

Resistenze al sisma e al fuoco

Gli esiti delle prove eseguite presso istituti certificati



Resistenza al sisma

Da molto tempo sono noti i vantaggi di una struttura leggera, come quella lignea, in zone caratterizzate da frequenti eventi sismici.

Un importante progetto di ricerca è stato svolto da EUCENTRE di Pavia (Centro Europeo di Formazione e Ricerca in Ingegneria Sismica, Università di Pavia) con l'obiettivo di testare la resistenza al sisma del sistema costruttivo a telaio Wolf Haus. Obiettivi primari di questo progetto innovativo sono stati la ricerca di conferme sperimentali ai modelli di calcolo utilizzati, l'individuazione di aspetti tecnologici da migliorare nonché la certificazione di alcuni fattori previsti in normativa.

Il progetto è stato suddiviso in quattro fasi, studiando prima le singole parti che compongono la struttura, per finire con una simulazione su tavola vibrante di un edificio a quattro piani.

Prove pseudostatiche su pareti

Le prove pseudostatiche sono prove a controllo di spostamento. Questo significa che in testa alla parete viene imposto, mediante degli attuatori, uno spostamento predefinito. Lo spostamento avviene prima in fase di spinta e poi in fase di tiro. Gli stessi attuatori rilevano la resistenza offerta dalla parete all'imposizione dello spostamento. Ogni spostamento viene impresso per tre cicli dopodiché si interrompe la prova e si controlla la presenza di eventuali danni. Finito il rilevamento, si procede al valore di spostamento successivo. La prova prosegue fino a che non vi è un notevole calo (-20%) di resistenza offerta dalla parete. Lo spostamento simula il comportamento della parete sotto azione sismica.

Le prove pseudostatiche hanno permesso di tracciare delle curve forza-spostamento per i vari tipi di parete. Da queste curve si è potuta ricavare l'effettiva resistenza delle pareti e una prima stima del fattore di struttura che serve a identificare la capacità di dissipare energia in caso di sisma. Le prove sono state eseguite con diversi pannelli caratterizzati dalla presenza o meno di aperture (finestra, porta, porta scorrevole) e da diverse configurazioni di carico verticale. Si è potuto rilevare che le scelte apportate in fase di progetto hanno condotto a un aumento della resistenza pari circa al 30% per le singole pareti.

Prove pseudostatiche su collegamenti

Un ruolo di grande importanza nelle strutture in legno lo ricoprono i collegamenti, poiché sono proprio questi a conferire alla struttura un comportamento dissipativo. Durante la fase di sperimentazione sono state testate sia le unioni tra pareti che le unioni tra parete e solaio in legno. Le prove consistevano, come per le prove su pareti, nell'imposizione di uno spostamento a una delle parti unite in modo da simulare l'azione sismica. E come per le prove su pareti, anche in questo caso i risultati sono stati schematizzati in curve forza-spostamento dalle quali sono state ricavate informazioni sulla resistenza e sulla duttilità.

Modellazione delle strutture

La normativa italiana richiede un'analisi sismica tridimensionale per tutti gli edifici di nuova realizzazione. I ricercatori dell'EUCENTRE hanno analizzato i dati sperimentali delle prove eseguite sulle pareti e sulle connessioni per ricavarne i parametri di rigidità necessari a caratterizzare correttamente un modello sismico. Con le conoscenze acquisite si è proceduto alla modellazione dell'edificio a quattro piani da realizzare per il test su tavola vibrante. A seguito delle prove è stato fatto un confronto fra i risultati sperimentali e i risultati di prova realizzati con un programma agli elementi finiti. Analizzando le due modellazioni si è constatato che i risultati ottenuti per le prove su tavola vibrante risultavano essere molto simili a quelli previsti in fase di modellazione.

Prova su tavola vibrante

Per prima cosa si è dovuto scegliere l'accelerogramma di prova. La scelta è ricaduta su uno degli accelerogrammi rilevati durante l'evento sismico di L'Aquila (2009).

È stato scelto tale accelerogramma perché presentava delle accelerazioni alla base (*peak ground acceleration*) superiori a quelle previste da normativa ma soprattutto perché Wolf Haus è stata una dei principali protagonisti della ricostruzione post sisma con ben 22 edifici e

536 alloggi realizzati in soli 5 mesi.

La struttura è stata sottoposta a 6 prove consecutive in cui è stato aumentato percentualmente l'accelerogramma del sisma di L'Aquila fino a ottenere delle accelerazioni di picco max di 1,48g.

Le prime quattro prove sono state eseguite sulla struttura al grezzo. Nonostante l'entità delle azioni in gioco, gli spostamenti d'interpiano rilevati sono stati minori dei limiti previsti in normativa e la struttura non ha riportato danni.

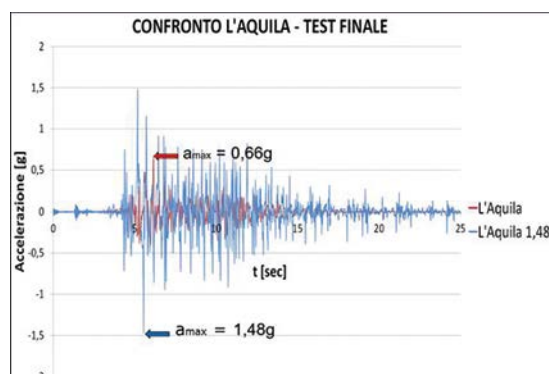
Data l'assenza di danni, le successive prove sono state effettuate su struttura completa di finiture. In pochi giorni sono stati inseriti gli infissi e montato il cappotto esterno + intonaco. L'ultimo piano è stato finito completamente e arredato per rendere più realistiche le condizioni all'interno. Tali prove sono state fatte con



Nella pagina a fianco, prova di resistenza su parete sottoposta a carico verticale e dislocamento orizzontale tramite attuatore. La parte ancorata alla fondazione di cemento armato, come nella realtà, viene monitorata con estensimetri e misuratori digitali che riportano gli spostamenti su diagrammi e cicli di isteresi.

A sinistra unico esempio europeo di test condotto su edificio di 4 piani completo di finiture interne ed esterne.

Oscillogramma sisma Aquila 2009 amplificato ad accelerazione Max 1,48g.



A fianco Attestato di sistema costruttivo Antisismico e Antidanno rilasciato dal laboratorio Eucentre di Pavia in seguito a prove dinamiche su edificio Wolf Haus.



l'obiettivo di individuare l'influenza e il comportamento degli elementi non strutturali.

Nella normativa tecnica italiana (NTC08) l'accelerazione massima prevista alla base vale $a_g = 0,28g$ e pertanto il nostro edificio è stato testato a un'accelerazione ben cinque volte superiore ($a_g = 1,48g$ 529%) alla massima prevista dalla normativa.

Nel tentativo di portare la struttura al limite di resistenza, si è deciso di testare l'edificio per la settima volta utilizzando, oltre all'accelerogramma di L'Aquila, anche l'accelerogramma dell'evento sismico di Kobe (Giappone 1995). Tale sisma è caratterizzato da vari picchi di accelerazione molto elevati e da spostamenti del terreno maggiori rispetto a quelli registrati a L'Aquila. Queste caratteristiche hanno reso tale sisma uno dei più distruttivi di sempre, causando il crollo di 200.000 edifici.

I risultati delle prove su tavola vibrante sono stati straordinari. L'edificio non solo non ha riportato nessun

danno per quanto riguarda la struttura portante, ma anche gli elementi secondari hanno superato assolutamente indenni i vari test (nemmeno una crepa nell'intonaco, infissi illesi). Negli intervalli tra le diverse prove sulla tavola vibrante non sono mai stati sostituiti o semplicemente riserrati i collegamenti della struttura. La struttura è stata quindi sottoposta a ben sette prove consecutive con accelerazioni alla base elevatissime.

È importante ricordare che l'accelerazione massima applicata durante le prove ($1,48g$) supera di ben cinque volte il massimo valore $a_g = 0,28g$ previsto dalla normativa italiana (NTC18).

La struttura è stata in grado di reagire in maniera ottimale alle prove grazie alle caratteristiche di duttilità e leggerezza che caratterizzano il sistema a telaio delle case Wolf Haus (*platform frame*). La leggerezza della struttura e il numero maggiore di connessioni, sottopongono la struttura a forze minori durante un sisma rispetto a quelle che si sviluppano in altri sistemi che, pur essendo in legno, hanno maggiore peso e rigidità.

I test effettuati hanno avuto ampio spazio sui mezzi d'informazione dato che l'edificio Wolf Haus montato sulla tavola vibrante dell'Eucentre di Pavia risulta essere ad oggi l'edificio più alto testato in Europa.

In seguito ai risultati ottenuti, è stato rilasciato un certificato che attesta come il sistema costruttivo Wolf Haus sia antisismico e antidanno.

Resistenza al fuoco

Con una corretta progettazione e stratigrafie adeguate, le strutture in legno sono in grado di garantire resistenze al fuoco molto elevate e in molti casi da preferire rispetto ad altri materiali da costruzione.

La sicurezza della struttura può essere ottenuta in due modi:

- utilizzando materiali che forniscono una protezione passiva dello strato portante (ad esempio lastre in cartongesso);
- utilizzando la resistenza al fuoco dell'elemento strutturale stesso.

Da un punto di vista normativo bisogna valutare la reazione al fuoco e la resistenza al fuoco. Le due definizioni precisano concetti e caratteristiche differenti.

Per reazione al fuoco si intende il grado di partecipazione di un materiale combustibile al fuoco al quale è sottoposto. Ogni materiale, se sottoposto al fuoco, reagisce in maniera differente e per questo motivo la normativa (UNI EN 13501-1) definisce delle sigle per indicare alcune caratteristiche che determinano la reazione. In particolare viene definito se il materiale è combustibile o meno, se genera del fumo se sottoposto all'incendio e se si genera un gocciolamento incandescente che può portare alla propagazione dell'incendio. Nelle dichiarazioni di prestazione dei materiali viene quindi riportata la sigla che ne identifica la classe di reazione al fuoco.

La reazione al fuoco non dice però niente riguardo alla resistenza al fuoco, la quale viene definita anch'essa



A fianco, sezione con strato esterno carbonizzato.

da un punto di vista normativo da un insieme di sigle che servono a definire la capacità di un elemento di mantenere per un tempo prefissato alcuni parametri. Nella normale progettazione solitamente si fa riferimento ai seguenti tre parametri R, E, I che definiscono il mantenimento nel tempo di:

R = resistenza meccanica

E = ermeticità al passaggio dei fumi

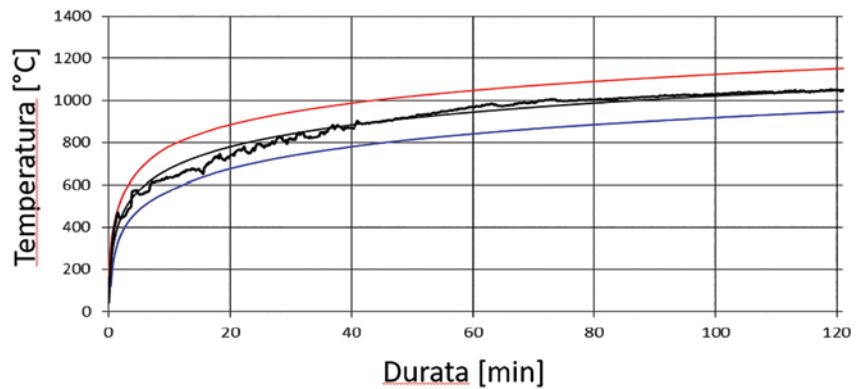
I = isolamento termico

Per quanto riguarda la resistenza meccanica del materiale sottoposto al fuoco è interessante fare un confronto tra cemento armato, acciaio e legno.

Le strutture in cemento armato presentano generalmente delle elevate resistenze. Il calcestruzzo subisce prima un rigonfiamento, con l'aumento della temperatura, e poi una contrazione con l'evaporazione dell'acqua interstiziale. Pertanto, all'aumentare della temperatura, si ha un decadimento delle caratteristiche meccaniche.

L'acciaio è un materiale molto performante dal punto di vista strutturale, in virtù del suo rapporto resistenza/massa per unità di volume. Si tratta quindi di strutture snelle che permettono grande versatilità strutturale. Nel momento in cui la struttura comincia a essere sottoposta ad alte temperature, i vantaggi del materiale non agiscono però in maniera favorevole.

Poca massa e alta conducibilità termica implicano incrementi di temperature, veloce decadimento delle caratteristiche meccaniche e prematuro collasso della struttura. Basti pensare che, a una temperatura di 600 °C, la resistenza dell'acciaio allo snervamento risulta dimezzata rispetto a temperatura ambiente.

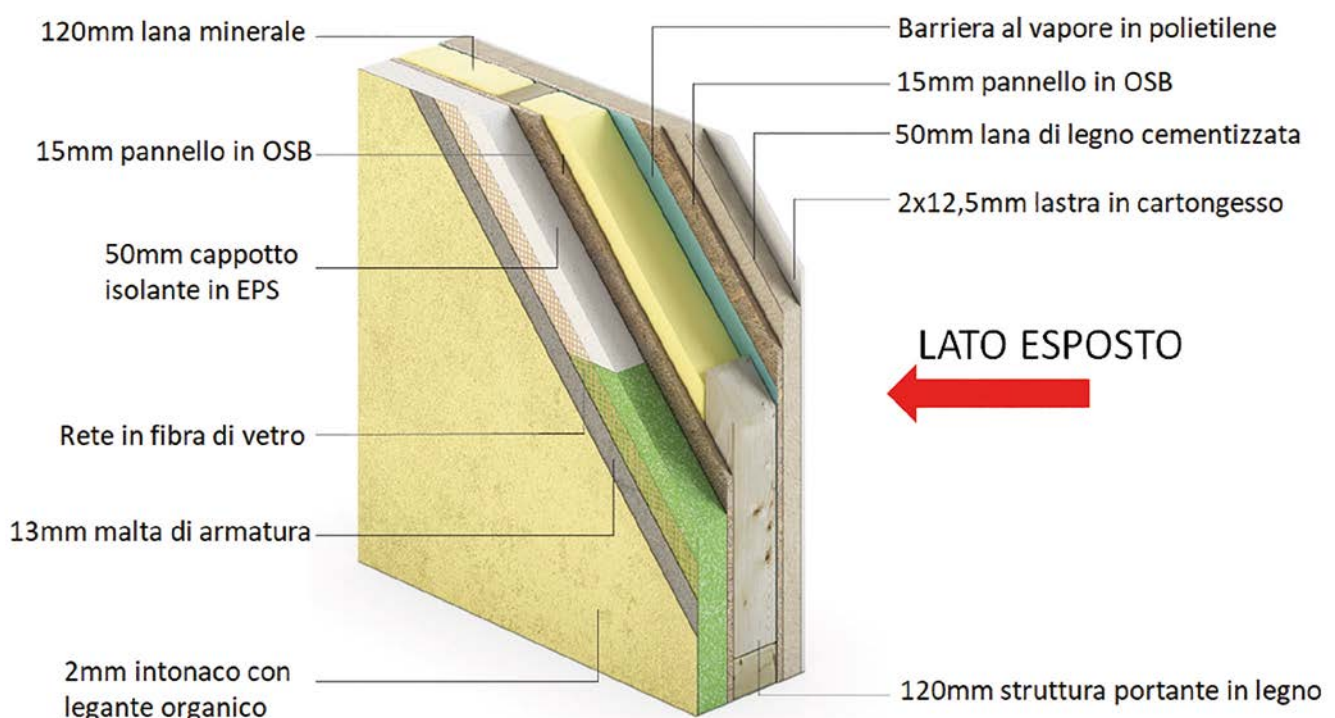


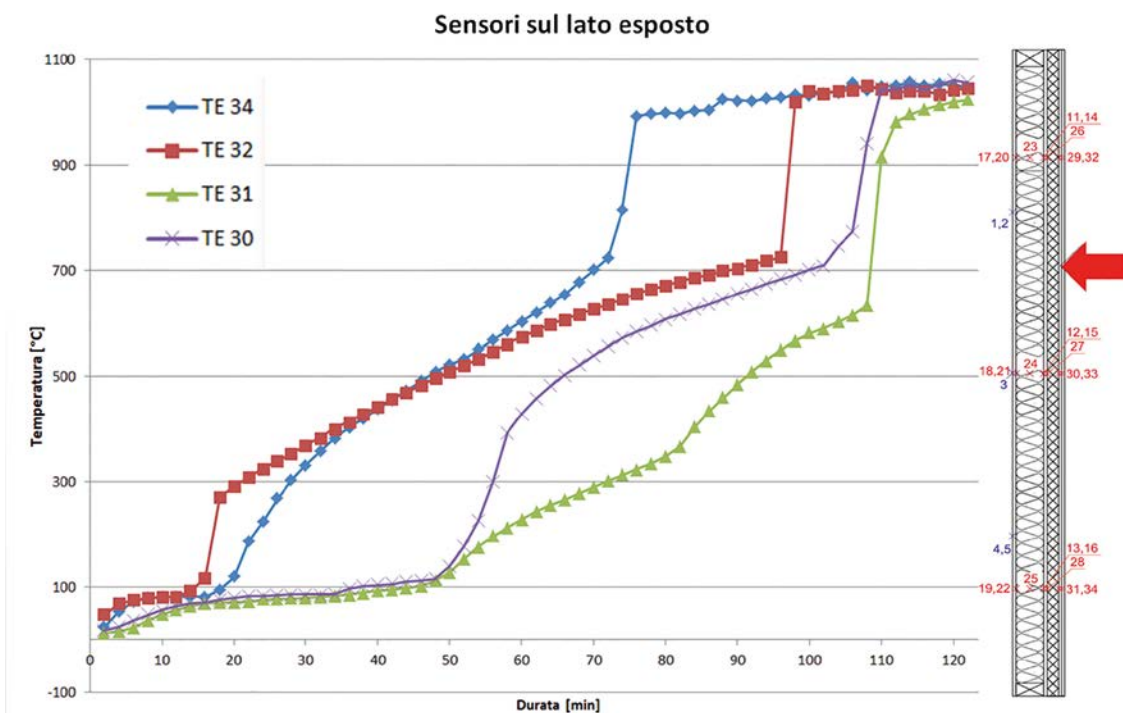
Sopra, la curva di andamento della temperatura durante la prova con picco massimo 1075°C.

Sotto la stratigrafia che è stata sottoposta alla prova.

Il legno ha un comportamento differente dai due materiali analizzati in precedenza. Si tratta di un materiale organico che in caso di incendio partecipa al fenomeno perdendo massa. Una sezione di legno sottoposta a incendio si presenta con uno strato esterno carbonizzato mentre al di sotto di tale strato il materiale risulta intatto e con capacità meccaniche invariate. Il legno per sua natura è un ottimo materiale isolante e per questo motivo, durante un incendio, si forma superficialmente uno strato carbonizzato di circa 4 cm, che funge da "protezione", sotto il quale la sezione lignea si presenta intatta.

Le caratteristiche del legno in presenza di incendio sono parte integrante della progettazione strutturale; infatti la riduzione di sezione in modo costante, prevedibile e controllata porta a definire questo materiale come un buon materiale in caso di incendio. Nella progettazione di sezioni resistenti al fuoco il metodo più utiliz-





zato è quello della sezione ridotta. La normativa UNI EN 1995-1-2 fornisce le velocità di carbonizzazione da considerare per la valutazione della sezione residua. Una volta determinata la resistenza in minuti che si vuole ottenere, la normativa fornisce la formula per il calcolo della sezione ridotta da verificare. Per quanto riguarda pareti e solai prefabbricati, che sono a tutti gli effetti degli assemblati con materiali e

stratigrafie differenti a seconda della destinazione d'uso, del produttore e delle caratteristiche che si vogliono ottenere, la normativa fornisce le formulazioni per la progettazione di elementi fino a una resistenza massima REI60 (sezione 5 UNI EN 1995-1-2).

Nel caso siano richieste resistenze superiori a REI60 è necessario sottoporre l'elemento prefabbricato a una prova di laboratorio. Da un punto di vista economico, per gli elementi prefabbricati, risulta vantaggioso studiare una protezione passiva in grado di garantire da sola il raggiungimento dei requisiti di prova. Di conseguenza il calcolo della struttura portante può essere eseguito a freddo.

In generale si può dire che la normativa fornisce delle formulazioni molto cautelative e pertanto, se il prodotto viene immesso sul mercato in grandi quantità, risulta conveniente eseguire delle prove di laboratorio anche per resistenze inferiori a REI60.

Le prove di laboratorio consistono nella chiusura dell'elemento da testare in un forno all'interno del quale si sviluppa un incendio con un andamento normato delle temperature. La prova si interrompe nel momento in cui uno dei requisiti di prova risulti non soddisfatto.

Di seguito si riporta l'esempio di una prova eseguita presso i laboratori della Holzforschung Austria di Vienna su di una parete a telaio in legno classificata a seguito della prova come REI120.

Tale prova è stata eseguita da Wolf Haus per avere delle pareti con elevata resistenza al fuoco che trovano solitamente utilizzo in ambiti particolari in cui tale resistenza viene prevista dal progetto antincendio.

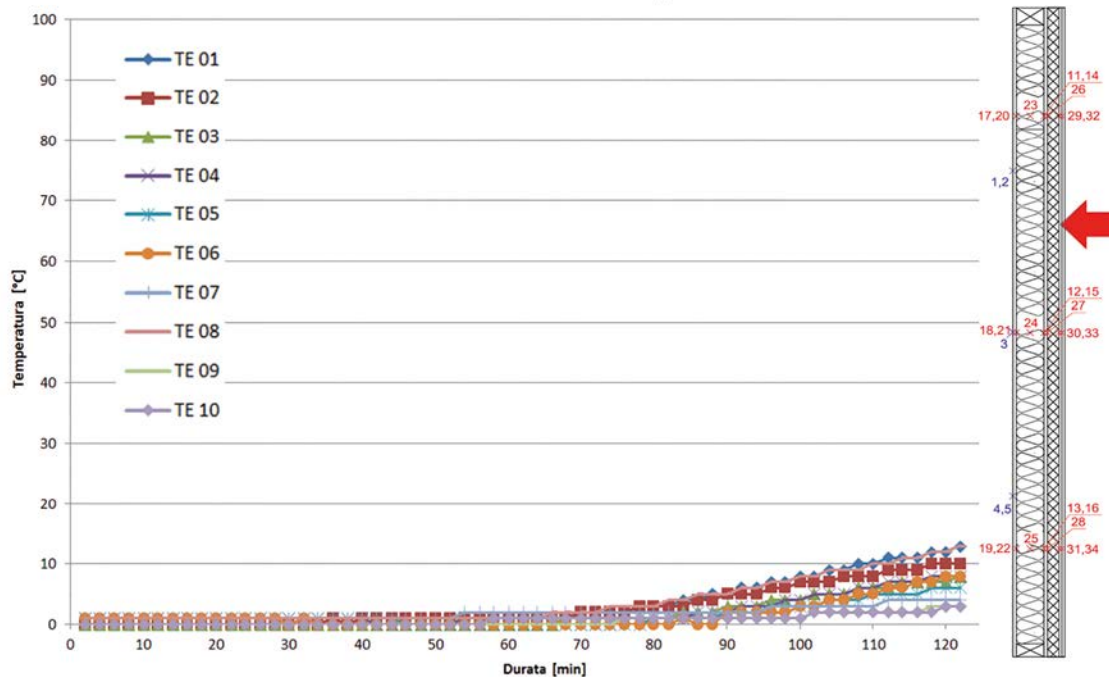
Una delle difficoltà maggiori nella progettazione del campione di prova consiste nel definire il carico verticale agente sul campione. Tale carico è fondamentale per la definizione delle sezioni della struttura portante

A destra, le temperature massime rilevate nei diversi strati.

Più in basso, la chiusura del forno di prova con parete prefabbricata.



Sensori sul lato non esposto



Temperatura rilevata dai sensori sul lato non esposto.

in legno. Una volta certificata, per poter essere utilizzata, la parete dovrà essere realizzata con le stesse sezioni strutturali e la stessa stratigrafia del certificato di classificazione. Definendo un carico troppo basso si corre il rischio di non poter utilizzare il certificato in molti progetti. Utilizzando un carico troppo elevato si corre il rischio di sovradimensionare la struttura portante e, di conseguenza, di avere dei costi elevati in tutti quei progetti in cui il carico agente risulti essere molto inferiore. Visto il target di utilizzo, per la prova REI120, il carico di prova è stato definito pari a 50 kN/m. Tale carico è stato scelto valutando vari edifici scolastici e case di riposo realizzate negli anni passati.

Per raggiungere la resistenza REI120 con la parete in legno, è stata studiata una stratigrafia ad hoc in modo da ottimizzare gli spessori di protezione passiva.

Lo strato di protezione passiva è stato realizzato con materiali non combustibili o poco combustibili.

Prima della prova sono stati posizionati molti sensori in modo da rilevare l'andamento delle temperature nei diversi strati e in diverse posizioni.

Durante la prova le temperature rilevate dai sensori variavano principalmente in base all'altezza e profondità di posizionamento dei sensori stessi e dal distacco localizzato di materiale sullo strato esterno esposto al fuoco.

Sempre durante la prova, analizzando i dati dei sensori negli strati intermedi, ovvero tra i montanti, veniva rilevata dopo 120 minuti una temperatura massima di 85 °C. Tale temperatura risulta essere molto inferiore alla temperatura di accensione del legno (circa 250 °C). In virtù di questo dato, prima di interrompere la prova ci si aspettava di trovare una struttura portante ancora perfettamente intatta.

Per verificare lo stato della struttura dopo 120 minuti

d'incendio si è deciso, una volta raggiunto il target necessario per la certificazione REI120, di interrompere la prova e visionare i singoli strati.

Il doppio strato in cartongesso risultava essere completamente consumato lungo tutto lo sviluppo della parete. Lo strato in lana di legno cementizzata risultava essere ancora presente per circa il 50% del suo spessore totale.

Rimosso tale strato, si è mostrato il pannello di controventamento completamente intatto.

Il lato interno della lana di legno cementizzata si presentava con la sua colorazione originale, a indicare che non vi era stato passaggio di fumi.

Dopo avere rimosso una parte del pannello di controventamento, si verificava che i montanti del telaio in legno risultavano non essere stati attaccati dalle fiamme, così come le lane isolanti interne poste tra i montanti non avevano avuto nessuna variazione.

La stratigrafia utilizzata è risultata essere molto performante e ha permesso di superare facilmente la prova e ottenere la certificazione REI120. L'aspetto visivo dei materiali post prova fa pensare che la parete avesse ancora una resistenza tale da garantire ancora molti minuti prima del collasso.

Prove di questo tipo vengono inserite all'interno della certificazione ETA, in modo da fornire ai tecnici un pacchetto completo di caratteristiche che vanno dall'acustica, alla trasmittanza termica fino alla resistenza al fuoco.

La prova ha chiaramente dimostrato come le strutture in legno Wolf Haus siano assolutamente performanti dal punto di vista della resistenza al fuoco portando al contempo dei grossi vantaggi sotto l'aspetto del consumo energetico, della resistenza sismica e dell'aspetto ecologico della struttura.