



SEMINARIO

LA VALUTAZIONE DELLE COSTRUZIONI ESISTENTI

Lucca, 13-14 dicembre 2013

TECNICHE DI MONITORAGGIO

Prof. Maria Luisa Beconcini

Università di Pisa – Dip. Ingegneria Civile e Industriale

Leonardo da Vinci

Assessment of existing structures

Project number: CZ/11/LLP-LdV/TOI/134005

TECNICHE DI MONITORAGGIO

Generalità	3 - 6
Monitoraggio dei fenomeni di dissesto	7 - 26
Monitoraggio a breve termine	27
Prove di carico statiche	28 - 47
Prove di caratterizzazione dinamica	48 - 56
Misura delle vibrazioni	57 - 61

MONITORAGGIO STRUTTURALE

- controllo del progredire dei fenomeni patologici (degrado, dissesti) \Rightarrow **tempi lunghi**
- per conoscere il comportamento di una struttura sotto i carichi di servizio, le azioni ambientali (vibrazioni, ecc), fenomeni ciclici (variazioni di temperatura, ecc) \Rightarrow **tempi brevi**

Il processo di danneggiamento

causa perturbatrice



dissesto



manifestazione di faticenza

circostanza o fenomeno che induce alterazioni nel regime di equilibrio della costruzione



movimenti della struttura, della massa muraria



soluzioni di continuità della massa muraria o delle strutture, deformazioni 4

Esempio:



Il processo diagnostico

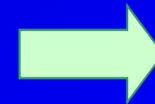
esame delle manifestazioni
deformative e fessurative



definizione della natura del
dissesto statico



individuazione delle cause
perturbatrici

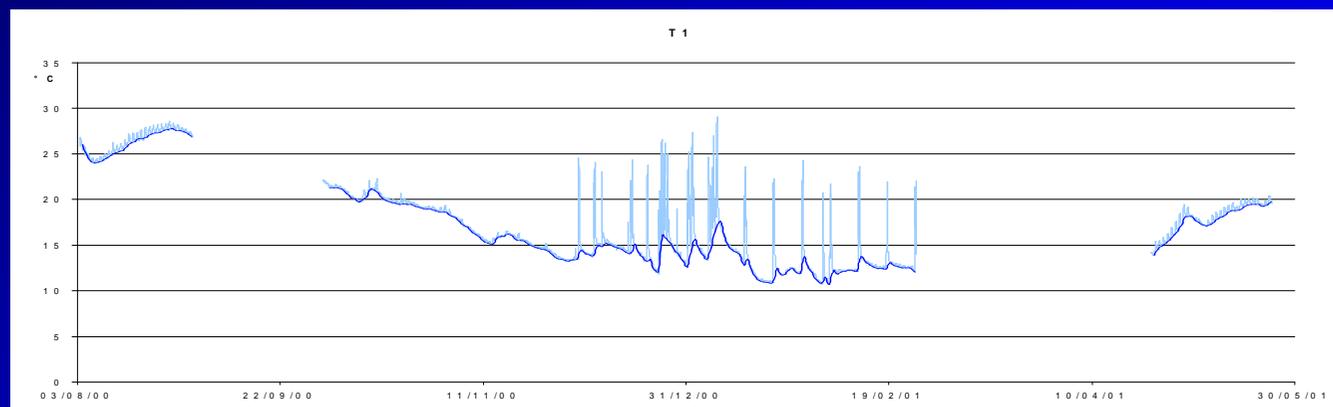


RIMEDI

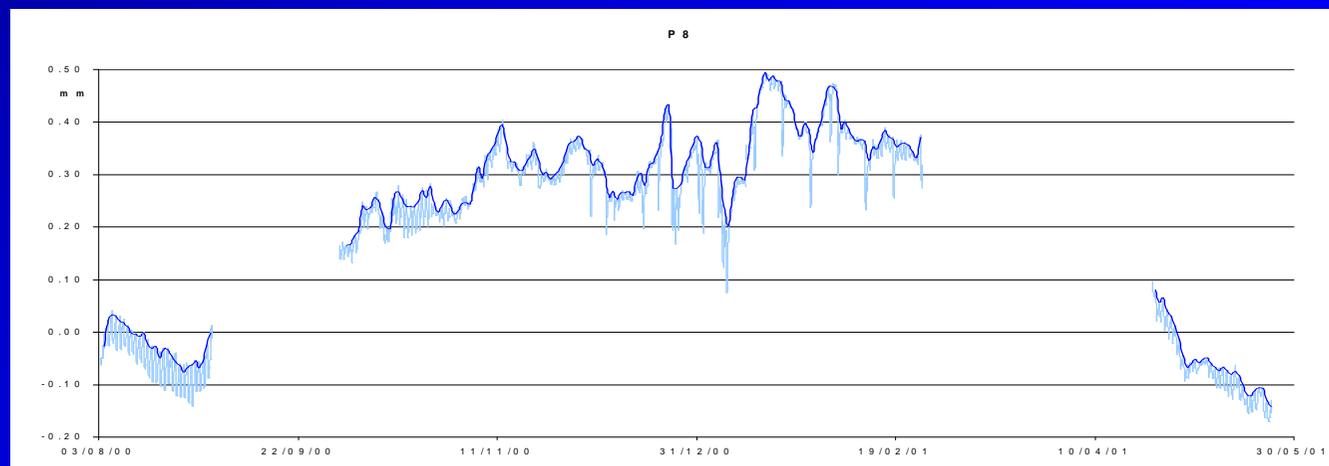
MONITORAGGIO DEI FENOMENI DI DISSESTO

Per distinguere l'evoluzione del dissesto dai fenomeni ciclici, è necessario protrarre il monitoraggio per un tempo abbastanza lungo, almeno un anno

temperatura



ampiezza
della lesione

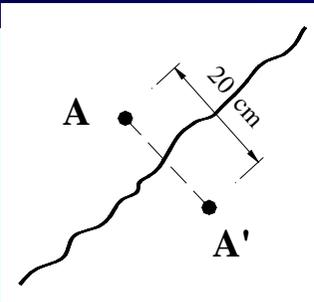


Monitoraggio delle lesioni

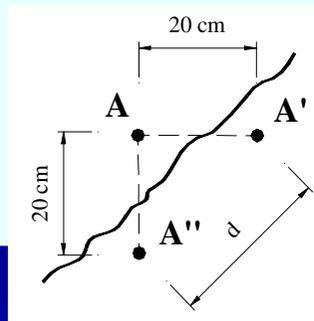
consiste nel rilevare, non l'ampiezza delle lesioni, bensì la variazione nel tempo: aumento o diminuzione

- strumenti meccanici
 - economici
 - pratici da usare
- strumentazione elettronica
 - permette un monitoraggio continuo
 - la lettura a distanza
 - la memorizzazione dei dati
 - permette di impostare allarmi

Disposizione dei punti di misura e dei fessurimetri



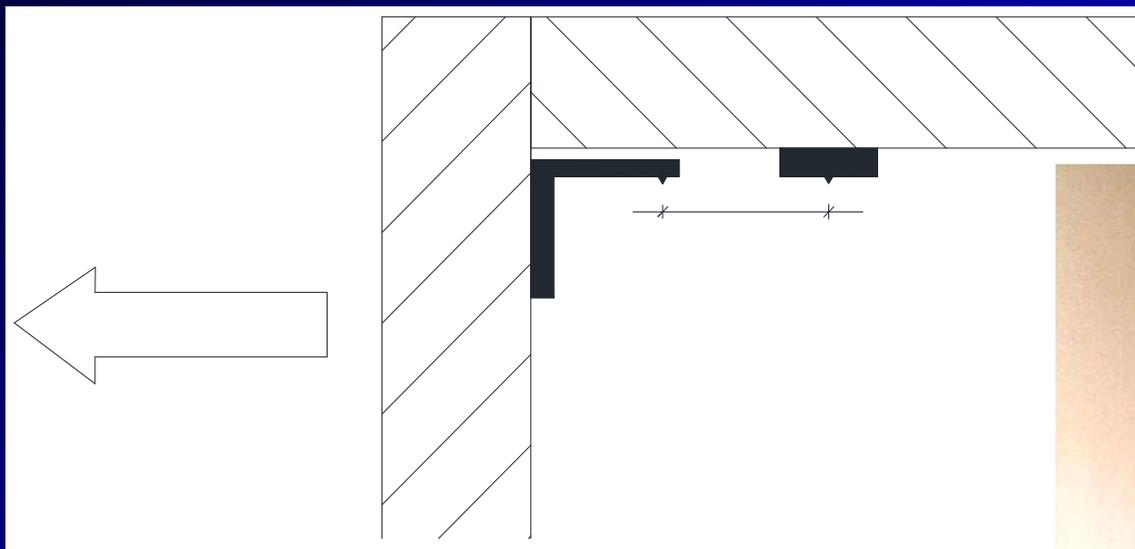
I riferimenti sono applicati alla distanza di 20 cm, a cavallo della lesione, in direzione circa ortogonale alla direttrice fessurativa.



I riferimenti sono applicati a cavallo della lesione in modo tale che le direzioni AA', AA'' formino un angolo il più possibile prossimo a 90°.

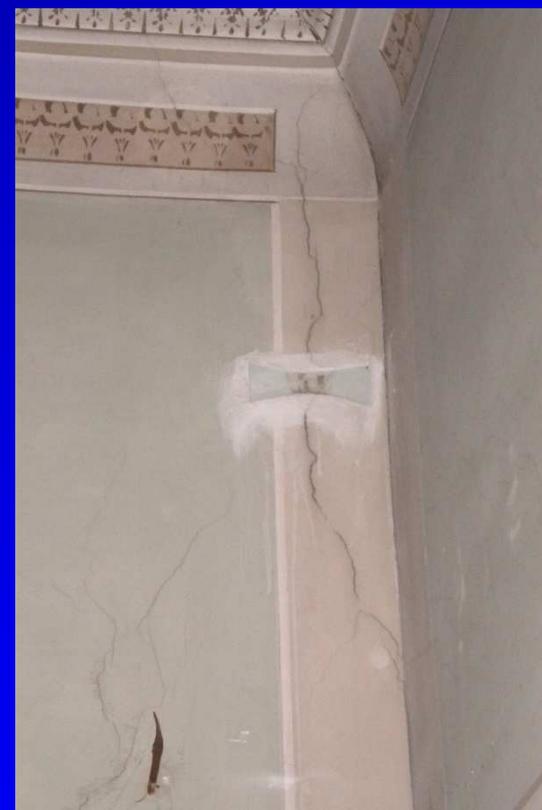
il monitoraggio serve non solo a misurare il progredire del fenomeno di dissesto, ma aiuta ad individuare la direzione del movimento relativo delle due parti della struttura, ovvero la natura del dissesto

Modalità di applicazione per lesioni d'angolo



Monitoraggio di lesioni sistema obsoleto

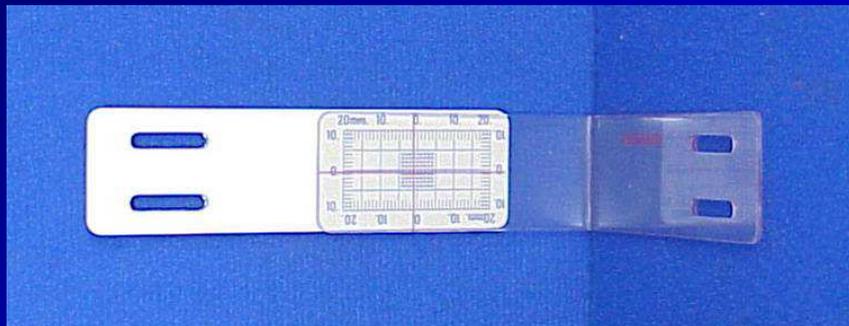
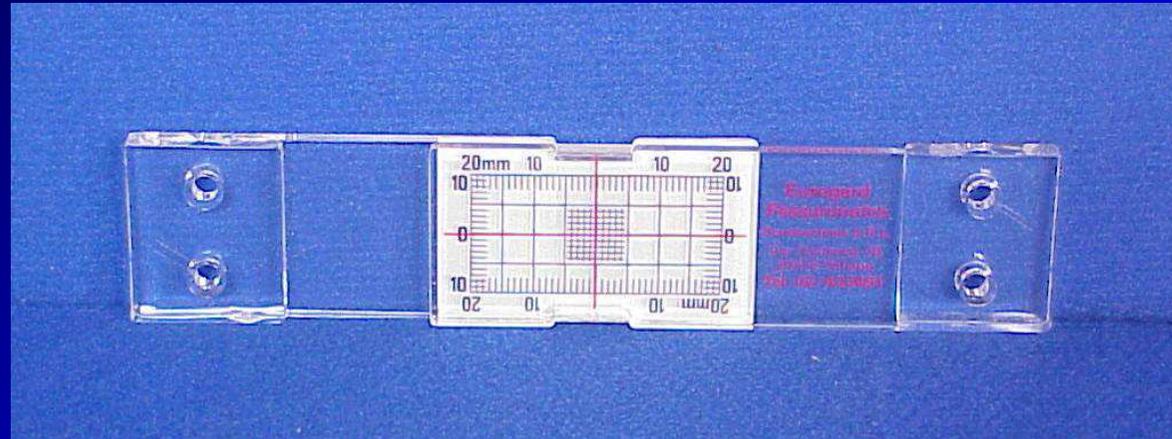
VETRINI



Strumenti meccanici

fessurimetri

- basso costo
- bassa precisione



deformometro removibile



permette di misurare gli spostamenti relativi fra due riferimenti

- accurato
- non invasivo, permette di protrarre il monitoraggio per tempi molto lunghi

La risoluzione va dal 1/100 mm al 1/1000 mm.
Per la misura della variazione di ampiezza delle lesioni nelle strutture è adeguato il deformometro centesimale.

L'azzeramento dei deformometri meccanici, la cui misura di riferimento potrebbe variare con le condizioni ambientali, viene fatto attraverso la misurazione di una "dima", barra di Invar, materiale a bassissimo coefficiente di dilatazione termica, la cui lunghezza si considera praticamente invariabile nel tempo.



Nel caso di misura di ampiezza di lesioni, lo strumento non fornisce l'ampiezza ma solo l'eventuale variazione di ampiezza nel tempo, come differenza di misure successive.

Strumentazione elettronica

strumenti di misura di tipo elettronico (potenziometrici o induttivi)

varie modalità di applicazione:

- trasduttori di spostamento
- inclinometri
- trasduttori speciali
- sonde di temperatura

centrale di acquisizione con diverse opzioni di acquisizione:

- continua
- periodica
- allarme

possibilità di trasmettere dati a distanza

Trasduttori di spostamento relativo

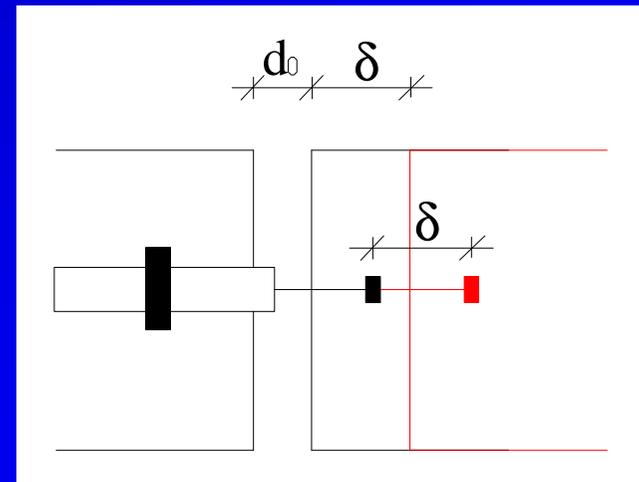


NUCLEO
SCORREVOLE

TELAIO CILINDRICO

misura lo spostamento relativo fra il punto dov'è applicato il telaio ed il punto dov'è applicato il nucleo

se il telaio ed il nucleo sono fissati a cavallo di una lesione, funziona come fessurimetro



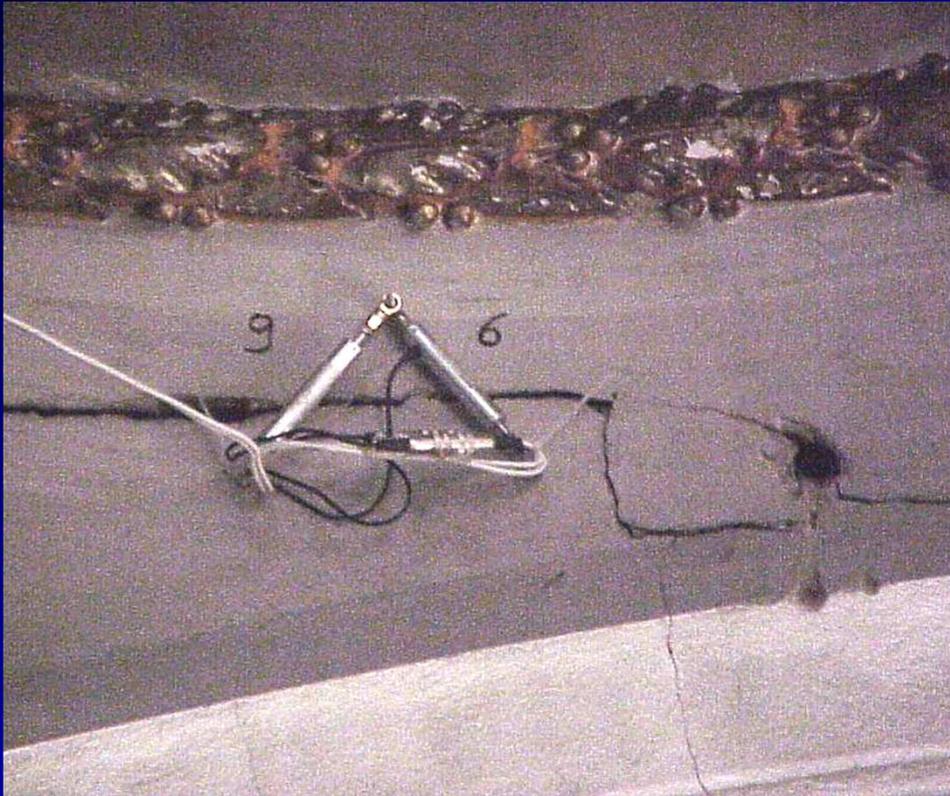
Fessurimetri

Trasduttori di spostamento utilizzati come fessurimetri



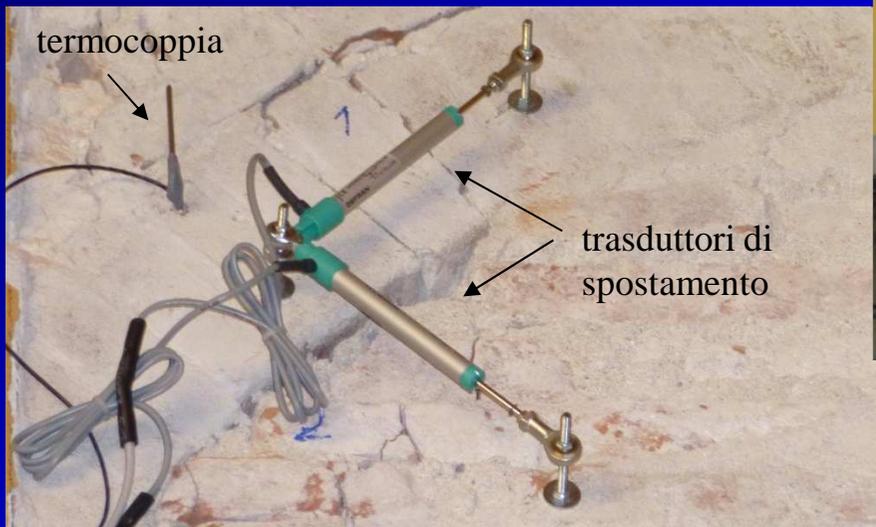
Fessurimetri

Trasduttori di spostamento potenziometrici

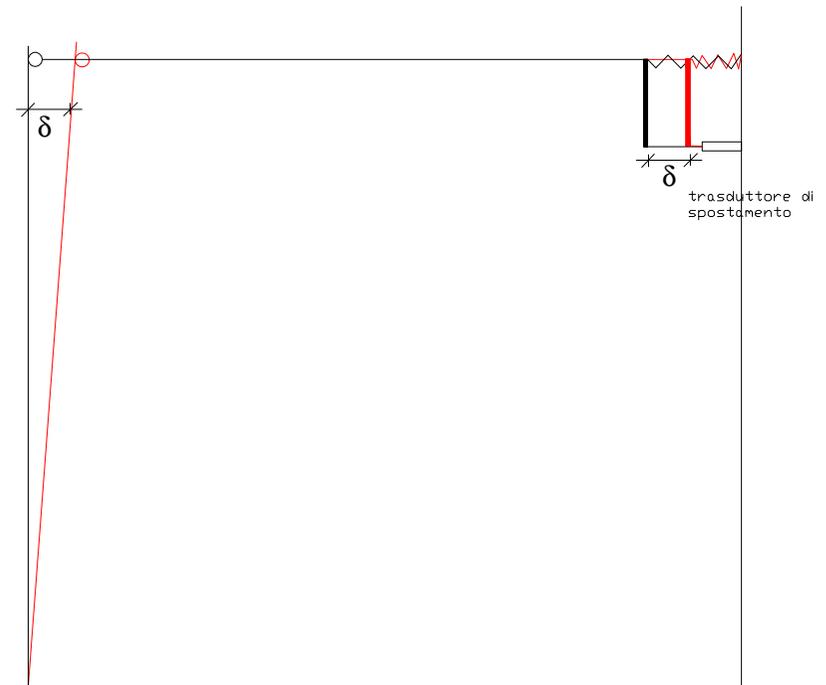
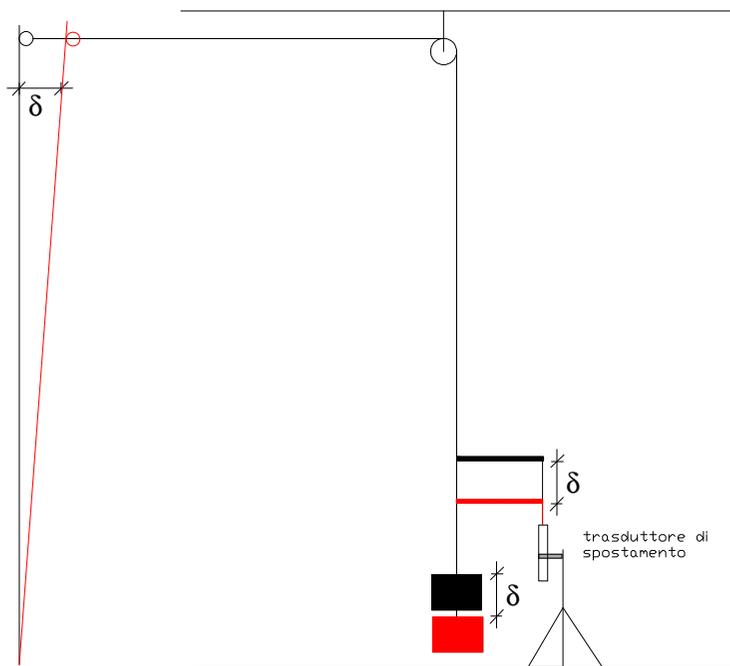


Sistema di monitoraggio con misure in remoto

- ridotta invasività, sia dal punto di vista estetico che di connessione alle reti elettriche ed informatiche esistenti
- minima necessità di intervento da parte degli operatori per le operazioni di gestione e misura

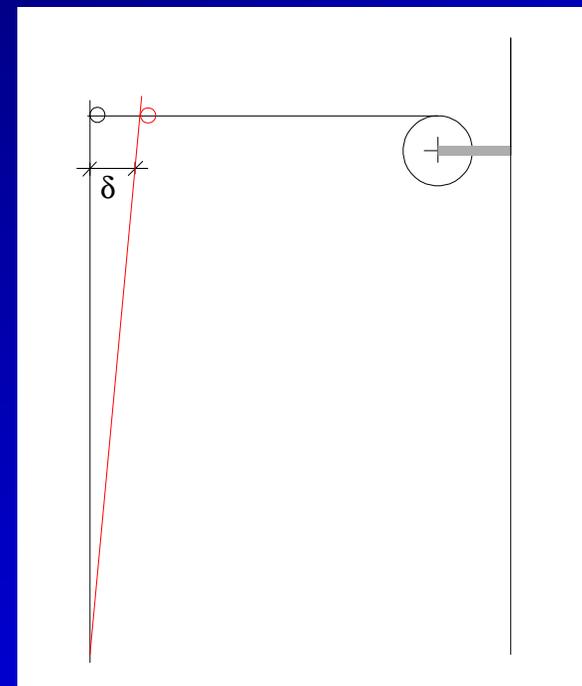
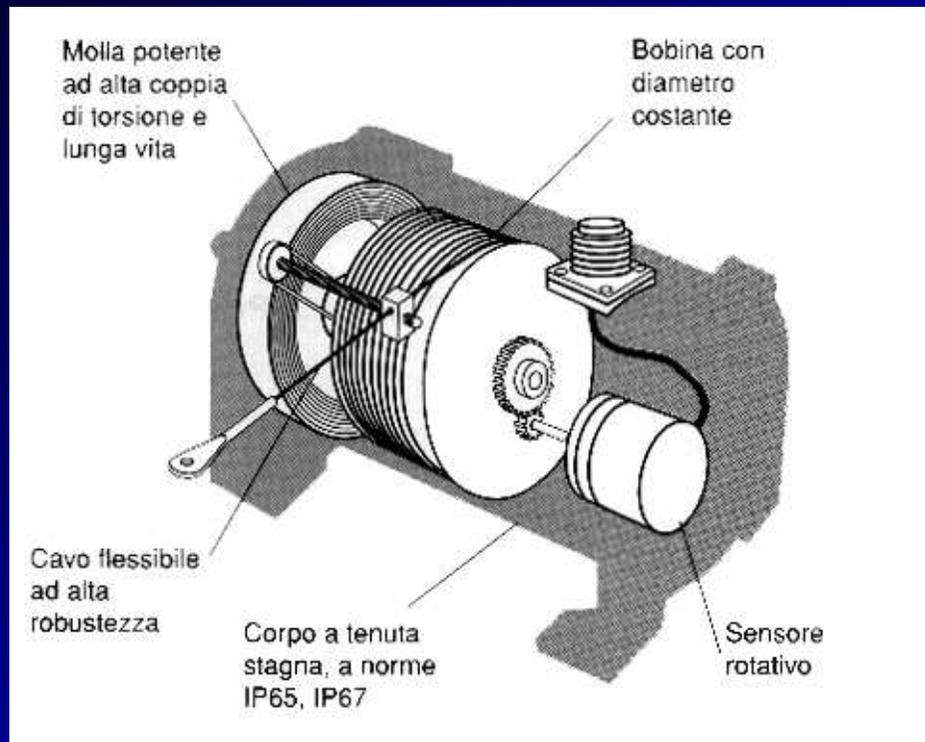


Trasduttori di spostamento orizzontale



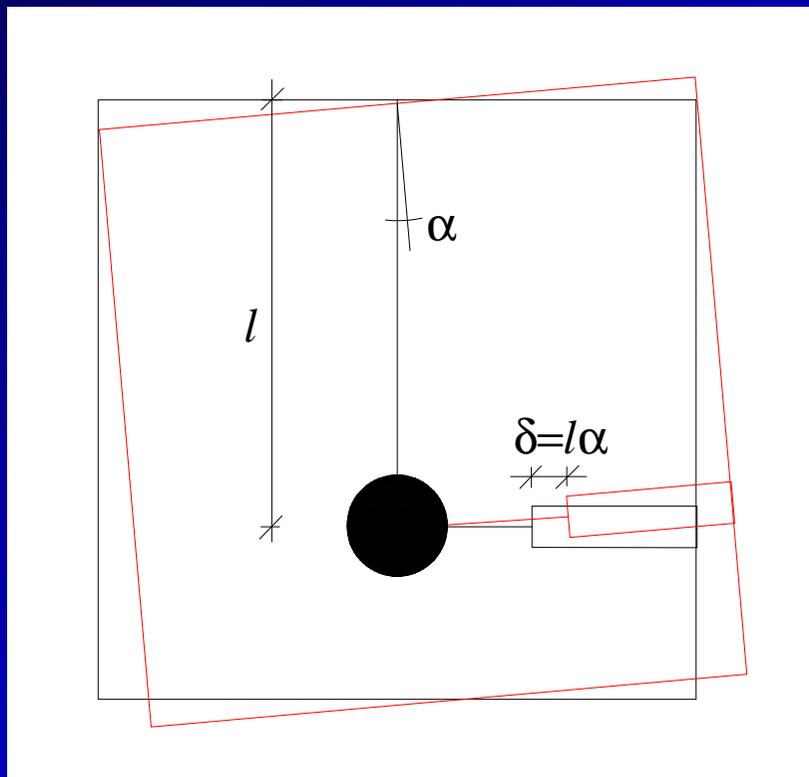


Trasduttore di spostamento a filo



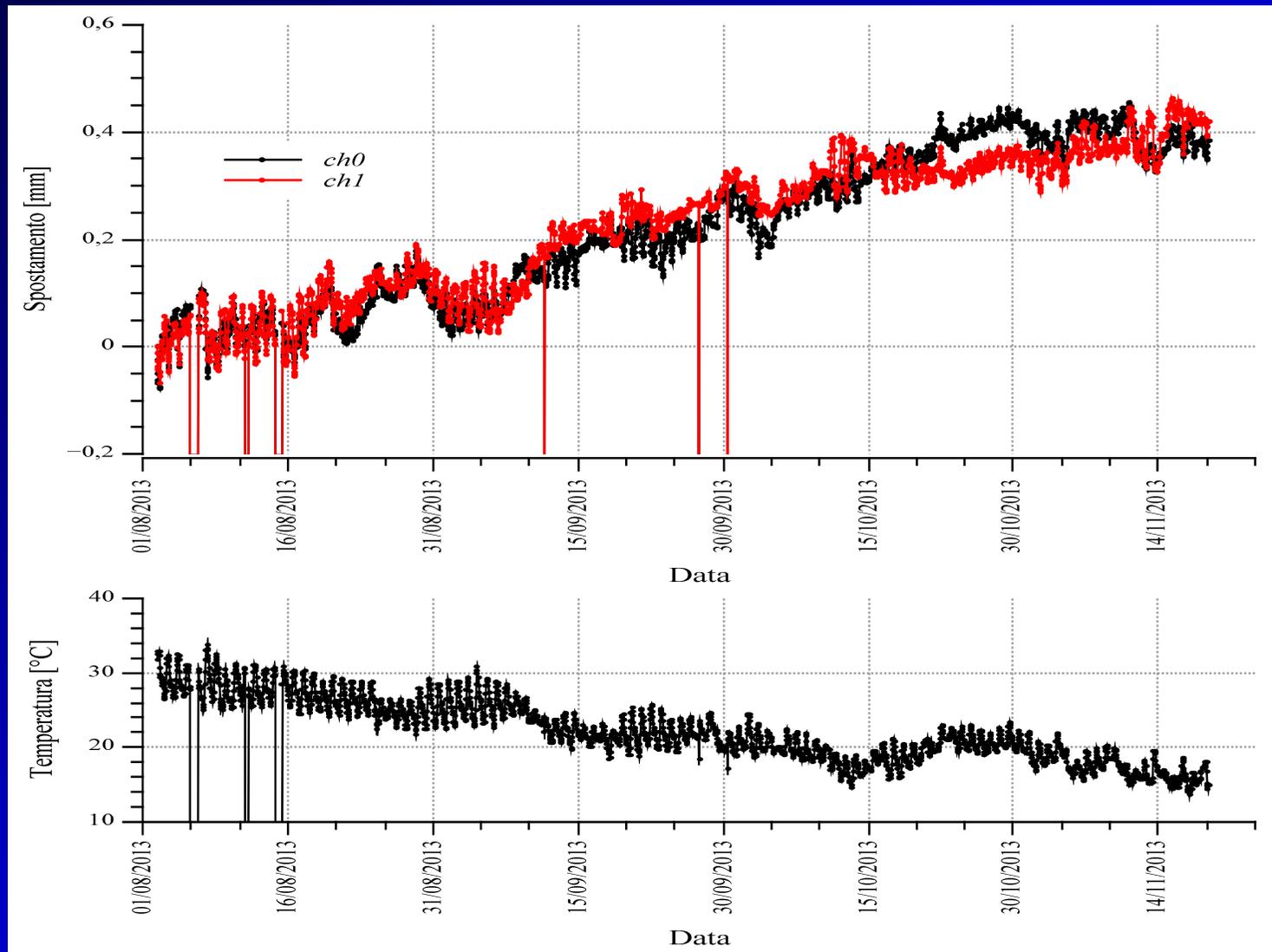
Inclinometri –

misurano il progredire della rotazione di una struttura (es. un muro)

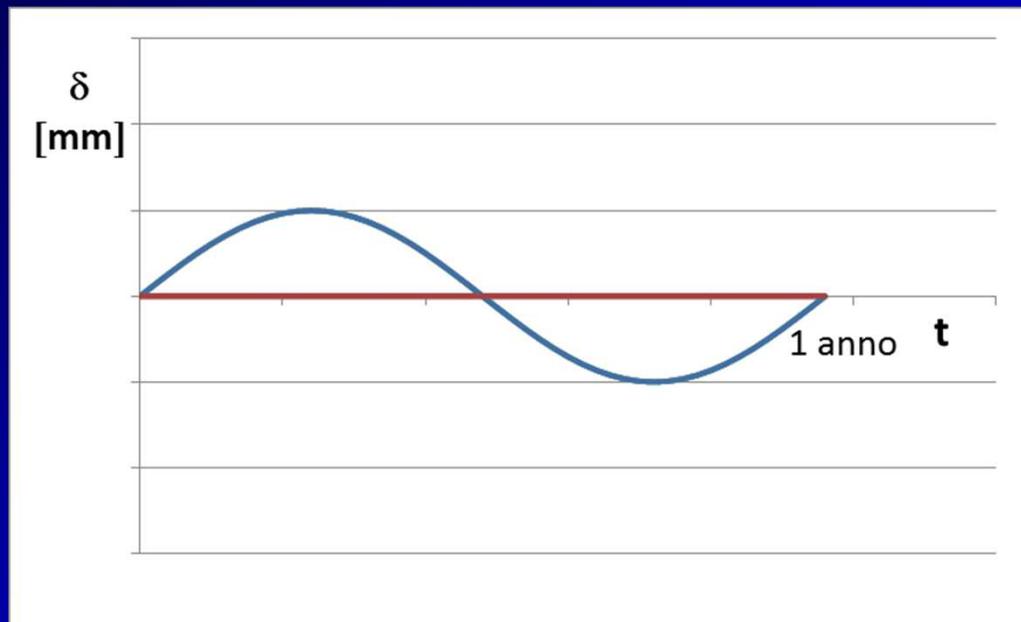


Risultati del monitoraggio strutturale

Grafici dell'andamento dell'ampiezza di una lesione e della temperatura

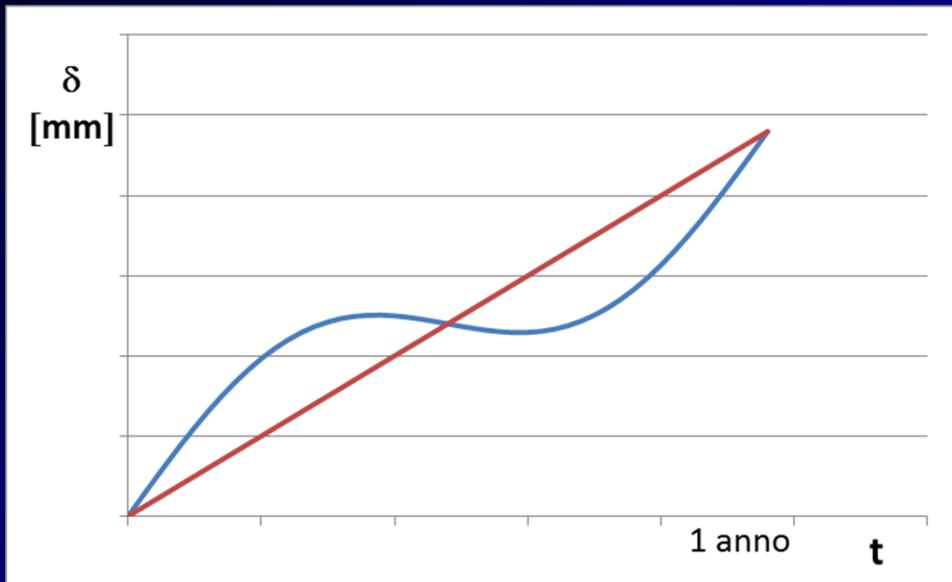


normalmente si analizzano i risultati dopo un periodo abbastanza lungo, in maniera da distinguere gli effetti delle variazioni stagionali dal progredire del dissesto



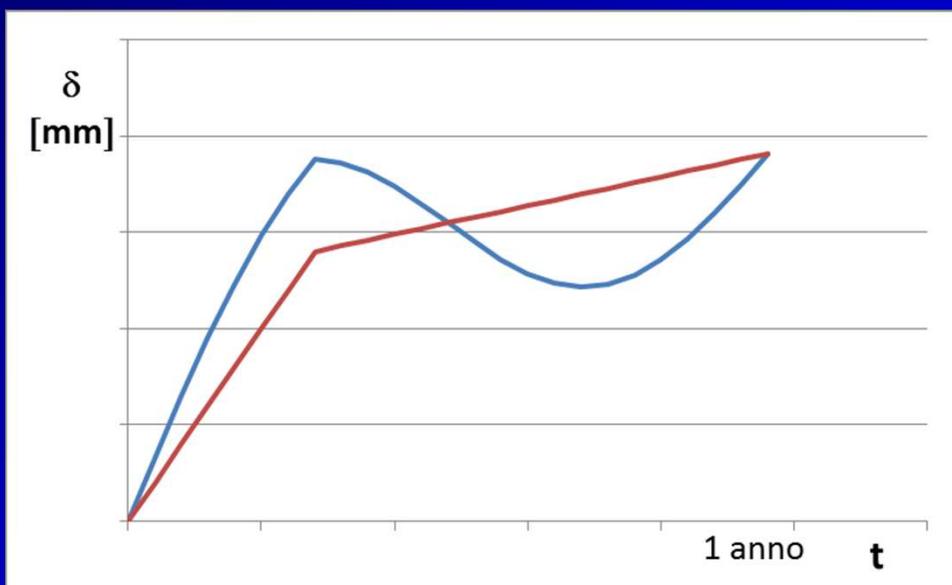
il fenomeno si è
STABILIZZATO

si può progredire effettuando
misure meno frequenti



il fenomeno sta
PROGREDENDO

occorre riparare o continuare
il monitoraggio



il fenomeno sta
probabilmente
STABILIZZANDOSI

continuare il monitoraggio

Monitoraggio a breve termine

consiste nel registrare la risposta della struttura alle azioni sollecitanti:

- nel normale funzionamento della costruzione
- applicate appositamente
 - prove di carico statiche
 - prove dinamiche

un impiego frequente è la registrazione delle vibrazioni dovute a fattori ambientali (traffico, macchine, sismi, ecc)

Prove di carico statiche

Si eseguono applicando i carichi sugli orizzontamenti e registrandone gli effetti in termini di deformazioni, sui solai e sulle strutture più direttamente interessate (travi, pilastri)

E' fondamentale ricordare che dalla sola prova di carico non si ricava la "resistenza" di una struttura, se non quando la si spinga fino a rottura, ma ciò in genere non è desiderabile.

Il fatto che un solaio, ad es., abbia superato con esito positivo una prova spinta fino al carico di servizio, non è sufficiente per affermare che quel solaio ha resistenza sufficiente: infatti potrebbe entrare in crisi per un carico leggermente più alto e pertanto non possedere il necessario margine di sicurezza

La prova serve a misurare la **deformabilità** della struttura ed il tipo di risposta ai carichi imposti: se i risultati, in termini di deformabilità, sono congruenti con le previsioni teoriche, allora può essere lecito considerare valide anche le valutazioni teoriche in termini di resistenza e, quindi, di grado di sicurezza.

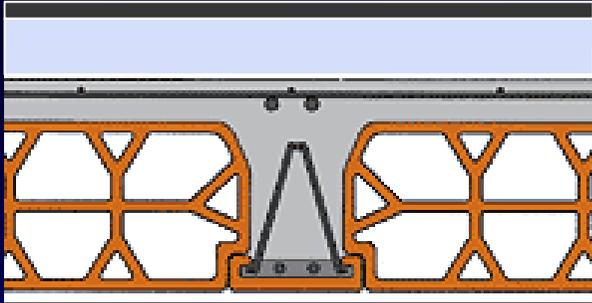
PROGETTO DELLA PROVA DI CARICO

- per non rischiare di danneggiare la struttura
- per condurre correttamente la prova
- per ottenere dalla prova risultati significativi

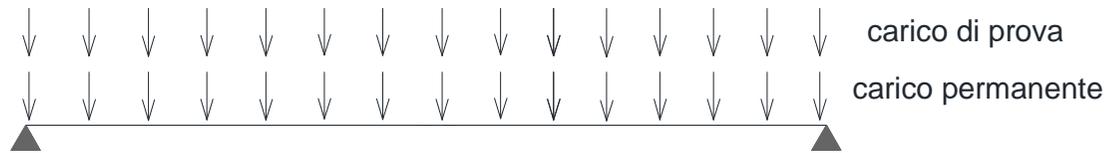
Prima dell'esecuzione della prova, occorre effettuare tutti i rilievi e i saggi necessari per determinare la natura dei materiali e la geometria degli elementi portanti.

Su questa base si costruisce un modello per:

- verificare che la struttura abbia sufficiente resistenza a fronte dei carichi che già sopporta e dei carichi di prova
- valutare le deformazioni sotto i carichi di prova



- carichi permanenti
- EJ
- resistenza



Tmax

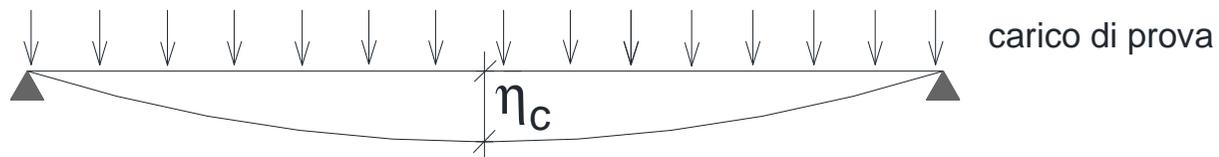


verifiche di sicurezza

Mmax



determinazione carico massimo di prova



scelta degli strumenti

$\eta_c \leftrightarrow \eta_{sp}$ \Rightarrow esito della prova di carico

Collaborazione degli elementi non strutturali

Massetti di pavimentazione, tramezzature, tamponamenti sotto i normali carichi di prova rimangono connessi con la struttura, collaborando in flessione con gli elementi provati o trasferendo parte dei carichi ad altre membrature (effetto arco).

Le strutture secondarie portate collaborano in rigidità con quelle portanti, alterando la risposta statica in termini deformativi, senza modificarla apprezzabilmente sotto l'aspetto della sicurezza.

Collaborazione degli elementi non caricati

Quando non si carica un intero solaio ma soltanto una striscia nella direzione di orditura, occorre considerare la collaborazione delle parti di solaio non caricate.

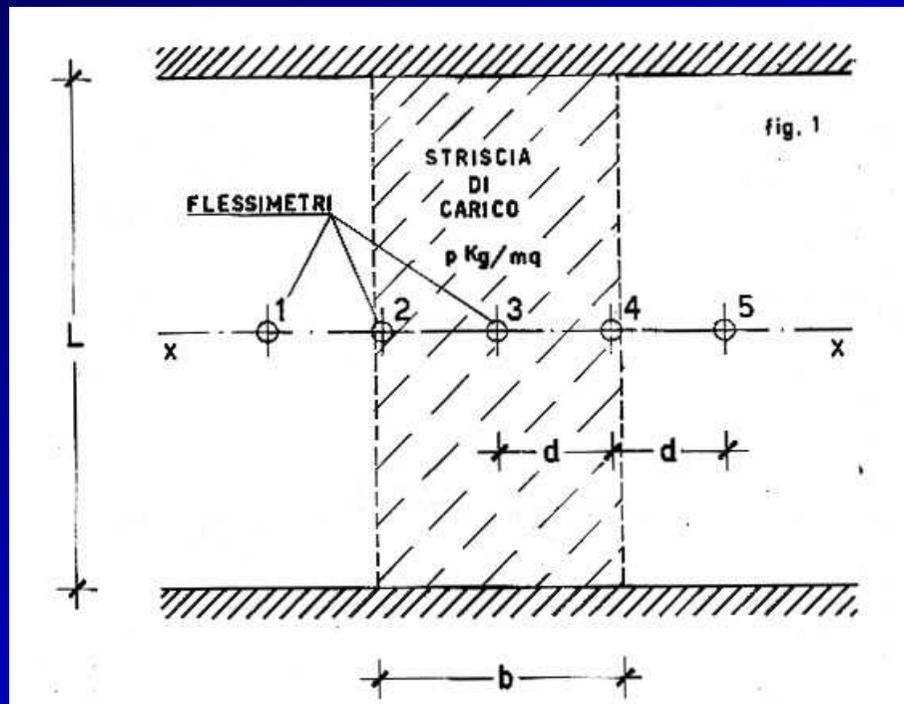


Anche se il solaio è formato da elementi lineari affiancati fra loro, generalmente esiste una connessione, più o meno forte, fra tali elementi.

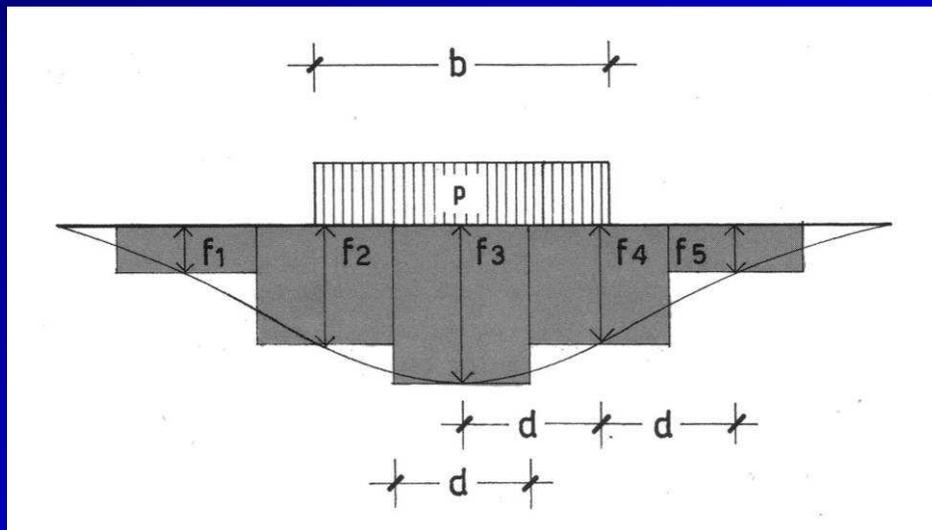
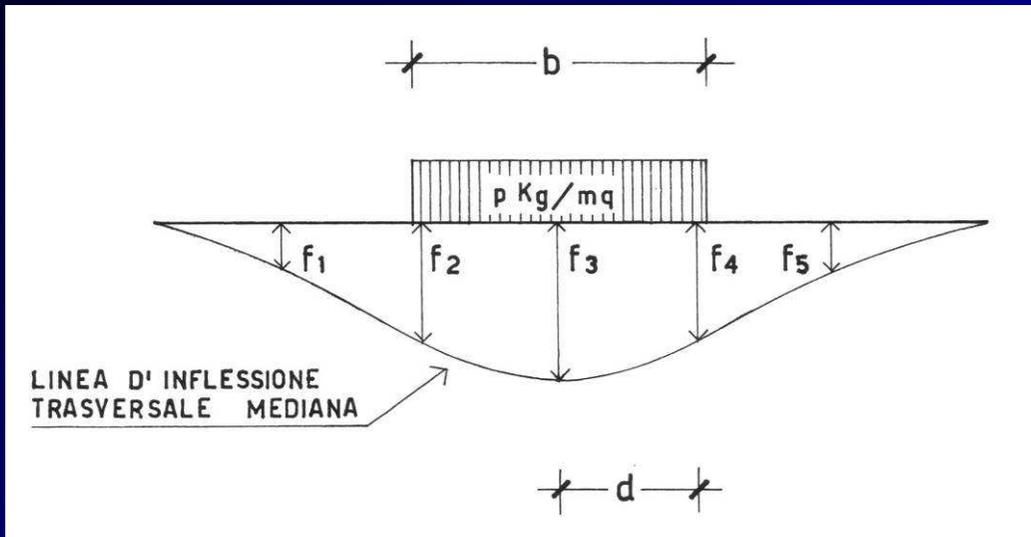
Gli elementi direttamente caricati si inflettono, ma con essi anche gli elementi adiacenti, che quindi assorbono una parte del carico.

Il calcolo delle inflessioni della striscia direttamente caricata deve essere condotto con riferimento non all'intero carico di prova ma solo alla quota parte di competenza.

Tale quota parte può essere determinata direttamente durante la prova.



Si dispongono lungo l'asse di mezzeria del solaio, ortogonalmente alla striscia caricata, un certo numero di flessimetri con i quali si può rilevare la linea d'inflessione trasversale mediana.



Si può assumere, con accettabile approssimazione, che ogni striscia di solaio assorba una quota di carico proporzionale alla corrispondente freccia.

Carico massimo di prova

- dovrebbe riprodurre, insieme ai carichi già presenti sulla struttura, le massime sollecitazioni di progetto
- in genere è pari al carico di esercizio, aumentato di un carico corrispondente al peso delle finiture, se queste non sono ancora in opera
- non sempre il carico che produce il massimo momento flettente riproduce anche il taglio massimo, e viceversa
- se il carico non è distribuito su tutto il solaio, occorre realizzare due condizioni di carico diverse per poter raggiungere le sollecitazioni massime

- se si carica solo una striscia nella direzione di orditura del solaio, si può applicare un carico maggiorato, tale che produca le sollecitazioni massime di prova, tenendo conto della collaborazione degli elementi non caricati
- occorre fare attenzione che il carico applicato su una striscia non produca sconnessioni con le strisce adiacenti
- la striscia caricata può anche essere ortogonale alla direzione di orditura del solaio; in questo caso il carico che riproduce il max momento, dà luogo ad un taglio molto minore del max (circa $\frac{1}{2}$)
- se il carico è applicato con martinetti, occorre utilizzare adeguate piastre di ripartizione e verificare il solaio superiore, se usato come contrasto

Disposizione degli strumenti di misura

Il minimo di strumenti da utilizzare è costituito da:

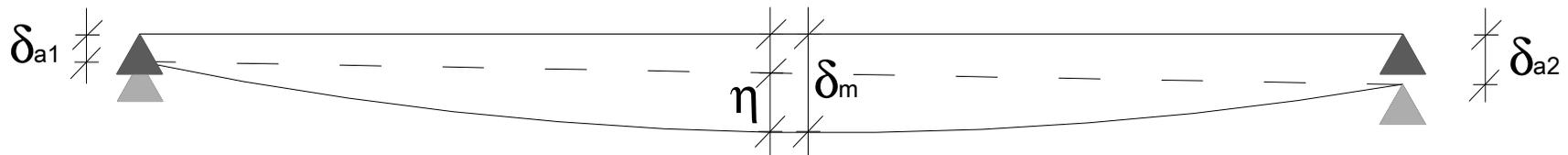
- strumenti in corrispondenza dei vincoli della struttura in prova
- uno strumento dove si prevede la deformazione massima (se si misurano inflessioni: in mezzeria di una struttura vincolata ad entrambi gli estremi, all'estremità di uno sbalzo; se si misurano rotazioni, alle estremità vincolate, ecc.).

Un esempio: prova di carico su solaio

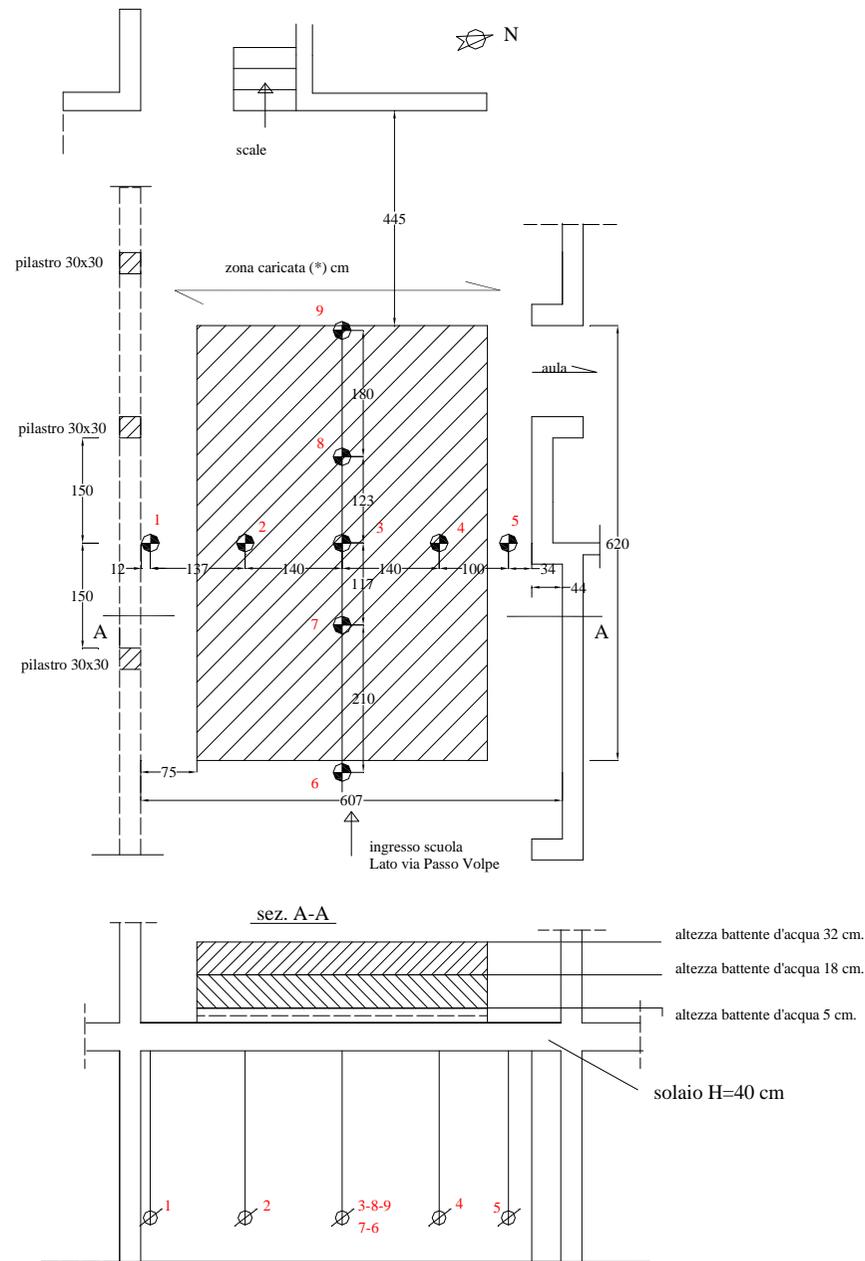
Interessa misurare le inflessioni del solaio per confrontarle con i dati teorici

Nello studio teorico, le inflessioni sono relative agli appoggi

Nella prova, le inflessioni devono essere depurate degli abbassamenti degli appoggi, che devono quindi essere misurati



$$\eta = \delta_m - \frac{\delta_{a1} + \delta_{a2}}{2}$$



(*) le dimensioni della superficie caricata sono variabili in funzione del livello di riempimento

☉ comparatore centesimale



Conduzione di una prova di carico

La prima operazione è la lettura degli strumenti in assenza di carichi: la lettura di "0"

Per quanto possibile i carichi si applicano con gradualità.

E' opportuno condurre la prova per gradini: aumentare i carichi fino a livelli prestabiliti ed in corrispondenza leggere gli strumenti e registrare le misure; attendere che l'assetto si sia stabilizzato prima di procedere ad aumentare i carichi

Registrare orari e temperature ed eventuali altri fattori di influenza

Durante tutto il corso della prova condurre rilievi a vista dello stato delle strutture direttamente o indirettamente influenzate dal carico

La conduzione della prova per gradini permette di:

- tenere sotto controllo l'andamento della prova:
 - * se uno strumento non funziona correttamente, siamo in tempo a provvedere
 - * se l'andamento della prova non rispetta le previsioni, occorre rendersi conto dei motivi, prima di procedere
- condurre la prova in maggior sicurezza: inattesi o improvvisi cedimenti sono più facilmente individuabili disponendo di grafici di risposta

Una volta raggiunto il carico massimo che si intende applicare alla struttura, si effettuano le misure

Se è possibile si mantiene il carico per un certo periodo di tempo per evidenziare eventuali fenomeni lenti e si ripetono le misure

Si procede allo scarico, eventualmente per gradini

Si registrano le misure allo scarico per valutare le deformazioni residue: se queste risultano grandi, in rapporto alle deformazioni massime raggiunte, sono indice di comportamento non elastico della struttura. In tal caso, se è possibile, conviene ripetere la prova

Se gli esiti della prova non sono del tutto convincenti, può essere opportuno ripetere

Esito della prova

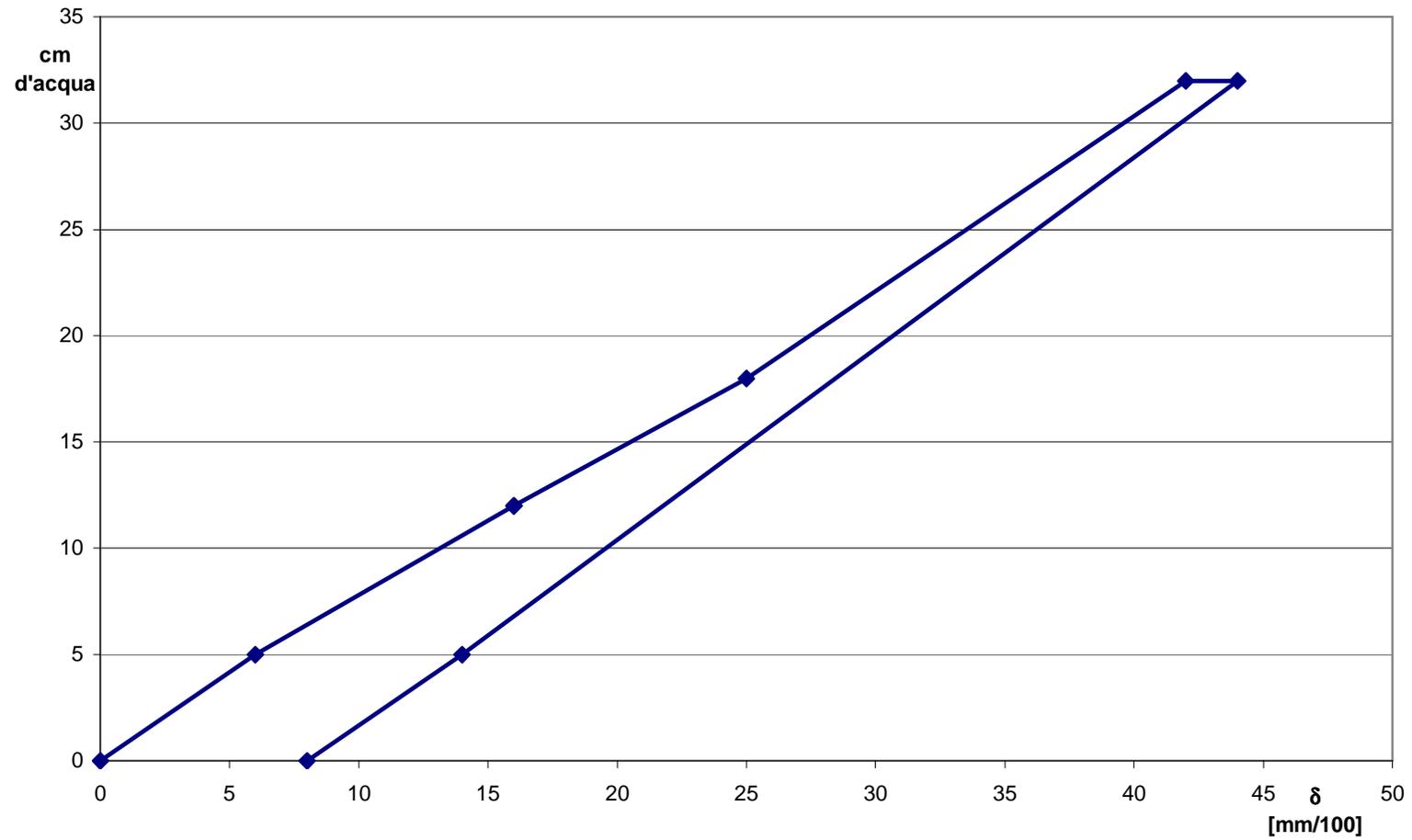
Il giudizio sull'esito di una prova di carico si compone di molteplici aspetti:

- se non si sono rilevati danni
- se i risultati rispettano le previsioni
- se l'accrescimento delle deformazioni è più o meno lineare con i carichi
- se l'entità delle deformazioni residue allo scarico è una quota piuttosto piccola (10% ?) delle deformazioni massime

esempio

ora	10.05	10.20	10.37	11.04	11.22	11.50	12.10	12.32	12.45								
T (°C)	25.8	25.6	25.9	25.9	26.0	26.3	26.2	26.6	26.7								
Fase di carico	Atezza del battente in acqua [cm]																
	0	5.0	12.0	12.0	18.0	32.0	32.0	5.0	0.0								
Comparatore N°	[mm/100]																
	lettura	lettura	η	lettura	η	lettura	η	lettura	η	lettura	η	lettura	η	lettura	η	lettura	η
1	635	637	2	639	4	639	4	641	6	646	11	646	11	640	5	639	4
2	858	864	6	871	13	871	13	877	19	890	32	891	33	870	12	866	8
3	782	788	6	798	16	798	16	807	25	824	42	826	44	796	14	790	8
4	804	807	3	814	10	814	10	821	17	834	30	835	31	813	9	808	4
5	949	949	0	952	3	952	3	953	4	956	7	956	7	951	2	949	0
6	813	819	6	824	11	825	12	830	17	840	27	840	27	823	10	819	6
7	679	686	7	696	17	696	17	706	27	725	46	725	46	696	17	689	10
8	674	677	3	687	13	687	13	691	17	715	41	716	42	689	15	686	12
9	674	680	6	687	13	687	13	693	19	704	30	704	30	687	13	683	9

Diagramma carico-inflessione



Prove di caratterizzazione dinamica

In genere le prove di carico statiche sono utilizzate per saggiare la risposta di strutture ai carichi verticali

Le prove con azioni orizzontali risultano spesso inattuabili per la difficoltà di disporre di una struttura di contrasto abbastanza rigida e più resistente della struttura in prova e di una struttura di riferimento per gli strumenti di misura che non abbia movimenti durante tutto il corso della prova

In questi casi, e su strutture che si prevede siano cimentate da importanti azioni dinamiche, è conveniente condurre prove dinamiche

Si effettuano sottoponendo la struttura ad una eccitazione dinamica (azione variabile rapidamente nel tempo) e registrando la risposta, anch'essa dinamica, in termini di spostamenti, velocità, o accelerazioni.

eccitazione $\left\{ \begin{array}{l} \text{naturale: vento, traffico, sisma, ...} \\ \text{forzata: rilascio, urto, vibrodina, campane, ...} \end{array} \right.$

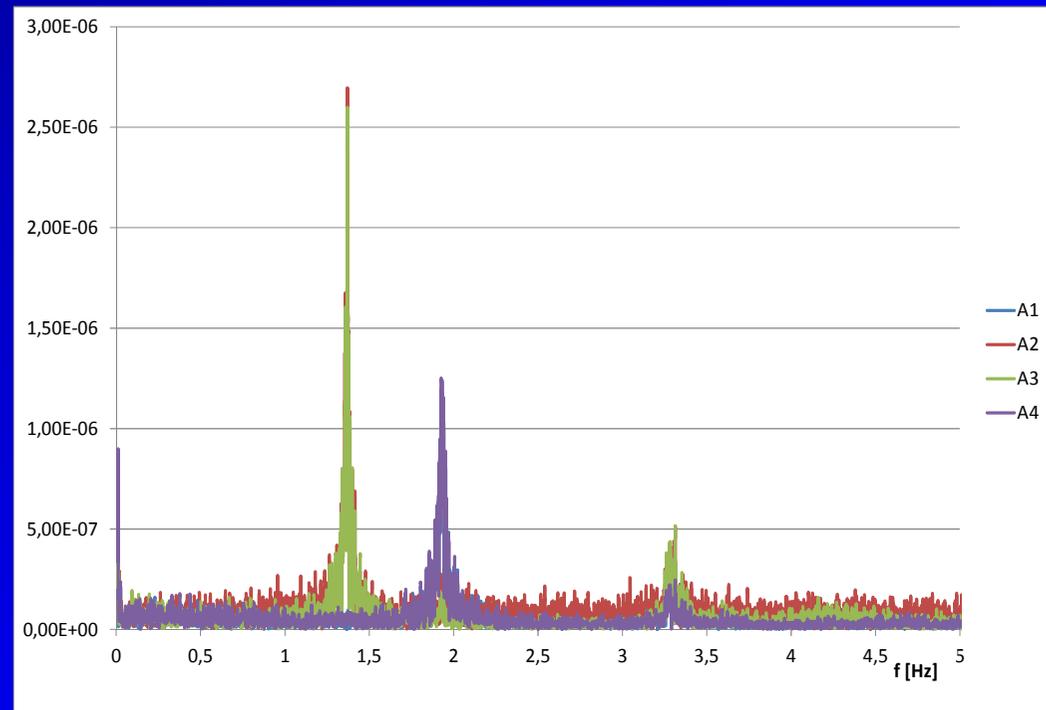
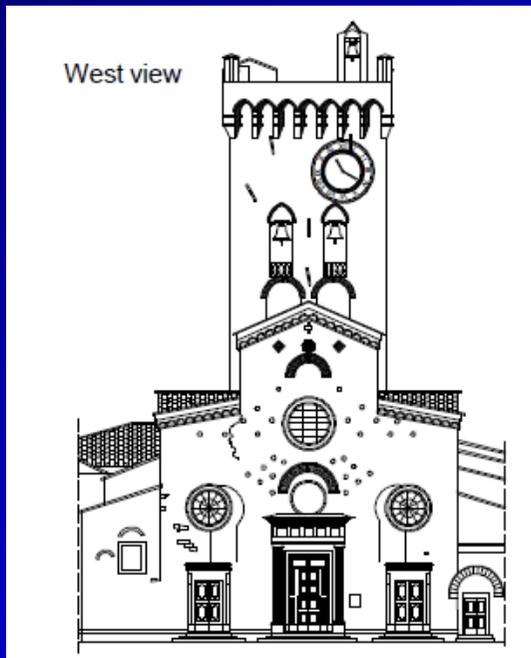
L'obiettivo è ricavare le caratteristiche dinamiche della struttura, che sono legate alle caratteristiche di massa e di rigidità.

**FREQUENZA PROPRIA DI VIBRAZIONE
NATURALE**

$$f = \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{k}{m}}$$

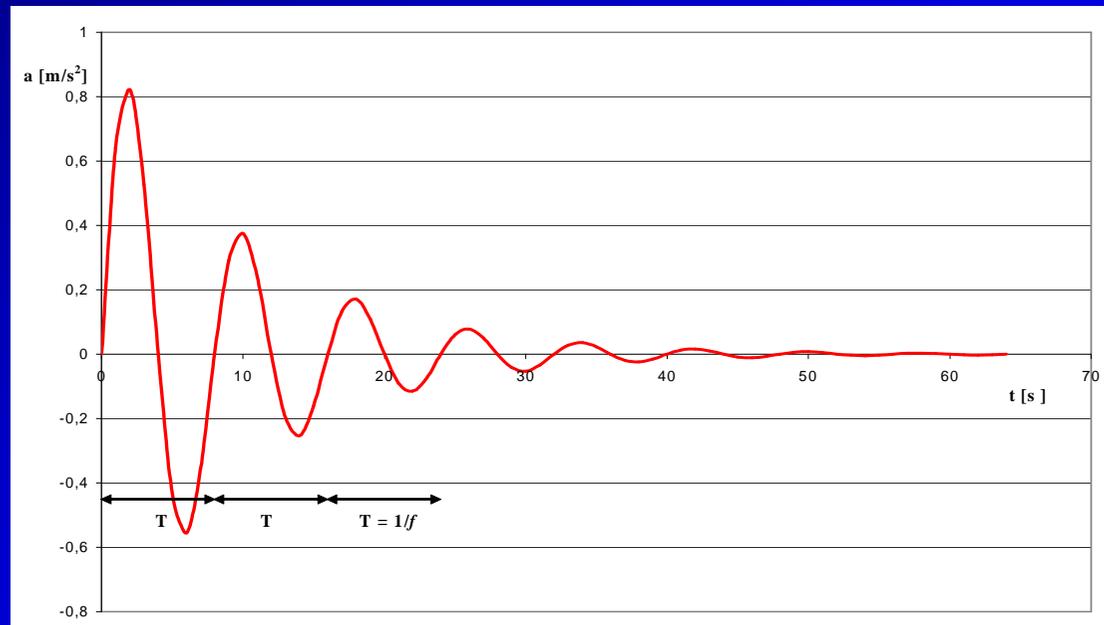
Prove di vibrazione naturale

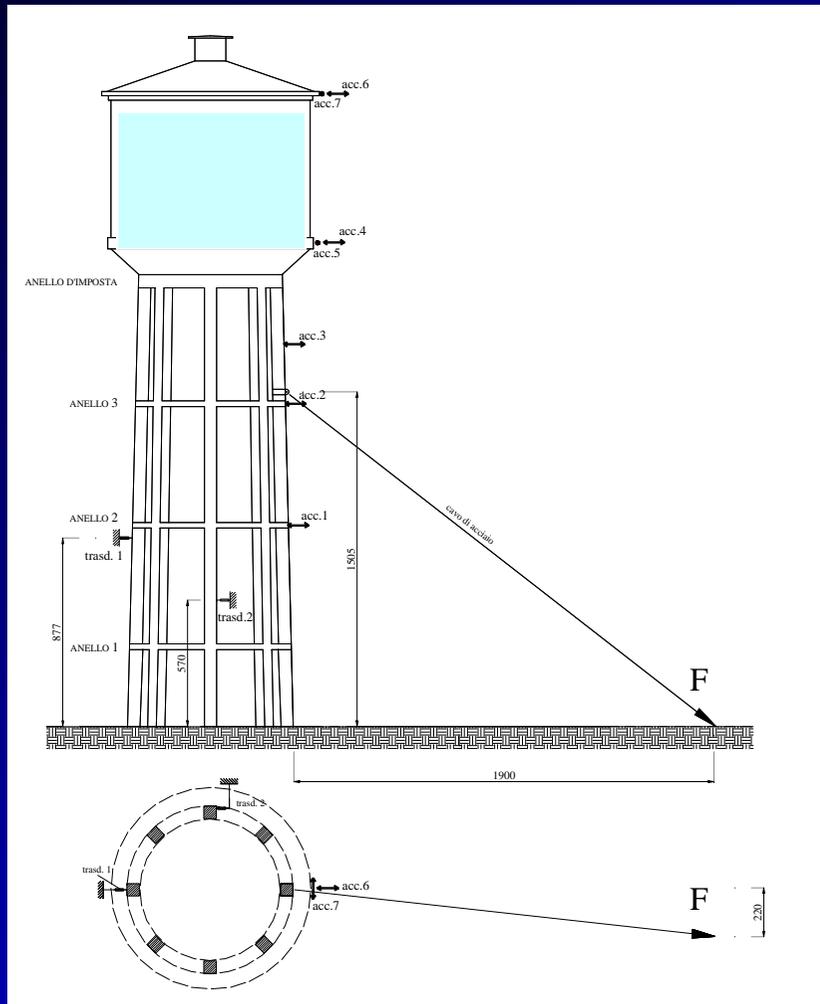
- si registrano per un tempo sufficientemente lungo accelerazioni o spostamenti della struttura provocati dalle condizioni ambientali
- mediante l'analisi di Fourier, si ricavano frequenza propria di vibrazione e smorzamento
- note le masse, si ricavano informazioni sulle rigidità



Prove di rilascio e urto

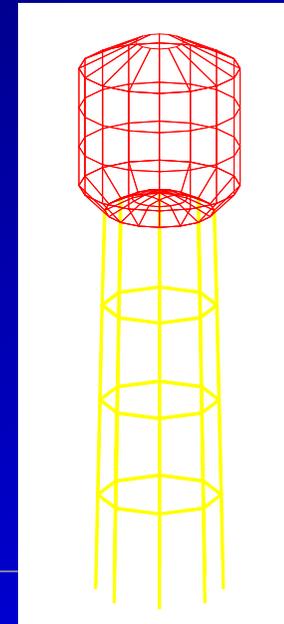
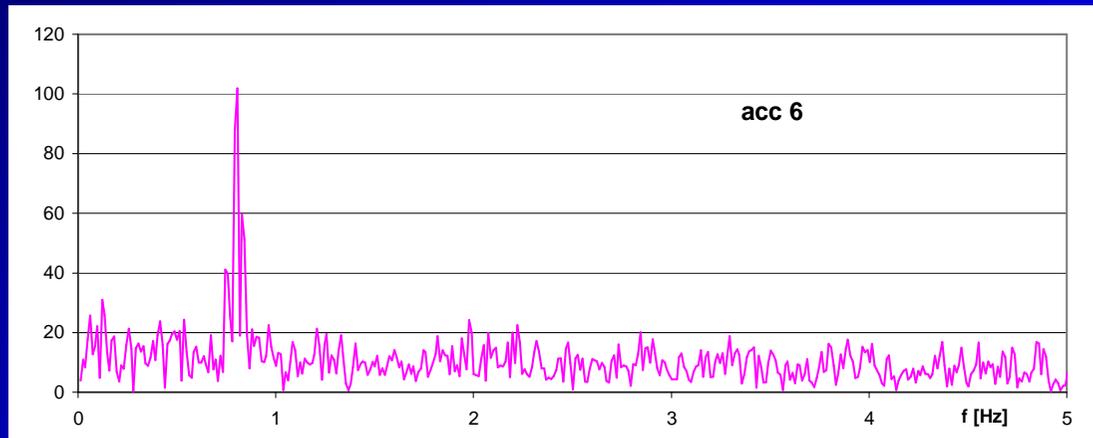
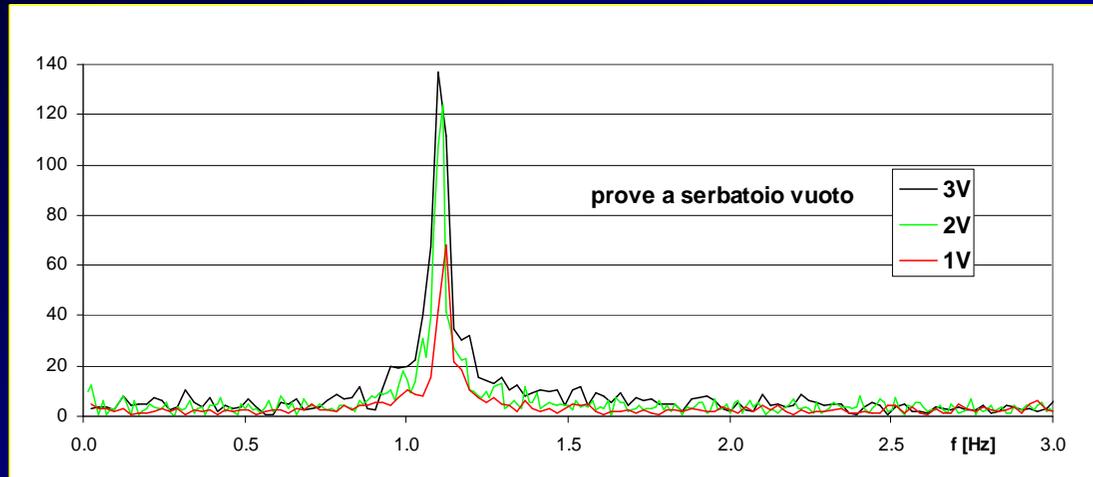
- si imprime alla struttura uno spostamento dalla posizione di equilibrio statico oppure si imprime un urto
- si provocano le vibrazioni libere della struttura
- si registrano accelerazioni o spostamenti nel tempo
- si ricavano frequenza propria di vibrazione e smorzamento
- note le masse, si ricavano informazioni sulle rigidzze







Risultati



		f [Hz]
serbatoio pieno	sperimentale	0.80
	teorico	0.83
serbatoio vuoto	sperimentale	1.11
	teorico	1.12

Prove di vibrazione forzata

Se si sollecita una struttura con una forza variabile nel tempo, ad esempio periodica, la struttura entra in vibrazione.

La risposta della struttura (cioè lo spostamento rispetto alla posizione di equilibrio statico, o la velocità, o l'accelerazione) è anch'essa variabile nel tempo con la stessa frequenza della forzante.

A parità di intensità della forza applicata, la risposta è tanto più grande quanto più la frequenza della forzante si avvicina alla frequenza propria della struttura

RISONANZA

- Si sollecita la struttura con una forzante periodica di frequenza variabile con continuità
- Si registra la risposta della struttura nel tempo
- Si rileva la frequenza in corrispondenza della massima ampiezza di risposta
- Tale frequenza è la frequenza propria di vibrazione della struttura

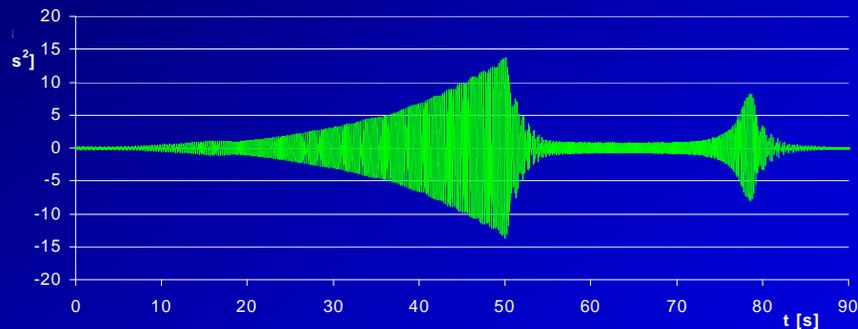
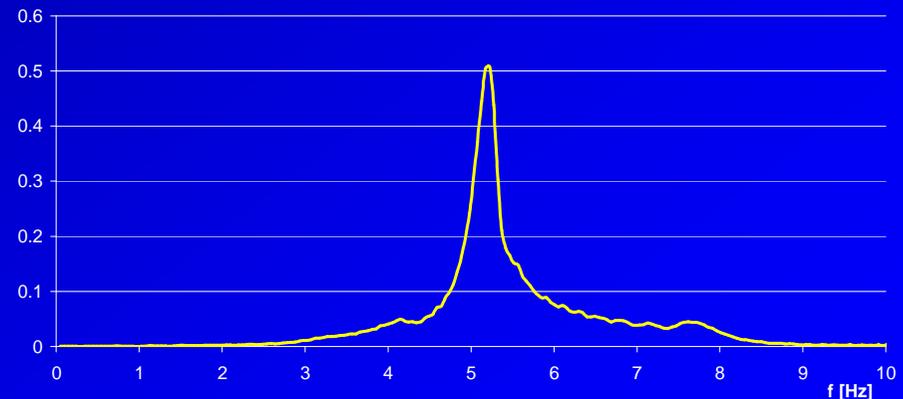


Gráfico della risposta nel tempo



Ampiezza della risposta in
funzione della frequenza

Misura delle vibrazioni ed effetti sulle costruzioni e sulle persone

Il problema della misura di vibrazioni si presenta abbastanza spesso e sempre più di frequente, in conseguenza dell'aumento delle cause che le producono: traffico stradale, metropolitane, ferrovie, macchine per esecuzione di lavori edili, ecc.

Le vibrazioni dei fabbricati possono essere causa di:

- disturbo alle attività umane
- danni alle strutture
- danni ad elementi di pregio contenuti negli edifici
- malfunzionamento di strumenti o apparecchiature

Il problema si pone nei seguenti termini:

- la misura delle vibrazioni
- l'analisi degli effetti
- il giudizio sull'accettabilità delle vibrazioni

La misura delle vibrazioni

è effettuata tramite accelerometri, o trasduttori dinamici di spostamento o di velocità



Analisi degli effetti e giudizio sull'accettabilità

dipende dal tipo di problema posto:

disturbo agli occupanti: UNI 9614-1990, UNI 11048-2003 forniscono indicazioni sulle misure da effettuare, sulle elaborazioni di tali misure e valori di confronto per stabilire l'accettabilità (derivazione dalla medicina del lavoro)

disturbo a strumentazioni e lavorazioni di precisione: i livelli di disturbo sono ben noti, fanno parte delle caratteristiche di impiego degli strumenti

danno strutturale:

se si tratta di sollecitazioni di fatica (sollecitazioni cicliche a livelli abbastanza alti di tensione) la procedura di valutazione è ben nota: stato limite ultimo di fatica per strutture in acciaio e in c.a.

se si tratta di vibrazioni ambientali, in genere il livello delle vibrazioni è molto basso ma molto grande è il numero di cicli a cui è soggetta la struttura nella sua vita.

in generale, ma specialmente per le strutture in muratura che sono le più sensibili a questi fenomeni, non si dispone di relazioni ben verificate

i materiali privi di coesione sono i più sensibili alle vibrazioni, perché le particelle vibrano ciascuna per conto proprio: si possono avere compattazioni, ulteriore perdita di consistenza, ecc.

lo stesso vale per le strutture se le varie parti non sono ben connesse fra loro

il riferimento è la UNI 9916:2004 che riporta una classificazione degli edifici (in funzione della tipologia, del tipo di struttura, delle fondazioni e del tipo di terreno) secondo la resistenza meccanica alle vibrazioni e la tolleranza accettabile per gli effetti delle vibrazioni

sono forniti poi dei valori, da considerare "orientativi" per esplicita ammissione, dei livelli di vibrazione ritenuti accettabili (in termini di velocità di vibrazione)