



RINFORZO DEI SOLAI LIGNEI ESISTENTI «BASI DI CALCOLO E NORMATIVE»

Ivan Giongo

Università degli Studi di Trento

DICAM | Dipartimento di Ingegneria Civile, Ambientale e Meccanica

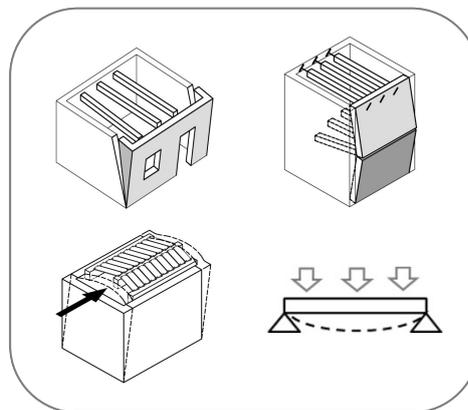
SOMMARIO

- I. Introduzione & soluzioni di rinforzo per solai lignei
- II. Tecniche composte legno-legno per il rinforzo fuori-piano
- III. Solai composti pre-sollecitati
- IV. Deformabilità di piano dei solai esistenti
- V. Strumenti normativi
- VI. Verifica dei solai lignei esistenti per azioni nel piano: nuovo EN1998-III

DIAFRAMMI LIGNEI ESISTENTI

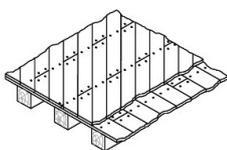
Rilevazioni post-sisma hanno evidenziato come i fenomeni di collasso negli edifici in muratura siano fortemente influenzati da:

- Rigidezza dei solai (nel-piano)
- Inadeguati collegamenti tra orizzontamenti e murature

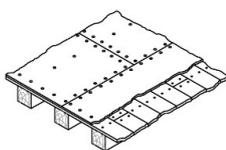


TECNICHE DI RINFORZO PER SOLAI LIGNEI

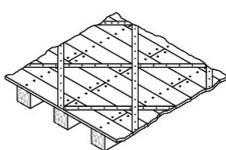
A. Tavolato diagonale



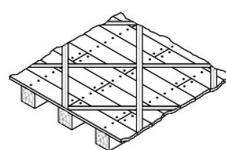
B. Pannelli compensato/OSB



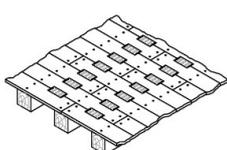
C. Bandelle metalliche



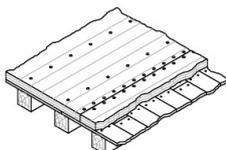
D. Strisce FRP - CFRP



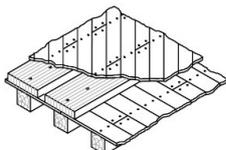
E. Piastre chiodate



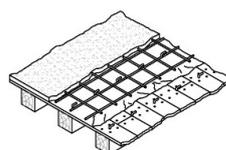
F. Pannelli CLT - LVL



G. Tavoloni lignei e tavolato diagonale

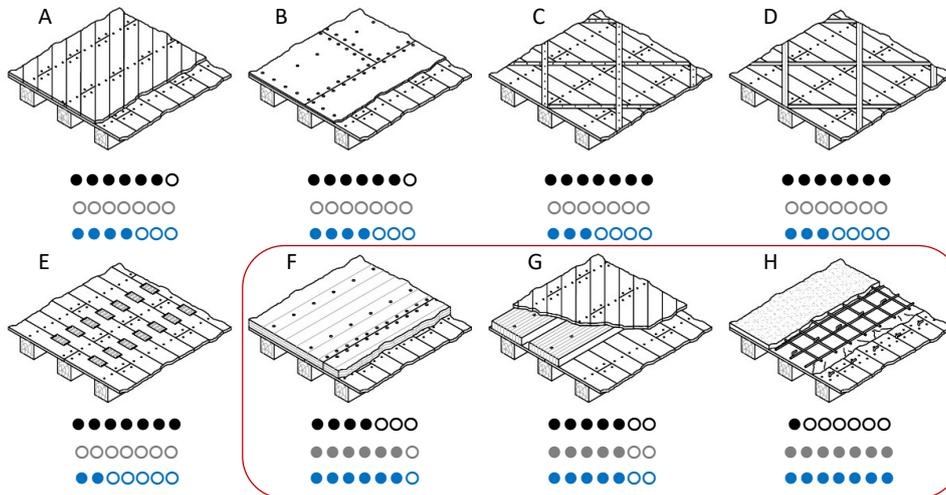


H. Soletta collaborante in CLS



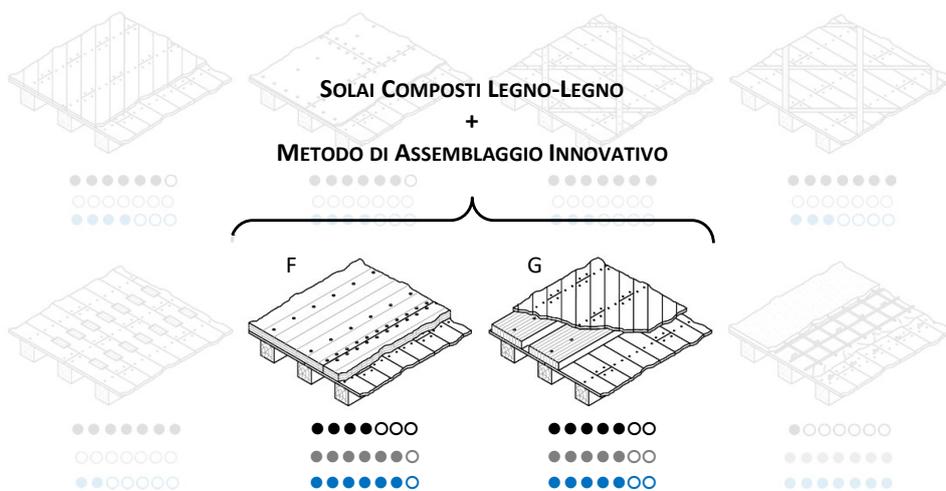
TECNICHE DI RINFORZO PER SOLAI LIGNEI

- Leggerezza
- Rigidezza fuori-piano
- Rigidezza nel-piano



TECNICHE DI RINFORZO PER SOLAI LIGNEI

- Lightness
- Out-of-plane stiffness
- In-plane stiffness



TECNICHE DI RINFORZO PER SOLAI LIGNEI

Soluzioni che comportano significativi incrementi di massa sono da evitare, specialmente ai piani superiori.



[Borri 2007]

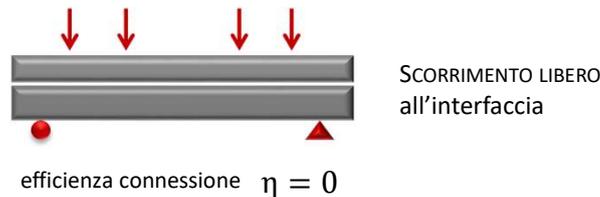


Norme Tecniche 2018 (Circ. 2019)

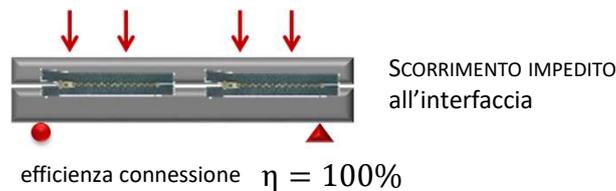
[C8.7.4.1] «...Per gli edifici storici, nel consolidamento di solai lignei sono generalmente preferibili i diaframmi leggeri, di rigidità non trascurabile, realizzati a secco, quali quelli ottenuti con doppio assito, con pannelli a base legno, lamiere di acciaio, reticolari di acciaio, reticolari con fibre o altro materiale idoneo...»

STRUTTURE COMPOSTE

$K = 0$ RIGIDEZZA DELLA CONNESSIONE NULLA (NESSUNA INTERAZIONE)



$K = \infty$ RIGIDEZZA INFINITA (COMPLETA INTERAZIONE)

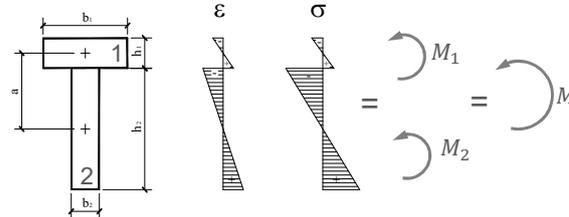


STRUTTURE COMPOSTE

$K = 0$ RIGIDezza DELLA CONNESSIONE NULLA (NESSUNA INTERAZIONE)

$$EJ_0 = EJ_1 + EJ_2$$

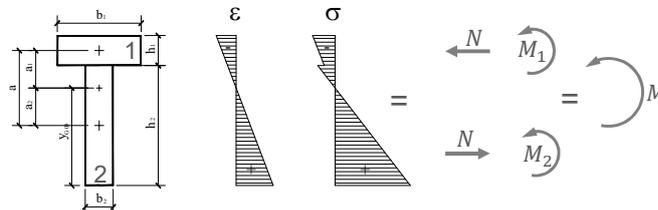
$$= \frac{1}{12} (E_1 b_1 h_1^3 + E_2 b_2 h_2^3)$$



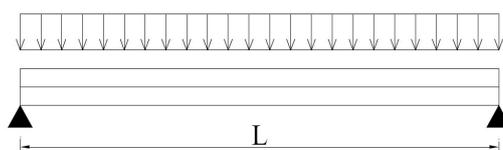
$K = \infty$ RIGIDezza INFINITA (COMPLETA INTERAZIONE)

$$EJ_\infty = EJ_0 + EA_0 \cdot a^2$$

$$EA_0 = \frac{1}{\frac{1}{E_1 A_1} + \frac{1}{E_2 A_2}}$$



STRUTTURE COMPOSTE



$K = 0$ (INTERAZIONE NULLA)

$$EJ_0 = E \frac{2bh^3}{12}$$

$$M_1(x) = M_2(x) = \frac{M(x)}{2} \quad N(x) = 0$$

$$w_0\left(\frac{l}{2}\right) = \frac{5}{384} \frac{ql^4}{EJ_0}$$

$$\sigma_{0\max}\left(\frac{l}{2}\right) = \frac{1}{2} \frac{ql^2}{bh^2} = \frac{3}{8} \frac{ql^2}{bh^2}$$

$K = \infty$ (COMPLETA INTERAZIONE)

$$EJ_\infty = E \frac{8bh^3}{12} = 4EJ_0$$

$$M_1(x) = M_2(x) = \frac{M(x)}{8} \quad N(x) = \frac{3}{4} \frac{M(x)}{h}$$

$$w_\infty\left(\frac{l}{2}\right) = \frac{5}{384} \frac{ql^4}{EJ_\infty} = \frac{w_0}{4}$$

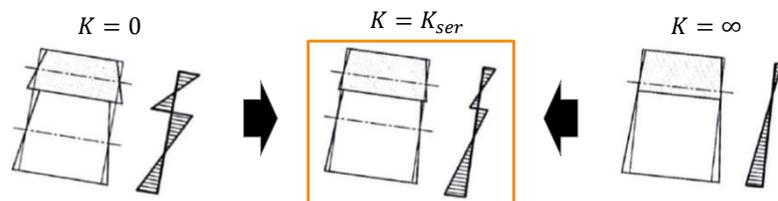
$$\sigma_{\infty\max}\left(\frac{l}{2}\right) = \frac{1}{8} \frac{ql^2}{bh^2} + \frac{3}{4h} \frac{ql^2}{8} = \frac{3}{16} \frac{ql^2}{bh^2} = \frac{\sigma_{0\max}}{2}$$

STRUTTURE COMPOSTE

$K = K_{ser}$ RIGIDEZZA REALE DELLA CONNESSIONE

Il comportamento statico reale della struttura composta inflessa è intermedio tra le due situazioni limite viste in precedenza.

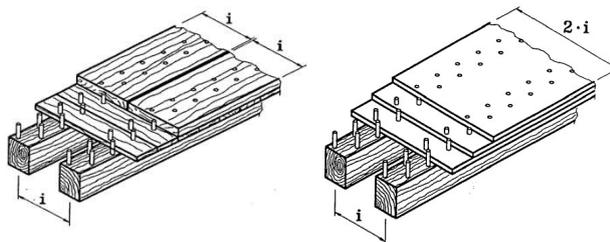
Se incremento $\uparrow K$: L'asse neutro del sistema composto si alza e di conseguenza la porzione tesa aumenta (trave tenso-inflessa). Le deformazioni flessionali si riducono e diminuisce anche la curvatura.



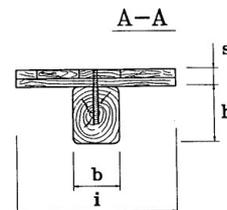
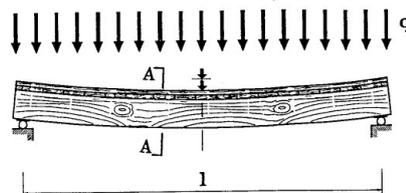
[Ballerini M. et al., 2002]

PRIMI ESEMPI DI SOLUZIONI LEGNO-LEGNO

Piazza (1994)

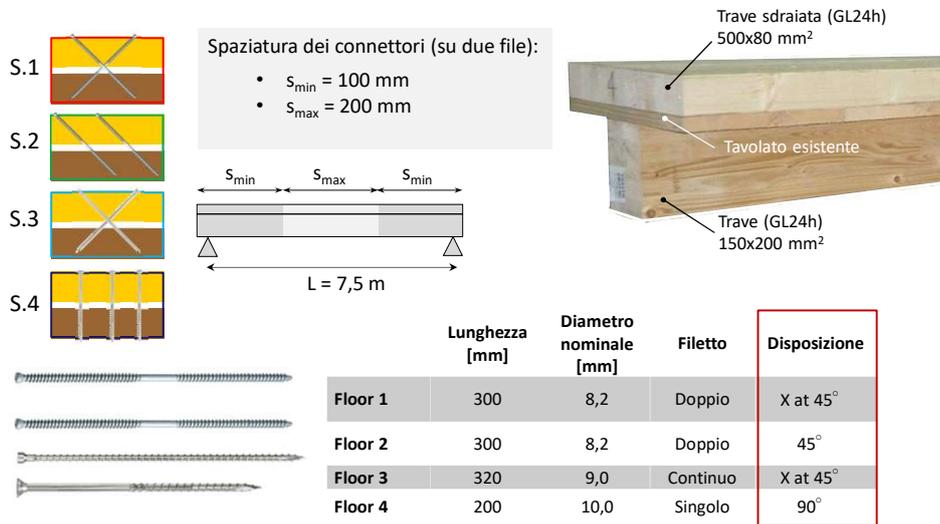


$\eta = 60\% - 70\%$



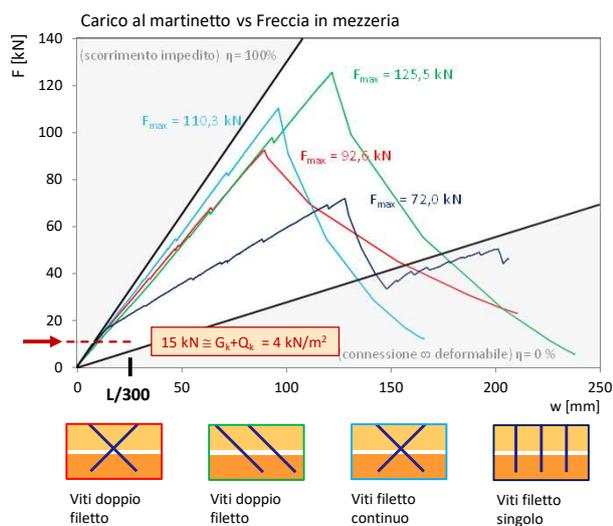
TEST SPERIMENTALI

SOLUZIONI DI RINFORZO ADOTTATE



TEST SPERIMENTALI

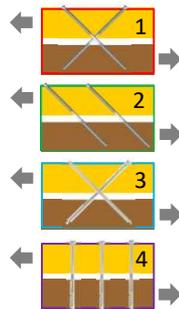
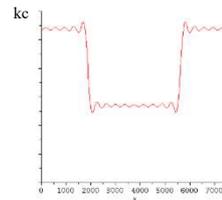
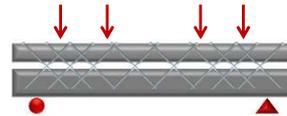
TRAVI COMPOSTE: TEST A ROTTURA



TEST SPERIMENTALI

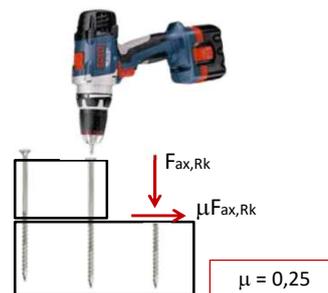
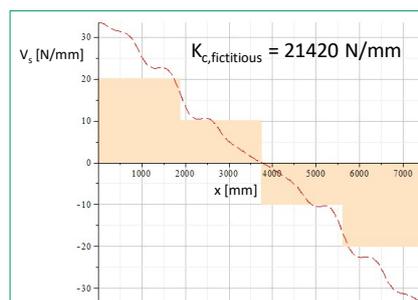
ANALISI DEI DATI – MODELLO NUMERICO

- Teoria esatta (Newmark et al.,1951);
- reale configurazione di carico; ➡
- reale distribuzione di rigidità; ➡



	k_c [N/mm]	$w_{exp.}$ [mm]	$w_{theor.}$ [mm]	Err. [%]
Floor 1	30102	13,289	12,340	7,1
Floor 2	36493	14,742	14,098	4,4
Floor 3	33028	12,820	11,941	6,9
Floor 4	5383	12,564	16,471	31,1

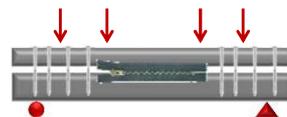
ANALISI DEI DATI E MODELLAZIONE MODELLO NUMERICO



$$F_{ax,Rk} = f_{head,k} \cdot d_h^2 \cdot \left(\frac{\rho_k}{350}\right)^{0,8} = 4,01 \text{ kN}$$

[ETA – 11/0030]

	k_c [N/mm]	$w_{exp.}$ [mm]	$w_{theor.}$ [mm]	Err. [%]
Floor 4	5383	12,564	13,641	8,6



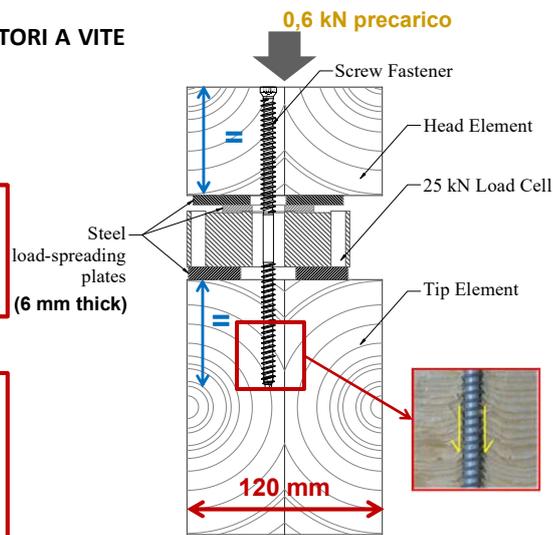
PRESSIONE ESERCITATA DAI CONNETTORI A VITE

✓ 170 TEST SPERIMENTALI

Viti a doppio filetto



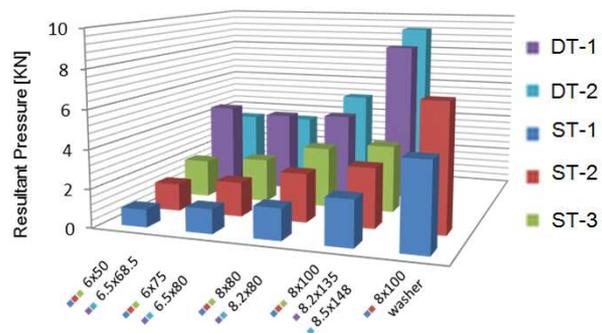
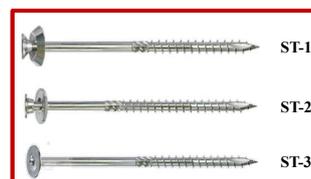
Viti a filetto parziale



C24 – Bilama d'abete
 $(\omega_{\text{mean}} = 12.5 \%, \rho_{\text{mean}} = 450 \text{ kg/m}^3)$

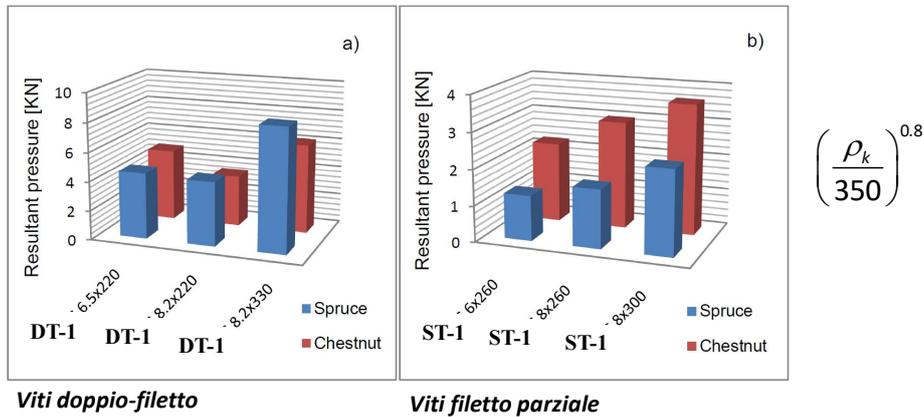
PRESSIONE ESERCITATA DAI CONNETTORI A VITE

Generalmente le viti a doppio filetto permettono di raggiungere valori di forza di compressione più elevati rispetto alle viti a filetto parziale



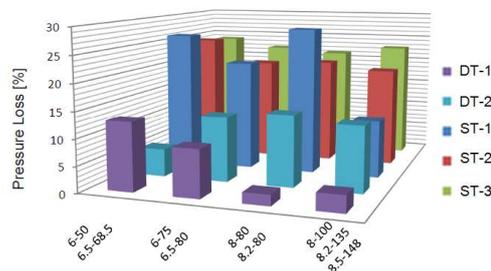
PRESSIONE ESERCITATA DAI CONNETTORI A VITE

L'inserimento dei connettori nel legno di latifoglia (castagno) ha avuto esito opposto a seconda del tipo di connettore.



PRESSIONE ESERCITATA DAI CONNETTORI A VITE

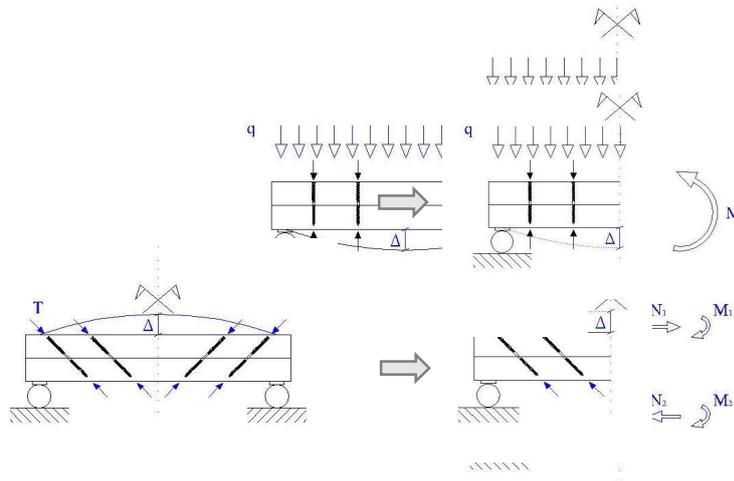
Dopo 15h, le viti a filetto parziale hanno mostrato una perdita di forza di compressione all'incirca doppia di quella registrata per le viti a doppio filetto.



E' stata proposta una formula per stimare la forza di compressione per le diverse tipologie di connettore (errore max. ≈12%).

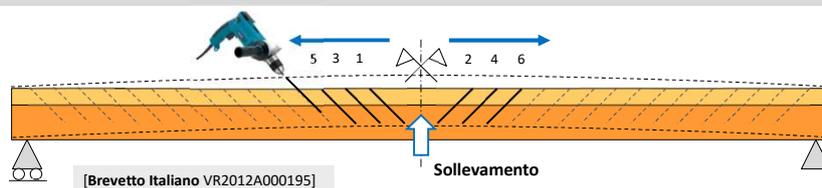
$$T = \gamma (d \cdot l_{th})^\alpha \rho^\beta \cdot \varphi$$

SOLUZIONI INNOVATIVE PROCEDURA DI PRE-SOLLECITAZIONE E MONTA



SOLUZIONI INNOVATIVE PROCEDURA DI PRE-SOLLECITAZIONE E MONTA

- Procedura:**
1. Posizionamento di un elemento ligneo sopra il travetto da rinforzare
 2. Inserimento sequenziale (da int. a est.) di viti con un angolo di 45° rispetto all'asse baricentrico della trave

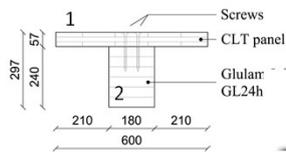


La forza di compressione esercitata dalle viti permette di ottenere una **struttura composta pre-sollecitata** e con **controfreccia**

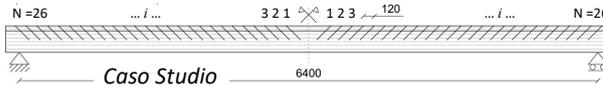
$$w_{L/2} = \sum_{i=1}^n \Delta w_{L/2} = \frac{nTa}{\alpha^2 EJ_0} \left\{ \sum_{i=1}^n \left[\frac{2 - \alpha(L - 2si) \sinh(\alpha si)}{2 \cosh(\alpha si)} \right] - 1 \right\}$$

[Giongo et al., 2012]

PREVISIONI NUMERICHE/ANALITICHE

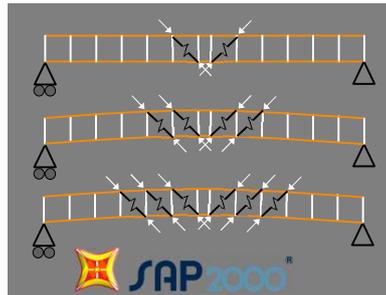
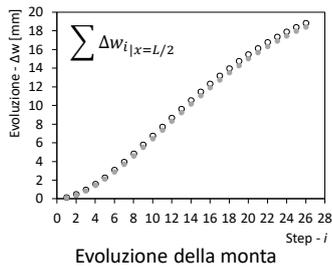


Proprietà meccaniche			
$E_1 = 11700 \text{ N/mm}^2$	$k_c = 62 \text{ N/mm}^2$		
$E_2 = 9500 \text{ N/mm}^2$	$F_{t1} = F_v = 6450 \text{ N}$		



Spostamento verticale in mezzeria

- Formulazione analitica
- Modello numerico



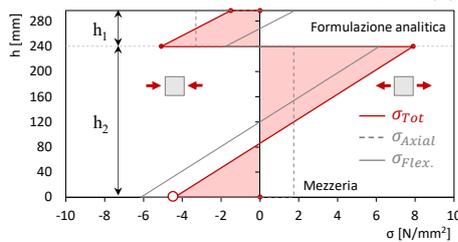
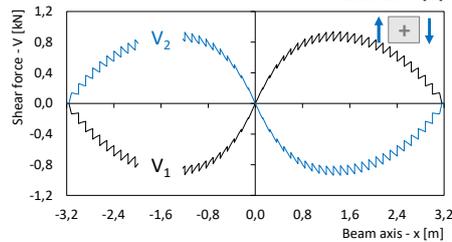
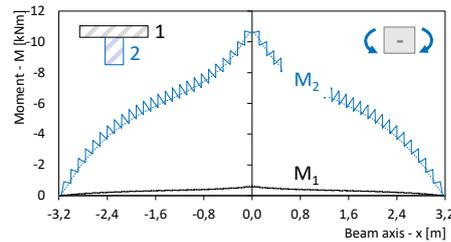
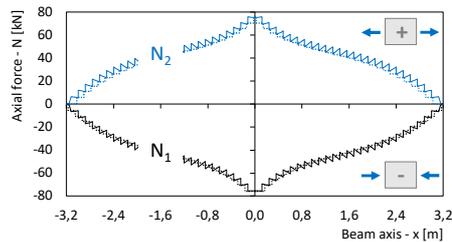
Non-linear staged construction



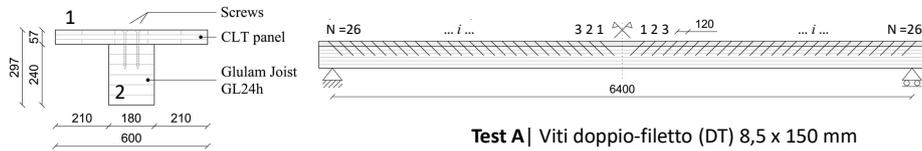
PREVISIONI NUMERICHE/ANALITICHE

Azioni interne | Al termine dell'assemblaggio

- Formulazione analitica
- Modello numerico



VALIDAZIONE SPERIMENTALE



Elemento	Proprietà	Test A	Test B
Pannello (1)	E_1 [N/mm ²]	11353	11708
	$\rho_{m,1}$ [kg/m ³]	457.12	458.24
Travetto (2)	E_2 [N/mm ²]	9638	9530
	$\rho_{m,2}$ [kg/m ³]	418.05	421.50
Connessione	k_s [N/mm]	9773	3740
	F [N]	2940	4560

Test A | Viti doppio-filetto (DT) 8,5 x 150 mm



Test B | Viti a filetto parziale (ST) 10 x 220 mm



Formulazione analitica
[Giongo et al 2013]

$$F = \gamma \cdot (d \cdot l_{th})^\alpha \rho^\beta \cdot \varphi$$

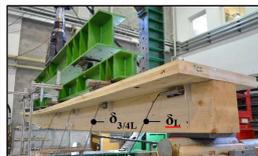
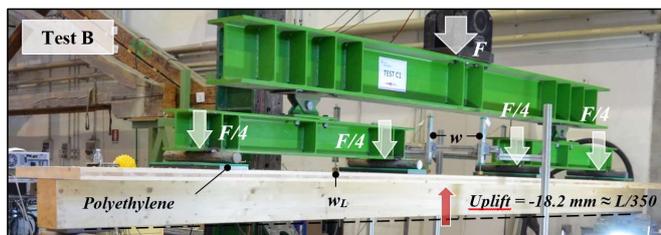
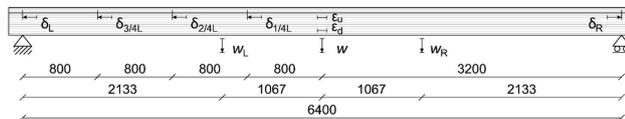
Dati sperimentali
[Schiro et al 2018]

Push-out Tests

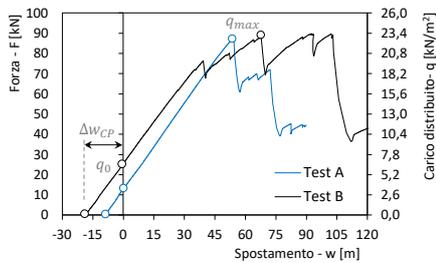
VALIDAZIONE SPERIMENTALE

- Fasi test :
1. Assemblaggio trave TTC | procedura CP
 2. Test a flessione | carico su sei punti

Instrument configuration:



VALIDAZIONE SPERIMENTALE



Results	Test A	Test B
$\Delta w_{CP,Exp}$ [mm]	8.35 (L/766)	18.22 (L/351)
q_0 [kN/m ²]	3.38	6.51
F_{max} [kN]	87.90	90.29
q_{max} [kN/m ²]	22.89	23.51
Formula analitica $\Delta w_{CP,A}$ [mm]	7.82	18.84
	(-6.35 %)	(+3.40 %)
Modello numerico $\Delta w_{CP,N}$ [mm]	7.42	18.43
	(-11.14 %)	(+1.15 %)

Test A | Viti doppio-filetto (DT) 8,5 x 150 mm



Test B | Viti a filetto parziale (ST) 10 x 220 mm

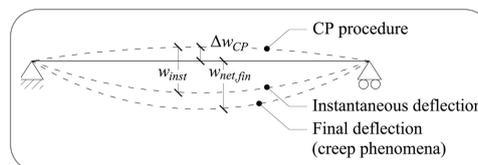


STRUTTURE COMPOSTE PRESOLLECITE | COMPORTAMENTO A LUNGO-TERMINE



Limiti di progetto:

- Stato Limite Ultimo
 - Breve-termine
 - Lungo-termine
- Stato Limite di Servizio
 - Freccia istantanea: $w_{inst} \leq L/300$
 - Freccia finale: $w_{net,fin} \leq L/350$



GEOMETRIA DEI CAMPIONI

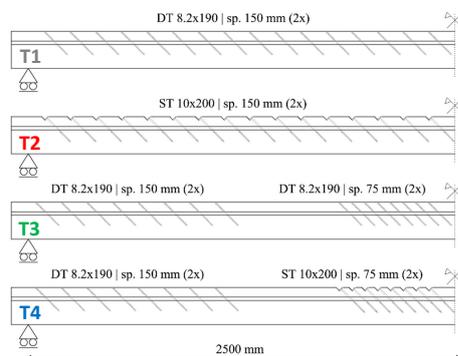
Quattro configurazioni. Medesimo numero di connettori: 64 (su 2 file)

- T1: Vite doppio-filetto
 - T2: Vite filetto-parziale
 - T3: Vite doppio-filetto
 - T4: Vite filetto parziale
- } Spaziatura costante
- } Spaziatura variabile

Vite doppio-filetto (DT) 8.2 x 190 mm



Vite filetto parziale (ST) 10 x 200 mm



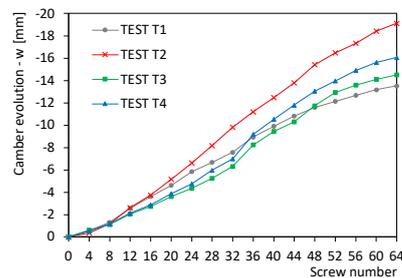
Condizioni ambientali: T = 20°C RH = 60%

EN 1995 | Classe di Servizio 1

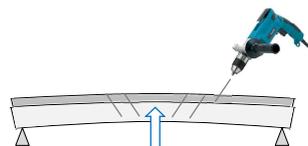
“...moisture content in the materials corresponding to a temperature of 20°C and the relative humidity of the surrounding air only exceeding 65% for a few weeks per year...”

PROCEDURA DI ASSEMBLAGGIO

Tutti i campioni sono stati assemblati secondo la procedura di pre-sollecitazione CP



Test	Sperim.	Numerico	Analitico
T1	-13.5 (L/370)	-12.13 -10.2%	-14.4 +6.6%
T2	-19.1 (L/262)	-16.7 -12.5%	-19.4 +1.2%
T3	-14.5 (L/345)	-11.8 -18.5%	- -
T4	-16.1 (L/311)	-13.3 -17.5%	- -



MESSA IN CARICO: COMBINAZIONE DI CARICO CARATTERISTICA

Ogni campione di solaio è stato caricato da un numero di sacchi di sabbia corrispondente alla combinazione caratteristica

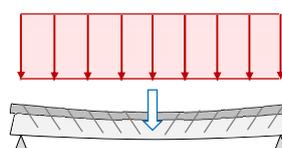
Combinazione caratteristica | 5.43 kN/m²
51 sacchi di sabbia (25 kg l'uno)

Combinazione quasi-permanente | 4.03 kN/m²
37 sacchi di sabbia (25 kg l'uno)



Fase	w		T1	T2	T3	T4
1°	w_{CP}^*	[mm]	-13.96	-19.13	-14.55	-16.33
2°	$w_{Ch.}$	[mm]	5.58	-3.95	5.22	0.74
	$\Delta w_{Ch.}$	[mm]	19.54	15.18	19.77	17.07

Combinazione di carico caratteristica



w_{CP}^* : monta dopo ~15 h dal termine dell'assemblaggio

RIMOZIONE DEL CARICO

Ogni campione è stato scaricato e si è misurato il "recupero elastico"

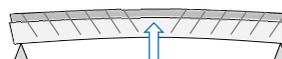
Combinazione caratteristica | 5.43 kN/m²
51 sacchi di sabbia (25 kg l'uno)

Combinazione quasi-permanente | 4.03 kN/m²
37 sacchi di sabbia (25 kg l'uno)



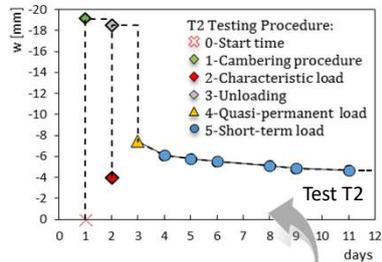
Fase	w		T1	T2	T3	T4
1°	w_{CP}^*	[mm]	-13.96	-19.13	-14.55	-16.33
2°	$w_{Ch.}$	[mm]	5.58	-3.95	5.22	0.74
	$\Delta w_{Ch.}$	[mm]	19.54	15.18	19.77	17.07
3°	w_{Unload}	[mm]	-13.12	-18.5	-14.2	-15.8

Non si sono osservate deformazioni residue apprezzabili



w_{CP}^* : monta dopo ~15 h dal termine dell'assemblaggio

MESSA IN CARICO: COMBINAZIONE DI CARICO QUASI-PERMANENTE

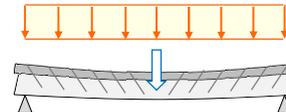


T = 20°C RH = 60%

Fase	w	T1	T2	T3	T4
1°	w_{CP}^* [mm]	-13.96	-19.13	-14.55	-16.33
2°	$w_{Ch.}$ [mm]	5.58	-3.95	5.22	0.74
	$\Delta w_{Ch.}$ [mm]	19.54	15.18	19.77	17.07
3°	w_{Unload} [mm]	-13.12	-18.5	-14.2	-15.8
4°	$w_{Q.P.}$ [mm]	0.50	-7.43	0.12	-3.46
	$\Delta w_{Q.P.}$ [mm]	13.62	11.07	14.32	12.34

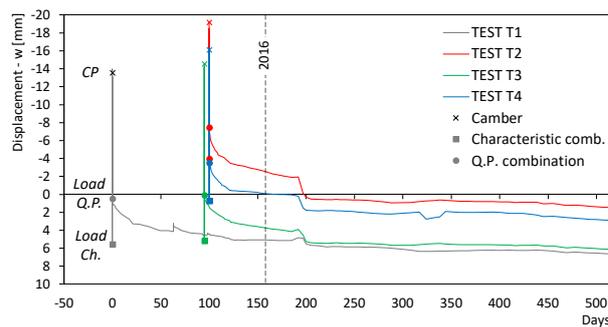
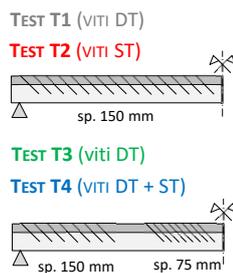


Combinazione quasi-permanente



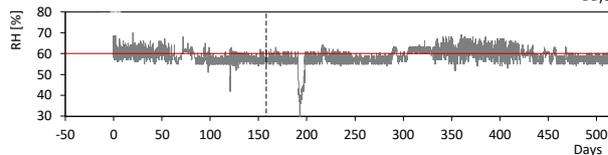
w_{cp} : monta dopo ~15 h dal termine dell'assemblaggio

MONITORAGGIO A LUNGO-TERMINE

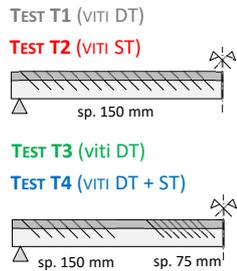


Valore limite adottato per SLE (lungo termine):

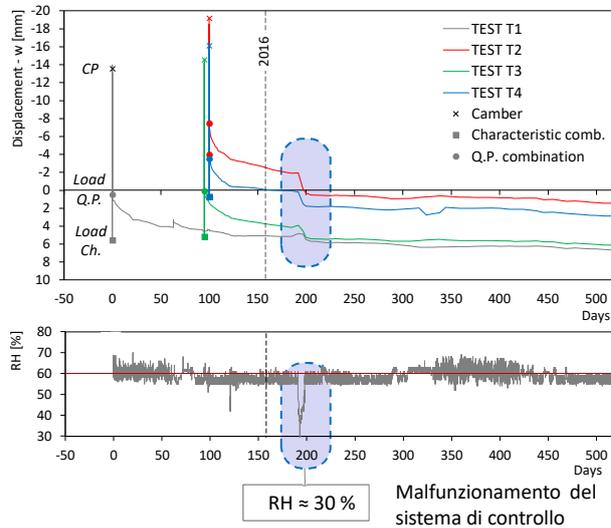
$$w_{net,fin} \leq L/350 = 14.29 \text{ mm}$$



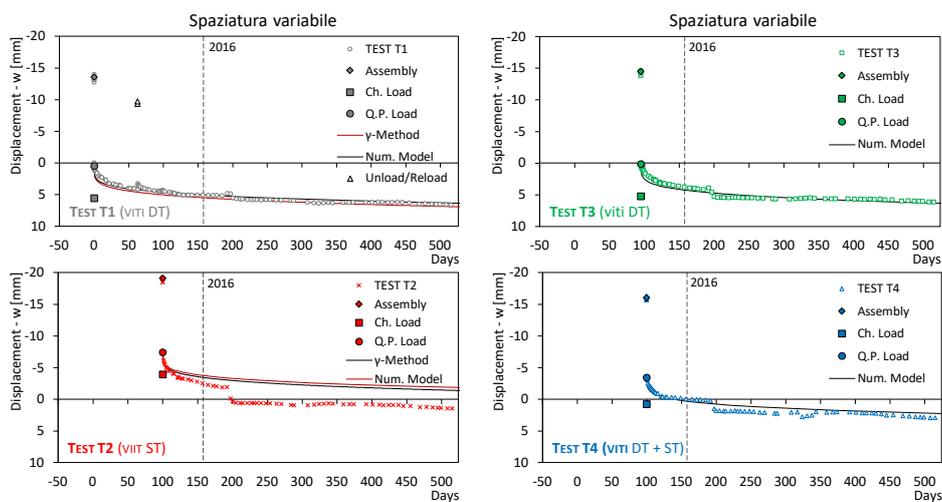
MONITORAGGIO A LUNGO-TERMINE



Le viti ST sono più sensibili delle viti DT a variazioni dimensionali del legno (vedi T2 e T4)



MONITORAGGIO A LUNGO-TERMINE



SOLAI COMPOSTI LEGNO-LEGNO «PRECOMPRESSI»

Test a rottura (L=6.4 m)
Pannello: LVL di latifoglia / CLT di conifera
Trave: Latifoglia (GL70) / Conifera (GL24)

MATERIALI



Conifera
Travetto in legno lamellare



Conifera
Pannello in CLT



Latifoglia
Travetto in LVL(GL70)
Pannello in LVL

LEGNO DI CONIFERA



LEGNO DI LATIFOGLIA



CONNETTORI



Viti doppio filetto



Rondella tradizionale

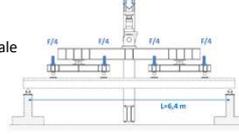


Viti a filetto singolo



Rondella speciale

SETUP



SOLUZIONI IBRIDE

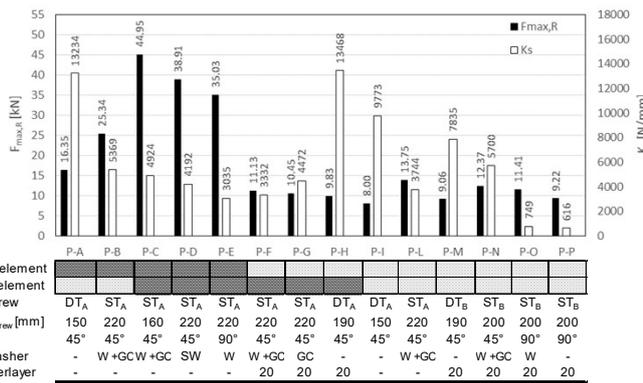


Nuove realizzazioni, sostituzioni



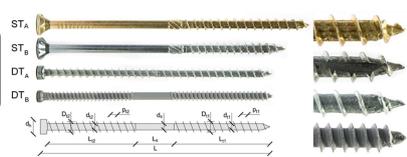
Soluzioni di rinforzo

SOLAI COMPOSTI LEGNO-LEGNO «PRECOMPRESSI» | TEST CONNESSIONI

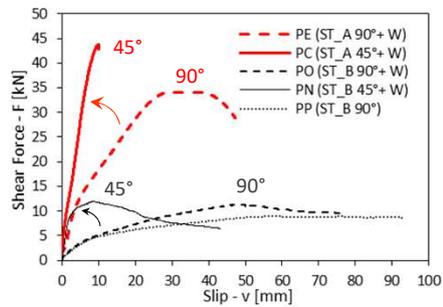


C. element	L. element	Screw	L _{screw} [mm]	α	Washer	Interlayer
P-A	DT _A	ST _A	150	45°	-	-
P-B	ST _A	ST _A	220	45°	W+GC	W
P-C	ST _A	ST _A	160	45°	W+GC	W
P-D	ST _A	ST _A	220	45°	SW	SW
P-E	ST _A	ST _A	220	90°	W	W
P-F	ST _A	ST _A	220	45°	W+GC	W
P-G	ST _A	ST _A	220	45°	GC	GC
P-H	DT _A	DT _A	190	45°	-	20
P-I	DT _A	DT _A	150	45°	-	-
P-L	ST _A	DT _B	220	45°	W+GC	-
P-M	DT _B	ST _B	190	45°	-	20
P-N	ST _B	ST _B	200	45°	W+GC	W
P-O	ST _B	ST _B	200	90°	W	-
P-P	ST _B	ST _B	200	90°	-	20

59 Test di pushout
14 Configurazioni



TEST DELLE CONNESSIONI



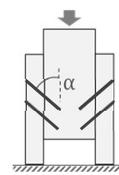
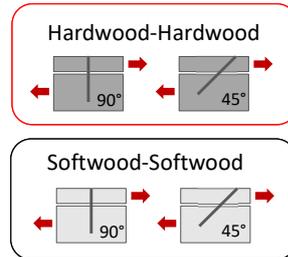
Test	F_{max} [kN]	K_s [N/mm]
● PE (90°+ W)	35.03	3035
● PC (45°+ W)	44.95	4924
● PO (90°+ W)	11.41	749
● PN (45°+ W)	12.37	5700
● PP (90°)	9.22	616

[Schiro et al. 2018]

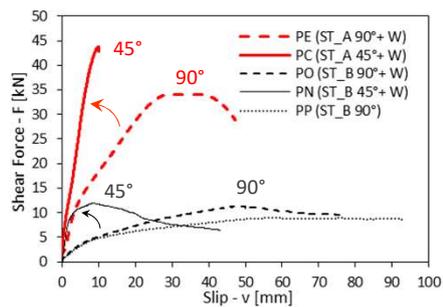
Vite a filetto parziale 10 x 220 mm



Rondelle tradizionali



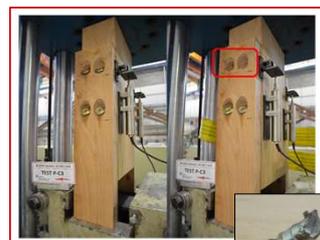
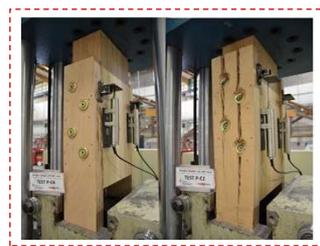
TEST DELLE CONNESSIONI



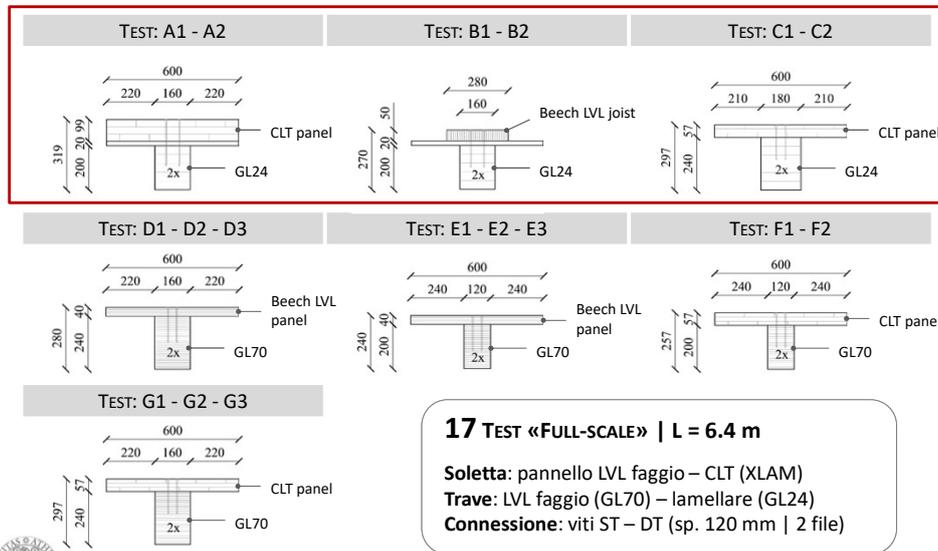
Vite a filetto parziale 10 x 220 mm



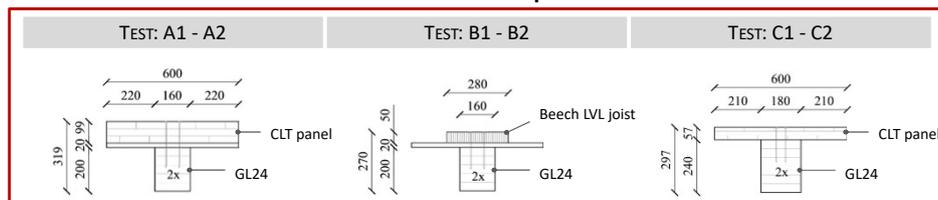
Rondelle tradizionali



SOLAI COMPOSTI LEGNO-LEGNO «PRECOMPRESSI» | TEST A ROTTURA



SOLAI COMPOSTI LEGNO-LEGNO «PRECOMPRESSI» | TEST A ROTTURA



Vite doppio filetto $\phi 8.5$ mm (DT)



A1 (300 mm), B1 (190 mm), C1 (150 mm)

Vite filetto parziale $\phi 10$ mm (ST)



Rondella (W)



A2 (280 mm), B2 (220 mm), C2 (220 mm)

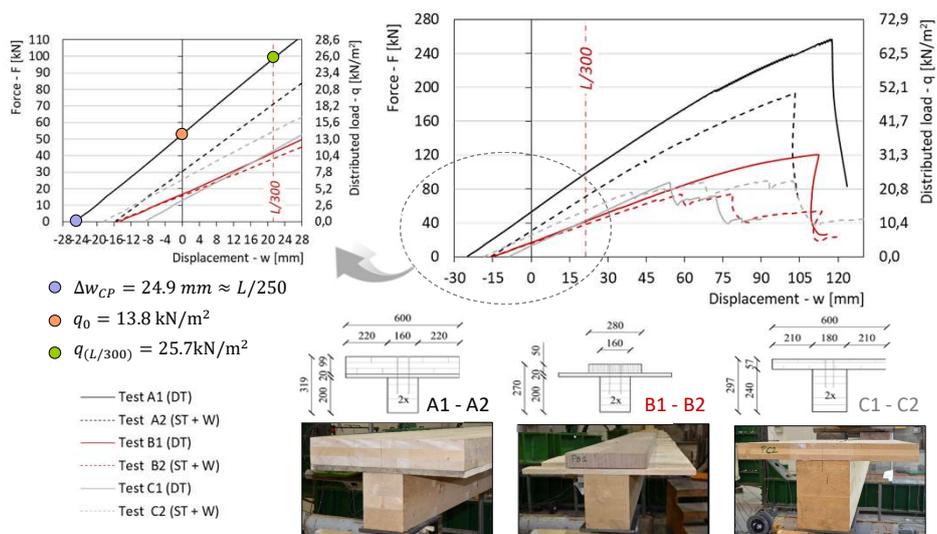
Progettazione secondo EC5 (Annesso B), senza considerare benefici derivanti dalla procedura di pre-sollecitazione

Test ID	A1	A2	B1	B2	C1	C2
Tasso di lavoro [%]	71	95	148	158	96	93

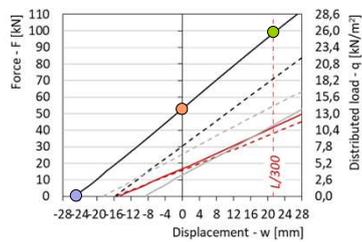




SOLAI COMPOSTI LEGNO-LEGNO «PRECOMPRESSI» | TEST A ROTTURA



SOLAI COMPOSTI LEGNO-LEGNO «PRECOMPRESSI» | TEST A ROTTURA



Test ID	A1	A2	B1	B2	C1	C2
$q_{(L/300)}$ [kN/m ²]	25.7	18.5	10.9	9.9	11.2	14.2
$q^*_{(L/300)}$ [kN/m ²]	18.8	13.5	8.0	7.3	8.2	10.4
j	3.8	2.7	1.6	1.5	1.6	2.1

$$q^*_{(L/300)} = q_{(L/300)} / w_R$$

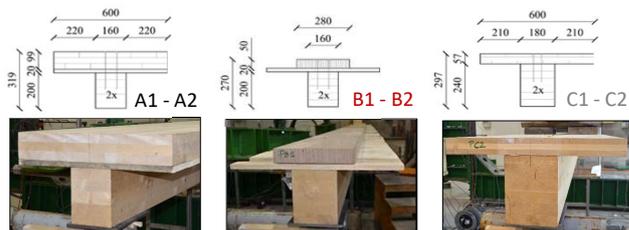
$$w_R = w_{fin} / w_{ist}$$

$$j = q^*_{(L/300)} / (g_{2,k} + q_k)$$

Indice di sicurezza

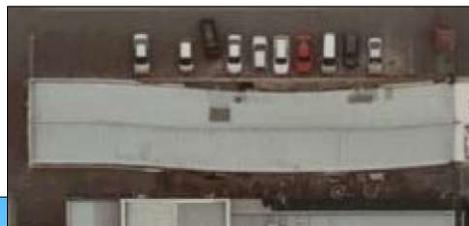
- $\Delta w_{CP} = 24.9 \text{ mm} \approx L/250$
- $q_0 = 13.8 \text{ kN/m}^2$
- $q_{(L/300)} = 25.7 \text{ kN/m}^2$

- Test A1 (DT)
- - - Test A2 (ST + W)
- Test B1 (DT)
- - - Test B2 (ST + W)
- Test C1 (DT)
- - - Test C2 (ST + W)



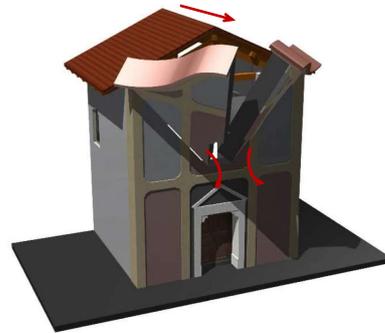
DEFORMABILITÀ DI PIANO DI SOLAI E COPERTURE

Solai eccessivamente deformabili, anche in presenza di un collegamento efficace diaframma – muratura, non sono in grado di contrastare il **ribaltamento** fuori piano della muratura



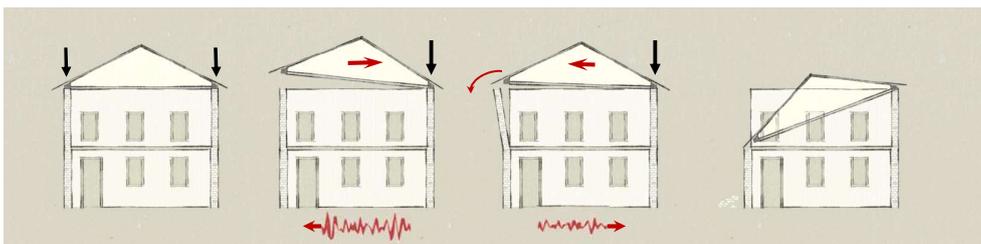
[Dizhur et al., 2011]

DEFORMABILITÀ DI PIANO DI SOLAI E COPERTURE



Evitare il collasso fuori piano delle murature causata dall'eccessiva **deformabilità** delle coperture

COPERTURE RIGIDE: ATTENZIONE!



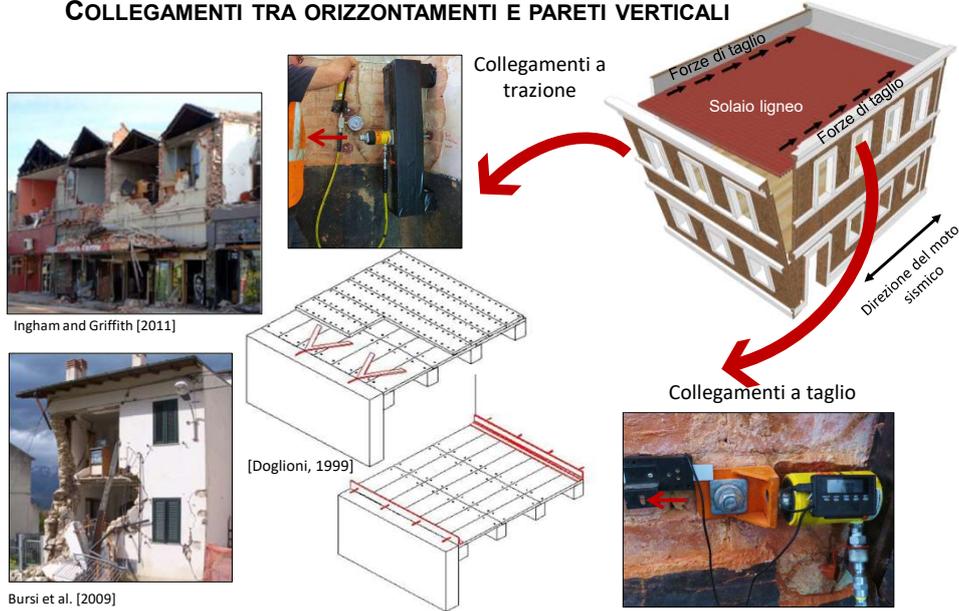
Le coperture devono avere una **adeguata rigidità di piano** e devono essere opportunamente **collegate** alle murature perimetrali



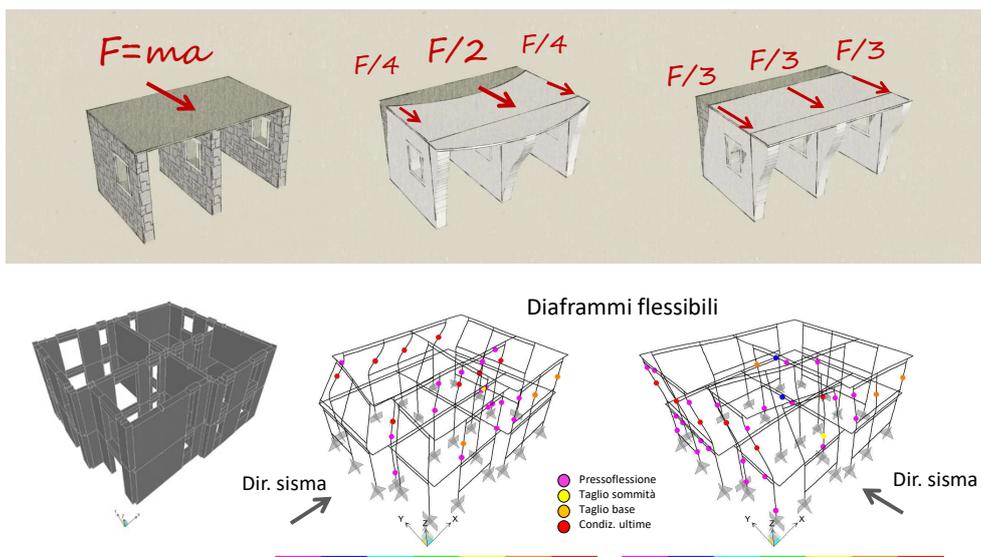
Evitare coperture pesanti



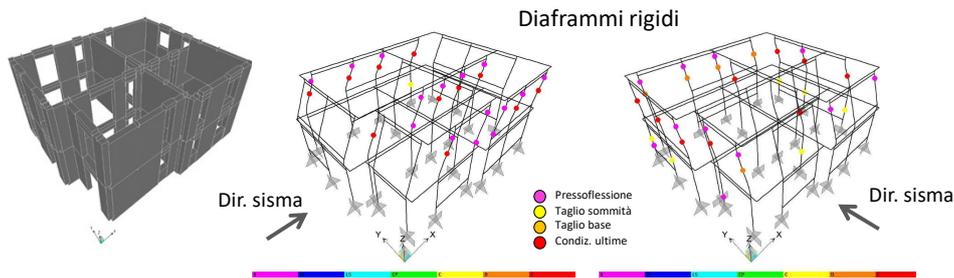
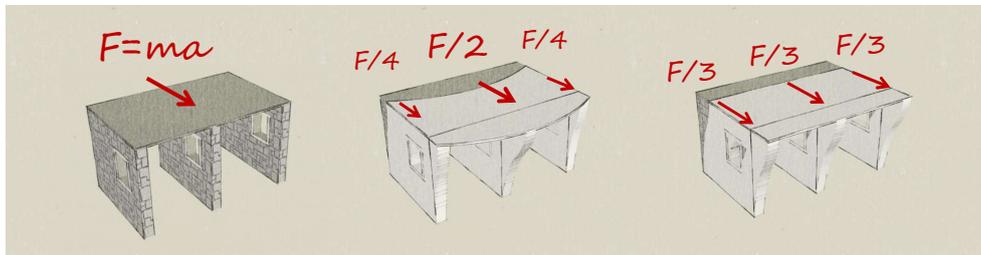
COLLEGAMENTI TRA ORIZZONTAMENTI E PARETI VERTICALI



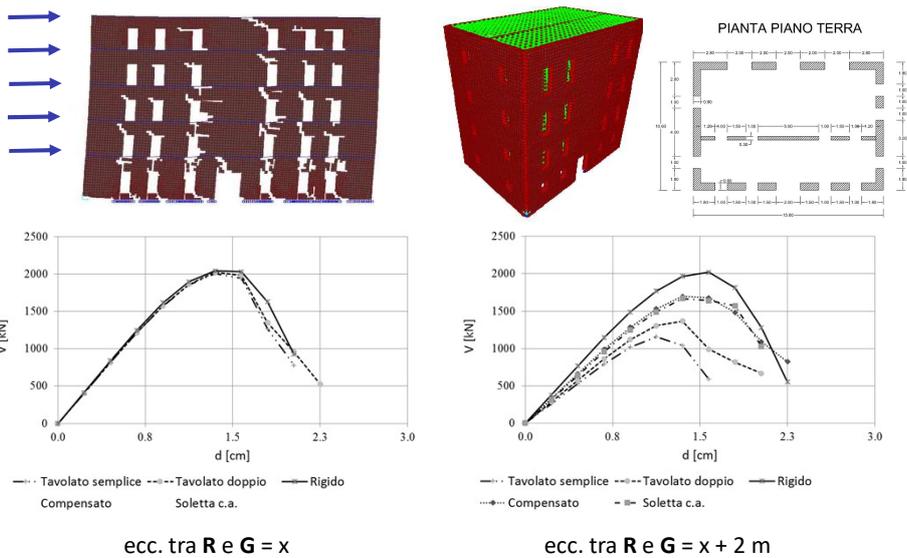
DEFORMABILITÀ DI PIANO DEI SOLAI E COMPORTAMENTO GLOBALE

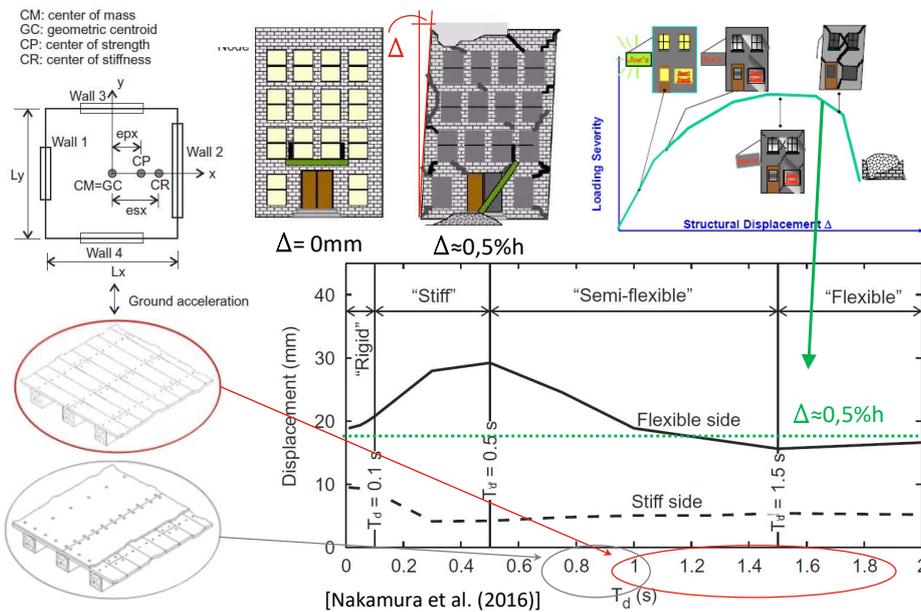


DEFORMABILITÀ DI PIANO DEI SOLAI E COMPORTAMENTO GLOBALE



DEFORMABILITÀ DI PIANO DEI SOLAI E COMPORTAMENTO GLOBALE





STRUMENTI NORMATIVI PER GLI INTERVENTI SUI SOLAI LIGNEI

MINISTERO DELLE INFRASTRUTTURE E DEI TRASPORTI
 CIRCOLARE 2 febbraio 2008, n. 617
 Istruzioni per l'applicazione delle Norme tecniche italiane per la costruzione di edifici strutturalmente integrati (NTI)

DM 14 gennaio 2008
 CM 2 febbraio 2009 n° 617

Norme
 Tecniche per
 le Costruzioni
 2018

EUROPEAN STANDARD EN 1998-3
 NORME EUROPEE EUROPEAN STANDARD

EN 1998-3
 Design of structures for ultimate and serviceability limit states
 Part 3: Assessment and retrofitting of buildings and bridges

CEN

Eurocodice 8 parte 3
 Assessment and retrofitting
 of buildings and bridges

DEFINIZIONE DEL MODELLO DI RIFERIMENTO PER LE ANALISI

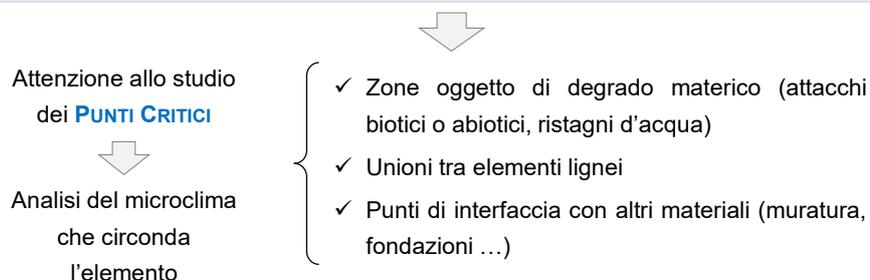
[C8.5] «...L'adeguata **conoscenza** del manufatto è presupposto fondamentale e fase imprescindibile per la comprensione di singole criticità e del comportamento strutturale; l'attendibilità dei risultati, dunque, è strettamente legata al **livello di conoscenza...**»

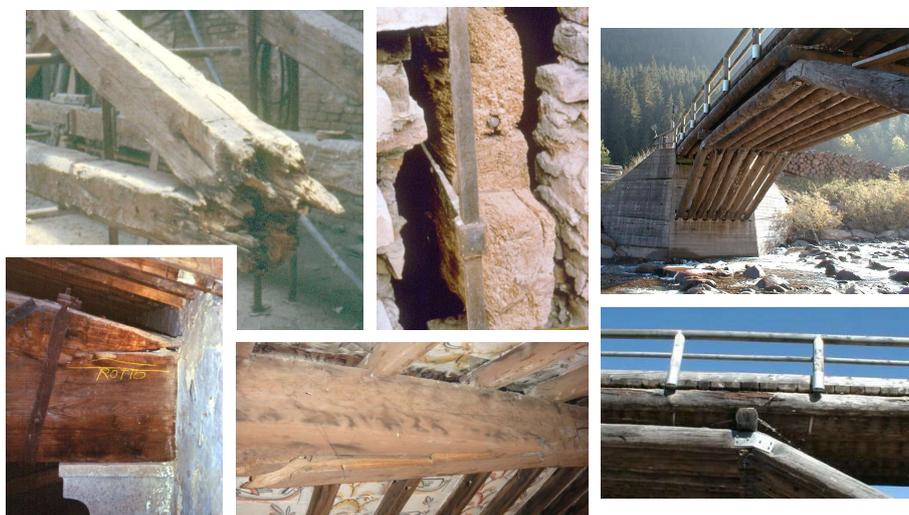
Nelle NTC2018 anche le Costruzioni in Legno sono considerate nella definizione di:

- Rilievo strutturale [C8.5.2.3]
- Caratterizzazione meccanica dei materiali [C8.5.3.3]
- Livelli di conoscenza e fattori di confidenza [C8.5.4.3]

RILIEVO E ANALISI STORICA-CRITICA [C8.5.2.3]

[C8.5.2.3] «...particolare attenzione deve essere rivolta al **rilievo delle deformazioni** delle singole membrature e della struttura, distinguendo, ove possibile, lo stato deformativo derivante dalle azioni applicate da quello **proprio del materiale**, causato ad esempio da difettosità anatomiche, di taglio o di lavorazione...»





CARATTERIZZAZIONE MECCANICA DEI MATERIALI [C8.5.3.3]

Utili riferimenti normativi:

UNI 11118:2004 Criteri per l'identificazione delle specie legnose.

UNI 11119:2004 Ispezione in situ per la diagnosi degli elementi in opera.

UNI 11138:2004 Criteri per la valutazione preventiva, la progettazione e l'esecuzione di interventi.

Beni
culturali...
ma non solo

Si possono distinguere tre tipologie di prove:

1. **Limitate:** indagini di tipo visivo (su almeno tre lati e una testata per trave)
2. **Estese:** indagini visive e prove NDT (controllo dell'umidità nei punti critici)
3. **Esaustive:** indagini visive e strumentali diffuse e sistematiche, verifica dell'umidità e, dove richiesto, prove di laboratorio. Identificazione specie legnosa.

RILEM Technical Committee AST 215 "In-situ assessment of structural timber"

METODO	TIPOLOGIA	MISURA UmidITÀ	LOCALIZZAZIONE DETERIORAMENTO	QUANTIFICAZIONE DETERIORAMENTO	DETERMINAZIONE SPECIE	VALUTAZIONE RESISTENZA	VALUTAZIONE MODULO ELASTICO	IDENTIFICAZIONE DETTAGLI NASCOSTI	LIVELLO DI CONOSCENZA
Ispezione visiva	NDT		Limit.						LC1 , LC2, LC3
Ispezione visiva remota	NDT		Limit.	Limit.				Si	LC3
Identificazione specie	NDT				Si				LC1 , LC2, LC3
Misura contenuto umidità	NDT/SDT	Si							LC1 , LC2, LC3
Radioscopia digitale	NDT		Si	Limit.				Si	LC3
Georadar	NDT	Limit.	Limit.					Limit.	LC3
Termografia a infrarossi	NDT	Limit.	Limit.					Limit.	LC3
Metodi sonici	NDT		Limit.	Limit.		Limit.	Stima		LC2, LC3
Metodo resistografico	SDT		Si	Si		Limit.		Limit.	LC2, LC3

RILEM Technical Committee AST 215 "In-situ assessment of structural timber"

METODO	TIPOLOGIA	MISURA UmidITÀ	LOCALIZZAZIONE DETERIORAMENTO	QUANTIFICAZIONE DETERIORAMENTO	DETERMINAZIONE SPECIE	VALUTAZIONE RESISTENZA	VALUTAZIONE MODULO ELASTICO	IDENTIFICAZIONE DETTAGLI NASCOSTI	LIVELLO DI CONOSCENZA
Estrazione nucleo	SDT		Si			Stima	Stima		LC2, LC3
Trazione microcampioni	SDT					Stima	Stima		LC2, LC3
Test linea di colla	SDT	Limit.	Limit.			Limit.			LC2, LC3
Estrazione di una vite	SDT		Limit.			Limit.			LC2, LC3
Prova sclerometrica	SDT		Limit.			Limit.			LC2, LC3
Spinta di una punta	SDT		Si	Limit.		Stima			LC2, LC3
Test di durezza	SDT		Limit.			Limit.			LC2, LC3

CRITERI DI INTERVENTO

Funzionalità statica diaframmi di piano:

1. Sostenere i carichi verticali senza inflettersi eccessivamente
2. Evitare il ribaltamento fuori piano delle pareti
3. Trasferire le azioni orizzontali alle pareti resistenti



INTERVENTI DI CONSOLIDAMENTO

- ✓ Resistenza
- ✓ Rigidezza fuori piano
- ✓ Rigidezza nel piano
- ✓ Collegamenti con le murature

[C8.7.4.1] «...**può non essere necessario realizzare un'elevata rigidezza**, in quanto i meccanismi fuori dal piano sono caratterizzati da deformazioni ammissibili a volte elevate, mentre è opportuno che i diaframmi abbiano una **resistenza sufficiente** a trasferire le azioni tra una parete e l'altra, quando la prima raggiunge la resistenza ultima a taglio...»

CRITERI DI INTERVENTO

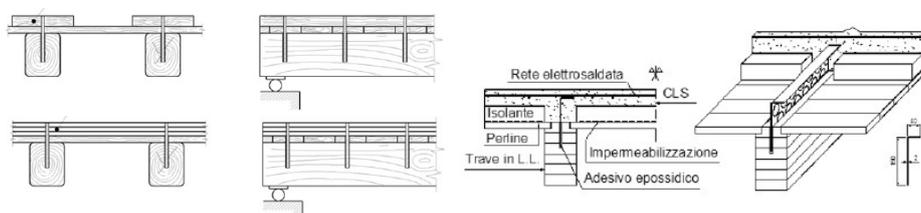
Aspetti da tenere in considerazione:

- ✓ Contenimento delle masse aggiunte (piani superiori)
- ✓ Spessore dei solai e quota delle aperture
- ✓ Accessibilità → Rivestimenti di pregio (controsoffitti e/o pavimenti di pregio)
- ✓ Reversibilità/invasività dell'intervento
- ✓ Rapidità di esecuzione e costi

[C8.7.4.1] «...Per gli edifici storici, nel consolidamento di solai lignei sono generalmente preferibili i **diaframmi leggeri**, di rigidezza non trascurabile, **realizzati a secco**, quali quelli ottenuti con doppio assito, con pannelli a base legno, lamiere di acciaio, reticolari di acciaio, reticolari con fibre o altro materiale idoneo...»

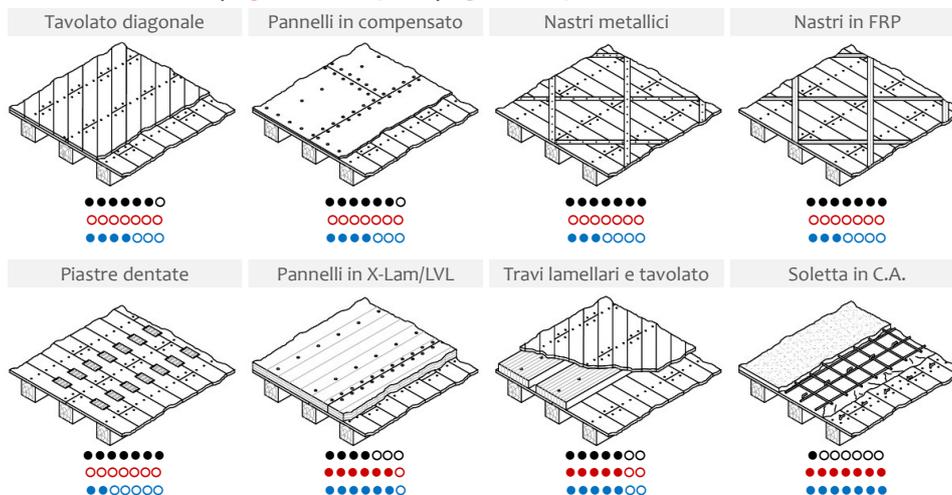
CRITERI DI INTERVENTO

[C8.7.4.1] «...è possibile conseguire contemporaneamente un rinforzo nel piano e un rinforzo flessionale, realizzando **strutture composte legno-legno** mediante solette lignee, che sfruttino eventualmente il tavolato esistente, rese opportunamente collaboranti con le travi tramite idonei connettori a taglio. La tecnica di rinforzo con soletta collaborante in **calcestruzzo** realizza ugualmente un elevato irrigidimento nel piano e un miglioramento della resistenza ai carichi verticali, ma con un **maggiore incremento dei pesi...**»



TECNICHE DI RINFORZO/IRRIGIDIMENTO

Contenimento masse | **Rigidezza fuori piano** | **Rigidezza di piano**



RIGIDEZZA DI PIANO DEGLI ORIZZONTAMENTI

Nell'analisi globale dell'edificio la ripartizione delle azioni orizzontali tra le diverse pareti dipende dalla **rigidezza dei solai nel proprio piano** e dall'efficacia dei loro **collegamenti** con le murature.

Per la rigidezza dei solai si può fare riferimento a tre situazioni:

1. Solai infinitamente rigidi → Ripartizione delle forze in base alla posizione, alla capacità e alla rigidezza delle pareti.
2. Solai con rigidezza finita → La «reale» rigidezza dei diaframmi è considerata nei modelli di calcolo
3. Solai con rigidezza trascurabile → Ripartizione delle forze per aree di influenza

RIGIDEZZA DI PIANO DEGLI ORIZZONTAMENTI

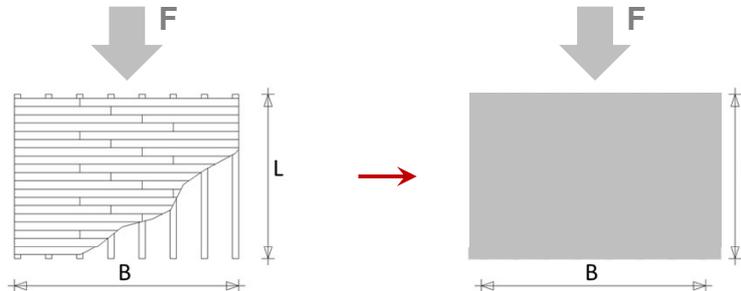
Nell'analisi globale dell'edificio la ripartizione delle azioni orizzontali tra le diverse pareti dipende dalla **rigidezza dei solai nel proprio piano** e dall'efficacia dei loro **collegamenti** con le murature.

Per la rigidezza dei solai si può fare riferimento a tre situazioni:

1. Solai infinitamente rigidi → Ripartizione delle forze in base alla posizione, alla capacità e alla rigidezza delle pareti.
2. Solai con rigidezza finita → La «reale» rigidezza dei diaframmi è considerata nei modelli di calcolo
3. Solai con rigidezza trascurabile → Ripartizione delle forze per aree di influenza

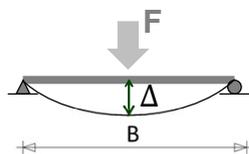
Quali valori utilizzare ??

RIGIDEZZA DI PIANO DEGLI ORIZZONTAMENTI



Un solaio ligneo è un «assemblaggio» di numerose componenti strutturali

Spesso si fa riferimento ad un solaio ideale costituito da un materiale omogeneo fittizio

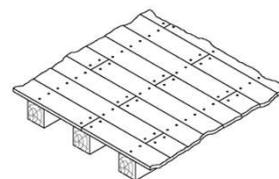


$$\Delta = \frac{F \cdot B^3}{48 \cdot E \cdot J} + \chi \frac{F \cdot B}{4 \cdot G \cdot (Lt)}$$

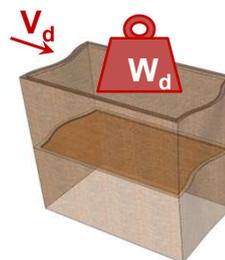
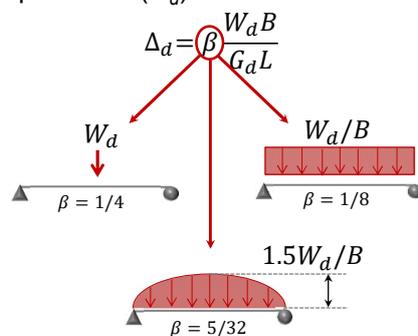
Analogia della trave

RIGIDEZZA DI PIANO DEGLI ORIZZONTAMENTI

Si considera il diaframma come una trave soggetta alla sola deformabilità tagliante.



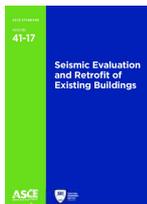
Si fa riferimento alla rigidezza a taglio equivalente (G_d)



RIGIDEZZA DI PIANO DEGLI ORIZZONTAMENTI

Attuali norme di riferimento:

ASCE-SEI 41-17



NZSEE 2017



Table 10-2. Default Expected Strength Values for Wood Diaphragms

Diaphragm Type*	Property	
	Shear Stiffness (kN/9m ²)	Expected Strength (kN/9m ²)
Single Sheathing	Checked	120
	Unchecked	150
Double Sheathing	Checked	400
	Unchecked	700
Diagonal Sheathing	Checked	400
	Unchecked	800
Diagonal Sheathing with Straight Sheathing or Plywood Above	Checked	420
	Unchecked	18,000
Double Diagonal Sheathing	Checked	900
	Unchecked	625
Wood Structural Panel Sheathing	Checked	8,000
	Unchecked	4,000
Wood Structural Panel Overlay on Sheathing	Checked	9,000
	Unchecked	450
a. Straight or Diagonal Sheathing or Plywood	Checked	5,000
	Unchecked	300
b. Existing Wood Structural Panel Sheathing	Checked	18,000
	Unchecked	7,000

Table 10.8: Shear stiffness values[†] for straight sheathed vintage flexible timber floor diaphragms (Giorgio et al., 2014)

Direction of loading	Joist continuity	Condition rating	Shear stiffness [†] , G _d (kN/m)
Parallel to joists	Continuous or discontinuous joists	Good	350
		Fair	285
		Poor	225
Perpendicular to joists ^{††}	Continuous joist, or discontinuous joist with reliable mechanical anchorage	Good	265
		Fair	215
		Poor	170
	Discontinuous joist without reliable mechanical anchorage	Good	210
		Fair	170
		Poor	135

Table 10.9: Stiffness multipliers for other forms of flexible timber diaphragms (derived from ASCE, 2013)

Type of diaphragm sheathing	Multipliers to account for other sheathing types	
Single straight sheathing	x 1.0	
Jude straight sheathing	Chorded	x 7.5
	Unchorded	x 3.5
Single diagonal sheathing	Chorded	x 4.0
	Unchorded	x 2.0
Double diagonal sheathing or straight sheathing above diagonal sheathing	Chorded	x 9.0
	Unchorded	x 4.5

RIGIDEZZA DI PIANO DEGLI ORIZZONTAMENTI

Ci sono delle proposte in discussione in questo momento a livello nazionale ed europeo

ReLUIS 2015 – Linea Costruzioni in Muratura
Temi Generali e Temi Territoriali

Prodotto della ricerca

Prodotto 2-2b

Primi sviluppi di modelli interpretativi degli effetti strutturali degli interventi su diaframmi, solai, coperture e volte

WP2_2-2b_2015_UNITN

PROPOSTA LINEA GUIDA DI ANALISI ED INTERVENTO PER IL RINFORZO DI SOLAI LIGNEI NEL PIANO

EUROPEAN STANDARD
NORME EUROPÉENNE
EUROPÄISCHE NORM

prEN 1998-3

Doc CEN/TC250/SC8/N388B

Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance
Part 3: Assessment and retrofitting of buildings

LINEE GUIDA PER LA VALUTAZIONE SISMICA DEGLI ORIZZONTAMENTI LIGNEI
QUADRO NORMATIVO: EN1998 – PARTE III

Strutture in legno esistenti – Parte generale

10 SPECIFIC RULES FOR TIMBER BUILDINGS94

10.1 Scope94

10.2 Identification of geometry, details and materials.....94

10.2.1 General94

10.2.2 Geometry94

10.2.3 Details94

10.2.4 Materials94

10.2.4.1 Condition assessment and knowledge level97

10.2.4.2 Condition assessment factors97

10.3 Classification of timber structural elements.....98

10.3.1 Timber diaphragms98

10.3.1.1 Joists98

10.5.1 General104

10.5.2 Local analysis of diaphragms with a force-based approach104

Table 10.1 NDT and SDT methods to assess Knowledge Level and Condition assessment of structural timber

Method	Determine species	Measure MC	Locate deterioration	Quantify deterioration	Assess strength	Determine stiffness	Determine load capacity	Knowledge level	Condition assessment
Visual inspection	NDT		Limited					KLM1 KLM2 KLM3	✓
Moisture inspection	NDT		Limited	Limited			Yes	KLM3	✓ (1)
Species identification	NDT	Yes						KLM1 KLM2 KLM3	✓

Table 10.3 Condition assessment criteria (φ factors)

Condition rating	Condition description	φ
D1 - Good	Timber free of borer; no signs of past water damage*; little or no fastener rust; tight connections, coherent and unable to wobble	1,00
D2 - Fair	Little or no borer/little or no signs of past water damage*; some rust on the fasteners but integrity still fair; connections have some but little movement/slack; small degree of timber wear surrounding fasteners	0,75
D3 - Poor	Considerable borer; water damage evident*; fastener rust extensive; significant timber degradation surrounding the fasteners; connections appear loose	0,30

(* Degradation process is assumed to be no longer active, the biotic cause of degradation is assumed to be no longer present)

Table 10.2 Knowledge level and φ factor

Knowledge level	Condition assessment factor - φ
KLM1 - Minimum knowledge	Refer to D3 class φ-value
KLM2 - Average knowledge	Refer to the φ-value corresponding to the degradation class immediately worse than the one obtained on the basis of the inspections
KLM3 - High knowledge	Refer to the φ-value corresponding to the degradation class obtained on the basis of the inspections

LINEE GUIDA PER LA VALUTAZIONE SISMICA DEGLI ORIZZONTAMENTI LIGNEI
QUADRO NORMATIVO: EN1998 – PARTE III

Diaframmi lignei – Valutazione dell'esistente

10.6 Resistance models for assessment106

10.6.1 General106

10.6.2 Timber diaphragms106

10.6.3 Carpentry joints107

10.6.3.1 General107

10.6.3.2 Compression of timber107

10.6.3.3 Single step joints (SSJ)107

10.6.3.3.1 Shear crack in the tie beam107

10.6.3.3.2 Crushing at the front-notch surface107

10.6.3.4 Double step joints (DSJ)111

10.6.3.4.1 Shear crack in the tie beam111

10.6.3.4.2 Crushing at the front-notch surface113

10.6.4 Dowel-type joints114

10.6.5 Dowel-type joints114

10.7 Verification to limit states114

10.7.1 Timber diaphragms115

10.7.1.1 Displacement limitation115

10.7.1.2 Force limitation115

10.7.2 Timber frames115

10.7.2.1 Displacement limitation115

10.7.2.2 Force limitation115

10.7.3 Carpentry joints115

10.7.4 Dowel-type joints115

Table 10.4 Acceptance criteria in terms of force V_{Rk} [kN/m]

	No retrofit	Type of retrofit (Figure 10.2)			
		(a)	(b)	(e)	(f)
Parallel to joists	3	30	25	40	30
Perpendicular to joists	5*	45	25	45	40

* In case of SQ joists, diaphragm shear strength in the direction perpendicular to the joists, can be significantly higher than the $V_{Rk,098}$ value reported in the table.

Table 10.5 Acceptance criteria for horizontal diaphragms in terms of drift ratios d_r [%]

	No retrofit	Type of diaphragm (Figure 10.10.1)			
		(a)	(b)	(e)	(f)
Near Collapse (NC)	6,0%	2,1%	1,6%	1,5%	2,1%
Significant Damage (SD)	4,0%	1,5%	1,2%	1,1%	1,5%
Damage Limitation (DL)	2,5%	0,8%	0,7%	0,6%	0,8%

LINEE GUIDA PER LA VALUTAZIONE SISMICA DEGLI ORIZZONTAMENTI LIGNEI
QUADRO NORMATIVO: EN1998 – PARTE III

Rinforzo

10.8 Resistance models for strengthening116

10.8.1 Material design resistance 116

10.8.2 Diaphragms 116

 10.8.2.1 Methods for strengthening 116

 10.8.2.2 Modelling and analysis 118

 10.8.2.3 Verifications 119

10.8.3 Timber frames 119

 10.8.3.1 Methods for strengthening 119

 10.8.3.2 Modelling and analysis 119

 10.8.3.3 Verifications 119

10.8.4 Carpentry joints..... 119

 10.8.4.1 General..... 119

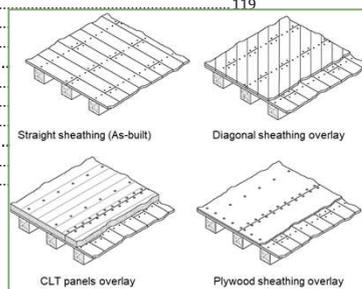
 10.8.4.2 Repair and reinforcement 119

 10.8.4.3 Verifications 119

10.8.5 Dowel-type joints 119

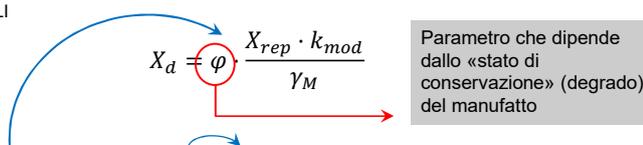
 10.8.5.1 Reinforcement measures 119

 10.8.5.2 Verifications 119



EN1998 – PART III: CHAPTER 10 - SPECIFIC RULES FOR TIMBER

REGOLE GENERALI



Knowledge level	Condition assessment factor - φ
KLM1 - High knowledge	Refer to the φ -value corresponding to the degradation class obtained on the basis of the inspections
KLM2 – Average knowledge	Refer to the φ -value corresponding to the degradation class immediately worse than the one obtained on the basis of the inspections
KLM3 – Minimum knowledge	Refer to D3 class φ -value

Coefficienti φ per solai lignei

Condition rating	Condition description	As-built	(*) Retrofitted
D1 - Good	Timber free of borer; no signs of past water damage*; little or no nail rust; floorboard-to-joist connection tight, coherent and unable to wobble	1.00	1.00
D2 - Fair	Little or no borer; little or no signs of past water damage*; some nail rust but integrity still fair; floorboard-to-joist connection has some but little movement; small degree of timber wear surrounding nails	0.75	0.90
D3 - Poor	Considerable borer; water damage evident*; nail rust extensive; significant timber degradation surrounding nails; floorboard joist connection appears loose and able to wobble	0.30	0.70

(*): Degradation process is assumed to be no longer active, the biotic cause of degradation is assumed to be no longer present

EN1998 – PART III: CHAPTER 10 - SPECIFIC RULES FOR TIMBER

REGOLE GENERALI

$$X_d = \varphi \frac{X_{rep} \cdot k_{mod}}{\gamma_M}$$

Parametro che dipende dallo «stato di conservazione» (degrado) del manufatto

Livello di conoscenza	Scelta del coefficiente φ
LC3 (accurata)	si faccia riferimento alla classe di qualità/degrado ottenuta tramite procedura di ispezione
LC2	si faccia riferimento alla classe di qualità/degrado che precede quella ottenuta tramite ispezione
LC1 (limitata)	si faccia riferimento alla classe D3

Coefficienti φ per solai lignei

Classe di qualità/degrado	Descrizione dello stato di conservazione	Esistente	Rinforzato
D1- danneggiamento limitato o assente	Materiale legno: assenza di attacchi biotici* o abiotici. Elementi di connessione non affetti da corrosione. Assenza di "giochi" in corrispondenza delle connessioni tavola-travetto. Tavole a diretto contatto l'una con l'altra.	1.00	1.00
D2 – danneggiamento moderato	Materiale legno: presenza limitata di attacchi biotici* o abiotici. Tracce di corrosione sugli elementi di connessione. Evidenze di limitato rifollamento attorno ai connettori. Non è esclusa la presenza di un certo "gioco" tavola-travetto. Presenza di fessure evidenti tra le tavole ma con apertura limitata.	0.75	0.9
D3 – danneggiamento severo	Materiale legno: attacchi biotici*/abiotici diffusi. Elementi di connessione largamente affetti da corrosione. Rifollamento evidente dei connettori.	0.30	0.7

* Si fa riferimento ad una condizione di attacco progressivo in cui gli organismi che hanno causato il degradamento non sono più attivi [UNI 11130:2004]

EN1998 – PART III: CHAPTER 10 - SPECIFIC RULES FOR TIMBER

CRITERI DI VERIFICA PER I SOLAI LIGNEI

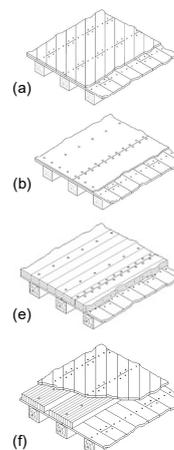
Vengono fornite indicazioni per diverse tipologie di analisi, da statica lineare (LFM) a dinamica non-lineare (NLTH).

$$G_{d0,eff} = \varphi \cdot \alpha_m \cdot \frac{A_n}{A} \cdot G_{d,0}$$

Valori di riferimento per la rigidezza a taglio equivalente, $G_{d,0}$ [kN/m]**

	No retrofit	Retrofit			
		(a)	(b)	(e)	(f)***
Single straight sheathing	150	3000	1800	3000	3000
Single straight sheathing (SQ joists)*	400	3600	2400	4100	3800

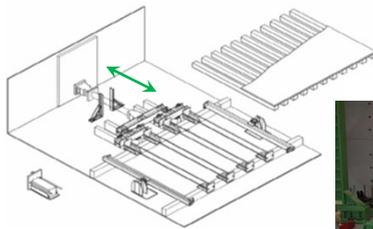
* When the diaphragm is loaded in the direction perpendicular to the joists.
** Given values can be considered as reference values. Background information is provided in Annex D2
*** This retrofit strategy, that is mainly intended for improving diaphragm out-of plane performance, requires squat joists (SQ) in order to be effective.



RIGIDEZZA DI PIANO DEGLI ORIZZONTAMENTI | DATI SPERIMENTALI



Dimensione campioni: 5 m × 4 m
Direzione di carico: parallela ai travetti



Tavolato semplice

Tavolato doppio



Bandelle metalliche / CFRP

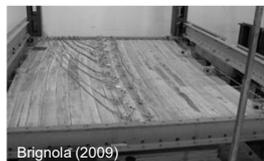
Soletta in c.a.

Compensato (3 strati)

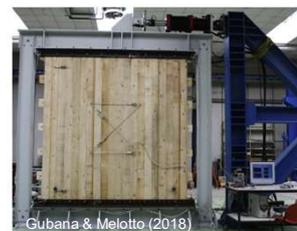


RIGIDEZZA DI PIANO DEGLI ORIZZONTAMENTI | DATI SPERIMENTALI

- Geometrie molto diverse (dimensioni, rapporto di forma)
- Campioni costruiti in laboratorio (raramente solai esistenti)
- Direzione di carico (parallelo ai travetti, ortogonale ai travetti)
- Caratteristiche del rinforzo (spessore pannelli, spaziatore e tipo connettori)

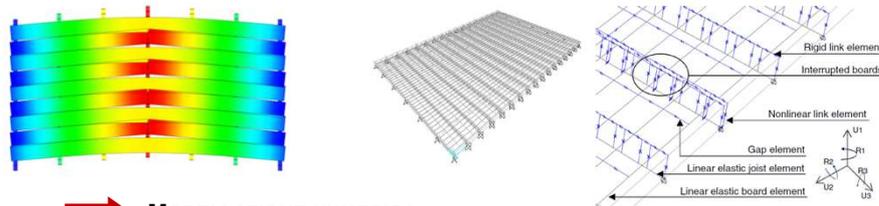


Valori di $G_{d,0}$ molto diversi tra loro!

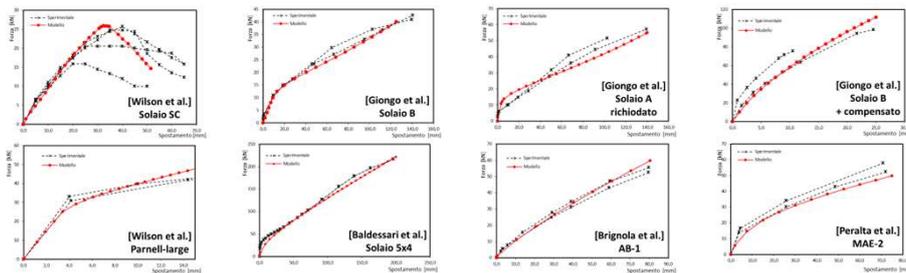


RIGIDEZZA DI PIANO DEGLI ORIZZONTAMENTI | ANALISI NUMERICHE

Necessario trovare una chiave di lettura «unica», che permetta di definire caratteristiche di validità generale



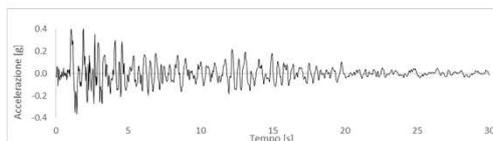
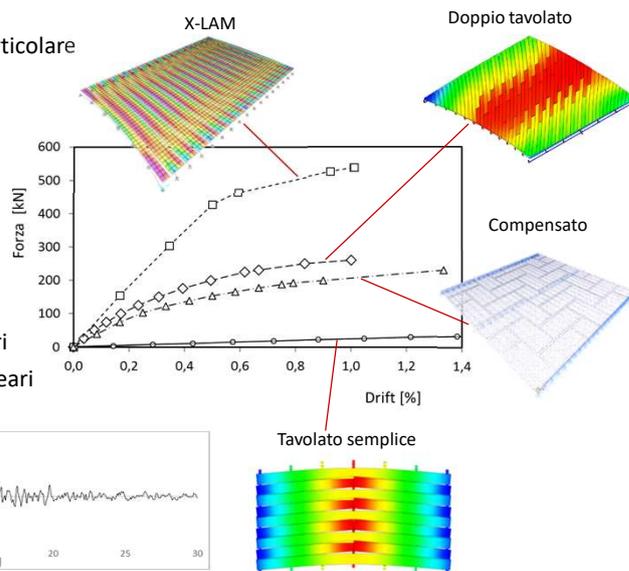
MODELLAZIONE NUMERICA



RIGIDEZZA DI PIANO DEGLI ORIZZONTAMENTI | ANALISI NUMERICHE

Analisi parametriche con particolare attenzione a:

- ✓ Rapporto di forma
- ✓ Fattore di scala
- ✓ Direzione di carico
- Diversi approcci di modellazione
- Analisi statiche non lineari
- Analisi dinamiche non lineari

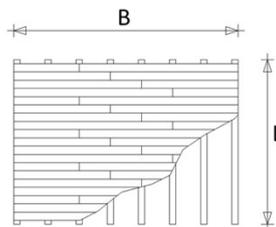


RIGIDEZZA DI PIANO DEGLI ORIZZONTAMENTI | ANALISI NUMERICHE

SOLAI ESISTENTI A TAVOLATO SEMPLICE

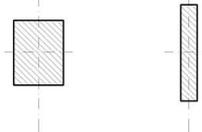
ASPETTI INDAGATI:

- Rapporto di forma ($\alpha=L/B$);
- Fattore di scala (L);
- Direzione di carico;
- Tipologia costruttiva.

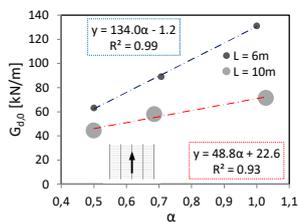


Tipologie di travetto:

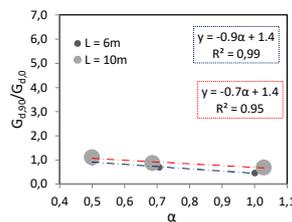
- > Tozzo, area mediterranea rapporto $h/b \sim 1,2-1,5$;
- > Snello, nord America/ nord Europa/ Oceania, rapporto $h/b \sim 5-7$



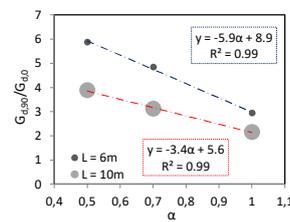
Rigidezza a taglio equivalente



Ortotropia – travetti snelli

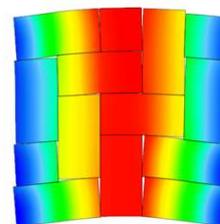
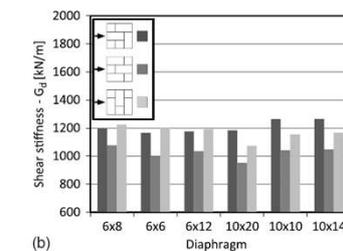
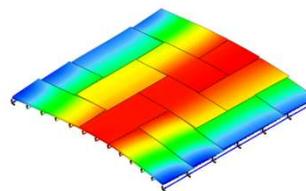
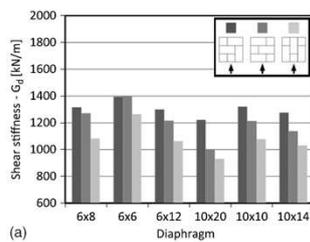
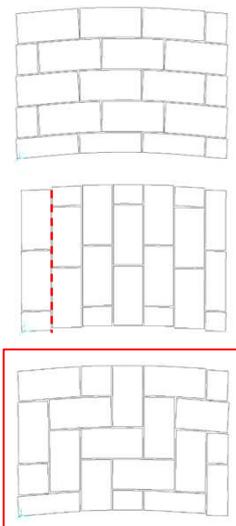


Ortotropia – travetti tozzi



RIGIDEZZA DI PIANO DEGLI ORIZZONTAMENTI | ANALISI NUMERICHE

RINFORZO MEDIANTE PANNELLI A BASE DI LEGNO – DISPOSIZIONE ELEMENTI DI RINFORZO

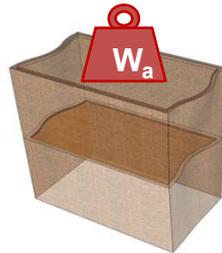


EN1998 – PART III: CHAPTER 10 - SPECIFIC RULES FOR TIMBER

ANALISI STATICA LINEARE

La forza di inerzia totale sul diaframma F_a

$$F_a = (S_a \cdot W_a \cdot \gamma_a) / q_a$$

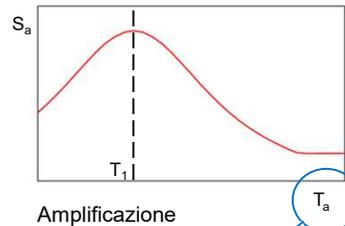


γ_a è il fattore di importanza

q_a è il fattore di comportamento

$W_a = m_a \cdot g$ è il peso sismico associato al diaframma

$$S_a(T_a) = \alpha \cdot S \cdot \left(\frac{3 \cdot \left(1 + \left(\frac{Z}{H} \right) \right)}{1 + \left(1 - \frac{T_a}{T_1} \right)^2} \right)^{0.5}$$



Amplificazione

Periodo naturale del diaframma

EN1998 – PART III: CHAPTER 10 - SPECIFIC RULES FOR TIMBER

ANALISI STATICA LINEARE

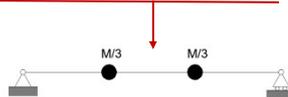
Come si determina il periodo di oscillazione del diaframma?

$$T_a = \alpha_T \cdot \left(\frac{W_a \cdot L_a}{G_{d0,eff} \cdot B} \right)^{0.5} \quad \text{Quoziente di Rayleigh}$$

$\alpha_T = 0.63$ Forma modale per carico parabolico, distribuzione di massa uniforme

$\alpha_T = 0.64$ Forma modale per carico uniforme, distribuzione di massa uniforme

$\alpha_T = 0.70$ 1/3 della massa concentrata a $L_g/3$ e $2L_g/3$ (NZSEE 2017)



Il valore del periodo così ottenuto, è realistico?

RIGIDEZZA DI PIANO DEGLI ORIZZONTAMENTI | TEST *IN SITU* DI SOLAI ESISTENTI

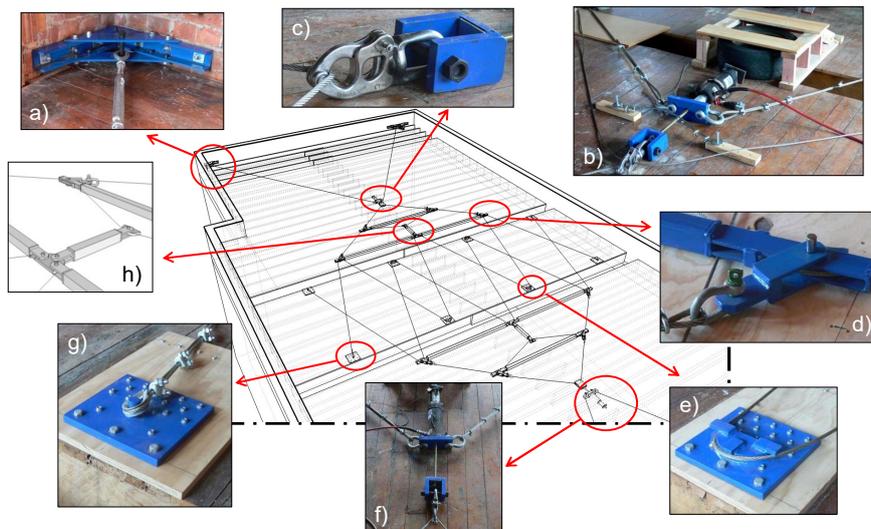


- ✓ Dimensione campioni: 9,6 m × 5,6 m
- ✓ Direzione di carico: ortogonale ai travetti
- ✓ Età solai: ≈ 100 anni
- ✓ Edificio in muratura con mattoni pieni in laterizio e malta di calce



RIGIDEZZA DI PIANO DEGLI ORIZZONTAMENTI | TEST *IN SITU* DI SOLAI ESISTENTI

Prove cicliche e test di *snap-back*





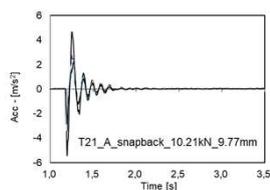
RIGIDEZZA DI PIANO DEGLI ORIZZONTAMENTI | TEST *IN SITU* DI SOLAI ESISTENTI

Prove di *snap-back*

$$T_1 = 0.63 \sqrt{\frac{F_d L}{G_d B}} \cdot \theta$$

Parametro θ necessario per rendere i dati sperimentali confrontabili con quelli teorici.

$$\theta = \sqrt{\frac{\rho B L}{F_d}}$$



Dato sperimentale			Valore teorico	
Test n°	T [s]	Disp. [mm]	T [s]	Err. [%]
T4_A	0.12	10.00	0.12	1%
T6_A	0.25	61.82	0.22	12%
T7_A	0.25	60.68	0.22	12%
T11_A	0.37	131,12	0.35	6%
T15_A	0.41	152,55	0.38	7%
T19_A	0.34	120,97	0.33	3%
T23_A	0.34	101,55	0.33	1%
T27_B	0.45	157,15	0.49	9%
T29_B	0.45	152,89	0.51	13%
T36_B	0.10	10,09	0.12	19%
T44_C	0.17	35,83	0.16	3%

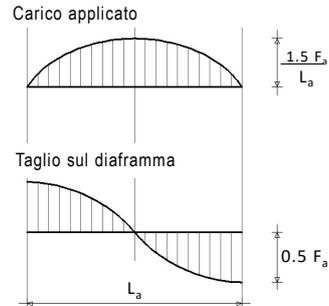


EN1998 – PART III: CHAPTER 10 - SPECIFIC RULES FOR TIMBER

ANALISI STATICA LINEARE

L'effetto dell'azione sismica sul diaframma viene valutato attraverso una distribuzione di carico che riproduce il profilo inerziale

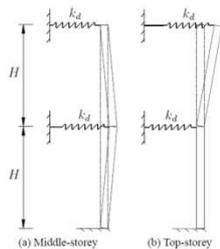
$$f_a(x) = \frac{1.5 \cdot F_a}{L_a} \cdot \left[1 - \left(\frac{2 \cdot x}{L_a} \right)^2 \right]$$



- f_a è il carico inerziale a metro lineare [kN/m];
- F_a è il carico inerziale totale sul diaframma [kN];
- L_a è la distanza tra i supporti laterali [m];
- x è la distanza dalla mezzeria del diaframma [m].

EN1998 – PART III: CHAPTER 10 - SPECIFIC RULES FOR TIMBER

CRITERI DI VERIFICA PER I SOLAI LIGNEI

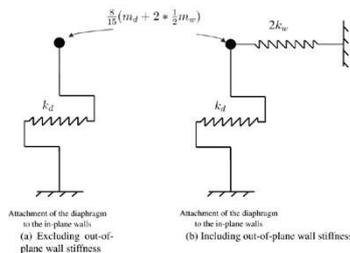


$$G_{d0,eff} = \varphi \cdot \alpha_m \cdot \frac{A_n}{A} \cdot G_{d,0}$$

tiene conto del contributo di rigidità dei muri caricati «fuori piano»



Displacement incompatibility between diaphragm and URM end walls.



$$T_1 = 2\pi \sqrt{\frac{8}{15k_d} (m_d + m_w)} \quad T_2 = 2\pi \sqrt{\frac{8}{15k^*} (m_d + m_w)}$$

$$k^* = 2k_w + k_d$$

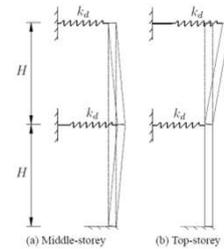
$$k_d = \frac{16}{3} G_d' \frac{B}{L} \quad k_w = \frac{3E_m I_{cr,\ell}}{H_d^3} + \frac{3E_m I_{cr,u}}{H_u^3} = 3E_m \left(\frac{I_{cr,\ell}}{H_d^3} + \frac{I_{cr,u}}{H_u^3} \right)$$

EN1998 – PART III: CHAPTER 10 - SPECIFIC RULES FOR TIMBER

CRITERI DI VERIFICA PER I SOLAI LIGNEI

$$G_{d0,eff} = \varphi \cdot \alpha_m \cdot \frac{A_n}{A} \cdot G_{d,0}$$

$$\alpha_m = 1 + \left(\frac{t_i^3}{h_i^3} + \frac{t_s^3}{h_s^3} \right) \frac{L_a^2 E_m A}{B G_{d,0} A_n}$$



- t_i è lo spessore delle murature sollecitate fuori piano al livello inferiore al diaframma [m];
- t_s è lo spessore delle murature sollecitate fuori piano al livello superiore al diaframma [m];
- h_i è l'altezza di interpiano al livello inferiore [m];
- h_s è l'altezza di interpiano al livello superiore [m];
- E_m è il modulo elastico della muratura in assenza di fessurazione [MPa];
- A è l'area totale lorda del diaframma [m²];
- A_n è l'area netta del diaframma, depurata da eventuali aperture [m²];

Se il contributo irrigidente delle murature sollecitate fuori piano è considerato trascurabile, $\alpha_m = 1$

EN1998 – PART III: CHAPTER 10 - SPECIFIC RULES FOR TIMBER

CRITERI DI VERIFICA PER I SOLAI LIGNEI

$$G_{d0,eff} = \varphi \cdot \alpha_m \cdot \frac{A_n}{A} \cdot G_{d,0}$$

tiene conto della presenza di aperture

- A è l'area totale lorda del diaframma [m²];
- A_n è l'area netta del diaframma, depurata da eventuali aperture [m²];

Nel caso in cui il rapporto A/A_n sia inferiore a 0.9, si devono condurre analisi specifiche (ad es. analisi statiche non lineari ed analisi dinamiche non lineari mirate a valutare la risposta di piano del solaio)

EN1998 – PART III: CHAPTER 10 - SPECIFIC RULES FOR TIMBER

CRITERI DI VERIFICA PER I SOLAI LIGNEI

Verifica di deformazione

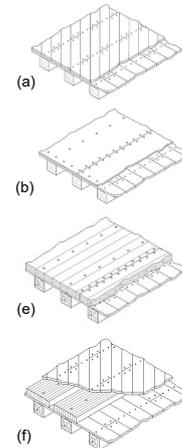
$$d_r = \frac{2 \cdot \Delta_d}{L_a} \cdot 100 \leq d_{r,max}$$

domanda di spostamento

$$\Delta_d = \alpha_d \cdot \mu_d \cdot S_d(T_a) \cdot \frac{L_a \cdot W}{B \cdot g \cdot G_{d,eff}}$$

Valori massimi di deformazione accettabile, $d_{r,max}$ [%]

	No retrofit	Retrofit			
		(a)	(b)	(e)	(f)
Near Collapse (NC)	6.0%	2.1%	1.6%	1.5%	2.1%
Significant Damage (SD)	4.0%	1.5%	1.2%	1.1%	1.5%
Damage Limitation (DL)	2.5%	0.8%	0.7%	0.6%	0.8%



EN1998 – PART III: CHAPTER 10 - SPECIFIC RULES FOR TIMBER

CRITERI DI VERIFICA PER I SOLAI LIGNEI

Verifica di deformazione

$$\Delta_d = \alpha_d \cdot \mu_d \cdot S_d(T_a) \cdot \frac{L_a \cdot W}{B \cdot g \cdot G_{d,eff}}$$

$\alpha_d = 1.26$ Forma modale per carico parabolico, distribuzione di massa uniforme
 $\alpha_d = 1.23$ Forma modale per carico uniforme, distribuzione di massa uniforme } 1.25

μ_d fattore di duttilità, tiene conto delle nonlinearità del sistema nella definizione della domanda di spostamento

$$\mu_d = \frac{q_a^2 + 1}{2}$$

q_a fattore di comportamento, assunto pari a 1.5 per tutte le tipologie di solaio

EN1998 – PART III: CHAPTER 10 - SPECIFIC RULES FOR TIMBER

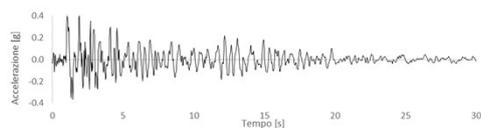
CRITERI DI VERIFICA PER I SOLAI LIGNEI

Fattore di comportamento

$$q_a = 1,5$$

per tutte le tipologie di solaio

- Analisi statiche non lineari (*pushover*)
- Analisi dinamiche non lineari (*time history*)



Dir. parallela ai travetti		
	G_d [kN/m]	q_a
Straight	150	1.5
Plywood	1500	1.4
Diagonal	2400	1.2
X-LAM	2900	1.2

Dir. ortogonale ai travetti - SQ		
	G_d [kN/m]	q_a
Straight	400	1.0
Plywood	2400	1.4
Diagonal	3200	1.2
X-LAM	4000	1.2

Dir. ortogonale ai travetti - SL		
	G_d [kN/m]	q_a
Straight	100	1.5
Plywood	1500	1.4
Diagonal	2400	1.2

EN1998 – PART III: CHAPTER 10 - SPECIFIC RULES FOR TIMBER

CRITERI DI VERIFICA PER I SOLAI LIGNEI

Verifica di resistenza

$$v_{Ed} \leq v_{Rd}$$

forza di taglio per unità di
lunghezza ai bordi del solaio

$$v_{Ed} = \frac{F_a}{2B}$$

Resistenza a a taglio unitaria $v_{R,rep}$ [kN/m]**

	No retrofit	Retrofit (Figure 8.4)			
		(a)	(b)	(e)	(f)
Parallel to joists	3	30	25	40	30
Perpendicular to joists	5*	45	25	45	40

* In case of SQ joists, diaphragm shear strength in the direction perpendicular to the joists, can be significantly higher than the $v_{R,rep}$ value reported in the table.

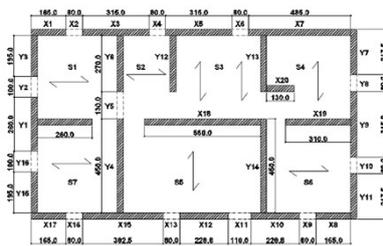
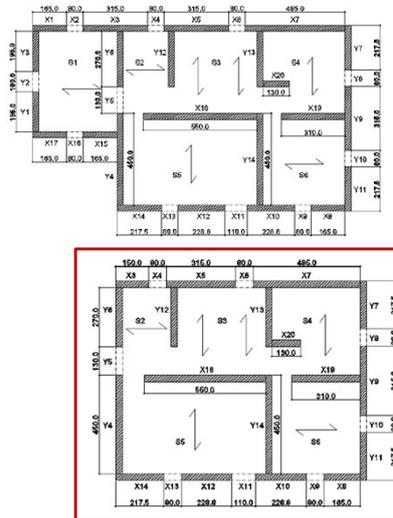
** Given values can be considered as mean reference values.

LINEE GUIDA PER LA VALUTAZIONE SISMICA DEGLI ORIZZONTAMENTI LIGNEI

APPLICAZIONE DELLE PROCEDURE A CASI STUDIO

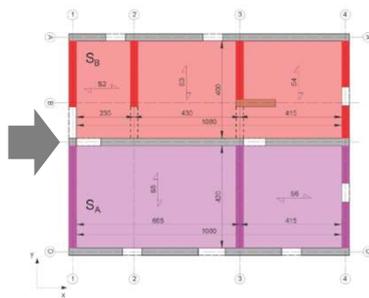


- Selezione di edifici con diverse caratteristiche di regolarità in pianta ed in elevazione;
- Applicazione delle procedure previste dalle Norme di riferimento;
- Diverse ipotesi di comportamento;
- Confronto tra le procedure;
- Effetti del rinforzo sulle verifiche di sicurezza

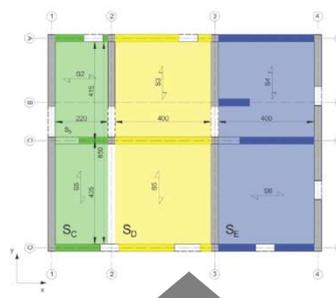


LINEE GUIDA PER LA VALUTAZIONE SISMICA DEGLI ORIZZONTAMENTI LIGNEI

APPLICAZIONE DELLE PROCEDURE A CASI STUDIO

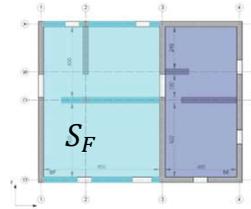


$$G_{d,0} = \frac{\sum_i G_{d,0} \cdot B_i}{\sum_i B_i}$$



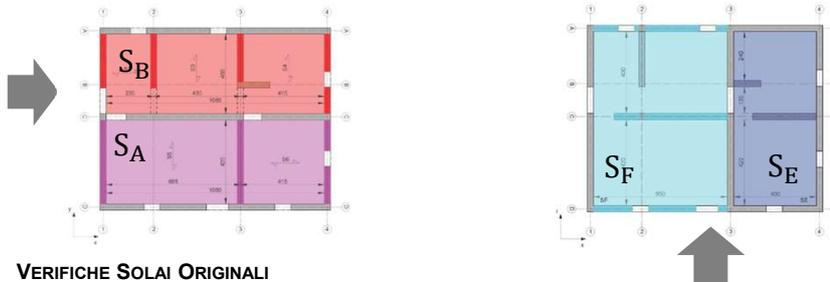
Solaio	Campo	Direzione*	$G_{d,0}^i$ [kN/m]	B_i [m]	$G_{d,0}$ [kN/m]
SA	S ₂	90	400	6.65	304
	S ₆	0	150	4.15	
SB	S ₂	0	150	2.35	346
	S ₃	90	400	4.30	
SC	S ₂	90	400	4.15	272
	S ₆	0	150	4.35	
SD	S ₂	0	150	4.15	150
	S ₆	0	150	4.35	
SE	S ₄	0	150	4.15	278
	S ₆	90	400	4.35	

* Direzione di carico: 0 – parallela ai travetti, 90 – perpendicolare ai travetti



LINEE GUIDA PER LA VALUTAZIONE SISMICA DEGLI ORIZZONTAMENTI LIGNEI

APPLICAZIONE DELLE PROCEDURE A CASI STUDIO



VERIFICHE SOLAI ORIGINALI

Stato di fatto, verifiche in termini di spostamento.

Livello	Solaio	L_a [m]	Δ_d [mm]	dr [%]	dr_{cap} [%]	$dr/d_{r, cap}$ [-]
1	S _A	4.2	30.19	1.44	4.00	0.36
	S _B	4.0	24.22	1.21	4.00	0.30
	S _E	2.2	36.20	1.81	4.00	0.45
	S _F	6.5	109.68	3.37	4.00	0.84
2	S _A	4.2	35.58	1.69	4.00	0.42
	S _B	4.0	37.31	1.87	4.00	0.47
	S _E	2.2	33.42	1.67	4.00	0.42
	S _F	6.5	63.34	1.95	4.00	0.49

LINEE GUIDA PER LA VALUTAZIONE SISMICA DEGLI ORIZZONTAMENTI LIGNEI

APPLICAZIONE DELLE PROCEDURE A CASI STUDIO



$$F_{AS_2} = F_{A,SB} \cdot \frac{G_{d,0}^{S_2} \cdot B_{S_2}}{G_{d,0}^{S_B} \cdot B_{S_B}} = 57.67 \cdot \frac{150 \cdot 2.35}{346 \cdot 10.80} = 5.45 \text{ kN}$$

$$F_{AS_3} = F_{A,SB} \cdot \frac{G_{d,0}^{S_3} \cdot B_{S_3}}{G_{d,0}^{S_B} \cdot B_{S_B}} = 57.67 \cdot \frac{400 \cdot 4.30}{346 \cdot 10.80} = 26.58 \text{ kN}$$

$$F_{AS_4} = F_{A,SB} \cdot \frac{G_{d,0}^{S_4} \cdot B_{S_4}}{G_{d,0}^{S_B} \cdot B_{S_B}} = 57.67 \cdot \frac{400 \cdot 4.15}{346 \cdot 10.80} = 25.65 \text{ kN}$$

VERIFICHE SOLAI ORIGINALI

Tabella 4.16. Stato di fatto, primo solaio: verifiche in termini di forza.

Direzione	Campo	B [m]	$G_{d,0}$ [kN/m]	F_d [kN]	V_{Ed} [kN/m]	V_d [kN/m]	V_{Ed} [kN/m]	V_{Ed}/V_{Ed}
x	S2	2.35	150	5.45	1.16	3.00	2.25	0.52
	S3	4.30	400	26.58	3.09	5.00	3.75	0.82
	S4	4.15	400	25.65	3.09	5.00	3.75	0.82
	S5	6.65	400	49.00	3.68	5.00	3.75	0.98
	S6	4.15	150	11.47	1.38	3.00	2.25	0.61
	y	S2	4.15	240	46.56	5.61	5.00	3.75
S3		4.15	240	46.56	5.61	3.00	2.25	2.49
S4		4.15	150	14.52	1.75	3.00	2.25	0.78
S5		4.35	150	30.45	3.50	3.00	2.25	1.56
S6		4.35	400	40.58	4.66	5.00	3.75	1.24

LINEE GUIDA PER LA VALUTAZIONE SISMICA DEGLI ORIZZONTAMENTI LIGNEI

APPLICAZIONE DELLE PROCEDURE A CASI STUDIO



VERIFICHE SOLAI RINFORZATI

Tabella 4.21. Rinforzo con tavolato diagonale, primo solaio: verifiche in termini di forza.

Direzione	Campo	B [m]	G _{d0} [kN/m]	F _a [kN]	V _{Ed} [kN/m]	V _k [kN/m]	V _{Rd} [kN/m]	V _{Ed} /V _{Rd}
x	S2	2.35	3000	40.41	8.60	30.0	27.0	0.32
	S3	4.30	3600	88.72	10.32	45.0	40.5	0.25
	S4	4.15	3600	85.62	10.32	45.0	40.5	0.25
	S5	6.65	3600	151.71	11.41	45.0	40.5	0.28
	S6	4.15	3000	78.90	9.51	30.0	27.0	0.35
	y	S2	4.15	3217	140.74	16.96	45.0	40.5
S3		4.15	3217	140.74	16.96	30.0	27.0	0.63
S4		4.15	3000	94.86	11.43	30.0	27.0	0.42
S5		4.35	3000	137.57	15.81	30.0	27.0	0.59
S6		4.35	3600	119.32	13.71	45.0	40.5	0.34

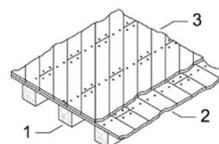
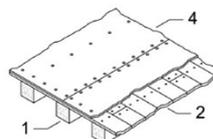


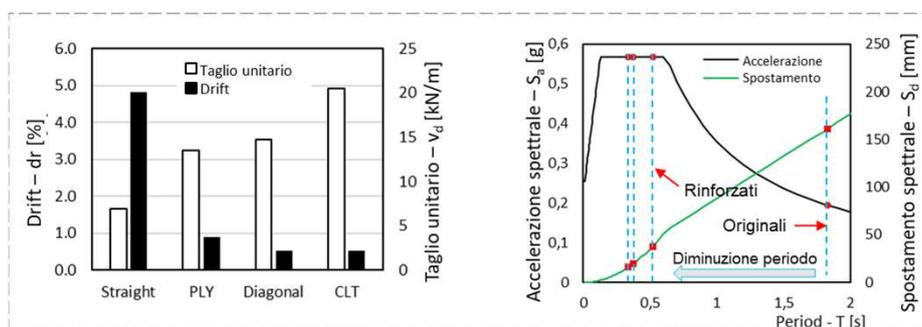
Tabella 4.26. Rinforzo con pannelli lignei di basso spessore, primo solaio: verifiche in termini di forza.

Direzione	Campo	B [m]	G _{d0} [kN/m]	F _a [kN]	V _{Ed} [kN/m]	V _k [kN/m]	V _{Rd} [kN/m]	V _{Ed} /V _{Rd}
x	S2	2.35	1800	39.53	8.41	25.0	22.5	0.37
	S3	4.30	2400	96.43	11.21	25.0	22.5	0.50
	S4	4.15	2400	93.07	11.21	25.0	22.5	0.50
	S5	6.65	2400	164.72	12.38	25.0	22.5	0.55
	S6	4.15	1800	77.10	9.29	25.0	22.5	0.41
	y	S2	4.15	2017	104.79	12.62	25.0	22.5
S3		4.15	2017	104.79	12.62	25.0	22.5	0.56
S4		4.15	1800	91.65	11.04	25.0	22.5	0.49
S5		4.35	1800	98.02	11.27	25.0	22.5	0.50
S6		4.35	2400	128.09	14.72	25.0	22.5	0.65



LINEE GUIDA PER LA VALUTAZIONE SISMICA DEGLI ORIZZONTAMENTI LIGNEI

APPLICAZIONE DELLE PROCEDURE A CASI STUDIO



GRAZIE PER L'ATTENZIONE

ivan.giongo@unitn.it

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI PRINCIPALI

Giongo I., Piazza M., Tomasi R., 2011, "Soluzioni di rinforzo di solai lignei mediante tecniche legno-legno nelle operazioni di miglioramento sismico di edifici esistenti". ANIDIS, XIV Conferenza di Ingegneria Sismica, Bari, Italy.

Giongo I., Piazza M., Tomasi R., 2013. "Investigation on the self tapping screws capability to induce internal stress in timber elements". *Advanced Materials Research*, vol. 778, pp. 604-611.

Giongo I., Dizhur D. Y., Tomasi R., Ingham J. M., 2015. "Field testing of flexible timber diaphragms in an existing vintage URM building", *Journal of Structural Engineering, ASCE*, vol. 141, United States.

Giongo I., Schiro G., Piazza M., 2016, «Tecniche di rinforzo per solai lignei», *Ingenio* - www.ingenio-web.it

Giongo I., Schiro G., Riccadonna D., 2019, "Innovative pre-stressing and cambering of timber-to-timber composite beams", *Composite Structures*, DOI: 10.1016/j.compstruct.2019.111195.

Giongo I., Schiro G., Walsh K., Riccadonna D., 2019, "Experimental testing of pre-stressed timber-to-timber composite (TTC) floors" in *Engineering Structures*, v. 2019 vol. 201, (2019).

Piazza, M., 1994, "Restoration of timber floors via a composite timber-timber solution". In *Proceedings of the Technical Workshop RILEM* "Timber: a structural material from the past to the future".

Riccadonna D., Walsh K., Schiro G., Piazza M., Giongo I., 2020, "Testing of long-term behaviour of pre-stressed timber-to-timber composite (TTC) floors" in *Construction and Building Materials*, v. 236, (2020), p. 117596. - DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.117596.

Rizzi E., Giongo I., Ingham J., Dizhur D., 2020, "Testing and Modeling In-Plane Behavior of Retrofitted Timber Diaphragms", *Journal of Structural Engineering*, v. 2020, vol. 146, n. Issue 2 (2020). - DOI: 10.1061/1943-541.0002473.

Rizzi E., Capovilla M., Giongo I., Piazza M., 2017, "Numerical study on the in-plane behaviour of existing timber diaphragms strengthened with diagonal sheathing". SHATIS'17, International Conference on Structural health assessment of timber structures, Istanbul, Turkey.