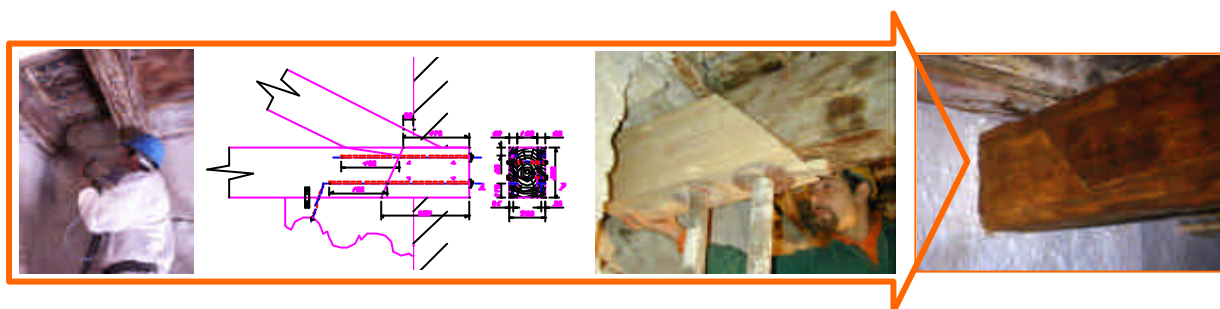




DOCUP 2000-2006 - Misura 1.8 Aiuti alla ricerca industriale e precompetitiva.

PROGETTO: **SISTEMI INTEGRATI PER IL RESTAURO DELLE STRUTTURE LIGNEE ANTICHE**



Relazione finale

Parte 2 (paragrafi 2.2.3-2.4.2)



Via Pratese, 114 int. 2
50145 FIRENZE
Tel/Fax 055 3024274
www.legnodoc.com

SISTEMA QUALITÀ





2.2.3- Secondo intervento di consolidamento: trave in abete - profilo saldato composto - compensato strutturale

L'intervento consiste nel disporre sopra il tavolato strati di compensato strutturale collegandolo al profilo saldato composto con delle viti autoforanti per ferro, e ai travetti con delle viti a legno con operazioni eseguite completamente a secco.

➤ Le fasi di esecuzione

La successione delle fasi da eseguire per mettere in opera l'intervento di consolidamento del solaio è di seguito riportata:

- puntellamento del solaio;
- smantellamento del pavimento, rimozione dell'attuale riempimento e messa in luce dell'estradosso del tavolato;
- interruzione continua del tavolato e dei travetti per la messa in luce dell'estradosso delle travi;
- posa in opera del profilo saldato - composto superiormente alle travi, questa operazione deve avvenire predisponendo una preforatura della trave in legno originaria (fori f 8, per la posa in opera degli spinotti che vengono disposti facendoli passare opportunamente per i fori praticati sulla piattabanda superiore del profilo; ogni 20 spinotti, su ogni fila, per i passi segnalati nella tavola tecnica n°14, detti elementi andranno sostituiti con dei chiodi disposti come nella tavola sopra indicata.;
- collegamento del profilo con la muratura eseguendo opportunamente lo scasso di questa nell'intorno della trave in questione, con la successiva disposizione delle squadrette in acciaio imbullonate al profilo, e chiusura dello scasso con ricostruzione della muratura;
- posa dei pannelli di compensato strutturale superiormente al tavolato e "incollaggio" in opera di questo strato con quelli del filare superiore;
- connessione dello strato di compensato al profilo saldato - composto per mezzo di viti autoforanti;
- connessione del compensato all'orditura secondaria con viti a legno;
- collegamento della soletta di compensato con la muratura tramite l'uso di piatti avvitati a questa, e saldati a barre f 12 ad aderenza migliorata opportunamente sagomate. Esse vengono disposte lungo tutto il perimetro ogni 50 cm in fori f 22 praticati preventivamente nella muratura e poi sigillati con malta fluida.
- getto dello strato di allettamento;
- posa in opera delle pianelle costituenti il pavimento originario.

2.2.3.1 - Materiali

- **Trave** T_3 :in Abete rosso II categoria

Materiale : Abete Rosso II Categoria	
E(N/mm ²)	11500
σ_m (flessione) (N/mm ²)	9
σ_m (compressione) (N/mm ²)	8
σ_m (trazione) (N/mm ²)	9
τ_m (taglio) (N/mm ²)	0.9

- **Profilo saldato composto:** Nel rispetto dei requisiti di resistenza e deformabilità, per la verifica della trave in flessa il materiale prescelto per la realizzazione, è un acciaio Fe360B, le cui caratteristiche fanno riferimento alla *CNR 10011 – giugno 1988-“Costruzioni in acciaio Istruzioni per il calcolo, l'esecuzione, il collaudo e la manutenzione”*. Il Metodo di verifica adottato è quello alle *Tensioni Ammissibili*; quindi nota la tensione normale ammissibile è

possibile ricavare la tensione tangenziale ammissibile come : $t_{adm} = \frac{s_{adm}}{\sqrt{3}} = 92.38 \text{ N/mm}^2$

Materiale : FE360B	
E(N/mm ²)	210000
γ (KN/mm ³)	78.5
σ_m (flessione) (N/mm ²)	160
τ_m (taglio) (N/mm ²)	92.38

- **Spinotti:** Le caratteristiche di resistenza e di deformabilità sono riferite ai dati riportati sul manuale Esac Zanichelli. La trattazione valuta lo spinotto come perno di acciaio inserito a forza in un foro, il cui diametro non è superiore a quello dello spinotto stesso; il diametro minimo è $d_n = 8\text{mm}$. Generalmente gli spinotti non hanno ne filettatura ne dadi, tranne quando devono avere anche funzione di contenimento laterale degli elementi collegati. Inoltre è necessario rispettare :

- tutte le distanze minime degli spinotti fra loro e dai bordi esterni degli elementi da collegare:

Distanza tra i gli spinotti lungo un allineamento	Parallelamente alla fibratura	$6 d_n$
Distanza tra i chiodi tra allineamenti adiacenti	Ortogonalmente alla fibratura	$3.5 d_n$
Distanza del chiodo dal bordo dell'elemento verso cui agisce la spinta del chiodo	Parallelamente alla fibratura	$8 d_n$
	Ortogonalmente alla fibratura	$5 d_n$

- le distanze massime degli spinotti fra loro pari a $40 d_n$;
- Il carico nominale ammissibile per spinotto è in N (infisso ortogonalmente alla fibratura) è pari a :

$$F_s = 44d_n^{1.7} \quad \text{con espresso } d_n \text{ (diametro dello spinotto) in mm}$$

- Se il numero degli spinotti è maggiore di 20 nella direzione dello sforzo questo va ridotto del 20%;
- Il modulo di scorrimento

$$K_s = 60d_n^{1.7} \text{ in N/mm} \quad \text{con } d_n \text{ espresso in mm}$$

- Lo spessore minimo del legno deve essere : $4.5 d_n \geq 24\text{mm}$ per spinotti a semplice sezione resistente con direzione dello sforzo parallela alla fibratura; in generale (questa condizione è valida per legno massiccio e per legno lamellare, non avendo però nessun riferimento per il compensato a favore di sicurezza si adatterà la stessa limitazione);
- La profondità di penetrazione per chiodi lavoranti a taglio a semplice sezione resistente è pari a $S \geq 8d_n$ per chiodi ad aderenza migliorata altrimenti se si effettua una riduzione di questa va proporzionalmente ridotto anche F_s .

2.2.3.2 – Progetto dell'orditura principale – trave in abete –profilo saldato composto – compensato strutturale

Analisi dei carichi sulla T_3 :

Per l'analisi dei carichi permanenti vale l'analisi fatta in precedenza per l'intervento con il listello:

$$A_1 = A_3 = 1250\text{mm}^2 \quad A_2 = 850\text{mm}^2 \quad A_{\text{tot}} = 3350\text{mm}^2 = 3.35 \cdot 10^{-3} \text{m}^2$$

$$y_g = \frac{A_1 \cdot \left(\frac{t_1}{2} + b_2 + t_3\right) + A_2 \cdot \left(\frac{b_2}{2} + t_3\right) + A_3 \cdot \left(\frac{t_3}{2}\right)}{A_{\text{tot}}} = 52.5\text{mm}$$

$$J_x = \frac{b_1 \cdot t_1^3}{12} + A_1 \cdot \left(\frac{t_1}{2} + b_2 + t_3 - y_g\right)^2 + \frac{b_2 \cdot t_2^3}{12} + A_2 \cdot \left(\frac{b_2}{2} + t_3 - y_g\right)^2 + \frac{b_3 \cdot t_3^3}{12} + A_3 \cdot \left(y_g - \frac{t_3}{2}\right)^2$$

$$J_x = 6173229 \text{ mm}^4$$

$$\text{Peso proprio trave} = g \cdot A_{\text{sezione}} = 6 \text{ KN/m}^3 \cdot 0.0496\text{m}^2 = 0.30 \text{ KN/m}$$

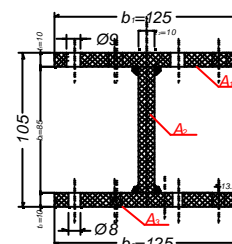
$$\text{Peso saldata -composta} = g \cdot A_{\text{sezione}} = 78.5 \text{ KN/m}^3 \cdot (3.35 \cdot 10^{-3})\text{m}^2 = 0.26 \text{ KN/m}$$

$$L_{\text{trave}} = 5.54\text{m} \quad L_{\text{influenza}} = 1.88\text{m}$$

$$q_p = 0.94 \cdot 1.88 + 0.30 + 0.26 = 2.32 \text{ KN/m}$$

$$q_v = 3.5 \cdot 1.88 = 6.58 \text{ KN/m}$$

$$q = q_p + q_v = 8.9 \text{ KN/m}$$





$$T_{\max} = \frac{q \cdot l}{2} = (8.9 \cdot 5.54) / 2 = 24.65 \text{ KN} = 24.65 \cdot 10^3 \text{ N}$$

$$M_{\max} = \frac{q \cdot l^2}{8} = (8.7 \cdot 5.54^2) / 8 = 33.1 \text{ KNm} = 34.14 \cdot 10^6 \text{ Nmm}$$

Coefficiente viscosità del legno

$$\phi_l = 1 + \phi = 1 + 0.5 = 1.5$$

$$\phi_{l,\text{calc}} = \frac{(1 + 0.5) \times (2.32 + 0.33 \cdot 6.58) + 0.67 \times 6.58}{8.90} = 1.25$$

Coefficiente viscosità del compensato

$$\phi_c = 1 + \phi = 1 + 0.8 = 1.8$$

$$\phi_{c,\text{calc}} = \frac{(1 + 0.8) \times (2.32 + 0.33 \cdot 6.58) + 0.67 \times 6.58}{8.9} = 1.40$$

Nella seguente trattazione denomineremo come :

- Elemento 1 la sezione in compensato $b = 1108 \text{ mm}$ $h = 48 \text{ mm}$;
- Elemento 2 la sezione saldata composta $b = 125 \text{ mm}$ $h = 105 \text{ mm}$;
- Elemento 3 la sezione della trave T_3 . $b = 200 \text{ mm}$ $h = 250 \text{ mm}$;

Si utilizzano per le due connessioni tipologie di viti differenti:

- Connessione 1

- tra l'elemento 1 e l'elemento 2: si usano viti autoforanti a $d_n = 6.3 \text{ mm}$ su 2 file a passo 104 mm (inteso lungo un allineamento $12 d_n < 104 \text{ mm} < 40 d_n$);
- la lunghezza delle viti $L = 60 \text{ mm}$ ottenuta considerando una lunghezza di infissione $S = 8 d_n = 50.4 \text{ mm} \Rightarrow 60 \text{ mm}$, questa lunghezza è tale da forare anche la piattabanda superiore in ferro,

- Connessione 3

- tra l'elemento 2 e l'elemento 3: tra l'elemento 2 e l'elemento 3: si usano spinotti $d_n = 8 \text{ mm}$ su 4 file a passo 52 mm (inteso lungo un allineamento $6 d_n < 56 \text{ mm} < 40 d_n$);
- la lunghezza degli spinotti $L = 230 \text{ mm}$ ottenuta considerando una lunghezza di infissione $S = 8 d_n = 64 \text{ mm} \Rightarrow L = 64 + 48 + 105 + 10 = 227 \text{ mm}$

- Lo spessore minimo del legno deve essere : $6 d_n \geq 24 \text{ mm} \Rightarrow 6.3 \cdot 6 = 37.8 \text{ mm}$, per la connessione 1 lo spessore dei due pannelli di compensato incollato in opera è pari a 48 mm ,

- Il taglio ammissibile a tempo $t=0$ dalla connessione è pari a :

$$\text{- connessione 1 - } F_n = 50 d_n^{1.7} \cdot 0.8 = 913.98 \text{ N}$$

$$K_{t=0} = 2 \cdot 40 d_n^{1.7} = 1827.97 \text{ N/mm}$$

alla connessione si attribuisce il coefficiente di viscosità del compensato $\phi_{c,\text{calc}} = 1.404$, per il calcolo della rigidità a $t = \infty$

$$K_{t=\infty} = 2 \cdot 40 d_n^{1.7} / j_{l,\text{cal}} = 1827.97 / 1.404 = 1308.9 \text{ N/mm}$$

$$\text{- connessione 3 - } F_n = 44 d_n^{1.7} \cdot 0.8 = 1207.25 \text{ N}$$

$$K_{t=0} = 2 \cdot 60 d_n^{1.7} = 4115.61 \text{ N/mm}$$

alla connessione si attribuisce il coefficiente di viscosità del legno $\phi_{l,\text{calc}} = 1.25$, per il calcolo della rigidità a $t = \infty$

$$K_{t=\infty} = 2 \cdot 60 d_n^{1.7} / j_{l,\text{cal}} = 4115.61 / 1.25 = 3286.4 \text{ N/mm}$$

elemento	base b (mm)	altezza h (mm)	$A(\text{mm}^2)$	$J(\text{mm}^4)$	modulo di elasticità E $t=0$ (N/mm ²)	coefficiente di fluage materiali	modulo di elasticità E $t = \infty$ (N/mm ²)	spaziatura connettori (mm)	coefficiente di fluage connettori
1	1108	48	5318	10211328	4000	1,40	2849.64	52	1.404
2	125	105	3350	6173229	210000	1,25	210000	-	-
3	200	250	49550	254389000	11500	1,25	9183.08	13	1,25

Verifica a tempo zero

$$g_{1t=0} = \left(1 + p^2 E_{1t=0} A_1 s_1 / K_{1t=0} l^2\right)^{-1} = 0.34 \quad g_{2t=0} = 1;$$

$$g_{3t=0} = \left(1 + p^2 E_{3t=0} A_3 s_3 / K_{3t=0} l^2\right)^{-1} = 0.63$$

è indicato con y_g la distanza del baricentro della sezione saldata composta dal lembo inferiore $y_g = 52.5 \text{ mm}$

$$a_{2t=0} = \left(\frac{g_{1t=0} E_1 A_1 (h_1 / 2 + (h_2 - y_g)) - g_{3t=0} E_3 A_3 (y_g + h_3 / 2)}{\sum_{i=1}^3 g_i E_i A_i} \right) = 51.5^0 \text{ mm}$$

$$a_{1t=0} = \frac{h_1}{2} + h_2 - y_g + a_{2t=0} = 128 \text{ mm} \quad a_{3t=0} = \frac{h_3}{2} + y_g - a_{2t=0} = 126 \text{ mm}$$

La rigidezza della sezione si calcola come

$$(EI)_{efft=0} = \sum_{i=1}^3 (E_i I_i + g_i E_i A_i a_i^2) = 13.04 \cdot 10^{12} \text{ Nmm}^2$$

Verifica sul compensato : esso risulta presso - inflesso

$$s_{N1} = \frac{g_1 E_1 a_1 M}{(EI)_{efft=0}} = -0.45 \text{ (N/mm}^2) \quad s_{M1} = \frac{0.5 E_1 h_1 M}{(EI)_{efft=0}} = -0.25 \text{ N/mm}^2$$

$$\left| \frac{s_{N1}}{s_{c90adm}} + \frac{s_{M1}}{s_{m90adm}} \right| \leq 1 \Rightarrow \left| \frac{0.45}{6} + \frac{0.25}{5.37} \right| = 0.12 < 1 \text{ verificato}$$

Verifica sulla saldata - composta : esso risulta presso - inflessa

$$s_{N2} = \frac{g_2 E_2 a_2 M}{(EI)_{efft=0}} = -28.31 \text{ N/mm}^2 \quad s_{M2} = \frac{0.5 E_2 h_2 M}{(EI)_{efft=0}} = -28.86 \text{ N/mm}^2$$

$$s_{\max} = s_{N2} + s_{M2} = -57.18 \text{ N/mm}^2 \Rightarrow |s_{\max}| \leq s_{adm} = 160 \text{ N/mm}^2 \text{ verificato}$$

Verifica sulla trave : essa risulta tenso - inflessa

$$s_{N3} = \frac{g_3 E_3 a_3 M}{(EI)_{efft=0}} = +2.40 \text{ N/mm}^2 \quad s_{M3} = \frac{0.5 E_3 h_3 M}{(EI)_{efft=0}} = +3.76 \text{ N/mm}^2$$

$$s_{\max} = s_{N3} + s_{M3} = +6.16 \text{ N/mm}^2$$

$$\frac{s_{N3}}{s_{cc \text{ compressione}}} + \frac{s_{M3}}{s_{mflessione}} \leq 1 \Rightarrow \frac{2.40}{8} + \frac{3.76}{9} = 0.69 < 1 \text{ verificato}$$

Verifica delle connessioni

$$F_{1t=0} = \frac{g_{1t=0} E_1 A_1 a_1 s_1 V}{(EI)_{efft=0}} = \frac{0.34 \cdot 4000 \cdot 5318 \cdot 128 \cdot 52}{13.04 \cdot 10^{12}} \cdot 24.65 \cdot 10^3 = 908.5 \text{ N}$$

$$F_{1t=0} \leq F_{1adm} \Rightarrow 908.5 < 913.98 \text{ N verificato}$$

$$F_{3t=0} = \frac{g_{3t=0} E_3 A_3 a_3 s_3 V}{(EI)_{efft=0}} = \frac{0.63 \cdot 11500 \cdot 49550 \cdot 126 \cdot 13}{13.04 \cdot 10^{12}} \cdot 24.15 \cdot 10^3 = 1117.4 \text{ N}$$

$$F_{3t=0} \leq F_{3adm} \Rightarrow 1117.4 \text{ N} < 1207.25 \text{ N verificato}$$

Verifica di deformabilità :



$$f = \frac{5}{384} \frac{ql^4}{EJ_{eff=0}} = \frac{5}{384} \frac{8.90 \cdot 5540^4}{13.04 \cdot 10^{12}} = 8.37 \text{ mm} = \frac{l}{662} \leq \frac{l}{300} = 18.47 \text{ mm} \text{ verificato}$$

Verifica a tempo infinito

$$g_{1t=\infty} = \left(1 + p^2 E_{1t=\infty} A_1 s_1 / K_{1t=\infty} l^2\right)^{-1} = 0.34$$

$$g_{2t=\infty} = 1;$$

$$g_{3t=\infty} = \left(1 + p^2 E_{3t=\infty} A_3 s_3 / K_{3t=\infty} l^2\right)^{-1} = 0.63$$

$$a_{2t=\infty} = \left(\frac{g_{1t=\infty} E_1 A_1 (h_1/2 + (h_2 - y_g)) - g_{3t=\infty} E_3 A_3 (y_G + h_3/2)}{\sum_{i=1}^3 g_i E_i A_i} \right) = 45.27 \text{ mm}$$

$$a_{1t=\infty} = \frac{h_1}{2} + h_2 - y_G + a_{2t=\infty} = 121.77 \text{ mm}$$

$$a_{3t=\infty} = \frac{h_3}{2} + y_G - a_{2t=\infty} = 132.23 \text{ mm}$$

La rigidezza della sezione si calcola come

$$(EI)_{eff=\infty} = \sum_{i=1}^3 (E_i I_i + g_i E_i A_i a_i^2) = 10.90 \cdot 10^{12} \text{ Nmm}^2$$

Verifica sul compensato : esso risulta presso - inflesso

$$s_{N1} = \frac{g_1 E_1 a_1 M}{(EI)_{eff=\infty}} = -0.37 \text{ N/mm}^2 \quad s_{M1} = \frac{0.5 E_1 h_1 M}{(EI)_{eff=\infty}} = -0.21 \text{ N/mm}^2$$

$$\left| \frac{s_{N1}}{s_{c90adm}} + \frac{s_{M1}}{s_{m90adm}} \right| \leq 1 \Rightarrow \left| \frac{0.37}{6} + \frac{0.21}{5.37} \right| = 0.1 < 1 \text{ verificato}$$

Verifica sulla saldata - composta : esso risulta presso - inflessa

$$s_{N2} = \frac{g_2 E_2 a_2 M}{(EI)_{eff=\infty}} = -29.76 \text{ N/mm}^2 \quad s_{M2} = \frac{0.5 E_2 h_2 M}{(EI)_{eff=\infty}} = -34.52 \text{ N/mm}^2$$

$$s_{\max} = s_{N2} + s_{M2} = -64.28 \text{ N/mm}^2 \Rightarrow |s_{\max}| \leq s_{adm} = 160 \text{ N/mm}^2 \text{ verificato}$$

Verifica sulla trave : essa risulta tenso - inflessa

$$s_{N3} = \frac{g_3 E_3 a_3 M}{(EI)_{eff=\infty}} = +2.41 \text{ N/mm}^2 \quad s_{M3} = \frac{0.5 E_3 h_3 M}{(EI)_{eff=\infty}} = +3.59 \text{ N/mm}^2$$

$$s_{\max} = s_{N3} + s_{M3} = +6.0 \text{ N/mm}^2$$

$$\frac{s_{N3}}{s_{cc \text{ compressione}}} + \frac{s_{M3}}{s_{mflessione}} \leq 1 \Rightarrow \frac{2.41}{8} + \frac{3.59}{9} = 0.67 < 1 \text{ verificato}$$

Verifica delle connessioni

$$F_{1t=\infty} = \frac{g_{1t=\infty} E_1 A_1 a_1 s_1}{(EI)_{eff t=\infty}} V = \frac{0.34 \cdot 2849 \cdot 64 \cdot 5318 \cdot 121.77 \cdot 52}{10.90 \cdot 10^{12}} 24.65 \cdot 10^3 = 736.31 \text{ N}$$

$$F_{1t=\infty} \leq F_{ladm} = 736.31 \text{ N} < 913.98 \text{ N} \text{ verificato}$$

$$F_{3t=\infty} = \frac{g_{3t=\infty} E_3 A_3 a_3 s_3}{(EI)_{eff t=\infty}} V = \frac{0.64 \cdot 9183.08 \cdot 49550 \cdot 132.23 \cdot 13}{10.90 \cdot 10^{12}} 24.65 \cdot 10^3 = 1119.9 \text{ N}$$



$$F_{3l=\infty} \leq F_{3adm} \Rightarrow 1119.9N < 1207.25N \text{ verificato}$$

Verifica di deformabilità:

$$f = \frac{5}{384} \frac{ql^4}{EJ_{effl=\infty}} = \frac{5}{384} \frac{8.9 \cdot 5540^4}{10.90 \cdot 10^{12}} = 10.1 \text{ mm} = \frac{l}{554} \leq \frac{l}{300} = 18.47 \text{ mm verificato}$$



2.2.4- Consolidamento con soletta in calcestruzzo non collaborante e trave in abete esistente

L'intervento consiste nel disporre sopra il tavolato una soletta di in calcestruzzo armato con rete elettrosaldata, non connessa con le travi in legno. Il comportamento tra i due elementi è del tutto indipendente, e quindi gli sforzi vengono ripartiti proporzionalmente alle rigidità flessionali (vale cioè la trattazione teorica precedente che al limite pone l'assenza di connessione, i due elementi lavorano a flessione semplice).

Analisi dei carichi sulla T_3 :

La valutazione dei carichi in KN/m^2 è la medesima dei casi precedenti, vi è da aggiungere il peso della soletta di 4cm. Le caratteristiche della soletta posta in opera sono:

- $R_{ck} = 30 N / mm^2$,
- rete elettrosaldata $j = 6$ maglie 30x30
- $E_c = 5.700 \sqrt{R_{ck}} = 31220 N / mm^2$

Tipo di carico	Spessore (m)	Base (m)	Peso specifico (KN/m ³)	Interasse i (m)	Incidenza del Carico (KN/m ²)
Pavimento in cotto	0,02	-	-	-	0,40
Sottofondo	0,02	-	14	-	0,28
Con cls alleggerito	0,4	-	25	-	1,00
Tavolato	0,015	-	6	-	0,09
Coprifili orizzontali	0,01	0,19	6	0,46	0,03
Coprifili verticali	0,01	0,06	6	0,33	0,01
Travicelli 7x8	0,08	0,07	6	0,46	0,07
Totale Carichi Permanenti	-	-	-	-	1,88

$$\text{Peso proprio trave} = g \cdot A_{sezione} = 6 \text{ KN/m}^3 \cdot 0.0496 \text{ m}^2 = 0.30 \text{ KN/m}$$

$$L_{trave} = 5.54 \text{ m} \quad L_{influenza} = 1.88 \text{ m}$$

$$q_p = 1.88 \cdot 1.88 + 0.30 = 3.83 \text{ KN/m} \quad q_v = 3.5 \cdot 1.88 = 6.58 \text{ KN/m}$$

$$q = q_p + q_v = 10.41 \text{ KN/m}$$

$$T_{max} = \frac{q \cdot l}{2} = (10.41 \cdot 5.54) / 2 = 28.84 \text{ KN} = 28.84 \cdot 10^3 \text{ N}$$

$$M_{max} = \frac{q \cdot l^2}{8} = (10.41 \cdot 5.54^2) / 8 = 39.94 \text{ KNm} = 39.94 \cdot 10^6 \text{ Nmm}$$

Coefficiente di viscosità del legno

$$\phi_l = 1 + \phi_l = 1 + 0.5 = 1.5$$

$$\phi_{l,calc} = \frac{(1 + j_c) \times (q_p + 0.33q_v) + 0.67 \times q_v}{q_p + q_v}$$

$$\phi_{l,calc} = \frac{(1 + 0.5) \times (3.83 + 0.33 \cdot 6.58) + 0.67 \times 6.58}{10.41} = 1.29$$

Coefficiente di viscosità del calcestruzzo

$$\phi_c = 1 + \phi_l = 1 + 1.5 = 2.5$$

$$\phi_{c,calc} = \frac{(1 + j_c) \times (q_p + 0.33q_v) + 1 \times q_v}{q_p + q_v}$$

$$\phi_{c,calc} = \frac{(1 + 1.5) \times (3.83 + 0.33 \cdot 6.58) + 0.67 \times 6.58}{10.41} = 1.86$$

elemento	base b (mm)	altezza h (mm)	A(mm ²)	J(mm ⁴)	modulo di elasticità E t=0 (N/mm ²)	coefficiente di fluage materiali	modulo di elasticità E t=∞ (N/mm ²)
1	1108	40	44320	5909333	31220	1.86	16741.7
2	200	250	49550	254389000	11500	1.29	8926.7

Le rigidità del legno e del calcestruzzo a tempo infinito sono rappresentate da :

$$k_c = \frac{E_c \cdot J_c}{J_c} = \frac{31220 \cdot 5909333}{1.86} = 9.89 \cdot 10^{10} \text{ N/mm}^2$$

$$k_l = \frac{E_l \cdot J_l}{J_l} = \frac{11500 \cdot 254389000}{1.29} = 2.27 \cdot 10^{12} \text{ N/mm}^2$$

$$M_l = M \frac{E_{l=\infty} J_l}{E_{l=\infty} J_l + E_{c=\infty} J_c} = 39.94 \cdot 10^6 \frac{89267 \cdot 25.44 \cdot 10^7}{(89267 \cdot 25.43 \cdot 10^7 + 16741.7 \cdot 59.093 \cdot 10^5)}$$

$$M_l = M \frac{E_{l=\infty} J_l}{E_{l=\infty} J_l + E_{c=\infty} J_c} = 38.27 \text{ KNm} = 38.27 \cdot 10^6 \text{ Nmm}$$

$$M_c = M \frac{E_{c=t=\infty} J_c}{E_{l=\infty} J_l + E_{c=t=\infty} J_c} = 39.94 \cdot 10^6 \frac{16741.7 \cdot 59.093 \cdot 10^5}{(8926.7 \cdot 25.43 \cdot 10^7 + 16741.7 \cdot 59.093 \cdot 10^5)}$$

$$M_c = M \frac{E_c J_c}{E_l J_l + E_c J_c} = 1.67 \text{ KNm} = 1.67 \cdot 10^6 \text{ Nmm}$$

$$s_{ML} = \frac{M_l h_l}{J_l} = s_{ML} = \frac{38.27 \cdot 10^6}{25.44 \cdot 10^7} \frac{250}{2} = 18.80 \text{ N/mm}^2 > 9 \text{ N/mm}^2$$

La presenza di una soletta in calcestruzzo non connessa al legno esistente invece che ridurre le tensioni nella membratura allo stato attuale addirittura le raddoppia.

Verifica di deformabilità :

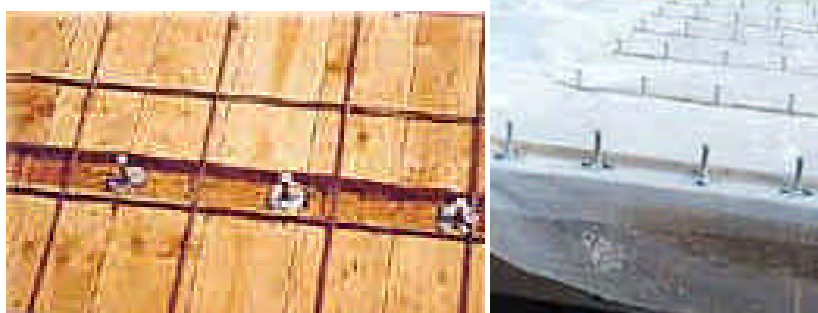
$$f = \frac{5}{384} \frac{ql^4}{E_{l=\infty} J_l} = \frac{5}{384} \frac{10.41 \cdot 5540^4}{8926.7 \cdot 25.44 \cdot 10^7} \cong 45 \text{ mm} = \frac{l}{123} \gg \frac{l}{300} = 18.47 \text{ mm}$$

2.2.5- Terzo intervento di consolidamento: trave in abete - soletta in calcestruzzo collaborante

La soluzione calcestruzzo armato - legno collaborante, considerata nell'ambito delle tecniche non invasive di riabilitazione strutturale è effettivamente un paradosso, se si pensa alle ipotesi fondamentali su cui si basa il restauro conservativo, dato che diminuisce in maniera sostanziale la **reversibilità** dell'intervento.

Le caratteristiche dell'elemento di connessione usato sono fondamentali: in questo esempio si farà riferimento al connettore "Tecnaria", uno dei più diffusi. L'interposizione dei connettori a piolo e ramponi tra le travi in legno e la soletta di calcestruzzo è necessaria per consentire ai due materiali di collaborare tra loro; il risultato sarà una struttura solidale dove, per effetto dei carichi verticali, il calcestruzzo risulterà prevalentemente compresso ed il legno prevalentemente teso. La struttura mista legno - calcestruzzo è più rigida e resistente di quella in solo legno, ne risulterà migliorato anche il comportamento dinamico (vibrazioni e isolamento acustico). La soletta di calcestruzzo rappresenta un ottimo accorgimento tecnico in edifici in muratura in zona sismica, in quanto consente di collegare fra di loro i muri portanti realizzando un piano rigido in grado di meglio ripartire le azioni sismiche orizzontali. L'efficacia del connettore è assicurata dalla robustezza piastra di base, come supporto del piolo, modellata a ramponi in modo tale da consentire la migliore aderenza al legno e di assorbire al meglio gli sforzi di taglio; le numerose prove di laboratorio hanno evidenziato l'assoluta efficacia di questo accorgimento. affinché non si verificino fenomeni di rifollamento, inevitabili nel caso in cui il rinforzo si affidato a semplici viti o chiodi.

I connettori a piolo e ramponi si caratterizzano per l'estrema semplicità di posa; non richiedono manodopera specializzata né particolari condizioni di cantiere. Spesso viene suggerito di interporre eventualmente un telo di materiale impermeabile trasparente sotto i connettori prima dell'esecuzione del getto esso previene la percolazione di boiaccia, l'assorbimento di acqua del getto dal parte del legno e la fastidiosa formazione di polvere ai piani sottostanti nel lungo periodo.



Esempi di connettore a piolo e ramponi.

Il connettore può essere fissato o a diretto contatto con la trave o sopra un eventuale tavolato. Nel caso di specie legnose dure sarà necessario eseguire un preforo (di 6 mm per connettori "BASE" con viti da 8 mm). Il preforo andrà sempre eseguito per i connettori "MAXI" con viti da 10 mm e dovrà essere di 8 mm di diametro. Andrà sempre disposta una rete elettrosaldata adeguatamente dimensionata. Di seguito sono descritte le due tipologie di posa adottate nella soluzione di consolidamento :

- 1) **Tavolato interrotto** per la direzione dell'orditura principale si prevede di tagliare il tavolato con una sega circolare per creare un corridoio continuo sopra la trave.
- 2) Posa in opera di **connettori sopra il tavolato** per lo studio dell'orditura secondaria. Questa soluzione è stata preferita alla precedente per intaccare il meno possibile il tavolato esistente, con intagli nelle due direzioni.

Le fasi di esecuzione

La successione delle fasi da eseguire per mettere in opera l'intervento di consolidamento del solaio è di seguito riportata:

- puntellamento del solaio;
- smantellamento del pavimento, rimozione dell'attuale riempimento e messa in luce dell'estradosso del tavolato;
- interruzione continua del tavolato e dei travetti per la messa in luce dell'estradosso delle travi;
- posa di fogli di tessuto impermeabile ma traspirante;
- posa in opera dei connettori maxi H=125 mm superiormente alle travi, questa operazione deve avvenire predisponendo una preforatura della trave in legno originaria (fori **f** 8, per la posa in opera delle viti **f** 10) i passi segnalati nella tavola tecnica n°15, detti elementi andranno disposti sfalsati sulla trave per non intaccare un'unica fibra longitudinale della trave ;
- posa in opera dei connettori base H=30 mm superiormente ai travetti, questa operazione deve avvenire predisponendo una preforatura della trave in legno originaria (fori **f** 6, per la posa in opera delle viti **f** 8);
- posa della rete elettrosaldata a maglie quadrate 30cmx30cm di diametro **f** 6;
- collegamento della soletta in calcestruzzo armato con la muratura tramite l'uso di ferri **f** 12, ad aderenza migliorata piegati a coda di rondine e immessi in fori **f** 22 praticati preventivamente lungo tutto il perimetro nella muratura, ogni 50 cm e poi sigillati con malta fluida
- getto dello strato di allettamento;
- posa in opera delle pianelle costituenti il pavimento originario.

Vantaggi e svantaggi della tecnica

Vantaggi	Svantaggi
<ul style="list-style-type: none"> - semplicità di realizzazione e messa in opera ; - economicità; - maggiore rigidità finale del solaio; - collegamento continuo, della soletta di compensato strutturale con le murature; 	<ul style="list-style-type: none"> - rapidità di esecuzione subordinata al tempo di maturazione del getto di calcestruzzo; - aumento del carico permanente; - non reversibilità dell'intervento.

4.2.5.1 – Progetto dell'orditura principale – trave in abete - soletta in calcestruzzo

L'analisi dei carichi è la medesima del caso precedente, lo stesso vale per l'entità delle sollecitazioni. Nella seguente trattazione denomineremo come:

- **Elemento 1** la sezione in compensato $b = 1108^{(1)}$ mm $h = 48$ mm;

⁽¹⁾ Soddisfa alla relazione $\min(\max(l/5; (10h+b_2)); \text{interasse } i)$

- **Elemento 2** la sezione della trave T_3 . $b = 200\text{mm}$ $h = 250\text{mm}$;
- **Connessione 1**
 - tra l'elemento 1 e l'elemento 2: si usa un **connettore tipo maxi** montato sulla trave avente una spaziatura variabile lungo l'asse della trave in funzione dell'andamento del taglio tra i valori estremi i_1, i_2 con $i_1 = 7\text{cm}$ per $1/4$ dagli appoggi e $i_2 = 2i_1 = 14\text{cm}$ nella zona in campata i può fare riferimento ad un interasse equivalente $i_{eq} = 0.75i_1 + 0.25i_2 = 8.75\text{cm}$ ai fini della trattazione (nell'ipotesi di travicello interrotto sulla trave);
 - la lunghezza delle viti $f = 10\text{mm}$ $L = 120\text{mm}$ ottenuta considerando una lunghezza di infissione $S = 8d_n = 80\text{mm} \Rightarrow 120\text{mm} > 80\text{mm}$,
 - Il **taglio ammissibile** a tempo $t=0$ dalla connessione è pari a

$$F_n = 8700\text{N} \quad K_{t=0} = 20800\text{ N/mm}$$

alla connessione si attribuisce il coefficiente di viscosità del legno $\phi_{\text{calc}} = 1.29$, per il calcolo della rigidità a $t = \infty$

$$K_{t=\infty} = K_{t=0} / j_{\text{cal}} = 20800 / 1.29 = 16124\text{ N/mm}$$

Verifica a tempo zero

Le verifiche sono state eseguite usando il software fornito dalla stessa ditta costruttrice del connettore. I risultati sono stati comunque ugualmente testati, in base alla teoria di Mohler, e risultano veritieri.

Verifica sulla soletta in calcestruzzo: essa risulta presso - inflessa

$$S_{\text{max}} = -4.41\text{ N/mm}^2 \Rightarrow |S_{\text{max}}| \leq S_{\text{adm}} = 8.78\text{ N/mm}^2 \text{ verificato}$$

$S_{\text{min}} = +4.86\text{ N/mm}^2 \Rightarrow$ per assorbire questa trazioni è necessario mettere in opera un area di ferri $> 1.09\text{ cm}^2$ per trave \Rightarrow si mettono $2j = 10$ per tutta la lunghezza della trave con l'ausilio di staffe reggi - ferro $j = 8\text{ mm}$ ogni 30 cm ;

Verifica sulla trave: essa risulta tenso - inflessa

$$\frac{S_{N3}}{S_{\text{cc compressione}}} + \frac{S_{M3}}{S_{\text{mflessione}}} \leq 1 \Rightarrow 0.62 < 1 \text{ verificato}$$

Verifica delle connessioni

$$F_{1t=0} = 8359\text{ N} \quad F_{1t=0} \leq F_{1adm} \Rightarrow 8359\text{ N} < 8700\text{ N} \text{ verificato}$$

Verifica di deformabilità:

$$f = \frac{5}{384} \frac{ql^4}{EJ_{\text{eff}t=0}} = 6.5\text{ mm} = \frac{l}{852} \leq \frac{l}{300} = 18.47\text{ mm} \text{ verificato}$$

Verifica a tempo infinito

Verifica sulla soletta in calcestruzzo: essa risulta presso - inflessa

$$S_{\text{max}} = -3.85\text{ N/mm}^2 \Rightarrow |S_{\text{max}}| \leq S_{\text{adm}} = 8.78\text{ N/mm}^2 \text{ verificato}$$

$S_{\text{min}} = +3.05\text{ N/mm}^2 \Rightarrow$ per assorbire questa trazioni è necessario mettere in opera un area di ferri $> 1.09\text{ cm}^2$ per trave \Rightarrow si mettono $2j = 10$ per tutta la lunghezza della trave con l'ausilio di staffe reggi - ferro $j = 8\text{ mm}$ ogni 30 cm ;

Verifica sulla trave: essa risulta tenso - in flessa

$$S_{\text{max}} = S_{N3} + S_{M3} = +5.83\text{ N/mm}^2$$

$$\frac{S_{N3}}{S_{\text{cc compressione}}} + \frac{S_{M3}}{S_{\text{mflessione}}} \leq 1 \Rightarrow 0.66 < 1 \text{ verificato}$$

Verifica delle connessioni

$$F_{1t=\infty} = 8578\text{ N} \quad F_{1t=\infty} \leq F_{1adm} \Rightarrow 8578\text{ N} < 8700\text{ N} \text{ verificato}$$

Verifica di deformabilità:

$$f = \frac{5}{384} \frac{q l^4}{E J_{eff=0}} = 9.3 \text{ mm} = \frac{l}{596} \leq \frac{l}{300} = 18.47 \text{ mm} \text{ verificato}$$

4.2.5.2 –Progetto dell’orditura secondaria- travetto in abete – soletta in calcestruzzo

La valutazione dei carichi in KN/m^2 è la medesima dei casi precedenti vi è da aggiungere il peso della soletta di 4cm.

Analisi dei carichi sul travetto

Tipo di carico	Spessore Base (m)	Peso specifico (KN/m ³)	Interassei (m)	Incidenza del Carico (KN/m ²)
Pavimento in cotto	0,02	-	-	0,40
Sottofondo	0.02	-	14	0.28
Con cls alleggerito				
Soletta in cls	0.4	-	25	1
Tavolato	0,015	-	6	0,09
Coprifili orizzontali	0,01	0,19	6	0,46
Coprifili verticali	0,01	0,06	6	0,33
Totale Carichi Permanenti	-	-	-	1.81

$$\text{Peso proprio travetto} = g \cdot A_{sezione} = 6 \text{ KN/m}^3 \cdot 0.056 \text{ m}^2 = 0.034 \text{ KN/m}$$

$$L_{travetto} = 1.88 \text{ m} \quad L_{influenza} = 0.46 \text{ m}$$

$$q_p = 1.81 \cdot 0.46 + 0.034 = 0.87 \text{ KN/m} \quad q_v = 3.5 \cdot 0.46 = 1.61 \text{ KN/m}$$

$$q = q_p + q_v = 2.48 \text{ KN/m}$$

$$T_{max} = \frac{q \cdot l}{2} = (2.48 \cdot 1.88) / 2 = 2.33 \text{ KN} = 2300 \text{ N}$$

$$M_{max} = \frac{q \cdot l^2}{8} = (2.48 \cdot 1.88^2) / 8 = 1.10 \text{ KNm} = 1.1 \cdot 10^6 \text{ Nmm}$$

Coefficiente di viscosità del legno

$$\phi_l = 1 + \phi = 1 + 0.5 = 1.5$$

$$\phi_{l,calc} = \frac{(1 + 0.5) \times (0.87 + 0.33 \cdot 1.61) + 0.67 \times 1.61}{2.48} = 1.28$$

Coefficiente di viscosità del calcestruzzo

$$\phi_c = 1 + \phi_l = 1 + 0.8 = 1.8$$

$$\phi_{c,calc} = \frac{(1 + j_c) \times (q_p + 0.33 q_v) + 0.67 \times q_v}{q_p + q_v}$$

$$\phi_{c,calc} = \frac{(1 + 0.8) \times (0.87 + 0.33 \cdot 1.61) + 0.67 \times 1.61}{2.48} = 1.85$$

- **Elemento 1** la sezione in compensato $b = 400 \text{ mm}$ $h = 40 \text{ mm}$;

- **Elemento 2** la sezione della travetto. $b = 70 \text{ mm}$ $h = 80 \text{ mm}$;

- **Connessione 1**

➤ tra l'elemento 1 e l'elemento 2: si usa un **connettore tipo base** montato sulla trave avente una spaziatura costante lungo l'asse del travetto $i_1 = 27 \text{ cm}$ (nell'ipotesi di posa in opera direttamente sul tavolato);

➤ la lunghezza delle viti $f = 8 \text{ mm}$ $L = 100 \text{ mm}$ ottenuta considerando una lunghezza di infissione $S = 8 d_n = 64 \text{ mm}$
 $\Rightarrow 100 \text{ mm} > 80 \text{ mm}$,

➤ Il **taglio ammissibile** a tempo $t=0$ dalla connessione è pari a

$$F_n = 4700 \text{ N} \quad K_{t=0} = 2708 \text{ N/mm}$$

alla connessione si attribuisce il coefficiente di viscosità del legno $\phi_{l,calc} = 1.28$, per il calcolo della rigidità a $t = \infty$

$$K_{t=\infty} = K_{t=0} / j_{l,calc} = 2708 / 1.28 = 2116 \text{ N/mm}$$



Verifica a tempo zero

Le verifiche sono state eseguite usando il software fornito dalla stessa ditta costruttrice del connettore. I risultati sono stati comunque ugualmente testati, in base alla teoria di Mohler, e risultano veritieri.

Verifica sulla soletta in calcestruzzo: essa risulta presso – inflessa

$$S_{\max} = -6.69 \text{ N/mm}^2 \Rightarrow |s_{\max}| \leq s_{\text{adm}} = 8.78 \text{ N/mm}^2 \text{ verificato}$$

$$S_{\min} = -6.31 \text{ N/mm}^2$$

Verifica sul travetto: essa risulta tenso- inflessa

$$\frac{S_{N3}}{S_{\text{compressione}}} + \frac{S_{M3}}{S_{\text{mflessione}}} \leq 1 \Rightarrow 0.59 < 1 \text{ verificato}$$

Verifica delle connessioni

$$F_{1t=0} = 1717 \text{ N}$$

$$F_{1t=0} \leq F_{1\text{adm}} \Rightarrow 1717 \text{ N} < 4700 \text{ N} \text{ verificato}$$

Verifica di deformabilità:

$$f = \frac{5}{384} \frac{ql^4}{EJ_{\text{eff} \neq 0}} = 3.8 \text{ mm} = \frac{l}{311} \leq \frac{l}{300} = 6.27 \text{ mm} \text{ verificato}$$

Verifica a tempo infinito

Verifica sulla soletta in calcestruzzo: essa risulta presso –inflessa

$$S_{\max} = -5.2 \text{ N/mm}^2 \Rightarrow |s_{\max}| \leq s_{\text{adm}} = 8.78 \text{ N/mm}^2 \text{ verificato}$$

$$S_{\min} = -4.72 \text{ N/mm}^2$$

Verifica sul travetto: essa risulta tenso- inflessa

$$\frac{S_{N3}}{S_{\text{compressione}}} + \frac{S_{M3}}{S_{\text{mflessione}}} \leq 1 \Rightarrow 0.75 < 1 \text{ verificato}$$

Verifica delle connessioni

$$F_{1t=\infty} = 2173 \text{ N}$$

$$F_{1t=\infty} \leq F_{1\text{adm}} \Rightarrow 2173 \text{ N} < 4700 \text{ N} \text{ verificato}$$

Verifica di deformabilità:

$$f = \frac{5}{384} \frac{ql^4}{EJ_{\text{eff} \neq 0}} = 7.3 \text{ mm} = \frac{l}{258} > \frac{l}{300} = 6.27 \text{ mm} \text{ non verificato}$$

La soluzione di soletta connessa al travetto nella direzione dell'orditura secondaria **non soddisfa** la verifica a deformabilità a tempo infinito.

2.2.6 - Confronto tra le tecniche di consolidamento proposte

Si riassumono nella seguente tabella i risultati dei calcoli di progetto ed il costo stimato dei metodi di consolidamento illustrati.

Confronto dei metodi (per la trave) a t infinito	σ_{legno} $\sigma_{\text{adm, legno}}$ 9N/mm ²	$\sigma_{\text{legno}} / \sigma_{\text{adm}}$	freccia(mm) a t inf	f/fadm 1/300L	Carichi Permanenti (KN/m)	Costo intervento (€/mq)
Stato attuale	17,25	1,92	40,00	138,5	2,5	/
Soletta non collaborante	18,80	2,09	45,00	123,1	3,8	180
Soletta collaborante	5,83	0,65	8,50	651,5	3,8	200
Listello di legno + Compensato	7,66	0,85	16,08	344,5	2,1	440
Profilo Saldato	6,0	0,67	10,01	53,5	2,32	525
Composto +Compensato						



Alla luce di tali risultati si possono trarre le seguenti conclusioni:

- 1) Il solaio nello stato attuale non verifica né la resistenza né la deformabilità;
- 2) La posa in opera di una **soletta in calcestruzzo non collaborante** con le travi di legno è un inutile aumento di peso poiché provoca un aumento nella tensione del legno pari al doppio, e della freccia di inflessione;
- 3) L'intervento eseguito con il getto della **soletta in calcestruzzo colalborante** (connessa alle travi) porta ad una notevole diminuzione della freccia anche se si ha un elevato aumento dei carichi permanenti che risulta particolarmente penalizzante per l'ubicazione di detti solai posti in zona sismica, inoltre nel caso esaminato la deformabilità dell'orditura secondaria risulta superiore a quella ammissibile. Il costo è però contenuto e ciò spiega la buona diffusione di tale tecnologia di intervento;
- 4) La realizzazione della soluzione "tutta legno" cioè **del listello più il compensato strutturale**, comporta una notevole diminuzione dei carichi permanenti, ed è tra gli interventi più "deformabili" pur soddisfacendo i limiti di normativa; inoltre nel contesto analizzato questo è certamente il migliore intervento in termini di "restauro conservativo";
- 5) L'intervento eseguito con la posa in opera **del profilo saldato composto** produce il massimo irrigidimento del solaio con un valore del carico permanente comunque inferiore rispetto a quello dello stato attuale. Questo intervento è peraltro il più oneroso.

Le 3 tecniche possono quindi essere comparate tra loro con riferimento ai 4 **criteri di valutazione** definiti all'inizio del progetto. I risultati sono riassunti nella tabella seguente:

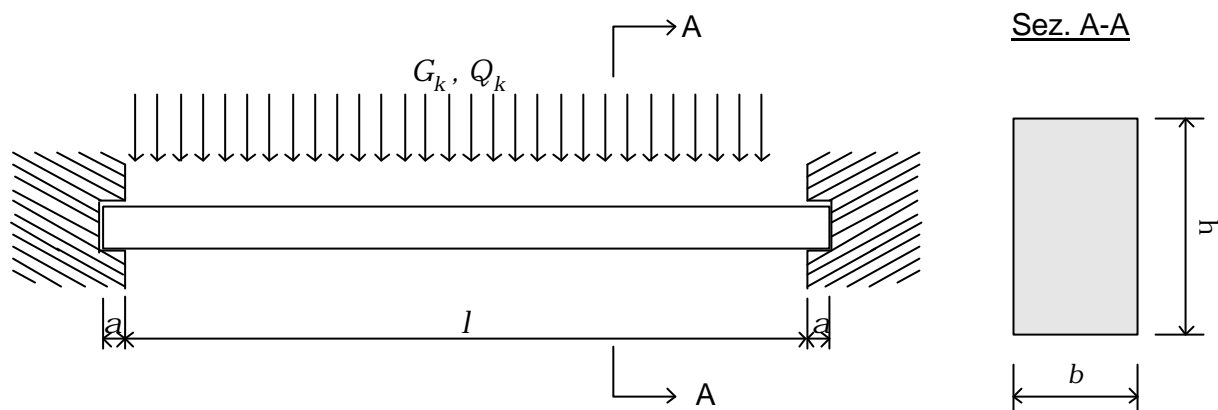
Technica	Soletta collaborante in cls	Listello + 2 compensati	Profilo saldato composto
Criterio			
Modalità di analisi strutturale	Teoria di Moehler, Eurocodice 5		
Requisiti dei materiali	Tutti disponibili nelle schede tecniche dei prodotti		
Facilità e costo dell'intervento	Facile, veloce ed economico.	Facile ma richiede più mano d'opera del precedente.	Più impegnativo e costoso dei precedenti.
Qualità della conservazione	Minima	Massima	Intermedia

2.3 ANALISI DELLA FATTIBILITÀ - CONSOLIDAMENTO DI TESTATE

L'esempio illustra tre diverse tecniche di intervento per un altro problema assai comune nelle strutture lignee antiche, il consolidamento di testate di travi degradate da funghi. Le tre tecniche più diffuse sono:

- A. collegamento di una protesi al legno esistente mediante barre incollate;
- B. ricostruzione del tipo "legno lamellare in opera" (con colla ma senza barre);
- C. uso di profili in acciaio per supportare la trave dall'estradosso (senza uso di colla).

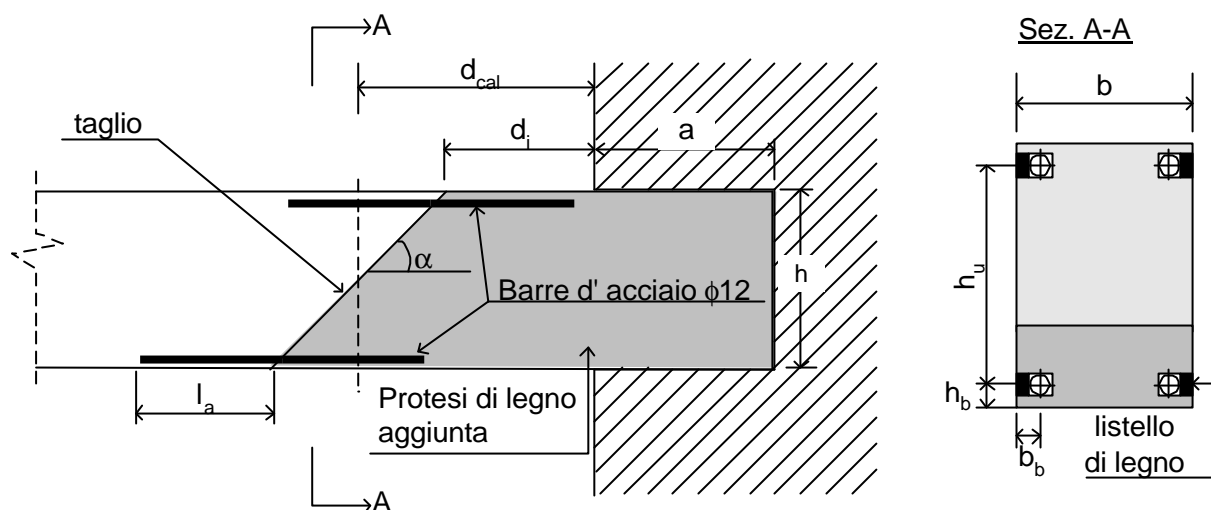
Anche in questo caso, le 3 tecniche sono comparate tra loro sulla base degli stessi parametri geometrici e degli stessi carichi di progetto, in termini di 4 criteri: modalità di analisi strutturale, requisiti dei materiali, facilità e costo dell'intervento, qualità della conservazione.



Geometria	
Interasse appoggi	$l = 6300 \text{ mm}$
Lunghezza di appoggio	$a = 250 \text{ mm}$
Larghezza trave	$b = 160 \text{ mm}$
Altezza trave	$h = 240 \text{ mm}$
Distanza tra le travi	$i = 750 \text{ mm}$
Lunghezza parte degradata, dal filo muro	$d_i = 100 \text{ mm}$

Carichi	
Permanenti	$G_k = 2,12 \text{ kN/m}^2$
Variabili	$Q_k = 3,00 \text{ kN/m}^2$
Coefficiente parziale di sicurezza per carichi permanenti	$g_G = 1,35$
Coefficiente parziale di sicurezza per carichi variabili	$g_Q = 1,5$

2.3.1 Tecnica a): barre incollate



La porzione di testata degradata viene sostituita con una protesi di legno stagionato che è collegata alla parte sana della trave per mezzo di 4 barre in acciaio incollate con resina epossidica bicomponente. Le barre sono alloggiare in scassi rettangolari che vengono richiusi mediante un listello di legno.

La messa in opera dell'intervento consiste delle seguenti fasi:

- 1 puntellare la trave e aprire una breccia nella muratura;
- 2 tagliare la trave a 45° e rimuovere la parte degradata;
- 3 preparare una protesi di legno con classe di resistenza e durabilità eguali o migliori rispetto a quelle del legno costituente la trave originale. L'umidità del legno con cui si realizza la protesi deve corrispondere all'incirca a quella attesa nelle condizioni di servizio previste (al momento della posa può superarla di un 5-6% al massimo);
- 4 preparare gli scassi di alloggiamento delle barre ed i listelli, avendo cura che le superfici siano esenti da bruciature, polveri, fibre strappate;
- 5 riempire gli scassi con adesivo tissotropico, avendo cura che non ci siano zone prive di adesivo o bolle d'aria. Inserire le barre nell'adesivo chiudendo infine lo scasso con i listelli e rimuovendo l'eccesso di colla dalle superfici esposte;
- 6 trascorso il periodo di reticolazione dell'adesivo ricostruire la muratura, togliere i puntelli e portare alla finitura desiderata le superfici della trave.

Legname di categoria C16 secondo EN 338	
Resistenza a trazione	$f_{t,0,k} = 10 \text{ MPa}$
Densità	$r_k = 310 \text{ kg/m}^3$
Coefficiente parziale di sicurezza sul materiale, secondo EC5	$g_{m,t} = 1,3$
Fattore modificativo (classe di servizio 1), sec. EC5	$k_{mod} = 0,8$
Barre Fe B 44k secondo DM LL.PP. 9/1/96	
Numero barre	$n = 4$
Diametro barre	$d_{nom} = 12 \text{ mm}$
Lunghezza di incollaggio (=max [0,4 d ² ; 8 d])	$l_a = 200 \text{ mm}$
Distanza tra il centro della barra e il lato della trave ($\geq 2,5 d$)	$b_b = 35 \text{ mm}$
Distanza tra il centro della barra e il bordo inferiore della trave ($\geq 2,5 d$)	$h_b = 35 \text{ mm}$
Snervamento	$f_g = 430 \text{ MPa}$
Coefficiente parziale di sicurezza sul materiale	$g_{m,s} = 1,15$
Adesivo	
Densità	1600 kg/m^3
Resistenza a compressione	45 MPa
Resistenza a taglio	10 Mpa (dopo giorni a +23°C)
Resistenza a trazione	18 MPa
Modulo di elasticità	3000 Mpa

Calcolo delle azioni interne

1) Carico uniformemente distribuito allo stato limite ultimo

$$q_d = (g_G G_k + g_Q Q_k) \times i = (1,35 \times 2,12 + 1,5 \times 3,00) \times 0,75 = 5,52 \text{ kN/m}$$

2) Reazione ai supporti

$$T = \frac{q_d l}{2} = \frac{5,52 \times 6,30}{2} = 17,4 \text{ kN}$$

3) Distanza tra i centri delle barre (braccio della leva)

$$h_u = h - 2h_b = 240 - (2 \times 35) = 170 \text{ mm}$$

4) Lunghezza di taglio (proiezione orizzontale)

$$l_i = \frac{h}{\tan(\alpha)} = \frac{240}{\tan(45^\circ)} = 240 \text{ mm}$$

5) Distanza tra il punto intermedio della linea del taglio a 45° ed il filo muro

$$d_{cal} = d_i - \frac{l_i}{2} = 100 + \frac{240}{2} = 220 \text{ mm}$$

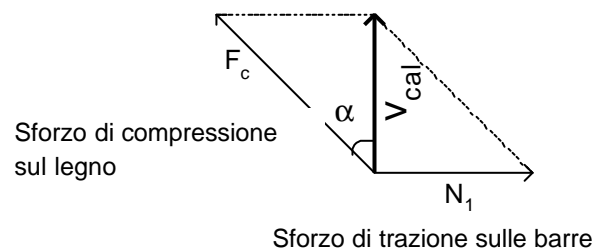
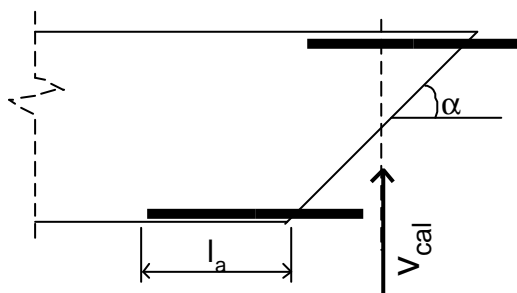
6) Sforzo di taglio nel punto medio della linea del taglio a 45°

$$V_{cal} = T - q_d d_{cal} = 17,4 - 5,52 \times 0,22 = 16,2 \text{ kN}$$

7) Momento flettente nel punto medio della linea del taglio a 45°

$$M_{cal} = T(d_{cal} + a/3) - \frac{q_d d_{cal}^2}{2} = 17,4 \times (0,22 + 0,25/3) - \frac{5,52 \times 0,22^2}{2} = 5,14 \text{ kNm}$$

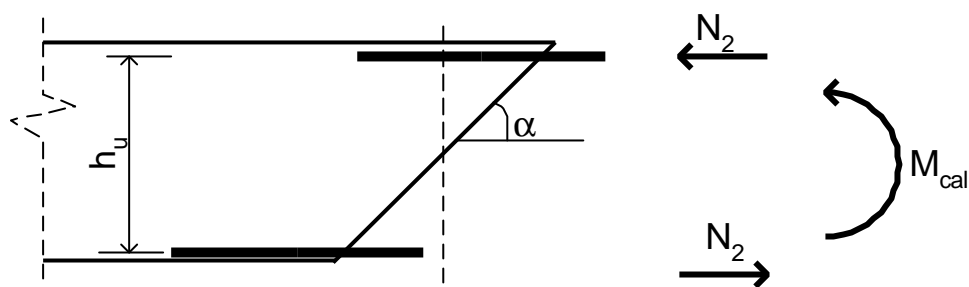
8) Effetto delle forze di taglio: trazione sulle barre e compressione nel legno



$$N_1 = V_{cal} \tan(\alpha) = 16,2 \times \tan(45^\circ) = 16,2 \text{ kN}$$

$$F_c = \frac{V_{cal}}{\cos(\alpha)} = \frac{16,2}{\cos(45^\circ)} = 22,9 \text{ kN}$$

9) Effetto del momento flettente: trazione sulle barre inferiori e compressione su quelle superiori



$$N_2 = \frac{M_{cal}}{h_u} = \frac{5,14}{0,17} = 30,3 \text{ kN}$$

10) Forza di trazione su ciascuna barra inferiore

$$N_d = \frac{N_1}{4} + \frac{N_2}{2} = \frac{16,2}{4} + \frac{30,3}{2} = 19,2 \text{ kN}$$

Resistenza all'estrazione delle barre

1) Diametro equivalente

$$d_{eq} = \min [d_{hole}; 1,25d] = 16 \text{ mm}$$

Note:

- Per le barre ad aderenza migliorata, il diametro esterno d è circa il 10% superiore rispetto al diametro nominale $d = 1,1 d_{nom}$;
- lo scasso deve lasciare circa 2 mm di colla sulla barra, quindi dev'essere alto circa $(d + 4)$ mm. La profondità dello scasso è invece dettata dalla distanza tra il centro della barra e il bordo inferiore della trave ($\geq 2,5d$)

2) Resistenza a taglio del legno all'interfaccia legno-colla

$$f_{vk} = \frac{1,2 r_k^{1,5}}{10^3 \times d_{equ}^{0,2}} = \frac{1,2 \times 310^{1,5}}{10^3 \times 16^{0,2}} = 3,76 \text{ MPa}$$

3) Resistenza all'estrazione delle barre

$$F_{ax, Rd,1} = \frac{k_{mod} \times p \times d_{equ} \times l_a \times f_{v,k}}{g_{m,t}} = \frac{0,8 \times p \times 16 \times 200 \times 3,76}{1,3} = 23,26 \text{ kN}$$

4) "Area di influenza" per ogni barra

$$A_{ef} = (3d + b_b) \times (3d + h_b) = (3 \times 13,2 + 35) \times (3 \times 13,2 + 35) = 5565,2 \text{ mm}^2$$

(Nota: se $b_b \geq 3d$ e $h_b \geq 3d$ usare $A_{ef} = 6d \times 6d$)

5) Resistenza all'estrazione del cilindro di legno

$$F_{ax, Rd,2} = \frac{k_{mod} \times f_{t,0,k} \times A_{ef}}{g_{m,t}} = \frac{0,8 \times 10 \times 5565,2}{1,3} = 34250 \text{ N} = 34,25 \text{ kN}$$

6) Resistenza allo snervamento delle barre



$$F_{ax, Rd,3} = \frac{f_y (pd^2/4)}{g_{m,s}} = 300 \times (p \times 12^2 / 4) = 33929 \text{ N} = 33,93 \text{ kN}$$

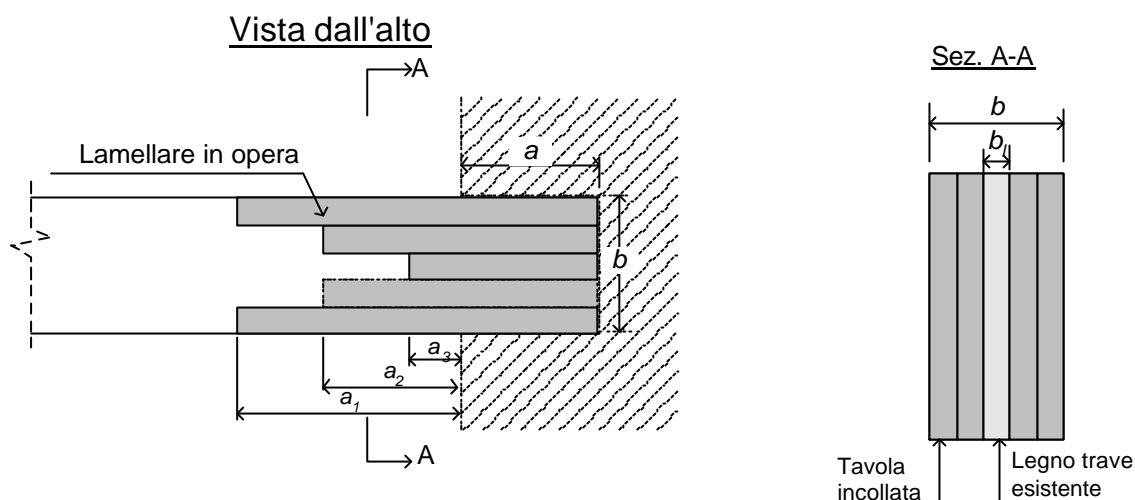
(Nota: il valore $\frac{f_y}{g_{m,s}}$ non deve superare i 300 N/mm².)

7) Verifica

$$F_{ax, Rd} = \min [F_{ax, Rd,1}; F_{ax, Rd,2}; F_{ax, Rd,3}] = 23,26 \text{ kN}$$

$$N_d = 19,2 \text{ kN} < F_{ax, Rd} = 23,26 \text{ kN} \quad (\text{Verificato})$$

2.3.2 Tecnica b): ricostruzione tipo « legno lamellare in opera »



La testate degradata viene rimossa e sostituita con tavole di legno stagionato incollate alla parte sana rimanente. La messa in opera dell'intervento consiste delle seguenti fasi:

- 1 puntellare la trave e aprire una breccia nella muratura;
- 2 tagliare la trave a tenone e rimuovere la parte degradata, avendo cura che le superfici siano esenti da bruciature, polveri, fibre strappate;
- 3 preparare una serie di tavole di legno con classe di resistenza e durabilità eguali o migliori rispetto a quelle del legno costituente la trave originale. L'umidità del legno con cui si realizza la protesi deve corrispondere all'incirca a quella attesa nelle condizioni di servizio previste (al momento della posa può superarla di un 5-6% al massimo);
- 4 incollare le tavole con adesivo tissotropico, avendo cura che non ci siano zone prive di adesivo o bolle d'aria. Inchiodare od avvitare le tavole alla parte sana della trave durante il periodo di reticolazione dell'adesivo;
- 5 trascorso il periodo di reticolazione dell'adesivo ricostruire la muratura, togliere i puntelli (ed eventualmente i chiodi o viti) e portare alla finitura desiderata le superfici della trave.

Geometria	
Larghezza delle tavole	$b_p = 53,3 \text{ mm}$
Lunghezza di appoggio	$a = 250 \text{ mm}$
Distanza tra il bordo della tavola più lunga ed il filo muro	$a_1 = 400 \text{ mm}$
Distanza tra il bordo della tavola più corta ed il filo muro	$a_2 = 100 \text{ mm}$
Legname di categoria C16 secondo EN 338	
Resistenza a trazione	$f_{t,0,k} = 10 \text{ MPa}$
Densità	$\rho_k = 310 \text{ kg/m}^3$
Coefficiente parziale di sicurezza sul materiale, secondo EC5	$g_{mt} = 1,3$
Fattore modificativo (classe di servizio 1), sec. EC5	$k_{mod} = 0,8$
Adesivo	
Densità	1600 kg/m^3
Resistenza a compressione	45 MPa
Resistenza a taglio	10 Mpa (dopo giorni a +23°C)
Resistenza a trazione	18 MPa
Modulo di elasticità	3000 Mpa

Determinazione delle azioni interne

- 1) Carico uniformemente distribuito per lo stato limite ultimo

$$q_d = (g_G G_k + g_Q Q_k) \times i = (1,35 \times 2,12 + 1,5 \times 3,00) \times 0,75 = 5,52 \text{ kN/m}$$



2) Reazione ai supporti

$$T = \frac{q_d l}{2} = \frac{5,52 \times 6,30}{2} = 17,4 \text{ kN}$$

3) Sforzo di taglio e momento flettente nella sezione resistente

$$V_{cal} = T - q_d x = 17,4 - 5,52 \times 0,25 = 16,02 \text{ kN}$$

$$M_{cal} = T \left(x + \frac{a}{3} \right) - \frac{q_d x^2}{2} = 17,4 \times \left(0,25 + \frac{0,25}{3} \right) - \frac{5,52 \times 0,25^2}{2} = 5,63 \text{ kNm}$$

4) Effetto del taglio e del momento flettente

- Sforzo di massimo taglio dovuto al momento flettente

$$t(M) = \frac{2M_{cal}}{n(pR^3)} = \frac{2 \times 5,63 \times 10^6}{2(p(120)^3)} = 1,04 \text{ Mpa}$$

dove "n" è il numero dei piani di taglio.

- Tensione massima di taglio dovuta alle forze di taglio

$$t(V) = \frac{V}{n(Bh)} = \frac{16,02 \times 10^3}{2(300 \times 240)} = 0,11 \text{ MPa}$$

dove "n" è il numero dei piani di taglio.

- Tensione massima di taglio

$$t_{sd} = t(M) + t(V) = 1,04 + 0,11 = 1,15 \text{ MPa}$$

Resistenza a taglio dell'unione

1) Resistenza a taglio caratteristica dell'unione

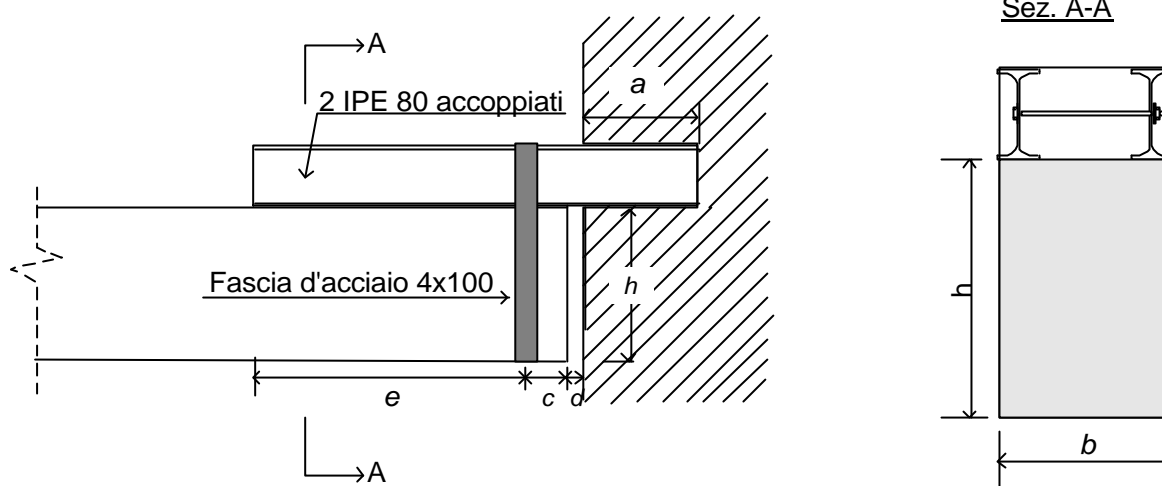
$$f_{vk} = \min [f_{vk,glue}; f_{vk,wood}] = \min [10, 3] = 3 \text{ MPa}$$

2) Resistenza a taglio di progetto dell'unione

$$f_{vd} = \frac{k_{mod} f_{vk}}{g_{m,t}} = \frac{0,8 \times 3}{1,3} = 1,85 \text{ MPa}$$

$$t_{sd} = 1,15 \text{ MPa} < f_{vd} = 1,85 \text{ MPa} \quad (\text{Verificata})$$

2.3.3 Tecnica c): profilati in acciaio



La testate degradata viene sostituita con profilati in acciaio (tipo HE o IPE) collegati con fasce in acciaio alla parte sana rimanente. La messa in opera dell'intervento consiste delle seguenti fasi:

- 1 puntellare la trave e aprire una breccia nella muratura;
- 2 tagliare la trave e rimuovere la parte degradata;
- 3 inserire i profilati in acciaio nella breccia e sull'estradosso della trave e ricostruire la muratura con cemento;
- 4 applicare una banda in acciaio per collegare la trave con i profilati, fissandola adeguatamente su entrambi i materiali;
- 5 trascorso il periodo di presa del cemento, togliere i puntelli e portare alla finitura desiderata le superfici della trave.

Geometria

Lunghezza del profilato inserito nella muratura	$a = 250 \text{ mm}$
Distanza tra la fascia in acciaio e la testate della trave	$c = 50 \text{ mm}$
Distanza tra la testate della trave ed il filo muro	$d = 200 \text{ mm}$
Distanza tra la fascia in acciaio e il filo interno dei profilati	$e = 600 \text{ mm}$

Legname di categoria C16 secondo EN 338

Resistenza a trazione	$f_{t,0,k} = 10 \text{ MPa}$
Resistenza a compressione, \perp alla fibratura	$f_{c,90,k} = 4,6 \text{ MPa}$
Densità	$\rho_k = 310 \text{ kg/m}^3$
Coefficiente parziale di sicurezza sul materiale, secondo EC5	$g_{mt} = 1,3$
Fattore modificativo (classe di servizio 1), sec. EC5	$k_{mod} = 0,8$

Profilati in acciaio IPE 80 in Fe 360, secondo UNI 5398 e DM 9/1/96

Larghezza	$b = 46 \text{ mm}$
Altezza	$h \approx 80 \text{ mm}$
Snervamento	$f_g = 235 \text{ MPa}$
Coefficiente parziale di sicurezza sul materiale	$g_{m,s} = 1,05$

Fascia Fe 360, secondo DM 9/1/96

Larghezza	$b_{band} = 100 \text{ mm}$
spessore	$t \approx 4 \text{ mm}$
Snervamento	$f_g = 235 \text{ MPa}$
Coefficiente parziale di sicurezza sul materiale	$g_{m,s} = 1,05$

Calcolo delle azioni interne

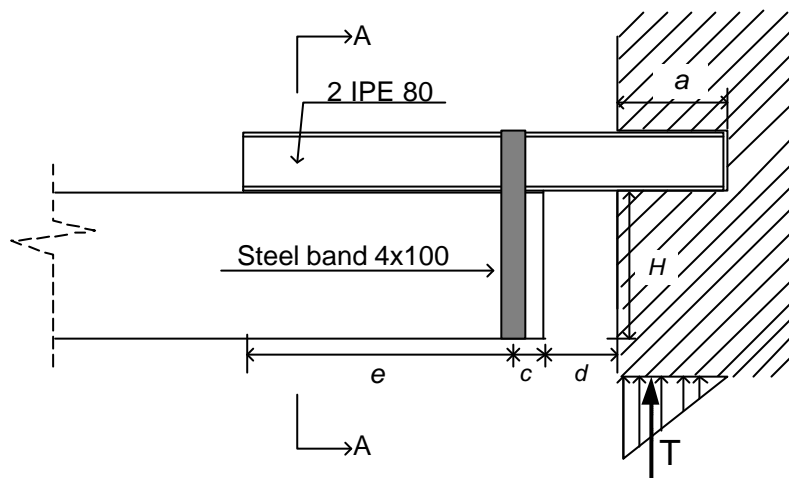
- 1) Carico uniformemente distribuito allo stato limite ultimo

$$q_d = (g_G G_k + g_Q Q_k) i = (1,35 \times 2,12 + 1,5 \times 3,00) \times 0,75 = 5,52 \text{ kN/m}$$

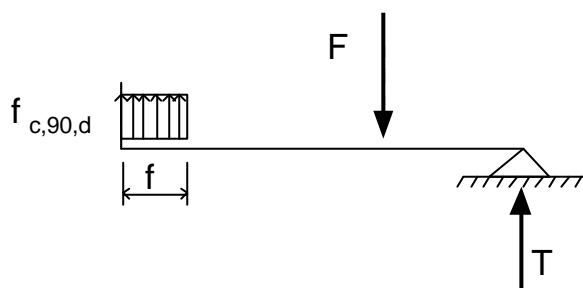
- 2) Reazione ai supporti

$$T = \frac{q_d l}{2} = \frac{5,52 \times 6,30}{2} = 17,4 \text{ kN}$$

- 3) Forze trasmesse tra legno ed acciaio



Struttura reale



Modello strutturale

- Resistenza alla compressione del legno

$$f_{c,90,d} = \frac{k_{\text{mod}} f_{c,90,k}}{g_{m,t}} = \frac{0,8 \times 4,6}{1,3} = 2,83 \text{ Mpa}$$

- Lunghezza di appoggio f

Situazione di equilibrio per I profilati:

$$2 b f f_{c,90,d} \left(e - \frac{f}{2} \right) = T \left(c + d + \frac{a}{3} \right) \quad (1)$$

$$2 b f f_{c,90,d} + T = F \quad (2)$$

Da (1), la lunghezza di appoggio è $f = 38,4 \text{ mm}$



4) Forza trasmessa dalla fascia alla trave di legno (taglio nel legno)

Da (2):

$$F = (2 \times 46 \times 38,4 \times 2,83) \times 10^{-3} + 17,4 = 27,4 \text{ kN}$$

5) Resistenza alla compressione del legno a contatto con la fascia

$$s_{c,90,d} = \frac{F}{B b_{band}} = \frac{27,4 \times 10^3}{160 \times 100} = 1,71 \text{ MPa}$$

$$s_{c,90,d} = 1,71 \text{ MPa} < f_{c,90,d} = 2,83 \text{ MPa} \text{ (Verificata)}$$

6) Tensione di taglio nella trave di legno

$$t_{sd} = 1,5 \frac{F}{BH} = 1,5 \frac{27,4 \times 10^3}{160 \times 240} = 1,07 \text{ MPa}$$

$$t_{sd} = 1,07 \text{ MPa} < f_{v,d} = \frac{k_{mod} f_{v,k}}{g_{m,t}} = \frac{0,8 \times 1,8}{1,3} = 1,1 \text{ MPa} \text{ (Verificata)}$$

Le tensioni negli elementi in acciaio sono largamente inferiori alle resistenze ammissibili.

2.3.4 Risultati della comparazione

Come già ricordato, le 3 tecniche sono comparate tra loro sulla base degli stessi parametri geometrici e degli stessi carichi di progetto, con riferimento a 4 **criteri di valutazione**:

- modalità di analisi strutturale (che possono essere più o meno semplici, far intervenire parametri diversi, richiedere tempi di calcolo diversi...);
- requisiti dei materiali (in termini di prestazioni, diffusione...);
- facilità e costo dell'intervento (soprattutto in termini di manodopera necessaria),
- qualità della conservazione (vista la notevole difformità di valutazione tra le diverse Soprintendenze, si è preferito valutare la rispondenza ai principi ICOMOS).

I risultati sono riassunti nelle tabelle seguenti.

Modalità di analisi strutturale

Tecnica 1 (barre incollate)	Tecnica 2 (legno lamellare)	Tecnica 3 (profilati in acciaio)
<ul style="list-style-type: none"> • una ispezione diagnostica accurata dev'essere eseguita prima della progettazione, per verificare lo stato di conservazione e assegnare ogni elemento ad una classe di resistenza 		
<ul style="list-style-type: none"> • la capacità portante dei collegamenti dev'essere verificata per le seguenti modalità di rottura: (1) della barra in acciaio; (2) della colla; (3) del legno adiacente l'incollaggio; (4) coesiva nel legno. • La lunghezza di incollaggio dev'essere tale da assicurare una rottura di tipo duttile (ad es. nella barra in acciaio). 	<ul style="list-style-type: none"> • La capacità portante dei collegamenti dev'essere verificata per le seguenti modalità di rottura: (1) coesiva dell'adesivo; (2) coesiva nel legno. 	<ul style="list-style-type: none"> • La capacità portante dei collegamenti dev'essere verificata per le seguenti modalità di rottura: (1) resistenza a compressione nel legno; (2) resistenza a taglio nel legno; • Dev'essere verificata l'assenza di tensioni dovute al cambiamento di condizioni di carico, oppure il loro effetto.



Requisiti dei materiali

Tecnica 1 (barre incollate)	Tecnica 2 (legno lamellare)	Tecnica 3 (profilati in acciaio)
<ul style="list-style-type: none">• Elementi in legno di qualità e durabilità equivalenti (o migliori) di quelli esistenti		<ul style="list-style-type: none">• Profilati e bande in acciaio
<ul style="list-style-type: none">• Adesivo epossidico tissotropico• Barre ad aderenza migliorata (alternativa: barre filettate, barre in fibra di vetro...)		

Facilità e costo dell'intervento

Tecnica 1 (barre incollate)	Tecnica 2 (legno lamellare)	Tecnica 3 (profilati in acciaio)
<ul style="list-style-type: none">• Lavorazione del legno facile e rapida, senza necessità di elevata precisione• Versatilità, adattabilità a varie situazioni di lavoro (con accessibilità laterale, dall'alto, dal basso, dal retro)• Costo relativamente contenuto	<ul style="list-style-type: none">• richiede elevata precisione nella lavorazione del tenone sulla trave originaria, quindi manodopera specializzata• difficile esecuzione senza una facile accessibilità• costo elevato	<ul style="list-style-type: none">• lavorazione legno minima, può essere necessario lavorare il profilato• il peso dei profilati può rendere difficile installarli manualmente• necessità di consolidare il legno con impregnazioni dove viene appoggiata la fascia• costo medio

Qualità della conservazione

Tecnica 1 (barre incollate)	Tecnica 2 (legno lamellare)	Tecnica 3 (profilati in acciaio)
<ul style="list-style-type: none">• impatto estetico favorevole• la durabilità dipende dalla compatibilità tra adesivo e legno, ma il "movimento" del legno è possibile e non suscettibile di creare problemi• reversibilità limitata ma possibile	<ul style="list-style-type: none">• impatto estetico favorevole• assenza di acciaio (non presente nella struttura originale)• la durabilità dipende dalla compatibilità tra adesivo e legno, e dal "movimento" del legno che in questo caso può creare problemi• reversibilità limitata ma possibile	<ul style="list-style-type: none">• impatto estetico negativo• necessità di protezione dal fuoco degli elementi metallici a vista• il diverso "movimento" dei due materiali va valutato in caso di interventi estensivi• reversibilità facile



2.4 Reversibilità e impatto ambientale

Oltre alle valutazioni riportate nei precedenti paragrafi, nel corso della ricerca è emersa l'esigenza da parte dei conservatori di fornire indicazioni almeno di tipo qualitativo (ma meglio se anche quantitative) sui seguenti temi:

- reversibilità dell'intervento;
- impatto ambientale del sistema di restauro (materiali, energia...).

A tale proposito si riportano i risultati degli sviluppi effettuati (relativamente al solo sistema di consolidamento delle testate degradate, a causa delle limitazioni di tempi e risorse).

2.4.1 Indice di reversibilità

Gli interventi sugli elementi delle strutture di legno sono spesso effettuati in conseguenza di un degrado (spesso di tipo biologico come un attacco da funghi e/o insetti; a volte meccanico come rotture o dissesti), e possono essere realizzati con l'utilizzo di differenti sistemi che consentono di ripristinare la funzionalità dell'elemento. Quasi sempre il degrado riguarda una porzione limitata dell'elemento stesso, per esempio nel caso di una trave soggetta a degrado biologico di una delle due testate, per cui sempre più spesso si fa ricorso ad interventi mirati e circoscritti che evitano la sostituzione integrale dell'elemento limitandosi alla riparazione delle sole parti degradate. L'intervento può essere condotto con svariati sistemi, più o meno efficienti e più o meno reversibili. Ma mentre è facile quantificare l'efficienza (in senso meccanico), risulta più difficile comparare in maniera oggettiva il grado di reversibilità di sistemi di intervento diversi.

Analizzando la sostituzione delle testate di travi con legno di nuovo apporto (protesi) "cucito" alla parte originaria attraverso barre, in acciaio o altri materiali, incollate con adesivi, è evidente che l'intervento presenta alcuni elementi di irreversibilità: la sostituzione della porzione ammalorata della trave per forza di cose comporta l'asportazione di una parte di legno sano; gli adesivi epossidici inoltre sono materiali termoindurenti e dunque caratterizzati da una reazione irreversibile di reticolazione. Se però si guarda all'intervento nel suo complesso, esso pone rimedio ad una situazione di degrado manifesta, che è anch'essa di per sé irreversibile.

E' comunque lecito chiedersi se sia opportuno che un intervento di consolidamento strutturale debba essere integralmente reversibile. Perciò si sta sviluppando un dibattito sulla definizione e sull'applicabilità del concetto di reversibilità degli interventi di restauro (Bonsanti, 2002), o se invece non sia meglio sostituirlo con altri, magari legati all'ambito specifico in cui si opera (vari contributi negli atti dei Convegni di Londra, 1999, e Torino, 2002). In questo contesto, a posizioni concettualmente radicali secondo cui un intervento o è totalmente reversibile oppure non lo si può in alcun modo definire tale (cfr. per esempio Barclay, 1999) si affiancano posizioni più flessibili secondo le quali importante è conoscere fino a che punto un intervento può considerarsi reversibile (Fiorani, 2002), posizioni queste ultime sostanzialmente analoghe a quelle espresse dall'International Council on Monuments and Sites (ICOMOS, 1999), il cui International Wood Committee ha emanato i "Principi per la conservazione delle strutture di legno antiche". Tali principi sanciscono, tra le altre cose, che gli interventi sulle strutture in legno (punto 5) dovrebbero:

- a) essere reversibili;
- b) almeno non pregiudicare o impedire ulteriori lavori di conservazione futuri nel momento in cui ciò sia nuovamente necessario.

Già in questi principi generali è contenuta, fatto salvo il concetto generale di reversibilità degli interventi, la necessità di definirlo con una certa gradualità sia nell'approccio programmatico che nell'applicazione pratica.

Partendo da queste considerazioni, nell'ambito del progetto è stata sviluppata una metodologia per la definizione e la quantificazione del "grado di reversibilità" relativamente al caso specifico di interventi di sostituzione di porzioni ammalorate di elementi lignei. Tale grandezza è stata definita sulla base di parametri misurabili, quale per esempio il volume di materiale che deve essere rimosso nel caso in cui si volesse disassemblare la protesi, e consente pertanto di quantificare l'ammontare dell'alterazione permanente apportata all'elemento. Tale concetto appare generalizzabile in linea di principio a qualsiasi contesto di restauro.

Il parametro R = grado di reversibilità è stato così definito:

$$R = \frac{1}{3} R_{VOL} + \frac{1}{3} R_{MECC} + \frac{1}{3} R_{ESTET}$$

dove i vari coefficienti rappresentano:

- R_{VOL} il contributo volumetrico alla reversibilità dell'intervento. Esso cioè misura in termini di volume qual è la perdita irreversibile nel momento in cui si effettua lo smontaggio della protesi e si ritorna ad una fase in cui l'elemento è pronto per



un nuovo intervento. Secondo lo schema indicato in tab. 1, per il calcolo di R_{VOL} si confrontano il valore iniziale e quello dopo lo smontaggio della protesi. Tale coefficiente può essere misurato quantitativamente con l'espressione:

$$R_{VOL} = \frac{V_{RES}}{V_{ORIGIN}}$$

esso è cioè dato dal rapporto tra il volume dopo lo smontaggio relativo alla base di calcolo scelta, V_{RES} (fase 3) e quello originario presunto, V_{ORIGIN} .

Il valore di R_{VOL} dipende dalla base di calcolo considerata. Nel seguito, si è scelto di considerare come base di calcolo il volume originario presunto dell'intera trave, anche se e potrebbe essere altrettanto corretto considerare come riferimento il valore del volume effettivo al momento iniziale (fase 0); si è scelto il primo approccio solo per semplicità di calcolo. La scelta del volume al momento iniziale (fase 0) infatti comporta una stima approssimata del volume residuo della testata degradata, che potrebbe essere calcolato più correttamente solo a posteriori, dopo aver tagliato via la parte ammalorata.

- R_{MECC} il contributo meccanico alla reversibilità dell'intervento. Esso viene misurato attraverso il confronto tra le prestazioni dell'elemento dopo l'intervento e dopo che esso è stato ripetuto (fasi 2 e 4). Il confronto è stato effettuato misurando dopo il 1° e dopo il 2° intervento la stessa caratteristica meccanica (nel caso specifico è stato considerata la pendenza della curva carico-spostamento) e riportandone i valori ottenuti:

$$R_{MECC} = \frac{P_{2^{\circ}INTERV}}{P_{1^{\circ}INTERV}}$$

La grandezza meccanica di riferimento deve naturalmente essere scelta in modo tale da coinvolgere in qualche modo la parte originaria della trave.

Da notare che in questo caso si è scelto di confrontare due interventi successivi (il 1° ed il 2°) senza coinvolgere le caratteristiche meccaniche al momento iniziale (fase 0) poiché i due valori non sarebbero stati direttamente confrontabili ed inoltre per evitare di ottenere un valore maggiore di 1.

- R_{ESTET} il contributo estetico alla reversibilità dell'intervento. Esso misura di quanto le superfici dell'elemento vengono irreversibilmente compromesse dall'intervento. La definizione proposta per il coefficiente è la seguente:

$$R_{ESTET} = \frac{S_{RES}}{S_{ORIGIN}}$$

in cui S_{RES} e S_{ORIGIN} sono rispettivamente la superficie esteticamente rilevante dell'elemento originario dopo la rimozione della protesi (fase 3) e quella originaria presunta. Anche in questo caso sarebbe possibile considerare come riferimento la superficie inizialmente visibile (fase 0), ma è da notare che, nel caso di degrado di tipo biologico limitato alle testate delle travi, spesso le due grandezze coincidono poiché il degrado è confinato nella zona di appoggio sulla muratura.

Per come sono stati definiti, tutti i coefficienti che compongono R sono compresi tra 0 e 1, per cui anche R, che di fatto rappresenta la media tra i tre, sarà compreso tra 0 e 1. Si può allora associare all'intervento anche un 'indice di irreversibilità' definito come

$$IRR = 1 - R.$$

Nella valutazione complessiva di una tecnica è inoltre utile calcolare, oltre al suo 'grado di reversibilità' (oppure all'indice di irreversibilità), anche un altro parametro che tenga conto di considerazioni estetiche. A tale scopo è stato definito il 'fattore di impatto visivo', FIV, definito come:

$$FIV = \frac{S_{INTERV}}{S_{ORIGIN}}$$

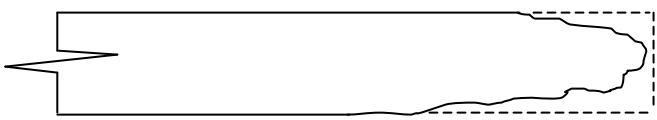
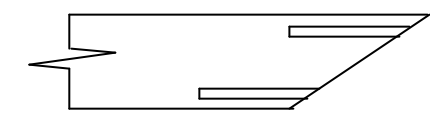
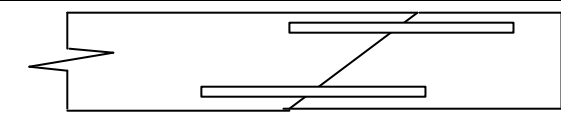
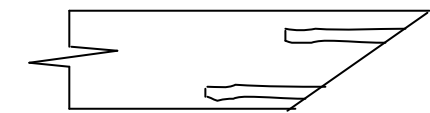
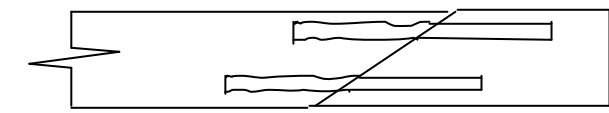
dove S_{ORIGIN} è definito come sopra (superficie originaria visibile) mentre S_{INTERV} rappresenta la superficie totale visibile dopo l'esecuzione dell'intervento. Essa viene cioè riferita alla fase 2 della tab. 1.

Per come è definito, il FIV non ha ovviamente nulla a che vedere con la reversibilità in sé. Esso inoltre fornisce un'informazione differente da quella del parametro R_{ESTET} in quanto quest'ultimo si riferisce non all'intervento ma a ciò che rimane nel momento in cui l'intervento viene rimosso.

Quando l'elemento è a vista il 'fattore di impatto visivo' è di utile valutazione a prescindere dalla rilevanza estetica della superficie, mentre può risultare superfluo per gli elementi per esempio dei sottotetti o comunque non visibili.

Nella tabella 1 è rappresentata schematicamente la successione delle fasi di realizzazione degli interventi presi a modello (sostituzione di una testata di una trave degradata per attacco da agenti patogeni con una protesi in legno collegata con barre in acciaio incollate). Nello schema, la fase 0 rappresenta lo stato iniziale, corrispondente all'elemento degradato, mentre la fase 2 corrisponde all'intervento finito, che normalmente rappresenta anche l'ultima fase. In questo caso invece alle normali fasi di lavorazione sono stati aggiunti altri due passaggi, che corrispondono allo smontaggio e al rimontaggio della protesi, effettuati con una tecnica analoga. Le varie fasi sono state effettivamente realizzate su provini di laboratorio, che simulano l'intervento reale, ed i risultati della sperimentazione applicati ad alcuni casi reali per misurare il 'grado di reversibilità' associato a tali interventi.

Tabella 1 – Fasi tipiche dell'intervento considerato.

Fase	Descrizione	Schema
0	Corrisponde allo stato delle cose al momento iniziale.	
1	Fase di preparazione dell'intervento. Nel caso specifico la trave viene lavorata in modo da poter poi posizionare la protesi	
2	Effettuazione dell'intervento	
3	Fase di rimozione della protesi	
4	Riesecuzione dell'intervento con procedure e modalità analoghe a quelle della fase 2	

Per procedere al calcolo del parametro R si sono realizzati in laboratorio due provini con la tecnica descritta nella tab. 1 e poi, per dimostrare l'applicabilità del metodo, si è proceduto allo smontaggio della protesi. Affinché tale smontaggio venga effettuato correttamente, senza danneggiare la parte originaria della trave, occorre:

- a. prima raggiungere le barre e tagliarle;
- b. poi riaprire gli scassi ed estrarre le barre asportando il minor quantitativo possibile di legno dalla trave.

La fase a) è stata realizzata con l'uso di una motosega (fig. 1) con la quale si praticano dei tagli in corrispondenza della superficie di contatto tra protesi e trave fino ad una profondità tale da raggiungere le barre d'acciaio. Il taglio delle barre invece è stato eseguito con l'impiego di un flessibile (fig. 2). Nella fase b), la riapertura degli scassi è stata effettuata con un seghetto alternativo in modo da ottenere superfici il più regolari possibile per procedere in seguito alla realizzazione di un nuovo intervento. La profondità di taglio è stata regolata in modo da incidere solo il legno più prossimo allo scasso, facendo attenzione a non lavorare sulla resina ma seguendone per intero il contorno (fig. 3). Infine, l'asportazione del tassello composto da resina, barra e listello di chiusura, è stata effettuata con uno scalpello (fig. 4).



Figure 1-4. Le varie di lavorazione per la imozione della protesi sui travetti realizzati in laboratorio

La corretta valutazione del parametro R_{VOL} si ottiene effettuando una stima del volume finale che si otterrebbe una volta smontata la protesi (fase 3, tab. 1) e una stima del volume iniziale su cui si effettua l'intervento (fase 0, tab. 1). La stima del volume della trave dopo la fase 3 è abbastanza semplice dal punto di vista geometrico a patto che si conosca il volume degli scassi. A tale scopo si possono utilizzare i valori ottenuti sui campioni di laboratorio e riportati in tab. 2.

Tabella 2. Dimensioni geometriche degli scassi relative alle fasi 1 e 3 per i travetti realizzati in laboratorio. I valori ottenuti sono stati utilizzati per il calcolo di V_{RES} relativo agli interventi reali.

Provino	scasso	Dimensioni degli scassi relative alla fase 1 (cm)				Dimensioni degli scassi relative alla fase 3 (cm)				Volume scasso fase 3 (cm ³)	Volume scasso fase 1 (cm ³)	differenza (cm ³)	Valore medio (cm ³)
		B	b	h	z	B	b	h	z				
1	1	21,0	19,0	2,2	4,0	22,4	19,6	2,9	4,1	250	176	74	79,5
	2	21,5	19,5	2,2	4,0	22,5	19,8	2,8	4,2	249	180	69	
	3	20,5	18,5	2,2	4,0	22,3	19,0	3,2	4,0	264	172	92	
	4	21,0	19,5	2,2	4,0	22,3	19,2	3,0	4,2	261	178	83	
2	1	21,0	18,5	2,2	4,0	21,0	18,5	2,9	4,2	241	174	67	84,7
	2	20,4	51,2	2,2	4,0	24,0	21,0	3,2	4,2	302	182	120	
	3	20,3	20,0	2,2	4,0	23,5	20,0	3,0	4,0	261	177	84	
	4	21,0	18,0	2,2	4,0	21,0	18,0	3,0	4,1	240	172	68	

Occorre fare attenzione al fatto che l'aumento del volume degli scassi tra la fase 1 e la fase 3, osservabile anche in fig. 5, è un valore assoluto e non relativo, poiché esso dipende non tanto dal volume iniziale dello scasso quanto piuttosto dalle

modalità utilizzate per rimuovere le barre (ad es. dallo spessore della lama del seghetto alternativo, dalla sua lunghezza ecc.). Ai fini del calcolo dunque, il modo più corretto di valutare l'aumento di volume è di esprimere i risultati riportati nella tab. 2 riassumendoli nell'unico valore di 0,4 cm³/cm di lunghezza dello scasso.



Figura 5. Variazione del volume degli scassi tra le fasi 1 e 3 dell'intervento realizzato utilizzando i travetti di laboratorio.

Valutazione del parametro R_{MECC}

Tale parametro viene calcolato sulla base del rapporto tra una stessa caratteristica meccanica considerata di riferimento dopo un 1° e dopo un 2° intervento (fasi 2 e 4). La valutazione di questo parametro deve dunque essere effettuata in laboratorio e dipende essenzialmente dalle modalità di esecuzione della tecnica utilizzata; esso non dipende dunque né dalle condizioni iniziali della trave né dalla base di calcolo considerata. Nel caso specifico la pendenza della curva carico-spostamento valutata in prossimità dell'interfaccia tra la protesi e il resto della trave è stata considerata come caratteristica meccanica di riferimento. La valutazione è stata effettuata con una prova di flessione a 4 punti appositamente realizzata per massimizzare le condizioni di taglio in prossimità degli appoggi, simulando quindi in qualche modo le condizioni reali. Lo schema di carico è riportato in fig. 6 nella quale sono stati anche indicati i punti in cui si è misurata la pendenza.

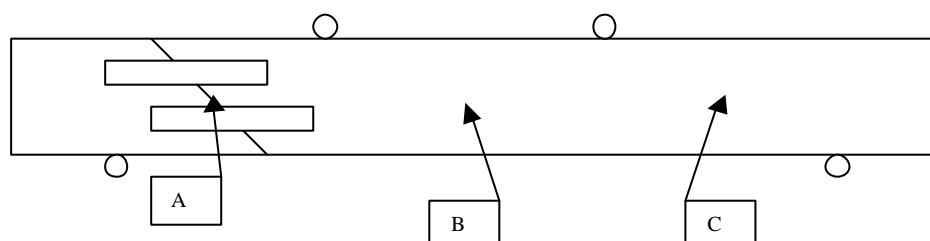


Figura 6. Schema di carico dei travetti di laboratorio per la misura delle caratteristiche meccaniche riportate in tab.3.

Dalla pendenza della curva carico-spostamento calcolata nella zona B (fig. 6) è ovviamente possibile calcolare il modulo elastico della trave. Tale valore è stato confrontato con il modulo elastico ottenuto con il metodo vibrazionale acustico (Brancheriau e Bailleres, 2002), ed i risultati sono riportati in tab. 3.

Tabella 3. Caratteristiche meccaniche valutate per gli interventi sui travetti di laboratorio. La rottura dei travetti è stata effettuata solo dopo il 2° intervento, ed i valori confrontati con quelli di altri travetti di riferimento su cui si è intervenuti con la stessa tecnica ma solo una volta.

Provino	Modulo elastico (MPa)	Modulo elastico vibrazion. (MPa)	Pendenza zona A		Pendenza zona C		s rottura travetti (MPa)	s rottura riferim. (MPa)
				Diff.%		Diff.%		
1	1° int.	19223	21520	171713	250247	24,40	24,99	
	2° int.	17339	19055	116701 -32,0	274267 9,6			
2	1° int.	21503	19826	142678	230127	26,49		
	2° int.	20707	20142	132456 -7,1	252952 9,9			

La tab. 3 mostra che non c'è sostanziale variazione tra i valori ottenuti per la trave dopo il 1° e dopo il 2° intervento sia in termini di modulo elastico (calcolato sia con il metodo tradizionale sia con quello vibrazionale) che di pendenza nella zona C, mentre esiste una differenza di circa il 30% in meno in un travetto tra il 1° e il 2° intervento. Tale differenza è da imputare ad

una non accurata sostituzione della protesi nel 2° intervento, come confermato dal fatto che il secondo travetto, dopo un più attento posizionamento, ha mostrato praticamente gli stessi valori della pendenza, e dal fatto che i valori di resistenza a flessione sono simili tra i due travetti e inoltre con i valori ottenuti su altri campioni di riferimento su cui è stato effettuato soltanto il primo intervento.

Sulla base delle considerazioni precedenti, si può calcolare il parametro R_{MECC} come segue:

$$R_{MECC} = \frac{124578}{157195} = 0,79$$

in cui come si vede, a vantaggio di una stima cautelativa, non si è tenuto conto del fatto i travetti presentano la stessa resistenza a flessione dopo il 1° e dopo il 2° intervento né del fatto che una più attenta esecuzione dell'intervento porta questo valore praticamente ad 1.

Valutazione del parametro R_{ESTET}

E' utile prendere tale parametro in considerazione solo quando le superfici delle travi sono particolarmente apprezzabili da un punto di vista estetico. In caso contrario esso può essere omesso.

Per la quantificazione del parametro R_{ESTET} occorre stimare la superficie originaria presunta esteticamente rilevante dell'elemento. Volendo invece scegliere di utilizzare la superficie al momento iniziale, una stima corretta potrebbe essere effettuata per esempio ricorrendo a strumenti quali l'analisi di immagine. La superficie dopo la rimozione della protesi invece può essere calcolata per differenza sulla base dei dati presentati per esempio nella tab. 2.

Applicazione del metodo a casi reali

Caso 1. Sostituzione integrale della trave

In alcuni Paesi (ad es. Germania e Austria) questo è ancora il tipo di intervento più frequente su travi di legno degradate. Sulla base delle definizioni date l'intervento di sostituzione è irreversibile sotto gli tutti gli aspetti considerati (volumetrico, meccanico ed estetico) poiché sono nulli i termini V_{RES} e S_{RES} ed inoltre non esiste una grandezza meccanica associabile alla trave originaria.

Caso 2. Sostituzione delle testate della trave con protesi e barre incollate inserite in scassi

In Italia, Francia, Inghilterra questa è la tipologia di intervento ormai più diffusa. Nella fig. 7 è possibile vedere un esempio del degrado riscontrato. Per l'intervento è stata adottata la tecnica descritta il cui progetto è riportato in fig. 9, mentre l'intervento finito è visibile nella fig. 8. Le dimensioni degli elementi sui cui si è intervenuti sono inoltre riportate in tab. 4.

Figure 7 e 8. Sulla sinistra è possibile osservare il degrado biologico relativo alla testata della trave su cui si è intervenuti. Sulla destra l'intervento per come si presenta una volta finito.



Figura 9. Progetto di intervento sulla trave con testata degradata utilizzando la tecnica descritta in tab. 1.

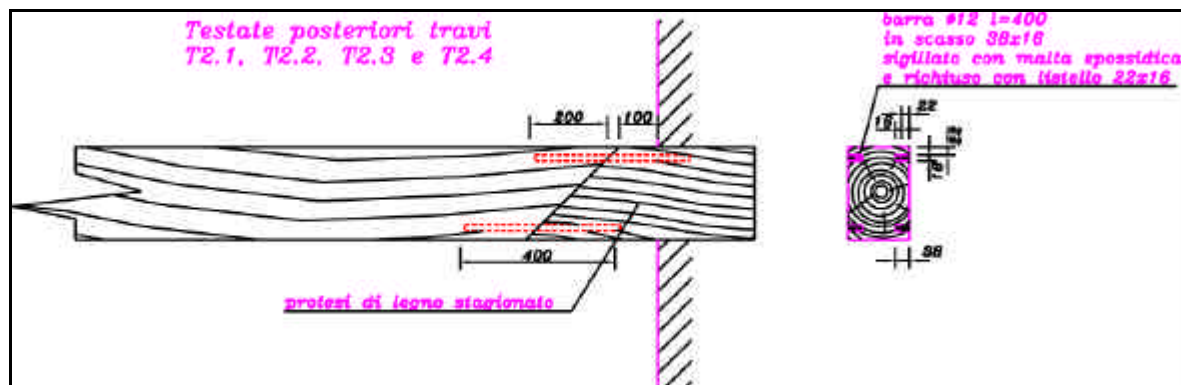


Tabella 4. Dimensioni geometriche di interesse per l'intervento descritto nella figura 9.

Elemento originario	cm	Dimensioni protesi	cm
Lunghezza:	560	lunghezza minore:	40
Sezione:	24 x 16	lunghezza maggiore:	64
Dimensioni di ogni singolo scasso:	22 x 3,8 x 1,6		

I valori per il calcolo del 'grado di reversibilità', R, analizzando i singoli contributi, sono riportati nella tab. 5.

Tabella 5. Valutazione del grado di reversibilità per l'intervento descritto in Figura 9.

CONTRIBUTO VOLUMETRICO		CONTRIBUTO MECCANICO	CONTRIBUTO ESTETICO	
V_{ORIGIN}	215 dm ³	calcolato come illustrato nel testo	S_{ORIGIN}	4,00 m ²
volume scassi dopo la fase 1	0,535 dm ³		superficie scassi	0,014 m ²
volume scassi dopo la fase 3	0,571 dm ³		superficie visibile della protesi	0,176 m ²
V_{RES}	194 dm ³		S_{RES}	3,81 m ²
R_{VOL} 0,90		R_{MECC} 0,79	R_{ESTET} 0,95	

Il valore del 'grado di reversibilità' associato a questo intervento può dunque essere valutato come media dei 3 contributi e vale:

$$R = 0,88$$

L'intervento presenta dunque un indice di irreversibilità, IRR, del 12%.

Essendo la superficie visibile dopo l'intervento coincidente con quella della trave originaria, il 'fattore di impatto visivo', FIV, per questo tipo di intervento risulta 1.

Caso 3. Intervento con supporti metallici laterali

Questo caso, presentato in fig. 10, è stato riscontrato nello stesso edificio dell'intervento descritto nella Figura 9, presumibilmente come intervento 'temporaneo' eseguito in passato.



Figura 10. Ecco come si presentava inizialmente la trave, il cui intervento è descritto nel caso precedente.

E' possibile applicare anche in questo caso la metodologia di valutazione, e a tale scopo si possono utilizzare le dimensioni riportate in tab. 4. In questo caso si deve supporre di intervenire dopo lo smontaggio con un metodo analogo, che richiede l'utilizzo di nuovi chiodi. Nel calcolo del parametro R_{VOL} si è tuttavia deciso di trascurare il volume dei fori lasciati dalla rimozione dei chiodi. Anche per quanto riguarda il parametro R_{MECC} , si può ragionevolmente osservare che, a prescindere dalla scelta della proprietà meccanica di riferimento, non dovrebbero esserci variazioni tra i valori ottenuti dopo un 1° e dopo un 2° intervento di questo genere. La tab. 6 riassume i risultati della valutazione.

Tabella 6. Valutazione del grado di reversibilità per l'intervento con supporti laterali.

CONTRIBUTO VOLUMETRICO		CONTRIBUTO MECCANICO	CONTRIBUTO ESTETICO	
V_{ORIGIN}	215 dm ³	valore ragionevole	S_{ORIGIN}	4 m ²
volume biologicamente degradato	4 dm ³		superficie visibile biologicamente degradata	0 m ²
V_{RES}	211 dm ³		S_{RES}	4 m ²
R_{VOL} 0,98		R_{MECC} 1	R_{ESTET} 1	

Il valore del 'grado di reversibilità' per questo intervento è allora:
 $R = 0,99$

L'intervento presenta dunque un indice di irreversibilità, IRR, dell' 1%, associabile interamente al degrado di tipo biologico riscontrato. Interessante è invece in questo caso il calcolo del 'fattore di impatto visivo', FIV. Le modalità di calcolo di tale fattore sono riportate nella tab. 7.

Tabella 7. Valutazione del 'fattore di impatto visivo', FIV, per l'intervento con supporti laterali.

Dimensioni supporto laterale			
lunghezza:	180 cm	altezza:	20 cm
		larghezza:	15 cm
superficie non visibile del supporto:		0,36 m ²	superficie visibile del supporto:
			0,93 m ²
superficie originaria della trave:		4,00 m ²	superficie visibile totale della trave:
			4,57 m ²
FIV 1,14			

Il valore del FIV ottenuto indica che l'intervento risulta visivamente più ingombrante dal punto di vista estetico del 14%, per cui se è vero che esso è altamente reversibile è altrettanto vero che, dipendentemente dal contesto in cui si inserisce (elemento a vista oppure no), esso potrebbe risultare non accettabile.

Caso 4. Sostituzione delle testate della trave con protesi e barre incollate inserite in fori longitudinali

La differenza rispetto al Caso 2 consiste nel fatto che la barra d'acciaio viene inserita in fori longitudinali anziché in scassi laterali, consentendo in tal modo una maggiore rapidità di esecuzione. Ai fini del presente approccio, è tuttavia necessario pensare alla rimozione dell'intervento stesso. La rimozione delle barre per mezzo di fori di diametro maggiore dei preesistenti è di realizzazione estremamente difficile, almeno con le tecnologie attuali. Si è dunque pensato alla rimozione dell'intervento con l'uso della stessa tecnica descritta per il Caso 2 (effettuazione di scassi laterali). A cambiare sono naturalmente le dimensioni geometriche, riportate in tab. 8.

Figura 11 – Intervento eseguito con fori sulla testata della trave.



Tabella 8. Dimensioni geometriche di interesse per l'intervento descritto in Figura 11.

Elemento originario	cm	Dimensioni protesi	cm
Lunghezza:	540	lunghezza minore:	40
Sezione:	28 x 20	lunghezza maggiore:	68
Dimensioni di ogni singolo foro:	40 x Ø 1,6		

I valori per il calcolo del 'grado di reversibilità', R, riportati nella tab. 9 differiranno dunque leggermente da quelli della tab. 5.

Tabella 9. Valutazione del grado di reversibilità per l'intervento descritto in Figura 11.

CONTRIBUTO VOLUMETRICO		CONTRIBUTO MECCANICO	CONTRIBUTO ESTETICO	
V_{ORIGIN}	302 dm ³	calcolato come illustrato nel testo	S_{ORIGIN}	4,61 m ²
volume scassi dopo la fase 1	0,322 dm ³		Superficie scassi	0,032 m ²
volume scassi dopo la fase 3	1,28 dm ³		Superficie visibile della protesi	0,23 m ²
V_{RES}	271 dm ³		S_{RES}	4,35 m ²
R_{VOL} 0,896		R_{MECC} 0,79	R_{ESTET} 0,943	

Da notare che il valore di R_{VOL} è limitato soltanto dalle tecnologie attualmente disponibili, e che potrebbe essere abbastanza incrementato cambiando la metodologia di rimozione delle barre.

Il valore del 'grado di reversibilità' associato è dunque:



$$R = 0,876$$

L'intervento presenta dunque un indice di irreversibilità, IRR, del 12%, uguale a quella del Caso 2, come era da aspettarsi in considerazione del fatto che (a parte i volumi) le due fasi iniziali (fase 0) e quelle relative alla valutazione finale dell'intervento (fase 3) sono coincidenti.

Anche in questo caso, inoltre, essendo la superficie visibile dopo l'intervento coincidente con quella della trave originaria, il 'fattore di impatto visivo', FIV, risulta 1.

Conclusioni

Il "grado di reversibilità" definito nel presente progetto consente di effettuare una stima quantitativa della reversibilità associata agli interventi, e riesce a discriminare tra i diversi casi presentati.

Esso è stato definito per il caso particolare di interventi su elementi strutturali lignei, ma si ritiene che la sua definizione possa essere generalizzata ad altri contesti, facendo ricorso all'espressione:

$$R = \sum_{i=1}^N p_i R_i$$

dove i parametri R_i rappresentano i vari contributi correlati alla tipologia di intervento presa in considerazione e p_i i singoli

pesi da assegnare ad ogni contributo. L'espressione si riconduce a quella presentata se $N=3$ e $p_1 = p_2 = p_3 = \frac{1}{3}$.

Affinché R sia compreso tra 0 e 1 occorre naturalmente che sia $\sum p_i = 1$.

Il vantaggio dell'approccio quantitativo è quello di imporre al progettista di pensare fin da subito ad una modalità con cui potere smontare l'intervento, e dunque di effettuare una stima dell'alterazione permanente che l'intervento stesso apporterà all'elemento ligneo. In questo modo la valutazione dell'accettabilità di un intervento può essere effettuata su basi oggettive. In particolare essa può riferirsi a:

- l'indice di irreversibilità, $IRR = 1 - R$, che per l'appunto quantifica l'ammontare permanente dell'alterazione;
- il 'fattore di impatto visivo' che, pur non essendo direttamente correlato alla reversibilità, tuttavia consente di valutare quanto un intervento risulti esteticamente "pesante".

Ovviamente il criterio di accettabilità non può essere definito a priori ma dipende dall'intervento specifico. In generale, qualora i due fattori presi in considerazione siano entrambi ritenuti importanti, il criterio di ottimizzazione per l'accettabilità di un intervento potrebbe essere quello di minimizzare entrambi questi parametri.

Bibliografia

- AA.VV.** (2002) Reversibilità? Concezioni ed interpretazioni nel restauro, Memorie del convegno, Torino. org. Arkos
- Barclay R** (1999) Reversibility. The thinking behind the word, in: Oddy A (a cura di:), Reversibility. Does it exist?, London; come riportato da: Fiorani D in: Reversibilità? Concezioni ed interpretazioni nel restauro, 12-13 aprile 2002, Torino
- Bonsanti G** (2002) Per una definizione del concetto di reversibilità: dalla storia alle applicazioni. In: Reversibilità? Concezioni ed interpretazioni nel restauro, Memorie del convegno, 12-13 aprile 2002, Torino
- Brancheriau L, Bailleres H** (2002), Natural vibration analysis of clear wooden beams: a theoretical review, Wood Sci Technol, **36** (4) pp 347-365
- Fiorani D** (2002) Utilità e limiti di un principio, la reversibilità nel restauro, in: Reversibilità? Concezioni ed interpretazioni nel restauro, Memorie del convegno, 12-13 aprile 2002, Torino
- ICOMOS** (1999) International Wood Committee: Principles for the Preservation of Historic Timber Buildings
- Oddy A.** (1999), Reversibility. Does it exist?, London

2.4.2 Analisi dell'impatto ambientale

L'analisi è stata condotta confrontando fra loro quattro differenti tipologie di intervento (le tre del paragrafo 2.3, più la sostituzione integrale della trave), ed è stata condotta in collaborazione con lo studio "Febe Ecologic" di Ravenna.

La valutazione ambientale comparativa viene realizzata attraverso uno studio di Life Cycle Assessment (LCA) secondo la norma ISO 14040 [UNI, 1998]. I risultati definiscono il profilo ambientale dei differenti sistemi d'intervento ed in particolare consentono di confrontare i relativi impatti.

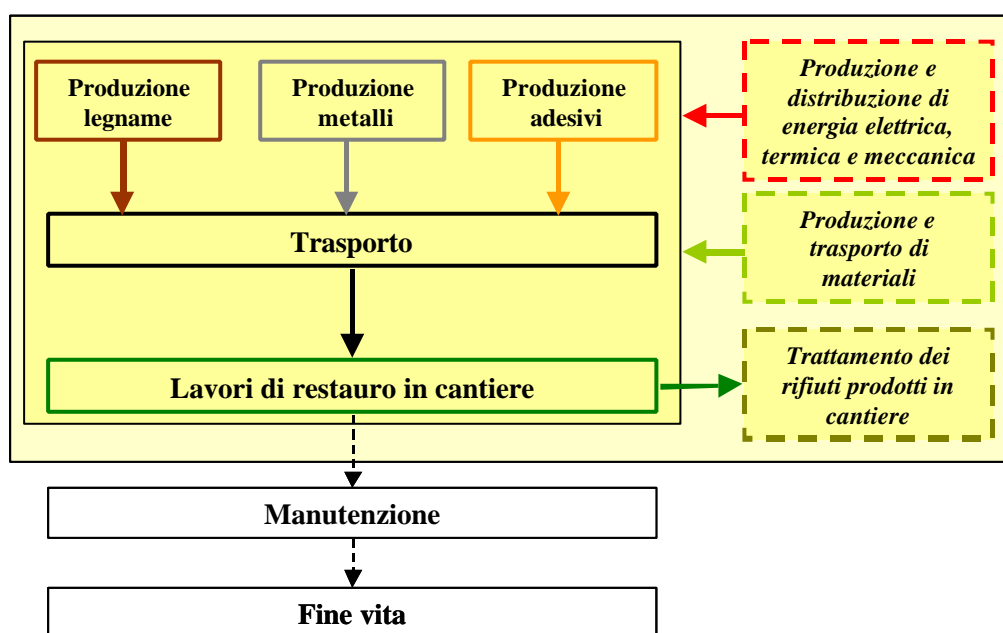
L'unità funzionale è rappresentata dalla trave descritta al paragrafo 2.3. Non è stato necessario aggiungere un criterio temporale alla definizione dell'unità funzionale, dal momento che i sistemi confrontati risultano avere la stessa durabilità. I confini del sistema definiscono le unità di processo da includere nel sistema individuato come oggetto dello studio di LCA.

Dal momento che lo studio è finalizzato a confrontare i 4 sistemi di intervento, gli aspetti del ciclo di vita che verranno presi in considerazione riguardano le seguenti fasi:

1. *Approvvigionamento delle materie prime:*
 - *attività forestale e produzione di prodotti legnosi (sistemi 1, 3, 4);*
 - *produzione di dispositivi metallici (sistemi 2, 3);*
 - *produzione di adesivi epossidici (sistemi 3, 4);*
2. *Trasporto delle materie prime fino al cantiere;*
3. *Lavori di restauro in cantiere;*
4. *Produzione e distribuzione di energia per le fasi 1-3;*
5. *Produzione e trasporto di materiali ausiliari per le fasi 1-3;*
6. *Trattamento dei rifiuti prodotti in cantiere, in fase 3.*

Sono state quindi escluse le seguenti fasi del ciclo di vita:

- la manutenzione delle testate restaurate durante il loro utilizzo, dal momento che non sono previste procedure di manutenzione o comunque si ritiene che, al fine del confronto, non ci sia differenza sostanziale nella manutenzione prevista per i differenti interventi di restauro ;
- il fine vita (smaltimento e/o riciclaggio) della trave dopo il suo utilizzo, dal momento che la lunga "vita" del prodotto non permette di definire un'ipotesi realistica.



Ciclo di vita dei sistemi di intervento analizzati

Sono stati usati dati primari per:

- consumi ed emissioni dei processi relativi alla produzione degli adesivi epossidici prodotti da MAPEI S.p.a;
- consumi ed emissioni delle 4 tipologie di intervento di restauro in cantiere;
- tipologia e distanza di trasporto delle materie prime delle 4 tipologie di intervento di restauro in cantiere.

Per la produzione e trasporto degli adesivi, i dati sono stati forniti da MAPEI S.p.a;



Sui processi relativi alla produzione dei materiali legnosi (attività forestale, processi di segheria), sono stati utilizzati dati provenienti da studi precedenti che prevedevano un'analisi specifica e dettagliata di questi aspetti [Frühwald, 2000] e dati provenienti da banche dati contenenti informazioni specifiche per il settore legno [IVAM, 1998].

Sui processi relativi alla produzione dei materiali metallici impiegati nei sistemi di intervento, sono stati presi contatti con l'IISI (International Iron & Steel Institute) che dispone di una banca dati di LCA sui prodotti in acciaio e offre anche un servizio di supporto per la scelta dei processi più appropriati ai singoli casi specifici. [IISI, 2002]

Come fonte prioritaria per i dati secondari sulla produzione di altri materiali, di fonti energetiche e di processi di trasporto si è fatto riferimento alla Banca Dati Professional del software di calcolo GaBi 3 che contiene dati provenienti da banche dati largamente diffuse ed accettate [BUWAL 250, 1998; APME, 1997; IKP/PE, 1998]

Per quanto riguarda i processi di trattamento dei rifiuti in cantiere, sono stati presi in considerazione anche i risultati di uno studio di LCA specifico per la demolizione e il trattamento dei rifiuti edili [Sára et al, 2000].

Dati primari

Sistema 1: sostituzione completa trave

LEGNO UTILIZZATO PER LA SOSTITUZIONE COMPLETA :	
Tipologia	Abete rosso classe C16
Peso	$0,16 \times 0,24 \times (2 \times 0,25 + 6,3) \times 500 = 130,6$ kg
Tasso di umidità	15%
Provenienza:	Luogo o luoghi: Austria ¹ Mezzo o mezzi di trasporto utilizzati: autoarticolato
Lavori in cantiere:	
Stima dei consumi di energia (elettrica, gasolio)	2h di motosega + 2h di verricello 4 kWh
Rifiuti prodotti in cantiere e loro destinazione	legno: 130 kg Rifiuti scalzamento testate: 20 kg

¹ stima della distanza: 800 km

Sistema 2: profilati metallici

DISPOSITIVI BARRE IN ACCIAIO:	
Tipologia acciaio (descrizione dettagliata del tipo di acciaio)	S235 (IPE 80) e S355 (fasce)
Numero e Peso profilati d'acciaio	4 IPE 80 (per 2 testate) $4 \times 1,10 \text{m} \times 6 \text{kg/m} = 26,4$ kg
Numero e Peso fasce d'acciaio	2 (per 2 testate) $2 \times 0,004 \times 0,1 \times [0,16 \times 2 + (0,24 + 0,08) \times 2] \times 7800 = 0,6$ kg
Provenienza:	Luogo o luoghi: regione ¹ Mezzo o mezzi di trasporto utilizzati: autotreno + 20 km di furgone
Lavori in cantiere:	
Stima dei consumi di energia (elettrica, gasolio)	2 kWh
Rifiuti prodotti in cantiere e loro destinazione	legno: $2 \times 0,45 \times 0,16 \times 0,24 \times 500 = 17,2$ kg Rifiuti scalzamento testate: 20 kg

¹ stima della distanza: 200 km

Sistema 3: barre incollate

Legno utilizzato per la protesi:	
Tipologia	Abete rosso C16 (secondo UNI EN 338)
Peso	$2 \times 500 \text{kg/m}^3 \times 0,16 \text{m} \times 0,24 \text{m} \times 0,47 \text{m} = 18,0$ kg
Tasso di umidità	15%
Provenienza	Luogo o luoghi: Austria Mezzo o mezzi di trasporto utilizzati: Autoarticolato fino a FI + 20 km di furgone
MAPEWOOD utilizzato:	
Tipologia	MAPEWOOD 140 (rapporto A:B = 2:1)
Quantità usata per l'intervento specifico	$2 \times 4 \times (1,6^2 - 1,4^2) \times \pi \times 400 \text{m}^3 \times 1,5 \text{g/cm}^3 = 1440 \text{g} = 2,9$ kg
Provenienza	Da Milano a Firenze in autoarticolato + 20 km di furgone

Dispositivi barre in acciaio:	
Tipologia acciaio (descrizione dettagliata del tipo di acciaio)	Fe B 44 k in barre ad aderenza migliorata
Numero e Peso barre d'acciaio:	4+4 (2 testate) 8x0,4x?x0,014x0,014x7800=15,4 kg
Provenienza:	Luogo o luoghi: regione Mezzo o mezzi di trasporto utilizzati: autotreno + 20 km di furgone
Lavori in cantiere:	
Stima dei consumi di materiali (tipologia e quantità)	20 chiodi di diametro 4 mm, L= 60 mm, Peso: 40 g Listelli di legno: 4cm x 4 cm x 50 cm, N=8 ¹ Pulitura attrezzi con carta Scottex ² 200 g di impregnante per legno
Stima dei consumi di energia (elettrica, gasolio)	2 h di motosega e pialletto (ca 2kWh)
Rifiuti prodotti in cantiere e loro destinazione	2 barattoli di plastica da 1 litro con residui colla indurita (discarica) legno: 9x2=18kg Rifiuti scaldamento testate: 20 kg

¹ stima della densità dei listelli in legno: 500 kg/m³; massa totale: 3,2 kg

² stima della quantità consumata di carta Scottex: 100 g

Sistema 4: legno lamellare incollato in opera

Legno utilizzato per la protesi :	
Tipologia	C16 (secondo UNI EN 338)
Peso	2x(2x0,032x0,24x0,65+2x0,032x0,24x0,50+0,032x0,24x0,35)x500= 20,2 kg
Tasso di umidità	15%
Provenienza	Luogo o luoghi: Austria Mezzo o mezzi di trasporto utilizzati: Autoarticolato fino a FI + 20 km di furgone
MAPEWOOD utilizzato:	
Tipologia	MAPEWOOD 140
Quantità usata per l'intervento specifico	Volume colla: 2x0,005m x (0,65x0,24x2+0,5x0,24x2)=0,0056 mc Peso specifico colla: 1500 kg/mc Peso colla: 8,2 kg + 'sprechi'=9 kg
Lavori in cantiere:	
Stima dei consumi di materiali (tipologia e quantità)	72 chiodi di diametro Ø=4 mm, L=60 mm, Peso: 144g Pulitura attrezzi con carta Scottex ¹ 300 g di impregnante per legno
Stima dei consumi di energia (elettrica, gasolio)	2kWh
Rifiuti prodotti in cantiere e loro destinazione	5 barattoli di plastica da 1 litro con residui colla indurita (discarica) legno: 2x10,1=20,2 kg Rifiuti scaldamento testate: 20 kg

¹ stima della quantità consumata di carta Scottex: 100 g

Modellazione ed elaborazione dei dati

I 4 sistemi analizzati sono stati modellati ed analizzati tramite il software di calcolo GaBi. Il sistema è stato modellizzato in modo da avere una struttura il più possibile disaggregata dei singoli sistemi. Questo permette infatti di interpretare i risultati nel modo più efficace possibile.

VALUTAZIONE DELL'IMPATTO AMBIENTALE

Di fronte a dati così complessi e numerosi non è immediata la formulazione di una interpretazione; conclusioni rapide e chiare non si possono raggiungere facilmente. Compito della fase di valutazione degli impatti è proprio quello di convertire i dati di bilancio forniti dall'inventario in una serie di misure d'impatto che permettano di valutare gli effetti ambientali del sistema in esame

Per quanto riguarda i metodi di caratterizzazione delle diverse categorie di impatto esiste un vasto numero di modelli messi a disposizione dalla letteratura scientifica per l'LCA. Dal momento che la maggior parte di questi modelli applica assunzioni e stime non sempre univocamente accettate a livello internazionale e non sempre rispondenti ai requisiti dettati dallo standard ISO 14042 [UNI, 2001], la loro applicazione ed interpretazione richiede particolare attenzione.

Dopo la Caratterizzazione la Valutazione dell'impatto dell'LCA prevede la Normalizzazione dei risultati. La Normalizzazione è uno stadio opzionale [UNI/ISO 14042] che permette di relazionare il valore di ogni impatto potenziale per unità funzionale ad una situazione di riferimento. La finalità principale è quella di trovare una relazione tra il carico ambientale di un singolo



prodotto e quello complessivo nell'ambiente circostante. Un istogramma che rappresenti i risultati di una Normalizzazione permette di capire a quale problema il sistema produttivo contribuisce maggiormente in rapporto alla situazione locale, regionale o globale. E' importante sottolineare questo concetto poiché spesso si utilizzano erroneamente i risultati della Normalizzazione per confrontare tra di loro le varie categorie d'impatto. Per poter confrontare le varie tematiche ambientali e stabilire quale sia l'impatto predominante per il prodotto esaminato è necessario attribuire un peso ai risultati della Normalizzazione (fase di Ponderazione) [Scimia e Masoni, 1999].

La Tabella seguente riassume i tipi di impatto considerati ed i relativi metodi di caratterizzazione:

Tema ambientale	Risultati dell'inventario	Metodologia di caratterizzazione	Indicatore
Consumo di risorse naturali	disponibilità di risorse rinnovabili e non	Indice disponibilità risorse Fava/SETAC ecc. - GaBi	1/kg
Consumo di energia primaria	estrazione di combustibili fossili, nucleari e sfruttamento di altre fonti energetiche	Consumo totale di energia primaria	MJ
Cambiamenti climatici	emissioni in atmosfera di gas serra	modello IPCC 1996	kg di CO ₂ eq
Distruzione della fascia di ozono stratosferico	emissioni in atmosfera di gas lesivi dell'ozono	modello EPA/WMO 1995	kg CFC-11 eq.
Acidificazione	emissioni in atmosfera di composti acidificanti	modello CML 1992 in GaBi	kg di SO ₂ eq.
Eutrofizzazione	emissioni di nutrienti in atmosfera, acque e suolo	modello CML 1992 in GaBi	kg di PO ₄ ³⁻ eq.
Formazione di ossidanti fotochimici (Smog fotochimico)	emissioni in atmosfera di composti organici e inorganici	modello CML 1992 in GaBi	kg di etilene equivalenti
Ecotossicità acquatica	emissioni tossiche in aria, acqua e suolo.	USES 1.0 in GaBi	kg DCB eq.
Ecotossicità terrestre	emissioni tossiche in aria, acqua e suolo.	USES 1.0 in GaBi	kg DCB eq.
Tossicità umana	emissioni tossiche in aria, acqua e suolo.	USES 1.0 in GaBi	kg DCB eq.

Il metodo di Normalizzazione che è stato scelto all'interno di GaBi3 è quello che normalizza rispetto all'impatto dei paesi appartenenti alla Comunità Europea (European Community). Le fonti di riferimento per questo metodo di Normalizzazione sono numerose ma i riferimenti principali sono Guinée, J. 1992 e Gebler, W. 1992 che sono le fonti principali anche per i metodi proposti dall'Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), dal World Meteorological Organization (WMO) e dal World Resource Institute (WRI).

La Ponderazione dei differenti impatti è molto importante per ottenere risultati sintetici di uno studio di LCA, ma attualmente essa non può ancora essere considerata una vera e propria procedura scientifica. La Ponderazione è una fase ancora affetta da forti elementi di soggettività e i fattori di peso possono essere definiti tenendo conto di scelte politiche nazionali o internazionali, preferenze sociali, scelte aziendali o addirittura individuali. Alcuni esempi possono essere:

- linee guida per uno sviluppo sostenibile;
- target ambientali (a breve o lungo termine) politicamente definiti;
- opinione dei cittadini;
- opinione di gruppi di esperti;
- target aziendali.

Per questo motivo si è deciso di adottare più metodi di Ponderazione allo scopo di confrontare l'effetto dei differenti metodi sui risultati finali.

Esaminando i risultati dell'analisi d'inventario appare evidente l'elevata quantità di flussi in ingresso ai Sistemi 3 e 4. Analizzando più nel dettaglio i singoli flussi si nota che la maggior parte di questi (circa il 90 %) è legata al consumo di acqua nella produzione della resina epossidica e degli indurenti. Il Sistema 3 ha un consumo di acqua tre volte superiore a quello dei Sistemi 1 e 2, mentre il Sistema 4 ha un consumo di acqua addirittura otto volte superiore rispetto ai Sistemi 1 e 2.

Per quanto riguarda i flussi in uscita, il valore elevato per il Sistema 1 proviene anche dal fatto che vengono conteggiati i co-prodotti delle segherie (quali il truciolo, la segatura con un contributo pari a circa il 25%). Altri flussi rilevanti in uscita (in



percentuale sulla massa) per i sistemi 1, 3 e 4 sono il gas esausto dalla produzione di energia termica (contributo pari a circa il 10-15%) e l'acqua di scarico relativa alla produzione di energia elettrica (contributo pari a circa il 50%).

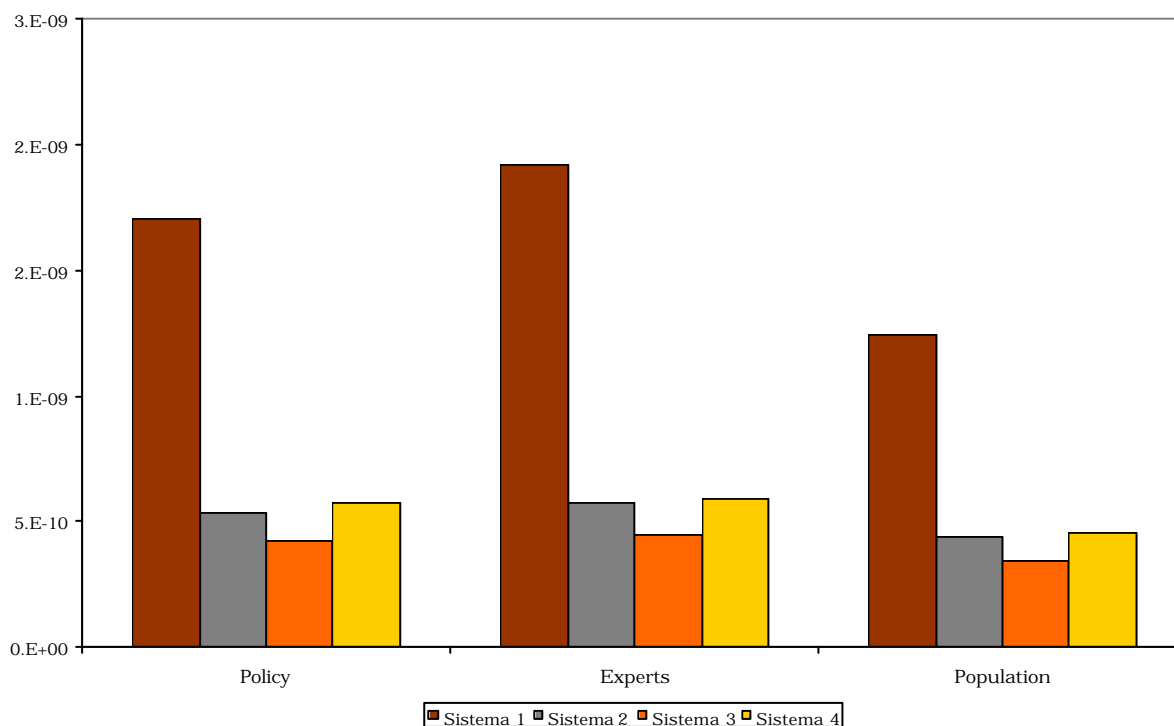
I risultati dell'analisi d'inventario sono stati classificati e caratterizzati applicando i metodi di caratterizzazione prescelti. Alcuni dei metodi prescelti non appartengono a quelli univocamente riconosciuti ed accettati a livello internazionale, come per esempio il "resource index" e le categorie di impatto sulla tossicità ed ecotossicità. Allo stato dell'arte attuale non esistono comunque in assoluto per queste categorie esempi di riconoscimento e accettazione univoca. Per questo motivo, queste categorie sono analizzate con un approfondimento minore rispetto a quelle largamente accettate e diffuse.

Risultati della valutazione dell'impatto

	Sistema 1	Sistema 2	Sistema 3	Sistema 4
Consumo di energia primaria [MJ]	643.74	781.97	444.1	868.99
Consumo di risorse naturali [1/(Mio a*kg)]	0.005669	0.00036	0.00186	0.003435
Cambiamenti climatici (GWP 100 years) [kg CO2-Equiv.]	649.6	153.2	115.42	155.24
Distruzione della fascia di ozono stratosferico (ODP, catalytic) [kg R11-Equiv.]	2.94E-06	2.83E-07	9.65E-07	1.61E-06
Acidificazione (AP) [kg SO2-Equiv.]	0.15128	0.22083	0.16318	0.30587
Eutrofizzazione (EP) [kg Phosphate-Equiv.]	0.022248	0.019128	0.019656	0.039495
Smog fotochimico (POCP) [kg Ethene-Equiv.]	0.23421	0.062204	0.04396	0.059857
Tossicità umana (HTP) [kg DCB-Equiv.]	0.96934	18.093	12.291	1.4787
Ecotossicità acquatica (AETP) [kg DCB-Equiv.]	0.69574	0.066163	0.57624	1.2671
Ecotossicità terrestre (TETP) [kg DCB-Equiv.]	16.695	336	374.14	100.58

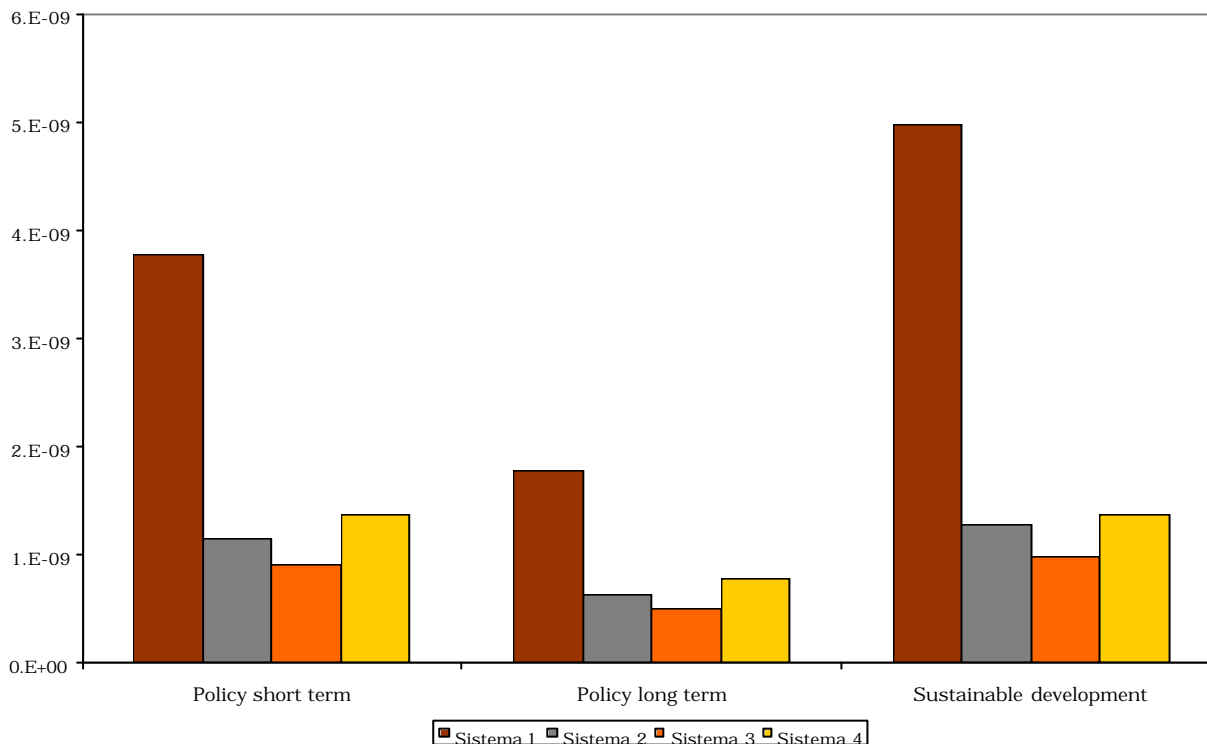
Conclusioni

I diversi metodi di Ponderazione danno risultati abbastanza omogenei per quanto riguarda il confronto tra i quattro sistemi. Il Sistema 3 (barre incollate) risulta essere sempre il migliore, mentre il Sistema 1 (sostituzione integrale) è sempre il peggiore dal punto di vista ambientale, a causa dell'elevato peso dello smaltimento in discarica della trave. I valori dei Sistemi 2 (profilati metallici) e 4 (legno lamellare in opera) sono spesso simili, ma il sistema 2 è leggermente migliore.



Confronto dei risultati di ponderazione

(Policy = target ambientali politicamente definiti, Expert = opinione di gruppi di esperti, Population = opinione dei cittadini)



Confronto dei risultati della ponderazione

(Policy short term = target ambientali politicamente definiti a breve termine, Policy long term = target ambientali politicamente definiti a lungo termine, Sustainable development = linee guida per uno sviluppo sostenibile)

Il Sistema 1 ha un impatto ambientale elevato che deriva dalla decomposizione anaerobica della trave demolita e portata in discarica (emissione di metano) che ha un effetto determinante sul cambiamento climatico e sullo smog fotochimico. Avendo analizzato lo studio anche con un'ipotesi migliorativa (tasso di emissione di metano inferiore o recupero del legno), la situazione non cambia in un'ottica di confronto con gli altri sistemi di intervento.

L'impatto ambientale del Sistema 4 è legato al consumo di resine perché la produzione di questi prodotti ha un effetto significativo sull'acidificazione, sull'eutrofizzazione e sul consumo di energia. Applicando un'incertezza di circa il 30% sui dati secondari utilizzati il Sistema 4 risulta migliore del Sistema 2 per le categorie di impatto acidificazione e consumo di energia primaria. Questo significa che se riducessimo del 30% il consumo di adesivo nel sistema di intervento 4, esso sarebbe migliore del Sistema 2 per questi aspetti ambientali.

Gli effetti negativi del Sistema 2 sull'ambiente sono legati alla produzione del profilato in acciaio che contribuisce in modo significativo al consumo di energia, all'acidificazione, alla tossicità umana e all'ecotossicità terrestre.

Il Sistema 3 risulta il migliore, dal momento che si utilizza molto meno adesivo rispetto al Sistema 4 e meno acciaio rispetto al Sistema 2, e quindi si evitano gli effetti negativi legati alla produzione di questi materiali. Comunque si sottolinea che riducendo di circa il 10% il consumo di adesivo nel Sistema 3 si avrebbe un miglioramento significativo in un'ottica di confronto (diventerebbe il migliore anche per la categoria di acidificazione).

E' stato messo in evidenza anche il contributo significativo derivante dalla produzione di polietilene (imballaggio dell'adesivo) all'ecotossicità acquatica. Un altro punto debole dei sistemi che utilizzano adesivi è dovuto all'elevato consumo d'acqua per la produzione delle resine.

I processi relativi alla produzione di energia (elettrica, termica, meccanica) danno contributi significativi alle categorie di impatto di eutrofizzazione (soprattutto nel Sistema 1) e consumo delle risorse. I processi di trasporto danno il maggior contributo alla distruzione dell'ozonofera (soprattutto il trasporto del legno dall'Austria), causato dalle emissioni prodotte durante la produzione del gasolio consumato.

Si può quindi concludere che i sistemi innovativi di intervento (Sistemi 3-4) risultano essere vantaggiosi rispetto ai sistemi tradizionali (Sistemi 1-2).