

Considerazioni sulle caratteristiche dinamiche delle strutture in relazione alla vulnerabilità sismica

Giovanni Bongiovanni

Considerazioni sulle caratteristiche dinamiche delle strutture in relazione alla vulnerabilità sismica

Struttura

<http://www.treccani.it/vocabolario/struttura/>

struttura s. f. [dal lat. structura, der. di struĕre «costruire, ammassare», part. pass. structus]. – In senso ampio, la costituzione e la distribuzione degli elementi che, in rapporto di correlazione e d'interdipendenza funzionale, formano un complesso organico o una sua parte; il complesso stesso, o un suo componente, inteso come entità funzionalmente unitaria risultante dalle relazioni reciproche dei suoi elementi costitutivi.

Considerazioni sulle caratteristiche dinamiche delle strutture in relazione alla vulnerabilità sismica



Considerazioni sulle caratteristiche dinamiche delle strutture in relazione alla vulnerabilità sismica

Dinamica

<http://www.treccani.it/vocabolario/dinamica/>

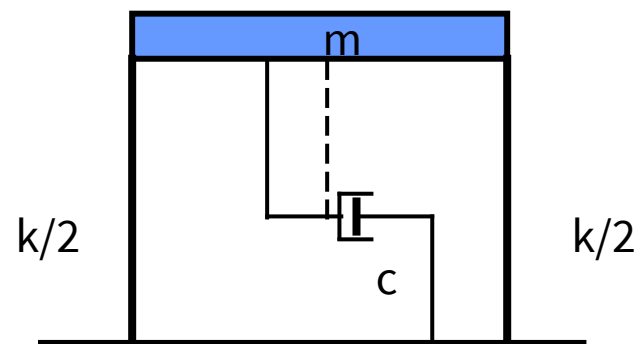
dinàmica s. f. [dall'agg. dinamico]. – 1. Parte della meccanica che studia i movimenti di un sistema in relazione alle cause che li determinano: d. del punto, d. dei sistemi, d. dei solidi, d. dei fluidi o fluidodinamica. Equazione (o legge) fondamentale della d., legge secondo la quale il moto di un punto materiale, cui sia applicata una forza, è tale che il prodotto della massa del punto materiale per l'accelerazione che esso acquista è uguale alla forza ad esso applicata ($\text{forza} = \text{massa} \times \text{accelerazione}$).

CARATTERISTICHE DINAMICHE SISTEMI A 1 GRADO DI LIBERTÀ (SDOF)

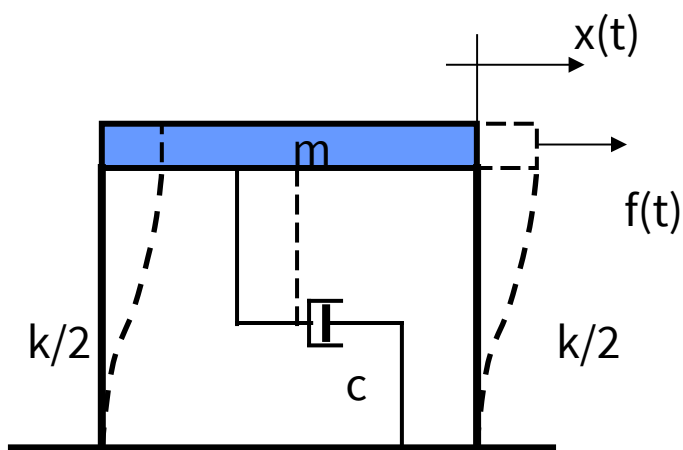
La generica configurazione è individuata da un solo parametro. Lo studio dei sistemi SDOF consente di fissare i concetti essenziali della dinamica delle strutture.

Consideriamo il portale in figura. Assumiamo che:

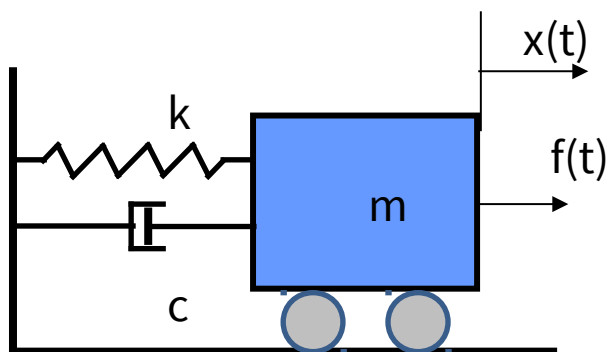
- La massa è concentrata nella trave, i pilastri hanno massa nulla (trascurabile);
- I pilastri sono deformabili flessionalmente ma infinitamente rigidi assialmente;
- La trave è infinitamente rigida, sia a flessione che assialmente;
- Lo smorzatore c assicura che le oscillazioni non proseguono all'infinito, come l'esperienza insegna;
- Il suolo è rigido. I pilastri sono incastrati al suolo.



Considerazioni sulle caratteristiche dinamiche delle strutture in relazione alla vulnerabilità sismica



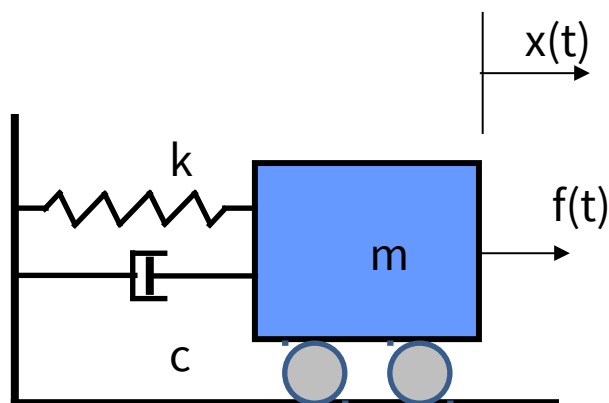
La posizione del sistema è individuata da un solo parametro: lo spostamento orizzontale $x(t)$



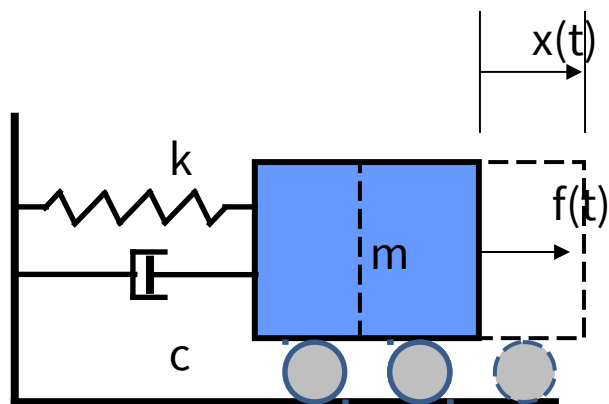
Il modello in esame è del tutto equivalente al sistema
“massa – molla – smorzatore”

Considerazioni sulle caratteristiche dinamiche delle strutture in relazione alla vulnerabilità sismica

SDOF: IL MOTO



Consideriamo il modello SDOF soggetto ad una forza esterna $f(t)$, ossia una forza che varia col tempo t .

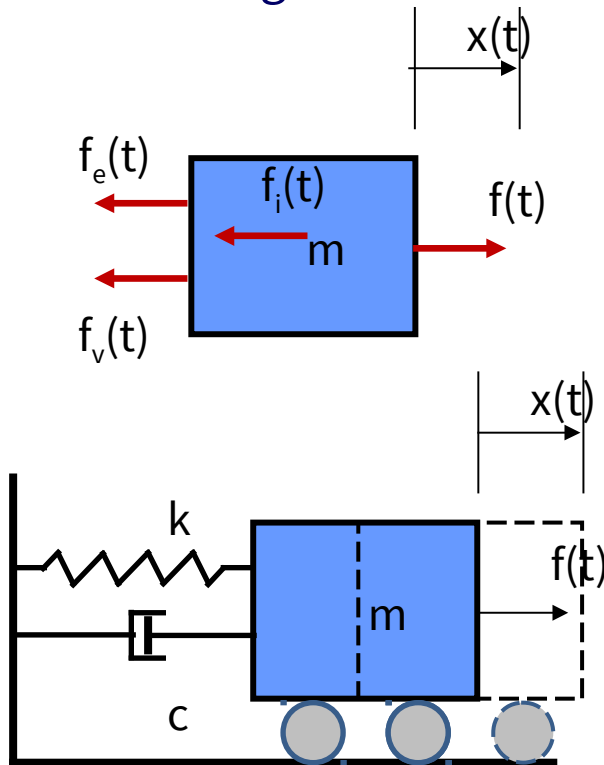


Sotto l'azione di tale forza la massa subisce uno spostamento $x(t)$, funzione del tempo, pari alla deformazione della molla.

Considerazioni sulle caratteristiche dinamiche delle strutture in relazione alla vulnerabilità sismica

SDOF: EQUAZIONE GENERALE

Le forze agenti sulla massa al generico istante t sono:



Forza elastica

$$f_e(t) = -k \cdot x$$

$$f_i(t) + f_v(t) + f_e(t) + f(t) = 0$$

Forza viscosa

$$f_v(t) = -c \cdot \dot{x}$$

$$m \cdot \ddot{x} + c \cdot \dot{x} + k \cdot x = f(t)$$

Forza d'inerzia

$$f_i(t) = -m \cdot \ddot{x}$$

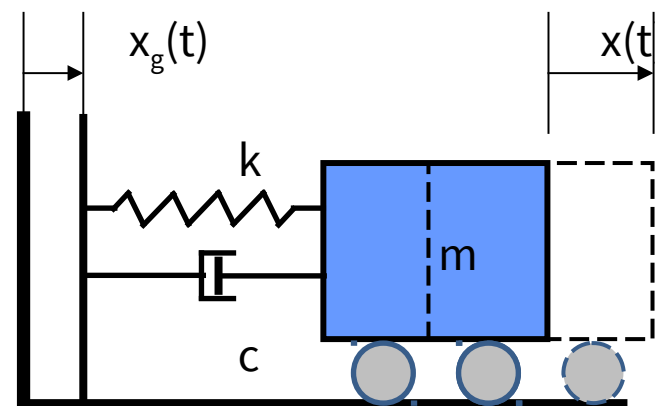
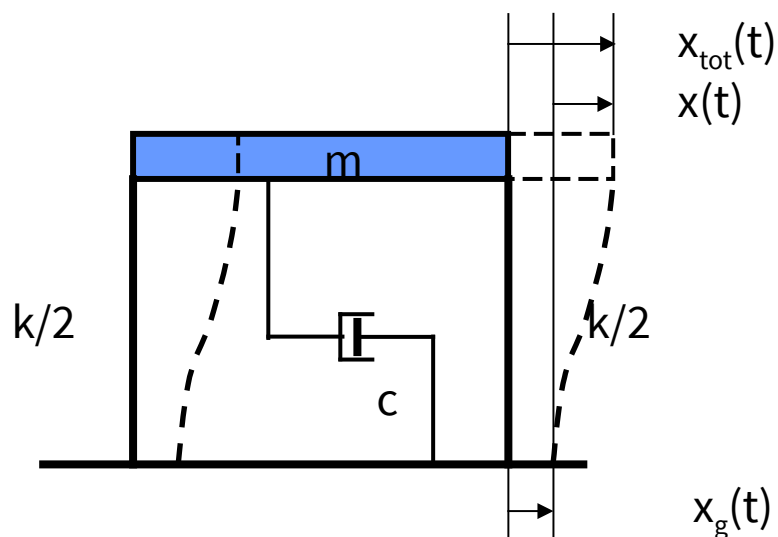
Forza applicata

$$f(t)$$

Considerazioni sulle caratteristiche dinamiche delle strutture in relazione alla vulnerabilità sismica

SDOF: AZIONE SISMICA

Il portale in figura non è soggetto a forze applicate ma al moto sismico orizzontale alla base, con spostamento x_g .



Anche questo sistema può essere schematizzato come
sistema “massa – molla – smorzatore”

SDOF: AZIONE SISMICA

La massa è soggetta alle forze:

Forza elastica

$$f_e(t) = -k \cdot x$$

funzione dello spostamento relativo

Forza viscosa

$$f_v(t) = -c \cdot \dot{x}$$

funzione della velocità relativa

Forza d'inerzia

$$f_i(t) = -m \cdot (\ddot{x} + \ddot{x}_g)$$

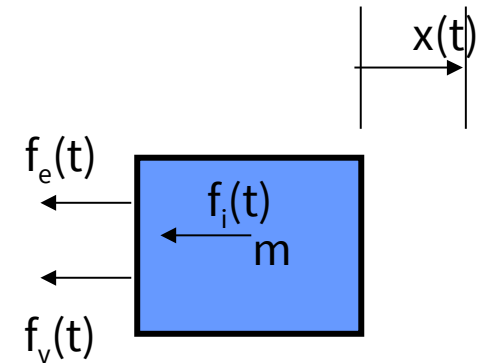
funzione della accelerazione assoluta

$$f_i(t) + f_v(t) + f_e(t) = 0 \quad m \cdot (\ddot{x} + \ddot{x}_g(t)) + c \cdot \dot{x} + k \cdot x = 0$$

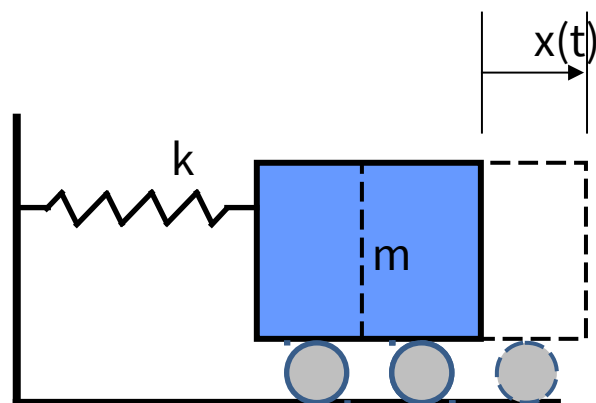
$$m \cdot \ddot{x} + c \cdot \dot{x} + k \cdot x = -m \cdot \ddot{x}_g(t)$$

L'effetto del moto al suolo equivale a una forza

$$-m \cdot \ddot{x}_g(t)$$



Considerazioni sulle caratteristiche dinamiche delle strutture in relazione alla vulnerabilità sismica



SDOF: $c=0$, $f=0$

Equazione del moto: $m\ddot{x} + kx = 0$

Istante per istante sono in equilibrio forza d'inerzia e forza elastica.

Dividendo per m :

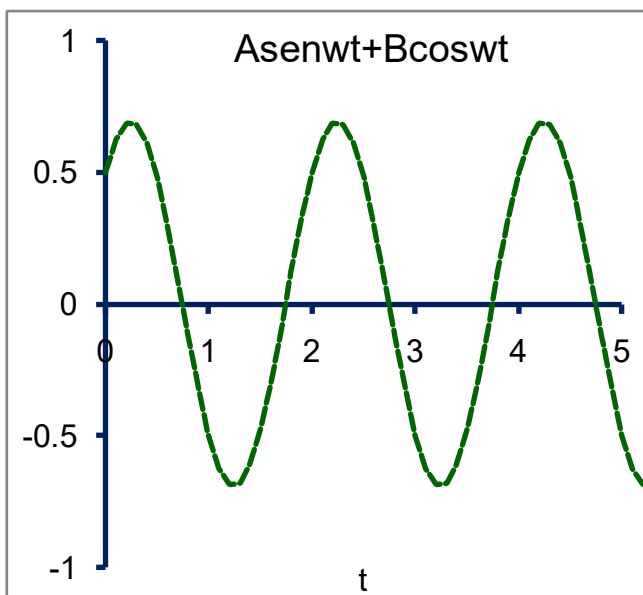
$$\ddot{x} + \frac{k}{m}x = 0$$

Si pone $\omega = \sqrt{k/m}$

L'equazione diventa: $\ddot{x} + \omega^2 x = 0$

La soluzione è del tipo: $x(t) = A \sin \omega t + B \cos \omega t$

È un'oscillazione armonica di pulsazione ω : il sistema oscilla indefinitamente intorno alla posizione di riposo. Le costanti A e B dipendono dallo stato del sistema a $t = 0$, ossia dalle condizioni iniziali



SDOF: $c=0$, $f=0$ – PERIODO NATURALE

$$x(t) = \frac{\dot{x}_0}{\omega} \sin \omega t + x_0 \cos \omega t$$

Pulsazione naturale

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}}$$

Periodo naturale di vibrazione T = tempo impiegato per un ciclo di vibrazione libera

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}}$$

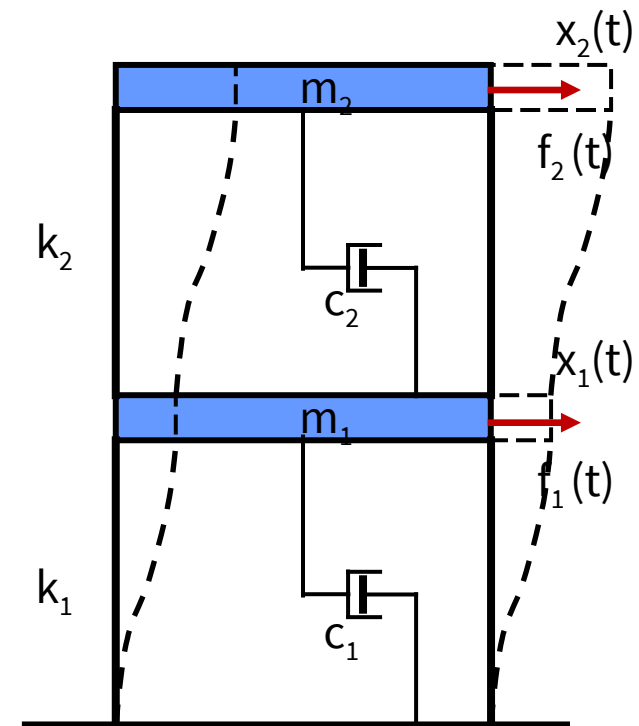
Frequenza naturale

$$f = \frac{1}{T} = \frac{\omega}{2\pi}$$

Il termine naturale è legato al fatto che il sistema oscilla liberamente

ω , T e f dipendono solo dalla massa e dalla rigidezza e sono caratteristiche del sistema. Il periodo T cresce con la massa e diminuisce al crescere della rigidezza

SISTEMI A PIÙ GRADI DI LIBERTÀ (MDOF)



2DOF: SISTEMA DI EQUAZIONI DI EQUILIBRIO

Le equazioni:

$$m_1 \ddot{x}_1(t) + (c_1 + c_2) \dot{x}_1(t) - c_2 \dot{x}_2(t) + (k_1 + k_2) x_1(t) - k_2 x_2(t) = -m_1 \ddot{x}_g(t)$$

$$m_2 \ddot{x}_2(t) - c_2 \dot{x}_1(t) + c_2 \dot{x}_2(t) - k_2 x_1(t) + k_2 x_2(t) = -m_2 \ddot{x}_g(t)$$

con le posizioni:

Matrice masse	$[M] = \begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{bmatrix}$	$\{\ddot{x}\} = \begin{Bmatrix} \ddot{x}_1 \\ \ddot{x}_2 \end{Bmatrix}$	Vettore accelerazioni
Matrice smorzamenti	$[C] = \begin{bmatrix} c_1 + c_2 & -c_2 \\ -c_2 & c_2 \end{bmatrix}$	$\{\dot{x}\} = \begin{Bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{Bmatrix}$	Vettore velocità
Matrice rigidezze	$[K] = \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 \\ -k_2 & k_2 \end{bmatrix}$	$\{x\} = \begin{Bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{Bmatrix}$	Vettore spostamenti

si scrivono:

$$[M]\{\ddot{x}\} + [C]\{\dot{x}\} + [K]\{x\} = -[M]\{I\}\ddot{x}_g \quad \{I\} = \begin{Bmatrix} 1 \\ 1 \end{Bmatrix}$$

Considerazioni sulle caratteristiche dinamiche delle strutture in relazione alla vulnerabilità sismica

2DOF: $[C] = [0]$, $\{F\} = \{0\}$

Le oscillazioni libere in assenza di smorzamento sono governate dalle equazioni:

$$m_1 \ddot{x}_1(t) + (k_1 + k_2)x_1(t) - k_2 x_2(t) = 0$$

$$m_2 \ddot{x}_2(t) - k_2 x_1(t) + k_2 x_2(t) = 0$$

Le soluzioni sono del tipo:

$$x_1 = \psi_1 \sin(\omega t + \varphi) \quad x_2 = \psi_2 \sin(\omega t + \varphi)$$

Nelle espressioni delle soluzioni sono incognite le ampiezze ψ_1 e ψ_2 , ma anche la pulsazione ω e la fase φ .

Sostituendo si ottiene il sistema di equazioni lineare omogeneo:

$$[-\omega^2 m_1 + (k_1 + k_2)]\psi_1 - k_2 \psi_2 = 0$$

$$-k_2 \psi_1 + (-\omega^2 m_2 + k_2)\psi_2 = 0$$

che ammette, ovviamente, la soluzione banale:

$$\psi_1 = \psi_2 = 0$$

2DOF: PULSAZIONI

Il sistema ammette soluzioni diverse da quella banale solo se il determinante dei coefficienti è nullo:

$$\det \begin{bmatrix} -\omega^2 m_1 + k_1 + k_2 & -k_2 \\ -k_2 & -\omega^2 m_2 + k_2 \end{bmatrix} =$$
$$\det \left[-\omega^2 \begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 \\ -k_2 & k_2 \end{bmatrix} \right] = 0$$

$$(-\omega^2 m_1 + k_1 + k_2)(-\omega^2 m_2 + k_2) - k_2^2 = 0$$

$$m_1 m_2 (\omega^2)^2 - k_2 m_1 \omega^2 - k_1 m_2 \omega^2 + k_1 k_2 - k_2 m_2 \omega^2 + k_2^2 - k_2^2 = 0$$

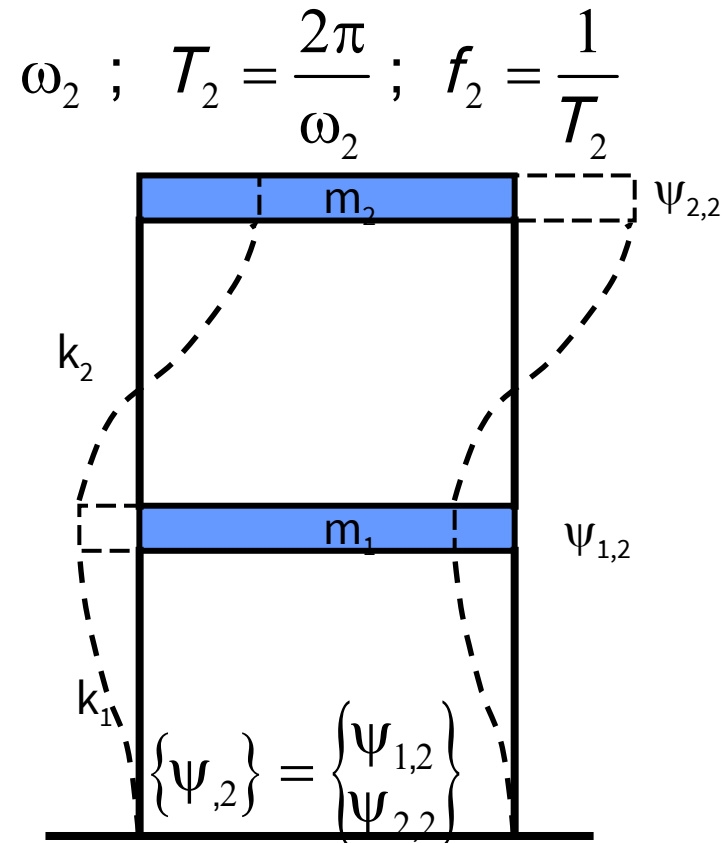
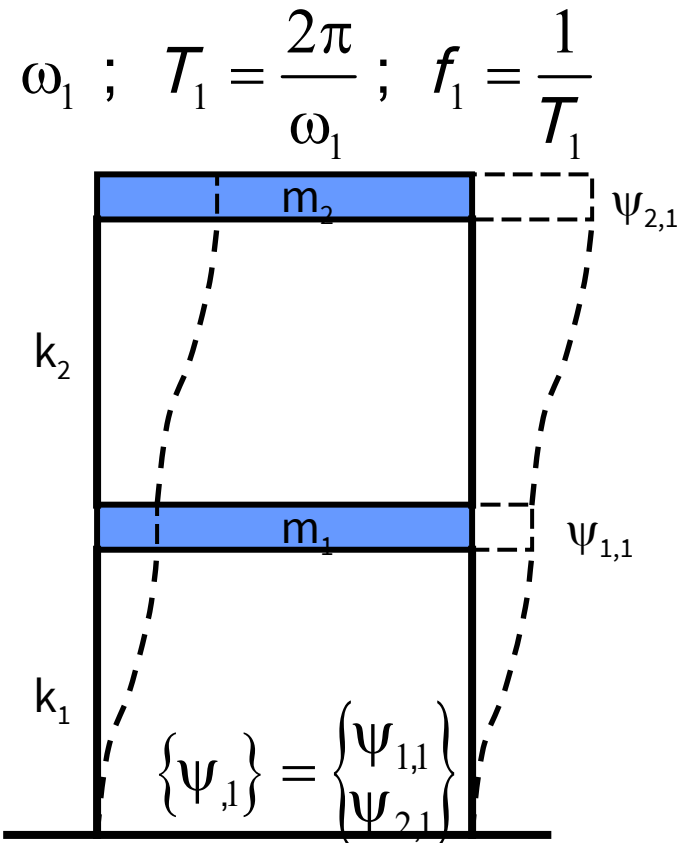
da cui l'equazione di secondo grado:

$$m_1 m_2 (\omega^2)^2 - (m_1 k_2 + k_1 m_2 + k_2 m_2) \omega^2 + k_1 k_2 = 0$$

che ammette 2 soluzioni: $\omega_1^2 < \omega_2^2$ $\omega_1 = \sqrt{\omega_1^2} < \omega_2 = \sqrt{\omega_2^2}$

Considerazioni sulle caratteristiche dinamiche delle strutture in relazione alla vulnerabilità sismica

2DOF: MODI DI VIBRAZIONE



Le oscillazioni libere del sistema sono la sovrapposizione dei 2 modi di vibrazione: la deformata dinamica è una combinazione lineare delle deformate modali

MODELLAZIONE DINAMICA

Il **modello** deve essere in grado di rappresentare tutti gli aspetti del comportamento che possono influenzare significativamente la risposta dinamica della struttura.

Pertanto il modello deve rappresentare il più fedelmente possibile la struttura reale in termini di **massa, rigidità e smorzamento**.

La schematizzazione di una struttura continua in un modello ad un numero finito di gradi di libertà è un processo alquanto delicato.

Il primo passo è l'individuazione dello **schema elastico**. Questo è un passo molto delicato: un errore nella modellazione elastica determina errori anche nelle conseguenti forze d'inerzia sulle masse. Perciò lo schema elastico deve essere molto accurato.

Le strutture reali hanno sempre masse diffuse, dovute ai pesi strutturali, ai carichi permanenti e ai carichi variabili. Il passaggio a un sistema di masse concentrate deve tener conto della partecipazione di tali masse al moto e dipende dall'analisi da sviluppare.

MODELLO DELLA STRUTTURA

Deve:

- essere **tridimensionale**
- rappresentare in modo adeguato le **effettive distribuzioni spaziali di massa, rigidezza e resistenza**,
- porre particolare attenzione alle situazioni nelle quali componenti orizzontali dell'azione sismica possono produrre **forze d'inerzia verticali** (travi di grande luce, sbalzi significativi, etc.).

Elementi strutturali considerati “secondari” e gli elementi non strutturali autoportanti (tamponature e tramezzi):

possono essere rappresentati unicamente in termini di massa, considerando il loro contributo alla rigidezza e alla resistenza del sistema strutturale solo qualora essi possiedano rigidezza e resistenza tali da modificare significativamente il comportamento del modello.

MODELLAZIONE

Caratteristiche che determina il comportamento di una struttura in presenza di azioni dinamiche:

Massa dei vari componenti strutturali e non

Rigidezza degli elementi strutturali

Dissipazione energetica, legata agli elementi strutturali e non

Il processo di modellazione deve prevedere:

Modellazione delle **azioni**

Modellazione **cinematica**

Modellazione delle **masse**

Modellazione delle **rigidezze**

Modellazione dello **smorzamento**

PROGETTO

Un progetto si basa su:

- Scelta della **azione sismica di progetto** in relazione alla zonazione sismica ed alle categorie di suolo di fondazione
- Adozione di un **modello meccanico** della struttura in grado di descrivere con accuratezza la risposta sotto azione dinamica
- Scelta di un **metodo di analisi** adeguato alle caratteristiche della struttura
- Esecuzione con esito positivo delle **verifiche di resistenza** e di **compatibilità degli spostamenti**
- Adozione di tutte le **regole di dettaglio** volte ad assicurare caratteristiche di duttilità agli elementi strutturali ed alla costruzione suo insieme

COMPORTAMENTO DISSIPATIVO

a) comportamento strutturale non-dissipativo: SLE

gli effetti combinati delle azioni sismiche e delle altre azioni sono calcolati **senza tener conto delle non linearità di comportamento** (di materiale e geometriche) se non rilevanti

b) comportamento strutturale dissipativo: SLU

gli effetti combinati delle azioni sismiche e delle altre azioni sono calcolati, in funzione della tipologia strutturale adottata, **tenendo conto delle non linearità di comportamento** (di materiale sempre, geometriche quando rilevanti e comunque sempre quando precisato).

Fondazioni

devono essere dimensionate sulla base delle **sollecitazioni ad esse trasmesse dalla struttura sovrastante**,
devono avere **comportamento non dissipativo**, indipendentemente dal comportamento strutturale attribuito alla struttura su di esse gravante.

Appare ragionevole affermare che le strutture “ingegnerizzate” possiedono le caratteristiche dinamiche frequenze proprie e forme modali “per definizione”, essendo progettate e realizzate sulla base di quanto detto. Questo è, in linea generale, vero anche per le strutture progettate e realizzate secondo norme tecniche oggi superate. Ciò è vero per la definizione di struttura “... la costituzione e la distribuzione degli elementi che, in rapporto di correlazione e d’interdipendenza funzionale, formano un complesso organico o una sua parte.”

Possiamo allora aspettarci che qualsiasi manufatto che presenti le caratteristiche suddette sia caratterizzato da frequenze proprie e relative forme modali.

Se queste caratteristiche non sono presenti possiamo aspettarci che ci siano delle parti che le possiedono, e individuare nelle zone di carenza di “organicità” la sede di potenziali vulnerabilità. Il rilievo della geometria e degli elementi costituenti il complesso è una delle basi per individuare le potenziali vulnerabilità.

Generalmente possiamo stimare a priori un comportamento dinamico globale unitario per le strutture ingegnerizzate, mentre per le altre possiamo fare riferimento alle conoscenze relative ai danni effettivamente subiti per effetto di eventi sismici.

Nel seguito si fa riferimento a:

Linee Guida per la Riparazione e il Rafforzamento di elementi strutturali, Tamponature e Partizioni, a cura di **Mauro Dolce e Gaetano Manfredi DPC-Reluis**

Considerazioni sulle caratteristiche dinamiche delle strutture in relazione alla vulnerabilità sismica



(a)



(b)

Figura 1. Nodo danneggiato dal sisma: a) lesione pseudo-orizzontale all'attacco pilastro-pannello; b) lesione diagonale nel pannello (by O.S. Bursi, T. Dusatti, R. Pucinotti)

La vulnerabilità non è ipotizzabile a priori, è stimabile mediante modellazione della struttura.

Considerazioni sulle caratteristiche dinamiche delle strutture in relazione alla vulnerabilità sismica



(a)



(b)

Figura 13. Danni alle tamponature: a) Ribaltamento fuori dal piano; b) Crolli parziali della tamponatura e distacchi della fodera esterna (by M. Di Ludovico, G.P. Lignola)

Il danneggiamento delle tamponature non è definibile come vulnerabilità strutturale ma deve essere limitato quanto a conseguenze.

Considerazioni sulle caratteristiche dinamiche delle strutture in relazione alla vulnerabilità sismica

1

RIBALTAMENTO SEMPLICE DI PARETE

Il meccanismo si manifesta attraverso la rotazione rigida di intere facciate o porzioni di pareti rispetto ad assi in prevalenza orizzontali alla base di esse e che percorrono la struttura muraria sollecitata da azioni fuori dal piano.

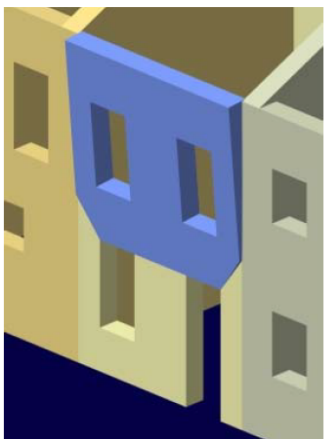
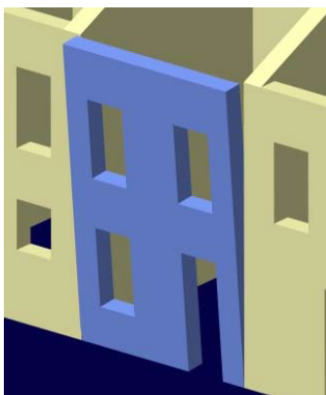


Foto: Arch. Fot. Vice Comm. Del.
Beni Culturali - Sisma Abruzzo 2009

Foto da: MEDEA - Papa e Zuccaro, 2001



Condizioni di vincolo della parete interessata dal meccanismo:

- Assenza di vincolo in sommità;
- Assenza di collegamento alle pareti ortogonali.

Carenze e vulnerabilità associate al meccanismo:

- Assenza di cordoli o catene ai piani;
- Orizzontamenti deformabili e/o mal collegati;
- Intersezioni murarie di cattiva qualità;
- Presenza di spinte non contrastate sulla parete;
- Muratura a sacco o paramenti mal collegati.

Sintomi che manifestano l'avvenuta attivazione del meccanismo:

- Lesioni verticali in corrispondenza delle intersezioni murarie (angolate e martelli murari);
- Fuori piombo della parete ribaltante;
- Sfilamento delle travi degli orizzontamenti.

Differenti varianti del meccanismo

Il ribaltamento può coinvolgere:

- uno o più livelli della parete, in relazione alla presenza di collegamento ai diversi orizzontamenti;
- l'intero spessore del muro o il solo paramento esterno, in relazione alle caratteristiche della struttura muraria (a sacco, carenza di diatoni);
- diverse geometrie della parete, in relazione alla presenza di discontinuità o di aperture.

Considerazioni sulle caratteristiche dinamiche delle strutture in relazione alla vulnerabilità sismica

3

FLESSIONE VERTICALE DI PARETE

Il meccanismo si manifesta con formazione di una cerniera cilindrica orizzontale che divide la parete in due blocchi ed è descritto dalla rotazione reciproca degli stessi attorno a tale asse per azioni fuori dal piano.

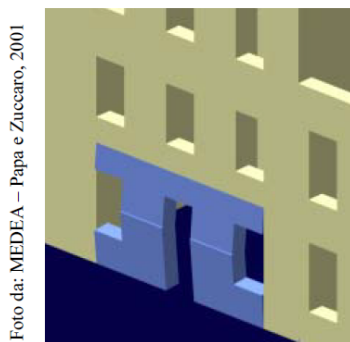
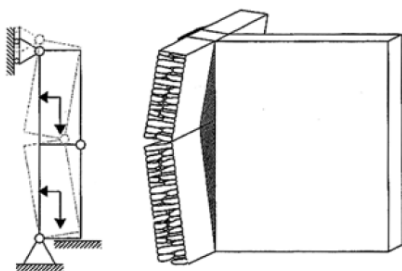


Foto da: MEDEA - Papa e Zuccaro, 2001

Condizioni di vincolo della parete interessata dal meccanismo:

- Trattenimento efficace in testa alla parete;
- Carenza di collegamento alle pareti ortogonali.

Carenze e vulnerabilità associate al meccanismo:

- Snellezza eccessiva delle pareti;
- Muratura a sacco o paramenti mal collegati;
- Spinte orizzontali localizzate (archi, volte);
- Orizzontamenti intermedi mal collegati.

Sintomi che manifestano l'avvenuta attivazione del meccanismo:

- Spanciamenti e fuori piombo della parete;
- Lesioni orizzontali e verticali;
- Sfilamento delle travi degli orizzontamenti intermedi.

Differenti varianti del meccanismo

La flessione verticale può coinvolgere:

- uno o più livelli della parete, in relazione alla presenza di collegamento ai diversi orizzontamenti;
- l'intero spessore del muro o il solo paramento esterno, in relazione alle caratteristiche della struttura muraria;
- diverse geometrie della parete, in relazione alla presenza di discontinuità o di aperture e spinte localizzate sulla parete.