

Statica per l'edilizia storica

Università degli Studi di Cagliari
Corso di Laurea Magistrale in
Architettura
A.A. 2016-2017

Prof. ing. Antonio Cazzani, Dr. ing. Flavio Stochino

antonio.cazzani@unica.it

<http://people.unica.it/antoniocazzani/ses/>

Lezione 19 – Solai in legno

Sommario

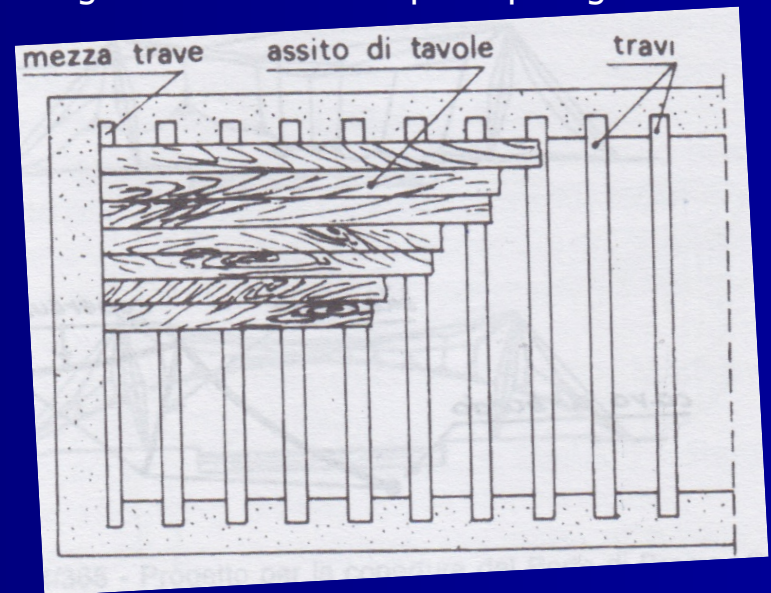
- Premessa
- Dissesti dei solai in legno:
 - Meccanismi di dissesto
 - Cause di dissesto
 - Metodi di intervento
 - Dissesti per depressione dei solai
 - Dissesti per cedimento degli appoggi
 - Dissesti per degrado del materiale
- Consolidamento dei solai in legno

Premesse (1/5)

I solai in legno furono diffusamente usati in passato prima dell'impiego di altri materiali da costruzione, quali acciaio e calcestruzzo armato. Risultano ancora molto diffusi nel Nord Europa e Nord America ove l'abbondanza di materia prima ha permesso lo sviluppo di una fiorente attività artigianale.

In Italia è ancora comune trovare l'utilizzo dei solai in legno in edifici storici per i quali gli interventi di ripristino vanno valutati con grande attenzione.

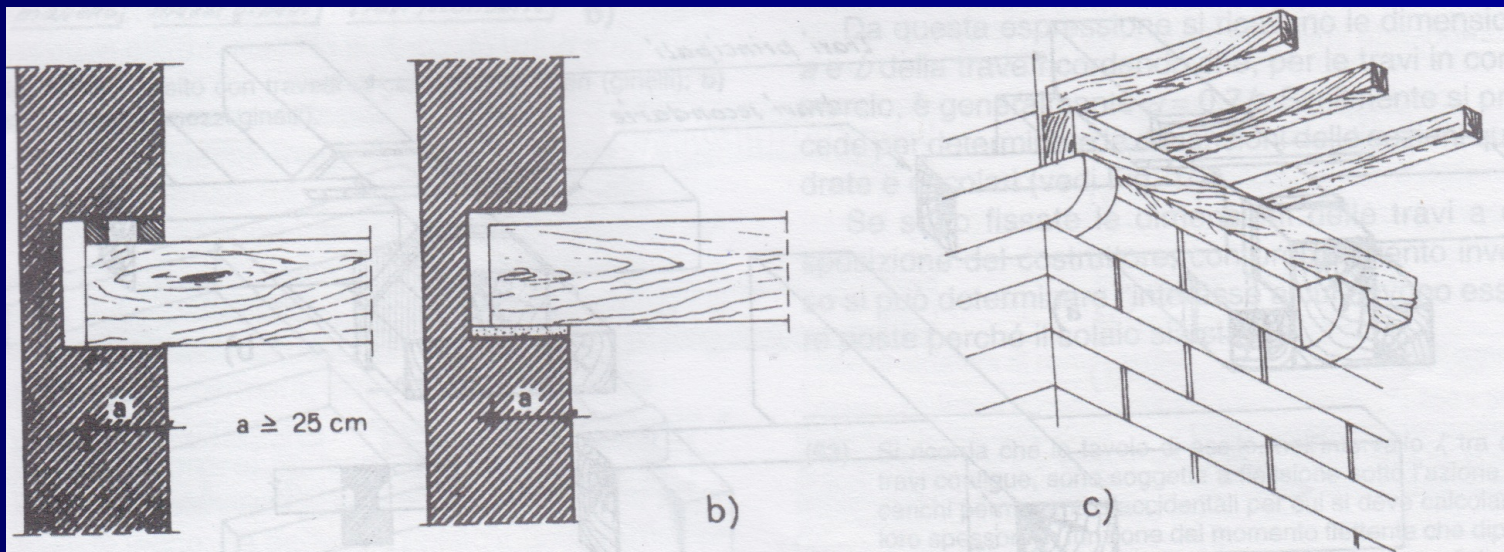
Nelle strutture murarie tradizionali il solaio in legno può essere semplicemente composto da un'orditura semplice composta da una serie di travi-travicelli o panconi parallelamente al lato minore dell'ambiente. Su queste travi si fissa direttamente l'assito di tavole.



(immagine tratta da Caleca, op. cit.)

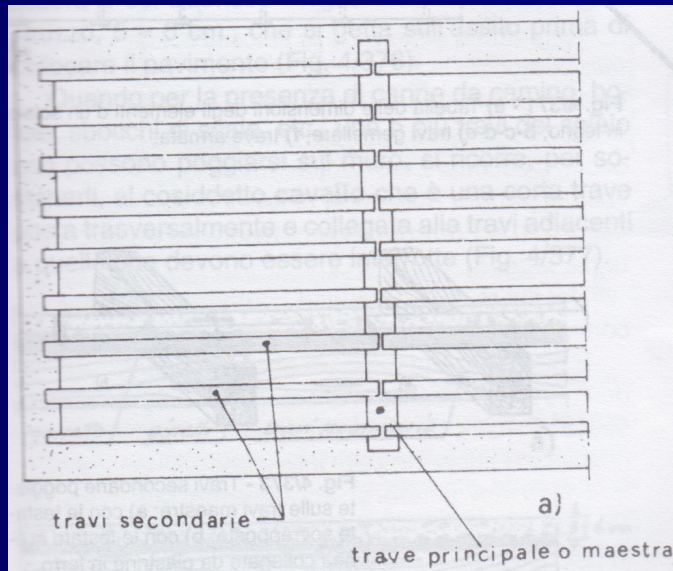
Premesse (2/5)

In generale le dimensioni delle travi si ricavano da un calcolo apposito, ma di regola per condizioni di carico usuali si dà alla loro sezione un'altezza pari a 1/24 della luce. Le testate delle travi poggiano sul muro per una profondità di almeno 25 cm, sotto di esse vi deve essere uno strato resistente costituito da uno strato di pietre o di mattoni con fori tanto ampi da lasciare uno spazio libero intorno alle testate delle travi per consentirne la ventilazione ed evitare l'infradiciatura che si avrebbe qualora venissero murate (figura a). Tale problema può essere affrontato anche rivestendo le testate con apposita guaina (figura b) o appoggiandole su travi longitudinali sostenute da mensole sporgenti dalla muratura (figura c).



(immagine tratta da Caleca, op. cit.)

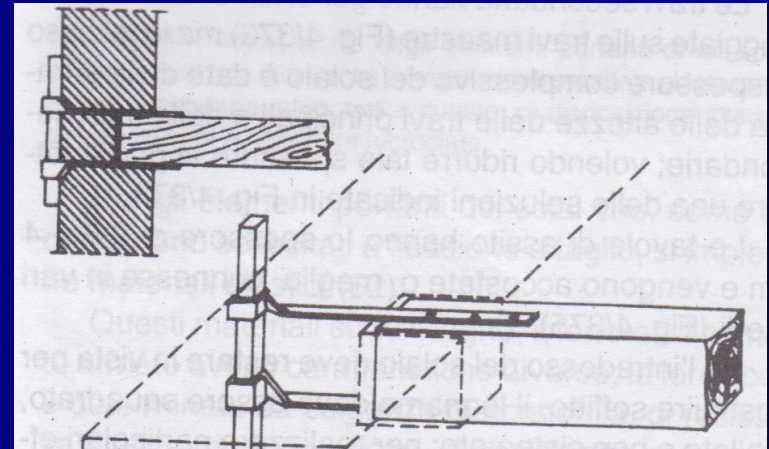
Premesse (3/5)



Se la luce del solaio supera i 4-5 m o nel caso di carichi particolarmente elevati si ricorre ad un'orditura composta costituita da travi principali disposte parallelamente al lato minore e travi secondarie disposte ortogonalmente (vedi figura a lato).

(immagini tratte da Caleca, op. cit.)

Inoltre, per rendere più efficace il collegamento delle travi maestre alla muratura si possono munire le testate di chiavi in ferro (vedi figura).



Premesse (4/5)

Nella tabella in figura si mostrano le dimensioni ordinarie di un solaio in legno tipico in funzione della luce e dei carichi applicati:

TABELLA DIMENSIONI ORDINARIE USATE PER TRAVI, TRAVETTI, PANCONI (COSTOLONI)										
(N.B. - I due valori nelle colonne sono larghezza e altezza in cm)										
Luce libera di m.		3		4		5		6		
interasse delle travi:	m 0.90	13 x 17		15 x 21		18 x 24		21 x 27		
	m 1.00	13 x 18		16 x 22		19 x 25		21 x 28		
interasse travicelli:										
solai leggeri:										
	m 0.40	9 x 12		10 x 15		12 x 17				
	m 0.50	10 x 14		12 x 17		14 x 20				
solai pesanti:										
	m 0.40	9.5 x 13		11 x 16		14 x 18				
	m 0.50	11 x 16		14 x 18		16 x 21				
interasse panconi:										
	m 0.40	5 x 18		6 x 22		7 x 26				
	m 0.50	6 x 19		7 x 23		8 x 28				

Tavola di copertura di 25-40 mm di spessore.
 Per portate > di 5 m - vedi la tabella seguente: (misure c.s. delle travi in cm), che fornisce le dimensioni delle travi principali o maestre dell'orditura composta.

Luce libera di m		4		5		6		7		8	
Carico al mq in kg		400	500	400	500	400	500	400	500	400	500
interasse delle travi:	m 3	31 x 22	35 x 25	35 x 25	43 x 30	39 x 28	47 x 33	43 x 31	52 x 37	47 x 33	56 x 40
	m 4	33 x 24	38 x 27	38 x 27	45 x 32	43 x 31	52 x 37	47 x 33	58 x 41	52 x 37	62 x 44
	m 5	36 x 25	42 x 30	42 x 30	47 x 33	47 x 33	56 x 40	52 x 37	62 x 44	67 x 48	67 x 48

(Tabella tratta da Caleca, op. cit.)

Premesse (5/5)

Il calcolo strutturale dei solai in legno è normato in Italia dal capitolo 4.4 del DM 14.01.2008, ma a livello internazionale si possono trovare utili indicazioni nell' Eurocodice 5 (UNI EN 1995-1-2 e UNI EN 1995-2-2).

In generale fissato l'interasse delle travi in funzione dei carichi e delle spessore dell'assito si determina il carico p gravante su un metro lineare di trave. Ai fini strutturali tutte le connessioni di un solaio in legno (salvo rare eccezioni) si considerano cerniere e quindi risulta semplice calcolare il momento massimo in mezzeria $M=pl^2/8$ in funzione della luce.

Dalle formule di Navier sulla flessione semplice si può ricavare un'utile formula di progetto per il dimensionamento della sezione resistente una volta stabilita la tensione di progetto σ cui dovrà essere sottoposta la trave:

$$bh^2/6=W=M/\sigma \quad [1]$$

Dalla [1] si possono ricavare le dimensioni b (base) e h (altezza) della trave ricordando che generalmente per le travi in commercio le due grandezze sono legate da $b=0.7h$.

In maniera simile, se la dimensione della trave è fissata con altri criteri con procedimento inverso si può determinare l'interasse cui devono essere poste affinché il solaio sia stabile.

Dissesti nei solai in legno (1/17)

Le manifestazioni di dissesto e degrado in un solaio in legno possono essere raggruppate in funzione della zona che viene danneggiata:

- Pavimenti (estradosso del solaio).
- Ordito (principale e/o secondario).
- Soffitti (intradosso del solaio).

Un altro modo di classificarle consiste nell'individuare tre categorie caratterizzanti il tipo di danno rilevabile visivamente:

- Depressione dell'orditura portante.
- Cedimento degli appoggi.
- Degrado del materiale.

Per completare il quadro è opportuno individuare quali sono le principali tecniche di intervento per il ripristino dei solai:

- Riduzione dei carichi.
- Ripristino e/o aumento della capacità portante.
- Rimozione delle cause di degrado del materiale.
- Modifica dello schema statico.

Dissesti nei solai in legno (2/17)

Riduzione dei carichi:

Tale intervento consiste semplicemente nel rimuovere i sovraccarichi accidentali e/o nel sostituire i carichi permanenti non strutturali con elementi costruttivi più leggeri.

È bene sottolineare che ogni alterazione o dissesto costituisce in fase di demolizione un onere ulteriore in quanto richiede di prendere opportuni accorgimenti. Ad esempio la rimozione di alcune travi del solaio costituisce una modifica dello stesso schema statico strutturale durante l'esecuzione della sostituzione.

Ripristino e/o aumento della capacità portante:

Con questo intervento si migliorano le prestazioni strutturali degli elementi portanti mediante:

1. Rigenerazione dell'elemento strutturale originale con un intervento diretto per ripristinare le caratteristiche meccaniche dei materiali.
2. Aumento della sezione resistente grazie all'inserimento di nuovi elementi costruttivi in vicinanza gli originali.
3. Sostituzione degli elementi degradati.

Dissesti nei solai in legno (3/17)

Rimozione delle cause di degrado dei materiali:

Si può avere un intervento diretto sugli elementi costruttivi o indiretto sugli elementi di contorno.

Modifica dello schema statico:

Se l'elemento da consolidare non è più in grado di sopportare le sollecitazioni cui è sottoposto e non si possono aumentare le dimensioni della sua sezione per vari motivi è possibile:

1. Realizzare un nuovo sistema di travi e travicelli considerando il vecchio sistema come un carico permanente non strutturale.
2. Effettuare un irrigidimento generalizzato della vecchia struttura.

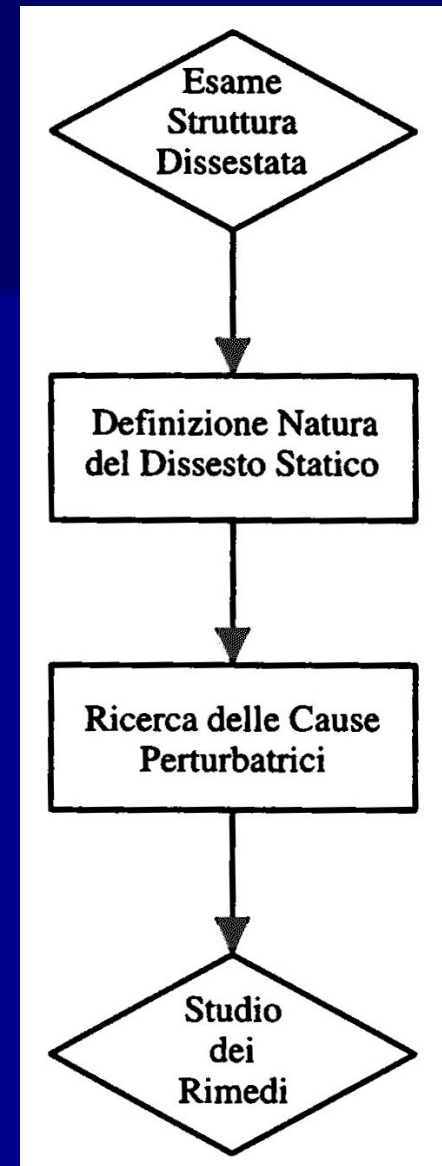
Dissesti nei solai in legno (4/17)

È ancora possibile distinguere due tipologie di cause di dissesto:

- Immediate: cedimenti di fondazione, schiacciamento dei materiali etc.
- Non immediate o lontane: errori di progetto e di costruzione, incompleta o errata manutenzione, degrado materiali etc.

Ma i principali rimedi si possono distinguere anche in due categorie principali:

- Provvisori: puntellature, fasciature, cerchiature etc
- Definitivi: ottenuti a valle di progettazioni esecutive complete di tutti gli interventi.



(immagine tratta da Olivito, op. cit.)

Dissesti nei solai in legno (5/17)

La tabella riportata mostra una sintesi di criteri, metodi e tecniche di intervento.

(Tabella tratta da Munafò, op. cit.)

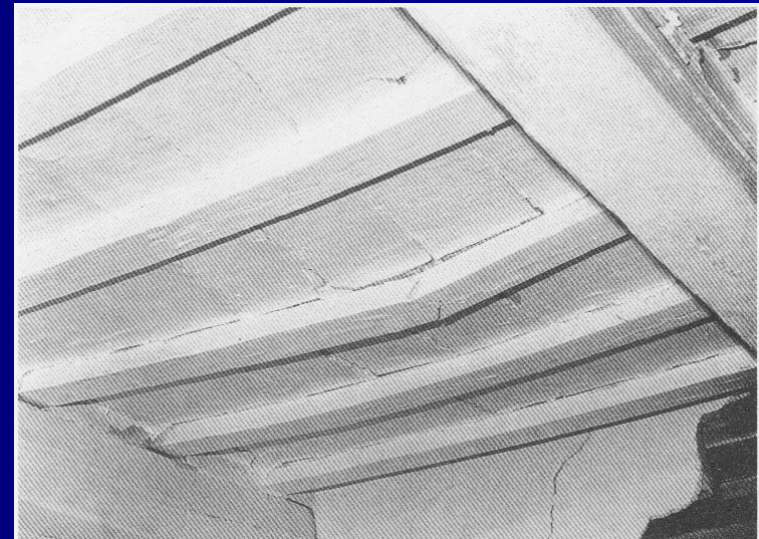
<p><i>RIDUZIONE DEI CARICHI</i></p>	<ul style="list-style-type: none"> - Demolizione di strutture e sovrastrutture 	
<p><i>RIPRISTINO E/O AUMENTO DELLE CAPACITA' PORTANTI</i></p>	<ul style="list-style-type: none"> - Sostituzione di travi senza modifica dello schema statico - Rigenerazione dell'elemento strutturale 	<ul style="list-style-type: none"> - Cuciture armate - Iniezioni di cemento e resine - Sostituzione di parti di legno alterate - Sostituzione di laterizi alterati
	<ul style="list-style-type: none"> - Aumento della sezione resistente 	<ul style="list-style-type: none"> - Rinforzo di travi con profilati metallici o elementi lignei - Collaborazioni fra elementi strutturali - Realizzazione di nuovi appoggi per travi
<p><i>RIMOZIONE DELLE CAUSE DI DEGRADO</i></p>	<ul style="list-style-type: none"> - Eliminazione delle cause 	<ul style="list-style-type: none"> - Aerazione degli appoggi delle travi in legno - Trattamento del legno contro lo attacco di insetti e funghi - Interventi sulle murature
<p><i>MODIFICA DELLO SCHEMA STATICO</i></p>	<ul style="list-style-type: none"> - Realizzazione di una nuova ossatura 	<ul style="list-style-type: none"> - Sostituzione dei solai esistenti - Sostituzione di travi
	<ul style="list-style-type: none"> - Irrigidimenti generalizzati 	<ul style="list-style-type: none"> - Realizzazione di una cappa armata all'estradosso dei solai - Realizzazione di cordoli perimetrali in cemento armato - Collegamenti fra elementi strutturali - Collegamento dei solai con i muri perimetrali

Dissesti nei solai in legno (6/17)

DEPRESSIONE DELL'ORDITURA PORTANTE DEI SOLAI

La depressione dell'orditura portante si manifesta con la perdita di orizzontalità del piano del solaio interessando sia la travatura principale, sia quella secondaria.

Generalmente questo tipo di lesione è da ricondurre allo stato di sollecitazione indotto dai carichi gravanti sul solaio e quindi alla capacità di resistenza delle travi.



Intradosso solaio in legno con depressione orditura portante
(Immagini tratte da Munafò, op. cit.)

Dissesti nei solai in legno (7/17)

DEPRESSIONE DELL'ORDITURA PORTANTE DEI SOLAI

Le lesioni in mezzeria sono quasi sempre caratterizzate da un andamento verticale, dovute ad un momento positivo che mette in trazione le fibre inferiori.



Le lesioni agli appoggi possono essere verticali, dovute ad un momento negativo che pone in trazione le fibre superiori, oppure inclinate di 45° circa dovute allo sforzo di taglio.

È possibile che entrambi gli effetti si manifestino con "fratture iniziali" all'estradosso della trave che si propagheranno in senso longitudinale lungo le fibre.

Intradosso solaio in legno con depressione
orditura secondaria

(Immagine tratta da Munafò, op. cit.)

Dissesti nei solai in legno (8/17)



Le lesioni sui pavimenti dovute a questo tipo di dissesto saranno provocate dalla conseguente compressione che provocherà una sbeccatura negli spigoli delle piastrelle ed una sconnessione dei giunti.

Estradosso solaio in legno con depressione orditura portante
(Immagine tratta da Munafò, op. cit.)

Dissesti nei solai in legno (9/17)

DEPRESSIONE DELL'ORDITURA PORTANTE DEI SOLAI

Tra le principali cause di depressione delle travi dei solai possiamo citare:

- Disomogeneità delle sezioni reagenti.
- Insufficiente sezione trasversale.
- Riduzione delle caratteristiche meccaniche dei materiali dovute a vetustità e degrado generale.
- Aumento del carico (ad. es. a causa di un cambio di destinazione d'uso della struttura).
- Fenomeni di "fluage" dovuti a carichi di lunga durata.

(Tabella tratta da Munafò, op. cit.)

CAUSE DI DEPRESSIONE DEI SOLAI CARICATI CON NORMALI CARICHI DI ESERCIZIO

- Cause inerenti la costruzione dei solai

- Disomogeneità della sezione reagente
- Uso di materiali scadenti
- Mancanza di elementi di ripartizione dei carichi
- Scarsa sezione reagente

- Cause legate alla modificazione della impostazione statica (del solaio o dei muri portanti)

- Soppressione di alcuni elementi portanti
- Realizzazione di aperture

- Dissesto dei muri di appoggio

- Rototraslazione dei muri di appoggio

- Degrado dei materiali legnosi

- Taglio fuori stagione
- Degrado della fibra legnosa
- Attacco del legname da parte di animali o vegetali
- marcescenza del legno per unidità e infiltrazioni d'acqua
- Fluage

CAUSE DI DEPRESSIONE DI SOLAI CARICATI CON CARICHI SUPERIORI A QUELLI NORMALI DI ESERCIZIO

- Carichi statici verticali

- Carichi aumentati

- Carichi dinamici

- Fenomeni sismici eccezionali
- Urti o scoppi
- Vibrazioni da traffico o da macchinari

Dissesti nei solai in legno (10/17)

Per l'eliminazione della depressione dei solai possono essere adottate diverse strategie:

1. Riduzione dei carichi agenti sui solai.
2. Ripristino o aumento delle capacità portanti dei solai.
3. Interventi sulle cause del degrado.
4. Modifica dello schema statico (costruzione di nuova ossatura, irrigidimenti generalizzati etc.)



Irrigidimento trave portante solaio
con aumento sezione.

(Immagine tratta da Munafò, op. cit.)

17

Dissesti nei solai in legno (11/17)

CEDIMENTO DEGLI APPOGGI

I cedimenti degli appoggi possono essere direttamente collegati alle funzioni strutturali che ad essi sono assegnate:

- trasmettere carichi alle strutture orizzontali ed a quelle verticali,
- realizzare un efficace collegamento tra i setti murari.

È possibile riscontrare manifestazione di questo effetto nella chiusura orizzontale (travi solaio) e nelle strutture verticali su cui si appoggiano i solai (murature).

Con riferimento alle travi del solaio è possibile notare delle fessure a 45° provocate dal taglio in prossimità degli appoggi come mostrato nelle immagini sottostanti.



Lesioni a taglio in
prossimità degli
appoggi
Immagini tratte da
Munafò, op. cit.

Dissesti nei solai in legno (12/17)

CEDIMENTO DEGLI APPOGGI

In riferimento alle pareti murarie le manifestazioni di questo dissesto possono essere:

1. lesione parabolica inversa dovuta allo schiacciamento del materiale murario causato dalla reazione di appoggio trasmessa dalla trave (figura a);
2. cedimento delle architravi (figura b);
3. rotazione della muratura intorno ad un asse orizzontale a causa dei carichi orizzontali trasmessi dal solaio (figura c).



(a)



(b) Varie lesioni per cedimento degli appoggi



(c)

Immagini tratte da Munafò, op. cit.

Dissesti nei solai in legno (13/17)

Le cause che possono innescare il cedimento degli appoggi possono essere distinte ancora tra quelle relative alle chiusure orizzontali e quelle che interessano le strutture in elevazione. In riferimento alle prime:

- Disomogenità della sezione reagente.
- Mancanza di elementi di ripartizione dei carichi.
- Variazione dello schema statico con soppressione di alcuni elementi portanti.
- Degrado della fibra legnosa e del materiale in generale.
- Aumento dei carichi di progetto a causa di eventi straordinari o cambi di destinazione d'uso.

Mentre per quanto riguarda le pareti murarie:

- Elevata snellezza dei muri.
- Variazione dello schema statico con realizzazione di aperture o abrasioni.
- Degrado dei materiali (invecchiamento delle malte, gelività delle murature)
- Aumento dei carichi di progetto.

Dissesti nei solai in legno (14/17)

I criteri di intervento per l'eliminazione del cedimento degli appoggi seguono lo schema presentato in precedenza:

- Riduzione dei carichi
- Ripristino o aumento della capacità portante delle travi riguardanti il solo appoggio o le immediate vicinanze.
- Eliminazione agenti animali, vegetali, ambientali causa del degrado del materiale.
- Modifica dello schema statico con l'adozione di una nuova ossatura portante, irrigidimenti generalizzati

Dissesti nei solai in legno (15/17)

DEGRADO DEL MATERIALE

Le cause di degrado dei materiali lignei possono essere così sintetizzate:

- Attacco di funghi che si nutrono delle sostanze cellulosiche del legno.
- Attacco di insetti xilofagi che attaccano il legname già abbattuto o in opera scavando gallerie e riducendo la capacità portante degli elementi strutturali.
- Umidità: in condizioni di saturazione il legno può presentare valori di resistenza meccanica pari a circa la metà di quella in condizioni ottimali di umidità (10-15%)
- Effetti di incendio.



Testata di una trave attaccata dai funghi.
(Immagine tratta da Munafò, op. cit.)

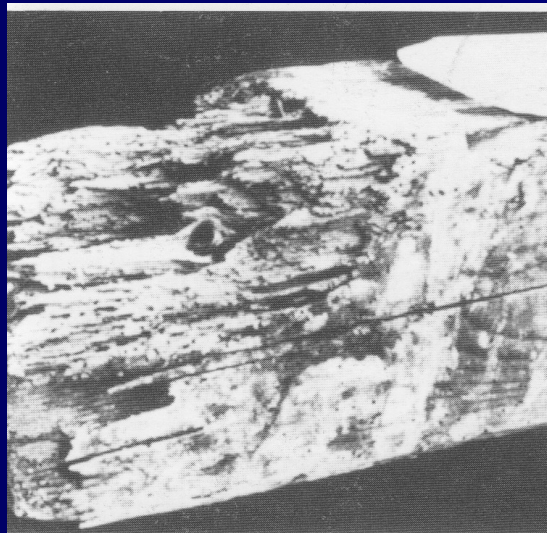
Dissesti nei solai in legno (16/17)

DEGRADO DEL MATERIALE

Le modalità di indagine per individuare il degrado del materiale possono essere distinte in :

■ Controllo visivo volto ad accertare che:

- non vi siano depositi di segatura o fori di uscita delle gallerie che indicherebbero un attacco da parte degli insetti
- non si rilevi la presenza di alterazioni cromatiche (grigio-rosa) dovute alla distruzione delle sostanze cellulari del legno da parte di funghi che attaccano il legname già messo in opera.



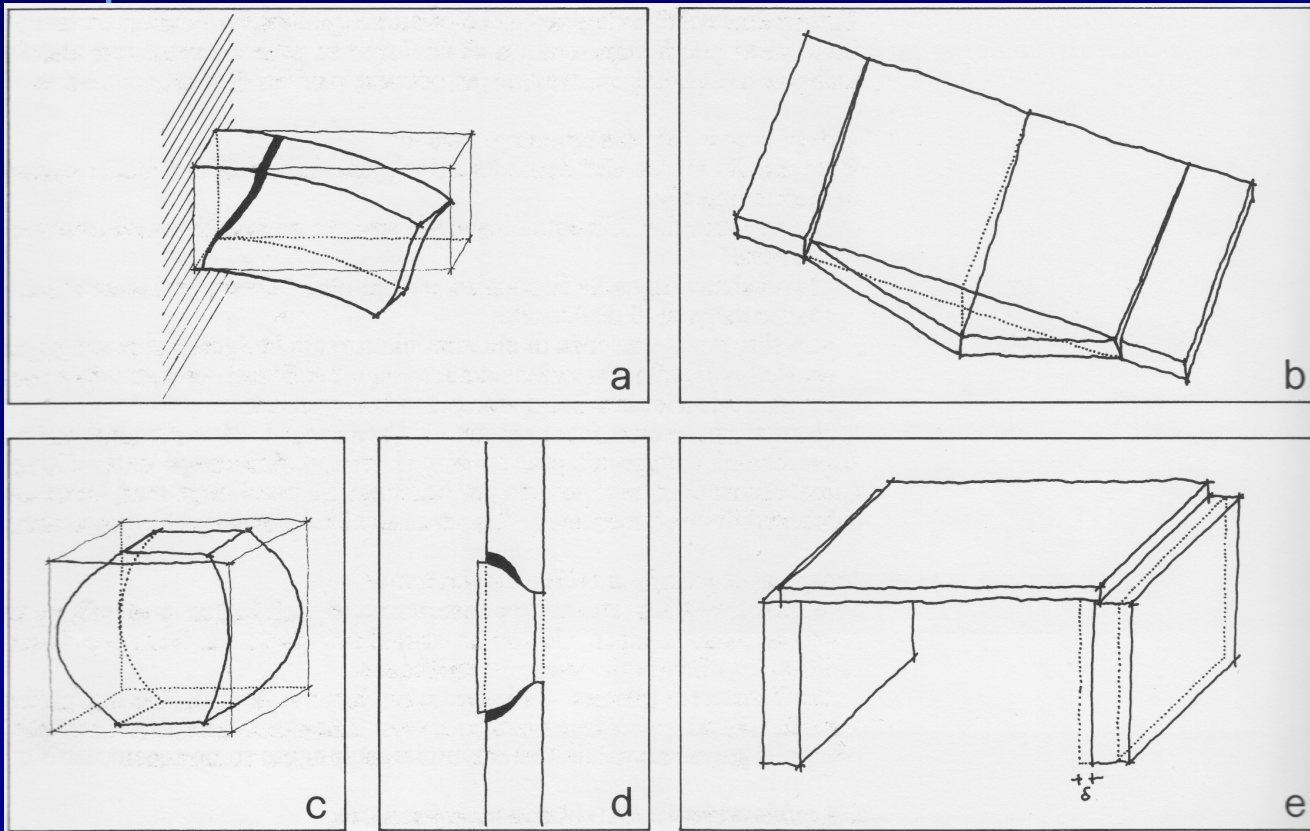
- Indagine acustica con battitura del legno con un percussore e studio del suono prodotto: se il suono risulta sordo è possibile la presenza di attacco da parte di insetti/funghi, se il percussore penetra nel legno si ha un'indicazione della presenza di gallerie superficiali che richiederà la rimozione della parte corticale per accertarsi dell'effettiva estensione dell'area reagente.
- Indagini strumentali distruttive e non distruttive.

Trave di abete attaccata da insetti,

immagine tratta da Munafò, op. cit. Statica per l'edilizia storica - A. Cazzani , F. Stochino – Lezione 19

Dissesti nei solai in legno (17/17)

MECCANISMI DI DISSESTO SCHEMA RIASSUNTIVO:



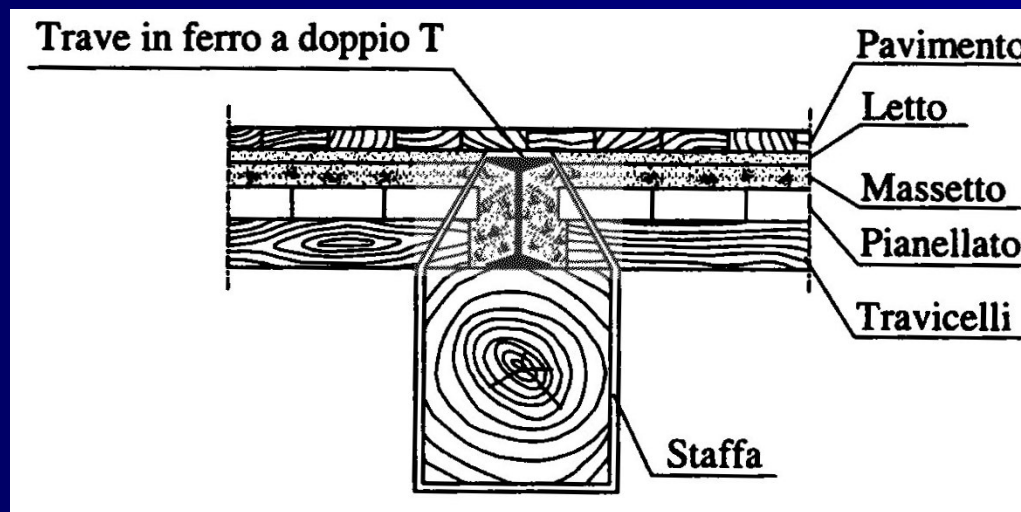
- a) Lesione per flessione e taglio.
- b) Traslazione verticale relativa.
- c) Rottura iperbolica inversa per schiacciamento.
- d) Punzonamento.
- e) Traslazione orizzontale relativa.

(Immagine tratta da Munafò, op. cit.)

Consolidamento dei solai in legno (1/4)

La convenienza del consolidamento di un solaio in legno di fronte all'opportunità della demolizione e ricostruzione va valutata attentamente dal punto di vista economico, estetico e funzionale.

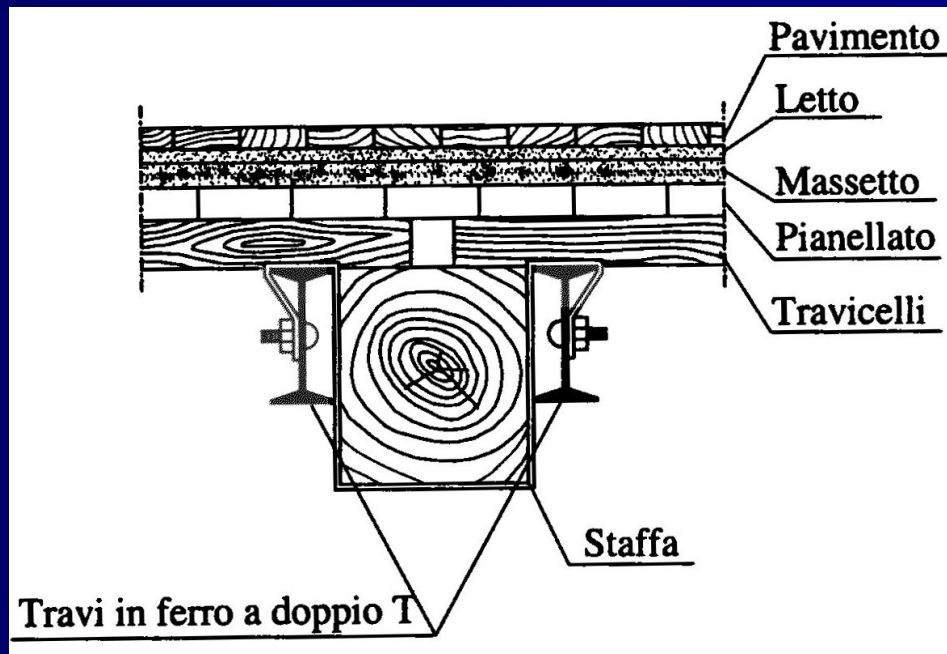
Generalmente si consiglia di rimuovere le travi che non offrono le necessarie garanzie di sicurezza per sostituirle con le nuove. Per esempio se il solaio presenta motivi architettonici particolari si può inserire una trave in acciaio a doppio T mediante l'inserimento di opportune staffe come mostrato in figura:



(Immagine tratta da Olivito, op. cit.)

Consolidamento dei solai in legno (2/4)

Oppure si può affiancare la trave in legno con due travi a doppio T sotto ascella (cioè nell'angolo fra i fianchi della trave di legno e l'intradosso dei travicelli) grazie al supporto di opportune staffe:

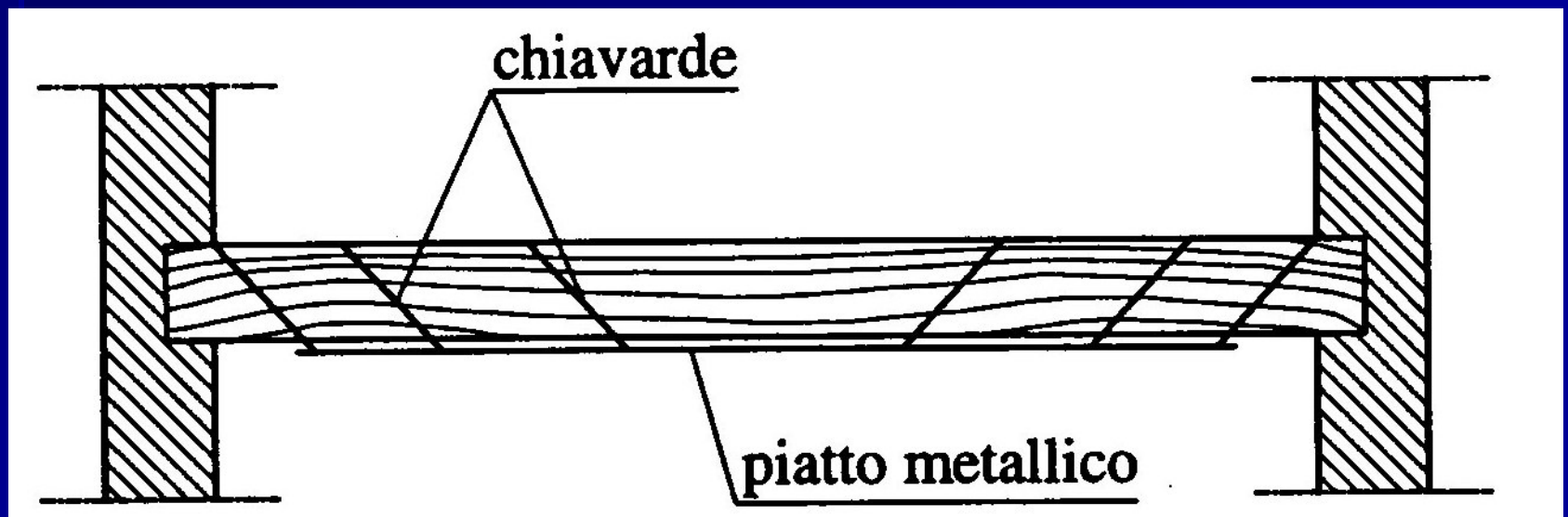


(Immagine tratta da Olivito, op. cit.)

Consolidamento dei solai in legno (3/4)

Nel caso di consolidamento volto a migliorare la resistenza flessionale si inserisce un piatto metallico all'intradosso della trave in legno e alcune chiavarde a 45° inserite in fori opportunamente distanziati per riportare all'estradosso lo sforzo di trazione dell'acciaio.

(Immagine tratta da Olivito, op. cit.)



Consolidamento dei solai in legno (4/4)

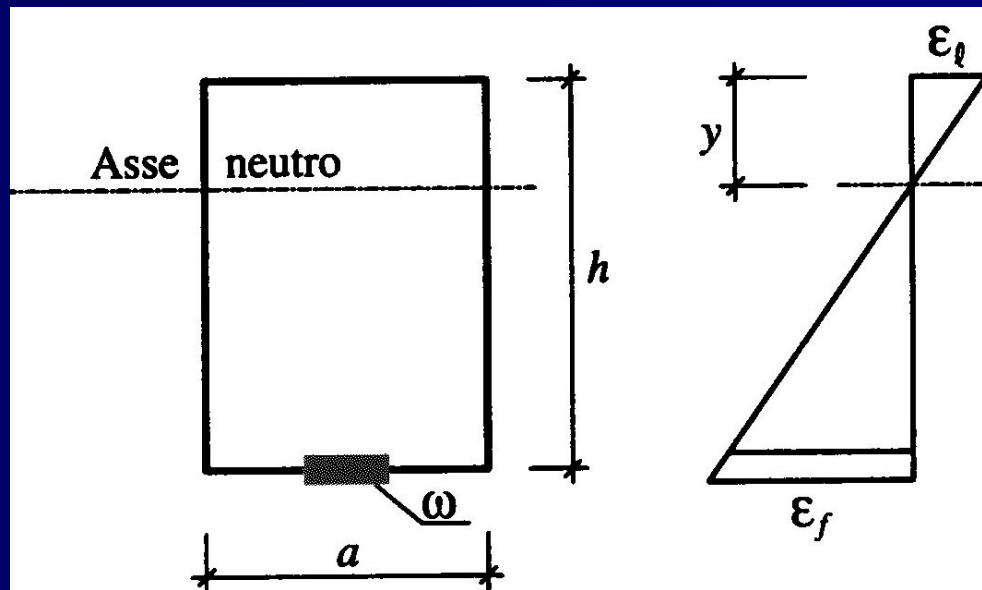
La sezione metallica all'intradosso si calcola in base al momento flettente, mentre le chiodate in base al taglio.

Si può effettuare un calcolo di verifica similmente a quanto accade per il calcestruzzo armato:

$$y = n\omega/a[-1 + (1 + 2ha/n\omega)^{1/2}] \quad \text{con } n = E_f/E_l$$

Le tensioni nell'acciaio e nel legno sono rispettivamente pari a :

$$\sigma_f = M/(\omega(h-y/3))$$

$$\sigma_l = 2M/(ay(h-y/3))$$


Se V rappresenta lo sforzo massimo di taglio la tensione tangenziale massima vale:

$$\tau = V/(a(h-y/3))$$

Da cui la forza di scorrimento lungo il piano neutro vale:

$$R = a/2 * \tau/2$$

Tale forza deve essere assorbita in ugual misura da ciascuna delle n chiodate che presentano una tensione:

$$\tau_n = R/(n(2)^{1/2})$$

Riferimenti bibliografici e iconografici

- L. Caleca, *Architettura tecnica*, Dario Flaccovio: Palermo, 2000
- M. Como, *Statica delle costruzioni storiche in muratura. Archi, volte, cupole, architetture monumentali, edifici sotto carichi verticali e sotto sisma*, Aracne: Roma, 2010
- S. Mastrodicasa, *Dissesti Statici nelle Strutture Edilizie*, Hoepli: Milano, 1980.
- P. Munafò, *Recupero dei solai in legno*: Dario Flaccovio: Palermo 1990
- R. S. Olivito, *Statica e Stabilità delle Costruzioni Murarie*, Pitagora: Bologna, 2009².