

...per la riduzione del rischio sismico

TAVOLA VIBRANTE

...per una iniziale informazione didattica



Rimini, 7÷21 maggio 2011

www.ionontremo.it



Il terremoto, quale evento naturale, raro ma probabile nell'arco di vita di una costruzione, si evidenzia con improvviso e alternato movimento del terreno (per una durata, a volte di pochi secondi, in genere non superiore al minuto) e, quindi, con conseguenti brusche accelerazioni che fanno nascere forze d'inerzia sulle masse presenti ai vari piani (solai) e lungo l'altezza (muri, colonne, etc.) di una costruzione.

Le sollecitazioni e gli spostamenti provocati sulla struttura di una costruzione sono influenzati dalle caratteristiche della stessa struttura; vale a dire che è la "risposta" della struttura (ai movimenti impressi alla sua base) a definire l'entità e qualità dell'azione sismica e gli eventuali conseguenti danni.

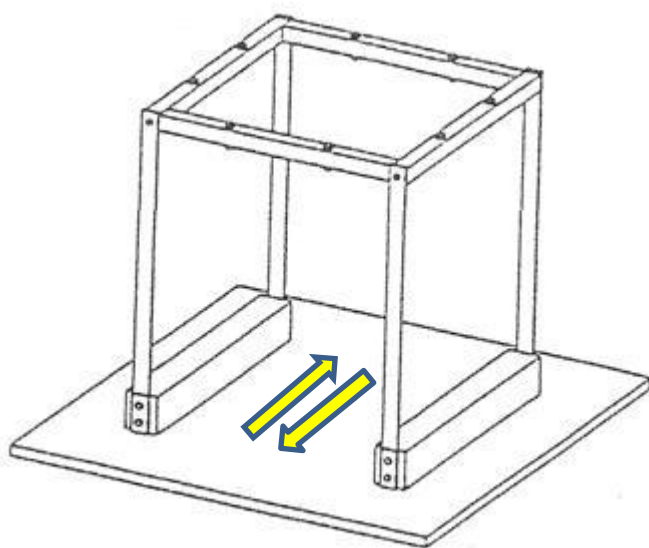
Efficaci indicazioni pratiche di questi comportamenti possono essere sperimentate con una tavola vibrante, anche ad una sola direzione di moto orizzontale quale quella elementare in mostra, opportunamente progettata nelle caratteristiche dell'azione variabile nel tempo (essendo nel caso particolare una azione ciclica) in rapporto alle caratteristiche di massa e rigidezza di modellini fisici, di per sé molto semplici.¹

Nel seguito vengono mostrate tre esemplificazioni significative, durante le quali l'azione applicata alla tavola su cui viene fissato il modello (ossia alla "fondazione" dello stesso modello) consiste in un moto sinusoidale (ossia un movimento ciclico, indotto da un motore collegato ad un tipico sistema biella-manovella).

L'ampiezza delle oscillazioni (della "fondazione") è costante (eventualmente regolabile entro predefiniti limiti, ma solo a macchina ferma, quindi non nel corso della singola esperienza) mentre la frequenza (velocità del motore) si può variare anche nel corso della singola esperienza, mediante un classico "inverter"².

CONFIGURAZIONE STRUTTURALE REGOLARE (1 G.d.L.)

esperienza n. 1

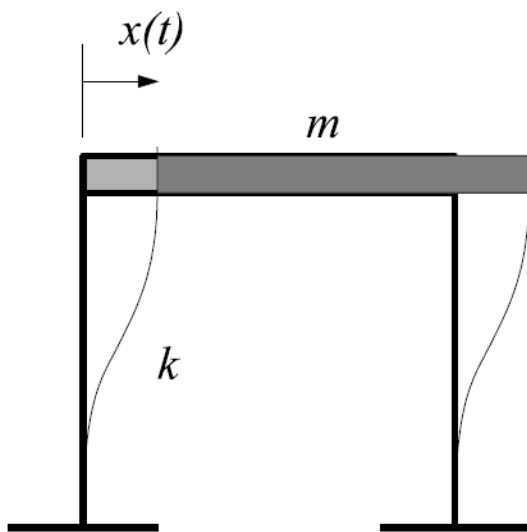


Il caso più semplice è quello di un modello di struttura intelaiata "regolare"³ di un solo piano fuori terra, quindi con un solo "grado di libertà" (1 G.d.L., ossia lo spostamento del "solaio", rispetto alla "fondazione") nella direzione della maggiore flessibilità del modello. E, sempre in tale direzione, le caratteristiche dei materiali e le dimensioni di questo modello (come del successivo) sono tali da garantire notevole flessibilità dei piedritti ("pilastri") sia rispetto alla fondazione che alla intelaiatura di piano ("solaio").

¹ La tavola vibrante ed i modelli sono stati realizzati all'inizio degli anni '90 presso i laboratori ISMES di Bergamo, nell'ambito di una tesi di laurea in architettura presso il Politecnico di Milano, successivamente utilizzati in attività formative concordate con il Gruppo Nazionale per la Difesa dai Terremoti (G.N.D.T.) del C.N.R. e custoditi presso il Centro di Ecologia e Climatologia – Osservatorio geofisico sperimentale di Macerata.

² Dispositivo elettronico utilizzato per variare la tensione e la frequenza della corrente alternata in uscita rispetto a quella in entrata, tale da indurre una variazione della velocità di rotazione del motore.

³ Si vedrà in seguito quando si definisce "irregolare".



Geometria e materiali del modello sono perciò tali da poterlo assimilare nel funzionamento allo schema di un "portale" con pilastri incastrati alla base e alla trave molto più rigida dei pilastri (quindi, con rotazione dei nodi trascurabile), essendosi così ricondotti allo schema di "oscillatori semplici" a un solo grado di libertà, caratterizzato dai soli parametri m (massa del "solaio") e k ("rigidezza alla traslazione" dei pilastri).

Se si sposta il "solaio" del modello dalla sua posizione di equilibrio lasciando poi

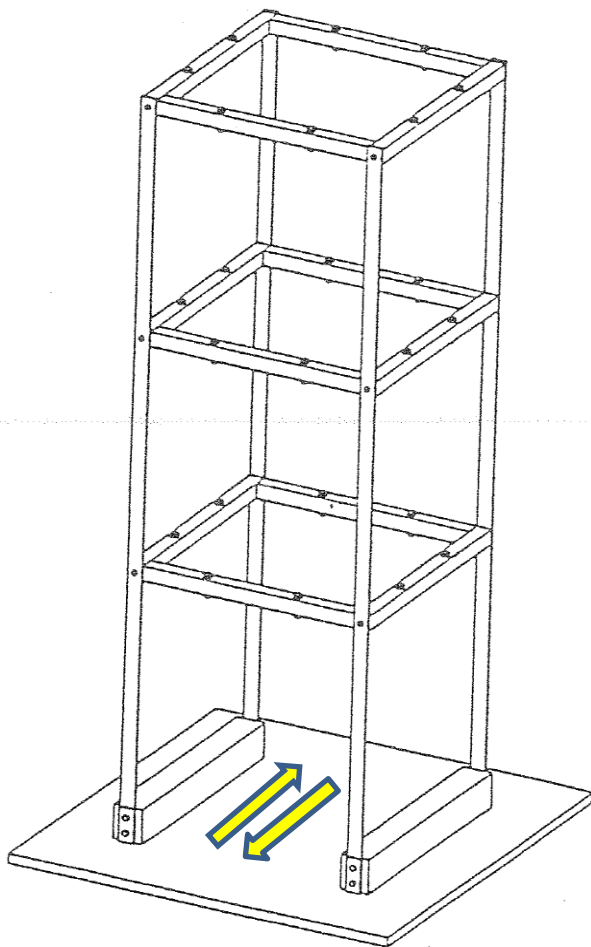
libera la struttura di muoversi, si evidenzia il "modo naturale di vibrare" (detto anche "modo proprio") e la relativa "forma di oscillazione libera" con il corrispondente valore del "periodo- T_1 " (tempo impiegato per compiere una oscillazione completa - "andata" e "ritorno"). Invece che al "periodo" ci si può riferire anche al suo inverso, detto "frequenza" ($f_1 = 1 / T_1$), o ad una grandezza denominata "pulsazione" o "frequenza circolare" ($\omega_1 = 2\pi f_1 = 2\pi / T_1$). Si può dimostrare che $\omega_1 = \sqrt{(k/m)}$, relazione da cui si evince che la frequenza aumenta all'aumentare della rigidezza e al diminuire della massa.

Nel caso del modello in esame $T_1=1$ secondo⁴ (s), e quindi $f_1=1$ hertz⁴ (Hz).

Applicando un'oscillazione alla base del modello mediante spostamenti variabili ciclicamente nel tempo, con frequenza gradualmente incrementabile (regolando l'inverter), si osserva che quando la frequenza del moto alla base raggiunge il valore di 1 Hz, vale a dire il medesimo valore della frequenza f_1 relativa alla "forma di oscillazione libera", la struttura del modello subisce il massimo della sua oscillazione (e sollecitazione): la struttura, cioè, entra in "risonanza" con il moto impresso. Continuando a incrementare la frequenza, l'oscillazione della struttura invece diminuisce, anche drasticamente, risultando la struttura stessa sempre meno sollecitata; di contro, tornando a diminuire la frequenza, appena questa si riavvicina al valore di 1 Hz si ripresenta il fenomeno della "risonanza".

Ovviamente, una variazione della rigidezza e/o della massa del modello comporta anche una variazione della frequenza relativa alla "forma di oscillazione libera" e, quindi, della corrispondente frequenza di "risonanza". È quanto si può facilmente mostrare anche con il modello in esame, ad esempio incrementando la massa con due angolari di identico peso (22 grammi), appoggiati simmetricamente su due traversi della intelaiatura di piano, con relativa riduzione – nel caso specifico – della suddetta frequenza da 1 a 0,90 Hz.

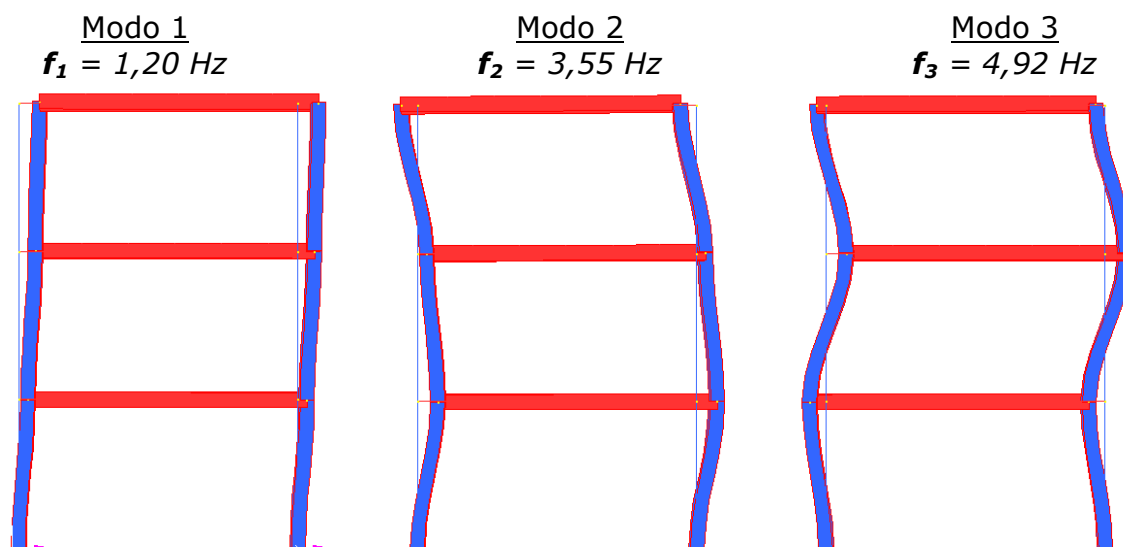
⁴ Numero "tondo" puramente casuale.



Ripetiamo la prova ancora con un modello di struttura intelaiata regolare, ma di tre piani fuori terra, avente quindi n. 3 "gradi di libertà" (3 G.d.L.) – uno per ciascun piano – facendola oscillare sempre nella direzione di maggiore flessibilità, che è anche quella regolare del moto applicato alla sua base.

Questo modello ha perciò tre "modi di vibrare" e, di conseguenza (come sarà mostrato), tre "forme di oscillazione libera" (quelle cioè che si manifestano quando una struttura, spostata in maniera opportuna dalla sua posizione di equilibrio, viene lasciata libera di muoversi), con rispettivi valori di "periodo" (ovvero di "frequenza").

La figura seguente visualizza i suddetti tre diversi modi di vibrare, in rapporto ai diversi valori della "frequenza libera" associata a ciascun modo.



Anche in questo caso l'esperienza consiste nell'imprimere un movimento alla base, variabile ciclicamente nel tempo, la cui frequenza viene incrementata (regolando l'inverter) fino ad intercettare i valori delle "frequenze proprie" corrispondenti ai "modi di vibrare", riconosciute così anche come "frequenze di risonanza" della struttura.

Il **primo modo di vibrare** ("modo 1"), caratterizzato dall'oscillazione in fase di tutti e tre i piani, si "attiva" per il valore di frequenza di risonanza f_1 indicato (1,20 Hz). Aumentando la frequenza del moto alla base, la "risposta" del modello (oscillazione dei solai) si riduce vistosamente ...

... fino a che non ci si approssima al valore f_2 (3,55 Hz) che corrisponde alla frequenza di risonanza del **secondo modo di vibrare** ("modo 2"), nel quale il primo piano risulta in "opposizione di fase" rispetto al terzo, con l'impalcato del secondo piano che è quasi fermo.

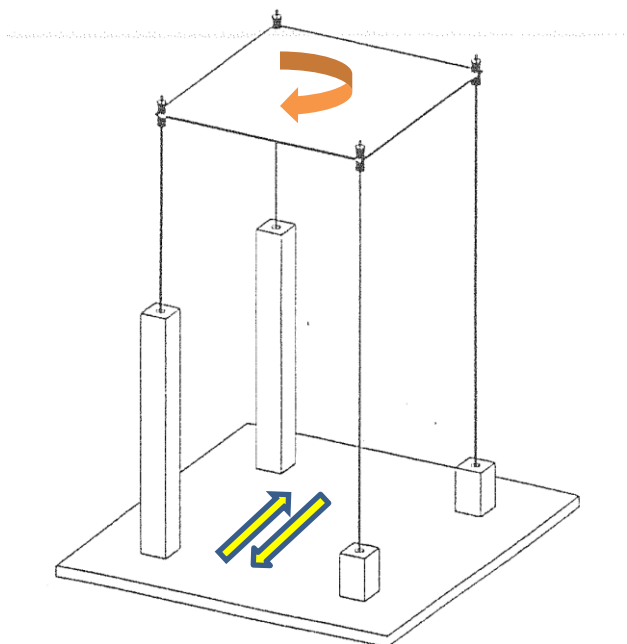
Il fenomeno si ripeterebbe – ovviamente – in prossimità del valore f_3 (4,92 Hz) con la deformata del **terzo modo di vibrare** ("modo 3"); ma la dimostrazione sperimentale del "modo 3" non viene effettuata perché, a seguito delle riparazioni del modello (in una prova una colonna si è rotta⁵), c'è stato un leggero incremento di rigidità flessionale delle colonne e quindi, a parità di massa del modello, anche un leggero aumento delle frequenze di risonanza: nel caso del "modo 3" detto aumento è però tale da compromettere il funzionamento della "tavola vibrante" ancor prima di raggiungere il valore f_3 .

Un "accorgimento didattico" per il superamento di tale inconveniente meccanico consiste nel provvedere ad un calibrato incremento delle masse⁶ su ciascuno dei tre orizzontamenti con sei angolari del medesimo peso (identici a quelli utilizzati nell'esperienza n. 1), disposti simmetricamente a due a due sui traversi delle tre intelaiature di piano. Ne conseguono i seguenti tre nuovi (e più bassi) valori per le tre frequenze di risonanza: $f_1^*=0,90$ Hz, $f_2^*=2,85$ Hz e $f_3^*=4,40$ Hz, rispetto ai quali la sperimentazione può essere ripetuta e completata (senza più rischiare la suddetta compromissione di funzionamento per valori prossimi a f_3^*), anche con visualizzazione del "modo 3" nel quale risulta il secondo piano in opposizione di fase rispetto al primo e al terzo piano.

⁵ Viene da chiedersi perché quella rottura non abbia riguardato tutte le colonne, essendo uguali tra loro. La spiegazione più probabile è che quella uguaglianza è solo teorica, in quanto nella realtà sia il modello che il moto sono affetti da eterogeneità più o meno elevate, per inevitabile differenza tra "modello progettato" e "modello realizzato".

⁶ Ovviamente nelle situazioni reali l'incremento delle masse è in genere da evitare essendo causa di maggiori sollecitazioni.

Ora vediamo le conseguenze che, a seguito del moto oscillatorio, si manifestano su una configurazione strutturale irregolare.



Consideriamo una struttura formata da quattro pilastri (di uguale materiale e sezione), collegati in testa da un impalcato rigido, di cui due più corti – e quindi con una maggiore rigidità – rispetto agli altri due. Per questa struttura “irregolare”, in presenza di moto oscillatorio alla base, diversamente da quello che avverrebbe in presenza di struttura “regolare” (soltanto traslazione del solaio), siccome le forze si distribuiscono in modo proporzionale alla rigidità dei singoli elementi, ai pilastri più corti viene applicata una forza maggiore: il baricentro delle rigidità non coincide con il baricentro delle masse, pertanto si generano effetti rotazionali del solaio (e, quindi, sollecitazioni torsionali nei pilastri).

DAI MODELLI ALLE COSTRUZIONI REALI

Si richiama di seguito l’emblematicità esemplificativa di dati accelerometrici misurati in fase sismica su alcune strutture pubbliche, monitorate in permanenza ai vari impalcati nell’ambito dell’Osservatorio Sismico delle Strutture (OSS), impiantato e gestito dall’ex-Servizio Sismico Nazionale¹⁰, soffermandosi – ad esempio – sulla particolare efficacia del confronto fra dati registrati per due strutture in c.a. a due piani fuori terra (di scuole nel Comune di Forlì), una “regolare” e l’altra “irregolare” (sia in pianta che in alzato), durante la scossa principale del 10 maggio 2000 (M_L 4.4 – M_W 4.8) dello sciame sismico di aprile-maggio 2000 nel faentino-forlivese. Vale la pena di notare che tale scossa non ha provocato danni ai due edifici.



Ampliamento (1993) di scuola a Forlì



Scuola in c.a. (anni '50) a Forlì

Configurazione dei sensori (Ampliamento in c.a. 1993)

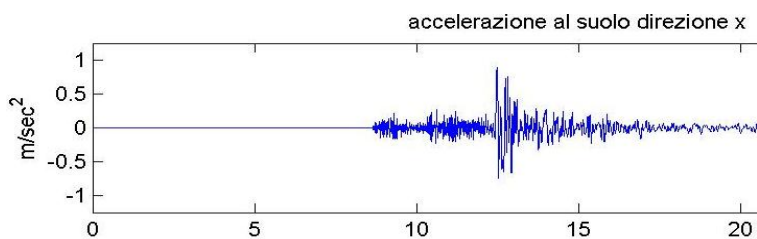
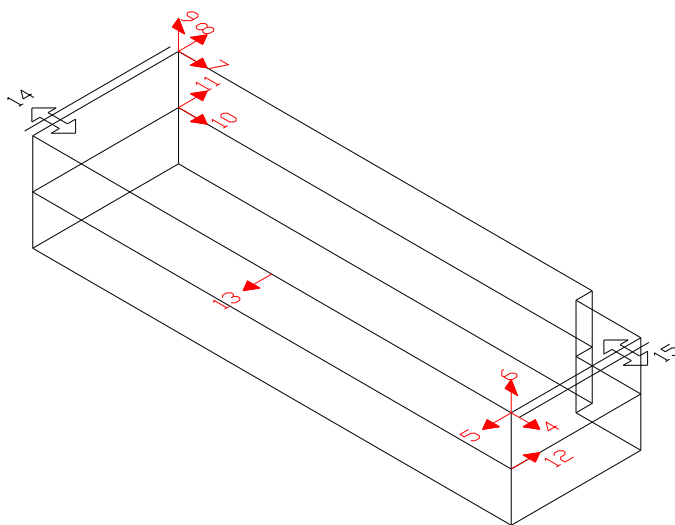
Parametri di "strong motion"
(moto del suolo)

Dir	X (1)	Y (2)	Z (3)
PGA (m/s^2)	0.89	1.25	0.71
PGV (mm/s)	35.0	40.4	9.8
PGD (mm)	2.3	3.6	0.4

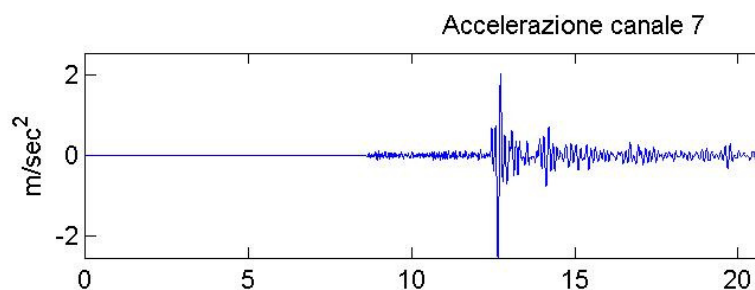
PGA: *picco di accelerazione*

PGV: *picco di velocità*

PGS: *picco di spostamento*

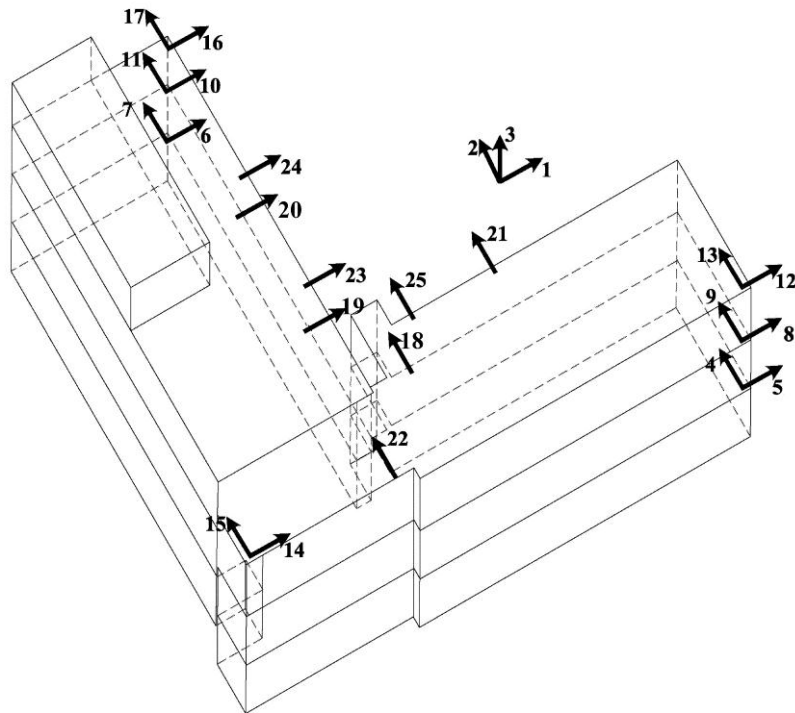


Risposta strutturale (Massime accelerazioni strutturali e fattori di amplificazione dinamica)



Canale	Accelerazione massima (m/s^2)	Fattore di Amplificazione
4	1.97	2.21
5	1.02	0.81
6	0.54	0.76
7	2.56	2.87
8	1.71	1.36
9	0.68	0.96
10	2.08	2.34
11	1.11	0.89
12	0.92	0.74
13	1.34	1.07

Configurazione dei sensori (Scuola in c.a. anni '50)

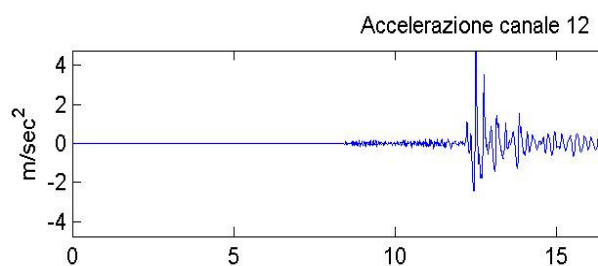
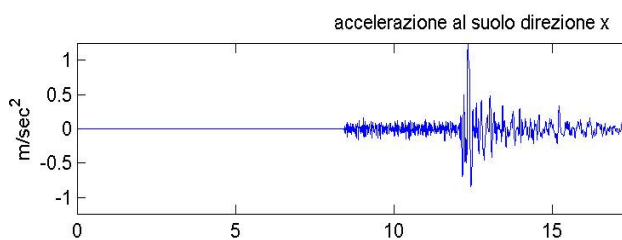


Parametri di "strong motion" (moto del suolo)

dir	X (1)	Y (2)	Z (3)
PGA (m/s^2)	1.24	0.96	0.53
PGV (mm/s)	44.8	37.6	12.8
PGD (mm)	3.2	2.1	0.4

Risposta strutturale (Massime accelerazioni strutturali e fattori di amplificazione dinamica)

Canale	Accelerazione massima (m/s^2)	Fattore di Amplificazione
4	1.89	1.97
5	1.97	1.59
6	0.91	0.73
7	1.03	1.07
8	2.33	1.88
9	2.33	2.42
10	1.10	0.88
11	1.23	1.28
12	4.75	3.83
13	2.87	2.99
14	2.06	1.66
15	2.06	2.15
16	1.82	1.47
17	2.31	2.41
18	1.00	1.04
19	1.20	0.97
20	1.29	1.04
21	1.41	1.47
22	1.39	1.45
23	1.88	1.52
24	2.38	1.92
25	1.18	1.23

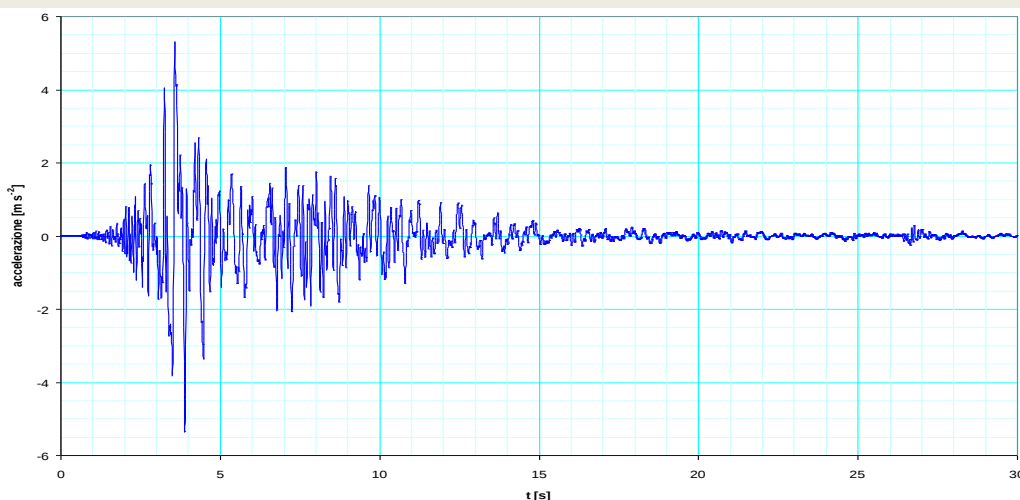


Anche solo da un primo sommario confronto dei suddetti dati registrati in fase sismica e dopo aver constatato una sostanziale parità di "input sismico"⁷ (applicato alla base dei due edifici), si può concludere che:

- per il primo edificio, di struttura regolare e con giunti sismici a norma, ad esempio il valore massimo (2,87) del *fattore di amplificazione* corrisponde al sensore "7" con una entità prossima al valore (2,21) corrispondente al parallelo sensore "4" posizionato sul medesimo impalcato all'altra estremità dell'edificio;
- invece, per il secondo edificio, di struttura irregolare (oltre che in pianta, anche in alzata: avendo un'ala del piano seminterrato "a pilotis"), il *fattore di amplificazione* in corrispondenza del sensore "12" non solo ha valore decisamente più alto (3,83), ma anche significativamente diverso da quelli (rispettivamente pari a 1,66 e 1,47) corrispondenti ai paralleli sensori "14" e "16" posizionati sul medesimo impalcato negli altri spigoli dell'edificio: ciò che evidentemente testimonia di "movimenti torsionali" importanti, oltre che determinanti per potenziali gravi danni in fase sismica in circostanze di probabili terremoti più violenti (di quello registrato il 10 maggio 2000), qualora non si intervenga prima con idonei rimedi.

A tale proposito, per un confronto qualitativo tra due "moti del suolo", sia sui valori delle accelerazioni al suolo (in ordinata) che sulle "durate del moto forte" (in ascissa), si riporta di seguito – per la scossa principale in Abruzzo del 6 aprile 2009⁸ – l'immagine dell'accelerogramma N-S (ad una distanza di 4,9 km dall'epicentro) registrato a L'Aquila dalla stazione AQV⁹ della Rete Accelerometrica Nazionale (RAN)¹⁰.

Abruzzo Earthquake 6/04/09 h. 3.32 recorded at AQV – N-S: PGA = 5,49 m/s² $\equiv$ 0,560 g



⁷ Il che rivela una equivalenza di caratteristiche geotecniche dei due siti ai fini della loro "risposta sismica locale".

⁸ Con valori di "Magnitudo Richter o locale (M_L)" e di "Magnitudo momento (M_W)" rispettivamente di 5.8 e di 6.3.

⁹ Si tenga presente che nell'immagine relativa a tale stazione accelerometrica la scala dei tempi (in ascissa) e quella delle accelerazioni (in ordinata) sono la prima alla stessa scala e la seconda in scala doppia rispetto ai precedenti grafici relativi all'accelerazione al suolo in direzione x (per la registrazione a Forlì dell'evento del 10-5-2000).

¹⁰ Anche la Rete Accelerometrica Nazionale (RAN), così come l'Osservatorio Sismico delle Strutture (OSS), è gestita dall'ex-Servizio Sismico Nazionale, ora denominato *Ufficio rischio sismico e vulcanico* del Dipartimento della Protezione Civile.

Il presente testo è stato condiviso dal **Comitato tecnico scientifico (CTS)**¹¹ nella seduta di mercoledì 4 maggio 2011.

Nota redazionale

Il sito internet della Regione Emilia-Romagna dedicato alla "sismica" è il seguente:

<http://ambiente.regione.emilia-romagna.it/geologia/temi/sismica>

In tale sito, oltre ai recapiti telefonici e di e-mail, sono contenuti documenti e sviluppati temi che, anche per alcuni degli argomenti didattici sopra accennati in via preliminare e sintetica, possono fornire notizie e conoscenze di maggior dettaglio, come ad esempio contenuti nei capitoli relativi a:

>> **La classificazione sismica**

>> **L.R. 30 ottobre 2008, n. 19 "Norme per la riduzione del rischio sismico"**

Invece, tra i **siti internet** nazionali di più diretta utilità, anche per eventuali esigenze di "**glossario**" (su alcuni termini specifici utilizzati nel testo), si segnalano senz'altro i seguenti:

http://www.protezionecivile.it/jcms/it/rischio_sismico.wp

<http://www.terremotiditalia.it/>

<http://itaca.mi.ingv.it/ItacaNet/>

http://itaca.mi.ingv.it/staticdata/doc/GLOSSARIO_ITACA_Ita.pdf

<http://cnt.rm.ingv.it/>

http://portale.ingv.it/portale_ingv/faq/terremoti/

<http://www.ingv.it/terremoti/terremoti-storici/>

<http://emidius.mi.ingv.it/DBMI11/>

¹¹ Il Comitato tecnico scientifico è stato istituito, con deliberazione della Giunta regionale 28 settembre 2009 n. 1430, ai sensi dell'art. 4, c. 1 della legge regionale 30 ottobre 2008, n. 19 "**Norme per la riduzione del rischio sismico**".