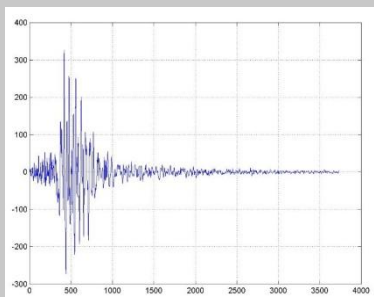


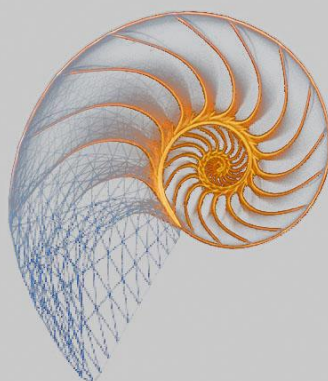
Approfondimenti

SETTORE:



PROGETTAZIONE ANTISISMICA:

- LE BASI DELLA DINAMICA STRUTTURALE



Altri Settori:

PROGETTAZIONE STRUTTURALE
PROGETTAZIONE ARCHITETTONICA
RISTRUTTURAZIONI E RESTAURO
RETI TECNOLOGICHE
PREVENZIONE INCENDI
PROGETTAZIONE IMPIANTISTICA
PROGETTAZIONE URBANISTICA

LE BASI DELLA DINAMICA STRUTTURALE

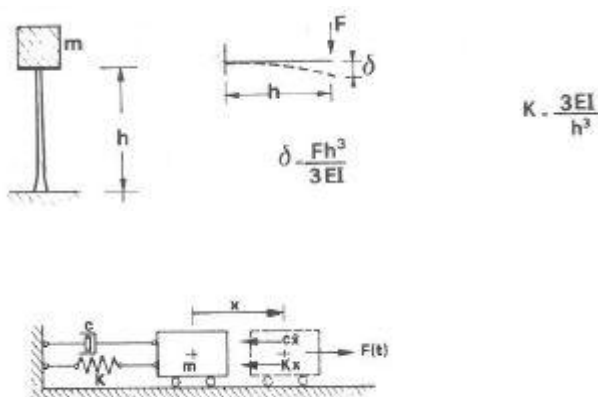
1) L'oscillatore semplice smorzato

La base degli studi di dinamica strutturale è il cosiddetto oscillatore semplice.

Trattato inizialmente dai ricercatori solo per via analitica e, successivamente, supportato da analisi numeriche tramite elaboratore, esso ha consentito la comprensione del comportamento sismico di fondo delle strutture elementari ad un grado di libertà

Il problema, nel caso pratico, schematizza (ad esempio) il caso del serbatoio sospeso, oppure un portale con travata infinitamente rigida, dove l'unica incognita "x" è la traslazione orizzontale; tuttavia lo studio dell'oscillatore semplice porta a risultati pratici estremamente importanti estendibili ai casi più complessi nell'ingegneria sismica.

Come detto, esso è un sistema dinamico in cui l'unico grado di libertà è lo spostamento "x" di una massa "m", soggetta a una forza di richiamo elastica di rigidità "k", e smorzamento viscoso "c"; quest'ultimo rappresenta lo smorzamento strutturale (vedi apposito paragrafo) proporzionale alla velocità nell'istante "t". F(t) è la forzante esterna.



L'equazione è:

Caso 1: $m \ddot{x} + c \dot{x} + k x = 0$ per lo studio delle oscillazioni libere

Caso 2: $m \ddot{x} + c \dot{x} + k x = F(t)$ nel caso di forzante esterna F(t)

Caso 1

Molto in sintesi, si può dire che, studiando prima di tutto il Caso 1) - oscillazioni libere – si è mostrato in modo chiaro il legame tra il periodo dell'oscillazione libera, la massa e la rigidità k:

Periodo proprio: $T=2\pi \sqrt{(m/K)}$

Inoltre, al variare di “c”, si è visto l’effetto dello smorzamento “c” sulle oscillazioni libere, definendone prima il valore critico:

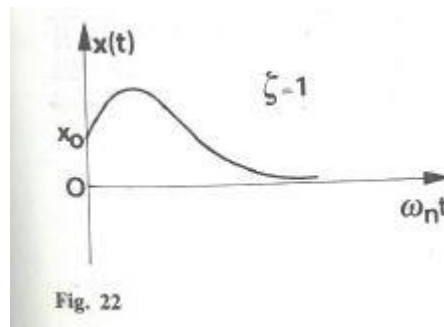
$$c_c = 2m \sqrt{(K/m)}, \text{ a volte scritta anche: } c_c = 2 \sqrt{(K*m)}, \text{ o anche } 2m\omega_n$$

e successivamente, definendo l’**“indice di smorzamento”** (o fattore di smorzamento):

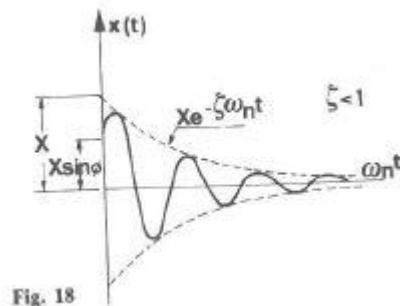
$$\zeta = c/c_c$$

si osserva l’influenza di tale parametro sul moto dell’oscillatore. In particolare che:

- per $\zeta = 1$ o superiore, il moto non è più periodico e tende asintoticamente a zero:



- per $\zeta < 1$, com’è usualmente nelle strutture, le ampiezze risultano decrescenti e il moto (definito pseudo-periodico), presenta un periodo si allunga ad ogni ciclo, fino all’arresto del moto:

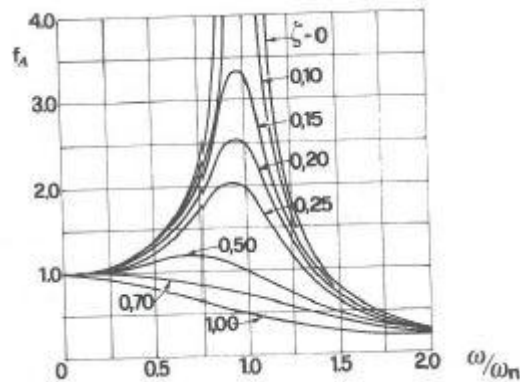


Caso 2

Studiando il caso della forzante esterna armonica, si è compreso il comportamento nel transitorio e poi a regime dell’oscillatore. La cosa fondamentale è la risonanza, cioè la coincidenza fra pulsazione della forzante esterna e la pulsazione dell’oscillatore.

In assenza di smorzamento ($\zeta < 0$) gli spostamenti diventano infiniti e la struttura collassa.

All’aumentare dell’indice di smorzamento, gli spostamenti si riducono. Risulta chiaro, quindi, che lo smorzamento è indispensabile nelle strutture reali, e diventa determinante quando ω e ω_n sono prossimi fra loro.



Dal momento che, nel caso di sisma reale, non si conosce l'input a priori, occorre fare le valutazioni seguenti.

Con l'ipotesi di regime elastico e spostamenti piccoli è possibile trattare il caso di forzante generica tramite l'analisi armonica, la quale consente di trasformare una funzione di input $F(t)$ in una sommatoria di singole funzioni armoniche. Ogni singola finzione, con la propria ampiezza e pulsazione, ecciterà in modo diverso l'oscillatore. Con la sovrapposizione degli effetti si potrà pervenire alla soluzione. Ogni "armonica del segnale sismico, quindi, creerà una certa "risposta" dell'oscillatore. Da qui il concetto di "Spettro di risposta".

Dal punto di vista analitico, per il caso di forzante generica, si è dimostrato anche che è comunque sempre possibile l'integrazione diretta nel dominio del tempo dell'equazione del moto: il cosiddetto "integrale di Duhamel", che oggi viene risolto tranquillamente per via numerica tramite software "commerciali" ormai disponibili da alcuni anni, una volta che se ne coglie il significato fisico. La strada tuttavia è densa di problemi reali, che si vedranno nel seguito.

I risultati pratici, in sintesi

Le osservazioni sull'oscillatore semplice smorzato aprono la strada a molteplici applicazioni pratiche. Si riesce infatti a trattare i seguenti fenomeni:

- 1) Tramite l'analisi armonica della forzante (intesa come modellazione dell'azione sismica, funzione del tempo), si comprende l'influenza delle armoniche della forzante stessa (il sisma reale) sull'oscillatore; da qui discende il metodo dello "spettro di risposta" come modellazione semplificata dell'azione sismica in ingresso.
- 2) Lo studio delle forme spettrali (in termini di accelerazione, velocità e spostamento) che derivano dall'involuppo di diversi accelerogrammi, dipende dall'oscillatore ma anche dal terreno: l'azione sismica alla sorgente combinata all'effetto di filtrazione dei terreni deformabili, ha consentito di capire gli effetti sulle strutture al variare della rigidità del sistema. Da qui discende anche l'idea dell'isolamento alla base come sistema di protezione sismica e i metodi per progettarlo.
- 3) Tramite la variazione dello smorzamento (o per essere più precisi l' "indice di smorzamento") si comprendono gli effetti di risonanza, e l'effetto benefico dello smorzamento; da qui derivano gli studi per trattare sia lo smorzamento strutturale intrinseco, l'isteresi dei materiali nelle zone critiche (cerniere) che quello del dispositivo "smorzatore".

La trattazione dell'oscillatore "semplice", quindi, è la base di tutto, ma non è sufficiente per trattare un problema reale di sismica delle strutture. Occorrono ulteriori passaggi che, man mano, diventano sempre più approssimati e delicati , non esistendo la soluzione "in forma chiusa" del problema analitico.

2) I sistemi a più gradi di libertà

Lo studio del caso generale a più gradi di libertà, porta ovviamente a complicazioni. Ma ad ogni ostacolo è stata trovata una soluzione, più o meno approssimata.

Utilizzando la tecnica dell'analisi "modale", sempre sotto l'ipotesi dell'elasticità, si è potuto dimostrare che la struttura a "n" gradi di libertà è caratterizzata da "n" modi di vibrare, aventi ciascuno una propria forma, un proprio periodo proprio, e un proprio coefficiente di partecipazione di massa al moto complessivo; però il comportamento complessivo non è risolvibile in forma chiusa, in quanto si ottiene un sistema di equazioni differenziali accoppiate. Sotto certe condizioni il tutto è trattabile come una sommatoria di "n" oscillatori semplici che rappresentano gli n modi di vibrare; tuttavia, non essendo possibile sovrapporre, i "massimi della risposta" in termini di spostamento, velocità e accelerazione (i quali si verificano ad istanti "t" diversi), si ricorre a combinazioni probabilistiche dei massimi stessi.

Inoltre, non si deve dimenticare che, con l'analisi modale:

- i risultati, in termini di forze e spostamenti, sono definiti a meno del segno;
- il problema resta elastico lineare e sotto l'ipotesi di spostamenti piccoli;
- vi sono a monte tutte le ipotesi dette.

Lo studio dell'oscillatore elasto-plastico

Per arrivare al caso progettuale concreto occorre necessariamente riuscire a trattare, anche se in via approssimata, il caso dell'oscillatore elasto-plastico, cioè mettere in conto la non linearità meccanica del materiale.

Per fare questo occorrono alcuni passaggi non banali e piuttosto delicati. In particolare perché:

- la duttilità di un materiale è diversa da caso a caso;
- La duttilità strutturale è cosa diversa dalla duttilità del materiale;
- La duttilità di una sezione critica è sempre influenzata dallo sforzo normale;
- Nel caso del CA, la duttilità della sezione dipende anche dalle armature longitudinali presenti e dalla staffatura;
- Occorre tenere conto del taglio, che spesso è dannoso.
- Riuscire a modellare il comportamento della sezioni critiche in caso di azione ciclica.

Nel seguito si vedrà come viene trattato il problema dal punto di vista pratico.

AZIONI CICLICHE

L'azione sismica reale è sempre un'azione ciclica che si inverte di segno. A monte quindi di ogni modellazione semplificata (esempio tramite spettro di risposta) non si deve mai dimenticare che la capacità di resistenza ciclica della sezione (per un numero di cicli sufficiente) è data per scontata.

Il problema, quindi, non è banale, dal momento che un ciclo di isteresi, per essere studiato, ha in sé i seguenti problemi:

- la non linearità meccanica;
- il ciclo di isteresi (cioè la dissipazione)
- la stabilità della sezione ai cicli ripetuti (cioè il degrado delle resistenze);
- l'influenza delle caratteristiche armoniche della forzante

Si capisce quindi che la sola analisi della sezione è piuttosto complessa ed ancora oggi, per certi aspetti, ancora oggetto di ricerca. Occorre quindi semplificarlo, ma con molta attenzione.

IL PRINCIPIO DI RESISTENZA AL SISMA

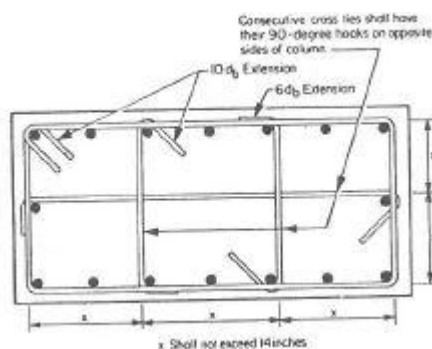
Il principio di resistenza al sisma della struttura il condizioni di plasticizzazione (il sisma più violento), è stato inizialmente osservato proprio nell'oscillatore elasto-plastico, il quale consente due letture diverse (anche se connesse) del comportamento strutturale:

- La capacità di resistenza sismica intesa come capacità di resistere alle forze d'inerzia in campo elastico;
- La capacità di resistenza sismica intesa come capacità di subire spostamenti in campo plastico, quindi capacità di isteresi e dissipazione di energia.

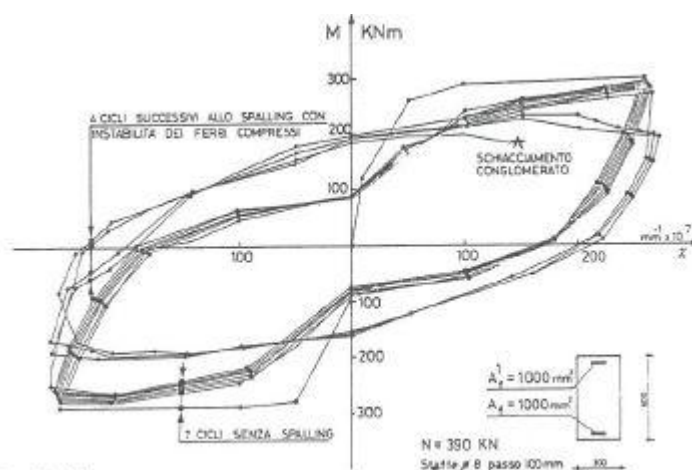
In entrambe entrano comunque in gioco sempre le "resistenze" delle sezioni, come si vedrà meglio in seguito.

Un discorso a parte merita lo smorzamento strutturale, di cui si è accennato per l'oscillatore semplice, e che vedrà meglio in apposito paragrafo dedicato.

In tutti i casi, è sempre valido il concetto che se le sezioni critiche della struttura (correttamente progettate), sono capaci di subire cicli di isteresi in numero ed entità sufficiente, quindi danneggiandosi in modo controllato e stabile, possono dissipare l'energia sismica e consentire all'edificio di restare in piedi.



Esempio di sezione correttamente staffata



Da rif. (16).

Ciclo di isteresi di un concio in CA, con valore basso di sforzo normale (es. Travi)

Duttilità del materiale, duttilità della sezione critica (presso-inflessa), duttilità strutturale

Allargando ora la visuale e tentando di trattare l'oscillatore nella sua reale geometria, come prima cosa dobbiamo ricordarci che occorre rimuovere l'ipotesi di spostamenti "piccoli", che sono alla base di tutta la statica delle strutture, in quanto questi (se va bene) restano validi solo per eventi sismici di bassa magnitudo (SLD). Per le magnitudo di resistenza ultima (SLV) la struttura deve plasticizzarsi per sviluppare duttilità (che equivale – vedi in seguito - a smorzamento isteretico), aumentando fortemente gli spostamenti.

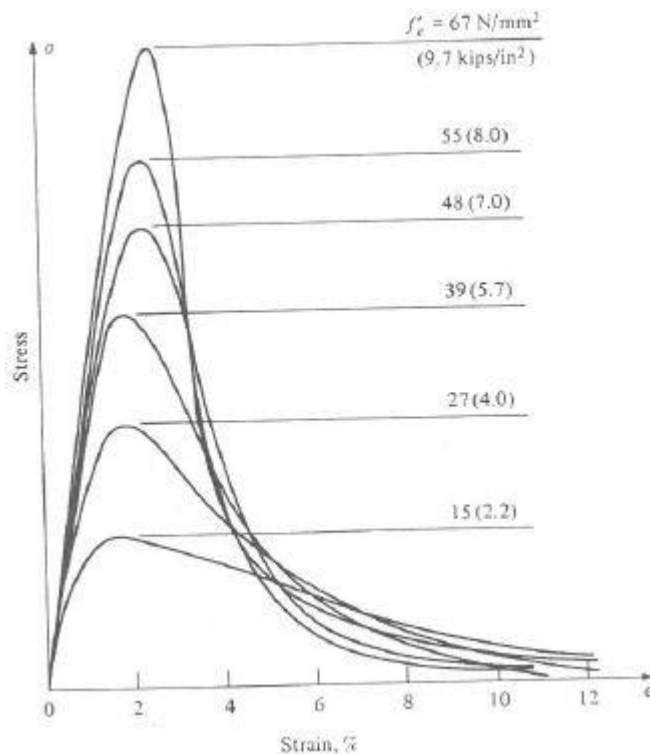
Non dimentichiamo inoltre che (soprattutto cìon spostamenti non più piccoli) vi è tutta la problematica dell'instabilità dell'equilibrio la quale, ovviamente, potrebbe entrare nel problema, soprattutto nelle strutture metalliche o nelle strutture molto snelle. Trattandosi però, in questo caso, di problematica che impedisce l'adozione di semplificazioni del problema dinamico, ed essendo spesso evitabile, ove possibile conviene evitarla. Anche qui abbiamo metodi semplificati per capire se siamo riusciti ad evitarlo veramente.

Tutti gli studi sull'oscillatore elasto-plastico sono stati fatti e sono disponibili in letteratura, ma alcune osservazioni, fra tutte, sono risultate determinanti: in particolare il concetto di duttilità strutturale e il concetto di smorzamento.

La duttilità del materiale

Questo concetto è ben noto, e non è il caso di riprenderlo.

L'acciaio è un materiale duttile; il CLS è un materiale fragile, dal comportamento complesso e variabile con la resistenza caratteristica.



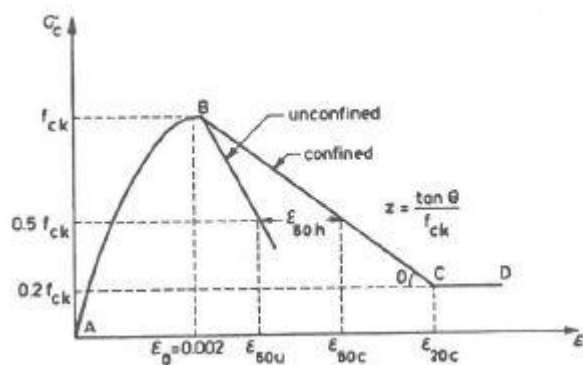
Comportamento a rottura di un cubetto di cls al variare della classe di resistenza

La duttilità di una sezione

Questo concetto risulta indispensabile in campo sismico.

Le sezioni in acciaio vengono suddivise in Classi, in funzione del comportamento. Gli studi hanno infatti evidenziato che certe sezioni (Classe I) sono duttili e stabili anche sotto azione ciclica. Altre lo possono essere (classe II e III) con certi accorgimenti; Le sezioni in classe IV, tipiche dei sagomati a freddo, sono da evitare.

Per il CA, si dimostra che il comportamento della sezione può essere fragile o duttile a seconda di come viene armata e staffata, e lo sforzo normale deve essere basso (max il 30% del limite). I cicli di isteresi stabili sono garantiti soprattutto dalla staffatura, la quale deve essere proporzionata alla quantità di barre longitudinali, ben ancorata (con staffe richiuse) e a passo fitto. In caso di forte taglio occorre incrementare le armature ulteriormente, perché la rottura a taglio è sempre fragile, quindi da evitare.



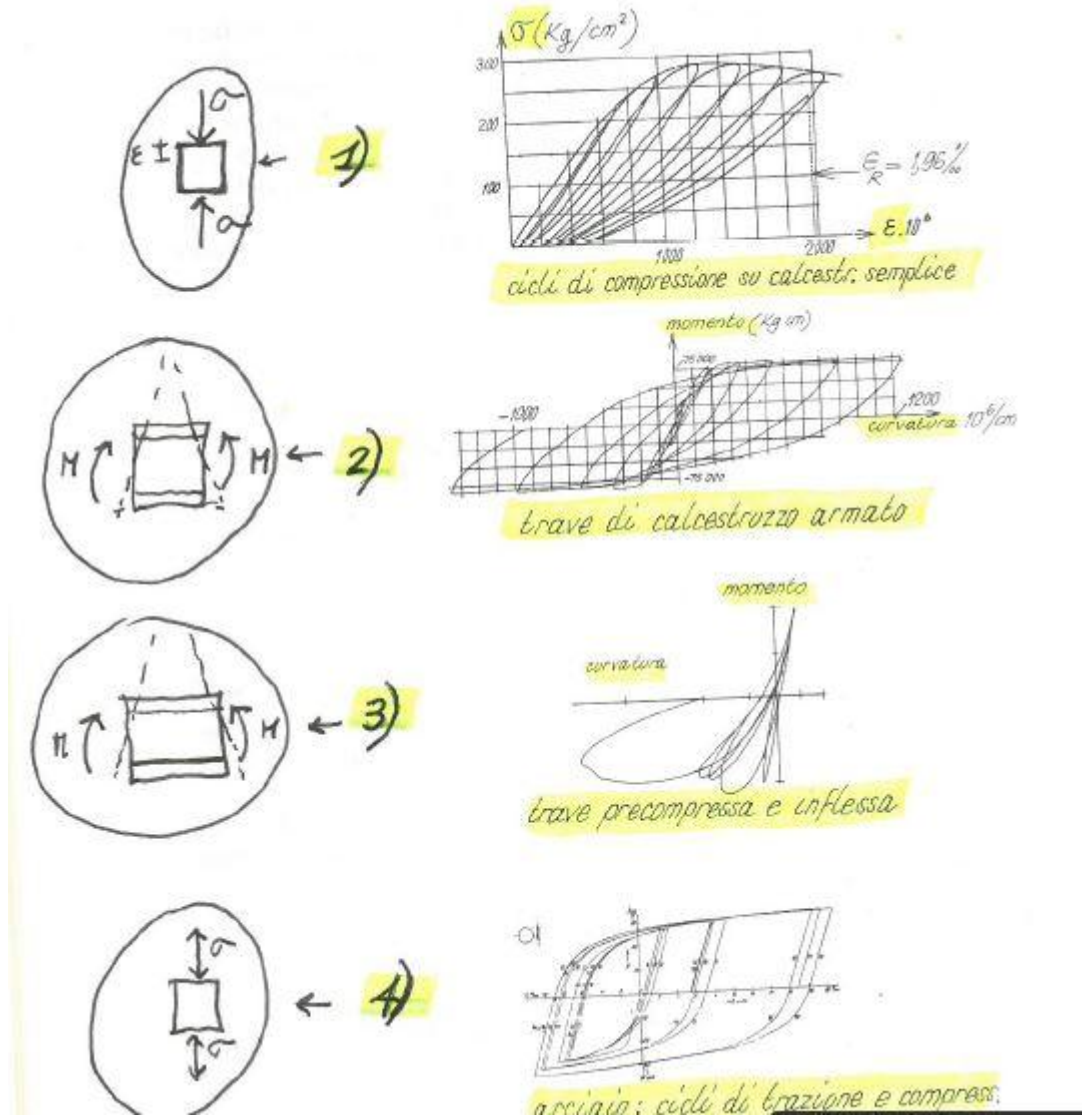
Modello non lineare del CLS per azioni monotone crescenti ; si vede l'effetto della staffatura nel ramo post-critico.

La duttilità strutturale

Usare un materiale duttile, o anche avere sezioni duttili, non garantisce un comportamento duttile della struttura. Questo è anche uno degli equivoci più frequenti nella pratica professionale, che porta poi a palesi errori di impostazione del progetto.

La struttura è duttile se può spostarsi e plasticizzarsi, creando cicli di isteresi e restando stabile. Quindi il tutto dipende anche dalla geometria strutturale.

Solo nella mensola (struttura isostatica), la duttilità strutturale è direttamente proporzionale alla duttilità (in curvatura) della sezione di base (di momento massimo). In tutti gli altri casi (strutture iperstatiche) non è così: occorrono ulteriori valutazioni.



Da Pozzati – 1984 : duttilità di materiale e duttilità strutturale

Nelle analisi che seguono si riprendono i concetti del Calcolo plastico a rottura e i teoremi dell'Analisi Limite (trattati nei corsi di Complementi di Scienza e Complementi di Tecnica delle Costruzioni, a cui si rimanda per completezza). Si rimanda ai testi per maggiori approfondimenti.

Per spiegare il concetto rapidamente conviene fare riferimento ad un esempio pratico.

Esempio: una struttura in acciaio a controventi concentrici

Questa struttura non è duttile. Una *Struttura a controventi concentrici* soggetta a azioni cicliche orizzontale, presenta spostamenti modesti, in quanto reagisce tramite un regime di sforzi prevalenti di trazioni e compressioni nelle aste. Escludendo problemi di instabilità delle aste compresse, quindi collasso già in fase elastica, le sezioni che possono creare deformazione plastica sono quelle delle aste tese, quindi una duttilità limitata in quanto l'asta tesa accumula deformazioni, arrivando presto a rottura. Risultato: struttura fragile

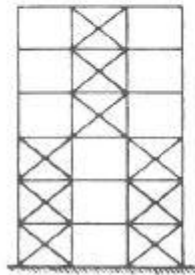


Fig. 5

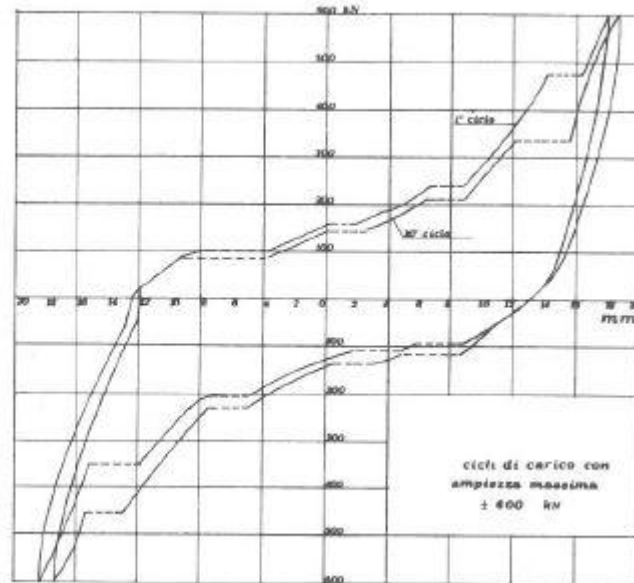
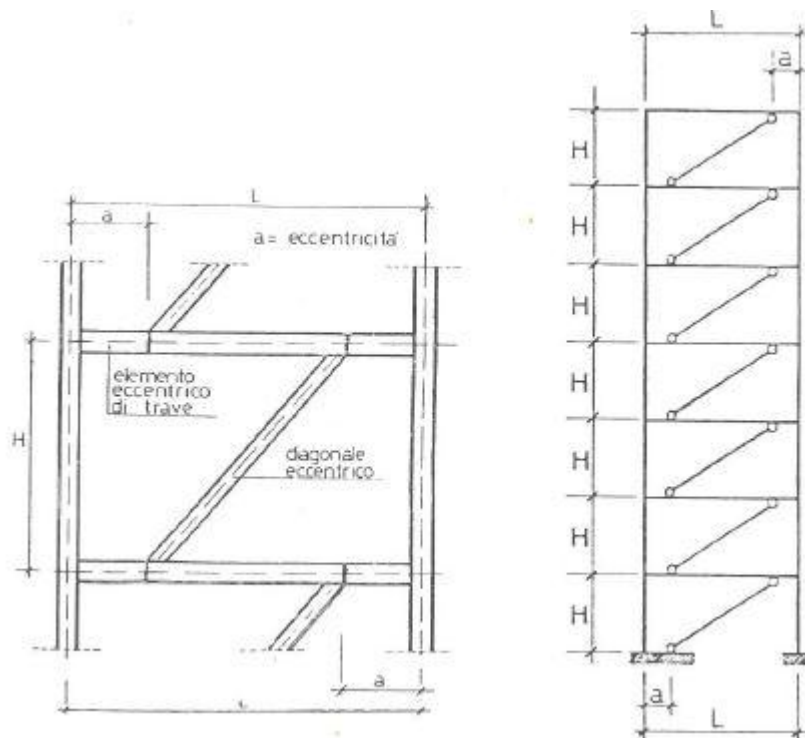


Fig. 6, da [4]

Struttura a controventi concentrici soggetta a azioni cicliche orizzontali: ciclo di isteresi complessivo della struttura

La stessa struttura con controventi eccentrici, al contrario, è duttile. Le sezioni critiche, in questo caso, sono quelle dei conchi deputati alla plasticizzazione, e le sezioni sono presso-inflesse: la struttura attinge quindi gli spostamenti tipici di un telaio e realizza molti cicli di isteresi stabili. Risultato: struttura duttile.



Struttura con controventi eccentrici

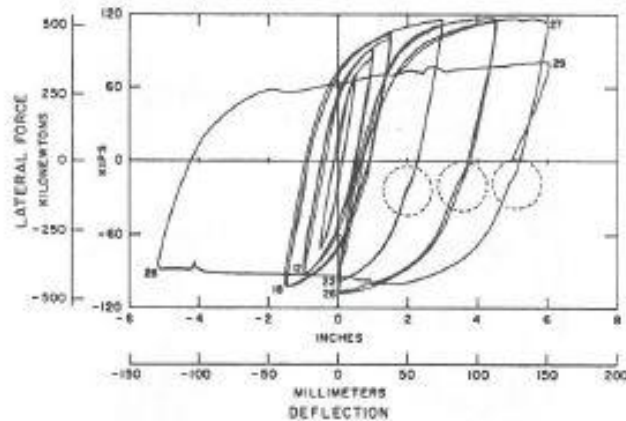


Fig. 24, da [7]

Ciclo di isteresi della stessa struttura con controventi eccentrici

Dall'esame dei diagrammi carichi-spostamenti (fig. 24) si osserva l'ottima duttilità del sistema e la notevole stabilità isteretica che ad esempio per un campione ha subito una prima apprezzabile riduzione a seguito dello strappo dell'anima di una trave solo al 27° ciclo.

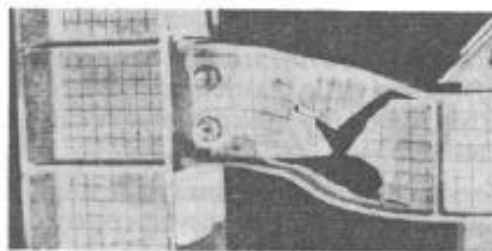


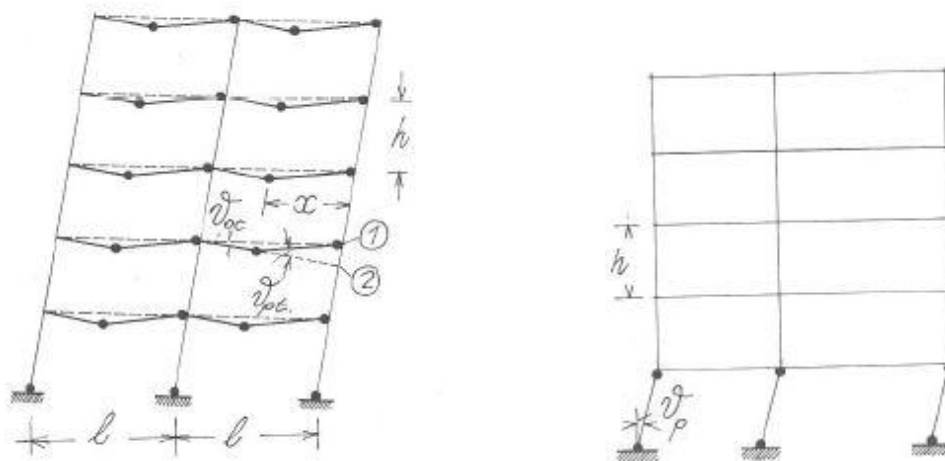
Fig. 25, da [7]

Va notato comunque che il sistema ha mantenuto in seguito elevate capacità resistenti ed anche a fine della prova quando due su cinque tratti di anima plasticizzati si erano strappati (fig. 26).

Duttilità e regolarità strutturale

La duttilità strutturale, per raggiungere il massimo livello, richiede che il maggior numero possibile di sezioni "utili" si plasticizzino. Sono da evitare quindi:

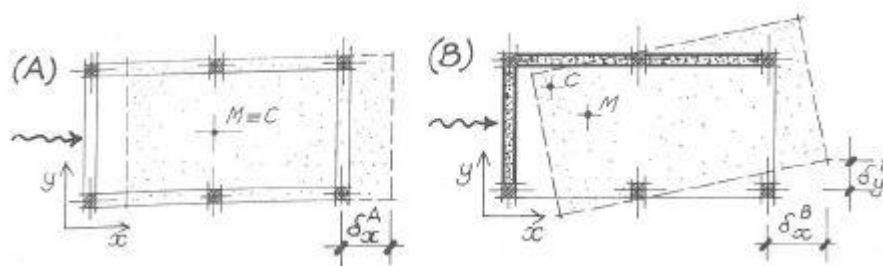
- Conformazioni strutturali che creano collassi localizzati, ad es il cosiddetto "piano debole", che impegna a collasso solo i pilastri di un determinato piano;
- Comportamento complessivo inidoneo delle strutture, ad esempio modi di vibrare torsionali, che impegnano a collasso solo i pilastri perimetrali dell'edificio.



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.

Quindi, la “duttilità strutturale”, per esplicarsi al massimo, richiede come elemento essenziale la “regolarità strutturale”, sia in pianta che in elevazione.

Ad esempio, un edificio che presenta il primo modo di vibrare “torsionale” è un edificio a vulnerabilità intrinseca più elevata, come anche l’edificio che presenta un piano debole.



Caso “A”: Regolare (ottimale); Caso “B”: Irregolare in pianta (da evitare).

Gli edifici irregolari, nelle normative, vengono giustamente penalizzati. A esempio, se si utilizza il metodo del fattore di struttura, per un edificio irregolare in pianta il fattore presenta valori molto bassi (1,5 - 2,0 max); altri metodi ulteriormente semplificativi (es. analisi statica equivalente) addirittura non sono consentiti per edifici non regolari.

L'influenza della duttilità strutturale nella mensola reale

Tornando la caso più semplice della mensola, la duttilità strutturale è definita come:

$$\delta = x_u / x_{el}$$

Ovviamente lo spostamento in sommità massimo x_u dipende solo dalla capacità di rotazione massima della sezione di base, e quindi dalla sua curvatura limite χ_u (il cui calcolo è ben noto).

Si definisce “duttilità in curvatura” il rapporto fra la curvatura ultima e la curvatura elastica:

$$\mu = \chi_u / \chi_{el}$$

Nel caso della mensola, quindi, più alta è la duttilità in curvatura della sezione di base e più alta è la duttilità strutturale. In tutti gli altri casi la cosa, invece, è tutta da verificare e dimostrare.

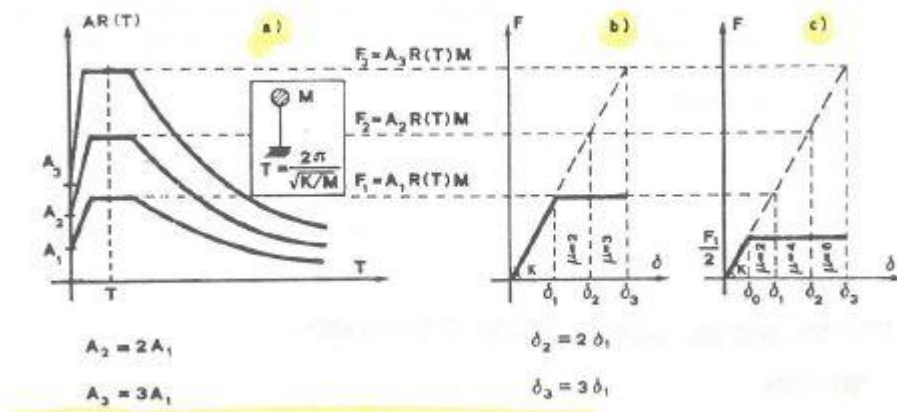
In questo caso l'oscillatore elasto-plastico fornisce ulteriori informazioni determinanti per la progettazione strutturale, proprio perché spiega il ruolo della duttilità nella resistenza sismica.

Vi è la seguente osservazione sperimentale e numerica, che è il fondamento del metodo del fattore di struttura:

“ Dato un oscillatore di massa m , rigidezza k , smorzamento c , a comportamento indefinitamente elastico, soggetto ad azione sismica, esso raggiunge lo spostamento (elastico) x_u e la forza (elastica) massima F_u . Se lo stesso oscillatore viene pensato elasto-plastico (ma con la stessa rigidezza elastica), quindi con forza massima di snervamento $F_{el} < F_u$, e corrispondente spostamento elastico $x_{el} < x_u$, esso, soggetto alla stessa azione sismica, raggiunge lo stesso spostamento massimo dell'oscillatore elastico x_u .”

Tenendo presente che la resistenza delle sezioni e la duttilità le decide il progettista, questa osservazione chiarisce che è possibile progettare strutture meno resistenti in campo elastico ma con capacità duttili (cicliche) maggiori, cioè maggiore capacità di spostamento.

In pratica: se abbasso al 50% le forze elastiche devo avere una duttilità in spostamento pari a 2; se riduco le resistenze elastiche a 1/3 mi occorre una duttilità pari a 3.



Si può quindi abbassare il livello dello spettro elastico di una quantità “q” pari alla duttilità “μ” disponibile.

NB: Le sezioni critiche, con spettro ridotto, andrebbero tutte progettate al limite di elasticità, in quanto la duttilità è stata utilizzata per abbassare lo spettro. Tuttavia oggi le NTC (Eurocodice) propongono di progettare le sezioni a rottura anche con spettro ridotto, in contrasto con il metodo originario.

Questa è la base concettuale del metodo del fattore di struttura, descritto nel seguito.

L'influenza dello smorzamento

Non si può in questo paragrafo riprendere tutta la trattazione teorica dell'oscillatore smorzato. Ci si limita quindi solo a conclusioni di valenza pratica.

In sintesi, possiamo dire che le strutture presentano diversi tipi di smorzamento che però non sono sempre trattabili separatamente in modo agevole.

Per valori di sisma bassi (SLE), la distinzione non è essenziale, per cui si raggruppano tutte le forme di smorzamento in modo forfetario, attribuendo agli spettri un indice convenzionale del 5% (vicino al vero per i telai in CA, meno alle strutture metalliche e alle murature)

Per i valori più alti di azione (SLV, SLC), lo smorzamento diventa essenziale nel comportamento strutturale impegnando le sezioni critiche con cicli di isteresi che risultano dissipativi e quindi smorzanti.

Smorzamento isteretico

È lo smorzamento dovuto ai cicli di isteresi dei materiali. Questo tipo di smorzamento, nelle analisi SLV o SLC può essere trattato in via semplificata tramite:

- L'utilizzo del fattore di struttura;
- Un' opportuna modifica dello smorzamento degli spettri (che è equivalente)
- Le analisi non lineari pseudostatiche (tipo pushover)
- La strada dell'integrazione delle equazioni del moto (time history): praticabile su strutture reali tramite il metodo delle cerniere plastiche e a condizione che le strutture non siano molto grandi.

In base a recenti formulazioni risulta anche possibile equiparare lo smorzamento isteretico ad un indice di smorzamento viscoso equivalente, ma tale assunzione è molto delicata.

Il danneggiamento delle sezioni, tuttavia, non è strettamente indispensabile se si inseriscono nella struttura appositi dispositivi che, per l'appunto, creano smorzamento aggiuntivo, tramite i cosiddetti "dissipatori", che in commercio si trovano per l'appunto sia di tipo isteretico che viscoso.

I Risultati dell'oscillatore e i metodi pratici di progettazione sismica

L'ingegneria sismica, purtroppo, richiede necessariamente la trattazione unitaria di tutti i problemi: dinamica, spostamenti non più "piccoli", non linearità meccanica (ed escludere l'instabilità dell'equilibrio). L'inserimento di tali problematiche, così come sono, nei problemi dinamici (indispensabile nella progettazione sismica) è ancora oggi praticamente inaffrontabile. Occorrono semplificazioni.

Gran parte della ricerca dell'ingegneria sismica, quindi, negli ultimi decenni è stata rivolta alla definizione di metodi semplificati in grado di linearizzare problemi dinamici tipicamente non lineari. In ogni caso, con tutte le approssimazioni necessarie e di cui si è accennato, l'analisi sismica delle strutture è divenuto oggi appannaggio pratico degli strutturisti (anche se solo da qualche decennio), in virtù anche della larga diffusione di programmi di calcolo a elementi finiti a prezzi contenuti, e contestuale abbassamento dei prezzi dei personal computer. Ma, nonostante gli elaboratori, la materia è e resta piuttosto delicata da trattare.

Il metodo del “Fattore di Struttura”

Uno dei metodi semplificati più usati, e quasi sempre cautelativi, è il cosiddetto metodo del fattore di struttura, di cui si è parlato, oggi largamente usato nella pratica progettuale, inquadrabile fra le cosiddette “verifiche lineari” e “in termini di forze”, anche se in realtà questo è convenzionale e parzialmente falso (e lo vedremo dopo).

Questo metodo è stato il primo metodo pratico di progettazione inserito nelle normative. Esso è basato su assunzioni di ipotesi tutt’altro che banali, soggette ad alcune limitazioni, che spesso si tende a dimenticare.

Si danno per scontati, infatti, i seguenti elementi:

- La duttilità delle sezioni critiche e la loro stabilità ai cicli di carico;
- La corretta distribuzione della plasticità nella struttura all’aumentare dell’azione;
- L’assenza di rotture anticipate delle cerniere e /o collassi parziali prematuri;
- che la struttura non sia troppo rigida, cioè presenti periodi non troppo corti - il limite è circa 0,3-0,4 secondi), e neppure sia troppo deformabile, in quanto il fattore di struttura, legato al fabbisogno di duttilità, non è una costante, ma varia con il periodo.

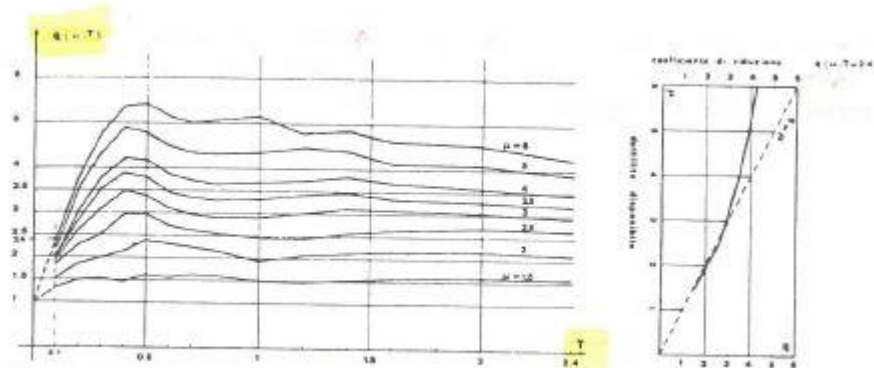


Fig. 7. Valori del coefficiente di riduzione ottenuti mediante l'analisi dinamica non lineare.

Il metodo ha il pregio di essere abbastanza semplice e quasi sempre cautelativo, ma richiede l’adozione di un fattore di struttura attendibile, che deve interpretare un po’ tutto il comportamento. E occorre giustificarlo.

Ovviamente si nota subito che di dinamica, in questo metodo, non resta molto.

L'analisi Statica equivalente con Spettro di risposta e fattore di struttura

Si tratta del metodo più semplice disponibile; tuttavia per essere utilizzabile la struttura deve essere estremamente regolare e ben progettata, quindi avere un primo modo fondamentale (ovviamente traslazionale) preponderante su tutti gli altri, tale da poter trascurare l'effetto dei restanti modi. Quindi occorre che:

- La struttura sia regolare in pianta e in alzata;
- La struttura non presenti periodo proprio fondamentale troppo piccolo o troppo grande;
- Gli impalcati ripartano correttamente le azioni.

Per gli edifici esistenti, la Circolare prevede anche due sottometodi ulteriori:

- L'utilizzo dello spettro elastico e il controllo dei rapporti ρ , il quale però prevede implicitamente duttilità in curvatura estremamente alti (di dubbia attendibilità nella pratica);
- L'utilizzo del fattore di struttura, differenziandolo fra meccanismi duttili (q da 1,5 a 3) e fragili ($q=1,5$)

Ribadendo che il fattore di struttura deve essere sempre verificato e giustificato dal progettista, tali metodi non paiono cautelativi per l'indicazione di utilizzare fattori di struttura molto alti. Peraltro sono nella Circolare e non nella NTC.

Il metodo della verifica Pushover

Un altro metodo semplificato è la verifica cosiddetta verifica "pushover", inquadrabile tra le cosiddette "non lineari" e "in spostamento" (anche se in realtà non si può prescindere dalle resistenze delle sezioni). Esso è utilizzato per più scopi:

- Come metodo di verifica
- Come metodo di progetto
- Come metodo di verifica del reale fattore di struttura
- Come metodo di valutazione della bontà della progettazione, in quanto consente di verificare come e in che modo si sviluppa la plasticità all'interno della struttura, all'aumentare del livello delle azioni orizzontali. E questo, probabilmente, è il più importante.

Tralasciamo le modalità con cui viene condotta, che sono noti, per andare a concetti più di ingegneristici.

Prima di tutto preme segnalare che, attualmente, è l'unica analisi non lineare che può essere condotta su una struttura senza l'utilizzo di codici di calcolo troppo costosi.

Essendo "non lineare" c'è sempre il problema di verificare l'errore nei risultati ma, essendo pseudo-statica, la comprensione dei risultati è abbastanza agevole.

Ha quindi il pregio di essere relativamente semplice, in quanto il problema dinamico viene ridotto ad un problema statico, e anche quello di dare indicazioni sullo sviluppo della plasticità nella struttura (quindi è utile anche per verificare il fattore di struttura adottato). Ha il difetto di essere un po' semplicistica, e quindi criticata da diversi autori. Attualmente è ancora in corso di "adattamento" in ambito scientifico.

Le norme la indicano come metodo di riferimento per le strutture esistenti e soprattutto per le strutture miste, dove, più di ogni altra cosa, è fondamentale cogliere l'interazione fra strutture di tipologie diverse.

Il metodo dell'analisi lineare con accelerogrammi

Esiste la possibilità, da lacuni anni, di utilizzare direttamente gli accelerogrammi reali per studiare il comportamento strutturale.

Tale possibilità, tuttavia, risulta abbastanza percorribile se la struttura ha comportamento “non dissipativo”, cioè se non occorre mettere in conto la non linearità meccanica e i relativi cicli di isteresi dei materiali. In caso contrario, soprattutto se gli elementi da modellare sono tanti, gli oneri di elaborazione diventano estremamente pesanti.

Il metodo ha il vantaggio di trattare il segnale sismico nella sua reale complessità, quindi cogliendo a pieno anche l'apporto energetico, cosa che con i metodi approssimati descritti in precedenza non può essere fatto, se non in via indiretta e approssimata.

Bisogna anche tenere presente che, integrando al passo gli accelerogrammi, occorre scegliere accuratamente quali usare e quanti usarne, ma soprattutto che, per ciascuno, la risposta della struttura è in funzione del tempo. Pertanto, a fine analisi, la ricerca dei massimi per ogni sezione non è cosa agevole...