

Progettare il futuro in legno lamellare

Milano, 06 ottobre 2006

Il comportamento al fuoco delle strutture di legno

ing. Roberto Modena

Ufficio Tecnico Holzbau S.p.A.

Il comportamento al fuoco del materiale legno

Il legno è un materiale combustibile, brucia



- Materiale organico (C per più del 50%)
- Temperatura di accensione $\approx 200\div 250$ °C
- Grande sviluppo di energia (≈ 4400 kcal/kg)

Le strutture di legno possono avere una buona resistenza al fuoco

Il comportamento al fuoco delle strutture di legno

Le domande alle quali dobbiamo rispondere

- Come brucia il materiale legno ?
- Cos'è la resistenza al fuoco di una struttura ?
- Come si raggiungono le prestazioni richieste ?

Gli argomenti da approfondire

- Il meccanismo della combustione
- Definizioni e riferimenti normativi
- Esempi e realizzazioni

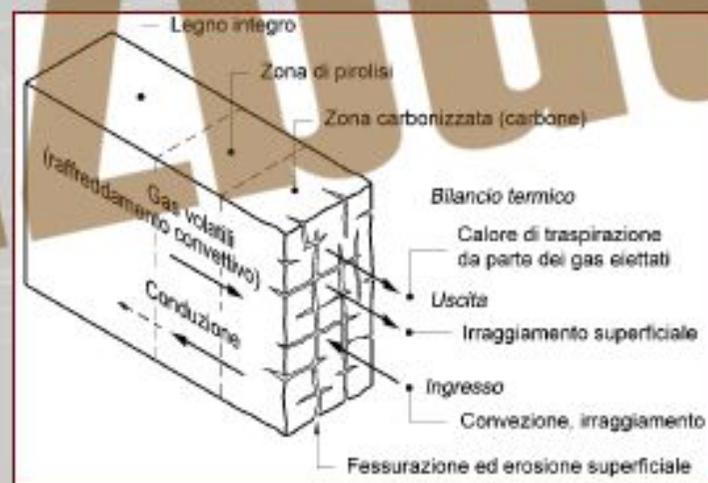
- **Attacchi biologici** ⇒ danni molto più diffusi



- **Incendio** ⇒ si manifesta in modo più drammatico

Il meccanismo della combustione

- Il legno è un pessimo conduttore di calore
- La propagazione del calore nel legno avviene per trasferimento di massa, in pratica per diffusione di gas caldi
- Gas caldi che si muovono verso l'interno
 - ⇒ aumento temperatura
 - ⇒ demolizione termica del materiale
 - ⇒ carbonizzazione
- Gas volatili prodotti della combustione si muovono verso l'esterno
 - ⇒ raffreddamento del carbone

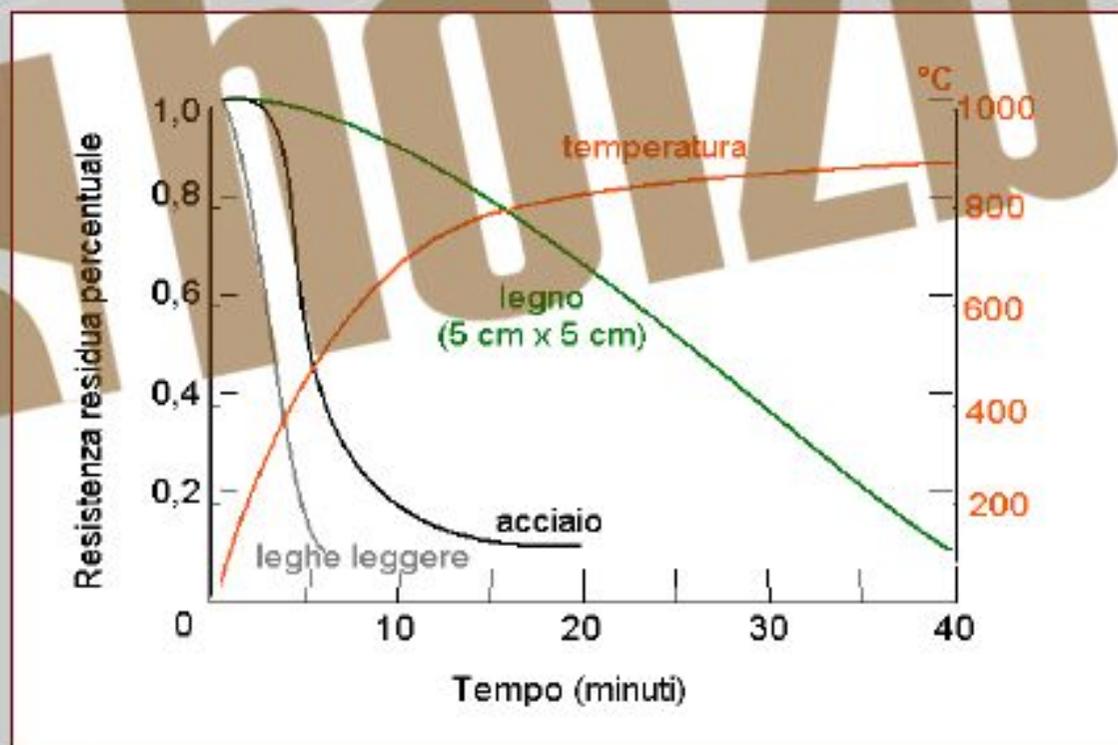


Il meccanismo della combustione

- Fino a 110 ÷ 115 °C ⇒ caratteristiche meccaniche invariate
- Innesco combustione 200 °C (flash-over)
- **Velocità di carbonizzazione costante** (valore normalizzato = 0.7 mm/min.)
- Lo strato carbonizzato protegge la parte di sezione resistente:
 - ⇒ temperatura sotto strato carbonizzato ≈ temperatura ambiente
 - ⇒ sotto strato carbonizzato il legno si può considerare integro
- L'omogeneità del materiale (legno lamellare) impedisce fenomeni locali
- L'assenza di dilatazioni termiche impedisce il collasso per deformazione
- Collasso avviene con preavviso ("scricchiola")

Il meccanismo di combustione caratterizza la valutazione della resistenza al fuoco delle strutture di legno

- Acciaio \Rightarrow evoluzione delle caratteristiche del materiale con la temperatura
- Legno \Rightarrow evoluzione delle prestazioni di un elemento con la temperatura



Dalla conoscenza della velocità di carbonizzazione ...

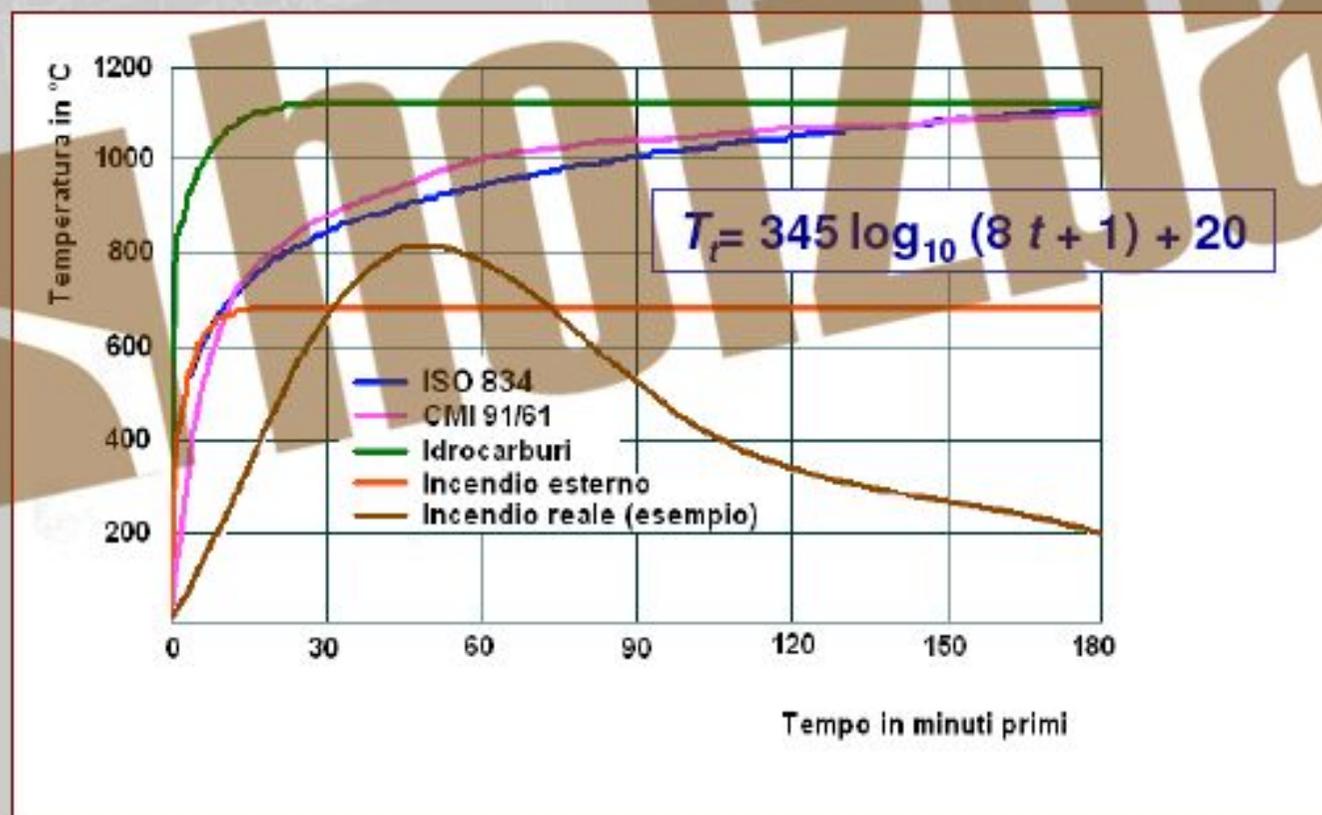
Valori sperimentali $\approx 0,5 \div 0,8$ mm/minuto



... alla definizione della sezione efficace

Azioni termiche: modellazione dell'incendio

S'individua una funzione, correlante lo stato termico dell'ambiente ed il tempo, rappresentativa dell'incendio reale, tale da sottoporre l'elemento ad uno stress compatibile con quello che subirebbe durante una vera esposizione al fuoco



Direttiva Prodotti da Costruzione 89/106/CE

Allegato I - Requisiti essenziali

Enunciati in termini di obiettivi, costituiscono criteri generali e specifici per conferire alle opere un congruo grado di sicurezza. Sono precisati in documenti interpretativi, i quali danno forma concreta ai requisiti di cui sopra

Requisito essenziale n°2: Sicurezza in caso d'incendio

L'opera deve essere concepita e costruita in modo che, in caso d'incendio:

- La capacità portante dell'edificio possa essere garantita per un periodo di tempo determinato*
- La produzione e la propagazione del fuoco e del fumo all'interno dell'opera siano limitate*
- La propagazione del fuoco ad opere vicine sia limitata*
- Gli occupanti possano lasciare l'opera o essere soccorsi altrimenti*
- Sia presa in considerazione la sicurezza delle squadre di soccorso*

Resistenza al fuoco

(DM 14/09/2005)

La **capacità portante** in caso d'incendio è l'attitudine della struttura, di una parte della struttura o di un elemento a conservare una sufficiente **resistenza meccanica** sotto l'azione del fuoco con riferimento alle altre azioni agenti.

- Capacità portante = R
- Espressa convenzionalmente in minuti
- Classi di resistenza R15, R20, R30, R45, R60, R90, R120, R180, R240
- Riguarda il comportamento del manufatto
- Riferita ad un incendio convenzionale (curva ISO 834)

Più in generale, le funzioni che un elemento può garantire sono:

- R - capacità portante:

capacità di conservare la propria resistenza meccanica sotto l'azione del fuoco

- E - tenuta:

attitudine a impedire il passaggio di fiamme, fumi, gas, sotto l'azione del fuoco su un lato

- I - isolamento termico:

attitudine a ridurre la trasmissione del calore

Reazione al fuoco

(DM 26/06/1984)

- La **reazione al fuoco** è il grado di partecipazione di un materiale combustibile al fuoco al quale è sottoposto
- **Reazione al fuoco riguarda il comportamento del materiale**
- Dipende da intensità e durata dell'azione della sorgente di calore alla quale il materiale è esposto
- Prove e criteri di valutazione stabiliti dalla norme.
- **Classificazione:**
 - classe 0 materiale incombustibile
 - classe da 1 a 5 materiali combustibili

Richieste di prestazione

- Quale classe di resistenza devo garantire?
- DM 14/09/2005 ⇒ Livello I, Livello II, Livello III, Livello IV, Livello V

Livello II

Requisiti di resistenza al fuoco delle strutture per un periodo sufficiente a garantire l'evacuazione degli occupanti in luogo sicuro

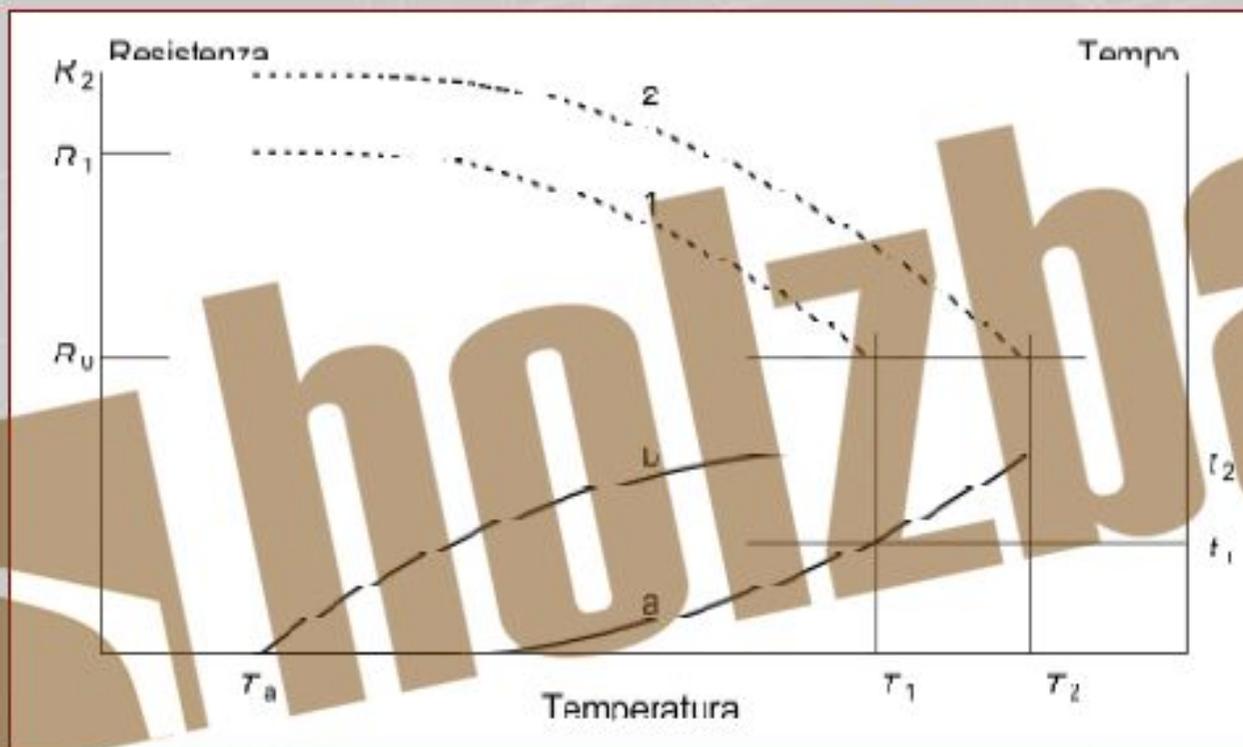
- *Affollamento limitato e nessuna presenza di posti letto*
- *Massimo due piani fuori terra ed un interrato*
- *Nessuna compromissione di altre costruzioni o sistemi di compartimentazione*

R15; R30; R45

Richieste di prestazione \Rightarrow Norme italiane di settore

- Edilizia scolastica (D.M. 26.08.1992):
 - presenze contemporanee fino a 100 persone: R30
 - presenze contemporanee oltre 100 persone:
 - altezza antincendio fino a 24. metri: R60
 - altezza antincendio oltre i 24. metri: R90
- Altezza antincendio (D.M. 30.11.1983):
altezza massima misurata dal livello inferiore dell'apertura più alta dell'ultimo piano abitabile e/o agibile, al livello del piano esterno più basso
- Locali di intrattenimento e di pubblico spettacolo (D.M. 19.08.1996)
- Impianti sportivi (D.M. 18.03.1996)

L'approccio normativo al calcolo della resistenza al fuoco nelle strutture di legno



T_a = temperatura ambiente

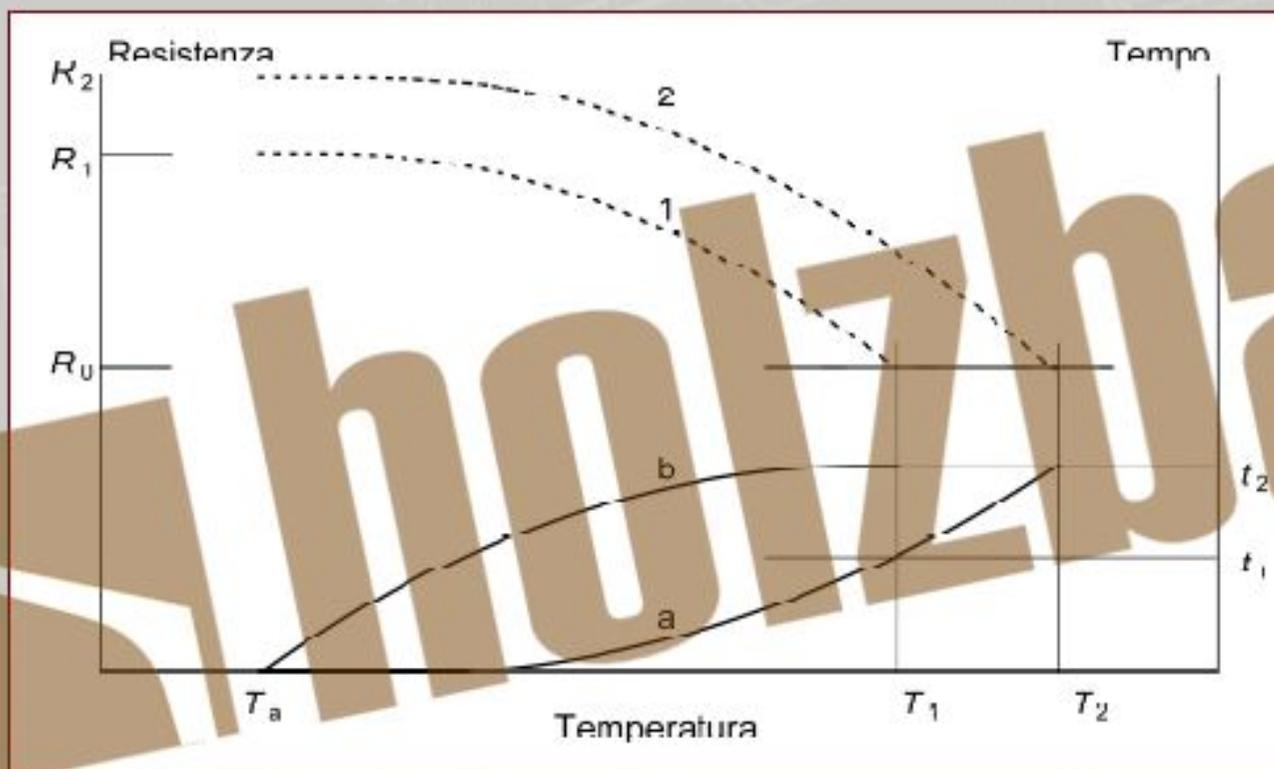
R_1 = resistenza sotto un certo carico alla temperatura T_a

R_0 = resistenza ultima

T_1 = temperatura di collasso

t_1 = tempo di esposizione per raggiungere il collasso

Come si migliora la resistenza al fuoco di una struttura ?



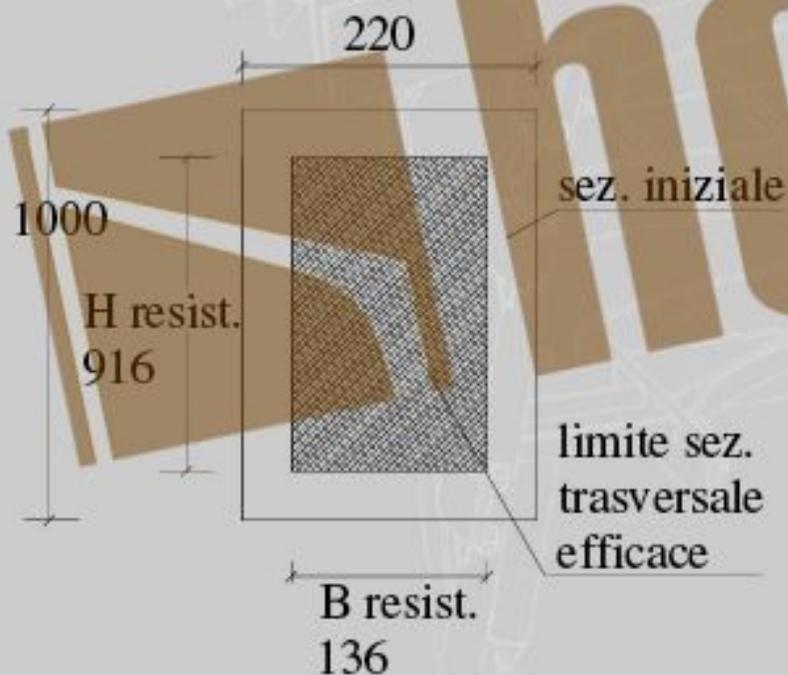
Migliorando la curva di riscaldamento del materiale \Rightarrow vernici intumescenti

Migliorando la resistenza dell'elemento \Rightarrow sezione residua efficace

Esempio di dimensionamento di un elemento per $R=60'$

UNI 9504

- sezione esposta su 4 lati
- velocità di carbonizzazione = 0,7 mm/min



sezione resistente a $t = 60'$

$$B = 220 - (2 \times 0.7 \times 60) = 136 \text{ mm}$$

$$H = 1000 - (2 \times 0.7 \times 60) = 916 \text{ mm}$$

verifica allo stato limite ultimo

$$R_d = F_d \quad \text{con}$$

R_d = resistenza di progetto allo SLU

F_d = sollecitazione di progetto allo SLU

$$F_d = G_k + Q_{1k} + 0,7Q_{2k,j}$$

Normativa di riferimento

[Circolare 91 Ministero dell'Interno \(14/09/1961\)](#): "Norme di sicurezza per la protezione contro il fuoco dei fabbricati a struttura in acciaio destinati ad uso civile",

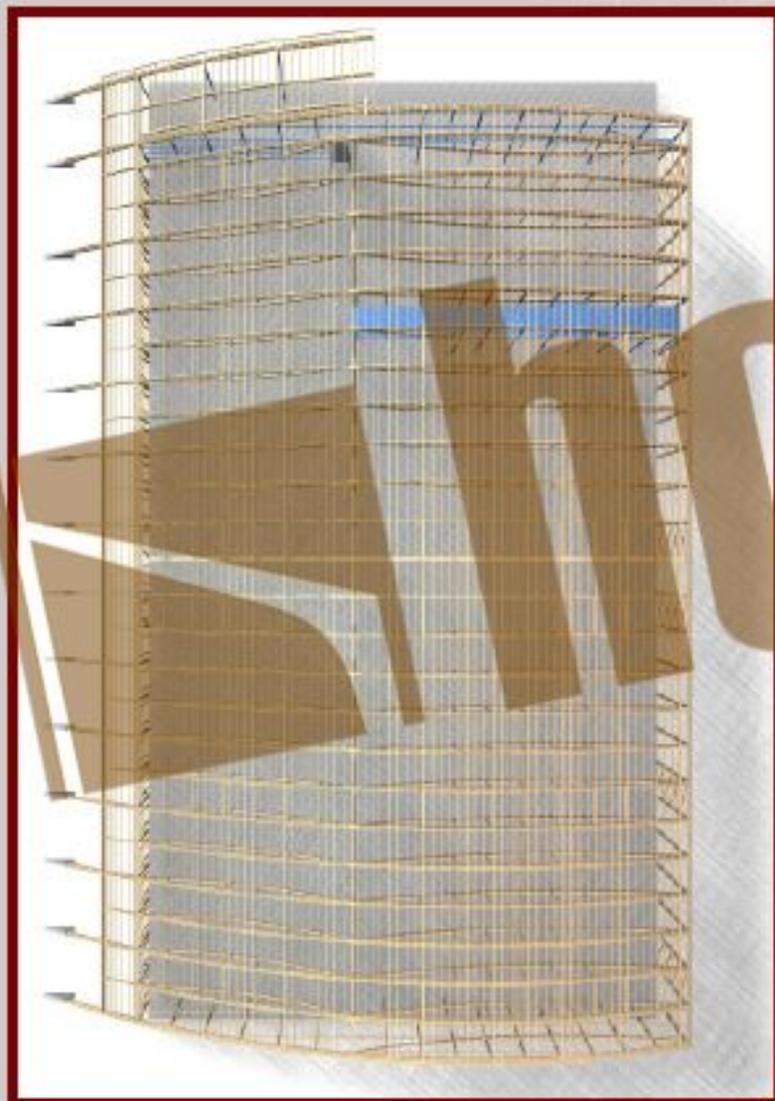
[UNI - VV. F. 9504 \(1989\)](#): "Procedimento analitico per valutare la resistenza al fuoco degli elementi costruttivi di legno"

[UNI CNR 192 \(1999\)](#): "Progettazione di costruzioni resistenti al fuoco"

[EN 1995-1-2:2004](#): "Eurocode 5: Design of timber structures - Part 1-2: General rules - Structural fire design", CEN

[CNR-DT 206:2006](#): "Istruzioni per la Progettazione, Esecuzione e Controllo delle Strutture di Legno"

Stabilimento industriale AIA (VR)



Superficie copertura: 11.700 mq

Soppalco interno: 2.900 mq

Resistenza al fuoco: - copertura R30

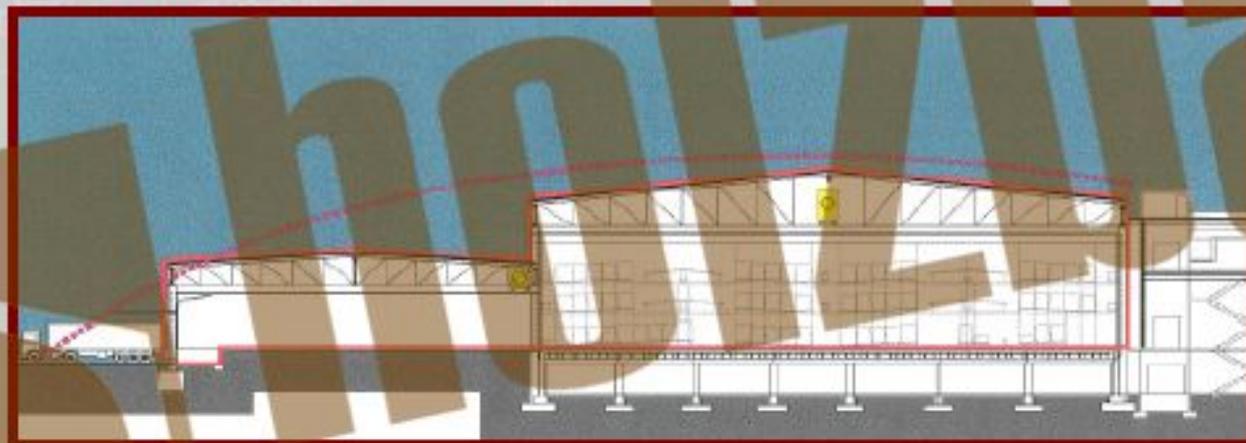
- pilastri R60



L'iter progettuale

Soluzione iniziale:

- Soluzione tradizionale in acciaio: magazzino dinamico + spedizioni
- Autorità Comunale: basso impatto visivo in relazione al paesaggio collinare
- Raccordo con una copertura unica: magazzino + tettoia base di carico



Problematiche:

- Ponti termici
- Oneri per la calandratura della membratura compressa della capriata reticolare
- Problemi statici legati all'inserimento delle macchine frigorifere in appoggio sulla catena

La scelta dei pilastri in legno

Soluzione iniziale:

- Pilastri in acciaio in profilo tipo IPE
- Baraccatura orizzontale in profili tubolari
- Controventi verticali in profili ad L
- Totale materiale = 90.000 kg

Soluzione adottata:

- Pilastri in legno lamellare
- Baraccatura orizzontale in legno lamellare
- Controventi verticali in legno
- Totale materiale = 230 mc

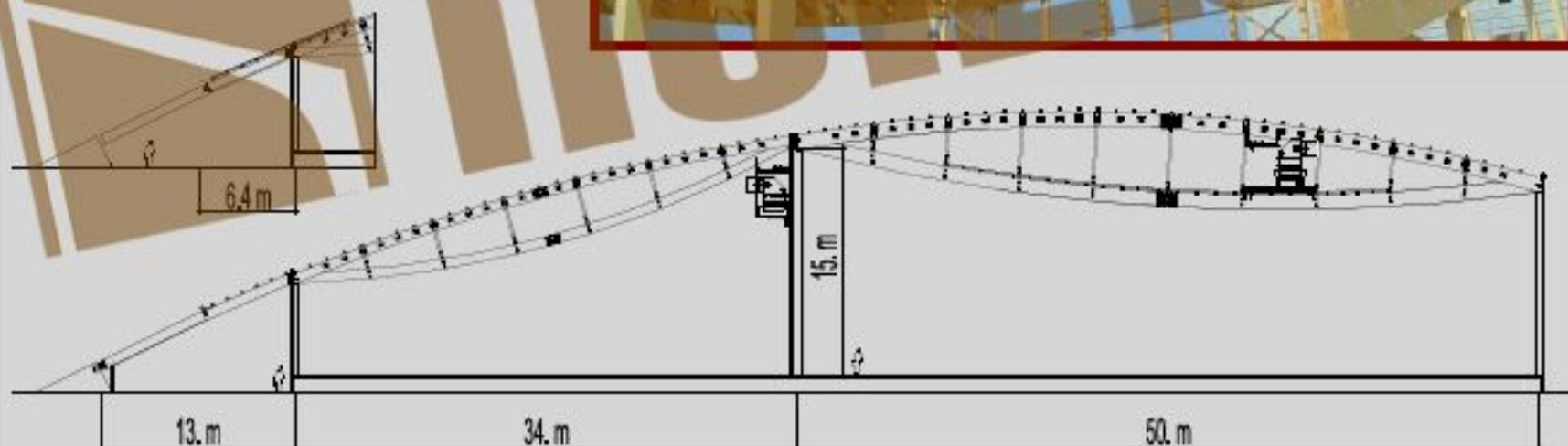
Analisi di costo:

- **struttura a freddo:** soluzione in acciaio \Leftrightarrow soluzione in legno
- **struttura a R60:** incidenza trattamento intumescente + 20%

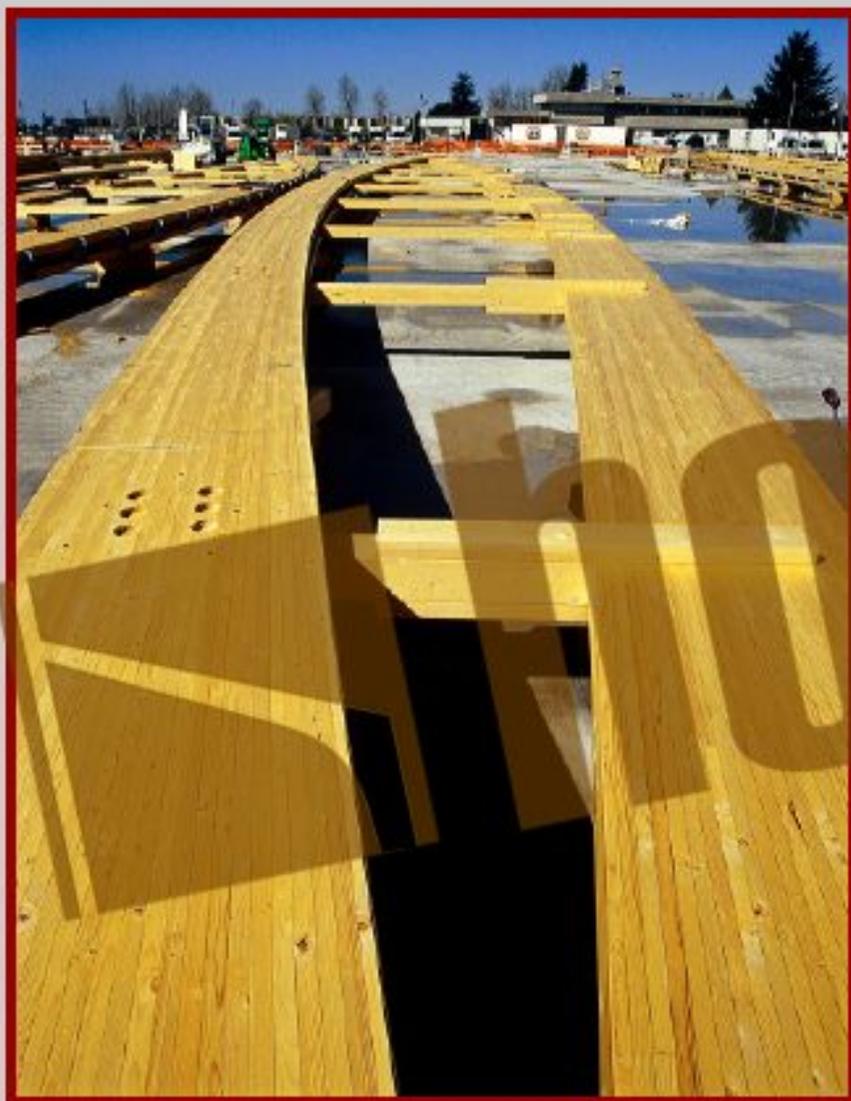
Sezione trasversale tipo

Interasse travi: 5.0 m

Interasse plinti: 10.0 m



Stabilimento industriale AIA (VR)



I collegamenti sulle travi

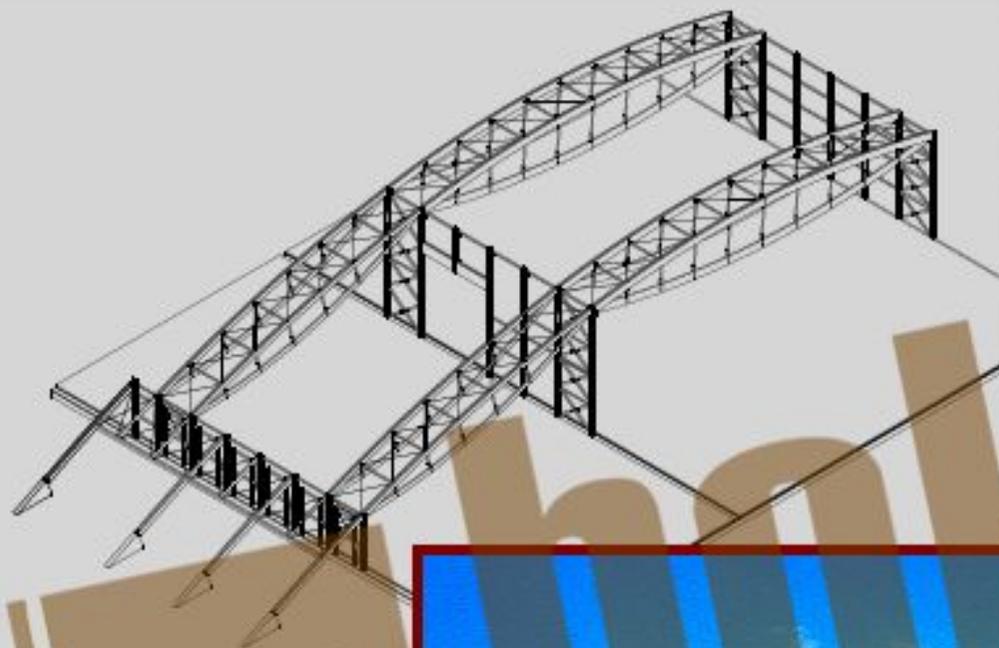


Stabilimento industriale AIA (VR)

I collegamenti sui pilastri



Stabilimento industriale AIA (VR)

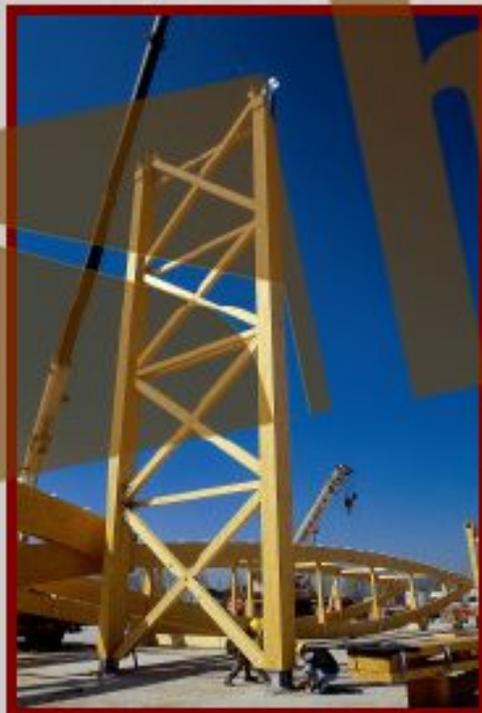
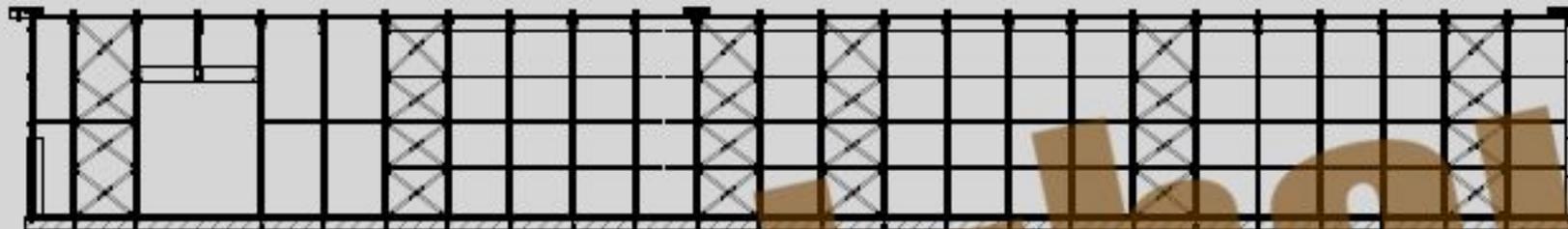


Il sistema dei controventi

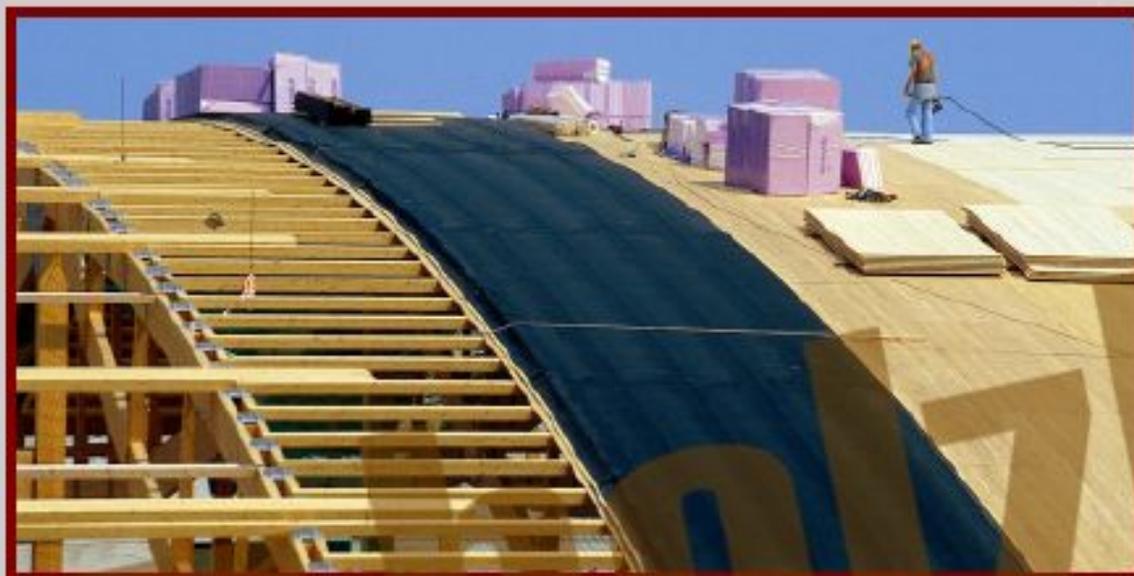


Stabilimento industriale AIA (VR)

Controvento verticale



Stabilimento industriale AIA (VR)

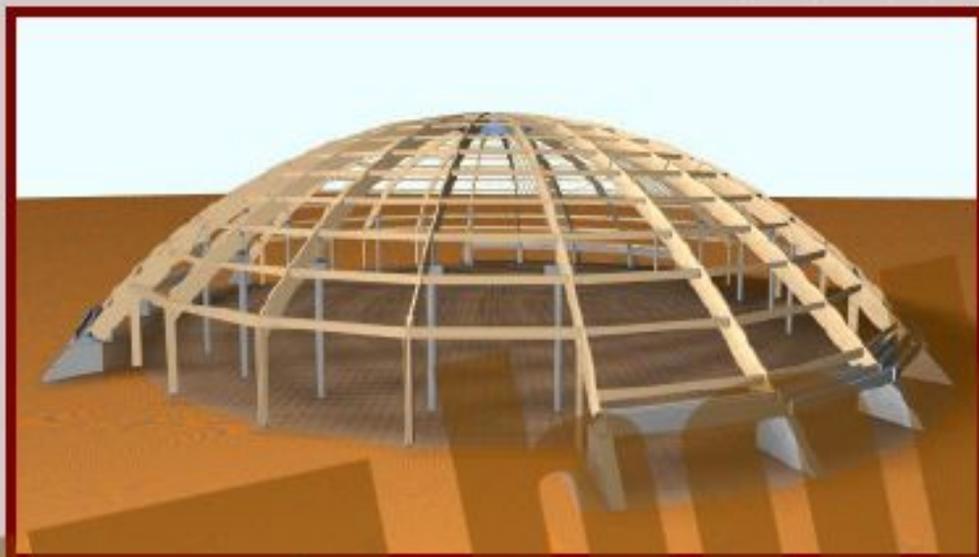


Il pacchetto di copertura



Stabilimento industriale AIA (VR)

Palasport di Livorno

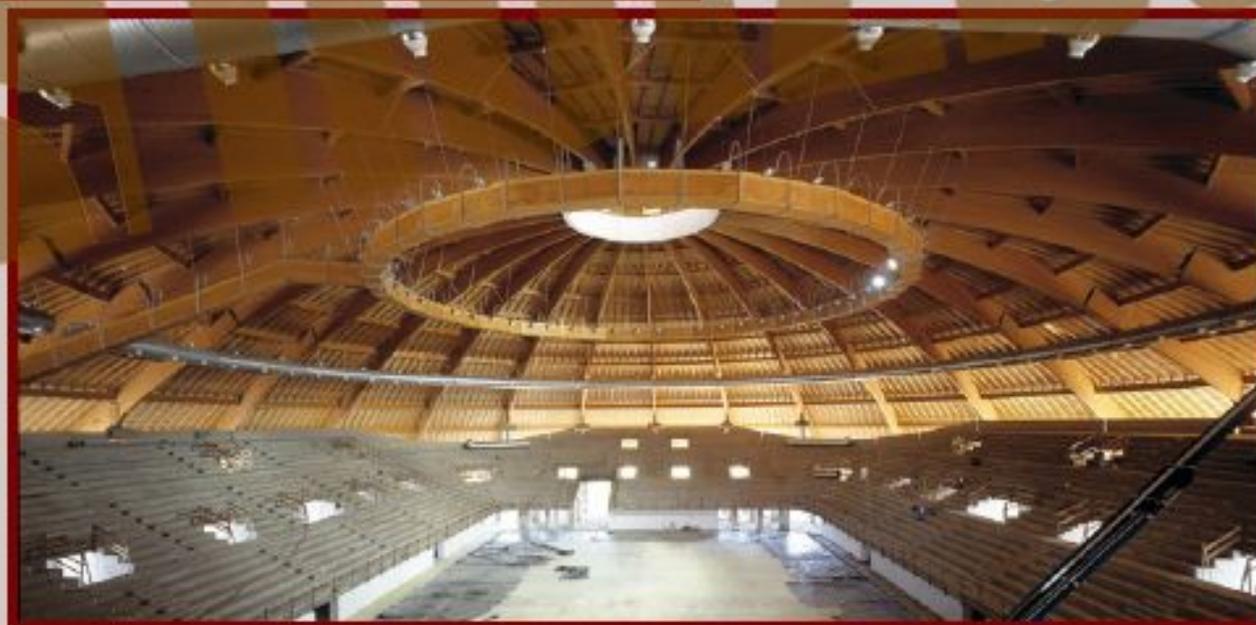


Superficie copertura 10.024 mq

Luce massima 109. m

Altezza massima 33. m

Resistenza al fuoco R 60

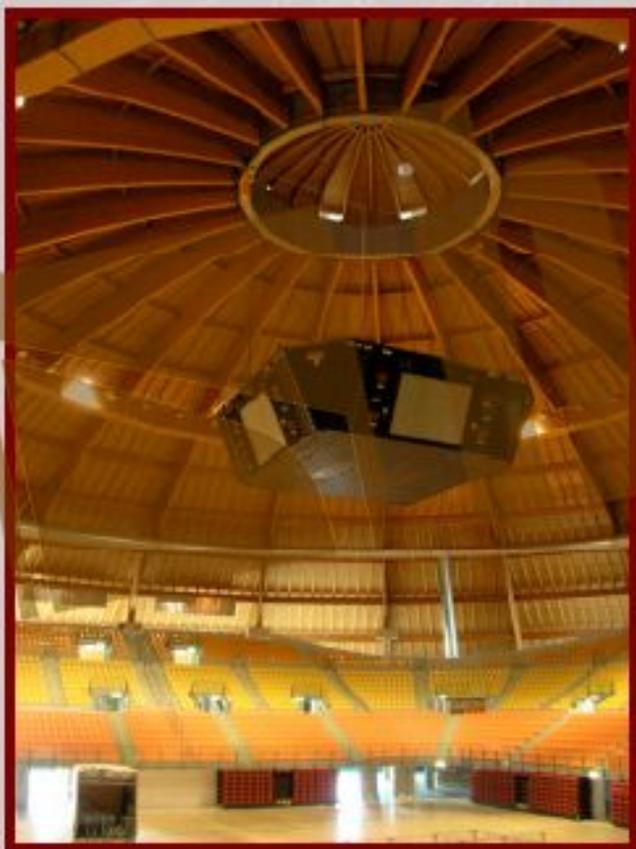


Palasport:

- superficie coperta: 10.000 mq

- n° posti a sedere: 9.000

RESISTENZA AL FUOCO: R60



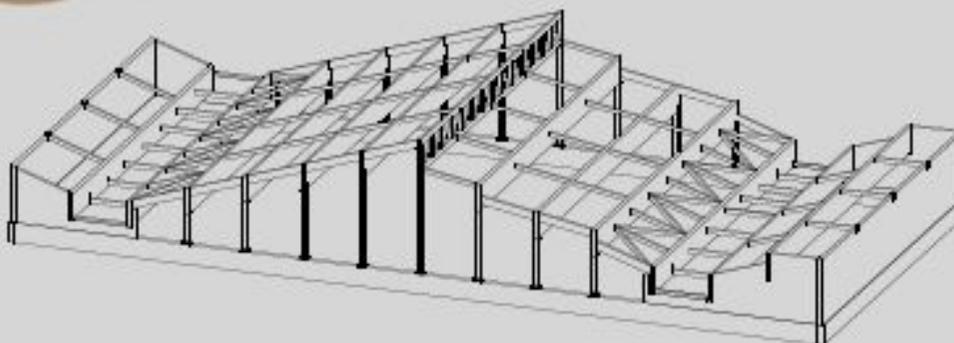
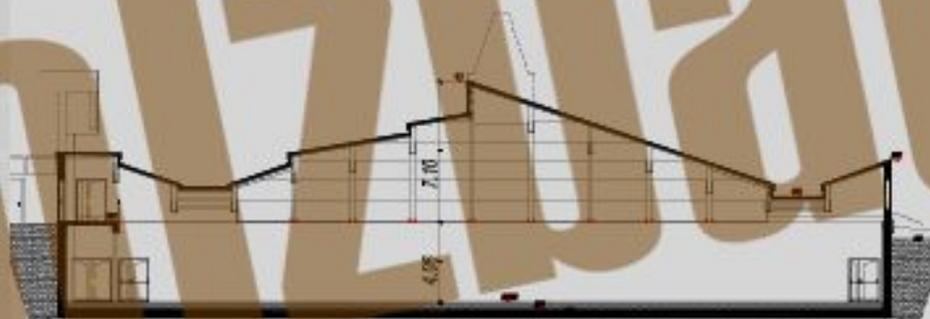
Palasport di Livorno

Campo da tennis:

- superficie coperta: 800 mq

- n° posti a sedere: nessuno

RESISTENZA AL FUOCO: R60

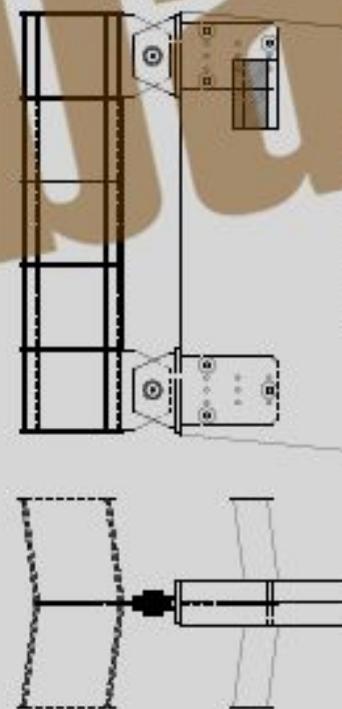


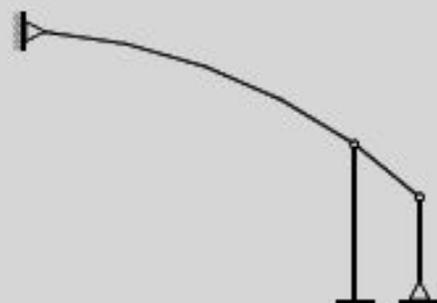
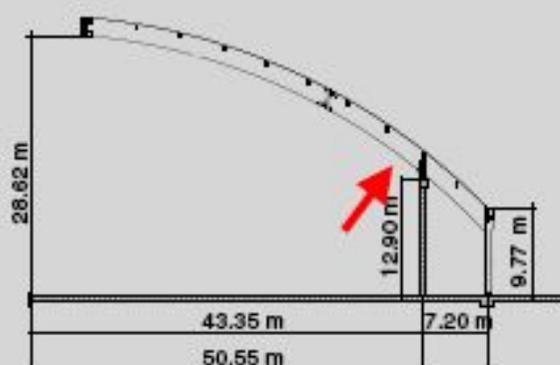


Palasport di Livorno

Sezione trasversale:

Archi con cerniera al piede
e incastro in sommità

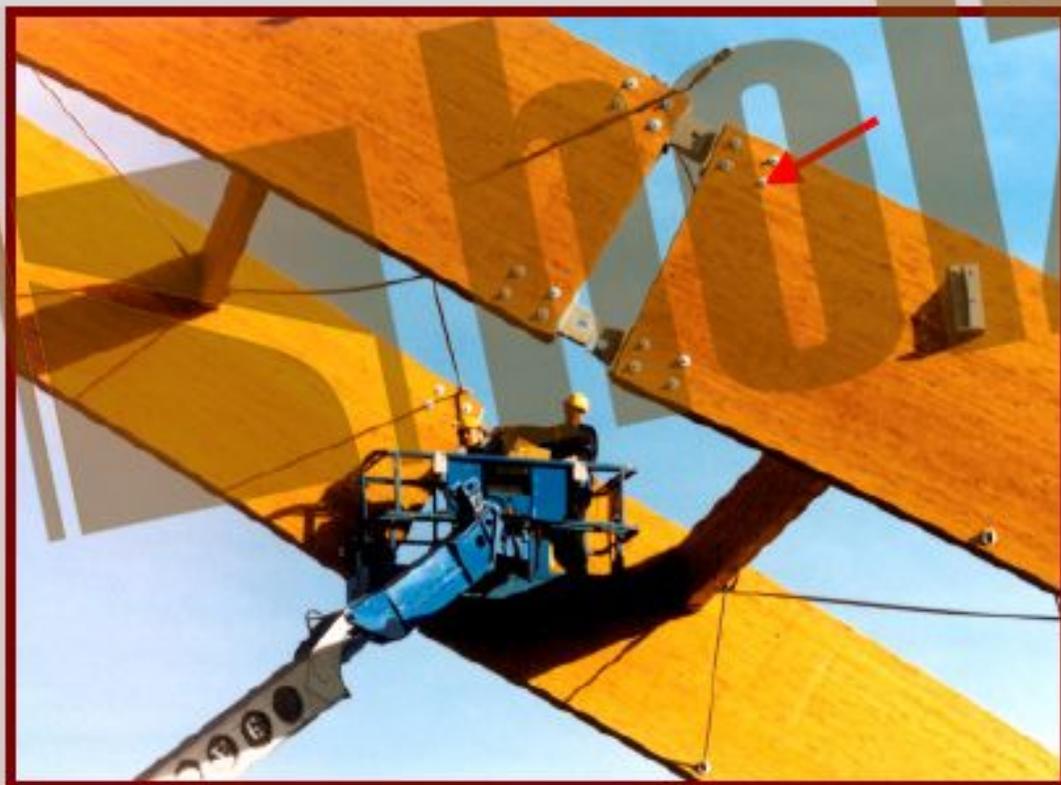




SEZIONE TIPO B

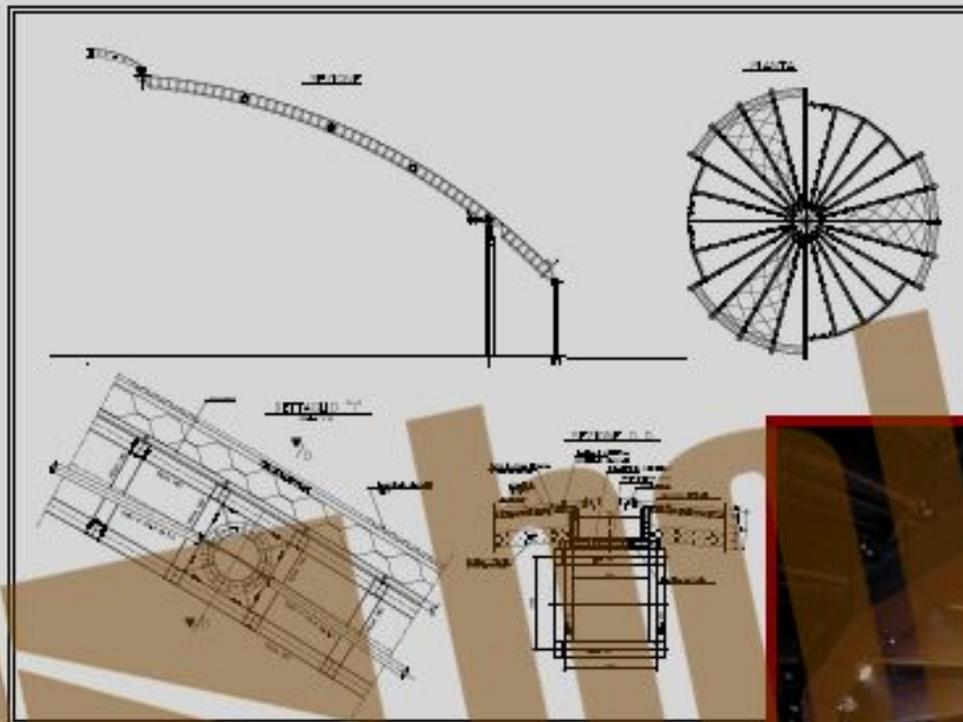
Sezione trasversale:

Archi con appoggio intermedio e pilastro in legno al piede



Palasport di Livorno





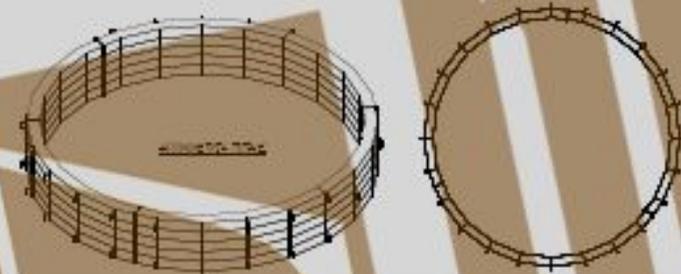
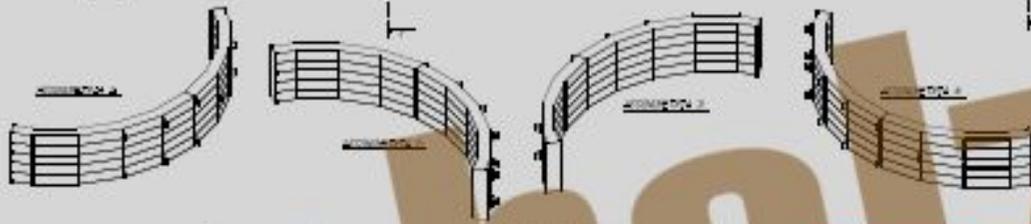
L'evoluzione progettuale:

dalla struttura in acciaio ...

... alla struttura in legno



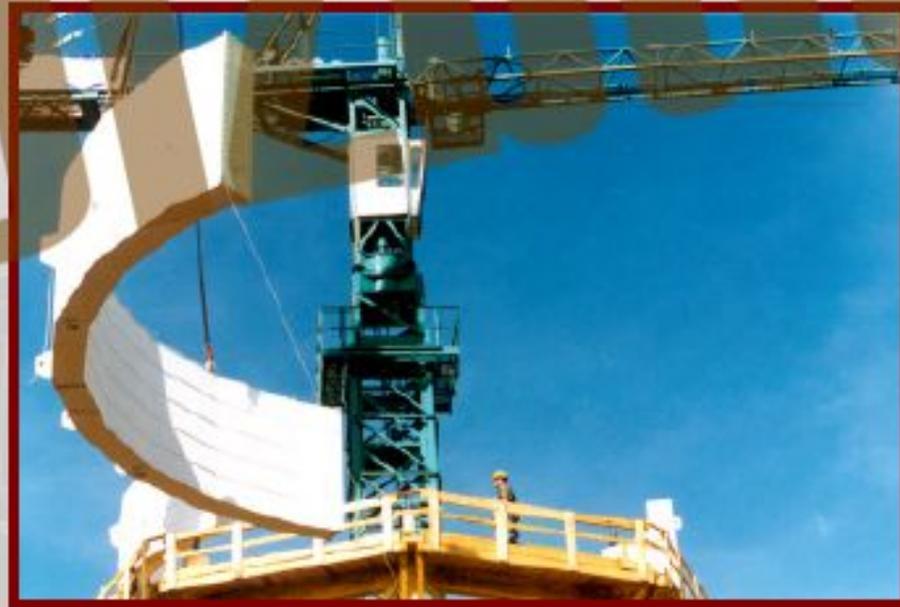
Palasport di Livorno



Anello centrale:

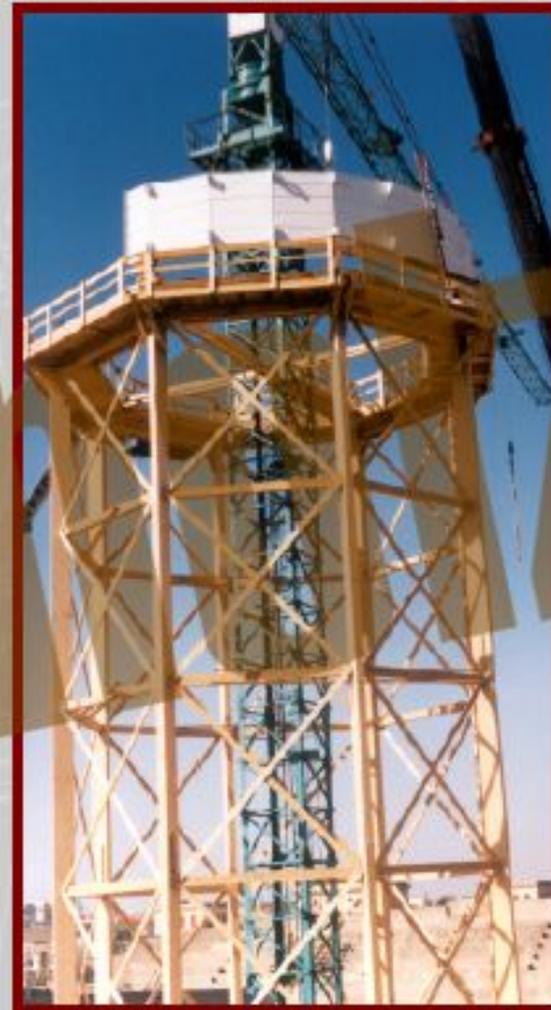
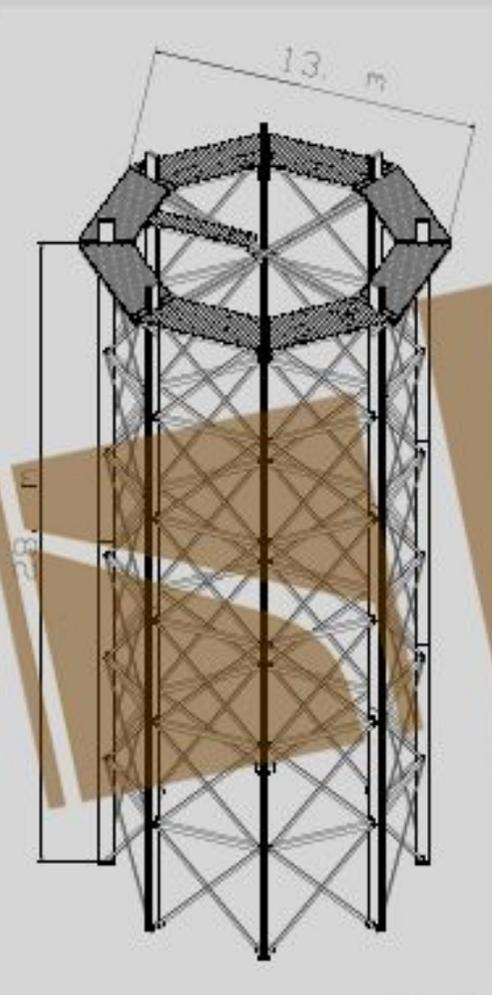
diametro 11.5 m
peso 25.000 kg

Palasport di Livorno



Struttura di sostegno dell'anello:

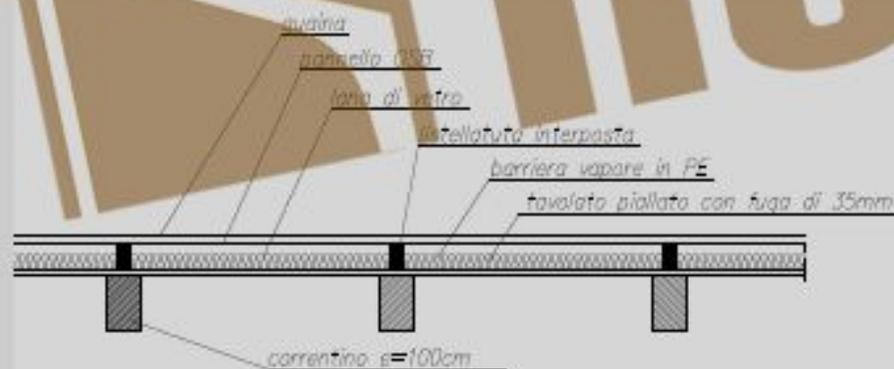
Altezza 28. m



Palasport di Livorno

PROGETTARE IL FUTURO IN LEGNO LAMELLARE



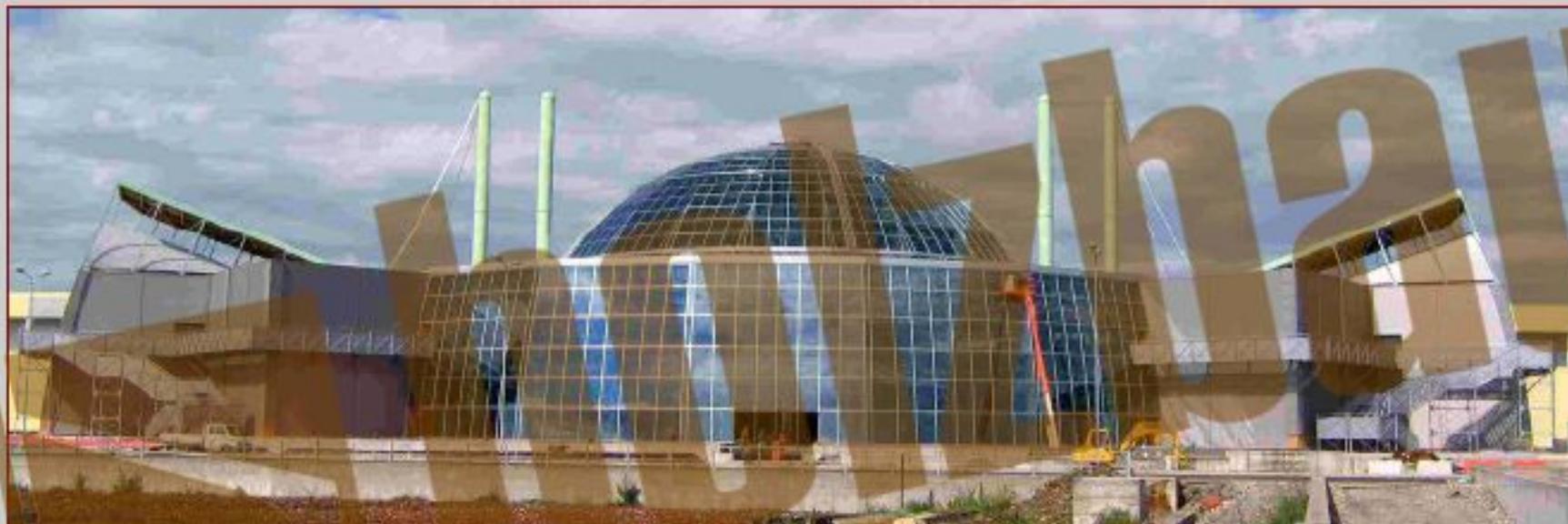


Pacchetto di copertura :

- pannelli pre-assemblati in cantiere
- superficie pannello 80 mq circa

Palasport di Livorno

Centro commerciale “Le Acciaierie”
Cortenuova (BG)



Caratteristiche generali:

Superficie copertura	10.000 mq
Superficie solai	2.320 mq
Superficie pareti	1.820 mq
Resistenza al fuoco	R 60

Schema strutturale:



Centro commerciale "Le Acciaierie" (BG)

La torre

Altezza torre 29. m

Diametro 6.5 m



Centro commerciale "Le Acciaierie" (BG)



L'ombrello

Diametro cupola	47.0 m
Raggio anello circolare	17.5 m
Diametro complessivo	82.0 m



Centro commerciale "Le Acciaierie" (BG)



Centro commerciale "Le Acciaierie" (BG)

Le ali

Lunghezza 17.5 m

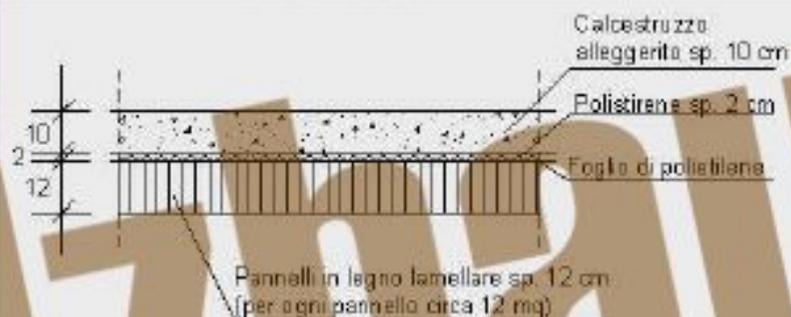
Altezza 14.0 m



PROGETTARE IL FUTURO IN LEGNO LAMELLARE



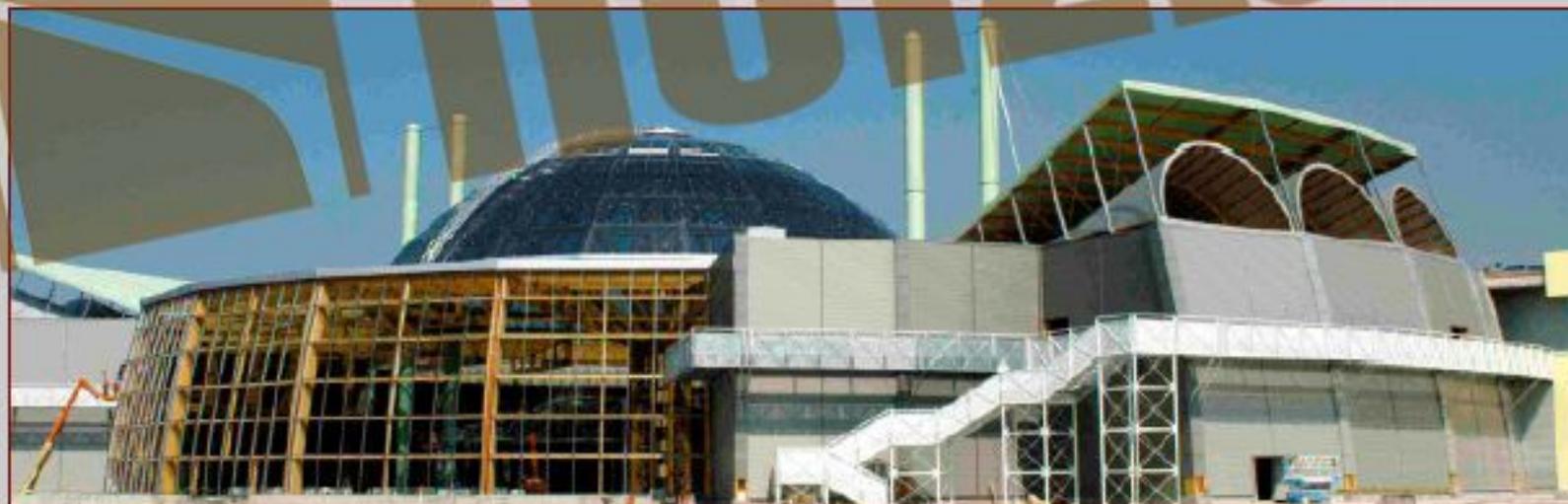
Solaio 1° piano



Solaio di copertura



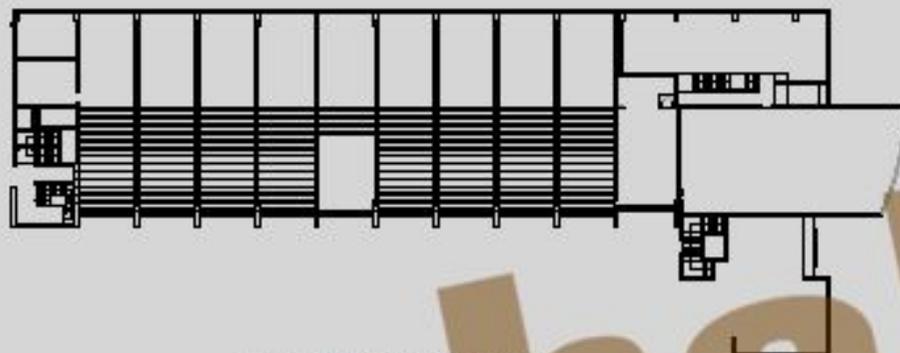
Le pareti delle ali



Centro commerciale "Le Acciaierie" (BG)

Centro protezione civile (TN)

PIANTA SOLAIO



PIANTA COPERTURA



Caratteristiche generali:

Superficie copertura 1.700 mq

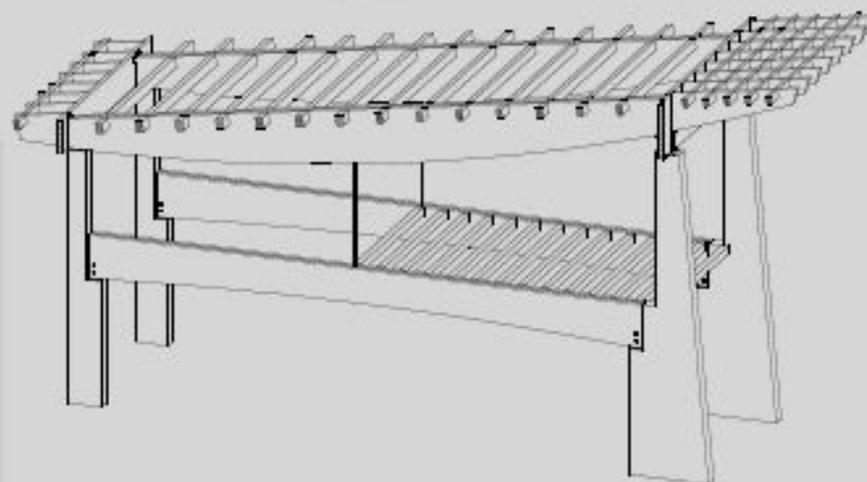
Superficie solaio 450 mq

Resistenza al fuoco R 90

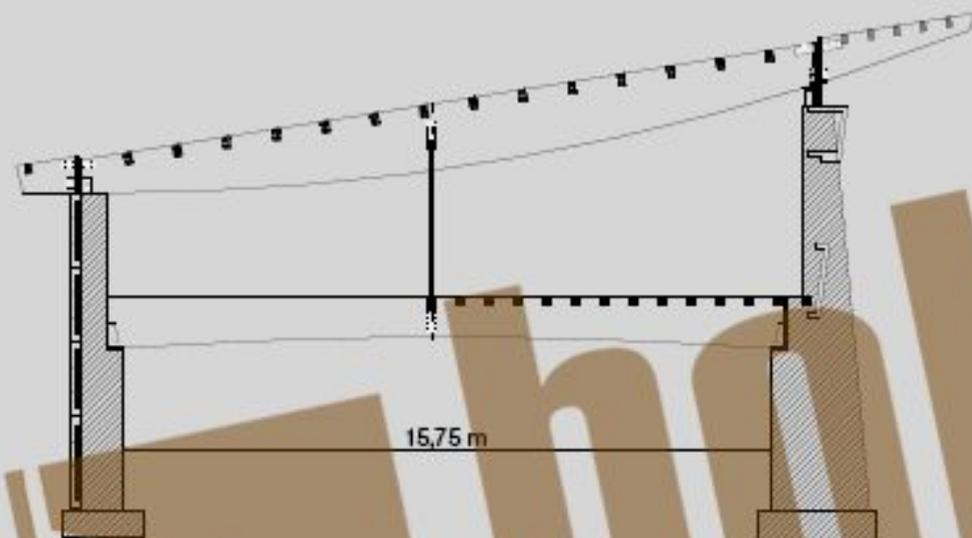
Edificio strategico (comando VVFF)



Struttura in legno



Sezione trasversale tipo



Interasse travi: 5.40 m

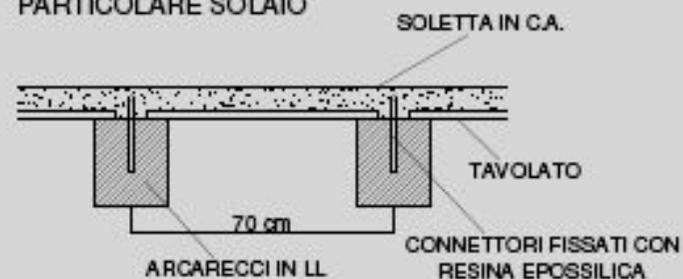
Luce travi di copertura: 17.0 m

Interasse arcarecci di solaio .70 m

SEZIONE TRASVERSALE SOLAIO



PARTICOLARE SOLAIO



Viste in fase di montaggio

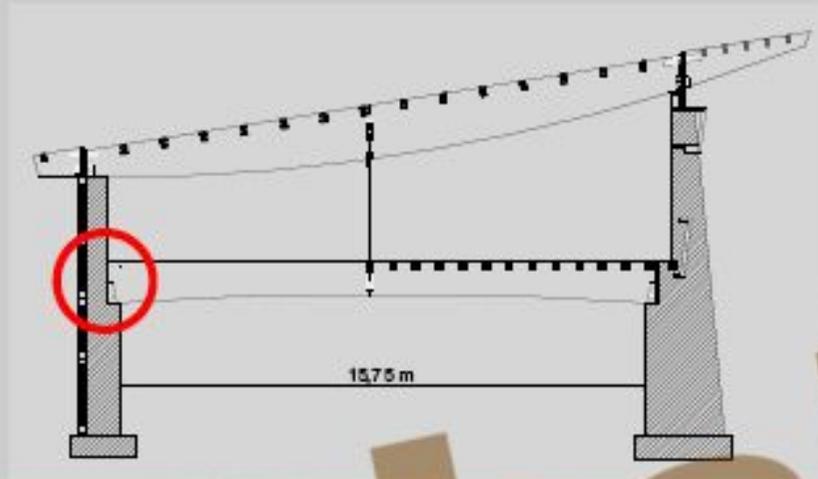


Posa dell'orditura principale



Posa del tavolato sul solaio

Centro protezione civile della Provincia Autonoma di Trento

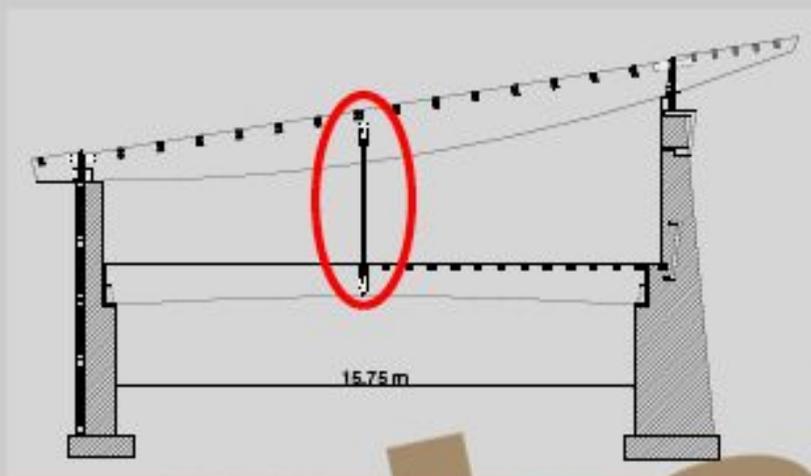


I particolari costruttivi

Forcelle di appoggio delle travi



Centro protezione civile della Provincia Autonoma di Trento



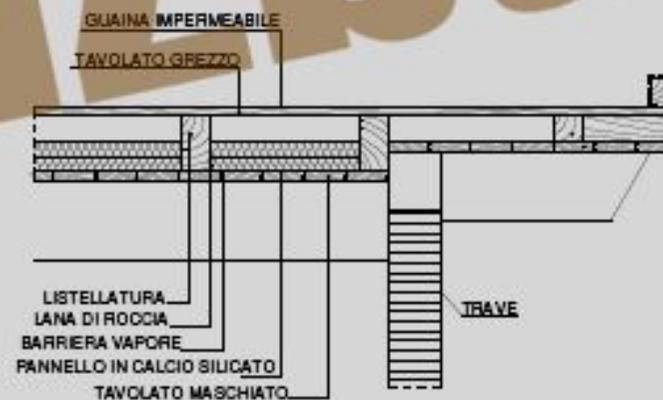
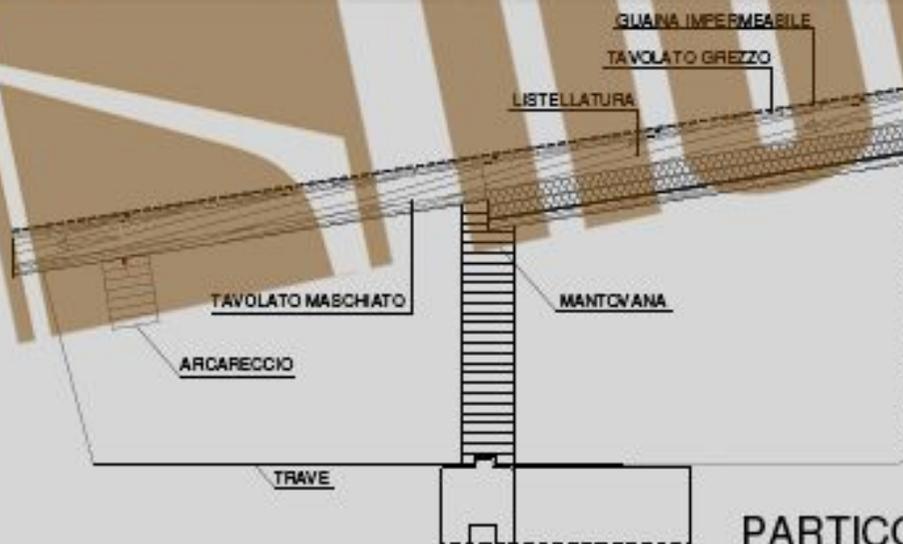
I particolari costruttivi

Aggancio e rivestimento del tirante



Centro protezione civile della Provincia Autonoma di Trento

Il pacchetto di copertura



PARTICOLARE PACCHETTO DI COPERTURA

Centro protezione civile della Provincia Autonoma di Trento

Stabilimento ortofrutticolo Melinda (TN)

Caratteristiche generali:

Superficie copertura 7.000 mq

Superficie pareti 2.500 mq

Resistenza al fuoco R 60

Corpo A: tettoia di accesso

Corpo B: deposito imballaggi

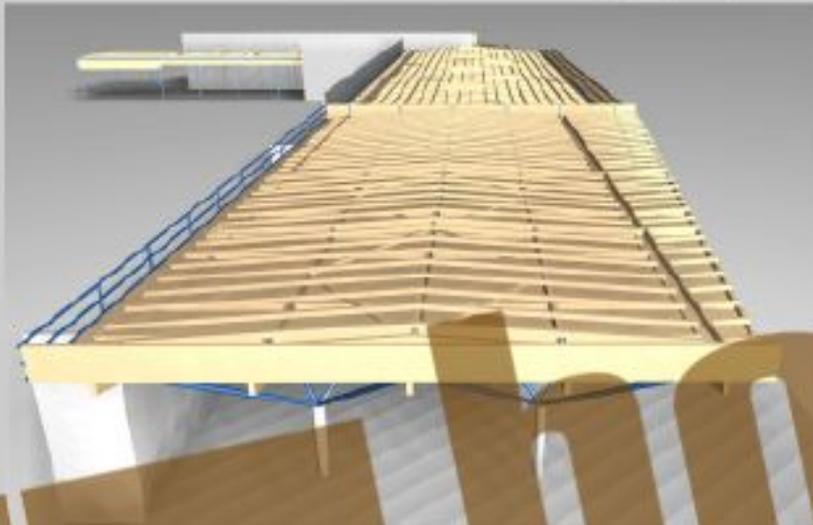
Corpo C: celle frigorifere

Corpo D: tunnel di collegamento

Corpo E: rampa di accesso interrato



Tettoia di accesso:



Superficie coperta 1.200 mq



Stabilimento ortofrutticolo Melinda (TN)

Deposito imballaggi

Superficie coperta 2.300 mq



Controvento in legno

Stabilimento ortofrutticolo Melinda (TN)

Pareti in legno lamellare



Lunghezza pannelli	8,50 m
Altezza parete	9,10 m
Tempo di montaggio	12 giorni

Stabilimento ortofrutticolo Melinda (TN)

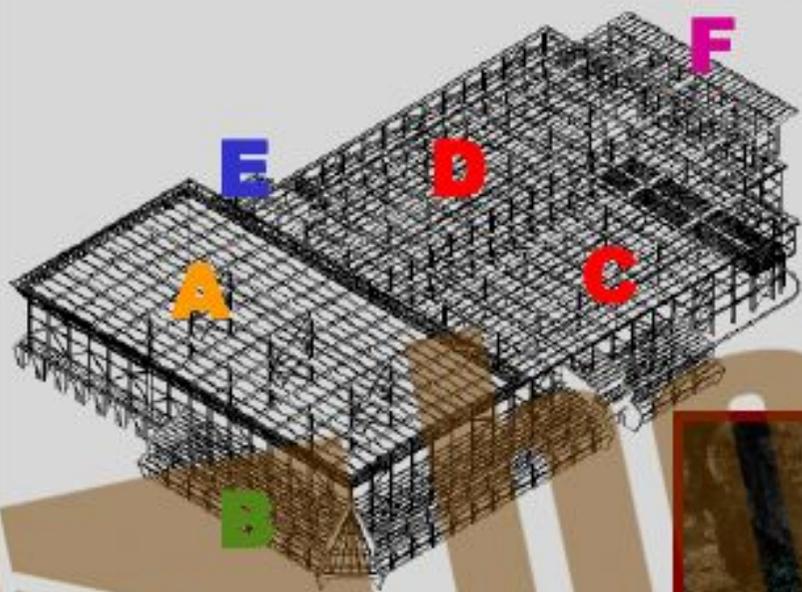
Stabilimento industriale Trentinalatte (TN)

Caratteristiche generali:

Superficie copertura 11.900 mq

Superficie solai 7.500 mq

Resistenza al fuoco R 60



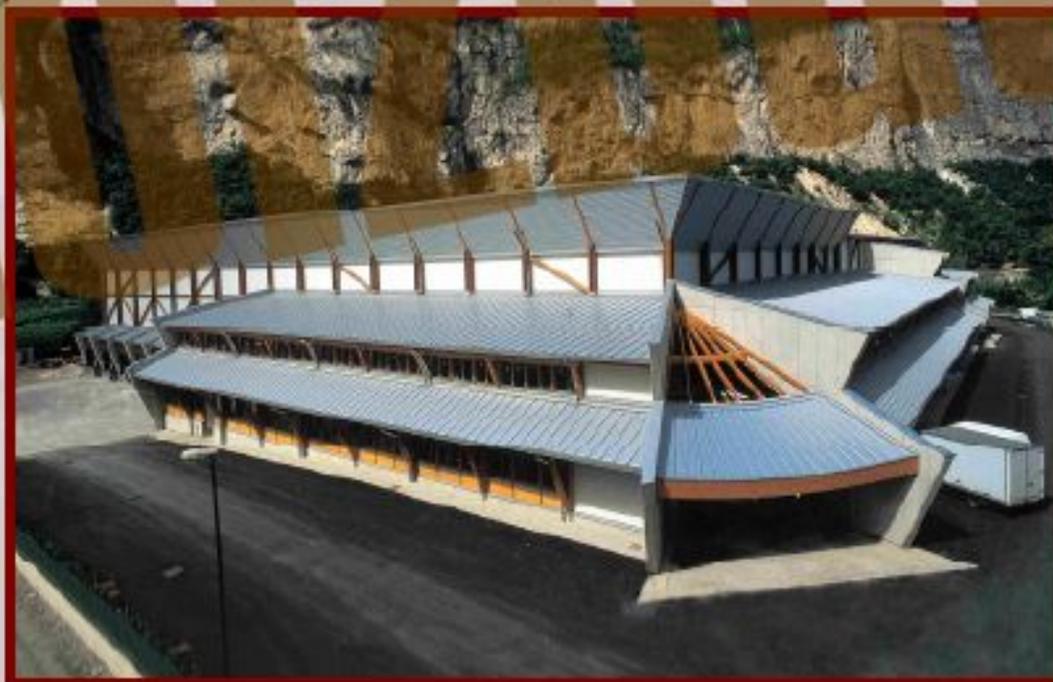
Corpo A: cella frigorifera

Corpo B: uffici

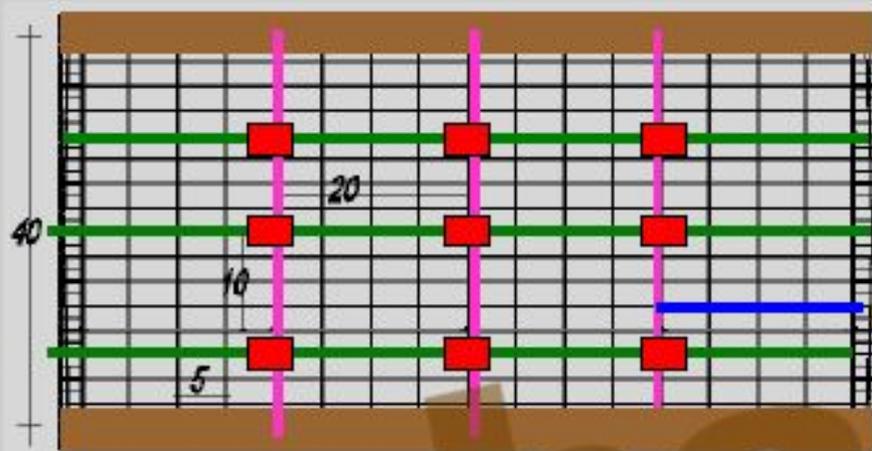
Corpo C-D: produzione

Corpo E: carico-scarico

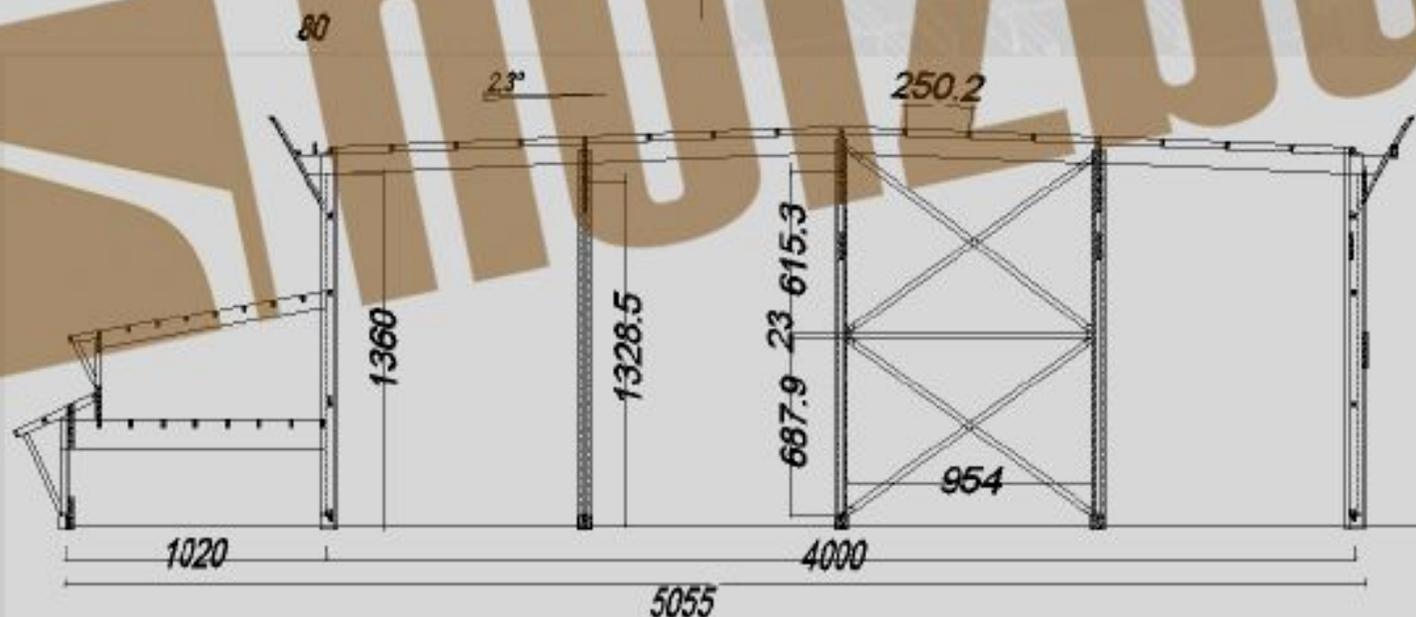
Corpo F: impianti



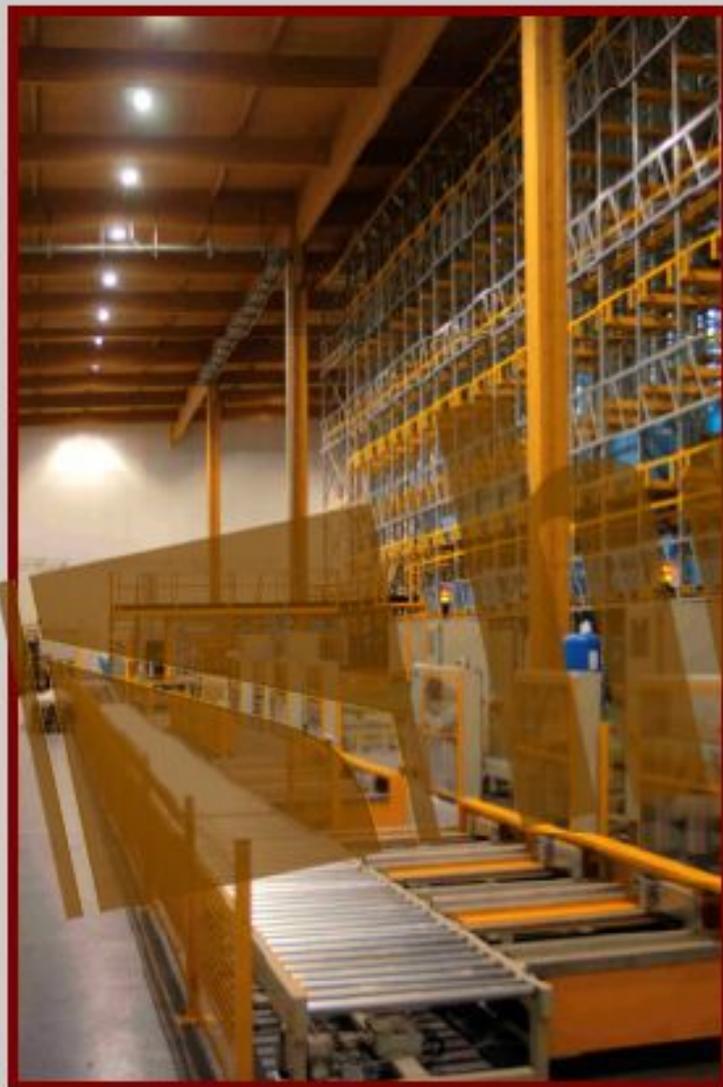
**Cella frigorifera:
schema strutturale**



- Pilastro ad "H" in legno lamellare $i = 20. m$
- Pilastro ad "H" in legno lamellare $i = 5. m$
- Architrave $i = 10. m$
- Trave IIª $i = 5. m$
- Trave IIIª $i = 2.5 m$



Stabilimento industriale Trentinalatte (TN)

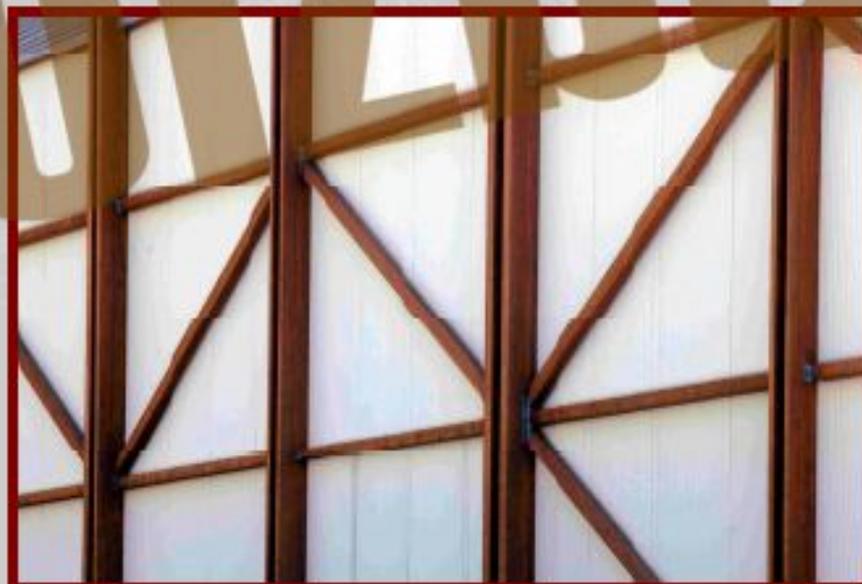
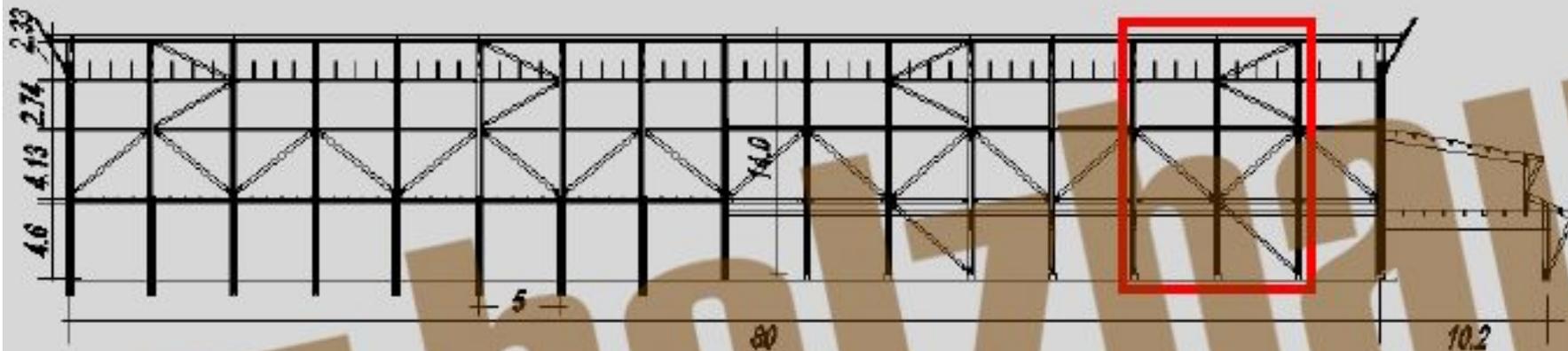


Cella frigorifera:
viste interne

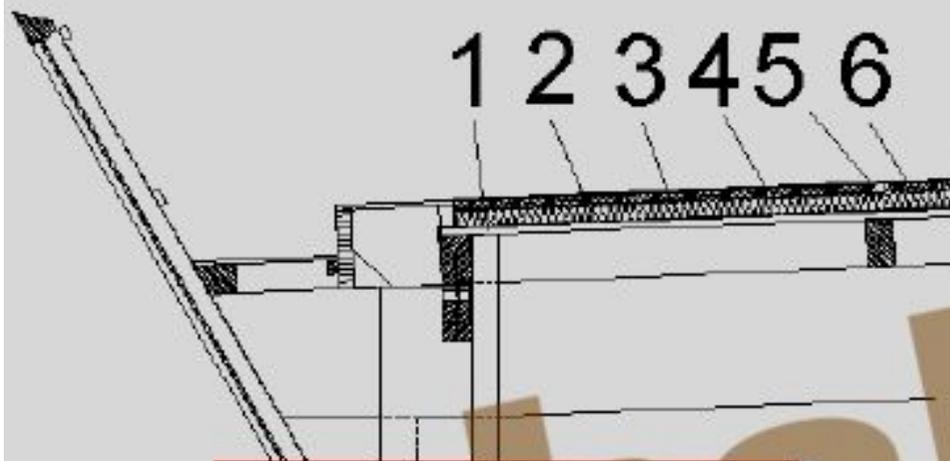


Stabilimento industriale Trentinalatte (TN)

Cella frigorifera:
sezione longitudinale



Stabilimento industriale Trentinalatte (TN)



Cella frigorifera:
il pacchetto di copertura

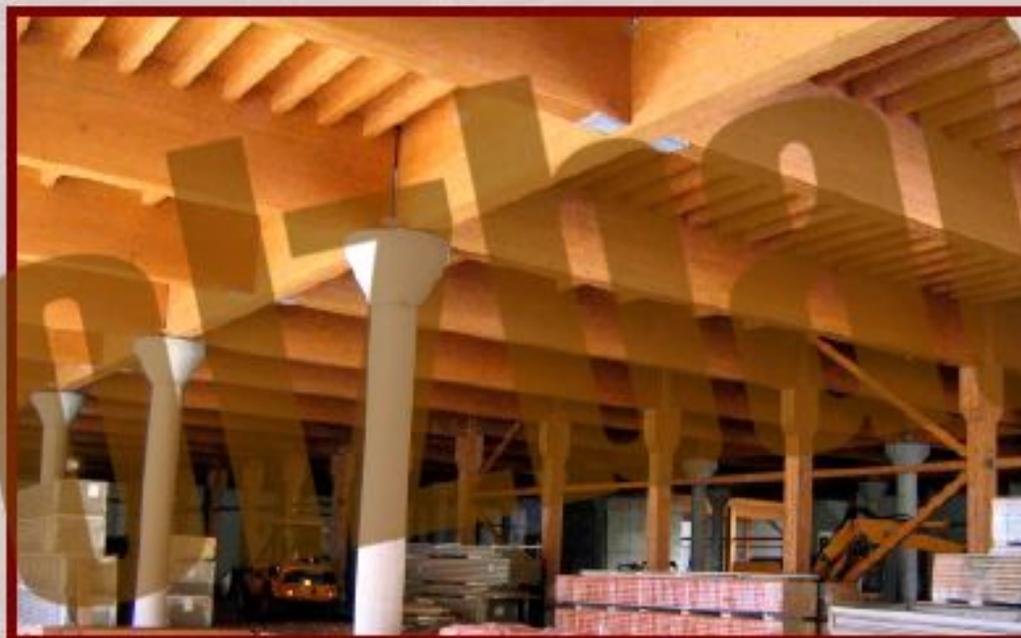
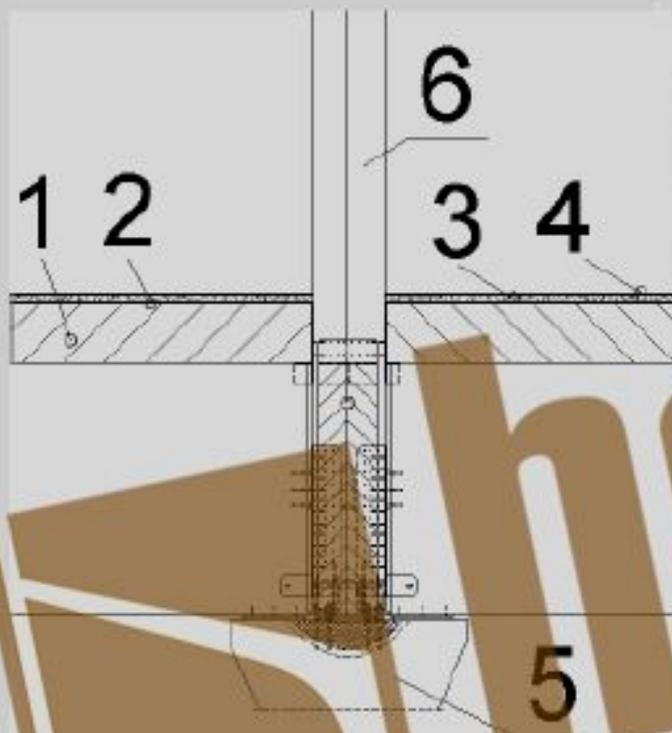


- 1 - Pannello strutturale di legno $s=4.2$ cm
- 2 - Barriera al vapore
- 3 - Polistirene estruso $s=10$ cm
- 4 - Lana di roccia con guaina $s=5$ cm;
- 5 - Listellatura interposta
- 6 - Guaina saldata a caldo

Stabilimento industriale Trentinalatte (TN)

Solaio corpo produzione:

Superficie solaio 5.600 mq



1 - Pannello strutturale di legno s=16. cm

4 - Spalmatura e verniciatura epossidica

2 - Foglio di separazione in silicone

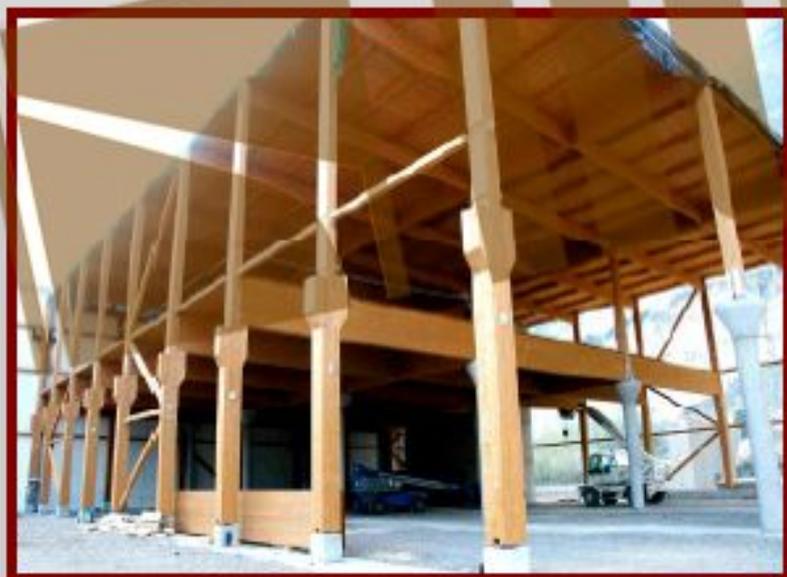
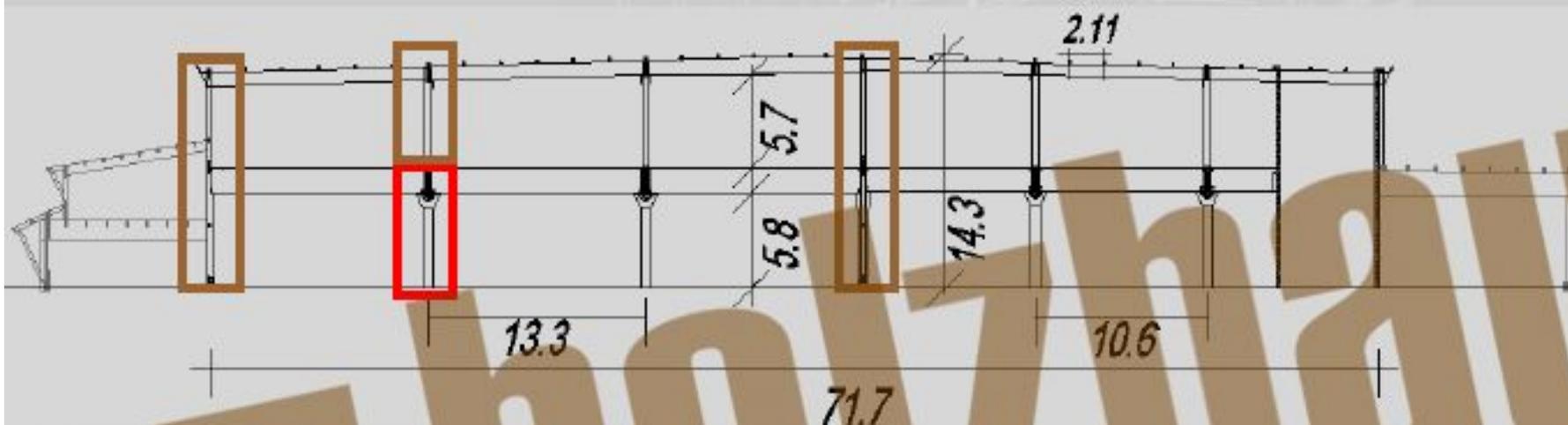
5 - Pilastro in c.a.

3 - Piastrelle in cemento compresso s=2. cm

6 - Pilastro incastrato in legno lamellare

Stabilimento industriale Trentinalatte (TN)

Copertura corpo produzione:



Superficie copertura 5.800 mq

Schema strutturale

-  Pilastris in c.a.
-  Pilastris in legno lamellare

Stabilimento industriale Trentinalatte (TN)



Grazie e arrivederci