

La forma della sonda e la disposizione della bobina fanno sì che il campo magnetico allungato secondo l'asse della sonda sia distribuito sul piano su cui giace. Gli oggetti metallici che si trovano nell'area di influenza di questo campo alterano il voltaggio della bobina. Questa alterazione avviene secondo un rapporto diametro/copertura dell'oggetto metallico. Pertanto, nel caso di armature metalliche per cemento armato, è possibile determinare diametro e copertura grazie ad una scala predisposta delle unità di misura.

L'apparecchio è portatile, alimentato con batterie interne ed è dotato di una sonda collegata via cavo con l'unità di misura. Alcuni modelli hanno sonde con diversa sensibilità di rilievo e capacità di definizione.



Figura 26 - Pachometro a induzione (Mod. 58-E60 della Controls).

L'indagine si effettua passando sistematicamente la sonda sulla superficie da investigare, dunque è necessario un contatto diretto sonda superficie.

La sonda è assai sensibile ed il segnale è molto amplificato soprattutto quando si misurano oggetti di piccole dimensioni; di conseguenza, le deviazioni della temperatura sulla sonda possono causare una leggera deflessione dell'ago indicatore.

Pertanto, di tanto in tanto si deve ritarare l'apparecchio sullo zero. La sonda viene guidata con movimento lento e regolare poiché movimenti rapidi, fanno deflettere in modo anomalo l'ago dell'indicatore analogico (induzione del campo magnetico terrestre).

Lo strumento è nato per il rilievo delle gabbie di armatura nei pilastri e nelle travi e di queste è in grado di rilevare: sia numero e diametro dei ferri che lo spessore del copriferro.

Naturalmente con lo stesso strumento è possibile rilevare: forme, dimensioni e disposizione di ogni tipo di rinforzo metallico e geometria degli impianti idrico sanitari.

È un indispensabile supporto all'indagine termografica intesa come rilievo qualitativo delle strutture di un edificio.

Ultrasuoni

Il principio fisico si basa sulle vibrazioni meccaniche con frequenza compresa tra i 16 Hz ed i 16/20 KHz, che sono percepite come sonore dall'orecchio umano. Frequenze superiori non possono più essere udite e si entra nel campo degli ultrasuoni, che si estende dai 20 KHz fino ad oltre 1000 MHz.

Le oscillazioni ultrasoniche primarie come quelle soniche consistono in onde longitudinali ed onde di taglio. Le onde ultrasoniche a differenza di quelle soniche non si trasmettono altrettanto facilmente nei gas, quali ad esempio l'aria.

Entrambe possono trasmettersi su lunghe distanze attraverso liquidi e solidi quando il materiale sia omogeneo, ma in presenza di discontinuità quale un'interfaccia tra materiali differenti, esse vengono riflesse e rifratte.

La caratteristica nelle onde di compressione degli ultrasuoni è che si propagano per lunghi tragitti praticamente inalterate in materiali liquidi o solidi, ma incontrando uno strato di aria (come una microfessura od una faccia di opposizione tra due sostanze) vengono quasi completamente riflesse. E' questa la proprietà che viene sfruttata per individuare discontinuità o per misurare lo spessore di strati. Infatti un'onda ultrasonica della lunghezza di circa un millimetro verrà quasi totalmente riflessa da una fessura di soli 13×10^{-4} mm.

La velocità di propagazione e la frequenza di risonanza riflettono le caratteristiche di compattezza e le proprietà elastiche del materiale attraversato.

La velocità di propagazione dell'ultrasuono permette di individuare zone alterate prima che le modificazioni della materia siano visibili ad occhio nudo.

La velocità di un impulso è data da:

$$V = \sqrt{\frac{E_d}{\rho} \cdot \frac{(1-\nu)}{(1+\nu) \cdot (1-2\nu)}}$$

dove:

V = velocità dell'impulso [m/s];

E_d = modulo elastico dinamico [N/mm^2];

ν = rapporto dinamico di Poisson;

ρ = densità [kg/m^3].

La velocità dell'impulso non è significativamente influenzata dalle dimensioni del campione di prova, eccetto quando una o più delle dimensioni laterali è piccola in relazione alla lunghezza d'onda dell'impulso.

Se però sono noti i valori di ρ e ν , è possibile utilizzare l'equazione per determinare i valori di E_d .

In base a queste relazioni, già da parecchi anni sono stati messi a punto metodi di indagine ultrasonica in situ per individuare le caratteristiche fisiche e meccaniche del calcestruzzo.

In base a quanto esposto se ne ricava che gli ultrasuoni possono essere utilizzati sia per individuare nei materiali anomalie, quali fessure, porosità, cavità, sia per ricavare le caratteristiche meccaniche.

L'apparecchiatura usata di norma può essere schematicamente rappresentata dai componenti qui descritti.

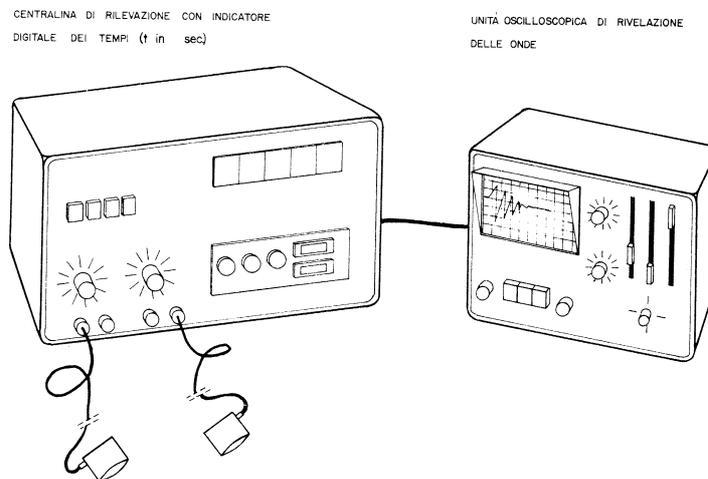


Figura 27 - Apparecchiatura per il rilievo ultrasonico.

Una sonda ricevente ed una emittente (identiche ed intercambiabili) di tipo piezoelettrico (più raramente a magnetostrizione) con frequenza fissa.

Le frequenze di lavoro possono variare mediamente dai 50 ai 100 KHz. La scelta tra queste frequenze e quindi delle sonde è legata al singolo problema. Genericamente le onde di bassa frequenza sono debolmente attenuate dai materiali e perciò penetrano

ad elevate profondità: con esse è possibile operare su materiali a grana grossa e su superfici ruvide ma non sono in grado di risolvere piccole discontinuità. Viceversa le frequenze più alte consentono maggiore risoluzione, ma hanno meno potenza di penetrazione.

L'apparecchiatura di rilevazione consiste essenzialmente in un emettitore di impulsi elettrici cadenzati per l'eccitazione della sonda emittente, un cronometro elettronico con una divisione per μ secondi con visualizzazione digitate.

Lo "start" e lo "stop" del cronometro è collegato rispettivamente alla partenza dell'impulso per la sonda emittente ed all'arrivo del primo impulso della sonda ricevente. In questo modo è possibile fare rilevamenti di velocità di diffusione delle onde ultrasoniche nel mezzo.

All'apparecchiatura di rilevazione può essere collegato un oscilloscopio per l'analisi delle onde ultrasoniche.

Poiché, come si è visto, la vibrazione ultrasonica è assai disturbata dalla più piccola discontinuità è necessario assicurare il miglior contatto possibile fra le sonde ed il materiale. Questo contatto viene assicurato frapponendo tra la superficie sensibile delle sonde e quella da indagare uno strato di materiale viscoso come olio, grasso o simili.

Gli schemi, usati per gli strumenti descritti per indagare i materiali usati nell'edilizia sono: per trasmissione diretta, per trasmissione semidiretta, per trasmissione indiretta.

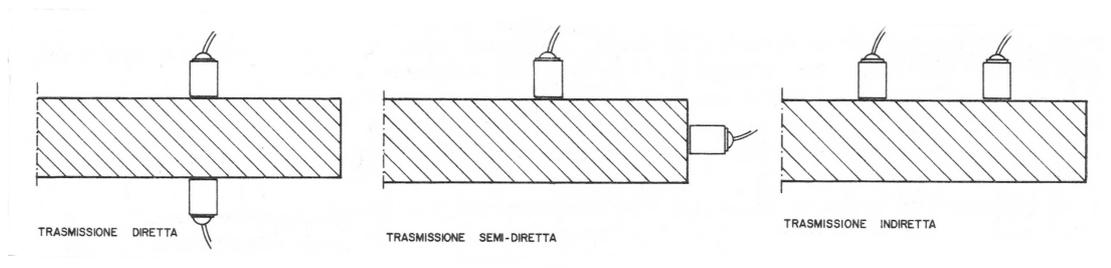


Figura 28 - Posizioni possibili per il trasmettitore e il ricevitore.

La trasmissione diretta prevede che le due sonde siano applicate in due punti speculari su due facce opposte dell'oggetto indagato. Questo tipo di indagine è certamente il più sensibile dei tre elencati poiché la maggior parte dell'energia emessa è diretta alla sonda ricevente.

Non sempre però è possibile utilizzare questo schema e ciò non solo per questioni di accessibilità ai punti di indagine ma anche per ragioni dovute alla particolare conformazione strutturale dell'oggetto indagato. Ad esempio nelle strutture linee

bisogna innanzitutto tenere conto della conformazione strutturale: a fibre parallele al senso di allungamento. In questo caso ogni fascio di fibra si comporta, rispetto al successivo, come un piano di discontinuità e quindi di riflessione per le onde ultrasoniche.

La trasmissione semi diretta è meno sensibile della trasmissione diretta a causa della incertezza della lunghezza di traiettoria, ma è sufficientemente precisa se la distanza è misurata da centro a centro delle facce del trasduttore.

La trasmissione indiretta è il metodo di applicazione meno sensibile. La velocità dell'impulso di solito è influenzata dallo strato superficiale del materiale, che presenta caratteristiche diverse dagli strati profondi. Per questo, quando si deve usare tale metodo per la determinazione della profondità di una fessura o quando soltanto una faccia della struttura è accessibile, deve essere effettuata una serie di misure con la sonda posta a varie distanze.

La sonda trasmittente deve essere posta in un punto determinato a contatto con la superficie ed il ricevitore deve essere poi posto a eguali distanze lungo una linea prestabilita.

I tempi di trasmissione tracciati su un grafico in funzione della distanza permetteranno di stabilire la velocità media dell'impulso e di ricavare le caratteristiche meccaniche del materiale indagato. L'uso degli ultrasuoni nelle indagini non distruttive è codificato negli acciai e nel calcestruzzo. Alla stessa stregua del calcestruzzo può essere indagata la pietra da costruzione.

Di questi materiali è possibile ottenere sia in laboratorio che in situ:

- il grado di omogeneità;
- la presenza di vuoti, fessure od altre imperfezioni;
- la presenza di strati di alterazione e di conseguenza rilevare la reale sezione resistente del singolo manufatto;
- il valore del modulo elastico e del rapporto dinamico di Poisson.

Anche sugli elementi strutturali in legno, essenzialmente travi, è possibile dare notizie sulle caratteristiche fisico-meccaniche, ed indagare sul loro stato di conservazione generale. Su questo argomento, di grande importanza per la diagnosi nel restauro, sono in corso alcune ricerche delle quali si spera presto di poter ottenere una serie di nuovi orientamenti ed informazioni che vadano ad arricchire questo indispensabile metodo di indagine.

Penetrometro Windsor

Stima le resistenze dei singoli materiali a mezzo infissione di una sonda in lega speciale, sparata da una pistola che utilizza cariche di potenza nota, nell'elemento in prova.



Figura 29 - Penetrometro Windsor con visualizzatore digitale (Mod.58-C179 della Controls).

Tabelle comparative permettono di correlare, in base ad esperienze condotte in U.S.A. (il sistema è stato normalizzato ASTM C 803-80) la profondità di infissione della sonda con la resistenza a compressione del materiale in cui essa è stata infissa. Anche se l'incognita sulle reali caratteristiche della muratura, diversa sicuramente dai provini americani, può inficiare di errore la stima della resistenza caratteristica; sicuramente tale errore è recuperabile confrontando i risultati con quelli di altre prove condotte in maniera diffusa sull'elemento murario.

P.O.R.T. (Pull-Out and Release Test)

Nel caso in cui la muratura sia costituita da pietrame ben squadrato si potrà determinare lo stato deformativo corticale in sito sotto l'azione dei carichi permanenti utilizzando la tecnica denominata Pull-Out and Release Test (P.O.R.T.), come di seguito specificato.

Su ogni blocco in prova, opportunamente individuato, verranno solidarizzate n°. due rosette estensimetriche triassiali a 45 gradi, oppure n°. due estensimetri di base opportuna, con relativa protezione dall'irraggiamento solare.

Ciascuno dei blocchi così strumentato (dopo aver provveduto all'azzeramento) viene estratto o comunque svincolato dal contatto con gli altri elementi superiori e laterali in modo che il blocco in esame risulti scarico. Vengono di nuovo letti i valori estensimetrici, che dalla fase di rilascio delle deformazioni nel blocco assumeranno entità diverse da quelle registrate nella fase iniziale, dipendenti dallo stato tensionale preesistente nel blocco stesso. Tali valori delle deformazioni corticali unitarie per i vari blocchi strumentati, unitamente alle informazioni che verranno raccolte in laboratorio sul modulo elastico E del materiale, forniscono una stima dello stato tensionale corticale dovuto ai carichi permanenti.

Nel caso di murature di laterizio, la prova potrà essere condotta con le medesime modalità, avendo l'accortezza di operare su campioni costituiti da parti murarie comprendenti almeno tre ricorsi di mattoni.

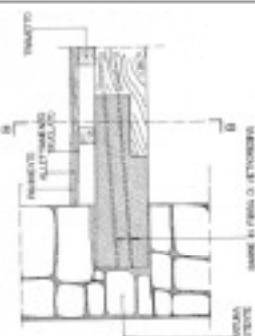
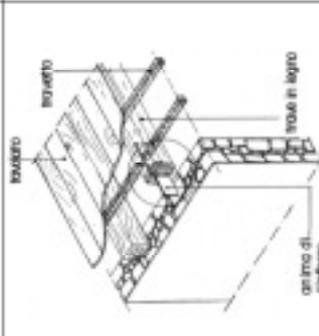
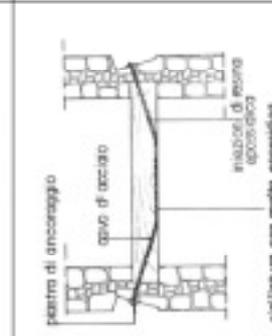
Le tensioni corticali così valutate, unitamente a quelle ottenute con le indagini sotto carichi accidentali, permettono la stesura di una mappa di tutti gli stati tensionali che verrà utilizzata insieme a tutte le altre informazioni e parametri raccolti per la fase fondamentale di controllo e/o identificazione del modello numerico.

Microcarotaggi

E' un metodo semidistruttivo per la determinazione della resistenza alla compressione in sito. L'apparecchiatura si compone di un sistema di prelievo rapido delle microcarote del diametro di $\phi > 2,8$ cm. (nominale), con raffreddamento ad acqua a circuito chiuso, successiva intestatura delle microcarote ed esecuzione della prova mediante pressa portatile ad azione manuale. La resistenza alla compressione è letta su due manometri corredati di indice di massima.

Trattandosi di una prova di compressione di provini cilindrici (microcarote) prelevati in sito, il risultato dell'indagine è già la resistenza a compressione. I risultati ottenuti si riferiscono a microcarote di diametro reale $\phi 26,5$ mm (nominale $\phi 28$ mm) e altezza H variabile, con rapporto H/D comunque compreso tra 1 e 2.

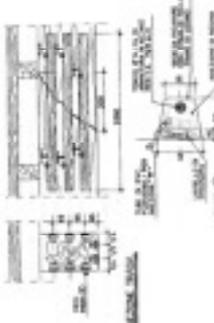
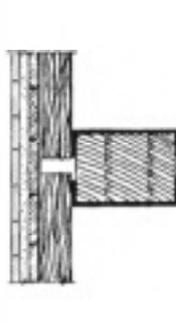
Allegato C – Tecniche d'intervento

Tipologia	Problematiche	Cause	Interventi	Schema intervento	Pro	Contro
Solai in legno	Degrado della testa delle travi	Attacco animale, muffe, umidità	Inserimento di barre in vetroresina: previo puntellamento e rimozione delle zone ammalorate della trave si eseguono i fori con trapani a rotazione. In tali fori si inseriranno le barre in vetroresina e verrà eseguito il getto del formulato epossidico all'interno del cassero che può essere a perdere o a recupero. ¹		<ul style="list-style-type: none"> Ottima resistenza meccanica e agli agenti de-gradanti 	<ul style="list-style-type: none"> Costoso Necessità di manodopera e attrezzature specializzate
			Anima di rinforzo e piastra di sostegno: dopo aver rimosso le parti ammalorate, si realizza nella trave una scanalatura. Si posiziona sulla muratura in corrispondenza dell'appoggio una piastra di acciaio. A questo punto si esegue un primo getto di malta epossidica nella scanalatura, si inserisce la piastra di acciaio e si fa un secondo ed ultimo getto di malta. ²			<ul style="list-style-type: none"> Rimozione della pavimentazione sugli appoggi
	Riduzione della sezione resistente	Attacco animale, muffe, umidità	Tiranti pretesi aderenti alle travi: si eseguono gli ancoraggi nella muratura previa consolidazione locale di quest'ultima. Si eseguono i fori con trapani a rotazione, sul piano verticale mediano, per il passaggio dei tiranti. Posa in opera del tirante e sua solidarizzazione al trave ligneo per mezzo di resine epossidiche. Sigillatura con malta epossidica. ³		<ul style="list-style-type: none"> Praticamente invisibile 	<ul style="list-style-type: none"> Necessità di eseguire nella muratura gli ancoraggi Difficoltà nell'eseguire i fori

¹ Rocchi P., *op. cit.*, pag.84-85

² Baruchello L. e Assenza G., *op. cit.*, pag. 343-344; Rocchi P., *op. cit.*, pag.86-87

³ Rocchi P., *op. cit.*, pag.79

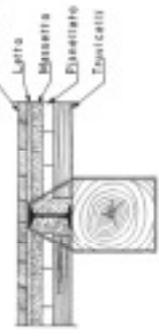
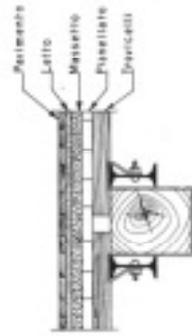
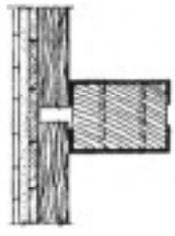
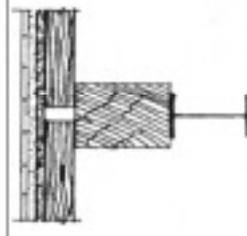
Tipologia	Problematiche	Cause	Interventi	Schema intervento	Pro	Contro
Solai in legno	Riduzione della sezione resistente	Attacco animale, muffe, umidità	Lamina in acciaio: si esegue l'incasso di una lamina di acciaio disposta verticalmente in una scanalatura realizzata dall'estradosso della trave in legno. Tale lamina si sigilla con resine epossidiche. ⁴ Utilizzo di resine epossidiche (fortemente addizionate di cariche) e di barre di armatura che possono essere in acciaio inossidabile o in vetroresina, previa asportazione delle parti degradate. Le barre si devono innescare per almeno 20 cm nella parte sana. ⁵		<ul style="list-style-type: none"> Ad opera ultimata l'intervento è invisibile. La resina additivata di cariche favorisce il trasferimento degli sforzi dal legno alle barre, abbassa il calore di reazione e diminuisce il costo dell'intervento. 	<ul style="list-style-type: none"> Le barre di acciaio sono soggette a ossidazione, quelle in vetroresina no, però sono meno resistenti. Va bene solo per parti compresse di sezioni inflesse
		Lesione	Barre in acciaio (o in vetroresina) fissate con resine in appositi incassi realizzati in corrispondenza della parte lesionata della trave. Si deve eseguire gli incassi con profondità pari ad almeno due volte il diametro del fondo ed inferiore ad un quinto della dimensione minore della trave. Per ciascun incasso si prevedono due ugelli di iniezione. ⁶ Affiancamento di travi metalliche o lignee: si può applicare due travi di ferro a C (o altro profilo) che vanno a consolidare la parte di trave lignea danneggiata. I due profilati sono tra loro collegati mediante perni metallici. ⁷		<ul style="list-style-type: none"> I listelli, che si inseriscono per coprire la barra prima dell'iniezione di resina, sono dello stesso legno della trave in modo tale da favorire il mimetismo dell'intervento. 	<ul style="list-style-type: none"> Le barre di acciaio sono soggette a ossidazione, quelle in vetroresina no, però sono meno resistenti.
					<ul style="list-style-type: none"> Rapido ed efficiente 	<ul style="list-style-type: none"> Antiestetico Non applicabile su travi decorate per via del loro valore storico

⁴ Baruchello L. e Assenza G., *op. cit.*, pag. 332-334

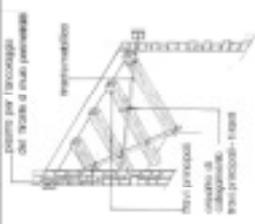
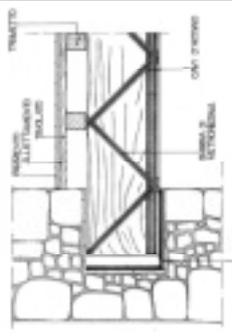
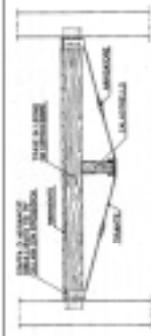
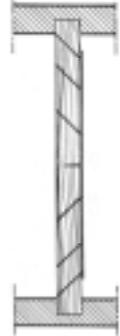
⁵ Baruchello L. e Assenza G., *op. cit.*, pag. 341-342

⁶ Baruchello L. e Assenza G., *op. cit.*, pag. 336-340;

⁷ Baruchello L. e Assenza G., *op. cit.*, pag. 330-332; Rocchi P., *op. cit.*, (AA.VV.), pag. 192; Koenig G. K., *op. cit.*, pag. 380 vol.III

Tipologia	Problematiche	Cause	Interventi	Schema intervento	Pro	Contro
Solai in legno	Elevata inflessione	Variazioni dello schema statico, aumento dei carichi	Rinforzo di trave principale mediante inserimento di trave metallica nella parte superiore. Tale trave deve essere fissata tramite cravatte ¹² oppure mediante perni filettati ¹³ .		<ul style="list-style-type: none"> Riduzione della freccia 	<ul style="list-style-type: none"> Rimozione del pavimento e del massetto di sottofondo Antiestetico
			Rinforzo con profilati affiancati alla trave: si può applicare due travi di ferro a doppio T (o a C) sottoscocca nell'angolo fra i fianchi del trave e il piano intradosso dei travicelli, vincolando, con cravatte, ai travi di ferro quelle di legno e contrastando con biette i travicelli ai travi di ferro. ¹⁴		<ul style="list-style-type: none"> Aumento della portata del solaio 	<ul style="list-style-type: none"> Non applicabile se la trave principale è decorata Antiestetico
			Rinforzo con profilati metallici affiancati alla trave: si può applicare due travi di ferro a C che vanno ad avvolgere la trave lignea, i due profilati sono tra loro collegati mediante perni metallici. ¹⁵		<ul style="list-style-type: none"> Aumento della portata del solaio 	<ul style="list-style-type: none"> Non applicabile se la trave principale è decorata Saturazione la struttura esistente
			Rinforzo con profilati metallici affiancati alla trave: si posiziona un IPE al di sotto delle travi lignee, forzando l'inserimento al fine di recuperare la freccia. ¹⁶		<ul style="list-style-type: none"> Aumento della portata del solaio 	<ul style="list-style-type: none"> Aumento dello spessore del solaio Antiestetico

¹² Mastrodicasa S., *op. cit.*, pag. 593-595; Meccanica delle strutture e restauro strutturale, Alfredo Corsanego in Tecniche della conservazione a cura di Amedeo Bellini
¹³ Baruchello L. e Assenza G., *op. cit.*, pag. 330-332; Koenig G. K., *op. cit.*, pag. 380 vol.III
¹⁴ Mastrodicasa S., *op. cit.*, pag. 593-595; Baruchello L. e Assenza G., *op. cit.*, pag. 330-332; Rocchi P., *op. cit.* (AA.VV.), pag. 192; Koenig G. K., *op. cit.*, pag. 380 vol.III
¹⁵ Baruchello L. e Assenza G., *op. cit.*, pag. 330-332; Rocchi P., *op. cit.* (AA.VV.), pag. 192; Koenig G. K., *op. cit.*, pag. 380 vol.III
¹⁶ Baruchello L. e Assenza G., *op. cit.*, pag. 330-332; Rocchi P., *op. cit.* (AA.VV.), pag. 191

Tipologia	Problematiche	Cause	Interventi	Schema intervento	Pro	Contro
Solai in legno	Elevata inflessione	Variazioni dello schema statico, aumento dei carichi	<p>Irrigidimento tramite tiranti disposti a croce sotto l'impalcato e cravatte di collegamento tirante-trave. Vengono eseguiti dei fori nella muratura per il passaggio dei tiranti. Posizionamento delle piastre e dei tiranti con corrispettivo collegamento.</p> <p>Collegamento tra tiranti e travi lignee per mezzo di cravatte.¹⁷</p> <p>Inserimento di barre in vetroresina (o in acciaio): si posizionano due barre nella parte inferiore in corrispondenza del piano verticale mediano e una serie di barre in diagonale che partono da uno spigolo e arrivano a quello opposto. I fori si eseguono con trapano a rotazione e la solidarizzazione avviene per mezzo di miscele epossidiche.¹⁸</p> <p>Si utilizza uno o più tiranti metallici disposti, mediante opportuni calastrelli, ad una certa distanza dalla trave di legno e collegati nei pressi della testata della stessa realizzando, così, una trave reticolare.¹⁹</p> <p>Rinforzo con piastra di ferro collegata con chiavarda: si applica un ferro piatto longitudinale nella mezzeria della faccia inferiore del trave di legno e, entro opportuni fori a 45°, praticati lungo il piano longitudinale medio verticale, si inseriscono delle chiavarde per riportare all'estradosso lo sforzo di trazione del ferro.²⁰</p>	   	<ul style="list-style-type: none"> Leggerezza e quindi ottimo in zona sismica 	<ul style="list-style-type: none"> Parziale o totale rimozione del controsoffitto Facile accesso all'esterno della muratura per il posizionamento delle piastre
			<ul style="list-style-type: none"> Si viene a creare un comportamento simile a quello di una trave in c.a. 	<ul style="list-style-type: none"> Non si aggravano le pareti in muratura, ma si sfrutta il funzionamento dello schema a capriata 	<ul style="list-style-type: none"> Necessità di travi in buone condizioni Particolarmente invasivo e difficilmente reversibile 	<ul style="list-style-type: none"> Intervento particolarmente estetico
				<ul style="list-style-type: none"> Non è necessario nessun intervento che interferisca con la muratura su cui poggia la trave 	<ul style="list-style-type: none"> Impraticabile nelle travi lignee con intradosso adfrescato Il resto della trave deve essere in buone condizioni Intervento invasivo 	

¹⁷ Rocchi P., op. cit., pag. 78

¹⁸ Rocchi P., op. cit., pag. 80-81

¹⁹ Baruchello L. e Assenza G., op. cit., pag. 335; Rocchi P., op. cit., pag. 82-83

²⁰ Mastrodicusa S., op. cit., pag. 594-599; Rocchi P., op. cit., pag. 80; Baruchello L. e Assenza G., op. cit., pag. 334; Koenig G. K., op. cit., pag. 380 vol.III