



Scientific Report

*Trattamento Numerico e interpretazione del dato NDT per la
verifica dei solai
- Elaborazioni Numeriche-*

Authors: G. Porco, F. Forestieri, M. Scattarreggia

Scientific Publications by Sismlab s.r.l.
Spin-Off University of Calabria
Rende (CS), Italy
N.09 - III- 2021
ISBN: 979-12-80280-08-4

EDIZIONI SISMLAB

Scientific Publications by Sismlab s.r.l.
Spin-Off University of Calabria
Rende (CS), Italy

N.09 - March 2021
ISBN: 979-12-80280-08-4
(*Year II*)

*Available online at www.sismlab.com
info@sismlab.it - sismlab@pec.it*

*Via Ponte Pietro Bucci - Università della Calabria - Rende (CS) P.Iva: 02730000789
- Tel./Fax.: +390984-447093*

TRATTAMENTO NUMERICO E INTERPRETAZIONE DEL DATO NDT PER LA VERIFICA DEI SOLAI - ELABORAZIONI NUMERICHE-

G. Porco* - F. Forestieri** - M. Scattarreggia***

*Dipartimento di Ingegneria Civile, Università della Calabria

giacinto.porco@unical.it

**Sismlab s.r.l.- Spin – Off Università della Calabria

info@sismlab.it

f.forestieri@sismlab.it

***Sismlab s.r.l.- Spin – Off Università della Calabria

info@sismlab.it

SOMMARIO

Le attività di controllo che hanno interessato il patrimonio edilizio italiano, a partire dagli inizi del 900, sono state orientate principalmente alla prevenzione sismica e finalizzate a valutare principalmente la risposta globale delle parti resistenti, trascurando di fatto lo stato di salute delle opere secondarie, come solai, controsoffittature, sbalzi e/o membrature a valenza architettonica. Per tali opere la presenza a volte di difetti preesistenti, di una non corretta pratica costruttiva, unitamente alla mancanza di piani di manutenzione per un obiettivo vuoto normativo fino al 2008, ha provocato l'insorgere di fenomeni di dissesto casuali e non prevedibili, quali distacchi di intonaco e sfondellamento sugli orizzontamenti. Questi accadimenti, hanno prodotto danni, disagi e restrizioni all'esercizio degli edifici, principalmente su strutture pubbliche come quelle scolastiche. È in merito a questa problematica che, con il presente lavoro si vuole individuare e validare, con attività di analisi numeriche e sperimentali, una metodologia di screening per i solai, che prevede l'utilizzo dell'indagine acustica strumentale insieme ad altre tecniche di indagine non distruttive *NDT*. Il tutto per individuare le zone di danno all'intradosso dei solai, definendone i contorni e la pericolosità, e per garantire una buona prevenzione ed una efficace programmazione degli interventi di riparazione. L'insieme delle azioni previste verrà proposto sotto forma di protocollo procedurale per definire l'ordine cronologico e propedeutico di esecuzione, al fine di rendere più fruibile il controllo della consistenza dei solai latero-cementizi.

1. INTRODUZIONE

Negli ultimi anni l'orientamento, dettato dalle normative tecniche sulle costruzioni, è stato quello di improntare le attività di analisi e verifica sul patrimonio edilizio esistente principalmente su controlli di integrità globale delle parti resistenti e di valutare la sicurezza strutturale nei riguardi delle possibili sollecitazioni indotte dal sisma. In tale ambito sono state spese notevoli energie intellettive ed economiche nello svolgimento di analisi predittive, finalizzate ad individuare la strategia di consolidamento più efficace per un aumento della risposta sismica dell'edificio. Seguire questa linea, ha di fatto distolto l'attenzione dalle cosiddette parti secondarie della struttura, quali i solai, che sono stati esclusi dai processi di controllo di affidabilità. Questo ha generato in diverse circostanze

imprevedibili segni di cedimento e di deterioramento anche con crolli improvvisi, provocando di fatto diverse condizioni di pericolo per i fruitori diretti.

Con il verificarsi, di tali accadimenti, il legislatore è intervenuto in maniera determinata erogando fondi destinati al controllo di questi elementi e predisponendo capitolati e procedure operative guida, da mettere a disposizione dei tecnici per affrontare il problema della valutazione di consistenza.

La notevole richiesta di intervento tecnico e conseguentemente di mercato, che ne è conseguita dalle disposizioni di legge, ha portato gli operatori del settore a predisporre e proporre modalità di approccio al problema con largo uso di procedure operative, che di fatto sono risultate essere a volte poco efficaci. Tali procedure, infatti, hanno visto l'utilizzo di tecniche di controllo NDT unite a tecniche tradizionali non verificate preliminarmente con una robusta attività di ricerca di base e quindi per lo più poco affidabili.

È in questo contesto che si inserisce il presente lavoro con l'intento di mettere a punto e validare, attraverso preliminari attività di studio e di laboratorio, una metodologia di screening per i solai in latero-cemento, che preveda l'utilizzo dell'indagine acustica strumentale in concerto con altre tecniche NDT, per individuare e perimetrare con una buona approssimazione le zone danneggiate all'intradosso dei solai, valutandone la pericolosità attraverso una classificazione di rischio. Per la validazione della tecnica di controllo sonoro strumentale proposta, si prevedono robuste analisi numeriche di base, sia in forma chiusa e sia agli elementi finiti, per rappresentare analiticamente il fenomeno fisico di propagazione della pressione acustica. I risultati numerici, così ottenuti, sono poi confrontati con quelli sperimentali in ciascuna prova di laboratorio. In particolare, si prevede una campagna sperimentale di laboratorio per verificare l'efficacia della strumentazione S.E.S. (*Sistema Ecometrico per il controllo dei Solai*) nel riconoscimento di materiali diversi e di variazioni di spessore su elementi piastra bidimensionali, e per caratterizzare l'andamento del segnale acustico direttamente sugli elementi costituenti il solaio, quali travetto e pignatta. Infine la sperimentazione riguarderà direttamente il riconoscimento delle tipologie costruttive di solaio in latero-cemento, con l'individuazione in opera dei segnali acustici riconducibili distintamente a parti integre e a parti danneggiate.

Di seguito verranno illustrate brevemente prima le tipologie di danneggiamento, che è possibile riscontrare agli intradossi dei solai, a seguire, per la metodologia di indagine strumentale, verranno riportate, tutte le attività analitiche e sperimentali di validazione e una prima proposta di protocollo procedurale che ne riorganizzi sinteticamente le fasi attuative salienti.

2. CLASSIFICAZIONE DEL DANNO

I difetti presenti sui solai, intesi come potenziali aree danneggiate in fase di evoluzione sono, fenomeni non prevedibili che non possono essere diagnosticati con approcci numerici in forma predittiva, ma necessitano di efficaci azioni di campo di tipo sperimentale. Pertanto l'unico modo per individuare eventuali danni sui solai e limitarne la pericolosità è quello di attuare una campagna sperimentale di prevenzione. Questi difetti dovuti nella maggior parte dei casi al deterioramento dei materiali costituenti e solo per alcuni limitati eventi, a condizioni di carico con associate deformabilità eccessive, possano generare meccanismi di collasso locale. Le tipologie costruttive dei solai impiegate negli anni sul territorio nazionale sono soggette a fenomeni di degrado e difetti costruttivi differenti in funzione della omogeneità e/o eterogeneità dei materiali impiegati.

I fenomeni di dissesto che si presentano con maggiore frequenza sono:

- *Sfondellamento del solaio*: danneggiamento di un elemento secondario del solaio che riguarda la rottura del fondello della pignatta e di parte dei setti verticali del laterizio di alleggerimento. In questo tipo di dissesto le parti interessate seguono molto spesso le direttrici dei travetti e difficilmente interessano aree circolari;

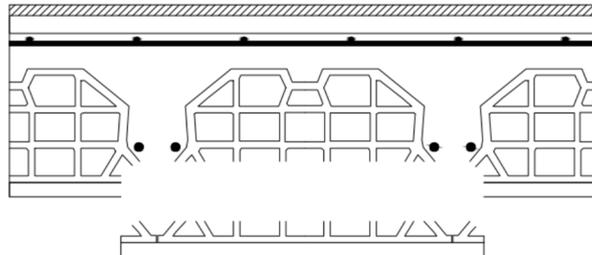


Fig. 1. Sfondellamento su un solaio.

- *Distacco di intonaco*: danneggiamento che può avvenire in maniera dissociata dallo sfondellamento, infatti la presenza di un distacco di intonaco non implica necessariamente la contestuale rottura dell'elemento pignatta. Il distacco di intonaco all'intradosso del solaio riguarda la perdita di adesione fra lo strato di intonaco e l'elemento travetto e/o pignatta. Questo tipo di dissesto è riconducibile al problema di de-adesione proprio della meccanica della frattura e genera con alta probabilità superfici a sviluppo circolare.

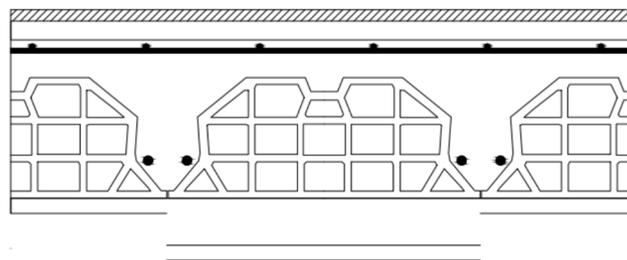
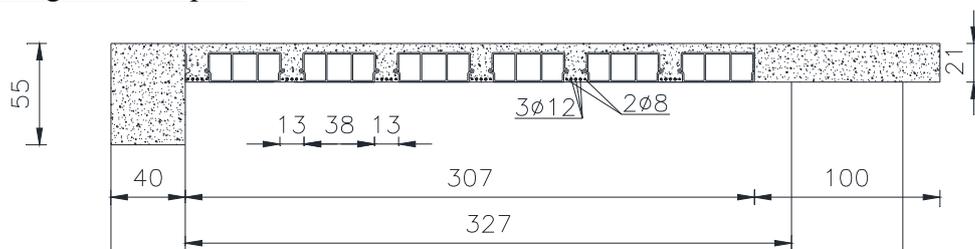


Fig. 2. Distacco di intonaco su un solaio.

Al fine di rendere agevole la comprensione dei due fenomeni espressi precedentemente, si riportano alcune immagini di solai dove sono state riscontrate le due problematiche:

- Solaio gettato in opera



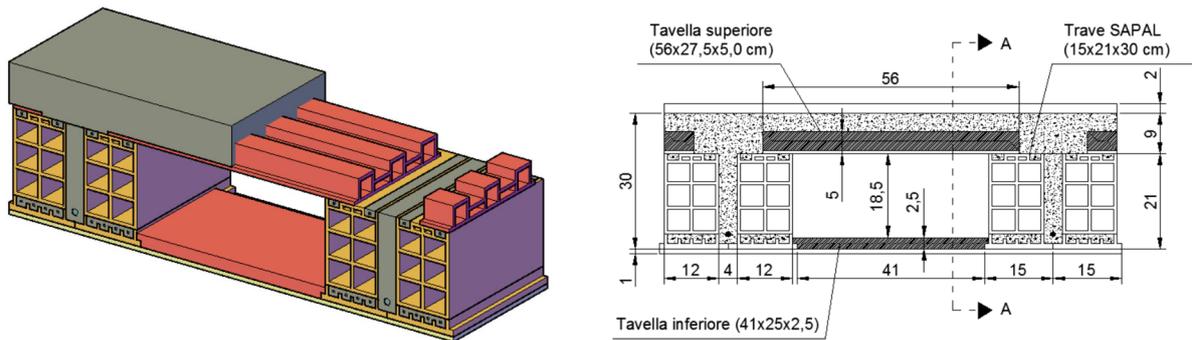


Fig. 6. Solai a cassa vuota SAPAL.

In questa particolare tipologia di solaio, dai controlli effettuati dagli operatori del settore, è stato possibile rilevare non solo la possibilità del distacco dell'intonaco ma un particolare tipo di danneggiamento che interessa la tavella inferiore che porta ad una condizione di collasso come quello riportato in figura.



Fig. 7. Danneggiamento tavella inferiore su un solaio SAPAL.

Tuttavia, anche questa tipologia di danneggiamento per come vedremo in seguito può essere analizzata attraverso l'impianto sperimentale che verrà presentato nelle successive sezioni.

3. INDAGINE ACUSTICA STRUMENTALE: VERIFICHE COMPARATIVE E POTENZIALITA' DI IMPIEGO

Per come precedentemente evidenziato, gli approcci, utilizzati dagli operatori del settore per identificare le aree del solaio con alta potenzialità di sfondellamento e/o di distacco di intonaco, sono stati articolati con procedure principalmente di tipo tradizionale. In particolare le tecniche, sempre di tipo NDT, associate ad ispezioni visive ed alle classiche battiture manuali, che vengono utilizzate in questi casi sono:

- L'indagine termografica: tecnica utilizzata, data l'assenza di gradienti termici, esclusivamente per individuare la direzione dei travetti ed eventuali perdite idriche;
- L'indagine endoscopica: tecnica utilizzata per rilevare la potenza in termini di spessore dell'impalcato e la sua costituzione materica;

- L'indagine acustica manuale: tecnica per l'individuazione delle zone di rischio agli intradossi dei solai, applicata alla quasi totalità dei casi. Questo accertamento, detto anche "battitura manuale" demanda all'operatore, per mezzo del solo rilievo soggettivo del suono, la possibilità di individuare punti caratterizzati da un suono associabile alla presenza del vuoto.

La battitura manuale, in molte campagne sperimentali attuate su un numero consistente di edifici dislocati sul territorio nazionale, ha assunto il ruolo di approccio guida per individuare le aree a rischio. In altri contesti invece, oltre alle attività appena descritte, è stata aggiunta anche l'indagine acustica strumentale, senza però l'utilizzo di opportuni riferimenti teorici a supporto dell'attività sperimentale e senza garantire all'operatore un riferimento guida per effettuare utili comparazioni.



Fig. 8. Indagine acustica manuale.

È all'indagine acustica strumentale, o anche detta di "battitura strumentale", a cui gli scriventi rivolgono la loro attenzione proponendo, all'interno del presente lavoro una campagna sperimentale di supporto all'impiego in opera di tale tecnica. Prima di entrare nel merito della campagna sperimentale attuata, si restituiscono di seguito alcune informazioni di carattere generale sulla metodologia di indagine.

Durante l'indagine sonora strumentale la pressione acustica, prodotta da una massa battente sulla superficie del solaio, viene acquisita per mezzo di un microfono del suono e ne viene restituita la registrazione.



Fig. 9. Indagine acustica strumentale.

La strumentazione è sostanzialmente costituita da:

- Attuatore / Trasduttore;
- Sfera Impattante;
- Microfono;
- Asta Telescopica;

- Carrello mobile;
- Centralina di acquisizione e tablet.

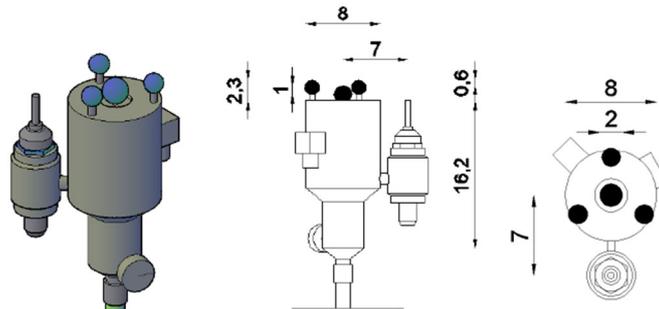


Fig. 10. Rappresentazione CAD strumentazione S.E.S. (Sistema Ecometrico per il controllo dei Solai).

Le caratteristiche fisiche e dinamiche dello strumento sono le seguenti:

- ATTUATORE / TRASDUTTORE: diametro 8cm, lunghezza 16,2cm;
- PIANO DI IMPATTO: distante 1.6 cm dal centro della sfera impattante;
- MICROFONO: distante 7 cm dal centro sfera. Tipologia 130E20. Sensibilità 45mV/Pa. Range dinamico: da 30 a 120 dB;

La sfera impattante ha le seguenti caratteristiche geometriche e materiali:

- Il raggio: 2 cm;
- Il modulo elastico del materiale: $2,6E9$ N/mq;
- Il coefficiente di Poisson: 0,4;
- La densità del materiale: 1400 kg/mc;
- La velocità all'istante dell'impatto: 0,72 m/s;



Fig. 11. Strumentazione per indagine acustica strumentale.

La procedura per la misurazione della pressione acustica è costituita da semplici operazioni da effettuare in sequenza che constano:

- **Fase 1:** posizionamento del supporto mobile lontano da pareti o apparecchiature che potrebbero interferire a livello sonoro con la registrazione del segnale;
- **Fase 2:** inserimento della strumentazione S.E.S.;
- **Fase 3:** posizionamento della strumentazione S.E.S. sotto l'elemento di controllo;
- **Fase 4:** esecuzione della prova e acquisizione del segnale acustico;

- **Fase 5:** elaborazione del segnale e presentazione del risultato nel dominio del tempo e delle frequenze.

Tale procedura consente di acquisire grafici del segnale acustico nel dominio del tempo e delle frequenze come quelli appresso riportati.

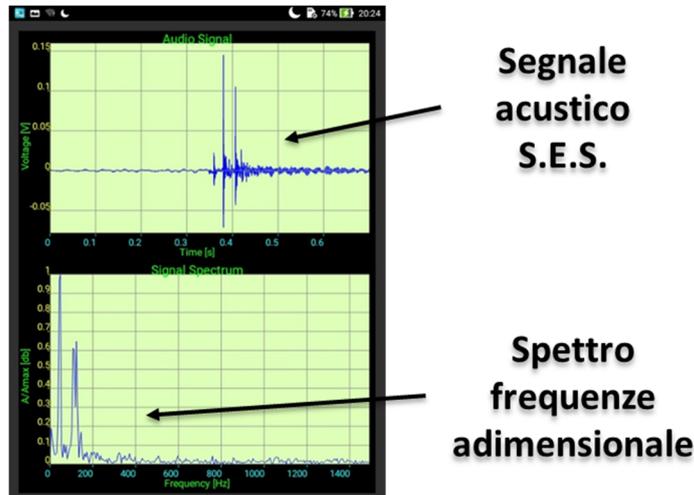


Fig. 12. Acquisizione segnale nel dominio del tempo e delle frequenze.

La tecnica di indagine acustica strumentale è una metodologia non distruttiva e le acquisizioni derivanti da tale tecnica potranno essere utilizzate all'interno di una procedura comparativa. In vista pertanto di impiegare questa metodologia sul campo per individuare aree danneggiate ed aree integre, è necessario disporre di grafici dedicati per poter consentire in opera il riconoscimento di determinati danneggiamenti. Questi risultati guida possono essere utilmente ottenuti anche con procedure numeriche, pertanto nelle sezioni seguenti verranno illustrate due strategie predittive la prima basata su una soluzione in forma chiusa e la seconda con approccio discretizzato agli elementi finiti.

3.1 SOLUZIONE ANALITICA IN FORMA CHIUSA

La soluzione analitica espressa in forma chiusa, relativa all'acquisizione del suono provocato dall'impatto generato da una sfera su un elemento, è data dalla teoria del contatto di Hertz, che analizza il problema dell'impatto su di un mezzo definito come semi - spazio elastico [3]. Ulteriori elaborazioni di questa teoria permettono di analizzare il fenomeno della propagazione d'onda dopo l'impatto quantificabile come pressione acustica.

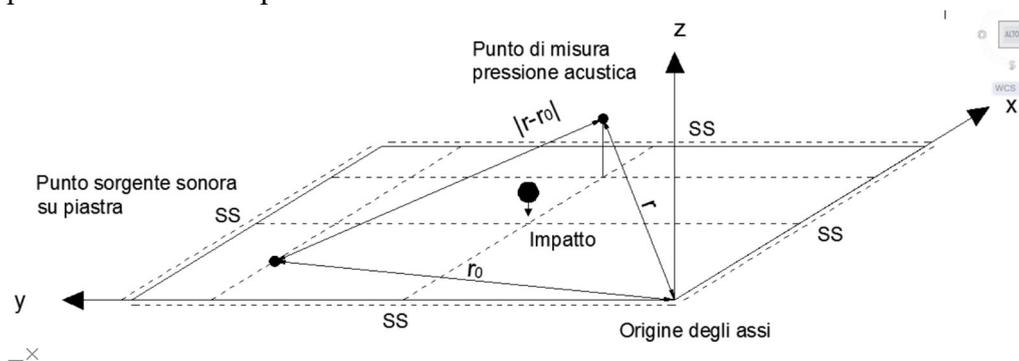


Fig. 13. Configurazione di calcolo pressione Sonora.

L'onda dinamica generata al centro della piastra a seguito dell'impatto, la attraversa in tutte le direzioni, ne acquisisce le peculiarità dinamiche nei pressi dei picchi di risonanza dalla stessa e poi viene riflessa in prossimità dei bordi. Nonostante la presenza di smorzamento, imposto nel materiale, l'onda iniziale riesce ad espandersi e ad essere riflessa più volte nel periodo di analisi. Il relativo responso nel dominio del tempo ne viene influenzato.

Si riportano a titolo d'esempio alcuni grafici ottenuti tramite soluzione in forma chiusa relativi all'andamento della pressione acustica nel dominio del tempo e delle frequenze.

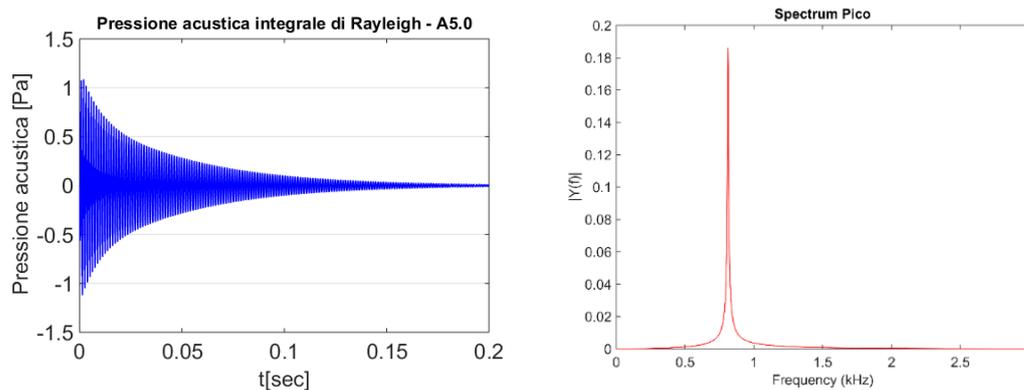


Fig. 14. Pressione acustica acquisita con la soluzione numerica nel tempo e nel dominio delle frequenze.

Il grafico a sinistra come si può ben notare ha proprio l'espressione, la forma e l'andamento di una funzione di tipo matematico. Difatti la pressione acustica è perfettamente simmetrica e presenta una pulizia del segnale impeccabile.

I grafici che invece derivano dal modello agli elementi finiti e tramite sperimentazione, come vedremo, si differenziano dal grafico ottenuto con la soluzione in forma chiusa solo ed esclusivamente per la pulizia del segnale. Questo problema non deve essere interpretato come una evidenza di mancata affidabilità o una perdita di precisione perché, come vedremo, il confronto sarà eseguito trasmigrando i risultati ottenuti nel dominio del tempo in quello delle frequenze individuando i picchi fondamentali.

3.2 SOLUZIONE NUMERICHE AGLI ELEMENTI FINITI

Al fine di disporre di un ulteriore strumento predittivo è stato impiegato un manipolatore agli elementi finiti di tipo multifisico, cioè una piattaforma software per uso generale basata su metodi numerici avanzati, capace di simulare e risolvere i problemi fisici prima analizzati. La difficoltà legata alla produzione sonora a seguito di un impatto superficiale è in particolare un problema multi fisico, ossia un problema che comporta l'applicazione e l'interazione fra due fisiche specifiche: la meccanica dei solidi e l'acustica. Il manipolatore FEM multifisico utilizzato, permette di simulare tale interazione dei due domini nel transitorio. I due sistemi a contatto sono governati da due equazioni distinte che sono:

- L'equazione della propagazione dell'onda acustica nelle tre dimensioni di D'Alambert;
- L'equazione di equilibrio dinamico;
- Condizioni al contorno applicate.

In figura viene riportata un esempio di modellazione in ambiente FEM multifisico di una piastra impattata. Il modello è composto da due solidi: il solido superiore simula la piastra, mentre quello inferiore a contatto lungo una faccia simula il dominio fluido di propagazione dell'onda acustica. Non vi è bisogno di tener conto dell'aria al di sopra della piastra e lungo i lati in quanto, volendo effettuare un confronto con i risultati analitici, vi è la necessità di modellare anche qui la piastra come una superficie vibrante immersa all'interno di uno schermo acustico infinito (rigid baffle).

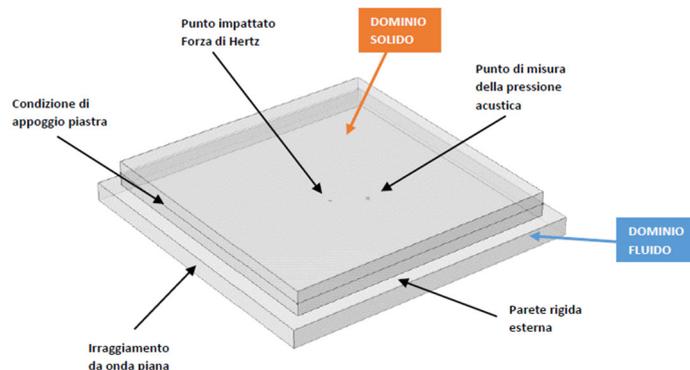


Fig. 15. Piastra in calcestruzzo sul Manipolatore FEM Multifisico (TAG: A4.0).

Immesse le caratteristiche meccaniche del materiale calcestruzzo, i rispettivi parametri di smorzamento alla Rayleigh e la medesima forza impulsiva ricavata dalla meccanica del contatto di Hertz, si ottengono i seguenti andamenti della pressione acustica nel dominio del tempo e delle frequenze (FFT).

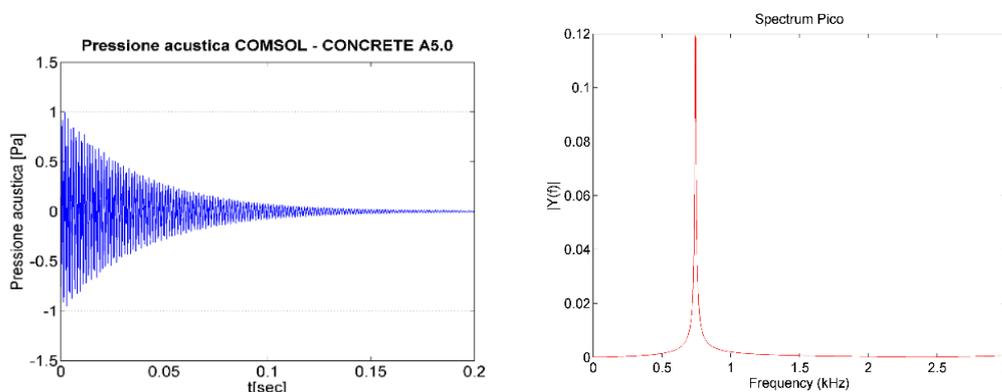


Fig. 16. Pressione acustica acquisita con il manipolatore FEM nel tempo e nel dominio delle frequenze.

Anche in questo caso la risposta numerica offerta è tale da consentire una buona azione predittiva prima di specializzare i controlli in opera sui solai. In pratica, con il supporto di analisi numeriche predittive basate su formulazioni in forma chiusa e su approcci in forma discretizzata, sarà possibile generare risultati guida da comparare successivamente con i dati sperimentali acquisiti con lo strumento S.E.S. Prima però di interessare casi specifici di screening in opera, gli autori hanno prodotto una prima campagna sperimentale di base per verificare la precisione offerta dallo strumento per il riconoscimento di materiali diversi e per l'individuazione di materiali sovrapposti, atteso che, il fenomeno del distacco interessa porzioni all'origine integre e successivamente divise in strati. La campagna sperimentale di base ha riguardato anche i componenti presenti sui solai, ossia travetti e laterizi, acquisendo i dati di riferimento per generare curve guida da utilizzare nelle fasi di campo. Infine l'acquisizione del segnale acustico è stata effettuata direttamente sulle diverse tipologie

costruttive di solaio in latero-cemento, individuando gli andamenti riconducibili a parti integre e a parti danneggiate

Di seguito sono illustrati i test eseguiti e i risultati sperimentali prodotti in ordine cronologico di esecuzione.

3.3 CAMPAGNA SPERIMENTALE DI BASE

Le analisi numeriche predittive, basate su formulazioni in forma chiusa e su approcci in forma discretizzata, hanno permesso di attivare una campagna sperimentale costruita su quattro fasi salienti, attraverso le quali è stata validata la possibilità di impiegare l'indagine acustica sperimentale. I quattro livelli di convalida sperimentale assunti sono:

1. Sperimentazione finalizzata al riconoscimento della risposta acustica sui materiali;
2. Sperimentazione finalizzata al riconoscimento della variazione di spessore su un materiale omogeneo;
3. Sperimentazione sugli elementi costituenti il solaio: travetto in c.a.p. e laterizi;
4. Sperimentazione sul campo: riconoscimento delle tipologie costruttive.

3.3.1 SPERIMENTAZIONE FINALIZZATA AL RICONOSCIMENTO DELLA RISPOSTA ACUSTICA SUI MATERIALI

La prima attività sperimentale ha previsto l'acquisizione, con strumentazione S.E.S., della pressione acustica generata su una piastra in c.a. La finalità di tale attività è stata quella di confrontare e valutare se i risultati numerici ottenuti con formulazioni analitiche in forma chiusa e discretizzata, come sopra esposti, fossero in linea con quelli ottenuti sperimentalmente.



Fig. 17. Test acustico sperimentale su piastra in c.a.

Si riportano di seguito gli andamenti della pressione acustica nel dominio del tempo e delle frequenze ottenuti strumentalmente e con gli approcci analitici e discretizzati.

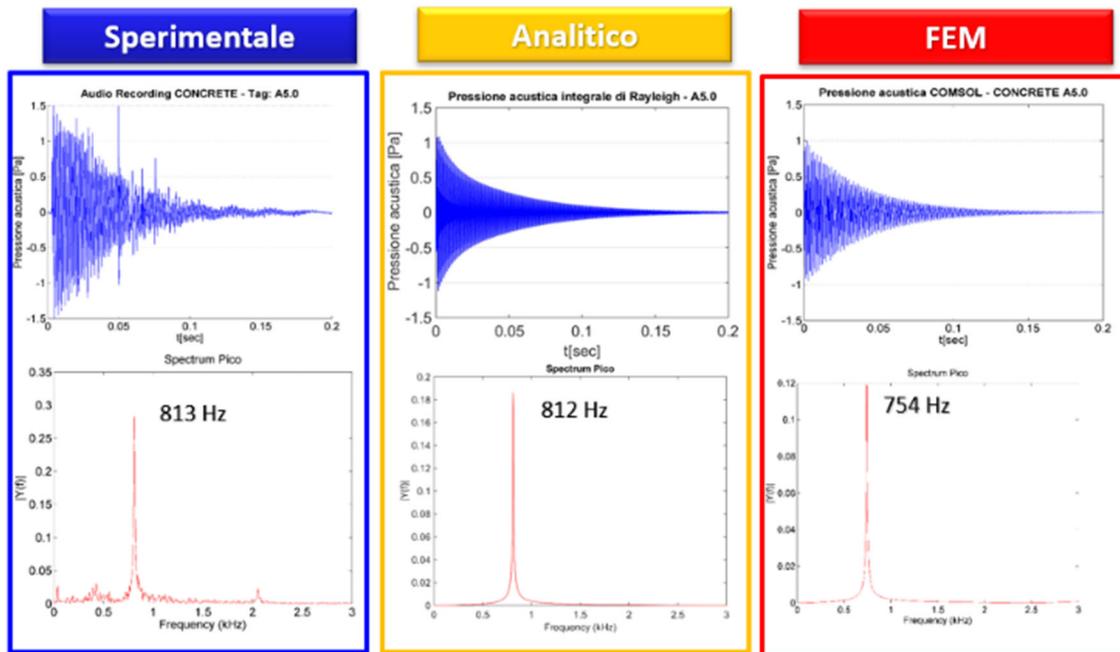


Fig. 18. Grafico relativo alla pressione acustica sperimentale delle piastre in c.a.

Dai risultati si evince che l'approccio sperimentale restituisce valori di pressione acustica molto vicini a quelli ricavati per via numerica anche nel dominio delle frequenze.

Conclusa questa prima parte si è avviata la seconda attività sperimentale con l'obiettivo di individuare le pressioni acustiche diversificate su elementi piastra costituiti da un unico materiale ma con spessori diversi.

3.3.2 SPERIMENTAZIONE FINALIZZATA AL RICONOSCIMENTO DELLA VARIAZIONE DI SPESSORE SU UN MATERIALE OMOGENEO

La sperimentazione in questa fase studia un tipico fenomeno proprio dei danneggiamenti sui solai, ossia la presenza di aree delaminate. A tale scopo sono stati utilizzati come provini oggetto di indagine due piastre in calcestruzzo con spessore diverso. Le piastre sono state prodotte in stabilimento con dimensioni in pianta 50x50 cm e con spessore 5 cm e 4 cm. I risultati numerici di riferimento sono stati ottenuti in riferimento alle caratteristiche meccaniche del materiale, quali densità del materiale, modulo elastico e coefficiente di Poisson, acquisite dalle schede tecniche del produttore, e a condizioni al contorno di semplice appoggio con luce libera di 44 cm [9].

Il setting di prova, per come indicato nelle seguenti figure, ha previsto l'utilizzo di un piedistallo con a capo una perimetrazione di legno su cui sono state ubicate le piastre. Sulla perimetrazione in legno è stata interposta una spugna adesiva per migliorare l'appoggio dei prototipi.

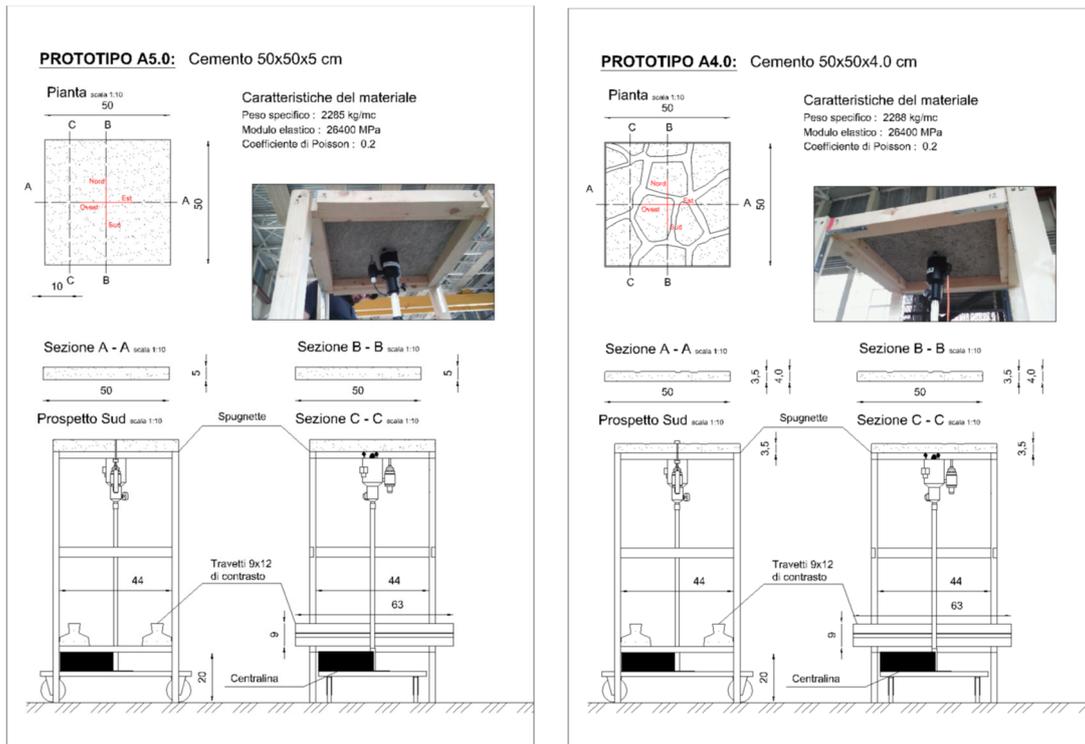


Fig. 19. Schema esplicativo della campagna sperimentale sulle piastre.

Per entrambi i provini le acquisizioni strumentali delle pressioni acustiche nel dominio del tempo e nel dominio delle frequenze hanno restituito i seguenti andamenti nelle figure 20 e 21.

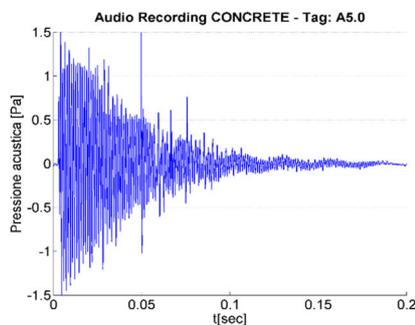


Fig. 20. Andamento del Segnale acustico e spettro relativo. (TAG A5.0).

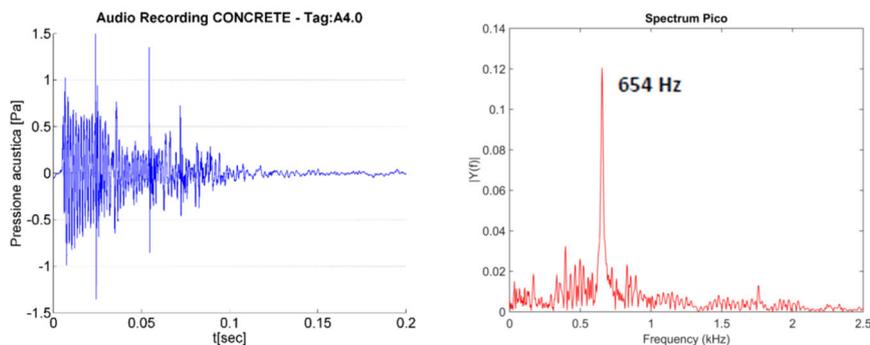


Fig. 21. Spettro Sperimentale S.E.S. Piastra.

In particolare dall'andamento nel dominio delle frequenze è stato possibile riconoscere, sia per la piastra con spessore 5 cm che per quella di spessore 4 cm, un unico picco rispettivamente alle frequenze 813 Hz e 654 Hz.

Anche l'elaborazione analitica in forma chiusa, condotta per i due elementi piastra, ha restituito nel dominio del tempo e della frequenza gli andamenti della pressione acustica con valori praticamente in linea a quelli sperimentali, per come mostrano le seguenti figure 22 e 23.

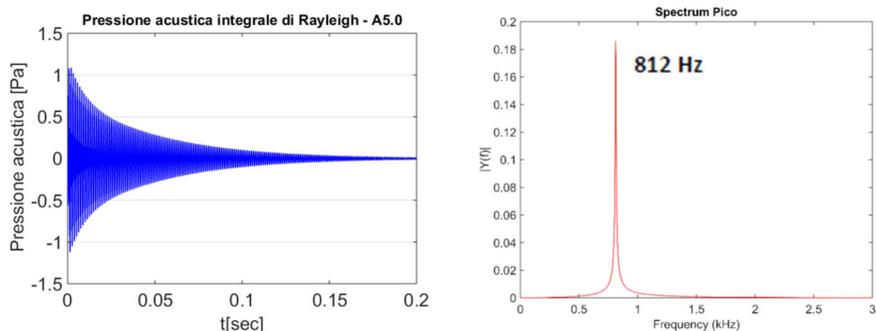


Fig.22. TAG A5.0 – Andamento della pressione acustica e spettro relativo.

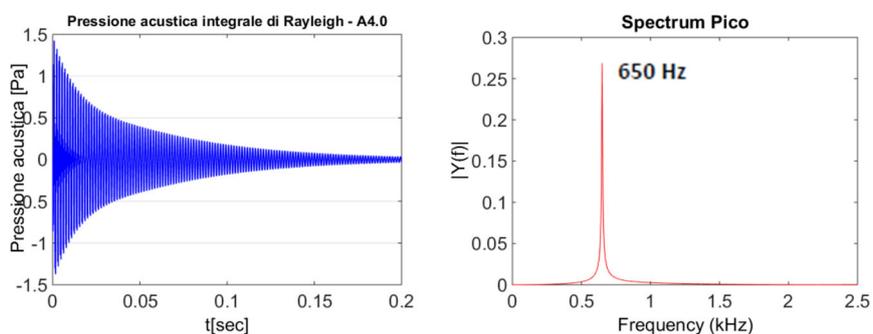


Fig.23. TAG A4.0 – Andamento della pressione acustica e spettro relativo.

Analogamente i risultati numerici agli elementi finiti ottenuti con il manipolatore FEM, per come risulta evidente dalle figure 24 e 25, prevedono andamenti della pressione acustica nel dominio del tempo e delle frequenze perfettamente allineati a quelli strumentali.

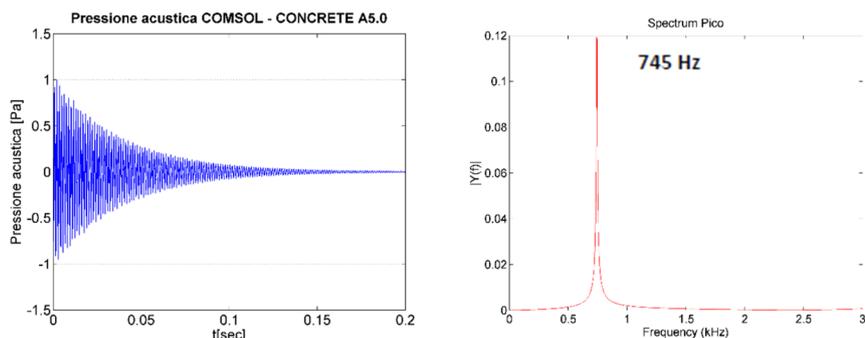


Fig. 24. TAG A5.0 – Andamento della pressione acustica e spettro relativo.

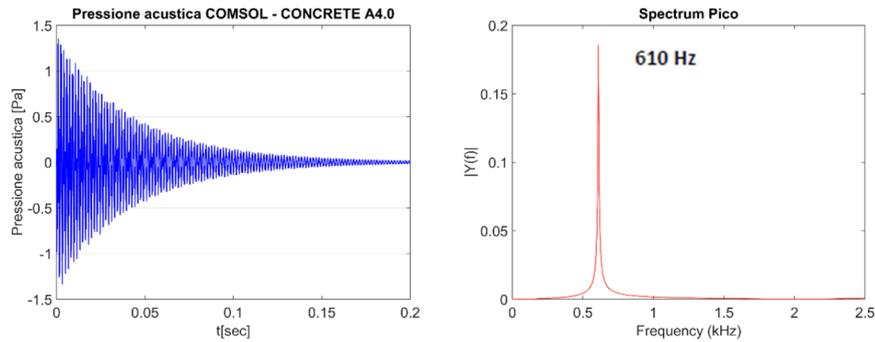


Fig. 25. TAG A4.0 – Andamento della pressione acustica e spettro relativo.

Dai confronti effettuati, si evince chiaramente come l’approccio sperimentale sia perfettamente coerente con le previsioni numeriche, per cui si conclude che, l’acquisizione del suono, effettuata in opera e restituita poi nel dominio del tempo o delle frequenze, è una strategia affidabile per l’individuazione delle perdite di aderenza su parti delaminate.

L’impiego di tale procedura sui solai potrà essere completamente validato, specializzando l’attività di sperimentazione anche per gli elementi costituenti, travetto e pignatta. E accertando, inoltre, la possibilità di generare curve guida nel dominio delle frequenze che possano condurre l’operatore di campo facilmente alla individuazione delle zone danneggiate.

È stata così avviata la terza parte dell’attività sperimentale con l’obiettivo di acquisire informazioni utili sia sui componenti costituenti il solaio e sia per la generazione di curve guida di riferimento per la comparazione in campo. Di seguito sono riportati, per brevità di esposizione, solo i risultati sperimentali acquisiti su solai realizzati con travetti in c.a.p. e laterizi.

3.3.3 SPERIMENTAZIONE SUGLI ELEMENTI COSTITUENTI IL SOLAIO: TRAVETTO IN C.A.P. E LATERIZI

La terza attività di sperimentazione ha previsto l’acquisizione di dati di pressione acustica direttamente sui componenti che costituiscono il solaio, ossia travetti e pignatte. Le attività restituite sono quindi due, un primo test relativo a travetti in c.a.p. e il secondo relativo a pignatte in laterizio. I prototipi oggetto di analisi nel primo test sono travetti in c.a.p. con dimensione standard 9x12 cm, lunghezza pari a 63 cm e luce libera al netto degli appoggi è pari a 44 cm.

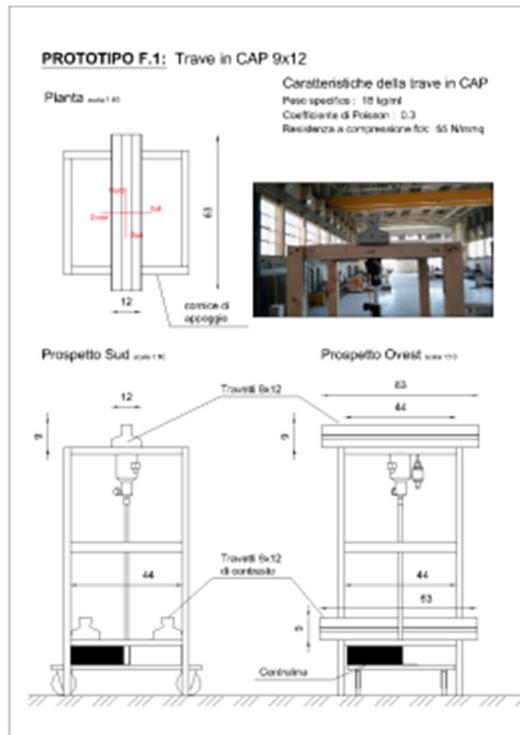


Fig. 26. Schema esplicativo della campagna sperimentale.



Fig. 27. Prototipi travetti e sistemazione su supporto per prova sperimentale S.E.S. Travetto c.a.p. – 9x12 cm (TAG: F.1, F2).

Lo schema sperimentale predisposto per la prova e le tipologie dei provini sono riportate in figura 26 e 27. Le attività di acquisizione sono state estese ad entrambi gli elementi con l'obiettivo di verificare se, su uno stesso materiale con la presenza interna di trefoli di precompressione, i valori di pressione acustica sono comparabili, ed inoltre per valutare la ripetitività della acquisizione in riferimento alla modifica di posizione e di sperimentatore. Nelle figure seguenti sono riportati i risultati sperimentali sia nel dominio del tempo che nel dominio delle frequenze.

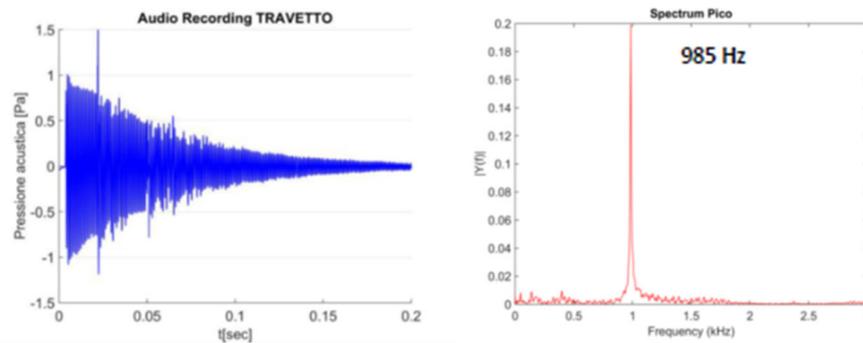


Fig. 28. Segnale acustico e spettro S.E.S. Travetto c.a.p. – 9x12 cm (TAG: F.1).

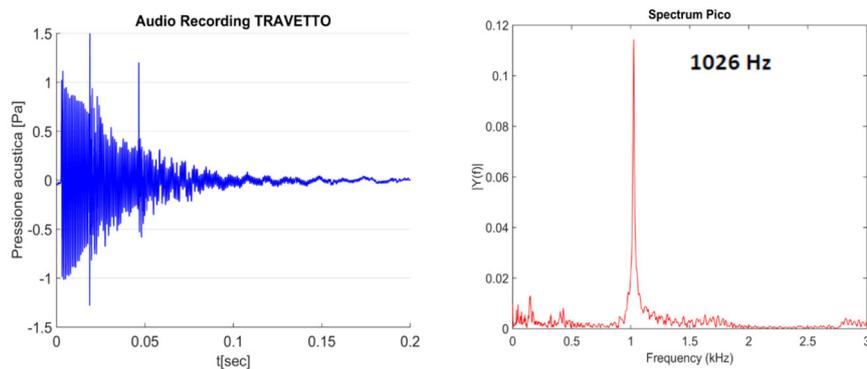


Fig. 29. Segnale acustico e spettro S.E.S. Travetto c.a.p. – 9x12 cm (TAG: F.2).

Gli andamenti della pressione acustica nel dominio del tempo presentano una moderata differenza solo in termini di smorzamento del segnale, ma non come ampiezza. Mentre nel dominio della frequenza il picco caratterizzante si attesta per entrambi intorno ai 1000 Hz. Si evince quindi come i due travetti abbiano in definitiva un comportamento abbastanza simile.

Il secondo test è stato effettuato su due elementi pignatta con spessore quasi simile, ma con forma diversa. L'obiettivo è stato quello di valutare se la risposta in termini di pressione acustica potesse subire alterazioni al variare della forma del laterizio e se tale evidenza avvenisse in modo apprezzabile. Pertanto, utilizzando la medesima procedura di sperimentazione come nel caso dei travetti di acquisizione e riproducendo per i due laterizi le posizioni di appoggio in opera, sono state effettuate le acquisizioni.



Fig. 30. Test sperimentale sui laterizi S200 ed SV200.

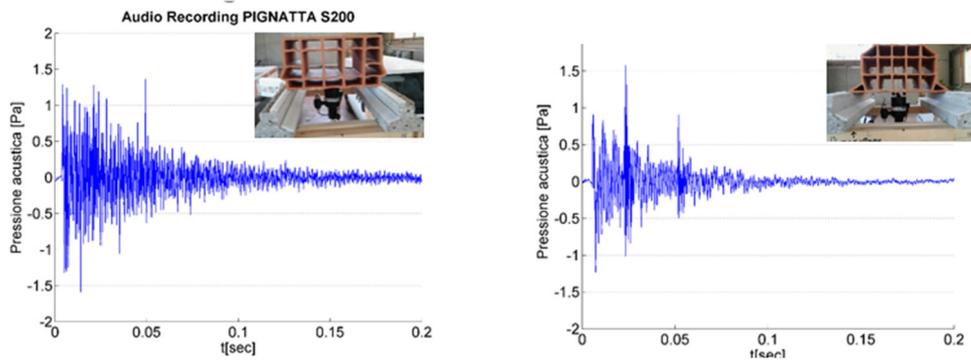


Fig. 31. Segnale acustico acquisito sui laterizi S200 ed SV200.

Dagli andamenti nel dominio del tempo, come riportati nelle figure 30 e 31, si può notare che a quasi parità di spessore del laterizio anche la forma gioca un ruolo fondamentale per la risposta in termini di pressioni acustiche. Pertanto per tipologie costruttive di solaio, con la stessa potenza, ove siano presenti i laterizi, sarà necessario caratterizzare anche le risposte delle singole tipologie di pignatta.

3.3.4 SPERIMENTAZIONE SUL CAMPO: RICONOSCIMENTO DELLE TIPOLOGIE COSTRUTTIVE

L'ultima campagna sperimentale ha riguardato l'applicazione della metodologia di indagine oggetto di studio su casi reali e a valle delle verifiche numeriche di validazione. Per cui, le pressioni acustiche sono state acquisite direttamente in opera sulle diverse tipologie di solaio in latero-cemento, restituendo successivamente i grafici nel dominio delle frequenze, relativi ad aree integre e ad aree danneggiate. Questa sperimentazione è stata finalizzata a dare condizioni reali in opera e quindi ad individuare segnali che possono essere riconducibili distintamente a parti integre e a parti danneggiate. I segnali associati alle parti integre potranno essere presi come guida per gli screening nell'individuazione in opera delle aree interessate dai fenomeni di dissesto. In particolare sono stati generati grafici guida di riferimento, come quelli riportati a titolo di esempio nelle figure precedenti, da impiegare a supporto degli operatori nelle attività di campo per le acquisizioni.

- Tipologia 1: Solaio gettato in opera

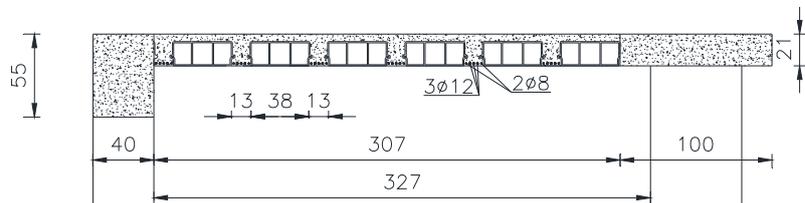


Fig.32. Solaio gettato in opera.

In pratica l'operatore potrà sovrapporre l'acquisizione effettuata in un determinato punto del solaio con quella di riferimento per una stessa tipologia disponibile integra. I grafici generati in riferimento al solo danneggiamento da distacco di intonaco, sono stati distinti per il distacco nel travetto, da quello sulla pignatta o anche da quello presente su parti in c.a. in corrispondenza delle travi di impalcato. Analogamente i grafici per la condizione di sfondellamento sono stati ottenuti per le diverse tipologie di solaio e per diversa penetrazione del danno nel laterizio.

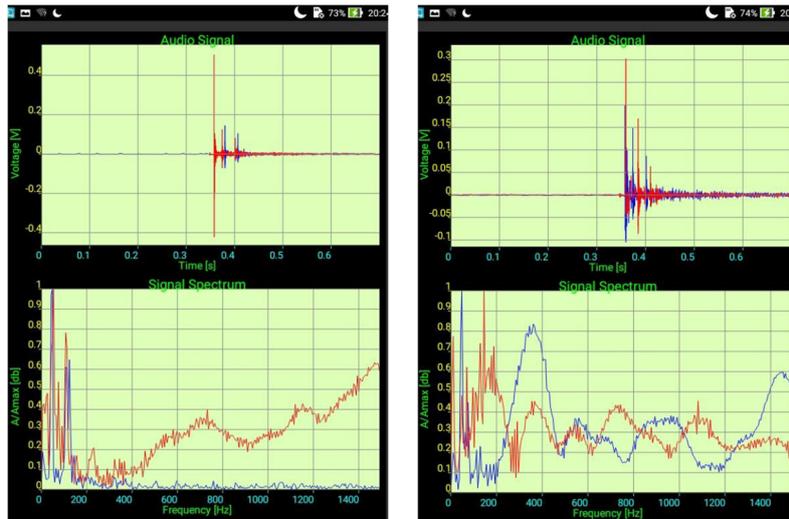


Fig. 33. Doppia sovrapposizione travetto e pignatta danneggiati.

- Tipologia 2: Solaio a travetti precompressi con laterizio interposto

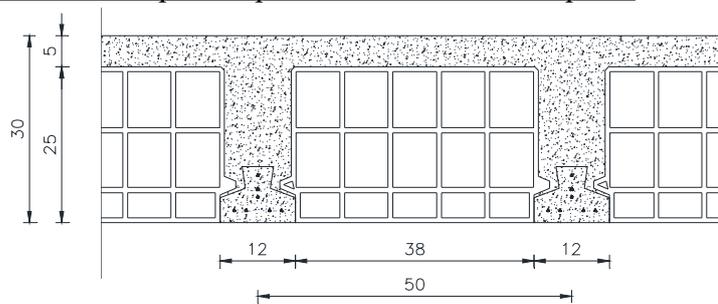


Fig.34. Solaio a travetti precompressi.

Confronto tra elementi integri e danneggiati

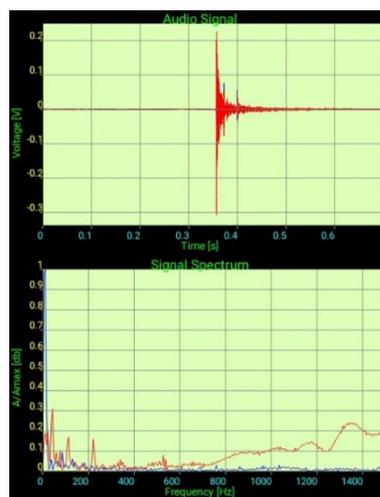


Fig.35. Sovrapposizione grafici Solaio Tipo 1: grafici plottati nel dominio del tempo e delle frequenze, per confronto tra travetto integro (blu) e danneggiato (rosso).

- Tipologia 3: Solaio con travetti a traliccio

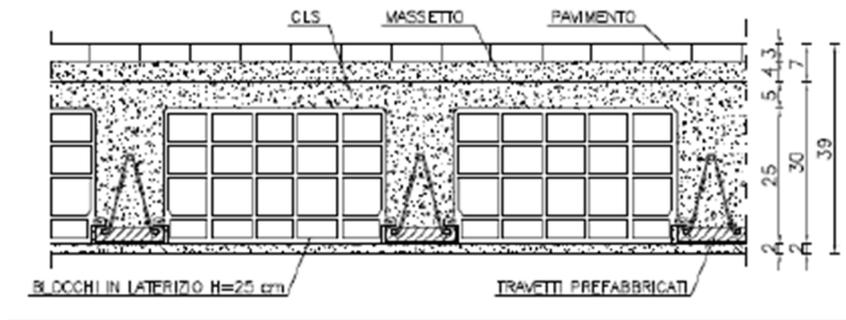


Fig.36. Solaio a travetti a traliccio.

Confronto tra elementi integri e danneggiati

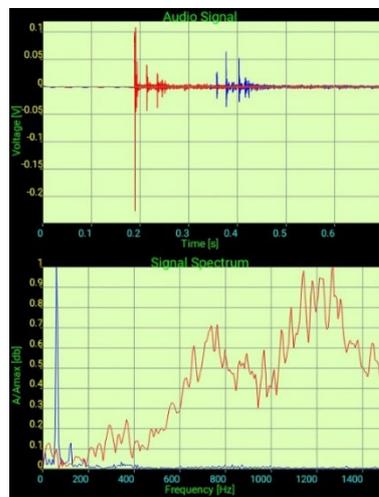


Fig.37. Sovrapposizione grafici solaio tipo 1: grafici plottati nel dominio del tempo e delle frequenze, per confronto tra travetto integro e danneggiato.

- Tipologia 4: Solaio tipo Sapal

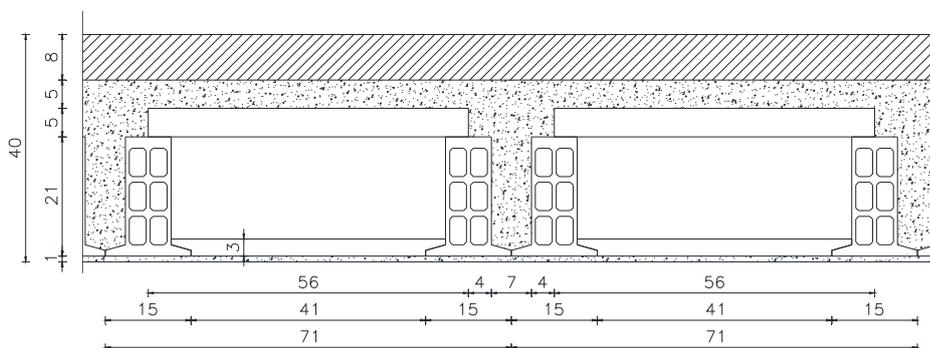


Fig.38. Solaio tipo Sapal.

Confronto tra elementi integri e danneggiati

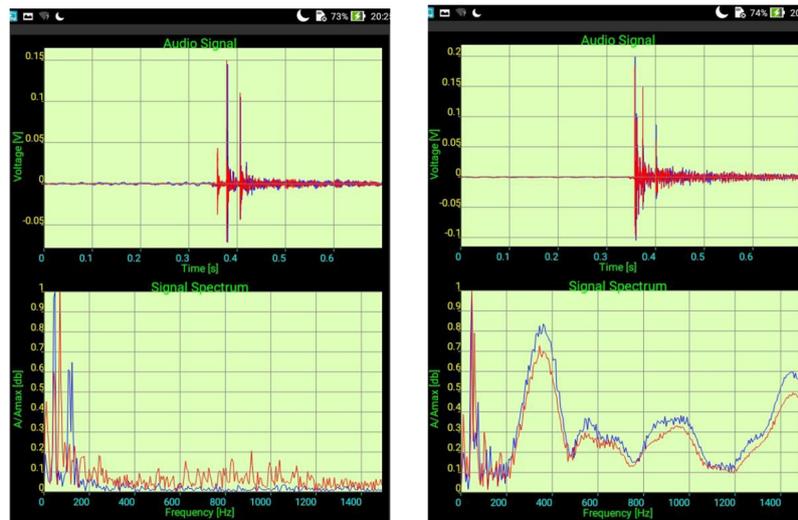


Fig. 39. Doppia sovrapposizione travetto e pignatta integri.

Da quest'ultima sperimentazione in opera appare evidente che, per le quattro tipologie di solaio analizzate, la strumentazione impiegata consente di distinguere le risposte integre da quelle danneggiate.

A questo punto, con l'ausilio della tecnica sperimentale proposta è possibile ipotizzare la redazione di un protocollo procedurale, di cui se ne possa specificare l'utilizzo, unitamente ad altre tecniche NDT, e verificare la validità di applicazione a valle di una affidabile campagna di rilievi in opera.

Il protocollo procedurale proposto, espresso in una forma sintetica, può essere rappresentato schematicamente, come nella figura seguente. Tale protocollo potrà essere ulteriormente esteso e specializzato, in relazione alla tipologia costruttiva di solaio in latero-cemento considerata, e successivamente validato su casi reali di studio.

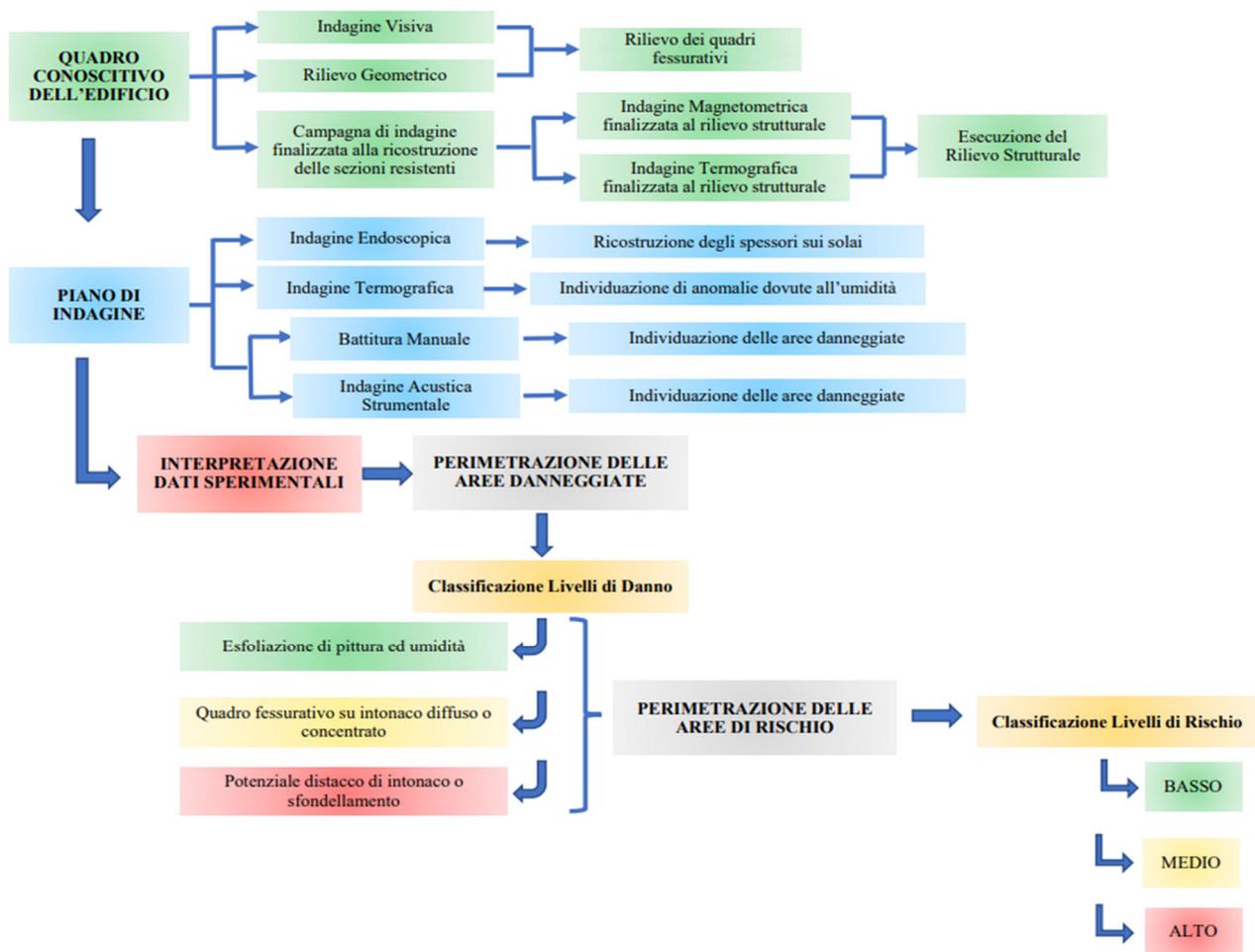


Fig. 40. Protocollo Procedurale.

5. CONCLUSIONI

Nel presente lavoro è stata implementata una metodologia di indagine sonoro strumentale per il controllo dei fenomeni di dissesto agli intradossi dei solai latero-cementizi. In particolare, l'approccio, della battitura strumentale, è stata validata mediante attività numeriche e di laboratorio in una estesa campagna di sperimentazione di base. L'utilizzo sinergico delle tradizionali indagini NDT, descritte ed applicate nel presente lavoro, con l'indagine di battitura strumentale, corredata di curve guida a supporto delle attività di campo, si è dimostrato essere un utile metodologia per il controllo e la perimetrazione di aree danneggiate dei solai.

E' possibile pertanto concludere che, la tecnica basata sul metodo acustico strumentale è pronta per essere applicata alle diverse tipologie di solaio presenti sul territorio nazionale per valutarne lo stato di affidabilità restituendone sia l'ampiezza del danno che classificazione del rischio. Un tale approccio potrebbe inoltre anche estendersi ai controlli sulle adesioni, realizzate tramite incollaggio, delle stuoie di materiale composito nei lavori di miglioramento e di adeguamento sismico delle strutture in c.a. Inoltre, a giudizio degli autori, l'insieme delle attività previste si prestano ad essere organizzate all'interno di un protocollo procedurale, che ne definisce l'articolazione in fasi e l'ordine cronologico di esecuzione, come utile guida nell'applicazione della metodologia proposta. Al contempo, si considera necessaria per tale protocollo procedurale la diversificazione in base alla tipologia costruttiva di solaio, con specializzazione delle attività di indagine, e a seguire la validazione sui casi reali di studio associati

BIBLIOGRAFIA

- [1] Sansalone, Mary, and Nicholas J. Carino. 1988, Concrete International "*Impact-echo method.*" 10.4: 38-46.
- [2] Thermography, historic structures–quantitative IR., 2010 "*Non-destructive examination of stone masonry historic structures–quantitative IR thermography and ultrasonic testing*". Diss. middle east technical university.
- [3] Popov, V., (2010)., "*Contact mechanics and friction: physical principles and applications*", Springer Science & Business Media.
- [4] Cannas, b., et al., 2012 "*Modeling of active infrared thermography for defect detection in concrete structures.*" Proceedings of the 2012 COMSOL conference.
- [5] Shin, S. W., Popovics, J. S., and Oh, T., 2012," *Cost effective air-coupled impact-echo sensing for rapid detection of delamination damage in concrete structures*", Advances in Structural Engineering, 15(6), 887-895.
- [6] Oh, T., Popovics, J. S., Ham, S., and Shin, S. W., 2012, "*Improved interpretation of vibration responses from concrete delamination defects using air-coupled impact resonance tests*". Journal of Engineering Mechanics, 139(3), 315-324.
- [7] Yuan, Maodan, et al., 2014 "*Prediction of the effect of defect parameters on the thermal contrast evolution during flash thermography by finite element method.*" journal of the korean society for nondestructive testing 34.1, 10-17.
- [8] CONSIP, Dicembre 2016, Allegato 1a al bando "*Servizi professionali*" per l’abilitazione di fornitori e servizi per la partecipazione al mercato elettronico per la fornitura di servizi di indagini non strutturali, versione 3.0, classificazione del documento: CONSIP PUBLIC.
- [9] Scattarreggia M., 2017 – Tesi di Laurea "*Tecniche non distruttive per il controllo di opere secondarie e per la perimetrazione di aree danneggiate*" – Dipartimento di Ingegneria Civile, Università della Calabria – Relatore: Prof. Ing. G. Porco.
- [10] Decreto del Ministro dell’istruzione, dell’Università e della Ricerca 8 agosto 2019, n. 734.
- [11] Caleca, L. "*Architettura tecnica 4 2 2 L. Caleca.*" Architettura tecnica 4.2.

N.09 - March 2021
ISBN: 979-12-80280-08-4

EDIZIONI SISMLAB
Available online at www.sismlab.com