 3.2.4. Si possono ottenere, in funzione del valore di **a<sub>g</sub>**, dalla Tabella 7 seguente.

TABELLA 7  
Valori di **V<sub>g</sub>**, **d<sub>g</sub>**, **V<sub>p</sub>** in funzione di **a<sub>g</sub>** e della categoria di sottosuolo

CAT. SOTTOSUOLO	A	B	C
<b>V<sub>g</sub>/a<sub>g</sub></b> (sec)	0,090	0,135	0,160
<b>d<sub>g</sub>/a<sub>g</sub></b> (sec <sup>2</sup> )	0,060	0,090	0,110
<b>V<sub>p</sub></b> (m/sec)	1500	700	300

Nella stessa Tabella sono riportati anche valori indicativi di **V<sub>p</sub>**, che possono essere utilizzati in mancanza di dati geotecnici specifici per il sito

$$V_p = \sqrt{(\lambda + 2G)/\rho}$$

con  $\rho$  = densità di massa del suolo,  $\lambda = V_g E_g / (1 - V_g) / (1 - 2V_g)$  con **G<sub>g</sub>**, **E<sub>g</sub>**, **V<sub>g</sub>**, costanti elastiche del suolo).

5. ASPETTI COSTRUTTIVI, MANUTENZIONE, SOSTITUIBILITÀ

Il progetto degli isolatori di qualsiasi tipo (in materiale elastomerico ed acciaio, elasto - plastici, a scorrimento o rotolamento) comprende la redazione di un piano di qualità, che prevede, fra l'altro, la descrizione delle modalità di installazione dei dispositivi durante la fase di costruzione dell'opera da isolare, nonché il programma dei controlli periodici e degli interventi di manutenzione durante la vita di progetto della struttura, la cui durata deve essere specificata nei documenti di progetto e che, comunque, non deve risultare minore di 60 anni (**v. Requisiti degli Isolatori. Punto 3.5.**) Inoltre deve essere possibile la sostituzione, totale o parziale, degli isolatori in fase di manutenzione, nel caso in cui le caratteristiche di durabilità dei vari materiali che costituiscono il dispositivo siano diverse fra loro e, comunque, non idonee a garantire la stabilità dell'equilibrio termodinamico con l'ambiente durante la prescritta vita di progetto della struttura.

Ai fini della durabilità sono rilevanti le differenti proprietà di invecchiamento degli elastomeri (gomme) e dei polimeri termoplastici (teflon), l'azione degradante esercitata dall'ossigeno atmosferico sulle superfici degli elementi di acciaio, le caratteristiche fisiche e chimiche degli adesivi, utilizzati per incollare le lamiere di acciaio alla gomma, e quelle dei polimeri

organici del silicio a catena lineare (oli e grassi siliconici), utilizzati nei dissipatori visco - elastici, eventualmente disposti in parallelo agli isolatori a scorrimento o a rotolamento.

Ai fini della qualità della posa in opera, gli isolatori che trasmettono non solo le azioni orizzontali, ma anche quelle verticali, come nel caso di isolatori in materiale elastomerico ed acciaio e gli isolatori a scorrimento o rotolamento, devono essere installati da personale specializzato, sulla base di un disegno planimetrico recante le coordinate e la quota di ciascun dispositivo, l'entità e la preregolazione degli eventuali dispositivi mobili a rotolamento, le dimensioni delle eventuali nicchie predisposte nei getti di calcestruzzo per accogliere staffe o perni di ancoraggio le caratteristiche delle malte di spianamento e di sigillatura.

Ai fini della sostituzione degli isolatori, il progetto delle strutture di c.a. deve prevedere la possibilità di trasferire temporaneamente i carichi verticali dalla sovrastruttura alla sottostruttura per il tramite di martinetti oleodinamici, adiacenti all'isolatore da sostituire. A tale scopo il progetto delle strutture può prevedere nicchie per l'inserimento dei martinetti tra la sottostruttura e la sovrastruttura ovvero altre disposizioni costruttive equivalenti (per es. mensole corte che aggettano dalla base della sovrastruttura e che appoggiano su due martinetti ai lati dell'isolatore).

Anche i percorsi, che consentono al personale addetto di raggiungere e di ispezionare gli isolatori, devono essere previsti e riportati sul progetto esecutivo delle strutture portanti e su quello delle eventuali murature di tamponamento, in modo da garantire l'accessibilità al dispositivo da tutti i lati.

Le risultanze delle visite periodiche di controllo devono essere annotate su un apposito documento, che deve essere conservato con il progetto della struttura isolata durante l'intera vita di utilizzazione (non quella di progetto) della costruzione.

## 6. COLLAUDO

Il collaudo statico deve essere effettuato in corso d'opera; al riguardo si segnala che di fondamentale importanza è il controllo della posa in opera dei dispositivi, nel rispetto delle tolleranze e delle modalità di posa prescritte dal progetto.

Oltre a quanto indicato nelle norme tecniche emanate ai sensi dell'art. 21 della legge 5.11.71 n. 1086, per le opere in c.a., in c.a.p. ed a struttura metallica, devono osservarsi le prescrizioni di minima di seguito riportate:

- con riferimento a quanto indicato nei precedenti par. **3.5.** e **3.6.** devono essere acquisiti dal collaudatore i documenti di origine, forniti dal produttore, unitamente ai certificati relativi alle prove sui materiali ed alla qualificazione dei dispositivi, nonché i certificati relativi alle prove di accettazione in cantiere disposte dalla Direzione dei Lavori;
- la documentazione ed i certificati sopraindicati devono essere esposti nella relazione a struttura ultimata del Direttore dei Lavori cui spetta, ai sensi delle vigenti norme, il preminente compito di accertare la qualità dei materiali impiegati nella realizzazione dell'opera;
- le prove e le certificazioni per la qualificazione e l'accettazione dei dispositivi e dei relativi materiali devono essere effettuate e certificate a cura di Laboratori Ufficiali ai sensi dell'art. 20 della Legge 1086/71 purché dotati delle necessarie attrezzature e della specifica competenza.

Il collaudatore, nell'ambito dei suoi poteri discrezionali, potrà estendere i propri accertamenti, ove ne ravvisi la necessità. In tale senso il collaudatore potrà disporre l'esecuzione di speciali prove per la caratterizzazione dinamica del sistema di isolamento atte a verificare, nei riguardi di azioni di tipo sismico, che le caratteristiche della costruzione corrispondono a quelle attese.

### Sovrastruttura

Per effetto della combinazione delle azioni definita al par. **3.3.** devono essere rispettate le condizioni seguenti:

- le tensioni unitarie nell'acciaio e nel conglomerato devono risultare inferiori od eguali ai rispettivi valori ammissibili;
- lo spostamento relativo interpiano deve risultare a tutti i piani inferiore o uguale a:  $0,001 \cdot h$ , dove  $h$  è l'altezza del piano considerato.

Il limite sopra indicato può essere superato, ove si dimostri che il materiale costituente le tramezzature interne e le tamponature esterne è in grado di sopportare deformazioni di entità superiore senza dar luogo a fessurazione apprezzabile.

### Sistema di isolamento

Qualora il sistema di isolamento sia realizzato mediante isolatori in materiale elastomerico ed acciaio o isolatori elasto - plastici, il livello di protezione richiesto è da ritenersi conseguito se sono soddisfatte le verifiche nei confronti dello **SLU**, di cui al successivo par. **3.9.2.**

#### 3.9.2. Stato limite ultimo (SLU)

##### Sottostruttura e fondazioni

###### a) Azioni

La azione orizzontale di progetto da considerare è data dalla somma di:

- la forza massima  $H_{x,y}$  trasmessa dagli isolatori, calcolata come  $H_{x,y} = \gamma_{Rd} K_{max} d_{Ex,y}$ , dove  $\gamma_{Rd}$  è un fattore di sicurezza legato alle eventuali sovraresistenze da assumere  $\geq 1,2$ ;

-  $d_{Ex,y}$  è lo spostamento orizzontale massimo in direzione x, y;

- la forza di inerzia massima agente sulla sottostruttura, assunta pari al prodotto della massa della sottostruttura per la accelerazione di progetto  $a_g$ .

La azione verticale è data dall'insieme delle reazioni verticali degli isolatori corrispondenti alla combinazione di azioni di cui al par. 3.3.

b) Verifica

Gli elementi strutturali e le fondazioni dovranno equilibrare le azioni di cui al punto

a) con le loro resistenze calcolate allo stato limite ultimo, attribuendo valore unitario ai coefficienti  $\gamma_M$  dei materiali.

## Sovrastruttura

a) Azioni

Le azioni di progetto sono le azioni ottenute dalla analisi della struttura per la combinazione di carico di cui al par. 3.3., con il termine  $I \cdot E$ , relativo all'azione sismica, ridotto mediante il fattore  $q = 1,1$  nel caso di zone con grado di sismicità  $S = 12$  ovvero  $q = 1,5$  nel caso di zone con grado di sismicità  $S \leq 9$ .

b) Verifica

Tutti gli elementi strutturali dovranno equilibrare le azioni di cui al punto a) con le loro resistenze calcolate allo stato limite ultimo, attribuendo valore unitario ai coefficienti  $\gamma_M$  dei materiali.

## Sistema di isolamento

a) Isolatori in materiale elastomerico ed acciaio

Avendo indicato con  $\gamma_c = 1,5V / (G S_1 A_r)$  la deformazione di taglio dell'elastomero prodotta dalla compressione, dove

$V$  sforzo normale massimo sull'isolatore, derivato dalla combinazione dell'azione sismica con le altre azioni (v. par. 3.3.),

$G$  modulo di taglio statico dell'elastomero,

$S_1$  fattore di forma primario, definito al par. 3.6.1.,

$A_r$  area ridotta efficace dell'isolatore, calcolata come  $A_r = A'(1 - d_{Ex} / b_{Ey} - d_{Ey} / b_y)$  per isolatori rettangolari di lati  $b_x$  e  $b_y$ , come

$A_r = A'(1 - d_E / D)$  per isolatori circolari di diametro  $D$ ,

$d_{Ex}$   $d_{Ey}$  spostamenti relativi tra le due facce (superiore e inferiore) degli isolatori, prodotti dalla azione sismica agente nelle direzioni x ed y, nonché dalle azioni di ritiro, fluage, e termiche (ridotte al 50%), ove rilevanti, e  $d_E = (d_{Ex}^2 + d_{Ey}^2)^{1/2}$

•  $\gamma_s = d_E / t_e$  la deformazione di taglio dell'elastomero per lo spostamento sismico totale, inclusi gli effetti torsionali;

$\gamma_\alpha = a^2 / 2t_e t_g$  la deformazione di taglio dovuta alla rotazione angolare dove:

$a^2 = (\alpha_x b_x^2 + \alpha_y b_y^2)$  nel caso di un isolatore rettangolare, essendo  $\alpha_x$  e  $\alpha_y$  le rotazioni rispettivamente attorno alle direzioni x ed y,  $a^2 = 3 \alpha D^2 / 4$  nel caso di un isolatore circolare, essendo  $\alpha = (\alpha_x^2 + \alpha_y^2)^{1/2}$

Si definisce deformazione di taglio totale di progetto  $\gamma_t$  la somma  $\gamma_t = \gamma_c + \gamma_s + \gamma_\alpha$ .

Gli isolatori in elastomero ed acciaio debbono soddisfare alle seguenti verifiche di seguito elencate.

## Minima forza verticale sugli isolatori

Per tutti gli isolatori deve essere soddisfatta la condizione  $V \geq 0$  (assenza di trazione).

## Spessore delle piastre in acciaio

La tensione massima  $\sigma_s$  agente nella generica piastra in acciaio  $\sigma_s = 1,3 V (t_1 + t_2) / (A_r t_s)$  dove  $t_1$  e  $t_2$  sono gli spessori dei due strati di elastomero direttamente a contatto con la piastra e  $t_s$  è il suo spessore ( $t_s \geq 2$  mm), deve risultare inferiore alla tensione di snervamento dell'acciaio  $f_{yk}$ .

## Deformazione di taglio massima degli isolatori

Deve risultare soddisfatta la condizione  $\gamma_t \leq \gamma^* / \gamma_M$  con  $\gamma_M = 1,4$ , dove  $\gamma^*$  è il valore massimo della deformazione di taglio raggiunto nelle prove di aderenza per taglio.

## Verifica alla instabilità

Indicando con  $p$  il rapporto  $p = V / V_{cr}$ , dove  $V_{cr}$  è il carico normale di instabilità  $V_{cr} = G A_r S_1 b_{min} / t_e$  ( $b_{min} = \min(b_x, b_y)$ ) per isolatori rettangolari e  $D$  per isolatori circolari) e con  $\gamma_t$ , la deformazione totale di taglio, la combinazione ( $p, \gamma_t$ ) deve rispettare le condizioni seguenti:

$$p \leq 0,25 \quad p + \gamma_t / (0,9 \delta) = 1$$

$$0,25 \leq p \leq 0,50 \quad 2p + \gamma_t / (1,35 \delta) = 1$$

dove  $\delta = b_{min} / t_e$ , nel caso di isolatori rettangolari, e  $\delta' = D / t_e$ , nel caso di isolatori circolari.

b) Isolatori elasto - plastici

Minima forza verticale sugli isolatori

Per tutti gli isolatori deve essere soddisfatta la condizione  $V \geq 0$  (compressioni positive).

Spostamento orizzontale massimo

I dispositivi devono poter consentire uno spostamento orizzontale almeno pari a  $\gamma_D d_2$  in presenza di una forza verticale  $\gamma_N V$

oppure  $V/\gamma_N$ , senza perdita della loro integrità e senza dar luogo a fenomeni di instabilità, dove  $\gamma_D = 1,5$ ,  $\gamma_N = 1,2,5$ .

### **Parti non dissipative**

Nelle condizioni di massima sollecitazione del dispositivo le parti non impegnate nella funzione dissipativa devono rimanere in campo elastico, con un margine di sicurezza pari a  $\gamma_s \geq 1,5$ .