



*Dr. Ario Ceccotti  
Prof.dr.eng.,  
Director CNR-IVALSA  
Trees and Timber Institute  
Florenz, Italien*

## **Legno: il materiale da costruzione affidabile per gli edifici sismo-resistenti**

**Holz – der Baustoff für erdbeben-  
sicheres Bauen!**

**Wood the construction material for  
earthquake-resistant buildings**

**Documento in italiano**



## Legno: il materiale da costruzione affidabile per gli edifici sismo-resistenti

L'ingegneria sismica è una disciplina relativamente recente, definibile come lo studio di sistemi strutturali aventi un prestabilito livello di sicurezza nei confronti del terremoto. Essa costituisce la base per lo sviluppo e l'adozione di normative antisismiche in grado di stabilire i livelli di sicurezza richiesti in un paese caratterizzato da rischio sismico più o meno elevato, fissare i criteri generali di progettazione nonché i metodi per raggiungerli. Gran parte dell'attenzione in materia, di fatto, è stata finora rivolta soprattutto alle costruzioni di cemento armato e di acciaio, dimenticando o comunque relegando a un ruolo marginale materiali costruttivi che sono alla base dell'edilizia tradizionale di molti paesi, quali il legno e la muratura.

Eppure anche in passato la protezione dai terremoti avveniva con un certo successo. Paesi come ad esempio il Giappone, la Turchia o i paesi balcanici, sono da sempre teatro di ripetuti terremoti catastrofici, e nonostante ciò risultano ricchi di strutture tradizionali sopravvissute nel corso dei secoli anche alle scosse più violente. Ciò vale non solo per gli edifici monumentali, per i quali presumibilmente all'epoca della costruzione sono stati utilizzati i materiali e le tecnologie costruttive migliori, ma anche per semplici edifici di civile abitazione, anche di diversi piani, arrivati intatti ai nostri giorni.

Gli ingegneri, gli architetti, i mastri e i carpentieri dei secoli passati conoscevano bene le regole dell'arte del costruire e le tecniche di prevenzione antisismica, che si basavano sull'esperienza e sulla sensibilità, mancando l'ausilio dei moderni metodi di analisi dinamica delle strutture.

L'attenta osservazione del comportamento degli edifici al verificarsi dei terremoti ha portato gradualmente alla concezione di sistemi costruttivi nei quali si evidenzia sia la profonda conoscenza del comportamento dell'intero organismo strutturale nei confronti delle azioni sismiche sia l'attenta previsione dei più piccoli particolari costruttivi.

Un caso esemplare è osservabile nell'isola greca di Lefkas [1], caratterizzata da un elevato rischio sismico. A seguito di un terribile terremoto che la distrusse completamente nel 1825, le autorità inglesi che allora la governavano promulgarono norme antisismiche per le costruzioni, stabilendo nuove regole sia sui materiali che sui sistemi costruttivi da utilizzare. Il risultato di queste norme fu la realizzazione di edifici multipiano con le pareti esterne del piano terra di muratura e pietrame. Al di sopra di queste i piani successivi venivano realizzati con telai di legno formati da elementi orizzontali e verticali e irrigiditi da elementi diagonali e da angolari di rinforzo curvati, anch'essi di legno (Figura 1).

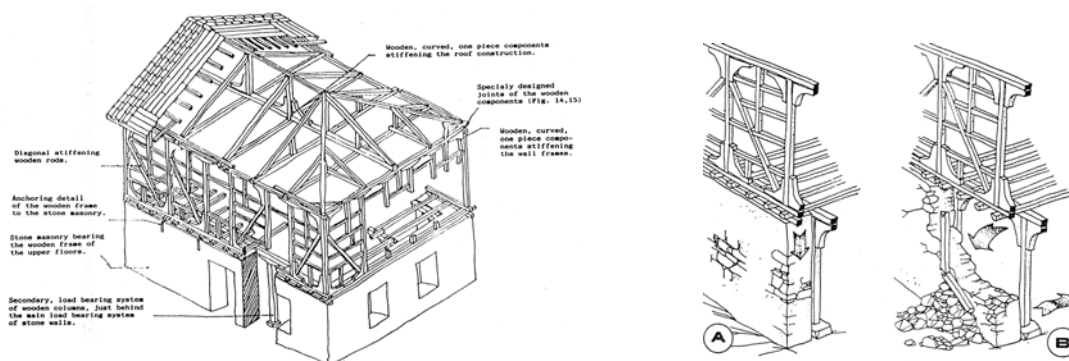


Figura 1: Vista isometrica degli edifici antisismici tradizionali a struttura di legno dell'isola di Lefkas (Grecia) e, a sinistra, comportamento della struttura in caso di sisma di elevata intensità [1].

La particolarità di questi edifici è che subito all'interno, parallelamente alle pareti di muratura del piano terra, veniva realizzato un secondo sistema portante di pilastri lignei che sorreggeva anch'esso l'intelaiatura di legno formante i piani superiori. Con questo sistema gli eventi sismici di moderata intensità venivano contrastati dalle caratteristiche di resistenza delle pareti di muratura, mentre i terremoti di forte intensità potevano provocare anche crolli parziali di queste ultime senza determinare il crollo dell'intero edificio, che veniva ancora sorretto dai pilastri interni e poteva essere successivamente riparato ricostruendo le murature danneggiate.

In tal modo veniva applicato un principio ancora oggi validissimo: i differenti materiali da costruzione presentano ciascuno un proprio comportamento sotto l'effetto del terremoto e da tale diversità si può trarre vantaggio, realizzando un edificio in cui la deformazione sismica di sottostrutture staticamente collaboranti, costruite con materiali differenti, avvenga in modo separato e indipendente.

Ancora oggi nell'isola di Lefkas si possono trovare edifici realizzati con questo sistema costruttivo, sopravvissuti intatti a eventi sismici frequenti e spesso distruttivi.

Altro esempio è rappresentato dal sistema costruttivo Pombalino [2] sviluppatosi a Lisbona nel diciottesimo secolo. A seguito del terremoto verificatosi nel 1755 a Lisbona, che distrusse interamente la città, il Marchese di Pombal, primo ministro all'epoca, radunò un gruppo di ingegneri e affidò loro il compito di stabilire quale fosse la tecnologia costruttiva antisismica migliore da adottare per la ricostruzione. Il risultato fu la scelta di un sistema costruttivo formato da una struttura intelaiata tridimensionale a gabbia di legno (nota come *gaiola*, ossia appunto gabbia) con le pareti (*parede pombalina*) costituite da intelaiature di legno formate da elementi verticali e orizzontali a formare una maglia quadrata, con all'interno di ogni quadrato una controventatura interna a Croce di S. Andrea anch'essa di legno. L'intelaiatura veniva riempita nei triangoli vuoti con l'inserimento di porzioni di muratura formata da piccole pietre e pezzi di mattone, e infine la parete veniva intonacata a nascondere totalmente l'intelaiatura di legno. Con questo sistema, mediante il quale fu possibile realizzare edifici fino a cinque piani di altezza, venne ricostruito tutto il centro di Lisbona che in onore del Marchese venne chiamato *Baixa Pombalina* (*Baixa* era l'antico nome del quartiere).

L'aspetto interessante di questo sistema costruttivo, risiede proprio nel fatto che esso fu scelto appositamente come sistema costruttivo antisismico. Probabilmente tale scelta fu determinata dall'osservazione del comportamento degli edifici realizzati in maniera simile in un quartiere vicino alla *Baixa*, il quartiere di *Alfama*, che secondo le cronache non fu interamente distrutto dal terremoto del 1755.

Questi edifici costruiti nel XVIII secolo sono giunti in perfette condizioni fino ai giorni nostri e costituiscono la sede prestigiosa di uffici, banche e negozi. Attualmente la loro sopravvivenza è legata, più che a problemi di rischio sismico, a problemi di durabilità conseguenti all'intervento dell'uomo. Infatti tutti questi edifici hanno fondazioni massicce impostate su pali di legno di grosso diametro che, essendo completamente immersi nell'acqua, non hanno mai presentato problemi di durabilità<sup>1</sup>. Recentemente le opere per la realizzazione di una nuova linea della metropolitana, hanno modificato il livello della falda sotterranea, abbassandolo in prossimità di alcuni edifici e facendo sì che alcuni pali si siano venuti a trovare in condizione di solo parziale immersione e determinando in tal modo le condizioni di umidità favorevoli per l'instaurarsi di pericolose situazioni di degradamento del legno.

L'attenta e ragionata osservazione dei danni occorsi al patrimonio edilizio a seguito del verificarsi di eventi sismici, oltre a essere sempre stata il metodo maggiormente utilizzato nel passato per la realizzazione di sistemi strutturali più sicuri, costituisce ancora oggi una premessa indispensabile a tutti gli studi di ingegneria sismica.

A questo proposito una interessante ricerca è stata svolta da R. Langenbach [3] il quale ha ispezionato attentamente i danni occorsi agli edifici a seguito del terremoto avvenuto nella regione della Marmara in Turchia nel 1999 presso la città di Izmit (noto come terremoto di *Kocaeli*, magnitudo 7,6), che ha purtroppo causato la morte di circa trentamila persone, con epicentro a circa 200 km a est di Istanbul. In alcune zone questo terremoto ha causato la distruzione di più di un terzo degli edifici residenziali, per la maggior parte di cemento armato. Nel cuore della regione maggiormente colpita dal sisma si trovano anche insediamenti di edifici tradizionali chiamati in turco *Himiş*, che invece sono quasi tutti rimasti praticamente intatti.

Si tratta di edifici a pareti portanti formate da una intelaiatura di legno di elementi verticali, orizzontali e diagonali e riempimento di muratura, non dissimili dalle pareti Pombaline di cui si è accennato in precedenza. La muratura è spesso costituita da mattoni posti a spina di pesce, o in alternativa da pietre di piccole dimensioni immerse in un letto di malta di calce o di argilla e limo. Gli orizzontamenti sono a struttura di legno e con questo sistema vengono realizzati generalmente edifici di modeste dimensioni da uno a tre piani. Le costruzioni *Himiş* ebbero origine in Turchia durante il periodo Ottomano e il loro uso è proseguito fino a che non sono state quasi completamente soppiantate dai moderni edifici a intelaiatura di c.a. e pareti di tamponamento di mattoni forati.

Dalle indagini effettuate (Gülhan e Güney, 2000) a seguito del terremoto nella provincia di Gölcük, una delle città colpite dal sisma, si è rilevato che degli 814 edifici di cemento armato da 4 a 7 piani ispezionati, 60 erano crollati o risultavano pesantemente danneggiati, mentre solamente 4 dei 789 edifici tradizionali da due a tre piani erano crollati o gravemente danneggiati. I morti negli edifici di c.a. furono 287, mentre negli edifici tradizionali furono solamente 3. Nel cuore della zona colpita, nella provincia di Adapazari, dove le condizioni del terreno erano peggiori, delle 930 strutture di cemento armato, 257 crollarono o furono pesantemente danneggiate e 558 furono moderatamente danneggiate, mentre non vi fu nessun crollo o danno notevole nei 400 edifici tradizionali ispezionati e solo 95 furono moderatamente danneggiati.



Figura 2: Edificio di cemento armato crollato presso la città di Adapazari a seguito del terremoto di Izmit, accanto ad una Casa *Himiş* sopravvissuta intatta [3]

L'osservazione ravvicinata, soprattutto del lato interno delle pareti delle case tradizionali *Himiş*, fornisce indicazioni interessanti per capirne il funzionamento nel corso dell'evento sismico. È risultato subito chiaro che la parete formata dall'intelaiatura di legno e dal riempimento di muratura ha risposto alla sollecitazione sismica attraverso un continuo «lavorio» lungo le interfacce fra i due materiali, dissipando in tal modo una enorme quantità di energia.

La manifestazione di questa “attività” della parete è osservabile dalle fessurazioni sull’intonaco all’interno delle pareti, che “disegnano” l’intelaiatura di legno della parete, mentre all’esterno, dove spesso la parete è nuda, non è visibile alcun danno. Solo raramente si sono verificate espulsioni del riempimento che, comunque, non hanno comportato grossi danni alla parete e quindi all’edificio, a causa della suddivisione del riempimento in piccole porzioni grazie alla fitta intelaiatura di legno.

Ciò ha rappresentato una differenza molto importante rispetto alle pareti di tamponamento degli edifici multipiano di c.a., in cui il “riempimento” dei telai con una tamponatura di mattoni forati ha effettivamente contribuito a irrigidire notevolmente le pareti, aumentando in tal modo le sollecitazioni sismi che, ma non ha preso parte minimamente alla dissipazione dell’energia prodotta dal sisma, avendo il tamponamento un comportamento spiccatamente fragile.

Inoltre, negli edifici *Himiş* viene utilizzata una malta di calce o di argilla che non si oppone allo scorrimento fra gli elementi della muratura e fra questi e l’intelaiatura di legno, a differenza della malta cementizia rigida e fragile che si fessura subito perdendo la sua funzione di collegamento fra gli elementi costituenti della parete di tamponamento.



Figura 3: A sinistra: esterno di una parete di una casa *Himiş* all’interno della zona più colpita dal terremoto, un mese dopo l’evento. A destra: la stessa parete visibile dall’interno dove si notano le fessurazioni nell’intonaco causate dal terremoto [3].

In definitiva, riprendendo le osservazioni di Langenbach, la differenza fra i due sistemi costruttivi sta nel fatto che le pareti degli edifici tradizionali *Himiş* non possiedono molta “resistenza” ma hanno una grande “capacità”, mentre gli edifici in cemento armato osservati hanno dimostrato una buona “resistenza” ma scarsa “capacità”. In altri termini, le pareti poco rigide degli edifici tradizionali turchi risultano meno sollecitate dall’azione sismica e rispondono ad essa “assecondandola” - per così dire - oscillando e dissipando in tal modo una notevole quantità di energia attraverso una fessurazione diffusa in tutta la parete e una continua interazione tra gli elementi lignei della parete e le porzioni di muratura in esso confinate. Questa continua azione di deformazione e scorrimento aumenta lo smorzamento isteretico della struttura e ne aumenta il periodo proprio rendendola in tal modo meno suscettibile all’azione sismica. È interessante notare come una struttura formata nei suoi componenti da materiale dal comportamento fragile (legno, muratura e malta) funzioni nel suo insieme come un sistema dotato di buona duttilità.

Vale la pena di puntualizzare che non sarebbe corretto a questo punto preconizzare un ritorno alle tecnologie costruttive tradizionali in zona sismica e abbandonare i moderni sistemi costruttivi a telaio di c.a. Infatti occorre innanzitutto sottolineare che la maggior parte dei crolli verificatisi a seguito del terremoto di Kocaeli in edifici di c.a. sono imputabili a cattiva progettazione o - più spesso - a carenze in fase di realizzazione (utilizzo di materiali scadenti, scorretta esecuzione, assenza di controlli) che sono indipendenti dal materiale e dal sistema costruttivo utilizzato.

Inoltre i fattori che influenzano la resistenza degli edifici alle azioni sismiche sono molteplici e non è possibile affermare che se una data struttura resiste meglio di un'altra sotto l'effetto di un dato evento sismico, ciò si verifichi di nuovo per un qualsiasi altro evento sismico.

Infatti, a seguito del terremoto ripetutosi a distanza di un anno nuovamente in Turchia, nella regione della città di Orta, di intensità minore di quello dell'anno precedente (magnitudo 6,1 della scala Richter), il danno osservato nelle strutture tradizionali *Himiş* è stato pressoché identico a quello rilevato l'anno prima nel terremoto di Kocaeli, mentre il danno osservato negli edifici di c.a. è stato molto minore.

Anche per edifici di concezione e costruzione più recente come gli edifici a struttura di legno realizzati con il sistema nord-americano Platform Frame l'osservazione del comportamento a seguito di eventi sismici di elevata intensità fornisce indicazioni interessanti, soprattutto per quel che riguarda gli edifici multipiano.

I risultati di una indagine effettuata in Canada [4] sul comportamento di questa tipologia di edifici durante terremoti avvenuti nel recente passato in aree dove la loro presenza è diffusa nel territorio, dà risultati più che apprezzabili.



Figura 4: Un condominio di quattro piani fuori terra a Richmond, British Columbia, Canada. Zona sismica di seconda categoria

Dalla Tabella 1 seguente risulta un valore molto basso di vittime rispetto al numero di edifici interessati dal sisma, soprattutto tenendo in considerazione il fatto che la maggior parte di questi edifici non erano “*progettati ingegneristicamente*” ossia erano stati realizzati semplicemente seguendo le indicazioni e prescrizioni costruttive previste dalle norme (cosa possibile in Nord America ed in Canada per edifici di minori dimensioni e importanza) e non sulla base di un progetto strutturale specifico eseguito da un ingegnere.

In particolare nel caso di edifici ad un piano non si sono verificati danni rilevanti per terremoti con valori dell'accelerazione di picco fino a 0,6 g. A seguito del terremoto avvenuto a Kobe (Giappone) nel 1995, il terremoto più forte avvenuto nel recente passato, con valori dell'accelerazione di picco da 0,6 a 0,8 g, di circa 8.000 case costruite con il sistema Platform ad uno o due piani, nessuna ha subito crolli e il 70% non ha subito alcun danno rilevante.

Eppure non sempre le cose sono andate così bene: a seguito degli eventi verificatisi a Northridge, Loma Prieta e Kobe si sono verificati alcuni collassi anche con conseguenze tragiche purtroppo, nel corso di terremoti recenti che hanno “messo in allarme” progettisti, ricercatori e normatori.

Ad esempio, se è vero che nel terremoto di Kobe non sono crollati i moderni edifici per l'edilizia residenziale realizzati con il sistema Platform Frame, è pur vero che c'è stato un certo numero di crolli in edifici di legno di più antica costruzione. Tuttavia, indagandone i motivi, si può osservare che spesso in questi edifici erano presenti manti di copertura molto pesanti (fatto molto pericoloso in zona sismica), realizzati con tegole di pietra o altri materiali pesanti, posti in opera al fine di contrastare il sollevamento del manto di copertura nel caso di altri eventi naturali talvolta catastrofici molto frequenti in quelle zone, ossia i tifoni.

Anche se spesso le cause dei collassi non sono imputabili direttamente a caratteristiche intrinseche del legno come materiale da costruzione, alcuni di questi meritano di essere studiati in maniera approfondita, al fine di capirne le implicazioni sulla progettazione e sulle relative indicazioni presenti nelle normative.

In casi come quello di Figura 6 in cui, a seguito del terremoto di Loma Prieta del 1989, di due edifici identici realizzati con il sistema Platform Frame uno è crollato e l'altro è rimasto praticamente intatto, l'unica spiegazione possibile è la cattiva esecuzione del primo.

È evidente che se, ad esempio, i chiodi di collegamento dei pannelli di compensato o OSB all'intelaiatura delle pareti nell'edificio vengono posizionati a un interasse di 40 cm in luogo dei 15 cm previsti dal progetto, la resistenza delle pareti alle azioni orizzontali si abbatte drasticamente con conseguenze che talvolta possono essere tragiche.

Tabella 1: Comportamento di edifici a struttura di legno nel corso di terremoti avvenuti in passato [4]

Terremoto	Intensità		N° approssimativo di vittime		N° stimato di edifici realizzati con il sistema Platform Frame investiti dal sisma
	Magnitudo Richter (M)	Valore dell'accelerazione di picco al suolo (g)	Totale	In crolli di edifici realizzati con il sistema Platform Frame	
San Fernando CA, 1971	6,7	0,6	63	4	100.000
Edgecumbe NZ, 1987	6,3	0,32	0	0	7.000
Saguenay QC, 1988	5,7	0,15	0	0	10.000
Loma Prieta CA, 1989	7,1	0,5	66	0	50.000
Northridge CA, 1994	6,7	1,0	60	20	200.000
Hyogo-ken Nambu, Kobe, Giappone, 1995	6,8	0,8	6.300	0*	8.000*

\* Riferito ad edifici realizzati con il sistema Platform Frame nell'area investita dal sisma.

La fase di osservazione ragionata del danno sui sistemi strutturali a seguito del verificarsi di eventi sismici, coadiuvato da una attenta valutazione dei dati anche storici disponibili e dalla conoscenza e comprensione del progetto originario, costituisce come si è detto un primo passaggio fondamentale per la comprensione del comportamento nei confronti delle azioni sismiche, sia per edifici di antica costruzione che per sistemi costruttivi moderni.

Tutto ciò però deve essere seguito da una attenta ricerca basata su una seria campagna di prove sperimentali, al fine sia di studiare in maniera approfondita l'influenza sulla resistenza sismica globale della struttura degli elementi che la compongono e dei loro collegamenti, sia infine per lo studio del comportamento sismico di ogni nuovo sistema costruttivo.





Figura 5: Terremoto di Kobe, Giappone, 1995, M=6,8. L'edificio in primo piano di più antica costruzione ha subito danni rilevanti, gli edifici sullo sfondo, moderni e realizzati con il sistema Platform Frame sono rimasti intatti [4].



Figura 6: La fotografia illustra lo stato di due edifici pressoché identici a seguito del terremoto di Loma Prieta in California del 1989: l'edificio di sinistra è crollato quello di destra è rimasto praticamente intatto. Il motivo è imputabile probabilmente a carenze in fase di esecuzione.

In Trentino, una lungimirante politica Provinciale, attraverso finanziamenti attenti, sta permettendo alla *Ricerca*, i.e. IVALSA-CNR ed Università, alla *Produzione*, i.e. Magnifica Comunità di Fiemme, ed alla *Industria* della costruzione, i.e. Rasom Holz&Co., di studiare il comportamento sismico di edifici pluri-piano eretti dall' industria trentina con pannelli di legno massiccio a strati incrociati (X-Lam) prodotti con legno del Trentino (Progetto SOFIE).

Nel luglio del 2006 presso i laboratori del NIED, a Tsukuba in Giappone è stato sottoposto a prova sismica su tavola vibrante un edificio di tre piani realizzato con pannelli X-Lam realizzati con legno trentino.

I risultati sono stati estremamente positivi in termini di capacità di resistere a terremoti di intensità distruttiva (solo con una intensità di PGA di 1,2g si sono danneggiati gli hold-down di collegamento alla fondazione) e addirittura sorprendenti in termini di capacità di self-centering dell'edificio anche sotto l'azione di così potenti terremoti [5].

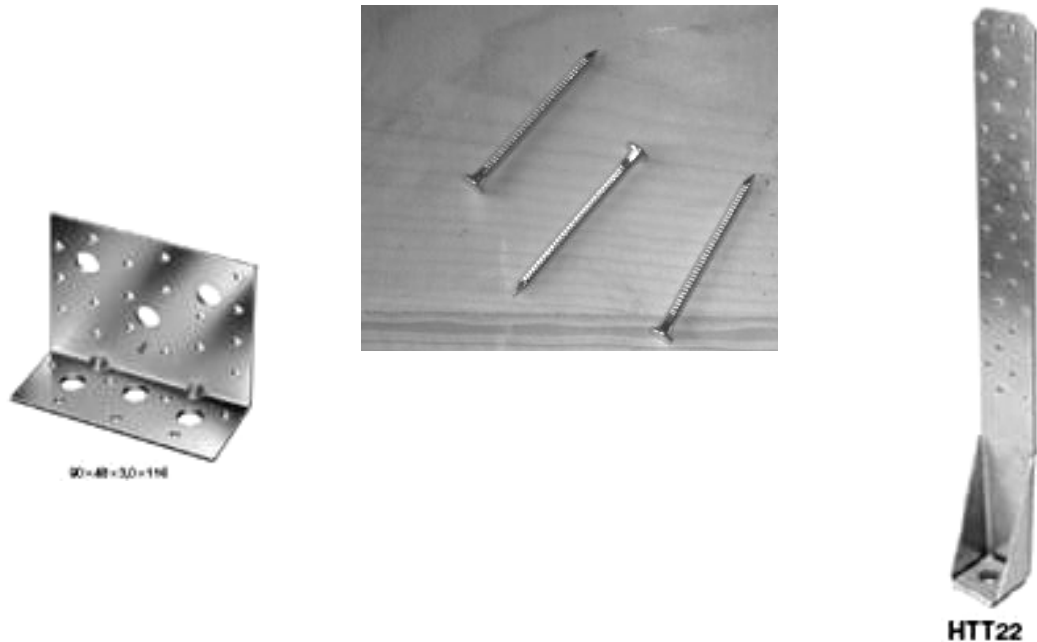


Figure 7: Angolari metallici BMF 90x48x3,0x116 e holddown HTT22 and  $\phi 4$  chiodi ad aderenza migliorata usati per il collegamento alle pareti di X-Lam.

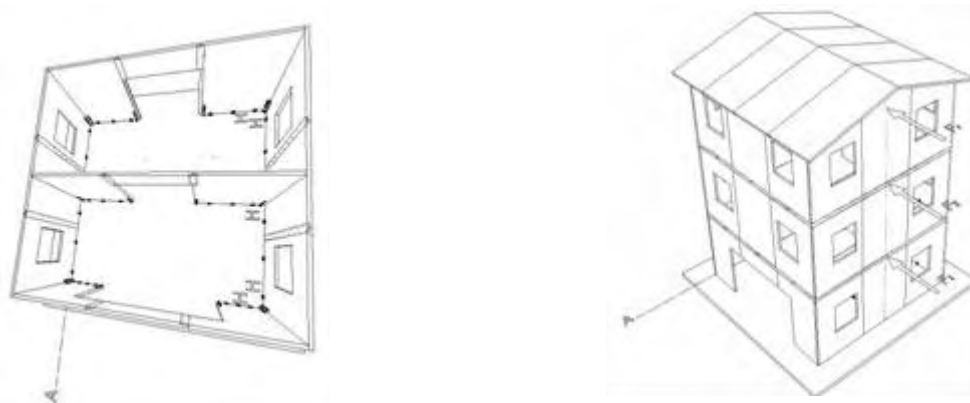


Figure 8: Distribuzione degli holddown e degli angolari metallici al piano terra e distribuzione delle forze sismiche di progetto a ciascun piano (Eurocodice 8: [ 6] e [ 7])

Tabella 2: Risultati delle prove su tavola vibrante, da [5].

Record	PGA [g]	Restoring intervention (before the test)	Observed damage (after the test)
Nocera Umbra	0.50	Tightening of holdown anchor bolts	None
El Centro	0.50	Tightening of holdown anchor bolts. Replacing of screws in vertical joints between panel	None
Kobe	0.50	Idem	None
Kobe	0.80	Idem	Slight deformation of screws in vertical joints between panels
Kobe	0.50	Idem	None
Kobe	0.50	Tightening of holdown anchor bolts	None
Kobe	0.80	Replacing of holdown anchors and tightening of bolts. Replacing of screws in vertical joints between panel	Slight deformation of screws in vertical joints between panels
Nocera Umbra	1.20	Tightening of holdown anchor bolts. Replacing of screws in vertical joints between panel	<b>Holdown failure</b> and deformation of screws in vertical joints between panels

L'impegno finale, ambizioso, del programma SOFIE è quello di contrastare con prove evidenti e numeri concreti quella che, nel gergo del settore, viene chiamata la sindrome del lupo cattivo, e convincere gli Italiani che nel legno si può abitare con soddisfazione, benessere e sicurezza ineguagliabili.



Figura 9: Crisi degli holdown dopo il terremoto di Nocera Umbra a 1,2g di PGA [5].

## Bibliografia

- [1] P. G. Toulaitos, "*Seismic disaster prevention in the history of structures in Greece*", atti del "Timber building systems – Seismic behaviour of timber buildings, Timber construction in the new millenium" one and a half day workshop coordinated by A. Ceccotti and S. Thelandersson, Venezia 28-29 Settembre 2000
- [2] V Coias E. Silva: "*Using Advanced Composites to Retrofit Lisbon's Old "Seismic Resistant" Timber Framed Buildings*"; Atti di "Culture 2000 – European Timber Buildings as an Expression of Technological and Technical Cultures", 2002
- [3] R. Langenbach, "*CROSSWALLS" INSTEAD OF SHEARWALLS -A Proposed Research Project for the Retrofit of Vulnerable Reinforced Concrete Buildings in Earthquake Areas based on Traditional Hımiş Construction*", Fifth National Conference on Earthquake Engineering, 26-30 May 2003, Istanbul, Turkey, Paper N°: AE-123
- [4] H.J. Reiner, E: Karacabeyli: "*Wood-frame constructions in past earthquakes*" – Atti del World Conference on Timber Engineering, Whistler Resort, BC, Canada, 2000
- [5] A. Ceccotti, M. Follesa, M.P. Lauriola, C. Sandhaas, C. Minowa, N. Kawai, M. Yasumura:  
"*Which Seismic Behaviour Factor for Multi-Storey Buildings made of Cross-Laminated Wooden Panels?*", 2006 CIB-W18 meeting, Florence, Italy
- [6] A. Ceccotti, M. Follesa, M.P. Lauriola: "*Le strutture di legno in zona sismica. Criteri e regole per la progettazione ed il restauro*". CLUT editore, Torino, 2005.  
[www.clut.it](http://www.clut.it)
- [7] EN 1998-1:2004: "*Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance - Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings*", CEN, Brussels.