

La dissipazione dell'energia nell'ingegneria strutturale

Di Alessandro Pignagnoli

Introduzione

La progettazione strutturale in ambito dinamico rappresenta una delle tematiche più importanti e recenti dell'ingegneria civile. In particolare negli ultimi decenni l'ingegneria sismica e l'ingegneria del vento hanno spinto allo studio di nuove e migliori strategie di protezione di edifici e infrastrutture, adottando approcci progettuali che superano il concetto di aumento delle resistenze meccaniche.

Gli ultimi sviluppi hanno introdotto metodologie sempre più sofisticate, che non solo mirano a mantenere salvaguardare la vita degli occupanti, ma anche a limitare i danni alle strutture o, addirittura, garantire la funzionalità post-evento. Tra queste, un ruolo centrale è assunto dai sistemi di dissipazione energetica, che comprendono dispositivi passivi, attivi o ibridi per la riduzione delle sollecitazioni e la limitazione degli spostamenti.

Nel seguito si riporta una sintesi dell'argomento, tratta da un intervento del sottoscritto a un seminario, per cui mi scuso se la forma del testo non è ottimale. Ringrazio inoltre FIP e ISAAC per le immagini, e l'ing. Francesco Iorio per le immagini fornite e l'autorizzazione a pubblicarle.

1) Approcci Progettuali alla Dinamica Strutturale

I metodi progettuali dell'ingegneria, in campo dinamico, di cui disponiamo sono:

1. **metodi basati sul puro rinforzo delle strutture:** prevedono solo l'incremento delle resistenze per resistere alle azioni esterne
2. **metodi basati sull'isolamento sismico:** creano il disaccoppiamento del moto fra la struttura e la fondazione
3. **metodi basati sulla dissipazione dell'energia** sfruttando:
 - a. la **duttilità strutturale**
 - b. l'**utilizzo di dispositivi**
4. Metodi che prevedono una **combinazione dei suddetti**

Vediamoli nel seguito.

1. Metodo Tradizionale: il Rinforzo Strutturale

Consiste nel progettare strutture che resistono alle azioni esterne tramite il solo RINFORZO delle strutture. Si adotta nelle strutture che:

- non hanno duttilità (strutture fragili);
- non devono danneggiarsi in nessun caso;
- non hanno dissipazione per ragioni costruttive;

Il risultato: si ottengono strutture molto massicce e pesanti. E' possibile solo per strutture di modeste dimensioni.



2. Resistere alle azioni esterne tramite l'isolamento alla base è utile solo per l'azione sismica. Richiede l'inserimento di dispositivi di isolamento che:

- Hanno bassa rigidezza alle azioni orizzontali
- Hanno un certo smorzamento (intrinseco del dispositivo)

Non è sempre applicabile in pratica: occorrono idonei spazi.

Si applica su edifici con periodo proprio modesto. Funzionano bene per il sisma.



[Dispositivo di isolamento alla base FIP]

3. Resistere alle azioni esterne tramite la dissipazione dell'energia La dissipazione dell'energia ha due approcci:

Primo approccio: Resistere alle azioni esterne sfruttando la plasticizzazione delle sezioni critiche della struttura portante, cioè i cicli di isteresi. È una tecnica efficace per l'azione sismica.

Secondo approccio: Resistere alle azioni esterne tramite dispositivi di dissipazione di energia inseriti nella struttura portante. È una tecnica utile per l'azione sismica e per il vento.

Il primo è l'approccio classico in "gerarchia delle resistenze", che qui non si approfondisce, in quanto ben noto. Esso è il metodo principe proposto nell'attuale NTC; prevede che la struttura possa superare l'evento più gravoso tramite un danneggiamento diffuso ma senza crolli.

Il secondo richiede l'inserimento di dispositivi di dissipazione che:

- Aggiungono un certo smorzamento strutturale
- Possono avere rigidità (isteretici) o non averla (viscosi)
- A volte si utilizzano in accoppiamento fra loro

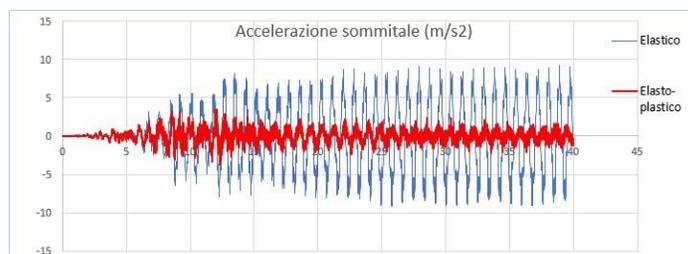
Si applicano facilmente su molti tipi di strutture e funzionano per il sisma e per il vento.



L'utilizzo dei dispositivi richiede un approccio progettuale specifico, e in particolare la definizione di un "target" di progetto. Nella NTC attuale, molto prescrittiva e impostata sulla gerarchia della resistenza, sostanzialmente non tratta questo tema.

2) Il Ruolo dello Smorzamento

Come già detto, lo smorzamento strutturale è dovuto alla dissipazione di energia. Nella dinamica delle strutture esso è **benefico, ed è fondamentale** per il raggiungimento del **target di progetto**.



[Accelerazioni in una struttura]

Lo smorzamento è indispensabile per:

- Ridurre l'entità degli spostamenti quindi limitare gli sforzi (target di progetto)
- Arrestare il moto al termine dell'azione esterna.

In moltissimi problemi dinamici noi utilizziamo sistemi meccanici smorzati: dalle sospensioni dei veicoli agli smorzatori sulle ante di un mobiletto della cucina.

3) I vari tipi di smorzamento strutturale.

Vi sono molti tipi di smorzamento strutturale ma la distinzione è convenzionale in quanto essi non sono sempre chiaramente distinguibili.

In pratica non esiste un unico modello universale di dissipazione, in quanto alcuni tipi sono indipendenti spostamenti, altri dipendono dagli spostamenti, e altri ancora dalla velocità. Per ogni tipologia strutturale occorre adottare un modello diverso di dissipazione, il più possibile aderente alla realtà.

Convenzionalmente possiamo distinguerli come segue:

- **Smorzamento** interno ed esterno della struttura **dovuto agli «attriti»:**
 - a. **Intrinseco**, dovuto agli attriti interni (sempre presente);
 - b. **Per isteresi dei materiali** (quando si supera il limite elastico);
 - c. **In fondazione** (parte dell'energia sismica che impatta viene dissipata nel suolo);
 - d. **Aerodinamico** (parte dell'energia viene dissipata nell'attrito con l'aria);
- **Smorzamento aggiuntivo immesso tramite dispositivi:** dissipatori isteretici, viscosi, TMD, AMD

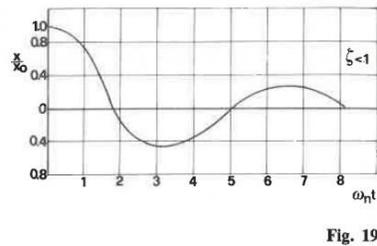
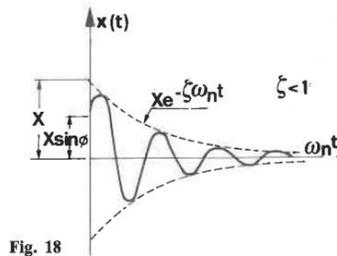
I campi di interesse dello smorzamento sono diversi, tra questi notiamo:

- le azioni sismiche, ovvero quando l'azione proviene dal suolo per cui nello smorzamento

interviene anche la fondazione;

- le azioni del vento, dove lo smorzamento in fondazione è minimo e si aggiungono interazioni aeroelastiche complesse;
- problemi di vibrazione;
- problemi di urti.

In generale sappiamo dalla dinamica delle strutture che, se lo smorzamento effettivo di una struttura è **inferiore al valore critico** ($\zeta < 1$), il moto si arresta lentamente, mantenendo un moto periodico con decadimento esponenziale. Da notare che, nell'ingegneria strutturale, gli smorzamenti effettivi sono sempre inferiori al 'critico'.



[Tratto da: Atti del Corso di Ingegneria sismica –Bologna 1984]

A. Smorzamento per attriti / isteresi dei materiali

Può essere sufficiente per bassi livelli dell'azione sollecitante. Per strutture che restano in campo elastico possiamo considerare:

- 5% per telai in cemento armato;
- 0.5–2% per strutture in acciaio;
- Valori inferiori per ponti o edifici alti.

Ad esempio, lo Spettro elastico in accelerazione della NTC adotta un indice di smorzamento

convenzionale al 5%; quindi per la progettazione, per bassi livelli di azione (sisma, vento), ci basta lo smorzamento interno della struttura.

A. Smorzamento aggiuntivo: quando occorre un apporto di dissipazione aggiuntiva

Per ALTI livelli di azione (sisma, vento) non ci basta lo smorzamento interno intrinseco perché abbiamo necessità di limitare gli spostamenti e sollecitazioni interne alla struttura.

Abbiamo più possibilità:

- Strutture progettate in «Gerarchia delle resistenze», e quindi «duttili»: sfruttiamo la dissipazione (quindi lo smorzamento) generata dalla isteresi dei materiali costituenti la struttura portante;
- In altri casi utilizziamo i dispositivi sismici smorzanti, cioè aggiungiamo smorzamento senza impegnare la struttura portante;
- Soluzione ulteriore: adottare dispositivi di isolamento alla base, in modo da limitare l'energia sismica in ingresso; il sistema però è sempre associato a un certo livello di smorzamento aggiuntivo.

Ne consegue che le soluzioni non sono sempre univoche e che per ogni situazione si deve trovare il sistema di smorzamento più adatto.

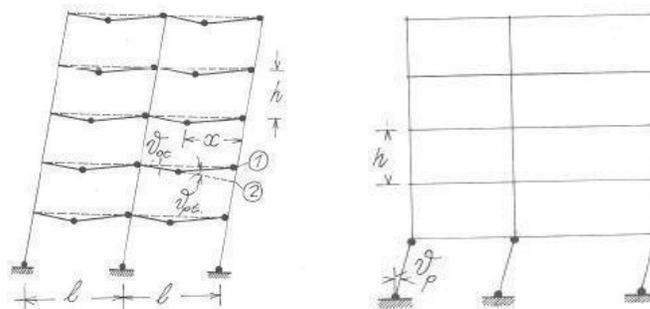
4) Vediamo alcuni esempi pratici:

CASO A: sfrutto la duttilità strutturale

Nell'immagine: Telaio più duttile (a sx) e telaio meno duttile (a dx -piano debole). Utilizzando i metodi classici del calcolo a rottura è facilmente calcolabile il lavoro di deformazione nei due casi e quindi le capacità dissipative.

PLV:

$Lve = Lvi$



[Tratto da: Atti del Corso di Ingegneria sismica –Bologna 1984]

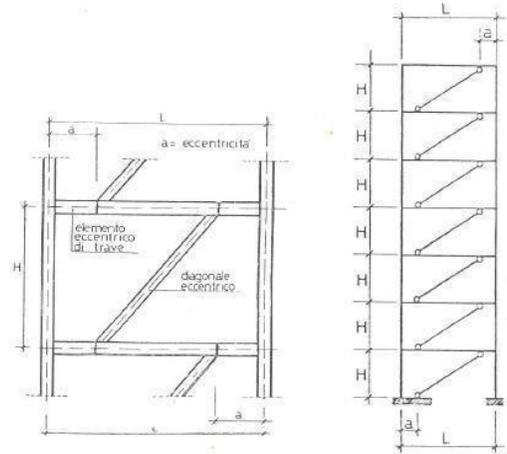
Esempi:

1. struttura metallica a controventi eccentrici. La struttura è duttile.

Le sezioni critiche, in questo caso, sono quelle dei conci deputati alla plasticizzazione e le sezioni sono soggette a presso-flessione e taglio.

La struttura attinge quindi gli spostamenti tipici di un telaio e realizza molti cicli di isteresi stabili.

Garantisce alti livelli di smorzamento isteretico, con durata sino alla fine dell'azione e del moto



[Tratto da: Atti del Corso di Ingegneria sismica –Bologna 1984]

2. struttura metallica a controventi concentrici. La struttura non è duttile.

In questo caso i cicli di isteresi sono irregolari e vanno restringendosi.

Il comportamento quindi non è affidabile nel tempo per cui è prudentiale mantenere la struttura in campo elastico; ne consegue che devo reggere le azioni integralmente, senza sconti, oppure inserisco dispositivi.

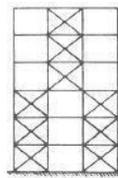


Fig. 5

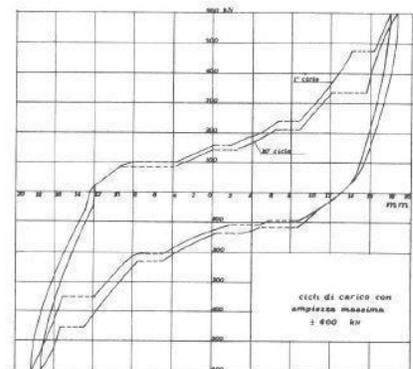


Fig. 6, da [4]

[Tratto da: Atti del Corso di Ingegneria sismica- Bologna 1984]

Come si progetta quindi una struttura che sfrutta la duttilità strutturale?

Quando le strutture duttili sono progettate tramite la gerarchia delle resistenze, sfrutto la dissipazione di energia per isteresi dei materiali della struttura stessa. Si tratta di un problema ingegneristico complesso che coinvolge la non linearità dei materiali; occorre un metodo di calcolo semplificato, almeno per i casi ordinari, evitando così l'analisi dinamica non lineare.

Metodo del Fattore di Comportamento "q"

Con questo metodo, metto in conto la dissipazione isteretica «forfetariamente», andando a ridurre lo spettro elastico con un fattore di struttura «q»

NTC: fornisce Spettri "di progetto" SLV" o "SLC", quindi in campo anelastico, utilizzando il metodo suddetto. Si utilizza un'analisi elastica lineare con spettro in accelerazione (e fattore di struttura); per ottenere lo spettro di progetto la NTC dice di porre:

$$\eta = 1/q$$

η è il fattore che altera lo spettro elastico per coefficienti di smorzamento viscosi convenzionali ξ diversi dal 5%, mediante la relazione

$$\eta = \sqrt{10 / (5 + \xi)} > 0,55 . \quad [3.7.4]$$

dove ξ (espresso in percentuale) è valutato sulla base dei materiali, della tipologia strutturale e del terreno di fondazione;

equiparando di fatto la duttilità strutturale a uno smorzamento viscoso.

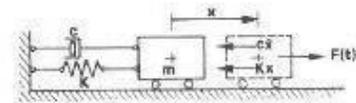
Sono qui necessarie alcune considerazioni:

1. Tenuto conto che isteresi del materiale e viscosità sono due cose diverse, il passaggio suddetto non è banale.

equazione dell'equilibrio dinamico:

$$m \ddot{X}(t) + \boxed{C \dot{X}(t)} + \boxed{K X(t)} = - m \ddot{X}_s(t)$$

viscosità
isteresi



Dove:

- $\ddot{x}_s(t)$ è l'accelerazione impressa al suolo
- $X(t)$ è lo spostamento relativo rispetto alla base (o al suolo) Per approfondire questo argomento si rimanda a trattazioni specifiche.

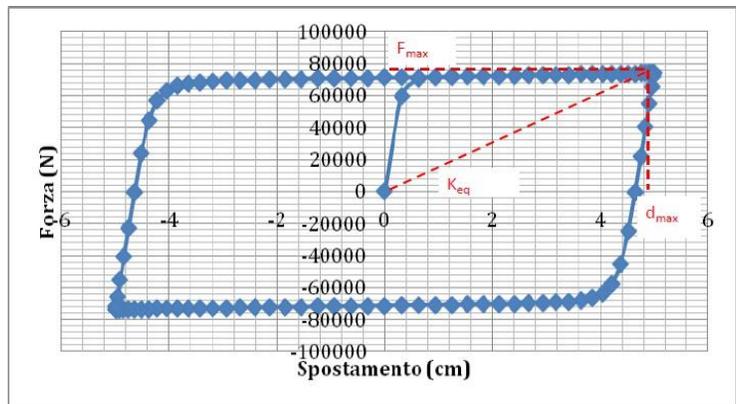
Si può porre una equivalenza fra lo smorzamento strutturale isteretico, dovuto a isteresi dei materiali di un sistema "reale", e smorzamento viscoso "equivalente" di un sistema elastico "equivalente" smorzato ponendo (Chopra 1995):

$$\xi_{eq} = E_d^{ciclo} / (4 \pi W_s)$$

(del sistema equivalente)

Oppure si può utilizzare la forma equivalente riportata nella NTC, par. 11.9.7, in riferimento ai dispositivi sismici elastomerici.

dove: E_d^{ciclo} è l'energia dissipata in un ciclo completo, mentre W_s è l'energia elastica allo spostamento massimo



Quindi dispongo di un metodo semplificato molto comodo: Progetto allo stato limite ultimo utilizzando spettri elastici ridotti tramite «q». Pare tutto risolto ma ... NON DIMENTHIAMO CHE la struttura SI DEVE DANNEGGIARE, quindi a fine evento sismico dovrò demolirla.

CASO B: Progettazione con Dispositivi Smorzanti (damper)

Gli smorzatori, di qualunque tipo, hanno due effetti importanti:

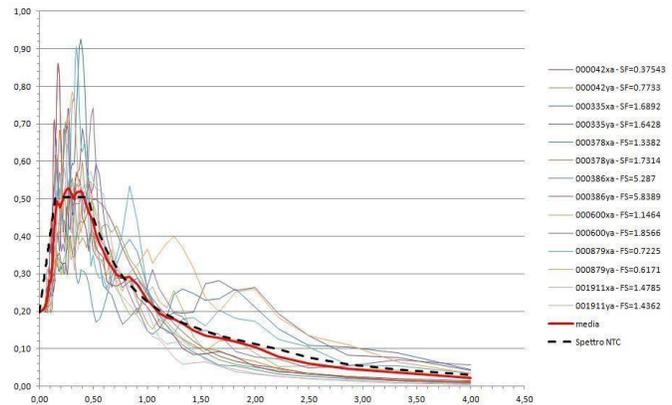
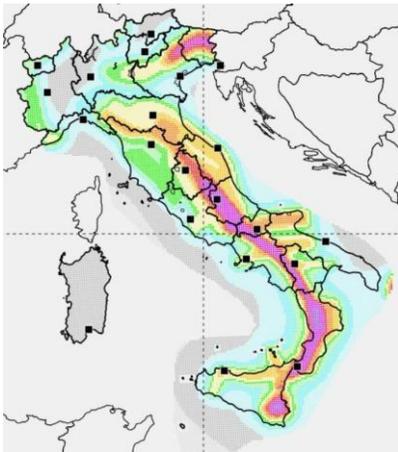
- consentono di ridurre fortemente gli effetti delle azioni sollecitanti (vento, sisma) dissipando energia
- preservano dai danneggiamenti le strutture portanti.

$$m \ddot{X}(t) + \boxed{C \dot{X}(t)} + \boxed{K X(t)} = -m \ddot{X}_s(t)$$

↑
↑

Dispositivi viscosi
Dispositivi isteretici

La progettazione richiede spesso analisi dinamiche non lineari (time-history), con selezione accurata degli accelerogrammi di input.



NB: Gli smorzatori, come gli isolatori, hanno limitazioni fisiche costruttive (forze massime, escursioni massime, ecc.), di cui si deve tenere conto.

2) Tipologie di Dispositivi:

- Isteretici: possono essere di varia forma e tipologia. In questi la dissipazione avviene tramite cicli di isteresi dei materiali di cui sono fatti, la quale è funzione dello spostamento relativo fra gli estremi.

I più usati sono:

- **assiali** a instabilità impedita (per le strutture più rigide)
- Link a **falce di luna** o a **piolo** (per quelle più deformabili).

Questi dispositivi aggiungono rigidità, oltre a dissipare, per cui in certi casi sono utili anche per correggere un comportamento strutturale non ottimale.

- Viscosi: in quelli classici **la dissipazione** avviene tramite un fluido; essa è **funzione della velocità** relativa fra gli estremi. Possono consentire spostamenti in un range molto ampio.

I dispositivi TMD e AMD rientrano concettualmente tra i “viscosi” in quanto mettono in gioco forze che:

- si oppongono alle forze d’inerzia;
- sono proporzionali alla velocità relativa fra gli estremi;
- non modificano le rigidezze della struttura

Applicazioni Reali

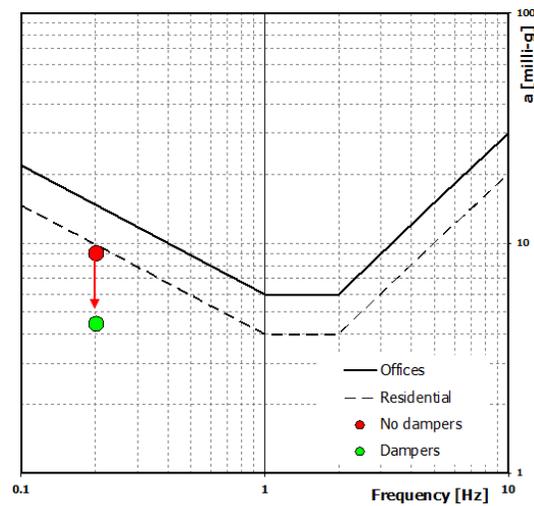
a) dispositivi smorzanti viscosi in strutture nuove

Per il caso esposto nel seguito i dissipatori, che sono collegati ai puntoni visibili nelle immagini seguenti, hanno la funzione di garantire il comfort di utilizzo degli uffici in caso di vento forte.



[Torre Isozaki (MI) – immagini per concessione ing. Francesco Iorio (SIO)]

Nel grafico seguente è possibile vedere l'efficacia degli smorzatori rispetto alle curve di comfort.



b) Dispositivi in Strutture Esistenti

I dispositivi smorzanti possono essere usati anche per interventi di miglioramento sismico su edifici prefabbricati. Occorre comunque valutare la possibilità di ancoraggio e valutare gli ingombri. Vedere l'immagine riportata sotto:



Nell'immagine un edificio prefabbricato in CA al quale sono stati applicati dei dispositivi viscosi FIP

c) Casi in cui non è possibile l'ancoraggio al suolo:

Quando non è possibile l'ancoraggio a terra, si può ricorrere a dispositivi alternativi: **TMD** (Tuned Mass Damper) o **AMD** (Active Mass Damper).

Gli AMD, in particolare, stanno avendo una certa diffusione negli ultimi anni. Essi sono installabili anche all'interno di una cella campanaria o in copertura a un edificio.



Immagine di un dispositivo AMD di produzione ISAAC Antisismica (per gentile concessione)