

Miglioramento sismico di strutture in muratura: Solaio Compound



Prove sismiche su tavola vibrante:
test su una struttura in muratura
migliorata sismicamente tramite
l'utilizzo del solaio "Compound"



Edificio oggetto di studio:
Case Cicala

Progetto di un modello
da testare su
tavola vibrante

Analisi Modale
con solaio di
copertura tradizionale

Analisi Modale
con solaio di
copertura "Compound"

Scelta del sisma da utilizzare
per il test

Analisi Dinamica con solaio
di copertura tradizionale

Analisi Dinamica con solaio
di copertura "Compound"

Prove sismiche:
confronti in termini di
accelerazione e spostamenti

Conclusioni

Edificio oggetto di studio: Case Cicala

Le Case Cicala sono l'esempio più interessante e tipologicamente più completo di edilizia di fine '800 a Messina e sono fra le poche che hanno resistito al terremoto del 1908.

L'edificio si trova in **zona sismica di prima categoria con suolo di fondazione di tipo B** (Testo Unico, OPCM 3274).



Le **Case Cicala** sono costituite da due stecche di cellule a schiera di 5m x 6m. Si vuole concentrare l'attenzione su una parte dell'edificio che sia rappresentativa di questo e che possa essere studiata in dettaglio senza appesantire l'onere computazionale. Scopo dell'analisi è la realizzazione di un modello migliorato sismicamente che possa essere testato in campo dinamico mediante l'utilizzo della tavola vibrante del centro di ricerche ENEA.

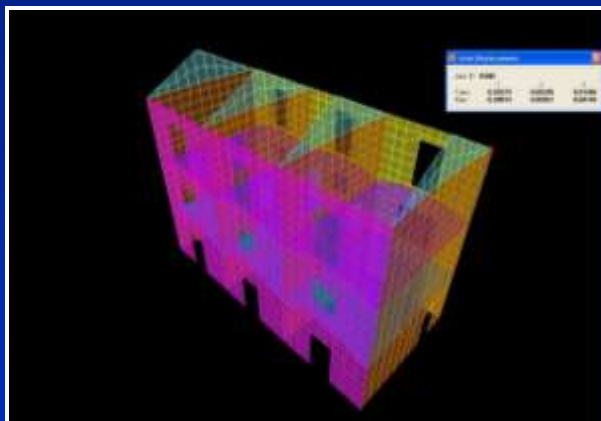
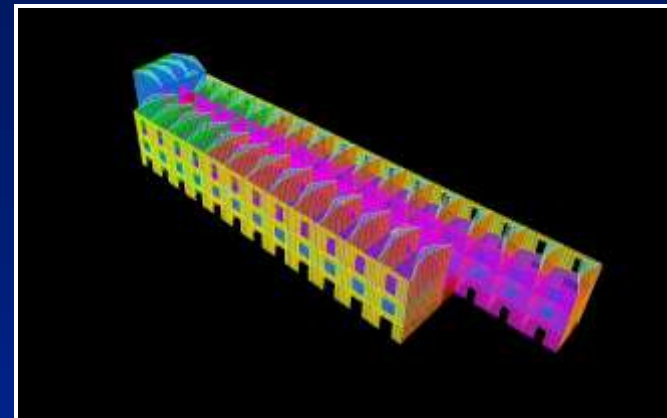


Le Case Cicala appartengono ad una tipologia di edifici che rappresenta una sovrapposizione di alcuni caratteri distintivi di un tipo edilizio base, le case a schiera, e di uno specialistico, il palazzo. Le chiusure verticali del primo piano sono “a sacco” mentre i piani rimanenti sono in muratura a due e tre teste. Le chiusure orizzontali intermedie sono costituite da volte a botte mentre quelle di copertura sono realizzate con semplici strutture isostatiche in legno.



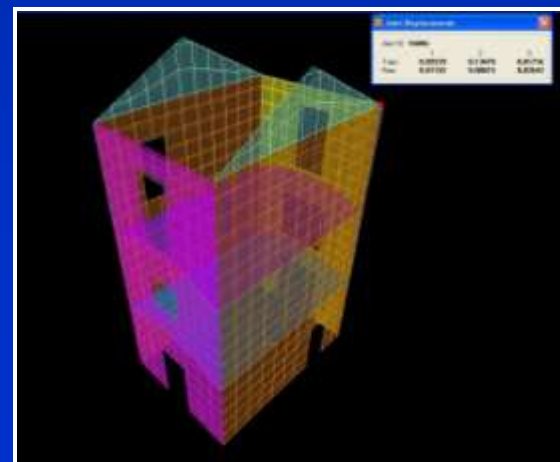
Progetto del modello da testare

La struttura dell'intero edificio è modellata con un programma agli elementi finiti (F.E.M.), SAP 2000. Vengono eseguite poi delle analisi con lo Spettro di Risposta dimostrando che gli spostamenti delle ultime tre celle sono simili a quelli delle tre celle isolate dal resto della struttura.

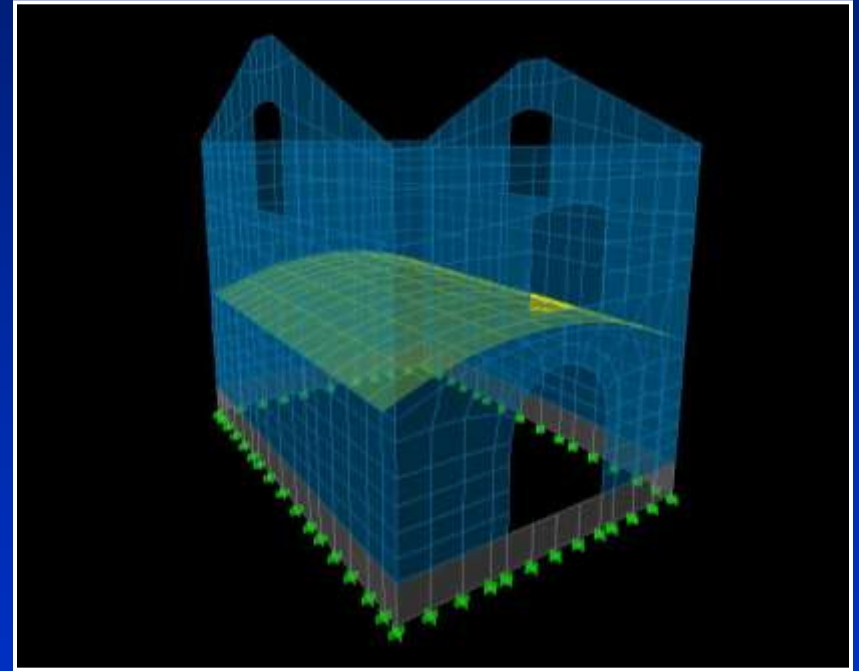


Infine, visto che gli spostamenti di una singola cella non differiscono di molto da quelli delle tre cellule, si può affermare che il modello definitivo oggetto di studio (una cellula) è rappresentativo dell'intero edificio.

	U_x	U_y	U_z
Intera	0.0958	0.0802	0.0158
Tre	0.0928	0.0825	0.0147
Una	0.0924	0.1347	0.0171

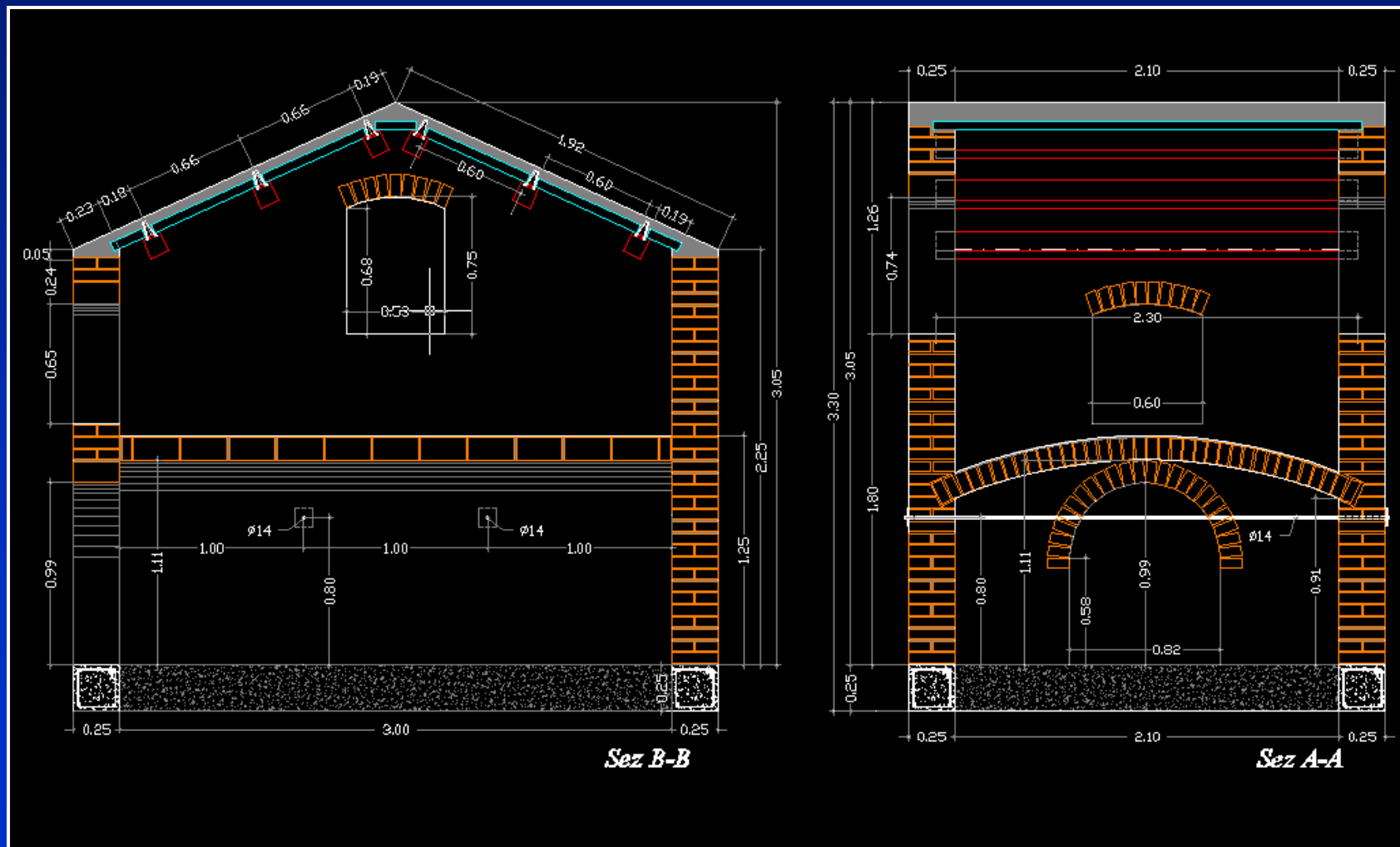


La tavola vibrante del centro ENEA ha dimensioni 4m x 4m e possiede 6 gradi di libertà. Riesce a raggiungere accelerazioni di 3g con una massa di 10 ton avente baricentro ad 1 m di altezza.



Tenendo conto delle dimensioni della tavola si decide di realizzare un modello in scala 1:2 degli ultimi due piani della singola unità abitativa.

Il miglioramento sismico viene ottenuto tramite la sostituzione della copertura con un **soffitto Compound**. Inoltre, per tenere conto degli effetti spingenti della volta, si inseriscono due tiranti in acciaio opportunamente dimensionati.





Il modello viene realizzato, dalla ditta Coperlegno, con muratura a due teste, volta a botte ad una testa e copertura costituita da “solaio Compound”.
 Alla base viene realizzato invece un cordolo in c.a. che ha funzione di interfaccia con la tavola vibrante.



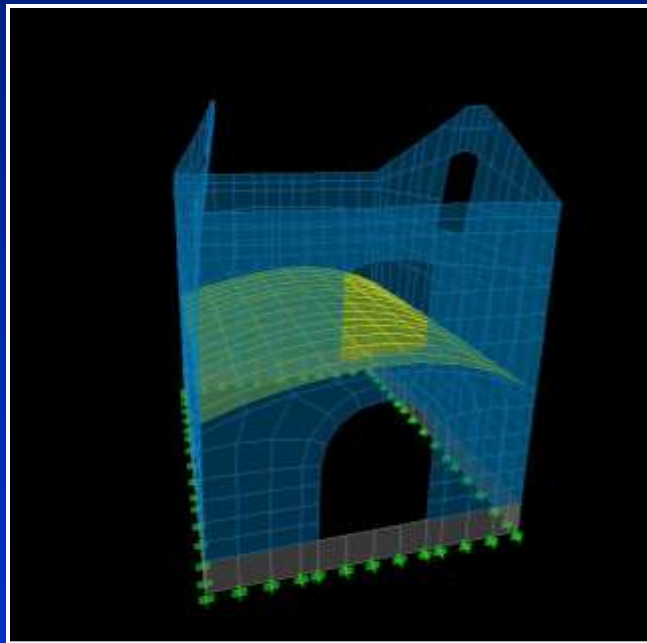
Caratteristiche della muratura (fornite da Coperlegno)

g [N/m ³]	E [N/mm ²]	G (*) [N/mm ²]	n (*) -
17650	8000	3200	0.25

(I valori () sono ottenuti come da normativa)*

Analisi Modale

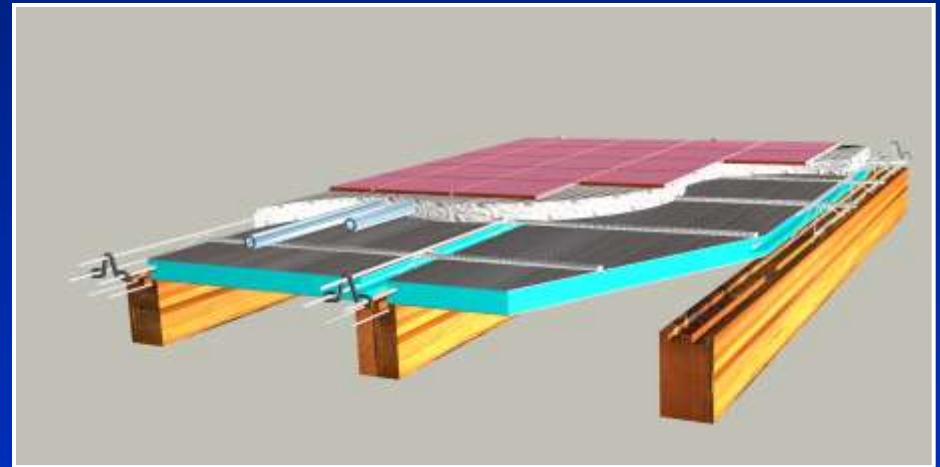
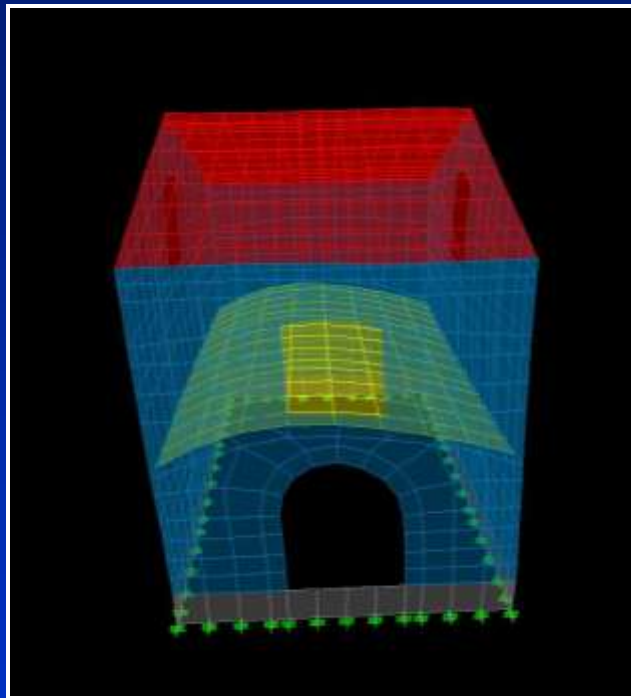
La **copertura tradizionale** è modellata utilizzando dei carichi concentrati in corrispondenza degli appoggi delle travi portanti sulla muratura. In questo caso, non essendo possibile realizzare un vincolo di incastro, non si riesce ad ottenere un effetto irrigidente sulle murature.



Con l'ausilio di SAP 2000 vengono analizzati i modi di vibrare della struttura. Si nota dal primo modo come la sommità delle pareti si muovono indipendentemente l'una dall'altra.

Modo	T (sec)	w (Hz)	Massa	Direz.
1°	0.029	34.01	38%	x
2°	0.018	55.44	5%	z
3°	0.015	64.39	40%	y

Il solaio di copertura “Compound” offre invece la possibilità di irrigidire la struttura (effetto scatolare) grazie alla presenza di una soletta Collaborante che completa ed omogeneizza il solaio creando una sorta di piastra bidirezionale monolitica. Riduce inoltre le masse in gioco grazie all’utilizzo del Pannello Compound, che ha funzione di cassero isolante alleggerito.

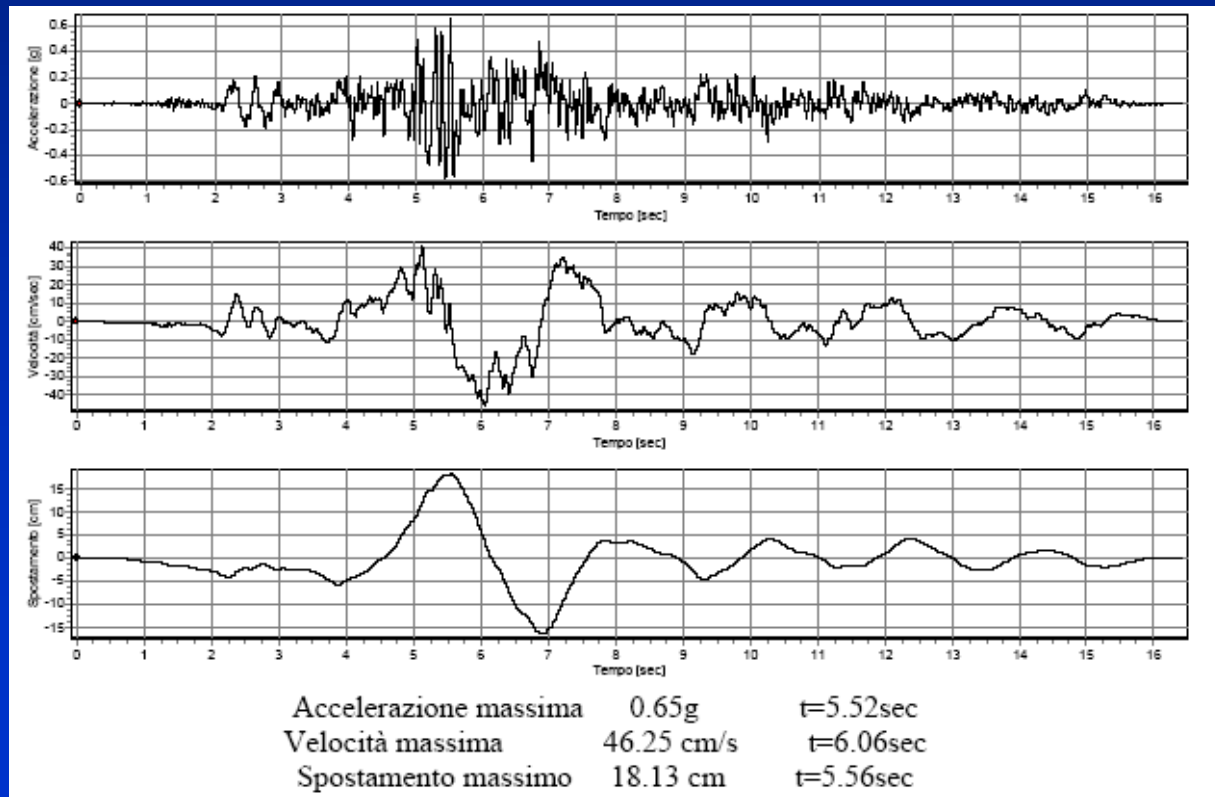


Modo	T (sec)	w (Hz)	Massa	Direz.
1°	0.021	47.54	70%	x
2°	0.016	59.99	7%	z
3°	0.014	67.65	62%	y

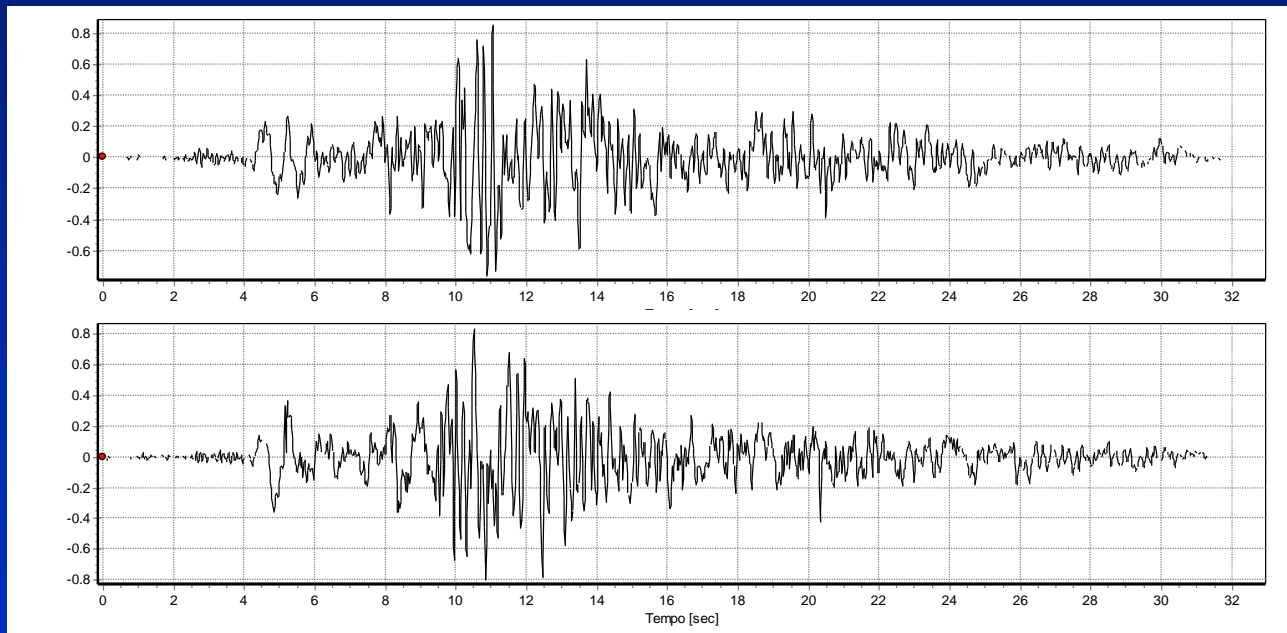
Scelta del sisma

Già da una semplice analisi modale si vede un miglioramento del comportamento dinamico della struttura con l'utilizzo del Solaio Compound.

La Normativa prevede diversi tipi di analisi. Fra questi si sceglie di utilizzare l'*analisi dinamica non lineare*, ovvero l'integrazione diretta dell'equazione del moto e l'utilizzo di accelerogrammi. Bisogna scegliere quindi una forzante sismica adatta al modello, cioè quella, fra le tante, che da maggiori sollecitazioni alla struttura. Si possono scegliere accelerogrammi compatibili con lo spettro di risposta di Normativa o accelerogrammi registrati. Tra questi ultimi si prendono in esame quelli registrati in prossimità dell'epicentro (Near Source).

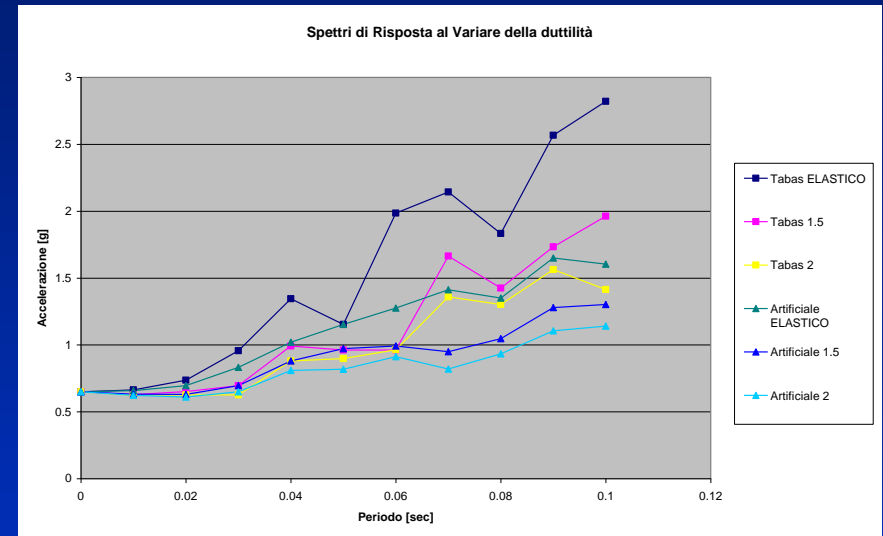
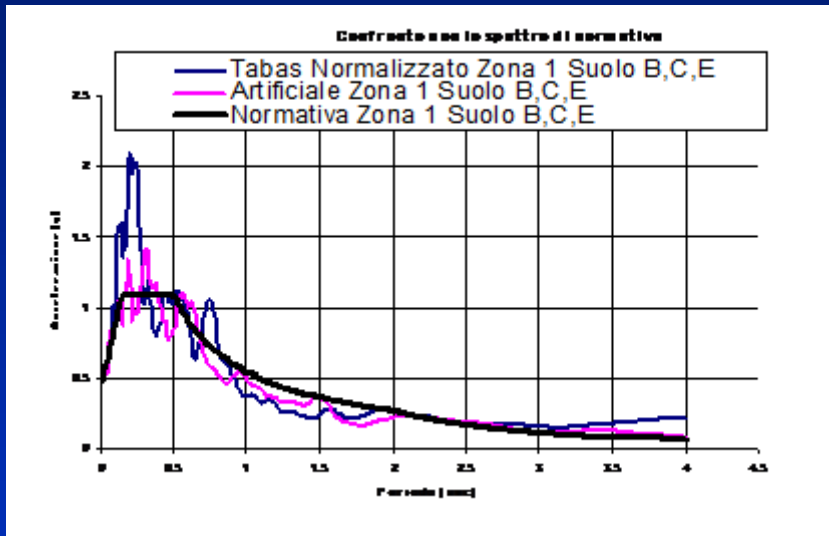


Vengono effettuate delle analisi dinamiche con due componenti orizzontali del sisma. Tutte le coppie di accelerogrammi vengono scalate nel tempo di un fattore $1/(2)^{1/2}$ e nell'ampiezza con un fattore tale da avere un'accelerazione massima di 0.1g. La componente, tra le due, con accelerazione massima è stata applicata nella direzione x (laterale) del modello, la direzione del primo modo.



Si riportano in figura le componenti orizzontali di un sisma registrato.

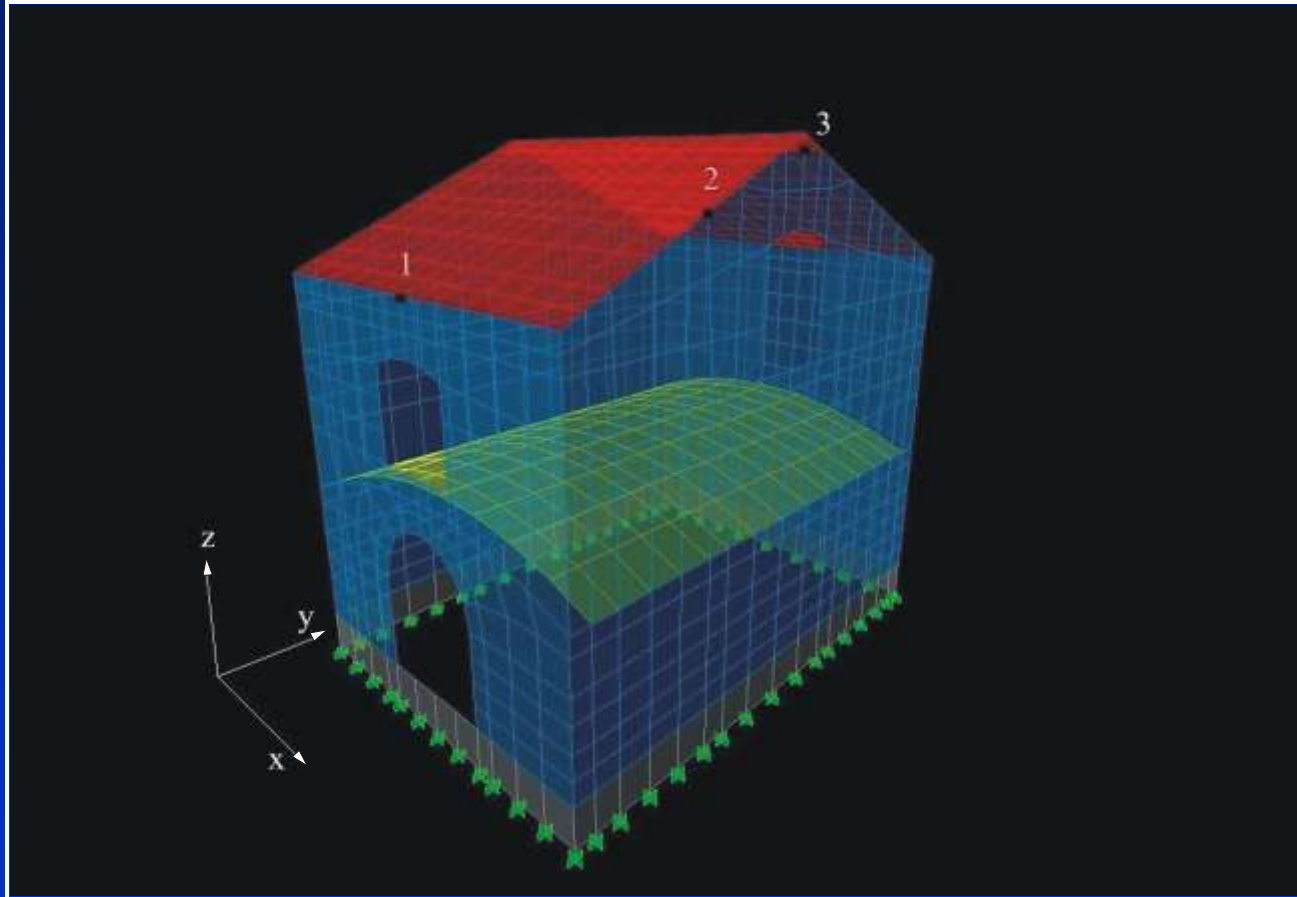
Dalle numerose analisi effettuate sul modello matematico, confrontando gli spostamenti ottenuti, si sceglie il sisma registrato a Tabas, in Iran, il 16 Settembre del 1978 (PEER STRONG MOTION DATABASE RECORD. PACIFIC ENGINEERING). Questa scelta può essere già prevista osservando gli spettri di risposta degli accelerogrammi; anche al variare della duttilità “vince” il sisma “Tabas”.



La struttura, danneggiandosi, diminuisce la sua rigidità e di conseguenza il suo periodo aumenta. Dal grafico su riportato si nota che “Tabas” presenta una forzante maggiore rispetto all’accelerogramma artificiale al crescere del periodo.

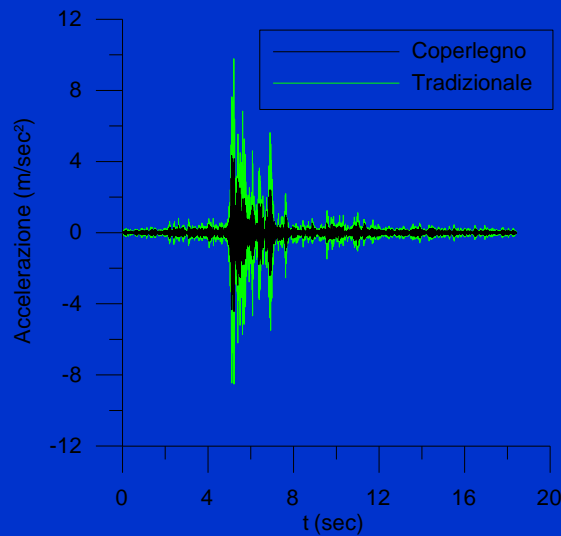
Analisi Dinamica

Le analisi dinamiche sul modello matematico forniscono le storie temporali dell'accelerazione e degli spostamenti dei punti ottenuti dalla discretizzazione del F.E.M. Si scelgono, sui due modelli, un punto di controllo sul prospetto frontale e due sul prospetto laterale destro come indicato in figura.



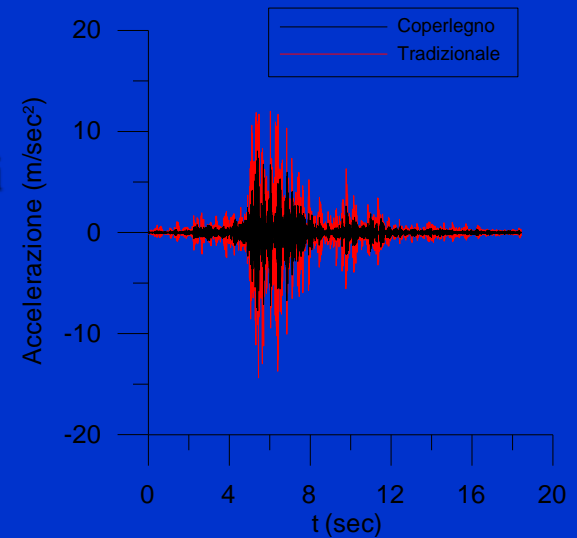
Confronti in termini di accelerazione

E' subito evidente da un primo controllo in termini di accelerazione che il sistema Coperlegno, con Soletta Collaborante e Pannello Compound, riduce notevolmente le accelerazioni rispetto ad un sistema di copertura tradizionale.

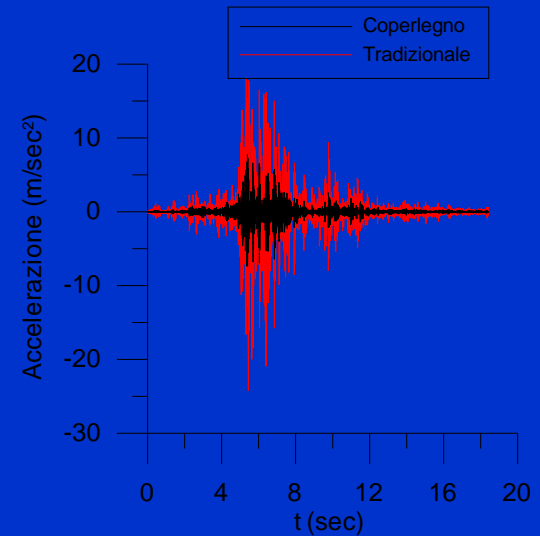


Punto 1 Direzione y

E' ben noto infatti che il peso gioca un ruolo fondamentale nelle azioni di tipo dinamico: più basso è il peso più si migliora il comportamento della struttura. E' quindi opportuno sottolineare che, nella generalità dei casi, le coperture tradizionali raggiungano pesi notevolmente superiori.

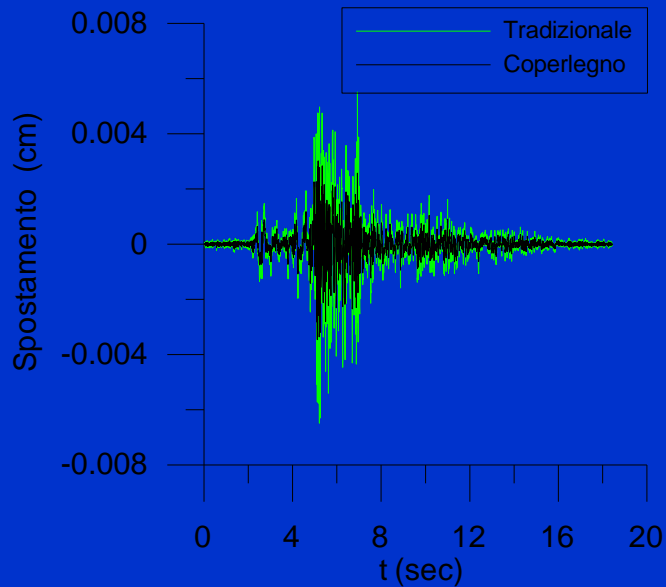


Punto 2 Direzione x

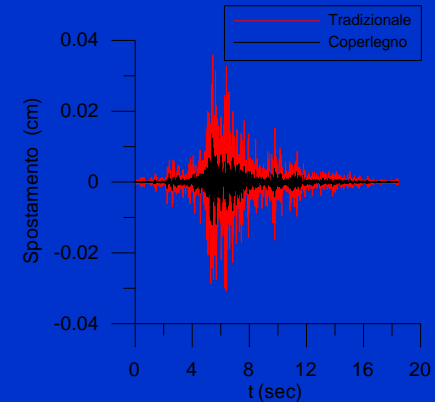


Punto 3 Direzione x

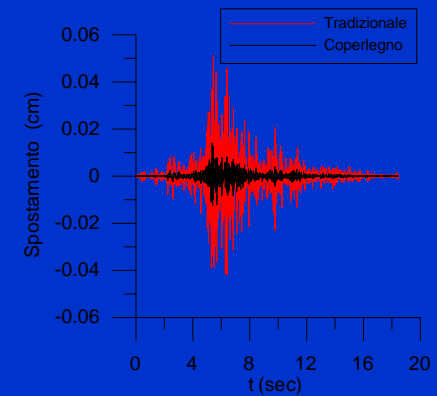
Confronti in termini di spostamenti



Punto 1 Direzione y



Punto 2 Direzione x



Punto 3 Direzione x

Anche in termini di spostamento il sistema a “piastra alleggerita” Coperlegno dà ottimi risultati, come d'altronde era già prevedibile dalle precedenti analisi in termini di accelerazioni.

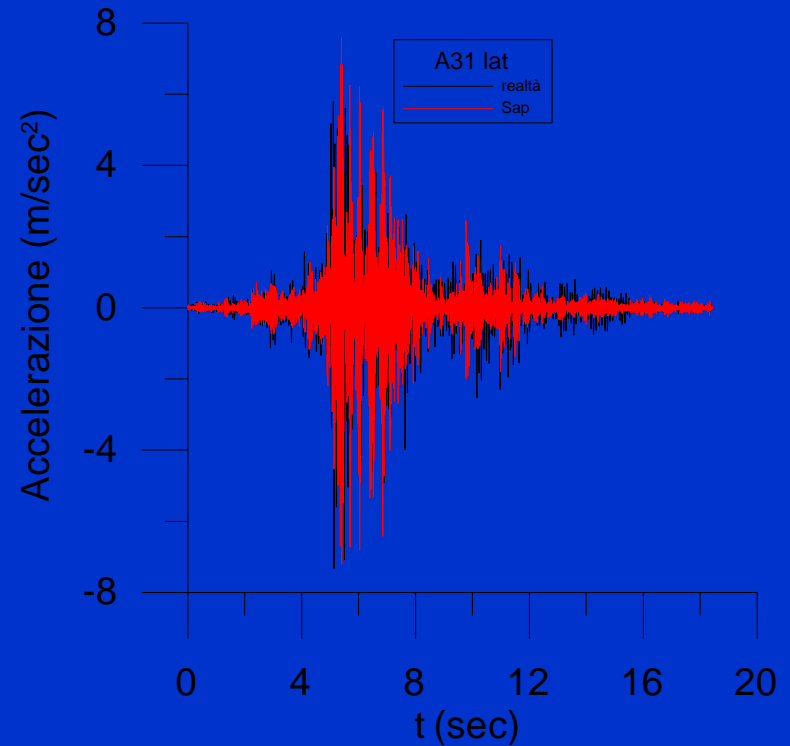
Prove su Tavola Vibrante

Dopo la modellazione al computer il modello viene testato sulla tavola vibrante del centro di ricerche ENEA della Casaccia nell'ambito del progetto Campec.

Il modello è sottoposto a diverse serie di prove con gli stessi accelerogrammi utilizzati nell'analisi dinamica non lineare effettuata sul modello matematico.

In una prima serie si arriva fino ad un picco massimo assoluto (PGA) di **0.5g** in corrispondenza del quale il modello inizia a fessurarsi.

Si ricorda che per un terreno di tipo B,C,E in zona sismica di prima categoria la Normativa prescrive l'utilizzo di un PGA pari a 0.44g.

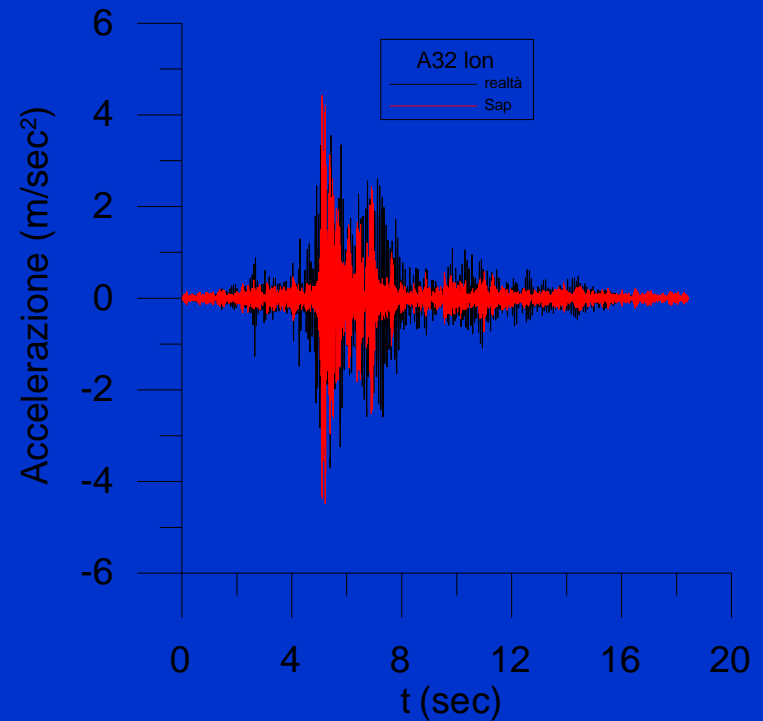
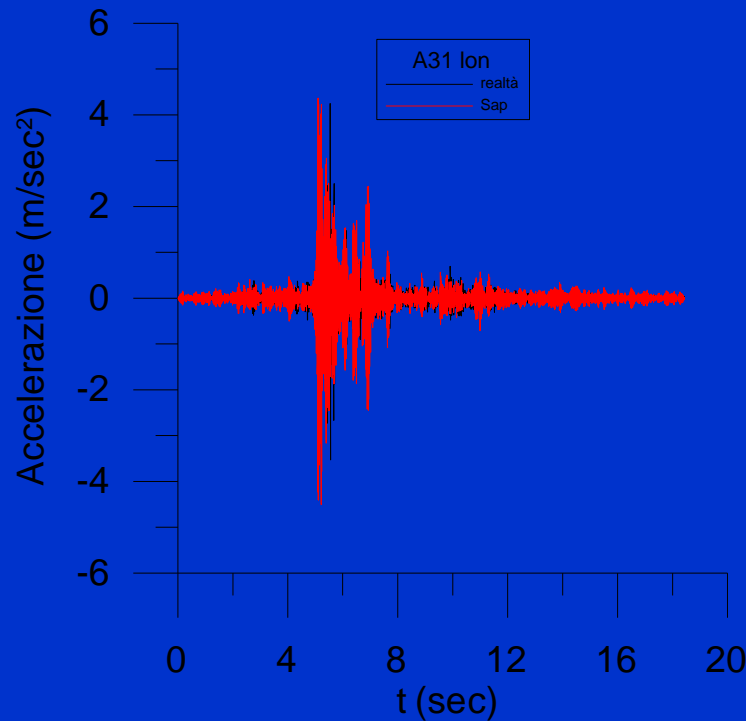


In figura si riporta la posizione dei sensori che misurano le storie temporale delle accelerazioni durante la prova, nei grafici invece si confrontano le previsioni del modello matematico con i dati reali.

Dai primi risultati dell'analisi su tavola vibrante si ottiene che i dati sperimentali confermano quanto previsto dall'analisi numerica:

il sistema Coperlegno è dunque un ottimo sistema per la riduzione delle accelerazioni e degli spostamenti di strutture sottoposte ad azioni sismiche.

I dati definitivi comunque sono ancora in fase di elaborazione.



Successivamente il modello reale viene rinforzato con l'utilizzo di compositi fibro-rinforzati (FRP) e si arriva ad un valore di **PGA** pari a **1.7g** mostrando ancora il buon funzionamento del tetto e della struttura in generale.



Infine, solo per permettere alle telecamere RAI di riprendere alcune sequenze spettacolari, si sottopone il modello ad un sisma con picco massimo di $2g$, portandolo a distruzione.



Dalle foto è possibile notare come, nonostante il sisma distruttivo, il solaio di copertura rimane completamente integro. Questo grazie al sistema di scorrimento controllato fra trave in legno e getto di cls, che permette al sistema di dissipare notevoli quantità di energia.