

**UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI PARMA**

FACOLTA' DI INGEGNERIA



**DOTTORATO DI RICERCA IN INGEGNERIA INDUSTRIALE**

**XXVIII CICLO**

**METODI DI INDAGINE ACUSTICA PER L'INTEGRITA'  
STRUTTURALE**

***ACOUSTIC METHODS FOR STRUCTURAL INTEGRITY TESTS***

**COORDINATORE**

Ch.mo Prof. Marco Spiga

**TUTOR**

Ch.mo Prof. Angelo Farina

**CANDIDATO**

Lucia Predari

**A.A. 2015 / 2016**

<b>1. INTRODUZIONE E OBIETTIVO .....</b>	<b>3</b>
<b>2. STATO DELL'ARTE .....</b>	<b>5</b>
<b>2.1 ANALISI NON DISTRUTTIVE PER IL MONITORAGGIO DELLE STRUTTURE .....</b>	<b>5</b>
<b>3. RICHIAMI DI TEORIA .....</b>	<b>10</b>
<b>3.1 I MEZZI ELASTICI.....</b>	<b>10</b>
<b>3.2 PROPAGAZIONE DELLE ONDE NEI SOLIDI .....</b>	<b>11</b>
<b>3.3 CARATTERISTICHE ACUSTICHE SUPERFICIALI DEI MATERIALI .....</b>	<b>11</b>
<b>3.4 ELABORAZIONE NUMERICA DEI SEGNALI.....</b>	<b>15</b>
<b>3.5 SONOGRAMMA E WATERFALL .....</b>	<b>18</b>
<b>4. STUDI SPERIMENTALI CONDOTTI: DIVISORI IN CARTONGESSO.....</b>	<b>20</b>
<b>4.1 GENERALITA' .....</b>	<b>20</b>
<b>4.2 SPERIMENTAZIONI EFFETTUATE .....</b>	<b>21</b>
<b>4.3 ELABORAZIONE E RISULTATI.....</b>	<b>28</b>
<b>4.4 CONSIDERAZIONI .....</b>	<b>32</b>
<b>5. STUDI SPERIMENTALI CONDOTTI: SOLAI IN LATEROCEMENTO .....</b>	<b>33</b>
<b>5.1 GENERALITA' .....</b>	<b>33</b>
<b>5.2 SPERIMENTAZIONI EFFETTUATE .....</b>	<b>36</b>
<b>5.3 ELABORAZIONE E RISULTATI.....</b>	<b>44</b>
<b>5.4 CONSIDERAZIONI .....</b>	<b>50</b>
<b>6. STUDI SPERIMENTALI CONDOTTI: LASTRE DI MARMO .....</b>	<b>51</b>
<b>6.1 GENERALITA' .....</b>	<b>51</b>
<b>6.2 SPERIMENTAZIONI EFFETTUATE: TEST IN LABORATORIO E RISULTATI .....</b>	<b>53</b>
<b>6.3 SPERIMENTAZIONI EFFETTUATE: TEST A FATICA E RISULTATI .....</b>	<b>60</b>
<b>6.4 SPERIMENTAZIONI EFFETTUATE: TEST IN SITO E RISULTATI .....</b>	<b>65</b>
<b>6.5 CONSIDERAZIONI .....</b>	<b>67</b>
<b>7. STUDI SPERIMENTALI CONDOTTI: PRODOTTI DELL'INDUSTRIA ALIMENTARE (SALAMI) .....</b>	<b>69</b>
<b>7.1 GENERALITA' .....</b>	<b>69</b>
<b>7.2 SPERIMENTAZIONI EFFETTUATE: PRIMA SESSIONE DI PROVE E RISULTATI.....</b>	<b>71</b>
<b>7.3 SPERIMENTAZIONI EFFETTUATE: SESSIONI SUCCESSIVE DI PROVE E RISULTATI.....</b>	<b>73</b>
<b>7.4 CONSIDERAZIONI .....</b>	<b>81</b>
<b>8. CONCLUSIONI E SVILUPPI FUTURI .....</b>	<b>82</b>
<b>9. BIBLIOGRAFIA.....</b>	<b>84</b>

## 1. INTRODUZIONE E OBIETTIVO

Questo lavoro di tesi nasce allo scopo di indagare lo stato interno di materiali e strutture di diverso tipo tramite sollecitazione acustica o vibrazionale delle stesse. Si sono sottoposte, di caso in caso, le strutture in esame a sollecitazione acustica (mediante speaker) o meccanica (mediante martello strumentato o altro percussore), acquisendo le onde meccaniche di ritorno con trasduttori microfonici, array microfonici, ed accelerometri. Si è valutato, di caso in caso, mediante considerazioni e prove pratiche, quale fosse la strumentazione più adeguata e quale il parametro da prendere in considerazione per effettuare una discriminazione tra oggetto integro ed oggetto danneggiato o contenente vuoti o inclusioni. Si è riflettuto sui dati raccolti allo scopo di capire quali caratteristiche accomunino strutture apparentemente molto diverse tra loro, e quali differenzino in realtà - rispetto alla possibilità di una efficace diagnosi acustica - strutture apparentemente simili.

Si è sviluppato uno script su piattaforma MatLab® per elaborare in modo organico e veloce i dati acquisiti, cercando di ottenere indici di output "standardizzati" per quanto possibile, senza tuttavia trascurare l'evidenza che materiali con caratteristiche di rigidezza, omogeneità, composizione e forma diversa, richiederanno comunque una personalizzazione dei parametri da esaminare. Tutte le analisi effettuate si basano sull'osservazione dello spettro acustico del segnale di ritorno dall'oggetto sollecitato. Ove necessario, si è osservata la funzione di trasferimento del sistema (per il calcolo della quale si crosscorrelano i segnali di output e di input). Da questa base, si sono sviluppati parametri specifici, talvolta immediati e in altri casi più elaborati.

Le strutture in prova che verranno presentate sono:

- Pareti divisorie interne in cartongesso
- Solai interni in laterocemento
- Lastre in marmo di rivestimento per facciate ventilate
- Prodotti dell'industria alimentare (salami)

Gli esami più approfonditi e proficui si sono effettuati sui solai, tanto che recentemente è stato sviluppato e commercializzato da un'azienda milanese che si occupa di controlli non distruttivi un kit del tutto simile a quello presentato in questo lavoro di tesi.

Anche lo studio sui salami si è rivelato soddisfacente, è infatti attualmente in corso da parte del laboratorio di acustica dell'Università di Parma la progettazione di un tester di supporto agli

espertizzatori di un'azienda produttrice si salami nel parmense che ha espresso la necessità di avvalersi di un controllo di qualità oggettivo che non richieda la percussione manuale da parte degli espertizzatori e possa essere utilizzato, all'occorrenza, da maestranze non specializzate.

Segue un diagramma di GANTT che illustra approssimativamente il tempo che, durante il mio Dottorato di ricerca, ho dedicato alle attività raccolte nella presente tesi.

## **2. STATO DELL'ARTE**

### **2.1 ANALISI NON DISTRUTTIVE PER IL MONITORAGGIO DELLE STRUTTURE**

Esistono svariate tecniche volte ad esaminare materiali e strutture senza pregiudicarne l'integrità o alterare il materiale. Il loro complesso rientra sotto la sigla CND (controlli non distruttivi), NDT (non destructive testing) o PnD (prove non distruttive) ed è in continua espansione. Se ne citano alcuni esempi di seguito, a titolo di panoramica generale.

#### **Raggi X**

I raggi x (porzione di spettro elettromagnetico con lunghezza d'onda compresa tra il nanometro e il picometro) permettono ispezioni con buona risoluzione su materiali opachi. Essi hanno un elevato potere di penetrazione, tale per cui interromperli richiede strati di piombo di alcuni centimetri, o spessori di calcestruzzo di decine di centimetri. Sono utilizzati principalmente per la diagnostica medica (radiografie).

I limiti principali sono l'elevato costo delle apparecchiature e la necessità di protezione per gli operatori. Si tratta infatti di radiazioni ionizzanti, cioè aventi sufficiente energia da ionizzare gli atomi o le molecole con cui interagiscono provocando mutazioni genetiche.

#### **Liquidi penetranti**

I liquidi penetranti sono utilizzati per evidenziare difetti superficiali. La tecnica di controllo che li impiega prende il nome di Penetrant Test (PT) e fu introdotta dai fratelli Robert e Joseph Switzer prima della seconda guerra mondiale. La procedura consiste nel cospargere con un liquido ad alta tensione superficiale e bassa viscosità l'oggetto testato mediante spruzzatura, pennellatura o immersione rimuovendo in una seconda fase il prodotto in eccesso con un diluente. Si cospinge poi il pezzo con un mezzo di contrasto (detto rilevatore), che farà riaffiorare superficialmente il liquido penetrato nelle discontinuità. Grazie all'azione della capillarità si potranno esaminare visivamente gli eventuali difetti.

#### **Campi magnetici: esame a correnti indotte (ET)**

Vi sono vari metodi d'ispezione che sfruttano i principi dell'elettromagnetismo. Tra questi, rilevante è l'esame a correnti indotte. Le correnti indotte sono create attraverso un processo chiamato elettromagnetismo indotto: quando una corrente alternata è applicata ad un conduttore, come ad esempio un filo di rame, un campo magnetico si sviluppa nel conduttore ed intorno ad esso. Il campo si espande quando la corrente aumenta e collassa quando la corrente si

riduce a zero. Se un altro conduttore elettrico è portato in prossimità del campo magnetico ne determina una variazione con conseguente induzione di corrente nel secondo conduttore. Tali correnti indotte influenzano il valore di impedenza della bobina che le ha generate. La presenza di una discontinuità nel pezzo esaminato, modifica l'intensità ed il percorso delle correnti indotte e quindi l'impedenza del circuito.

In appropriate circostanze le correnti indotte possono essere utilizzate per la rilevazione di cricche e danni da corrosione, misurazioni di spessori di materiali di rivestimento e misure di conduttività. Il limite maggiore di quest'analisi è la sua applicabilità esclusivamente a materiali conduttori, la rugosità superficiale interferisce con la misura, la profondità di penetrazione è limitata ed il controllo è localizzato, adatto perciò a ispezionare piccola aree.

### **Termografia**

La termografia si basa sull'acquisizione di immagini nel campo dell'infrarosso. Si divide il termografia per telerilevamento (utilizzata principalmente in edilizia) e termografia a contatto (impiego in campo medico).

La tecnica sfrutta il fatto che ogni corpo emette radiazioni nel campo dell'infrarosso in un quantitativo correlato alla temperatura del corpo stesso; la termocamera (strumento utilizzato dalla termografia), rileva le temperature dei corpi analizzati attraverso la misurazione dell'intensità di radiazione infrarossa misurata su corpi sottoposti a sollecitazione termica. L'energia radiante è funzione della temperatura superficiale dei materiali, della loro conducibilità ed inerzia termica. La correlazione tra irraggiamento e temperatura è data dalla legge di Stefan-Boltzmann.

In edilizia si utilizza per evidenziare le strutture, individuare la presenza di pilastri, orditura dei solai, canali, impianti, tessiture murarie e inoltre la presenza di ponti termici e umidità nelle murature.

### **Tecniche soniche**

Rientrano sotto il nome di tecniche soniche tutte quelle indagini che sfruttano le caratteristiche di propagazione delle onde elastiche, nel campo dell'udibile umano (20 Hz - 20 kHz), indotte all'interno dei corpi. La generazione del segnale può essere acustica (speaker) o meccanica (percussore) e la captazione può avvenire con trasduttori microfonici o accelerometrici.

## **Tecniche ultrasoniche**

Rientrano sotto il nome di tecniche ultrasoniche tutte quelle indagini che sfruttano le caratteristiche di propagazione degli ultrasuoni indotti ad attraversare un mezzo. Si definiscono ultrasuoni le onde aventi frequenza superiore ai 2 kHz. Il limite superiore di frequenza per la propagazione di onde ultrasoniche è dato dalle vibrazioni termiche del reticolo cristallino; al di sopra di tale limite il materiale non può seguire le vibrazioni del suono che lo penetra. La lunghezza dell'onda minore del suono è quindi il doppio della distanza interatomica. A frequenze così alte, i periodi delle onde ultrasonore diventano paragonabili al tempo di rilassamento del materiale. Nel campo dell'edilizia gli ultrasuoni vengono impiegati per determinare il grado di omogeneità di calcestruzzi e acciai, la presenza di vuoti, lesioni, discontinuità nelle strutture, il valore del modulo elastico, la resistenza dei calcestruzzi. I risultati sono buoni, ma si tratta di test che richiedono precauzioni per gli operatori in quanto l'attraversamento di tessuti biologici da parte di onde ultrasoniche provoca effetti termici, meccanici, e di cavitazione, e in generale un'alterazione del mezzo di propagazione, con conseguenti potenziali danni alla salute nel caso di prolungate o ripetute esposizioni. Tutte le analisi non distruttive che impiegano gli ultrasuoni si basano sul concetto di eco.

## **Ecografia**

Tra le tecniche ultrasoniche più assodate si cita l'ecografia, utilizzata in campo medico per la diagnosi di svariate patologie nonché per il monitoraggio delle gravidanze. Quando l'onda emessa raggiunge un punto di variazione dell'impedenza acustica, può essere riflessa, rifratta, diffusa, attenuata. La percentuale riflessa porta informazioni sulla differenza di impedenza tra i due tessuti; sfruttando questo principio è possibile ottenere un'immagine degli organi interni. Le frequenze utilizzate per questo esame sono le più basse del campo ultrasonoro, cioè quelle ritenute non pericolose per il paziente e che consentono, inoltre, una buona risoluzione d'immagine.

## **Emissione acustica (EA)**

L'emissione acustica è una particolare tecnica di controllo non distruttivo basata sul fatto che un materiale o una struttura sottoposta a sforzo emette segnali ultrasonori generati dal danneggiamento, degradazione, o corrosione del materiale stesso. Le nozioni di base di questa tecnica risalgono agli Anni '70, quando si pensò di estendere i concetti dell'analisi spettroscopica ai fenomeni acustici originati dalle dinamiche dei materiali. Lo sviluppo delle tecniche ultrasonore suggerì la possibilità che la caratteristica di eccitabilità dei materiali - per cui ad un impulso

ultrasonoro corrisponde una risposta in frequenza specifica - potesse giustificare una produzione di segnali acustici nelle frequenze ultrasoniche come conseguenza del rilascio di energia a livello microscopico. L'"Emissione Acustica" (AE) fu inizialmente solo una teoria, fino a quando non si ebbe a disposizione un insieme di strumenti adeguati ad analizzare i segnali raccolti.

I segnali di AE sono captati mediante sensori piezoelettrici; i più comuni contengono cristalli PZT (piombo zirconato di titanio).

Attualmente questa tecnica ha portato buoni risultati in alcuni campi della diagnostica sui materiali, in particolare laddove applicata a manufatti in esercizio come ad esempio condotte in pressione, serbatoi, strutture edili in conglomerato cementizio e carpenteria metallica. Nel caso delle condotte in pressione, l'AE è utilizzata per individuare la posizione di un eventuale rottura dell'impianto, semplicemente ricorrendo ad un calcolo della distanza mediante misura del tempo di volo.

La tecnica ha portato buoni risultati quando applicata a materiali isotropi e sufficientemente omogenei, in primis i metalli; mentre per materiali compositi, anisotropi, stratificati, aventi inclusioni o discontinuità di vario tipo, si sono riscontrati problemi nell'analisi dei segnali.

Si consideri che tutti i solidi hanno una certa elasticità. Fino a che si resta in campo elastico, essi si deformano sotto l'azione di carichi esterni e tornano nella configurazione iniziale quando scaricati. Lo sforzo più elevato sopportabile e la conseguente deformazione elastica dipendono dalla capacità del corpo di immagazzinare energia elastica. Superando un certo limite, nei materiali fragili si verifica pressoché immediatamente la frattura. Nei materiali dotati di elevata plasticità, invece, la frattura si presenta soltanto successivamente ad evidenti deformazioni.

Se il materiale sottoposto a trazione presenta una discontinuità, che sia questa un difetto o semplicemente un punto di connessione, come una saldatura o un giunto, si avrà in corrispondenza della stessa una concentrazione di tensioni che in alcuni casi potrebbe essere origine di un veloce moto di dislocazione conseguenza dell'azione sul materiale, associato ad un rapido rilascio di energia elastica, ed è quello che identifica un evento AE. Esso si manifesta come un'onda elastica che si propaga e può essere rilevata da sensori appropriati (piezoelettrici). Lo spettro d'onda è di tipo a banda larga: la frequenza del testing AE di oggetti metallici si attesta tipicamente tra i 100 e i 300 KHz.

Durante la deformazione plastica le dislocazioni si muovono attraverso il reticolo del cristallo: questi movimenti producono AE, ma la maggior parte di questi processi (eccetto il twinning) hanno un'ampiezza molto contenuta, la quale può essere misurata in maniera attendibile solo con un sensore posto a breve distanza dalla sorgente o in una prova di laboratorio. Nella maggior parte dei casi vengono prodotti segnali continui piuttosto che burst. I burst sono impulsi o

pacchetti di onde corte, cioè il tipo di segnale preferenziale su cui si basa la tecnica AE. L'Emissione Acustica è una tecnica ricettiva che analizza gli impulsi ultrasonici emessi da un difetto proprio nel momento in cui questo si verifica. In contrasto con la tecnica ultrasonora classica non si deve misurare la risposta ad un'eccitazione acustica artificiale indotta all'oggetto in prova.

Si tratta, come detto, di una tecnica dinamica: il segnale si genera quando la cricca cresce oppure quando i lembi di una cricca già aperta tornano in contatto, il che può avvenire per esempio dopo la rimozione di un carico applicato alla struttura in esame.

Solitamente l'oggetto testato deve essere stressato al di sopra del livello operativo al fine di ottenere la generazione di difetti locali che emettano ultrasuoni. Tale tecnica è appropriata specialmente in quei casi dove gli oggetti vengono caricati copiosamente, ad esempio per i test di impermeabilità su recipienti in pressione.

Anche la corrosione sul fondo di recipienti di carburante, o di olio, produce segnali tipo burst che si propagano attraverso il liquido. Con le infiltrazioni, l'AE viene prodotta dal flusso turbolento attraverso la fessura stessa.

Si possono distinguere, fondamentalmente, due tipi di segnali AE: transitori e continui. I primi, anche detti "burst", sono più facilmente distinguibili dal rumore di fondo rispetto ai segnali continui.

Uno dei compiti principali di un sistema AE è convertire il burst in set di dati compatti ripulendoli dal rumore di fondo. Per questo motivo nei sistemi AE si stabilisce una soglia di filtraggio (threshold) sotto la quale si ritengono gli eventi non significativi.

Se il segnale AE supera la soglia, significa che si ha l'inizio di un "hit" (identificazione di un burst).

Il tempo del primo superamento della soglia è chiamato tempo di arrivo (burst arrival time) ed è necessario per il calcolo della posizione della sorgente. I sistemi digitali campionano il segnale AE, ad esempio, ogni 100 ns (dieci milioni di volte al secondo), ovvero con una frequenza di 10 MHz. Un pacchetto d'onda di 100  $\mu$ s è composto dunque da più di mille campioni: ne segue che per l'acquisizione di un singolo burst è necessario un sistema ad elevata velocità di acquisizione e una grande quantità di memoria buffer.

Il threshold viene generalmente individuato fuori dalla fase di prova, quando si ritiene che non debbano verificarsi eventi AE significativi. Allora si assume che l'emissione rilevata corrisponda al rumore ambientale. Il valore di soglia si fissa immediatamente al di sopra del valore quadratico medio del rumore campionato.

### 3. RICHIAMI DI TEORIA

#### 3.1 I MEZZI ELASTICI

La descrizione della propagazione delle onde presuppone la conoscenza del comportamento meccanico delle strutture quando soggette a sollecitazioni di breve durata. Un'onda elastica che si propaga nella materia induce uno spostamento delle singole particelle del mezzo (supposto continuo) rispetto alla loro posizione di equilibrio. Gli spostamenti indotti si presumono essere associati a piccole deformazioni: le equazioni che governano la propagazione delle onde sono ottenute a partire da questa ipotesi semplificativa, che consiste nel considerare piccole perturbazioni rispetto ad una posizione di equilibrio. L'altra semplificazione normalmente utilizzata è quella di linearità tra sforzo e deformazione, che discende dagli esperimenti di Hooke e dal comportamento osservato dei materiali quando soggetti a sollecitazioni di debole intensità. L'elasticità rappresenta la proprietà di un corpo a ritornare nella condizione di non deformazione una volta che le forze applicate sono rimosse. Per l'analisi quantitativa dei movimenti delle particelle di un volume associati alla propagazione di un'onda è pertanto necessario rifarsi ai concetti di sforzo e deformazione considerando la relazione fra queste due quantità nell'approssimazione di piccole deformazioni e comportamento elastico.

Nella sua forma generalizzata la legge di Hooke afferma che ciascuna componente dello sforzo in ogni punto del corpo è una funzione lineare delle componenti indipendenti della deformazione. In un mezzo non isotropo ci sono 81 costanti che legano le nove componenti del tensore degli sforzi alle nove componenti del tensore delle deformazioni. In un mezzo isotropo queste costanti si riducono a due, le costanti elastiche  $\lambda$  e  $\mu$  dette costanti di Lamé. La legge di Hooke in un mezzo elastico ed isotropo si scrive:

$$\sigma_{ii} = \lambda(\varepsilon_{11} + \varepsilon_{22} + \varepsilon_{33}) + 2\mu\varepsilon_{ii}, \text{ con } i = j \quad (3.1.1)$$

per gli sforzi normali e:

$$\sigma_{ij} = 2\mu\varepsilon_{ij}, \text{ con } i \neq j \quad (3.1.2)$$

per gli sforzi di taglio. Dalla (3.1.1) vediamo che gli sforzi normali producono deformazione anche in direzioni diverse da quella dello sforzo agente. La (3.1.2) mostra che, a parità di  $\sigma_{ij}$ , essendo  $\mu$  grande per  $\varepsilon_{ij}$  piccolo, la costante  $\mu$  esprime la resistenza alla deformazione di taglio. Per questa ragione essa è nota come modulo di taglio o rigidità. Le costanti di Lamé  $\lambda$  e  $\mu$  hanno le

dimensioni fisiche dello sforzo. Altre costanti elastiche sono generalmente definite a partire dalle costanti di Lamè. Il modulo di Young **E** esprime la resistenza di un materiale a deformazioni lineari sotto l'azione di compressioni o dilatazioni. Il rapporto di Poisson **v** esprime il rapporto tra le componenti della deformazione parallela ed ortogonale alla direzione dello sforzo agente.

### 3.2 PROPAGAZIONE DELLE ONDE NEI SOLIDI

Sono onde elastiche le onde che si propagano in una fune, le onde sismiche dei terremoti e le onde che percepiamo come suoni. La loro propagazione è affidata alle forze elastiche che si esercitano fra le particelle del mezzo materiale in cui viaggiano, mezzo che può essere fluido o solido. Perché un'onda elastica si propaghi occorre che le particelle del mezzo in cui essa viaggia si spostino, cioè vengano accelerate, e a ciò si oppone la loro inerzia. Più precisamente, per qualsiasi onda elastica, la velocità di propagazione dipende in generale da due fattori: l'interazione elastica fra le particelle del mezzo ed un fattore inerziale che dipende dalla massa delle particelle coinvolte nella propagazione. Alla propagazione di qualsiasi onda si accompagna il trasporto di energia. Nel caso delle onde elastiche la trasmissione di energia avviene attraverso continue trasformazioni fra energia cinetica, associata al moto delle particelle, ed energia potenziale elastica, associata al loro spostamento dal punto di equilibrio.

Nei solidi possono propagarsi onde elastiche sia trasversali che longitudinali; nei liquidi e nei gas soltanto onde longitudinali.

### 3.3 CARATTERISTICHE ACUSTICHE SUPERFICIALI DEI MATERIALI

#### Assorbimento, trasmissione, riflessione

Quando un suono viene generato all'interno di un ambiente chiuso produce un campo acustico che è il risultato della sovrapposizione sia delle onde dirette che riflesse; le prime sono dovute alle onde di pressione che provenienti dalla sorgente raggiungono direttamente l'ascoltatore, come se fosse in campo libero; le seconde sono invece prodotte da tutte le riflessioni sulle pareti che delimitano l'ambiente. La porzione di energia riflessa dalle superfici di confine o che le attraversa dipende dal loro comportamento acustico, in generale descritto dai coefficienti di assorbimento, riflessione e trasmissione ( $a$ ,  $r$  e  $t$ ). Quando il fronte di un'onda sonora urta contro una parete, generalmente si assiste al verificarsi di tre fenomeni che contribuiscono in maniera diversa alla ridistribuzione dell'energia trasportata dall'onda stessa: una parte di questa energia viene riflessa

secondo le leggi della meccanica classica; una parte viene dissipata all'interno del materiale di cui è costituita la parete, convertendosi in energia termica, ed una terza parte attraversa il materiale e procede liberamente oltre. Se chiamiamo  $W_i$  l'energia totale che nell'unità di tempo (potenza) incide sulla parete e  $W_a$ ,  $W_r$ ,  $W_t$  le quote di potenza rispettivamente assorbita dalla parete, riflessa e trasmessa, si può scrivere:

$$W_i = W_a + W_r + W_t \quad (3.3.1)$$

Nel bilancio di energia sonora che incide su una parete si trascurano gli effetti di diffrazione che si hanno quando la parete ha misure confrontabili con  $\lambda/4$  dell'onda incidente. Ora, dividendo entrambi i membri dell'equazione per la potenza totale  $W_i$  incidente sulla parete, possiamo riscrivere l'equazione normalizzata come:

$$1 = a + r + t \quad (3.3.2)$$

dove "a" (coeff. di assorbimento), "r" (coeff. di riflessione) e "t" (coeff. di trasmissione) sono dei coefficienti adimensionali che esprimono rispettivamente le quote di potenza sonora assorbita, riflessa e trasmessa:

$$a = W_a / W_i , \quad r = W_r / W_i , \quad t = W_t / W_i \quad (3.3.3)$$

Dai coefficienti  $r$  e  $t$  sono state definite le grandezze che caratterizzano le prestazioni acustiche di una struttura: il coefficiente di assorbimento acustico apparente  $\alpha$ , che indica la capacità di una struttura di non riflettere energia verso la sorgente sonora e il potere fonoisolante  $R$ , che quantifica la capacità di isolare l'ambiente ricevente dai rumori provenienti dall'ambiente sorgente. Il coefficiente di assorbimento acustico apparente  $\alpha$  è dato da:

$$\alpha = 1 - r = a + t = 1 - ( W_r / W_i ) \quad (3.3.4)$$

mentre il potere fonoisolante  $R$  è definito come:

$$R = 10 \log ( 1 / t ) = 10 \log ( W_i / W_t ) [ dB ] \quad (3.3.5)$$

Le due grandezze hanno un significato fisico diverso:  $\alpha$  rappresenta le caratteristiche fonoassorbenti di un materiale mentre  $R$  quelle fonoisolanti. Un materiale fonoisolante non lascia passare il suono in quanto ha caratteristiche tali da minimizzare la potenza sonora trasmessa  $W_t$ ; al contrario, un materiale fonoassorbente non riflette il suono poiché riesce a minimizzare la potenza sonora riflessa  $W_r$ . I materiali che forniscono le migliori prestazioni fonoassorbenti presentano bassa massa, alta porosità, superficie cedevole; viceversa i materiali che danno

migliori garanzie di fonoisolamento hanno massa elevata, superficie continua, sono rigidi e non porosi.

Come qualsiasi onda elastica, le onde sonore si propagano soltanto attraverso i mezzi materiali, non importa se solidi, liquidi o gassosi. In ciascuno di essi con una data velocità, che nella maggior parte dei casi (fanno eccezione i mezzi detti "dispersivi") non dipende apprezzabilmente dalla frequenza dei suoni. Man mano che si propagano, le onde sonore si attenuano perché le oscillazioni che subiscono le particelle del mezzo vengono smorzate dagli attriti (attriti interni nei solidi, viscosità nei liquidi e nei gas), sicché una frazione dell'energia che esse trasportano viene continuamente dissipata in calore. E quindi possiamo dire che le onde vengono assorbite dal mezzo in cui si propagano. L'entità di questo assorbimento dipende fortemente dalla natura del mezzo. Nell'aria gli effetti di assorbimento sono molto modesti, sebbene rapidamente crescenti con la frequenza: per questo le sirene delle navi emettono suoni alle più basse frequenze udibili (27 Hz, nel caso del transatlantico Queen Mary che poteva essere udito fino a 15 km di distanza). L'assorbimento è invece assai rilevante negli isolanti acustici, come il sughero, la lana di vetro o il feltro.

### Impedenza acustica superficiale

L'impedenza acustica  $z$  di un generico materiale può essere definita come il prodotto della sua densità  $\rho$  per la velocità di propagazione longitudinale del suono  $c_L$  nello stesso (espressa in rayl). Per l'aria, essendo la sua densità, in condizioni di temperatura di 20°C ed alla pressione atmosferica di 1,013 bar, pari a circa 1,2 kg/m<sup>3</sup> e la velocità di propagazione pari a circa 340 m/s, l'impedenza vale circa 400 rayl. La capacità di trasmettere energia sonora tra l'aria e mezzi diversi si può quindi desumere dal coefficiente di riflessione dell'energia sonora incidente mediante la seguente relazione:

$$r = \left( z_1 - \frac{z_2}{z_1} + z_2 \right)^2 \quad (3.3.6)$$

Dove  $z_1$  è l'impedenza acustica dell'aria e  $z_2$  quella del materiale.

Altro parametro da definire è l'impedenza acustica specifica normale alla superficie, definita dal rapporto tra la pressione sonora  $p$  nel punto e la normale alla velocità delle particelle  $v_n$  nel punto stesso. Spesso si usa adimensionalizzare l'impedenza del mezzo rispetto a quella caratteristica dell'aria, pertanto, l'impedenza normalizzata  $\zeta$  risulta:

$$\zeta = \frac{z_n}{\rho * c} = \frac{1}{\rho * c} * \frac{p}{v_n} \quad (3.3.7)$$

in cui  $r$  è la densità del mezzo (aria) e  $c$  la velocità di propagazione del suono in essa. In generale il rapporto  $p / v n$  dipende dal campo sonoro di fronte alla superficie nel punto considerato e dalla frequenza, oltre che dalla natura della superficie stessa. Nella definizione di  $z$  si fa riferimento ad un campo incidente piano su una superficie piana ideale di estensione infinita (nessun effetto di campo diffratto dai bordi). Con queste restrizioni  $z$  da parametro puntuale, diviene una proprietà acustica di una superficie omogenea che dipende dalla frequenza e dall'angolo di incidenza.



*fig. 3.1 - Prototipo di Impedenziometro costruito in laboratorio*

### 3.4 ELABORAZIONE NUMERICA DEI SEGNALI

#### Segnali digitali: campionamento

Il concetto di segnale numerico nasce dall'esigenza di riprodurre completamente un segnale analogico utilizzando un'operazione di campionamento che preveda un numero sufficiente di campioni. Se si indica con  $\overset{a}{x}(t)$  un segnale a banda limitata B e si indicano con  $\overset{s}{x}(n)$  i rispettivi campioni negli istanti  $nT$ , si può scrivere:

$$\overset{a}{x}(nT) \stackrel{\Delta}{=} \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \overset{s}{x}(n) \cdot T \delta(t - nT) \xrightarrow{f} \frac{1}{T} \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \overset{a}{X}\left(f - \frac{n}{T}\right) \quad (3.4.1)$$

dove con  $\xrightarrow{f}$  si intende l'operazione di trasformazione di Fourier e con  $\overset{a}{X}(f)$  la trasformata di  $\overset{a}{x}(t)$ . Filtrando passa basso il segnale  $\overset{a}{x}(nT)$  così definito, si ottiene  $\overset{a}{x}(t)$  se e solo se  $F_s \geq \frac{1}{T} > 2B$

dove  $2B$  prende il nome di frequenza di Nyquist. Per evitare il fenomeno di "aliasing" (o distorsione da campionamento lento) si deve scegliere una frequenza di campionamento  $F_s$ , sufficientemente maggiore della frequenza di Nyquist ( $F_s \geq 2B$ ), per permettere ad un filtro con pendenza non infinita di separare il segnale dagli alias.

Si indichi con  $\bar{x}(n)$  la sequenza intera, e con  $x(n)$  il campione n-esimo di tale sequenza. Dato un sistema  $L$  che trasforma  $\bar{x}(n)$  nella sequenza  $\bar{y}(n)$  si dice che esso è :

\* Lineare  $\Leftrightarrow L[a\bar{x}_1(n) + b\bar{x}_2(n)] = aL[\bar{x}_1(n)] + bL[\bar{x}_2(n)]$

\* Tempo invariante  $\Leftrightarrow \bar{y}(n - n_0) = L[\bar{x}(n - n_0)]$

\* Con memoria o senza se il campione n-esimo dell'uscita dipende o meno dai campioni precedenti (n-i-esimi) dell'ingresso.

\* Causale  $\Leftrightarrow$  per  $\bar{x}(n)$ :  $\bar{x}(n) = 0 \quad \forall n < 0$  si ha che  $y(n) = 0 \quad \forall n < 0$

Siano:

- $\bar{\delta}(n) = \begin{cases} 1 & \text{se } n = 0 \\ 0 & \text{altrimenti} \end{cases}$

- $\bar{u}(n) = \begin{cases} 1 & \text{se } n \geq 0 \\ 0 & \text{altrimenti} \end{cases}$

Inoltre si definiscono energia e potenza associate alla sequenza  $\bar{x}(n)$  come segue:

$$E(\bar{x}(n)) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} |x(n)|^2 \quad P(\bar{x}(n)) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{n=-N}^N |x(n)|^2 \quad (3.4.2)$$

In particolare, si definiscono le sequenze ad energia finita, per cui vale:

$$E(\bar{x}(n)) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} |x(n)|^2 < \infty \quad (3.4.3)$$

### Sistemi lineari tempo invarianti

In base alla definizione di impulso discreto per una qualunque sequenza  $\bar{x}(n)$  si può scrivere :

$$x(n) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} x(k)\delta(n-k) \quad (3.4.4)$$

Per sistemi lineari tempo invarianti si ha:

$$\begin{aligned} L[x(n)] &= L\left[\sum_{n=-\infty}^{+\infty} x(k)\delta(n-k)\right] = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} x(k)L[\delta(n-k)] = \\ &= \sum_{n=-\infty}^{+\infty} x(k)h(n-k) \stackrel{\Delta}{=} x(n) * h(n) \end{aligned} \quad (3.4.5)$$

Dove  $h(n) = L[\delta(n)]$ , detta risposta all'impulso del sistema, è una funzione che lo descrive completamente. Considerando l'eccitazione  $x(n) = e^{j2\pi fnT}$  la risposta del sistema sarà:

$$\begin{aligned} y(n) &= \sum_{n=-\infty}^{+\infty} h(k)e^{j2\pi f(n-k)T} = e^{j2\pi fnT} \sum_{k=-\infty}^{+\infty} h(k)e^{-j2\pi fkT} = \\ &\stackrel{\Delta}{=} e^{j2\pi fnT} H(e^{j2\pi fT}) \end{aligned} \quad (3.4.6)$$

Dove  $H(e^{j2\pi fT}) \stackrel{\Delta}{=} {}^sH(f)$ , funzione periodica in  $f$  con periodo  $\frac{1}{T}$ , è detta funzione di

trasferimento del sistema.  ${}^sH(f)$  esiste se e solo se  $h(n)$  è assolutamente sommabile. Dalla definizione di  ${}^sH(f)$  segue che i campioni  $h(n)$  sono i coefficienti dello sviluppo in serie di Fourier e si ha quindi:

$$h(n) = \int_{f=-\frac{1}{2T}}^{\frac{1}{2T}} {}^sH(f)e^{j2\pi fnT} df \quad (3.4.7)$$

### La trasformata discreta di Fourier (DFT)

Per rappresentare una sequenza finita di campioni, si può utilizzare la trasformata di Fourier discreta (DFT), essa è formata da un numero finito di campioni della trasformata di Fourier ugualmente spaziati in frequenza. Le formule che descrivono la serie di Fourier discreta, definendo  $W_N = e^{j2\pi/N}$  sono:

$$\tilde{X}(k) = \sum_{n=0}^{N-1} \tilde{x}(n) W_N^{-kn} \quad (3.4.8)$$

$$\tilde{x}(n) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} \tilde{X}(k) W_N^{kn} \quad (3.4.9)$$

$\tilde{x}(n)$ . Questa relazione si ottiene considerando  $\bar{x}(n)$  tale da rappresentare un periodo di  $\tilde{x}(n)$ , ovvero  $x(n) = \tilde{x}(n)$  per  $0 \leq n \leq N-1$  e  $x(n) = 0$  altrimenti.

### La Fast Fourier Transform (FFT)

Uno degli algoritmi matematici più utilizzati per calcolare lo spettro a partire dai campioni quantizzati è detto FFT (Fast Fourier Transform). Esso opera sugli N campioni reali nel dominio del tempo trasformandoli in  $N/2+1$  campioni complessi nel dominio della frequenza con spaziatura costante. L'algoritmo produce un andamento lineare sull'asse delle frequenze.

Il primo elemento che si ottiene è relativo alla frequenza nulla, ha valore reale e rappresenta il valore medio del segnale, cioè la sua componente continua. Il secondo elemento ed i successivi hanno rispettivamente frequenza:

$$f_1 = \frac{1}{N \cdot T} \quad ; \quad f_i = i \cdot f_1 \quad (3.4.10)$$

con  $i = 1, 2, 3, \dots, N/2$  dove l'ultima frequenza è quella di Nyquist.

Dal punto di vista del calcolo della trasformata, l'algoritmo FFT è più efficace se nella sua esecuzione si utilizza la rappresentazione cartesiana invece che quella polare, e se viene scelto per N una potenza di 2. Applicando l'algoritmo si ottengono N linee spettrali; l'informazione è però interamente contenuta nelle prime  $N/2+1$  poiché le successive sono una replica coniugata delle precedenti.

### 3.5 SONOGRAMMA E WATERFALL

Essendo la FFT istantanea, come illustrato nel paragrafo precedente, si pone il problema rappresentativo di come rendere una mappa completa dell'evoluzione di un suono nel tempo. La soluzione più semplice e di fatto più adottata consiste nell'eseguire una serie di singole analisi a intervalli regolari per tutta la durata dell'evento sonoro. Tali analisi saranno "overlapate", ovvero la finestra temporale mobile che si utilizzerà dovrà essere spostata passo passo di modo che ogni posizione della finestra stessa ricopra una porzione più o meno grande (da determinarsi a seconda delle esigenze) della posizione precedente. Si otterrà così un **sonogramma**, ovvero un diagramma in cui si rappresenta il tempo sull'asse X, le frequenze sull'asse Y e ogni componente è rappresentata da una linea che si estende nel tempo, il cui colore è tanto più forte quanto è maggiore l'ampiezza. Poiché la rappresentazione è sul piano bidimensionale, mentre le grandezze da rappresentare sono 3 (frequenze, tempo e ampiezza), per la terza si deve ricorrere al colore. La gamma dei colori da utilizzarsi dev'essere tale da evidenziare le differenze di ampiezza creando con lo sfondo un contrasto tanto maggiore quanto più l'ampiezza è elevata.

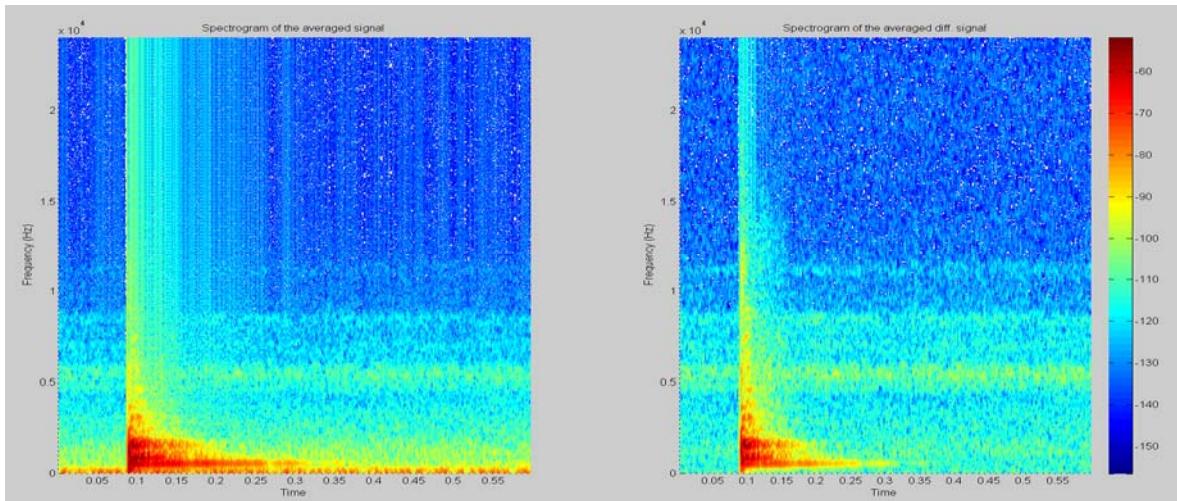
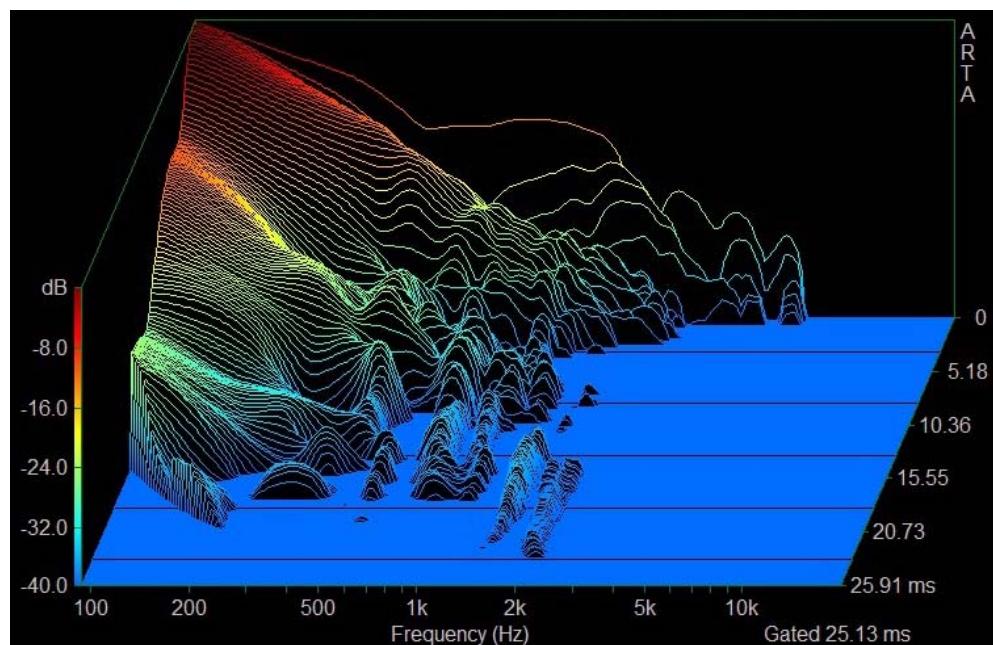


fig. 3.1 - Esempio di sonogramma

Con lo stesso procedimento si può ottenere uno **spettrogramma**, anche detto waterfall. Si tratta di una rappresentazione 3D in cui si hanno ancora le frequenze sull'asse X, il tempo sull'asse Y, mentre le ampiezze sono rappresentate, anziché da una scala di colori, sull'asse Z. In tal modo è possibile distinguere chiaramente anche l'inviluppo dei singoli armonici. Ovviamente in quest'ultimo caso la colorazione è accessoria e non necessaria. Può servire come semplice ausilio alla lettura. Come meglio esposto nel paragrafo precedente, si sottolinea che la risoluzione in frequenza contrasta con la risoluzione temporale. Se ad esempio ho un suono campionato a

48.000 e la finestra di analisi è lunga 16.384 campioni, essa corrisponde ad un intervallo di  $16.384 / 48.000 = 0.34$  secondi, il che significa che ogni variazione di durata inferiore risulterà malamente definita, o non definita affatto, in senso temporale. La cosa è mitigata solo dal fatto che, nella serie di analisi per creare il sonogramma, le finestre delle varie analisi vengono parzialmente sovrapposte con l'overlap. Comunque, in questi casi, una FFT con pochi punti seguirà meglio il fenomeno rispetto a una con più punti, anche se quest'ultima produce risultati più definiti in frequenza. Nel caso specifico di questo studio, tutti i suoni generati sono transienti, e perciò brevi nel tempo. Occorrerà scegliere di conseguenza valori opportuni di frequenza di campionamento e di finestra di analisi tenendo ben presente la natura impulsiva dei segnali da analizzare.



*fig.3.2 - Esempio di Waterfall chart*

## 4. STUDI Sperimentali condotti: divisori in cartongesso

### 4.1 GENERALITA'

Attualmente, uno dei materiali più utilizzati nell'edilizia leggera a secco e che sempre più sta prendendo piede in sostituzione alle tradizionali tecniche che prevedono la legatura di elementi in laterizio con malte di calce o gesso, è il cartongesso. Il suo largo utilizzo deve alle buone caratteristiche termiche, acustiche, ignifughe ed idrorepellenti, nonché alla semplicità di montaggio. Vi si realizzano sia pareti verticali divisorie che controsoffitti, nel primo caso la composizione del pacchetto, tipicamente, comprende almeno due lastre di cartongesso ed un'intercapedine che può essere d'aria o riempita di materiale fonoisolante; si possono raggiungere in questi casi ottimi valori di potere fonoisolante, nonostante di tratti di pareti leggere. Solitamente i pacchetti sono incastonati in montanti metallici guida a "C".

La previsione del potere fonoisolante di pareti composte è piuttosto complessa; per pareti con almeno 5 cm di intercapedine riempita di lana minerale si ottiene:

$$Rw(\max) = 22.7 \cdot (\sigma - 2.26) \cdot (1 - 0.372 \cdot \log \sigma_2/\sigma_1) / (\log 1.21/d) 0.268 \quad [\text{dB}] \quad (4.1.1)$$

dove  $\sigma_1$  e  $\sigma_2$  sono i valori della densità superficiale dei due pannelli che costituiscono la parete doppia,  $\sigma$  la somma delle densità superficiali e  $d$  la distanza tra loro. Questa relazione è valida per  $d > 5$  cm e per  $Rw$  compreso tra 30 e 50 dB.

Dati sperimentali elaborati presso l'IENGF (Istituto Elettrotecnico Nazionale Galileo Ferraris) forniscono per le pareti in cartongesso, montate su telai in profili metallici leggeri, la seguente relazione di previsione:

$$Rw = 20 \lg \sigma + 20 \lg d + e - 6 \quad [\text{dB}] \quad (4.1.2)$$

dove oltre ai simboli già definiti si indica con  $e$  lo spessore del materiale fonoassorbente presente nella intercapedine. I limiti di validità sono:

- Spessore di ogni singola lastra compreso tra 0.8 e 2 cm;
- Spessore totale della struttura non superiore a 20 cm.

Nel caso in cui sulla parete siano presenti aperture, porte o finestre, il potere fonoisolante complessivo si riduce notevolmente. La relazione che segue consente di calcolare tale valore in funzione del potere fonoisolante ( $R_i$ ) e delle superfici ( $S_i$ ) delle singoli parti che costituiscono la parete:

$$R = -10 \log \left( \frac{1}{S} * \sum S_i * 10^{-R_i/10} \right) \quad [\text{dB}] \quad (4.1.3)$$

dove  $S$  è la superficie totale della parete ed  $R$  il potere fonoisolante complessivo. Sperimentalmente è facile verificare come componenti edilizi caratterizzati da bassi valori di  $R_i$  possano ridurre notevolmente il potere fonoisolante complessivo della parete. Nel caso quindi di pareti perimetrali esterne, sia orizzontali che verticali, nelle quali molto spesso sono inserite porte e finestre, il potere fonoisolante complessivo risulta notevolmente influenzato dal valore che lo stesso assume per questi componenti. Di qui l'opportunità di prestare la massima attenzione nella realizzazione dei serramenti esterni ed in particolare delle superfici vetrate, alle quali, in pratica, è affidato il compito di assicurare l'isolamento acustico dai rumori provenienti dall'esterno.

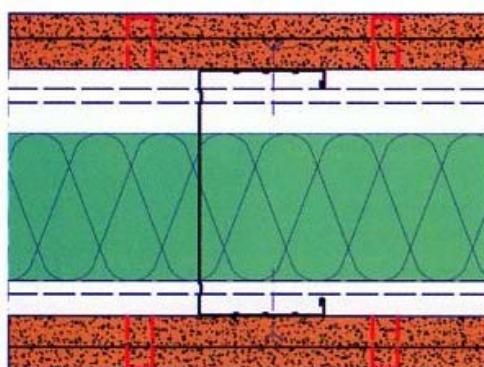
## 4.2 Sperimentazioni effettuate

Le prove qui presentate sono state eseguite presso il plesso scolastico "La Salle", in particolare su pareti divisorie interne tra aule all'ultimo piano (ampliamento dell'anno 2012) così costituite:

Pareti divisorie interne e parte delle pareti interne in gessofibra Fermacell:

Le lastre Fermacell Gessofibra sono composte da gesso e fibre di cellulosa ottenute da carta riciclata e sono impermeabilizzate su entrambi i lati (Vengono utilizzate anche nelle case in legno prefabbricate). Questo tipo di rivestimento garantisce protezione dal fuoco e impedisce che i montanti in legno perdano la verticalità. Vengono fissate mediante sistemi meccanici, quali griffe o chiodi. Con il Gessofibra Fermacell si ottengono partizioni verticali con spessori contenuti ma con elevate prestazioni acustiche e di resistenza ai carichi appesi: ad esempio, una parete di 12 cm di spessore con struttura in metallo raggiunge un potere fonoislante  $R_w$  di 62 dB. Analizziamo brevemente alcune caratteristiche tecniche:

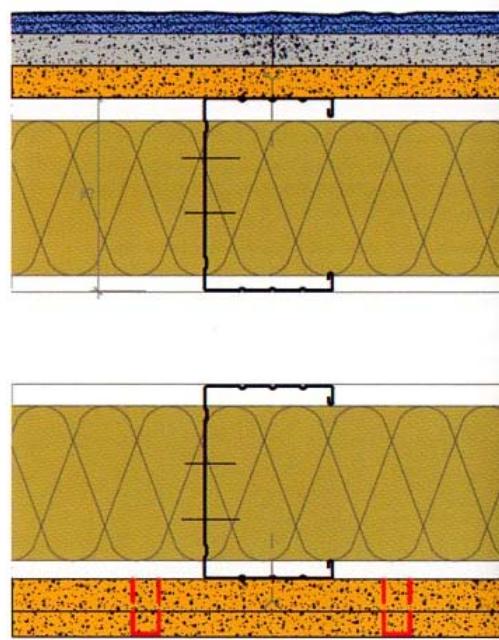
1. Orditura metallica con profili affiancati e materassino isolante interposto



*fig. 4.1*

- Rivestimento: 2 lastre in gessofibra originale Fermacell sp. 12.5 + 10 mm su entrambi i lati dell'orditura
- Spessore complessivo: 145 mm
- Potere fonoisolante:  $R_w=62$  dB
- Reazione al fuoco: classe 0.

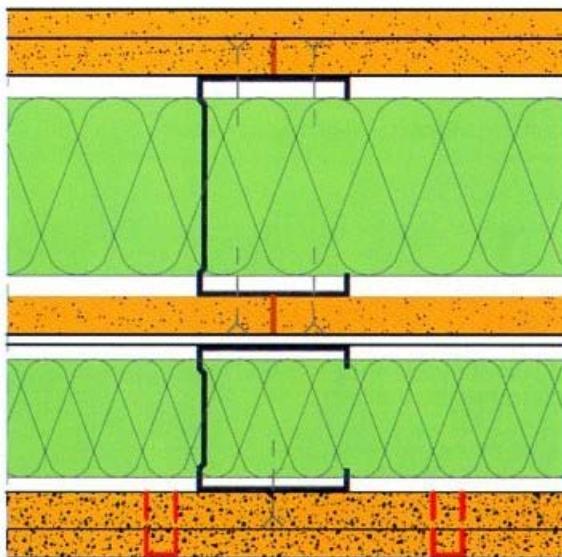
2. Orditure metalliche doppie e parallele con materassino isolante interposto



*fig. 4.2*

- Rivestimento interno: lastre in gessofibra originale Fermacell sp. 12.5 + 10 mm
- Rivestimento esterno: lastre cementizie Powerpanel H20 sp. 12.5 mm + lastre in gessofibra originale Fermacell sp. 12.5 mm
- Riempimento interno con pannello CELENIT FL I60 sp. 60 mm densità 160 kg/m<sup>3</sup>
- Spessore complessivo: circa 280 mm
- Peso: 90 kg/m<sup>2</sup>
- Potere fonoisolante:  $R_w=71$  dB
- Reazione al fuoco: classe 0.

3. Orditura metallica doppia parallela con materassini isolanti interposti



*fig. 4.3*

- Rivestimento: 1 strato di lastre Fermacell in gessofibra originale (sp. 12.5 + 10 mm su entrambi i lati esterni) + 1 strato di lastre Fermacell in gessofibra originale sp. 10 mm all'interno (con funzione di taglio acustico)
- Spessore complessivo: 180 mm
- Potere fonoisolante:  $R_w=63.5$  dB
- Reazione al fuoco: classe 0.

Sono state effettuate misure di vari parametri acustici passivi. In questa sede si riporta solo la misura di isolamento tra partizioni interne (aula) poiché è su questa che si è applicato il "filmato sonoro" atto a individuare discontinuità all'interno della struttura.

#### **Strumentazione utilizzata**

Si è utilizzata la seguente strumentazione, di proprietà del Dipartimento di Ingegneria Industriale:

- Altoparlante dodecaedrico LookLine®;
- Generatore di rumore bianco con amplificatore integrato LookLine®;
- Fonometro integratore di precisione (classe 1 IEC 804) ed analizzatore di spettro di tempo reale Brüel & Kjaer®, tipo 2250;
- Cavi speciali schermati con elementi sottili "sottoporta", Brüel&Kjaer®;
- Calibratore acustico di precisione (classe 1 IEC 453) Brüel & Kjaer®, tipo 4231;
- Array microfonico Eigenmike® ;
- Lettore Mp3 Philips®;
- Clappatore.

Tutta la strumentazione suddetta era stata preventivamente verificata e calibrata presso il laboratorio di questo Dipartimento, utilizzando strumentazione di riferimento con classe 0 di precisione (analizzatore di spettro Brüel & Kjaer tipo 2133 e sorgente campione B&K tipo 4231). Per l'elaborazione dei dati acquisiti sono stati impiegati i seguenti software:

- Software di analisi Brüel & Kjaer® “BZ-5503 Measurement Partner Suite”;
- Software di analisi Adobe Audition 1.5®;
- Software di analisi Audacity®;
- Piattaforma per il calcolo numerico MATLAB®, con annessi script sviluppati all'interno del Dipartimento di Ingegneria Industriale dell'Università di Parma;
- Software Microsoft ICE (Image Composite Editor);
- Piattaforma Plogue Bidule® con modulo X-Volver.

#### **Misure eseguite**

Si è proceduto alla misurazione dell'isolamento acustico di una partizione tra due aule adiacenti. La misura è stata effettuata utilizzando il dodecaedro in una delle due aule (ambiente emittente) emittente dapprima rumore bianco non equalizzato e successivamente segnale sinusoidale a frequenza variabile (sine sweep esponenziale). Il dodecaedro è stato posizionato in tre punti dell'ambiente emittente, indicati nella figura seguente.

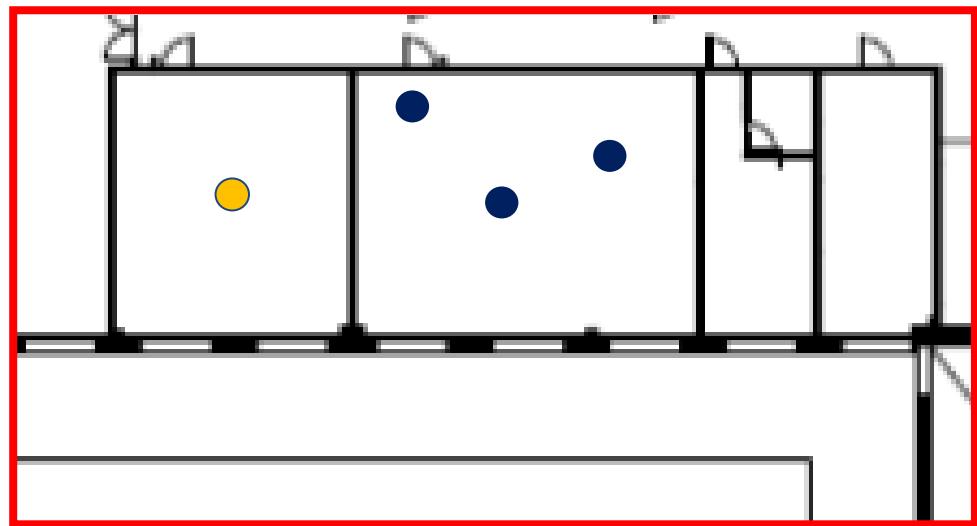


fig. 4.4 - posizioni sorgente (blu) e ricevitore (arancio)

La misura del tempo di riverbero  $T_{60}$  è stata effettuata con un clappatore, uno strumento che si caratterizza per ottima risposta in frequenza e riproducibilità.



fig. 4.5 - clappatore per la misura del tempo di riverbero

### Misura con rumore bianco non equalizzato

Il dodecaedro LookLine® è stato posto nell'aula accanto (ambiente emittente) in tre differenti posizioni (fig.4.4), che denomineremo rispettivamente 1, 2, e 3 leggendo la planimetria da sinistra verso destra; il livello di pressione sonora è stato misurato nella ricevente “spazzolando” lo spazio con il microfono in continuo movimento.

### Misura con tecnica Sine Sweep

Posizionando il dodecaedro sempre nelle tre posizioni nell'aula trasmittente, il livello nella ricevente è stato misurato tenendo fermo il microfono durante il segnale di sweep e spostandolo nei cinque secondi di silenzio tra un segnale e il successivo in modo casuale, evitando posizioni troppo vicine alle pareti. Il segnale immesso è descritto dalla seguente legge:

$$x(t) = \operatorname{sen} \left| \frac{\omega_1 * T}{\ln(\frac{\omega_2}{\omega_1})} * \left( e^{\frac{t}{T} * \ln(\frac{\omega_2}{\omega_1})} - 1 \right) \right| \quad (4.2.1)$$

In cui  $\omega_1$  e  $\omega_2$  sono le frequenze iniziale e finale, e  $T$  durata temporale del segnale.

Ai fini del presente studio, le due misure sopra descritte hanno permesso di individuare le frequenze alle quali l'isolamento presenta una caduta.

### Misura con array microfonico Eigenmike®

L'array microfonico Eigenmike® è prodotto dalla società americana "MH acoustic" ([www.mhacoustics.com](http://www.mhacoustics.com)) ed è stato uno dei primi sistemi di questo tipo ad essere commercializzato. Il sistema, illustrato nello schema seguente è composto da:

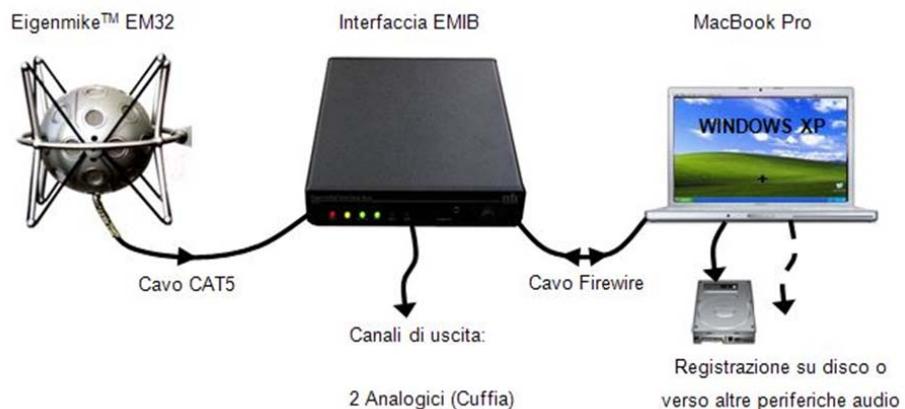


fig. 4.6 - Catena di acquisizione

Il microfono è costituito da una sfera di alluminio con raggio di 42mm sulla cui superficie sono disposte in modo quasi uniforme 32 capsule omnidirezionali a condensatore di tipo "electred" di elevata qualità. All'interno della sfera vi è l'intera circuiteria analogica di preamplificazione con

guadagno controllabile via software, nonché i convertitori analogico digitali in grado di campionare i segnali delle capsule con risoluzione fino a 24 bit e frequenza di campionamento di 48000 Hz. I segnali vengono quindi trasferiti all’interfaccia EMIB mediante un collegamento digitale garantendo totale immunità ai disturbi. Le 32 capsule sono montate secondo una disposizione sui baricentri delle facce e sui vertici di un dodecaedro inscritto nella sfera.



*fig. 4.7 - microfono Eigenmike®*

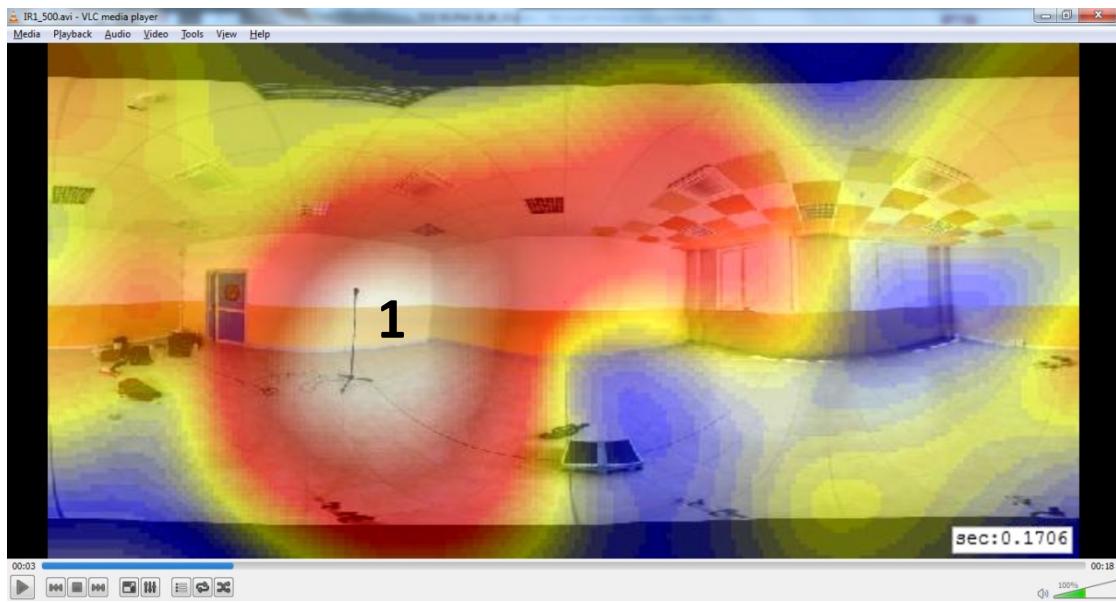
Elaborando i segnali a 32 canali (corrispondenti alle 32 acquisizioni dei 32 microfoni omnidirezionali) ottenuti dalla sonda Eigenmike® è possibile, processandoli con un opportuno banco di filtri, ottenere segnali corrispondenti a 32 microfoni virtuali ultradirettivi diretti perpendicolarmente ai piani dei trasduttori reali. Il filtraggio è stato effettuato con il modulo X-Volver operante sulla piattaforma Plogue Bidule®. I filtri impiegati da X-Volver sono stati ottenuti precedentemente (non oggetto di questa tesi e non dalla sottoscritta) misurando le risposte all’impulso della sonda Eigenmike® in camera anecoica. Il microfono è stato posizionato al centro della stanza in esame. Nell’aula trasmittente si è utilizzato il dodecaedro in tre posizioni prefissate, emettendo prima rumore bianco da tutte e tre e poi segnale sweep. Prima di inserire il microfono sul treppiede si sono fatte dalla stessa posizione fotografie a 360° di tutta l’aula, al fine di inserirle nel programma Microsoft ICE® (Image Composite Editor) per ottenere un’unica immagine dell’intera aula. Quest’ultima è stata inserita nello script di MATLAB® realizzato dal Dott. Ing. Amendola del Dipartimento di Ingegneria Industriale. Sempre nello stesso script sono state inserite di volta in volta le elaborazioni sia delle risposte all’impulso sia del segnale sweep e per ognuna di esse è possibile vedere l’evoluzione del campo sonoro sull’immagine a 360° dell’aula in esame. Tale script permette di ottenere un filmato sovrapponendo all’audio del

segna ricevuto le mappe dei livelli sonori di pressione che entrano e si propagano nell'ambiente ricevente. E' così possibile vedere da dove entra il suono: in generale inizialmente il suono entra in corrispondenza della posizione del dodecaedro nell'aula adiacente e poi continua a propagarsi "rimbalzando" su tutte le pareti. Oltre a creare un vero e proprio filmato, è possibile creare fermi immagine delle mappe alle varie frequenze. Questo metodo permette di individuare discontinuità nelle pareti.

### **4.3 ELABORAZIONE E RISULTATI**

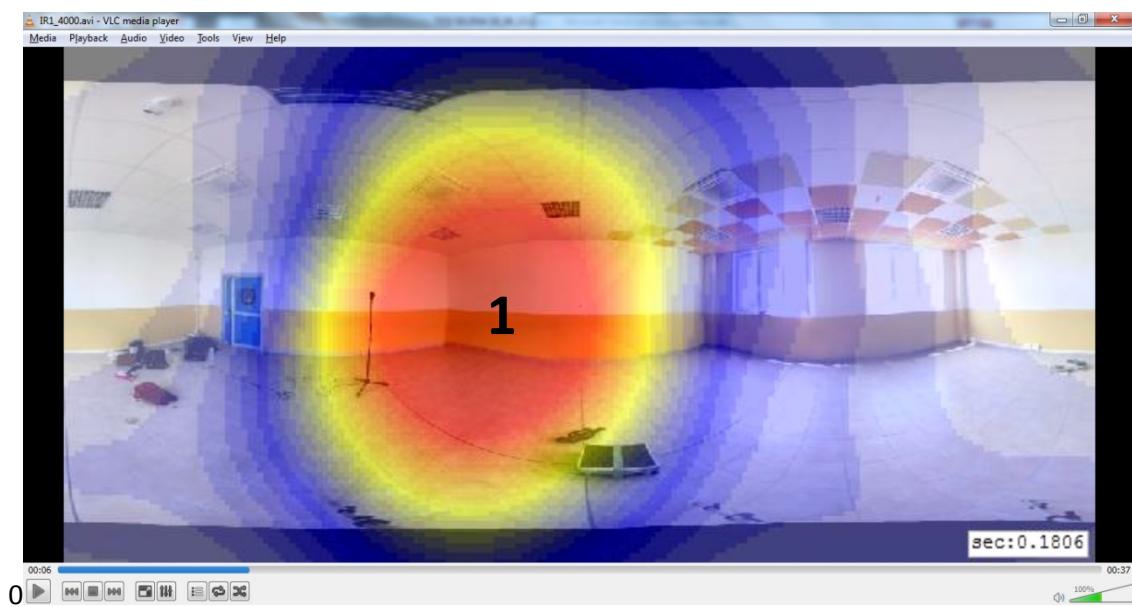
Le misurazioni dell'isolamento acustico della partizione verticale che separa l'aula in esame da quella contigua sono state condotte sia con rumore bianco (in terzi di ottava) che con segnale sweep (in ottave e terzi d'ottava). Il confronto fra i due metodi di elaborazione del segnale sweep ha portato al calcolo dell'isolamento di parete, utilizzando le curve di riferimento fornite dalla UNI 717-1 in ottave e terzi d'ottava.

Non si riportano in questa sede i valori di isolamento ottenuti in quanto non sono oggetto di diretto interesse per il presente studio. Si precisa però che nelle curve si isolamento ottenute da un'analisi in terzi di ottava di ambo i medoti, si nota che le frequenze "critiche" (cioè dove si ha un decadimento dell'isolamento) si attestano tra i 200 e i 500 Hz: è in tale range di frequenze infatti che abbiamo approfondito l'analisi con l'array Eigenmike®. Tuttavia alle basse frequenze il suono tende ad essere diffuso e non direttivo, ragion per cui analizzando i filmati delle registrazioni effettuate tra i 200 e i 500 Hz non si individua il punto di fuga da cui penetra il rumore. Si vedano le figure successive.



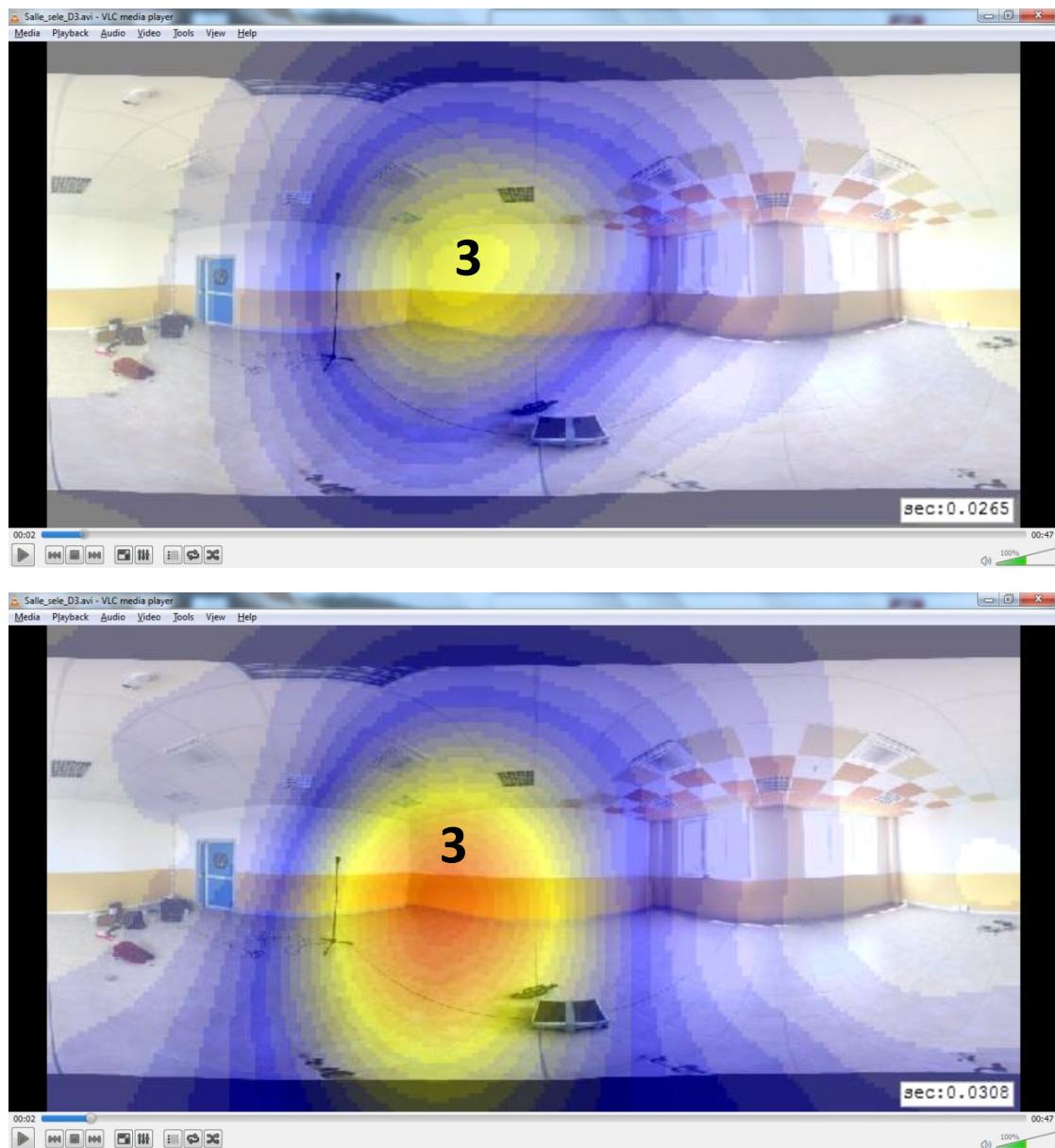
*fig. 4.8 - ingresso del suono tra i 200 e i 500 Hz*

Abbiamo quindi esaminato accuratamente i filmati ottenuti dalle risposte all'impulso ottenute nelle tre posizioni a 4000 Hz, frequenza alla quale non si ha, nel caso specifico, una caduta dell'isolamento, ma è per sua natura caratterizzata da una maggiore direttività del suono (all'aumentare della frequenza aumenta infatti la direttività), e da esse è facilmente visibile la dinamica di "attraversamento" delle onde sonore.



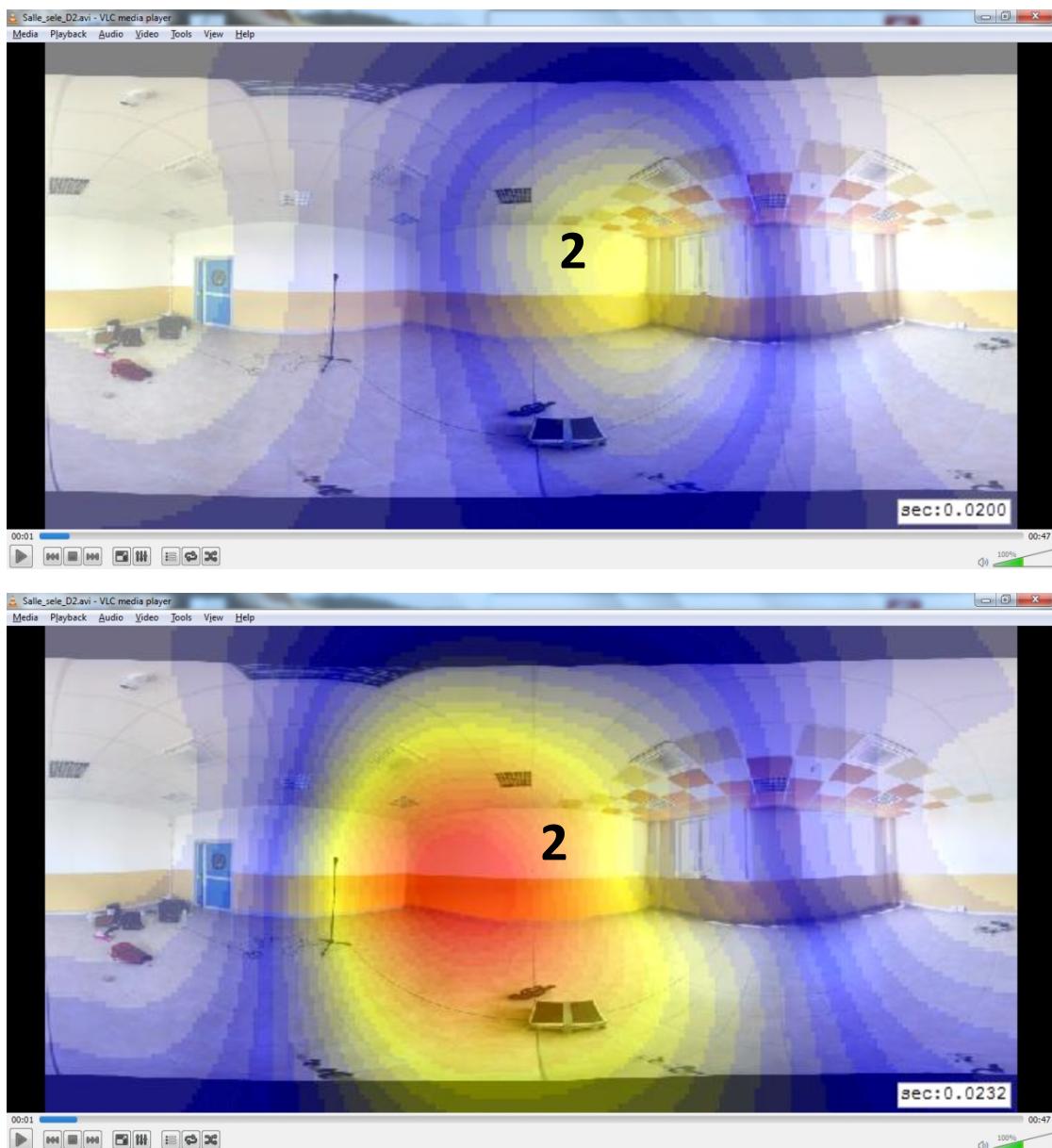
*fig. 4.9 - ingresso del suono a 4000 Hz con altoparlante in posizione 1*

Il suono sembra entrare direttamente in corrispondenza della posizione dell'altoparlante, esattamente come avviene per la posizione 3 dell'altoparlante, sempre esaminata a 4000 Hz.



*fig. 4.10 - ingresso del suono a 4000 Hz con altoparlante in posizione 3*

Nel caso di altoparlante in posizione 2, si vede che, come nei casi precedenti, il suono inizialmente attraversa il divisorio in corrispondenza della posizione della sorgente. Tuttavia, si nota che i livelli maggiori di pressione sonora non si verificano in corrispondenza della zona d'ingresso del suono diretto, bensì in corrispondenza dell'angolo inferiore sinistro della parete in esame; è in tale zona che si verifica il minor livello di isolamento della parete per ognuna delle posizioni dell'altoparlante prese in esame.



*fig. 4.11 - ingresso del suono a 4000 Hz con altoparlante in posizione 2*

Pare quindi evidente che in tale angolo si collochi il punto di fuga che inficia la proprietà isolante dell'intera parete. A tal proposito si è ipotizzata la presenza di elementi di impiantistica nella zona critica, e l'ipotesi è stata avvalorata dalla presenza di canaline porta-cavi dell'impianto elettrico nell'ambiente emittente.



*fig. 4.12 - canaline porta-cavi nell'ambiente emittente*

#### **4.4 CONSIDERAZIONI**

Nell'esaminare le partizioni verticali interne la tecnica Sine Sweep ha dato buoni risultati, in quanto coincidenti con quelli ottenuti dalle misurazioni con tecnica tradizionale (rumore bianco o rosa). Le misurazioni effettuate con le due tecniche sono state condotte con due modalità differenti; per la tecnica Sine Sweep attenendosi alle prescrizioni della normativa che imponeva di mantenere il microfono fermo durante l'emissione del segnale, mentre per la tecnica tradizionale (che permette invece di scegliere) si è “spazzolato” l'intero ambiente con il microfono sempre in movimento. Nonostante la scelta meno cautelativa adottata per la tecnica tradizionale, si è giunti allo stesso risultato: ciò testimonia il fatto che, se condotto con attenzione, anche il metodo del microfono in continuo movimento fornisce risultati precisi. La tecnica Sine Sweep, così come la tecnica tradizionale, richiede, per ottenere risultati precisi, un'analisi in terzi d'ottava.

L'impiego della tecnica innovativa dell'array microfonico Eigenmike® ha fornito risultati eccezionali. Grazie all'analisi delle mappe isofoniche ottenute tramite lo Script di MATLAB® (sviluppato dall'Ing. Amendola) siamo infatti riusciti a vedere con chiarezza il punto di fuga della partizione verticale interna, risultata deludente rispetto ai valori di legge imposti dal D.P.C.M. 05/12/'97; se ne è quindi dedotto che il sistema di isolamento adottato non è esso stesso difettoso, ma risulta non ottimale per le soluzioni impiantistiche adottate.

## **5. STUDI Sperimentali condotti: solai in laterocemento**

### **5.1 GENERALITA'**

#### **Sfondellamento dei solai**

Lo sfondellamento dei solai è un fenomeno di degrado che porta al distacco e alla successiva caduta delle cartelle (o "fondelli", da cui il termine "sfondellamento") delle pignatte in laterizio interposte tra i travetti nei solai in laterocemento. Il termine comprende anche il distacco di intonaco, di strutture continue in arelle o reti intonacate all'intradosso dei solai.

Le cause sono molteplici, dalla scarsa qualità dei materiali impiegati ad errori di progettazione o di posa in opera, alla scarsa manutenzione, all'avvento di fenomeni eccezionali come un sisma etc. ma hanno tutte in comune il raggiungimento di uno stato tensionale limite in parti del solaio. Questo comporta la frattura delle parti meno resistenti fino alla caduta di porzioni anche significative di laterizio e intonaco, compromettendo la sicurezza di coloro che vi sottostanno.

Non si tratta di un problema strutturale, il fenomeno non comporta generalmente una perdita di stabilità del solaio né una riduzione della sua capacità portante, ciò nonostante risulta compromettere la sicurezza delle persone e dei locali, in quanto i carichi che si staccano possono raggiungere i 50 kg / mq.

#### **Tipologie costruttive soggette allo sfondellamento**

I principali tipi di solaio colpiti dallo sfondellamento risultano essere quelli interamente gettati in opera e composti da laterizi con sezioni tali per cui si ha un accumulo di tensioni in zone meno resistenti, come ad esempio le alette inferiori, che col passare del tempo e dei carichi possono raggiungere uno stato tensionale limite oltre il quale si frattureranno.

Un fabbricato può essere incline a questo fenomeno nel caso in cui, durante la progettazione, si decidesse di coprire ampie luci con semplici solai gettati in opera, così che, con il tempo e la continua applicazione dei carichi permanenti, nascano eccessive deformazioni in seguito al rilassamento dei materiali strutturali, quindi in seguito a fenomeni di natura visco-plastica.

Una delle cause principali dello sfondellamento va cercata nel momento della realizzazione del solaio: eventuali errori nella messa in opera potrebbero comportare disomogeneità interne e quindi la presenza di zone più resistenti rispetto ad altre nelle quali si avranno delle

concentrazioni tensionali, il che, col tempo e l'applicazione di carichi, sfocerà in una crisi strutturale delle componenti più deboli del solaio, i laterizi.

Gli edifici che presentano maggiormente queste problematiche sono quelli costruiti tra gli anni '40 e '70, in particolare nei casi di edilizia popolare e di edifici pubblici, come le scuole. Per la maggior parte di questi edifici, inoltre, la scelta dei materiali venne fatta puntando al risparmio, il che comportò un più rapido degrado sia estetico che strutturale.

Nel caso di solai completamente o parzialmente prefabbricati il problema è meno frequente, in quanto la tipologia di travetti e di laterizi tipicamente scelta non comporta la nascita di zone eccessivamente sollecitate. Tuttavia in caso di mancata cura e manutenzione dell'intradosso del solaio anche in questi casi si può raggiungere uno stato di deterioramento tale da causare sfondellamento.

Spesso la causa principale del fenomeno dello sfondellamento risiede nella scelta delle pignatte. Nel caso di solai realizzati in opera le sezioni delle pignatte, dovendo fungere anche da cassaforme per i travetti, presentano alette laterali. Queste costituiscono la causa principale del fenomeno dello sfondellamento, risultando come le parti più deboli della sezione, cioè le zone in cui si concentreranno maggiormente le tensioni dovute alle deformazioni del solaio.

L'origine degli stati tensionali che comportano la rottura dei laterizi può essere direttamente legata a carichi applicati, oppure può derivare da azioni indirette quali le variazioni di temperatura o l'instaurarsi di reazioni chimiche tra le sostanze presenti in atmosfera e i laterizi stessi.

Lo sfondellamento può anche nascere da ripetuti cicli termici, quindi da ripetute dilatazioni e contrazioni delle diverse parti del solaio, le quali generalmente presentano coefficienti di dilatazione termica diversi tra di loro. La differenza tra le deformazioni delle pignatte e dei travetti porta alla nascita di stati tensionali interni a entrambe le parti, i quali risultano più gravosi per i laterizi, in quanto meno resistenti dei travetti in calcestruzzo armato sia a compressione che a trazione.

In caso di mancato distanziamento delle armature dei travetti dai laterizi le ripetute variazioni di temperatura possono portare ad un elevato stato tensionale, particolarmente nelle alette delle pignatte a causa delle dilatazioni dell'acciaio in prossimità di queste.

In certi casi infatti la causa dei problemi di sfondellamento riscontrati nei solai delle scuole si è constatato derivare dai cicli di spegnimento e accensione del sistema di riscaldamento tra fine e inizio settimana.

Un’ulteriore causa, legata a stati tensionali indiretti, è data dall’infiltazione dell’acqua e dello sporco attraverso l’intonaco, le quali possono, con il tempo e il realizzarsi di reazioni chimiche di ossido-riduzione, portare ad un’eccessiva perdita di resistenza del fondello delle pignatte e ad un eventuale distacco e caduta dovuta al peso proprio dei frammenti di laterizio.

In altri casi la causa del fenomeno dello sfondellamento è direttamente collegata al raggiungimento nelle pignatte di stati tensionali limite derivanti dall’applicazione di carichi eccessivi sul solaio. In questo caso generalmente i laterizi più in pericolo saranno quelli nei pressi degli incastri tra solaio e pareti, dove le pignatte saranno più vincolate e quindi sottoposte a tensioni maggiori.

Queste diverse tipologie di deterioramento possono combinarsi per rendere il fenomeno ancora più rapido, e quindi meno prevedibile e prevenibile.

#### **Diagnosi preventiva sullo sfondellamento**

Per valutare lo stato di un solaio sono necessari diversi passaggi, primo dei quali il controllo visivo, attraverso il quale si possono individuare in prima battuta le zone in cui è più probabile imbattersi in fenomeni di sfondellamento, quindi zone in cui è possibile notare disomogeneità dell’intradosso.

Dopo di che bisogna procedere con un controllo più accurato che ci consenta di identificare i punti in cui vi è o è molto probabile che vi sia un difetto interno, che con il tempo potrebbe manifestarsi attraverso la caduta di frammenti di laterizio e intonaco.

In caso di marcata disomogeneità interna tra i punti dell’intradosso sarà necessario operare in maniera tale da mettere in sicurezza i vani sottostanti e controllare l’effettivo stato di ammaloramento del solaio attraverso prove distruttive.

Una volta eseguiti i controlli e constatata preliminarmente la presenza di irregolarità interne al solaio sarà necessario svolgere delle prove per controllarne l’effettivo stato attraverso prove distruttive. Il controllo si può fare mediante l’utilizzo di una sonda, che andrà inserita all’interno delle pignatte nella zona in cui è probabile che vi siano difetti. In maniera più drastica si può effettuare il controllo andando a rimuovere porzioni di intonaco e analizzare direttamente il grado di ammaloramento dei laterizi. Una volta individuato e rimosso il problema si può procedere con il risanamento del solaio considerando che la parte strutturale generalmente non sarà

compromessa da questo fenomeno di deterioramento, a parte in caso di degrado ed eventuale caduta del copriferro dei travetti.

Le principali prove non distruttive che sono state sviluppate per poter dare una valutazione dello stato interno di un solaio sono due:

- Controllo mediante termocamera.
- Controllo mediante percussione e analisi acustica.

Per effettuare un controllo con termocamera è necessario generare un gradiente termico tra intradosso ed estradosso. Quindi viene fatta una valutazione dello stato del solaio analizzando le differenze, punto per punto, nei confronti dello scambio di calore, individuando eventuali ponti termici o imperfezioni interne. I risultati che si ottengono con questa prova ci possono fornire informazioni utili per procedere con il controllo dello stato del solaio.

## 5.2 Sperimentazioni effettuate

### Strumentazione utilizzata

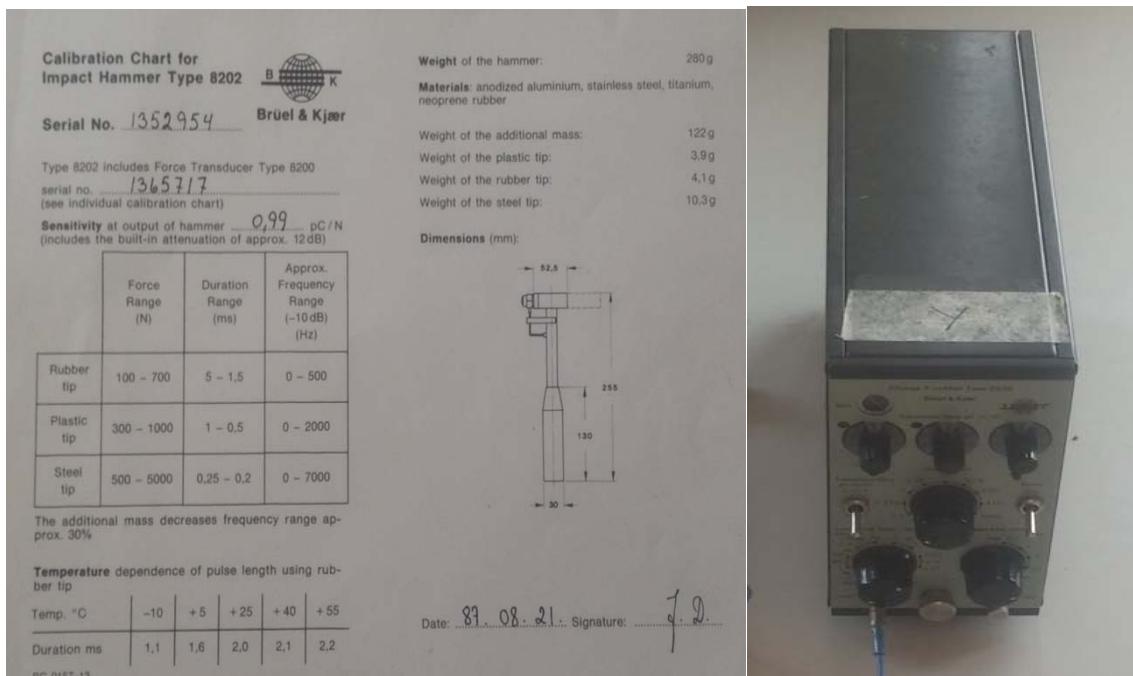
Le tecniche analizzate hanno tutte come base la percussione dei punti del solaio e l'acquisizione delle risposte delle zone sollecitate attraverso strumentazioni in grado di percepire le onde generate dalla sollecitazione dell'intradosso.

La strumentazione usata per questi tipi di prove è composta da:

Martello strumentato Brüel & Kjær® mod. 8202: si tratta di un martello strumentato con punte intercambiabili di diversa durezza dotato di una cella di forza, alimentato da un preamplificatore Brüel & Kjær®, contenente un circuito analogico integratore (può effettuare una doppia integrazione) che può fornire in uscita, a scelta, o il segnale di accelerazione rilevato dal trasduttore, o il segnale di velocità o di posizione.



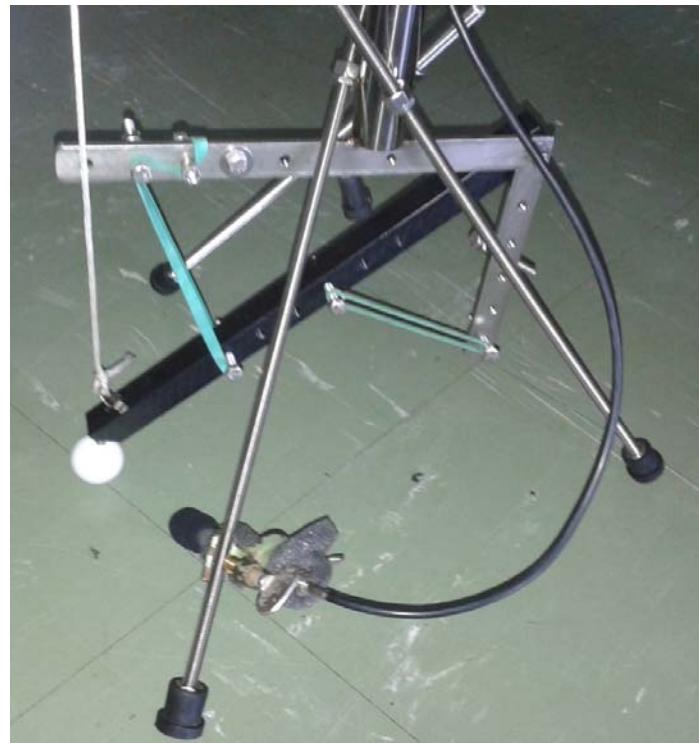
*fig. 5.1 - Martello strumentato usato nelle prove.*



*fig. 5.2 (sinistra) - Caratteristiche delle punte*

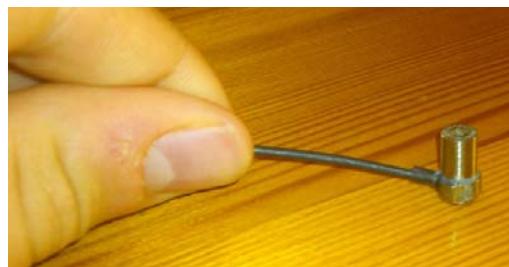
*fig. 5.3 (destra) - Preamplificatore*

Battitore non strumentato, costruito appositamente per la percussione dei solai nell'ambito di un lavoro di tesi inerente al presente studio, atto a imprimere colpi aventi circa pari energia: sono state effettuate prove per calcolare il range di variabilità dell'energia impressa a parità di superficie di contatto, riscontrando una tolleranza, su una parete in calcestruzzo, del 3% circa.



*fig. 5.4 - Battitore appositamente costruito per le prove sui solai*

Accelerometro piezoelettrico PCB Piezotronics®: trasduttore monoassiale mediante il quale è possibile misurare le vibrazioni, in direzione dell'asse dell'accelerometro, dell'oggetto a cui è reso solidale



*fig. 5.5 - Accelerometro utilizzato nelle prove*

Microfono omnidirezionale Brüel & Kjær® mod. 4188 con capsula da 1/2 pollice,.



*fig. 5.6 - Uno dei microfoni omnidirezionale utilizzati nelle prove*

Periferica di registrazione ZOOM H6® con microfono direttivo ad esso associato, e possibilità di collegare altri microfoni (6 canali in tutto):



*fig. 5.7 - ZOOM H6® dotato di microfono direttivo utilizzato nelle prove.*

#### **Sollecitazione con martello strumentato ed acquisizione con accelerometro**

La prima tecnica analizzata si basa sull'utilizzo di un martello con cella di forza, e un accelerometro, che, solidale al muro, ci permetterà di acquisire la vibrazione traversante il solaio nell'area sollecitata.

Conoscere la forza impressa permette di normalizzare l'energia delle battiture.

Il problema principale dell'utilizzo di questo set up consta nel corretto posizionamento e fissaggio dell'accelerometro, in quanto essendo la superficie dell'intradosso non uniforme e costituita da intonaco verniciato risulta difficile incollarvi il trasduttore in maniera tale che i risultati non vengano compromessi dal tipo di incollaggio e dalla posizione.

Un ulteriore problema è dato dall'azione di battitura: potrebbe causare distacchi di piccole porzioni di intonaco se questo non è perfettamente integro. Un ulteriore limite è dato dal notevole tempo impiegato nel fissare e distaccare gli accelerometri.

#### **Sollecitazione con martello strumentato ed acquisizione con microfono**

Rispetto al set up descritto nel paragrafo precedente, qui muta l'acquisizione: si utilizza un microfono per acquisire le onde sonore generate dall'impatto del martello sulla zona di studio.

In questo caso le onde trasmesse si propagano nell'aria (fluida) anziché nel solaio (mezzo solido).

Lo spettro del suono emesso dalla porzione di solaio sollecitato mediante la percussione risulterà diverso per strutture con caratteristiche meccaniche differenti, in quanto le zone vuote fungeranno da “cassa di risonanza”, amplificando certe frequenze rispetto ad altre. L'utilizzo di un microfono piuttosto che di un accelerometro permette di ridurre i tempi di esecuzione ed elimina il problema dell'incollaggio. Conoscendo il dato in ingresso nel sistema grazie alla cella di forza e l'onda in uscita grazie al microfono, siamo in grado di estrapolare la risposta all'impulso del sistema. Come nel caso precedente, calcolare la risposta all'impulso nei vari punti consente di ottenere risultati indipendenti dall'energia di battuta.

#### **Sollecitazione con percussore non strumentato ed acquisizione con microfono**

Per facilitare l'esecuzione della prova si è pensato di sostituire il martello con un battitore semplice da utilizzare. Si è per questo costruito un apposito battitore meccanico. Si è pensato di ottimizzare e rendere la differenziazione tra i suoni generati dai colpi su punti integri rispetto ai punti disintegri scegliendo attentamente il materiale da far impattare contro la superficie del solaio, scegliendo tra materiali di natura diversa quello che ci permetta di ottenere risultati maggiormente differenziati tra i punti sani e quelli difettati. In particolare, un materiale più rigido, a parità di energia imposta al battitore, sarà in grado di scaricare più energia rispetto ad un materiale più deformabile, il quale assorberà parte dell'energia. Il materiale è stato scelto anche con l'idea di non danneggiare le superfici su cui impatta. Risponde bene a queste caratteristiche una pallina da calcio balilla.

#### **Sollecitazione con battitore strumentato mediante accelerometro e acquisizione con microfono**

L'ultimo metodo non distruttivo sviluppato per il controllo dei solai nei confronti del fenomeno dello sfondellamento nasce dal metodo di con solo un microfono e il battitore non strumentato, al quale si aggiunge però un accelerometro posizionato in punta, dietro alla superficie battente, più precisamente incastrato in maniera tale per cui l'asse dell'accelerometro risulti parallelo alla direzione di battuta, cioè perpendicolare all'asta, in quanto la velocità tangenziale con cui l'estremità battente colpisce la superficie risulta tangenziale all'arco di circonferenza tracciato da questa estremità durante il rilascio dell'energia elastica accumulata per il colpo. La scelta di posizionare l'accelerometro su questo asse è necessaria per rendere meno percepibili allo strumento di acquisizione gli effetti di eventuali vibrazioni di parti del battitore durante il colpo, in particolare così facendo, essendo l'accelerometro uno strumento in grado di misurare l'accelerazione in direzione del proprio asse, tutte le eventuali oscillazioni del braccio dello strumento durante la percussione non andrebbero ad influenzare i dati acquisiti.

Una volta fissato l'accelerometro dietro alla superficie battente è possibile ottenere, come per il metodo con martello strumentato e microfono o accelerometro, sia dati in ingresso nel sistema, costituito dalla zona di intradosso in esame, sia i dati in uscita dal sistema percepiti dal microfono. Quindi, come nei casi analoghi precedenti, è possibile normalizzare i dati rispetto all'intensità del colpo inferto alla superficie colpo per colpo, svincolando i risultati da variabili non controllabili.

Questo metodo, rispetto a quello con il solo battitore non strumentato in aggiunta al microfono, ci permette di ottenere risultati più attendibili, in quanto eventuali colpi sferzati con intensità diverse sullo stesso punto, una volta normalizzati, risulteranno analoghi agli altri colpi relativi allo stesso punto sollecitato. Con il metodo basato sul battitore semplice in aggiunta al microfono si cerca di ovviare a questo problema registrando diversi colpi per lo stesso punto e prendendo come risultato per quel punto la media di quei colpi.

#### **Prova in situ su struttura con laterizi visibilmente sfondellati**

Si è esaminato il solaio di un fabbricato rurale visibilmente sfondellato. Si tratta di un deposito agricolo sito a Castelnovo Sotto (RE), realizzato negli anni '50, costituito da unico vano a pianta rettangolare e solaio in latero-cemento con travetti prefabbricati, affacciato su piano superiore ad ex uso fienile. Il tempo, i cicli termici, le sostanze presenti in atmosfera, sono in grado di deteriorare le aree più prossime all'intradosso del solaio, fino a causarne il distacco di frammenti. In tutta la superficie del solaio è stato possibile individuare difetti, dal lieve spogliamento dello strato di intonaco alla totale frattura e al distacco dei fondelli delle pignatte.



*fig. - 5.8 - Struttura danneggiata esaminata*

In questo caso il fenomeno dello sfondellamento è legato ad azioni di degrado chimico nei confronti delle armature presenti nei travetti, sulle quali si sono sviluppati dei prodotti di reazione che, occupando un volume maggiore rispetto al materiale originario, hanno causato la nascita di azioni interne ai laterizi circostanti, anch'essi soggetti ad azioni di degrado atmosferico. L'azione

combinata delle tensioni e dei fenomeni di deterioramento chimico hanno portato le pignatte oltre al loro stato tensionale limite, causandone la rottura e il distacco di frammenti.

Non avendo ancora a disposizione, in questa fase, il battitore standardizzato col quale sollecitare l'intradosso del solaio si sono eseguite le prove di controllo con accelerometro, microfono e martello strumentato, il tutto collegato allo ZOOM H6®, collegato a sua volta ad un computer portatile Sony Vaio® munito del software Adobe Audition®.

Una volta scelta una griglia di punti da analizzare, si è proceduto con l'acquisizione dei dati. E' stato necessario ripetere lo stesso procedimento per tutti i punti scelti del solaio facendo attenzione a non cambiare i parametri di acquisizione dei segnali, in particolare il guadagno attribuito ad ogni sorgente in ingresso della scheda audio.



*fig. 5.9 - Griglia di misura all'introdosso del fabbricato esaminato*

Le condizioni dell'intonaco non hanno garantito un incollaggio agevole e rapido dell'accelerometro.

#### **Prova in situ su struttura con laterizi perfettamente integri**

Si è proceduto, per avere un termine di paragone, all'esecuzione delle stesse prove su un solaio certamente integro. Si tratta di una palazzina residenziale realizzata nel 2002. La struttura di risulta essere di buona qualità, e rispondente alla normativa antisismica. I solai presenti sono realizzati con travetti prefabbricati. Il vano esaminato si estende per 4,25 metri in lunghezza e per 4,80 metri in larghezza. Avendo nel frattempo costruito il battitore, si è proceduto in questo caso alla sollecitazione sia con martello strumentato che con battitore strumentato.

### Prova in sito su struttura con laterizi apparentemente integri

Si sono esaminati i solai apparentemente integri di un edificio a rischio sfondellamento. Si tratta dell'asilo Fiocco di Neve (PR), le cui caratteristiche strutturali hanno portato gli ingegneri del comune a ritenere il solaio della sala principale ad alto rischio, principalmente per via dell'eccessiva luce coperta e per i carichi applicati dalla copertura, gravosi e non ben distribuiti. Inoltre si ha l'informazione che un fabbricato "gemello" (costruito da stesso progetto replicato) ha presentato cadute dei laterizi.

L'asilo Fiocco di Neve, situato in via Pini a Parma, fu costruito negli anni '80, ed è costituito da un piano fuori terra ed un sottotetto non abitabile. Il solaio del salone principale ha una luce di 8.25 metri, molto ampia per un solaio non composto da travi in cemento armato precompresso. L'alto affollamento dei locali favorisce il degrado chimico del solaio per via dell'umidità generata dalla presenza umana. La presenza di pannelli fonoassorbenti incollati all'intradosso del solaio nella sala principale ha reso l'acquisizione dei dati meno agevole. In seguito ad un'analisi visiva preliminare del salone principale non è stato possibile riscontrare problemi, se non qualche infiltrazione di umidità. Quindi si è proceduto con la scelta di una griglia di punti da analizzare. In questo caso l'acquisizione è stata fatta con due microfoni.



fig. 5.10 - Prove all'Asilo "Fiocco di neve"

Le prove sono state eseguite a struttura chiusa al pubblico, perciò silenziosa: in questa condizione è stato possibile utilizzare microfoni omnidirezionali, non c'è stata necessità di usarne direttivi. Una volta vincolati i microfoni a parti stabili dello strumento è stato possibile procedere con l'esecuzione della prova su tutti i punti scelti. In corrispondenza di due punti che suonavano in modo evidentemente diverso, si sono infittite le misure.

### 5.3 ELABORAZIONE E RISULTATI

Per ottenere risultati attendibili è necessario che per ogni punto venga acquisito un numero N di dati, registrando più colpi, così da minimizzare, con una certa base statistica, gli effetti di eventuali percussioni errate. Acquisiti i file, è necessaria una loro elaborazione mediante software in grado di leggere ed elaborare file audio.

Un software per la lettura e l'elaborazione dei dati raccolti dalle prove descritte è Adobe Audition®. Nel caso di sollecitazione con martello strumentato ed acquisizione con microfono o con accelerometro si può pensare l'onda registrata dalla cella di forza del martello come un'onda  $x(t)$  in ingresso nel sistema, e il suono acquisito dal microfono o dall'accelerometro come un'onda  $y(t)$  ottenuta dalla variazione del dato in ingresso a causa della risposta del sistema ad un impulso.

Avendo definito la risposta all'impulso del sistema  $h(t)$  come il segnale  $y(t)$  ottenuto applicando la funzione delta di Dirac  $\delta(t)$  al posto del generico segnale  $x(t)$ , il teorema della convoluzione ci dice che:

$$y(t) = x(t) * h(t) \quad (5.3.1)$$

Volendo ottenere  $h(t)$  la relazione diventa:

$$h(t) = x(t)^{-1} * y(t) \quad (5.3.2)$$

Per ottenere  $x(t)^{-1}$  bisogna avvalersi di uno strumento che ci permetta di invertire la funzione che rappresenta il segnale in ingresso  $x(t)$ .

Secondo Nelson & Kirkeby è possibile ottenere l'inversa di una funzione che descrive un'onda operando nel dominio della frequenza, prendendo, a ciascuna frequenza, il reciproco del valore complesso della funzione di trasferimento del sistema, aggiungendo al denominatore una piccola quantità positiva (parametro regolarizzatore).

Per generare un filtro da applicare alla nostra onda ottenendo l'inversa si procede per step:

Primo step: si trasforma il segnale di ingresso nel sistema tramite un'operazione FFT, così da passare dal dominio del tempo a quello della frequenza:

$$X(\omega) = \text{FFT}[x(t)] \quad (5.3.3)$$

Secondo step: si calcola il reciproco complesso a ciascuna frequenza:

$$F(\omega) = \frac{\text{Con}[X(\omega)]}{\text{Con}[X(\omega)] * X(\omega) + \varepsilon(\omega)} \quad (5.3.4)$$

Terzo step: si anti trasforma e si ritorna nel dominio del tempo:

$$f(t) = \text{IFFT}[F(\omega)] \quad (5.3.5)$$

Eseguendo queste operazioni otteniamo dei filtri  $f(t)$  che, applicati ai segnali registrati in uscita  $y(t)$ , ci consentono di ottenere le risposte all' impulso delle porzioni di solaio in esame.

Una volta ricavate le risposte all'impulso andiamo ad analizzarle e compararle nel dominio della frequenza: la trasformata di Fourier della risposta all'impulso viene chiamata funzione di trasferimento  $H(\omega)$ . In tal modo è possibile individuare eventuali differenze, che potrebbero essere legate a difetti interni o comunque a disomogeneità all'interno del solaio.

Nel caso venisse utilizzata una prova di controllo mediante utilizzo di un battitore non strumentato e di un microfono, per acquisire i suoni emessi dagli urti, il procedimento di elaborazione dei dati risulterà più semplice, in quanto si ipotizza che il battitore sia costruito in modo da eccitare il solaio con un impulso assimilabile alla funzione Delta di Dirac senza necessità dunque di applicare un ulteriore filtraggio al segnale registrato dal microfono.

Un problema di questo metodo consiste nella dipendenza dei risultati dall'energia e dalla modalità di battuta, è quindi necessario cercare di svincolare i dati da variabili che comporterebbero un poca attendibilità dei risultati. Una risposta a questo problema può essere data utilizzando un battitore in grado di colpire l'intradosso sempre nello stesso modo.

Avendo a disposizione solo un dato in uscita dal sistema ma non il relativo dato in ingresso, cercare la risposta all'impulso risulta essere impraticabile, quindi è necessario procedere in diverso modo:

Come prima cosa, nel caso non si avesse a disposizione un battitore in grado di percuotere i vari punti dell'intradosso sempre con la stessa energia, risulterà opportuno normalizzare ogni colpo acquisito rispetto al proprio massimo, il che non comporterà una variazione della forma spettrale, ma andrà inevitabilmente perduta l'informazione relativa all'ampiezza dei colpi.

Una volta ricavati i dati normalizzati ne analizziamo gli spettri di frequenza.

Compariamo gli spettri relativi ai vari punti del solaio per individuare eventuali differenze dovute ad esempio a difetti interni.

Si è proceduto in una prima fase all'elaborazione dei dati con il Software commerciale Adobe Audition®, insieme ai plug-in Aurora®, che consentono di effettuare le operazioni sopra descritte.

Il difetto principale dell'elaborazione mediante il software di calcolo Adobe Audition® risulta essere l'eccessivo tempo necessario per processare i dati, poiché dovendo acquisire per ogni punto del solaio diversi colpi, bisognerà ripetere le operazioni di calcolo un numero di volte pari al numero di colpi totale dati contro l'intradosso, il che rende lunga e ridondante l'elaborazione dei dati audio.

Per rispondere al problema dei tempi di elaborazione dei dati mediante Adobe Audition® è risultato utile lo sviluppo di uno script Matlab® in grado di ridurre enormemente i tempi di analisi e di computazione.

Inoltre mediante l'utilizzo di uno script Matlab®, è stato possibile ottenere una rappresentazione grafica dell'energia del colpo o dell'energia racchiusa in un intervallo di frequenza.

Si riporta un confronto dei dati acquisiti con microfono, che sono risultati i migliori. I problemi di incollaggio menzionati nei paragrafi precedenti e la forte dipendenza del risultato dall'incollaggio, hanno reso non affidabili i dati acquisiti con accelerometri.

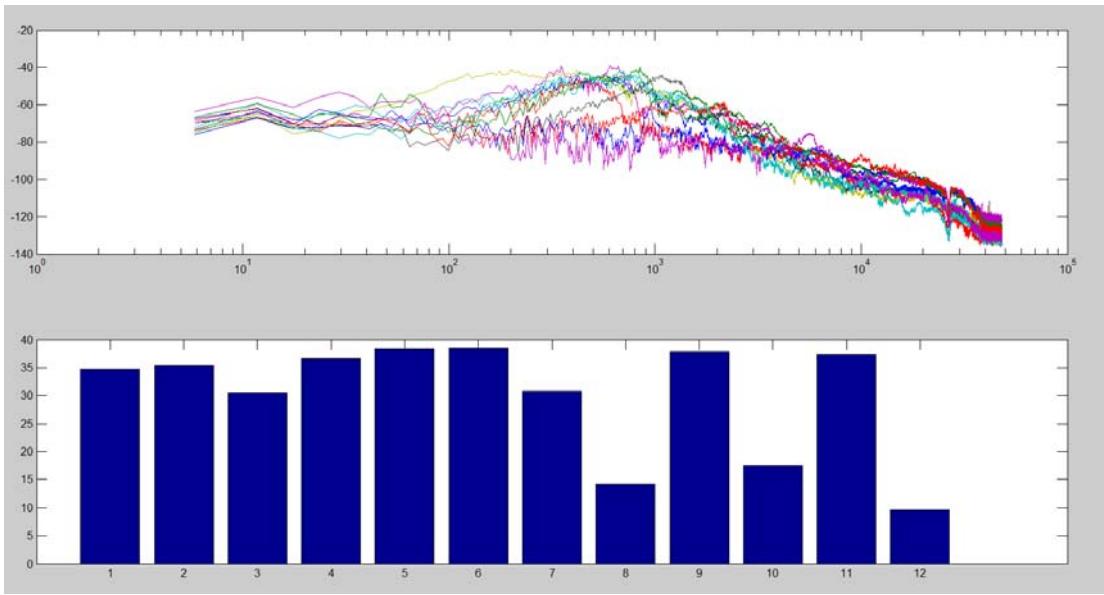


fig. 5.11 - Spettri dei microfoni, e istogrammi proporzionali alle energie nella banda 50 Hz - 1.000 Hz in 12 punti di prova - fabbricato rurale degradato

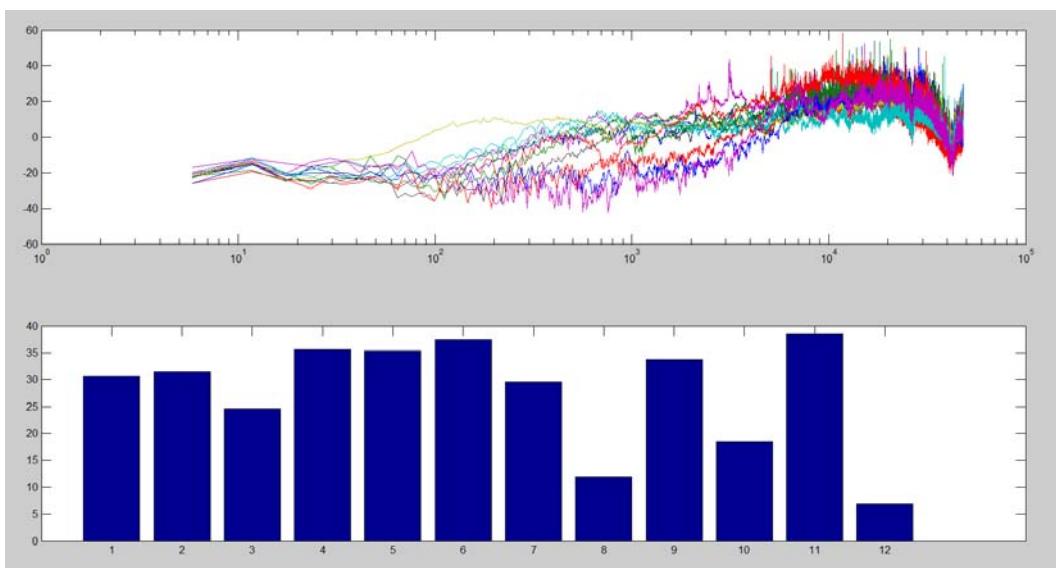
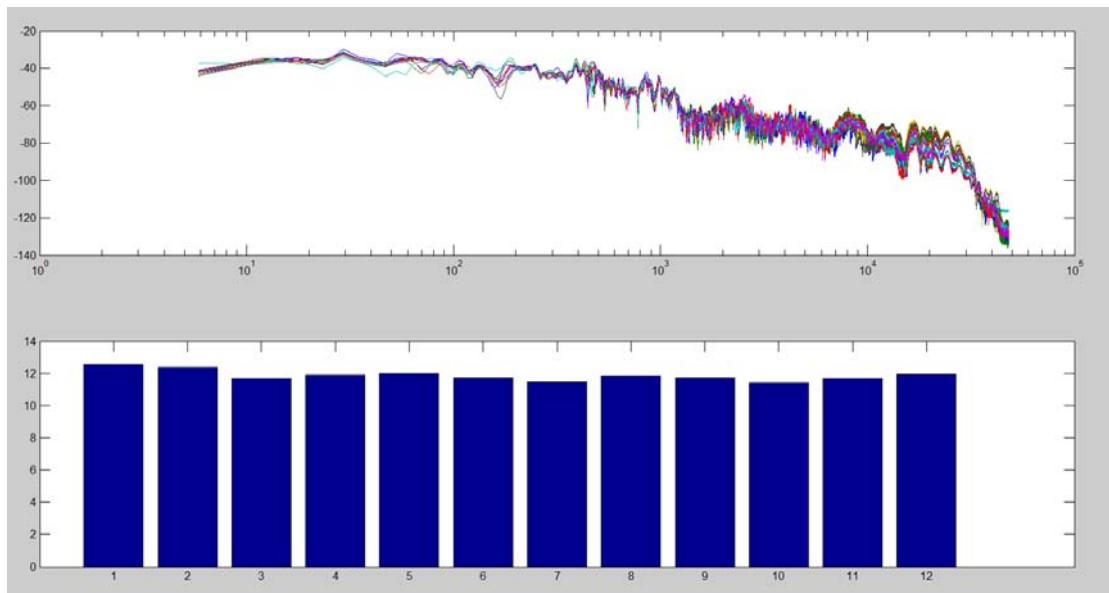


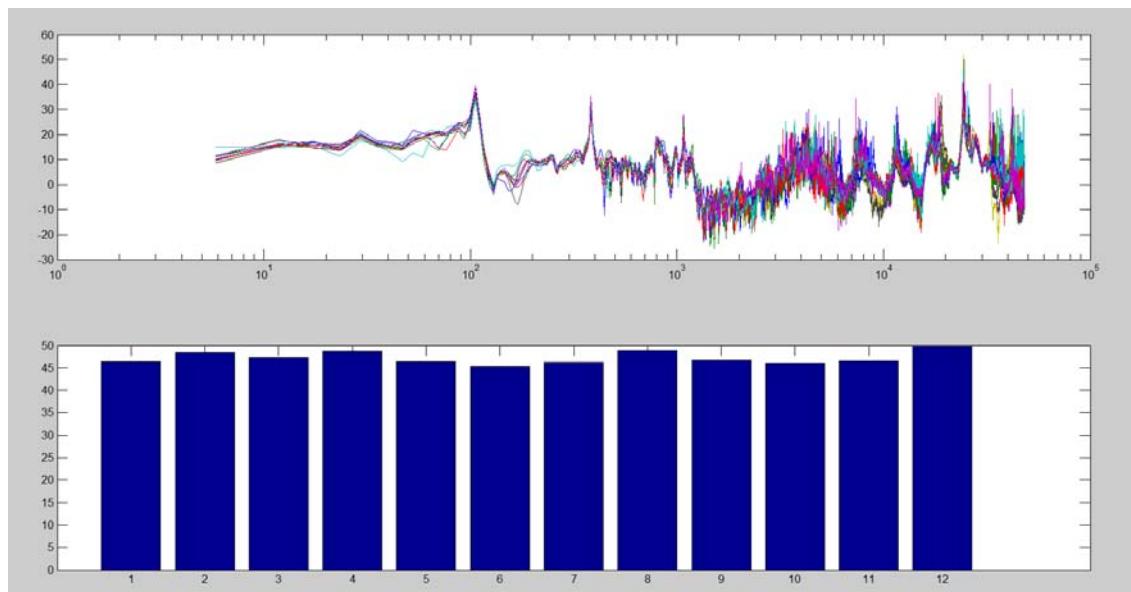
fig. 5.12 - Funzioni di trasferimento, e istogrammi proporzionali alle energie nella banda 50 Hz - 1.000 Hz in 12 punti di prova - fabbricato rurale degradato

Dai risultati ottenuti è possibile osservare come vi siano grandi differenze sia tra gli spettri che tra le funzioni di trasferimento relative ai diversi punti dell'intradosso del solaio. Le differenze di suono tra le varie zone del solaio sono state percepite ad orecchio durante l'analisi preliminare, e con i risultati ottenuti è stata confermata la disomogeneità interna del solaio dovuta a fenomeni di deterioramento. Osservando lo stato del solaio e considerando i risultati della prova, si può ragionevolmente concludere che le differenze riscontrate dal punto di vista acustico derivano direttamente dallo stato di avanzato deterioramento dell'intradosso.

Si vedono ora i risultati relativi al fabbricato residenziale in buono stato.



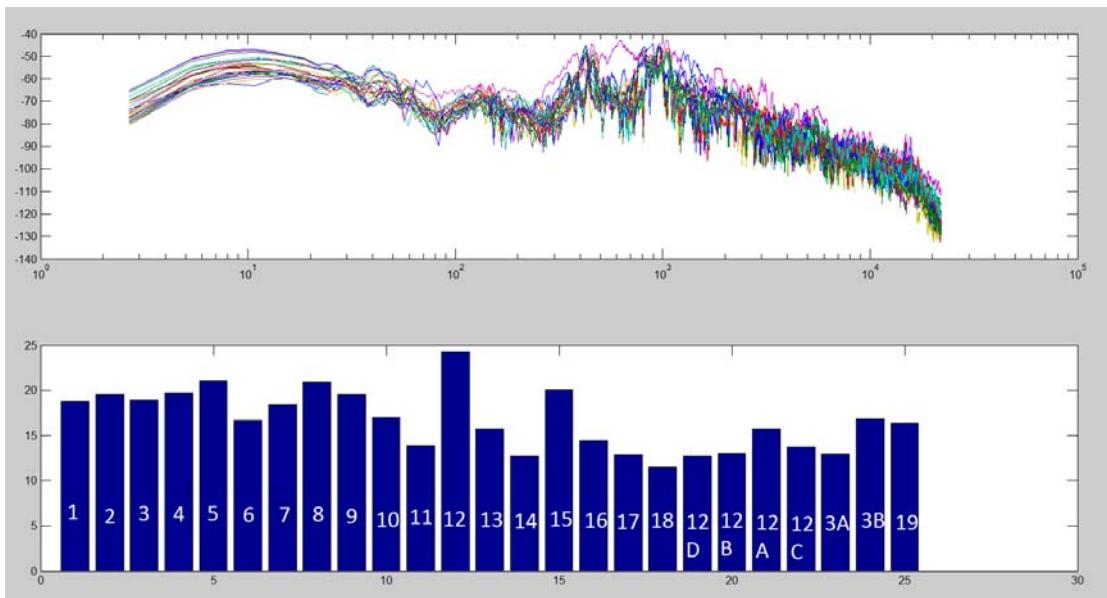
*fig. 5.13 - Spettri dei microfoni, e istogrammi proporzionali alle energie nella banda 50 Hz - 1.000 Hz in 12 punti di prova - fabbricato integro residenziale a S.Secondo*



*fig. 5.14- Funzioni di trasferimento, e istogrammi proporzionali alle energie nella banda 50 Hz - 1.000 Hz in 12 punti di prova - fabbricato integro residenziale a S.Secondo*

In questo caso le differenze di spettro e di funzione di trasferimento sono minime da punto a punto, il che è correlabile ad un'omogeneità interna del solaio, e quindi un rischio praticamente nullo nei confronti di fenomeni di sfondellamento.

Si riportano in seguito i risultati relativi all'Asilo Fiocco di neve.



*fig. 5.15 - Spettri dei microfoni, e istogrammi proporzionali alle energie nella banda 50 Hz - 1.000 Hz in 25 punti di prova - Asilo "Fiocco di neve"*

Dai risultati ottenuti si può facilmente osservare come le energie relative a ciascun punto risultino diverse, in particolare per quanto riguarda il punto 12. Un'altra informazione che possiamo estrapolare osservando i risultati è l'estensione puntuale dell'eventuale difetto interno, grazie al fatto che sono stati analizzati quattro punti in prossimità del punto 12, nei quali non si sono riscontrate grandi differenze di spettro rispetto alla media dei punti.

Nel caso volessimo confrontare i risultati ottenuti per i punti rappresentativi del solaio con il risultato relativo al punto ipotizzato integro (o comunque assumendo molto bassa la probabilità di sfondellamento), cioè il punto 19 (ultimo punto a destra del grafico a barre), potremmo notare come pochi punti risultino effettivamente simili a quello sano in termini di spettro acustico.

Valutando i punti globalmente e tenendo conto delle considerazioni fatte per l'edificio, è ragionevole considerare le differenze tra gli spettri sonori relativi ai vari punti dell'intradosso, riscontrabili sia ad orecchio che mediante l'utilizzo degli strumenti di acquisizione, un effetto del fenomeno dello sfondellamento. Un'idea quantitativa di quanto debbano differire tra loro gli spettri dei vari punti per portare ragionevolmente ad ipotizzare una disomogeneità interna in un solaio in laterocemento, la possiamo ricavare osservando il range di variabilità relativo all'edificio residenziale integro. Certamente i parametri da considerare sono anche altri: luci in gioco, distribuzione dei carichi, orditura etc.

## 5.4 CONSIDERAZIONI

Grazie alle prove eseguite e ai risultati ottenuti è stato possibile verificare le ipotesi iniziali sulla dipendenza tra l'integrità interna del solaio e l'omogeneità degli spettri medi relativi ai suoni generati dalla percussione nei diversi punti dell'intradosso. Si è giunti a questa conclusione avendo analizzato e comparato i risultati relativi alle prove eseguite in laboratorio ed in opera su tre diversi solai, uno certamente sfondellato, uno quasi certamente integro ed un ultimo a rischio sfondellamento.

Tra i metodi confrontati, il più efficace e snello nell'individuare difetti interni è risultato essere quello basato sull'utilizzo di un battitore non strumentato in aggiunta ad un microfono, mediante cui è possibile acquisire i dati relativi a ciascun punto scelto, e attraverso uno script Matlab® appositamente creato è possibile processare questi segnali e confrontare gli spettri sonori relativi a ciascun punto sollecitato.

Per rispondere ai problemi relativi all'utilizzo del microfono durante il controllo, legati alla necessità di un ambiente silenzioso, si è pensato di sviluppare uno strumento in grado di percuotere la superficie mediante un'estremità dotata di cella di forza battente e di un accelerometro vincolato ad essa, così da ottenere l'impedenza relativa a ciascun punto studiato. Essendo l'impedenza una grandezza legata alle caratteristiche meccaniche della zona sollecitata è possibile ottenere una caratterizzazione dello stato interno del solaio in esame.

## **6. STUDI Sperimentali condotti: lastre di marmo**

### **6.1 GENERALITA'**

#### **Il marmo rosso di Verona**

Il marmo è una roccia metamorfica composta prevalentemente da carbonato di calcio, il quale si forma partendo da una roccia sedimentaria, come il calcare, sottoposta ad alte temperature ed elevate pressioni. Il suo colore dipende dalla presenza di impurità minerali (ossidi di ferro, argilla, limo). I marmi bianchi, invece, derivano dalla metamorfizzazione di rocce calcaree prive di impurità. In particolare il marmo rosso di Verona si è formato circa 150 milioni di anni fa, quando iniziò il processo di sedimentazione dei fondali marini, che lentamente crearono il tavolato, il quale nel corso degli anni venne spinto sempre più in superficie fino ad emergere sul livello del mare per alcune centinaia di metri. La sua peculiarità principale sta nella presenza di innumerevoli ammoniti fossili e nella presenza di venature che possono essere scambiate per rotture superficiali mentre rappresentano un'altra caratteristica del materiale, detta "magrosità". Viene principalmente impiegato sotto forma di lastre e viene utilizzato come rivestimento esterni e interni. È possibile infatti osservarlo su pavimentazioni, bagni, cucine.

#### **L'edificio esaminato: torre del campus**

Nel nostro caso, nella palazzina del campus, il marmo rosso di Verona è impiegato come rivestimento per facciata ventilata. Questa tipologia di facciata permette un buon isolamento termico ed acustico; è costituita da una struttura metallica che avvolge la struttura portante, in cui si incastrano un materassino coibente e le lastre di rivestimento. Tra l'isolante ed il rivestimento si forma un'intercapedine d'aria la quale, per "effetto camino" attiva un'efficace ventilazione naturale favorendo rimozione di calore ed umidità.

L'intelaiatura metallica è d'alluminio piegato ad "L"; sul lato inferiore ancora la lastra per tutta la sua larghezza, per una profondità di 1,5 cm, mentre nella parte superiore ci sono due piccole lamiere, della larghezza di 3 cm, piegate ad "L", che costituiscono due appoggi puntuali.

#### **Principali cause di rottura: l'azione del vento**

Il vento è dovuto al movimento dell'aria causato dalla differenza di temperatura e quindi di pressione tra i diversi strati. La superficie della terra esercita un'azione di frenatura e quindi

all'interno di uno strato, detto Strato Limite, la velocità risulta essere variabile lungo la verticale. Questa variazione dipende dalla diversa rugosità del terreno nelle varie zone.

La pressione del vento, la cui direzione viene usualmente considerata orizzontale, si misura attraverso il Teorema di Bernoulli nell'ipotesi di arresto totale della massa fluida e totale trasformazione di energia cinetica in pressione.

$$p = q_{ref} C_e C_d C_p \quad (6.1.1)$$

$q_{ref}$  è la pressione cinetica di riferimento;

$C_e$  è il coefficiente di esposizione;

$C_d$  è il coefficiente dinamico, attraverso il quale si tiene conto della non contemporaneità degli eventi;

$C_p$  è il coefficiente di forma, il quale dipende dalla geometria e dall'orientamento rispetto alla direzione del vento della costruzione.

La pressione cinetica di riferimento,  $q_{ref}$ , dipende dalla velocità di riferimento del vento. Questa può essere determinata sfruttando la normativa italiana, la quale divide il nostro paese in 9 differenti zone e ne assegna diversi valori di velocità. Sempre nella normativa troviamo i vari valori dei coefficienti che ci permetteranno di determinare la pressione che agisce sul nostro edificio.

### **Principali cause di rottura: il fenomeno del "bowing"**

Le lastre di marmo utilizzate come rivestimento di facciata possono evidenziare un fenomeno di imbarcamento, detto bowing, anche dopo un breve periodo di esposizione alle azioni ambientali dovuto principalmente alla progressiva decoesione dei grani di calcite. Infatti in presenza di carichi termici ciclici, come ad esempio le escursioni di temperatura giornaliere, si formano delle deformazioni permanenti nelle lastre. Tale imbarcamento è dovuto a diverse cause concomitanti, come:

- gradiente termico lungo lo spessore della lastra dovuto al gradiente di temperatura tra la faccia esterna e quella interna;
- andamenti ciclici di temperatura producono un campo tensionale e quindi una propagazione delle fessure;
- la propagazione delle fessure provoca una progressiva inflessione che tende ad aumentare nel tempo.

## 6.2 Sperimentazioni effettuate: test in laboratorio e risultati

Per simulare le condizioni d'ancoraggio delle lastre all'edificio, abbiamo realizzato una struttura d'acciaio ad hoc avente lo stesso sistema di fissaggio presente in opera. Abbiamo dovuto dotare questo supporto di un braccio telescopico in modo da poter ancorare diversi tipi di lastre, infatti, per la realizzazione del rivestimento sono state utilizzate lastre di dimensioni diverse, lastre "piccole" e lastre "grandi". Le prime hanno una dimensione di circa 52 cm di larghezza e 62 cm di altezza mentre le seconde hanno larghezza variabile tra 52 cm e 63 cm e lunghezza pari 109,5 cm circa.



*fig.6.1 - Struttura di sostegno per le lastre*

Tutte le prove condotte hanno visto porre la lastra in due configurazioni: montata sulla struttura, per simulare il fissaggio in opera, e poggiata su un materasso di foam, per avvicinarsi al meglio possibile alle condizioni di totale svincolamento (lastra libera).

### Calcolo del tempo di volo

Si è proceduto alla misurazione del tempo di volo del suono nella lastra di marmo, sia in senso trasversale che in senso longitudinale. Questi due valori risultano diversi a causa dell'elevata anisotropia del materiale. La prova è stata condotta impiegando un martello strumentato e due

accelerometri, rispettivamente alle due estremità della lastra. Attraverso l'impiego di Audition®, è possibile determinare il tempo di volo dell'onda acustica all'interno della lastra.

Visualizzando la forma dell'onda è possibile riconoscere il picco relativo all'impatto e il corrispondente picco di ritorno. Tra questi due punti intercorre una distanza, misurata in campioni, che dipende quindi dalla frequenza di campionamento con la quale stiamo registrando, in questo caso 48 KHz. Conoscendo quindi il numero di campioni tra i due picchi possiamo determinare il tempo di ritorno dell'onda ed infine conoscendo lo spazio percorso, cioè la larghezza o la lunghezza della lastra, possiamo determinare la velocità del suono all'interno del nostro marmo.

Dalle misurazioni effettuate abbiamo ottenuto tali risultati:

Tempo di volo longitudinale: 5000 m/s circa

Tempo di volo trasversale: 3000 m/s circa.

Confrontabili con i valori ottenuti da analoga misura effettuata nel laboratorio strutture utilizzando dei trasduttori piezoelettrici posti sulla faccia esposta della lastra.

### Determinazione delle frequenze naturali

Un'altra prova è stata quella di cercare di individuare i modi di vibrare delle singole lastre sia sperimentalmente che teoricamente. I modi di vibrare rappresentano le frequenze alle quali un oggetto, disturbato da un evento esterno, si muove di moto armonico. A livello teorico è possibile ottenere tali valori di frequenza in funzione della geometria della lastra e dei vincoli ai quali è sottoposta. Le tipologie di vincolo studiate sono due: 4 incastri ai vertici e 4 appoggi nei vertici. Questo perché le configurazioni di vincolo reali non sono mai perfettamente corrispondenti ai vincoli ideali teorici.

Le frequenze teoriche si basano entrambe sulla stessa formula:

$$\mathfrak{R} = \sqrt{\frac{Eh^2g_z}{12(1-\mu^2)\gamma_0}} \quad (6.2.1)$$

Dove con  $E$  indichiamo il modulo elastico, con  $h$  lo spessore della lastra, con  $g_z$  l'accelerazione di gravità, con  $\mu$  il coefficiente di Poisson ed infine con  $\gamma_0$  il peso specifico.

Una volta ottenuta tale coefficiente, esso deve essere moltiplicato per altre due costanti, che dipendono dal rapporto  $\nu = \frac{a}{b}$ , dove  $a$  rappresenta la dimensione maggiore della lastra, mentre  $b$  quella minore. Da questo rapporto otteniamo due costanti,  $\psi_1, \psi_2$ , diverse nel caso dell'appoggio e dell'incastro.

Nel caso dei 4 appoggi otteniamo:

$$\psi_1 = 1,57(1 + \nu^2) \quad (6.2.2)$$

$$\psi_2 = 6,28(1 + 0,25\nu^2) \quad (6.2.3)$$

Mentre nel caso dei 4 incastri:

$$\psi_1 = 1,57\sqrt{5,14 + 3,13\nu^2 + 5,14\nu^4} \quad (6.2.4)$$

$$\psi_2 = 1,57\sqrt{5,14 + 11,65\nu^2 + 39,06\nu^4} \quad (6.2.5)$$

Da queste costanti è possibile ottenere le frequenze naturali teoriche:

$$f_1 = \frac{\psi_1}{a^2} \mathfrak{R} \quad (6.2.6)$$

$$f_2 = \frac{\psi_2}{a^2} \mathfrak{R} \quad (6.2.7)$$

Naturalmente dobbiamo considerare le due tipologie di lastre presenti in opera: quelle con larghezza pari a 52 cm e quelle con larghezza pari a 63 cm. Considerando tali diversità otteniamo:

per la lastra con larghezza pari a 52 cm

- 4 appoggi:  $f_1 = 277 \text{ Hz}$ ,  $f_2 = 430 \text{ Hz}$  ;
- 4 incastri:  $f_1 = 558 \text{ Hz}$ ,  $f_2 = 707 \text{ Hz}$ ,

per la lastra con larghezza pari a 63 cm

- 4 appoggi:  $f_1 = 205 \text{ Hz}$ ,  $f_2 = 359 \text{ Hz}$  ;
- 4 incastri:  $f_1 = 400 \text{ Hz}$ ,  $f_2 = 563 \text{ Hz}$ .

Dalle prove in situ, analizzando gli spettri si può osservare che le lastre larghe 52 cm presentano picchi in corrispondenza di circa 550 Hz, mentre quelle larghe 63 cm li presentano a circa 400 Hz. Abbiamo quindi trovato una corrispondenza tra valori teorici e sperimentali, soltanto per quanto riguarda la prima frequenza naturale ma, comunque, possiamo affermare che il sistema di ancoraggio delle lastre risulta essere simile a 4 incastri nei rispettivi vertici.

### **Prove con degrado meccanico**

Prima di poter provare a determinare eventuali difetti interni abbiamo dovuto ipotizzare come questi avrebbero potuto influire sui nostri risultati. Per fare questo abbiamo creato un danno evidente alla lastra, forandola con un trapano in diversi punti, in modo da esasperare la condizione di microfessurazione interna che potrebbe causare danni alla lastra o diminuirne la

resistenza meccanica. Infine abbiamo cercato di determinare i parametri da variare all'interno dello script di Matlab®.



*fig.6.2 - Lastra di marmo dopo la foratura*

Abbiamo quindi preso le registrazioni effettuate pre e post foratura e, caricandole su Matlab®, abbiamo potuto osservare inizialmente ogni singolo colpo, con la possibilità di scartarne alcuni, nel caso in cui questi fossero stati “sporcati” da cause esterne. In seguito sempre attraverso l'utilizzo del software è possibile ottenere lo spettro relativo alla martellata, ed in particolare abbiamo osservato sia lo spettro normale che quello derivato. Infine abbiamo cercato un parametro che ci potesse permettere di dividere le lastre integre da quelle forate, prendendo quindi la somma dell'energia in un determinato range di frequenza: 150-2000 Hz. Tale intervallo corrisponde alle frequenze che la punta di plastica del nostro martello è in grado di eccitare. Questo parametro viene visualizzato sotto forma di istogramma.

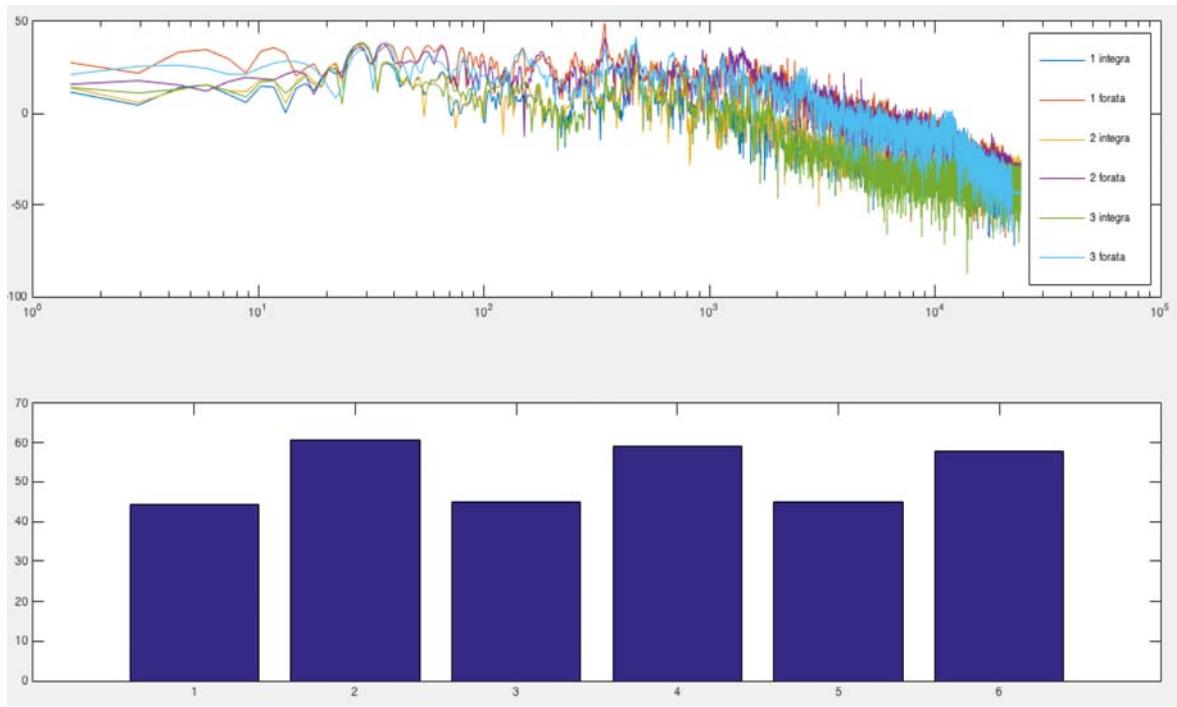


fig.6.3 - Spettro e istogramma dell'energia tra 150 Hz e 2 kHz

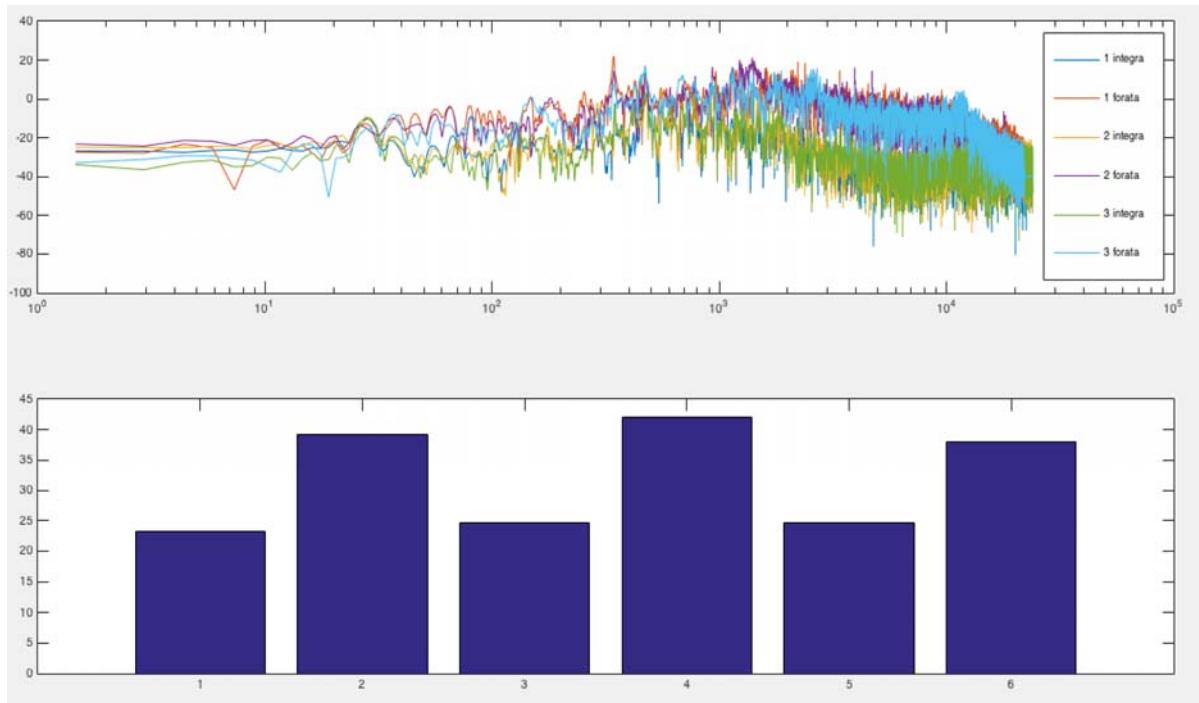
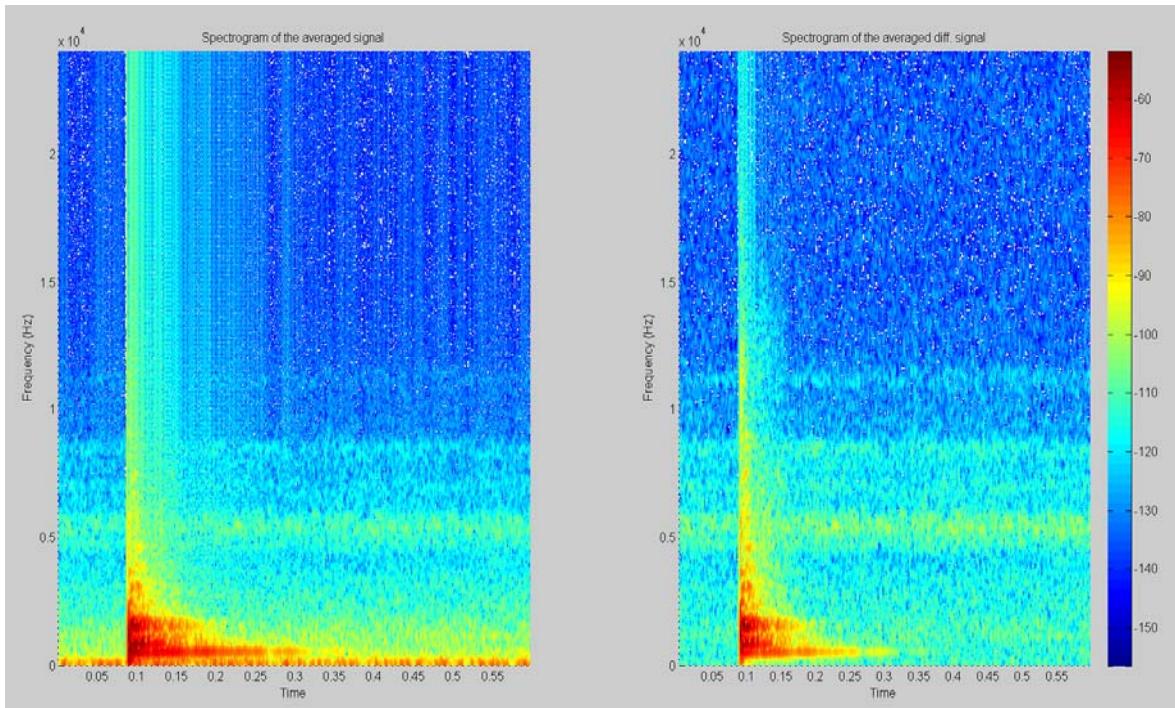


fig.6.4 - Spettro "derivato" e istogramma dell'energia tra 150 Hz e 2 kHz

Nei due grafici è importante osservare innanzitutto che i valori dei campioni 1,3,5, sono riferiti alla lastra integra, mentre i valori dei campioni 2,4,6, si riferiscono alla lastra forata. Come si può notare dal grafico, nella lastra forata si ha un notevole aumento di energia. In particolare questa

caratteristica si evince maggiormente nello spettro derivato, nel quale, come già visto, si ha un abbassamento dell'energia alle basse frequenze.



*fig.6.5 - Spettrogramma del segnale derivato e non relativo ad una serie di colpi sulla lastra*

Visualizzati questi spettrogrammi abbiamo cercato di determinare la finestra temporale nella quale la maggior parte dell'informazione sonora potrebbe trovarsi, cioè la zona che in figura risulta essere colorata di giallo, con maggiore energia. Dopo alcune prove abbiamo notato che conviene scartare dall'analisi il colpo iniziale, il quale fornisce un elevato contributo energetico, tanto da schermare la porzione di informazioni utili successive all'impatto, mentre conviene quindi analizzare la coda sonora, che descrive il decadimento del suono. Le linee orizzontali che si vedono sfumare gradualmente da sinistra verso destra rappresentano i modi della lastra, cioè le frequenze naturali alle quali essa, una volta percossa, inizia a vibrare con facilità. Lo sfumare di tali linee ci dà informazioni riguardo il tempo di decadimento dei singoli modi.

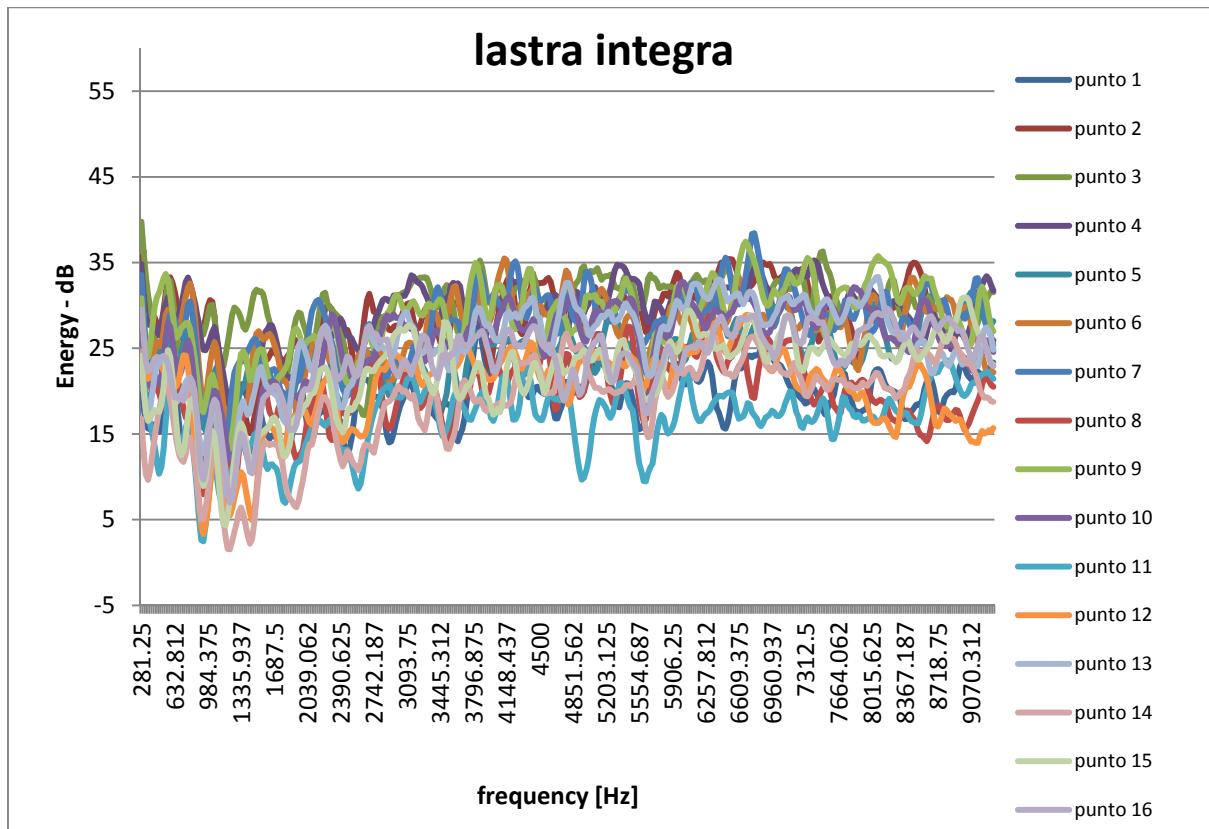
Abbiamo considerato una singola martellata per ogni punto della lastra, e visualizzandone il sonogramma tramite Audition®, ci siamo spostati di un certo numero di campioni nel verso crescente dell'asse dei tempi, e da lì abbiamo preso una finestra temporale.

Abbiamo preso due intervalli di riferimento:

- 5000 campioni dopo il picco seguiti da altri 15000 campioni di finestra;
- 10000 campioni dopo il picco seguiti da altri 10000 campioni di finestra;

Abbiamo campionato a 48 KHz. Quindi l'intervallo tra i 5000 e i 20000 campioni successivi all'impatto del martello si riferisce all'intervallo di tempo da 0,1 a 0,4 secondi dopo l'impatto. L'intervallo che va dai 10000 campioni successivi all'impatto fino ai 20000 successivi, invece, si riferisce ad un intervallo che va da 0,2 a 0,4 secondi dopo l'impatto.

Dagli spettri ottenuti è risultato che l'intervallo temporale che ci permette di distinguere meglio la lastra integra da quella forata è quello che va dai 5000 ai 20000 campioni successivi all'impatto del martello, cioè nell'istante temporale che va da 0,1 s a 0,4 s dopo l'impatto.



*fig.6.6 - Spettri della lastra integra relativi all'intervallo dai 5000 ai 20000 campioni dopo l'impulso*

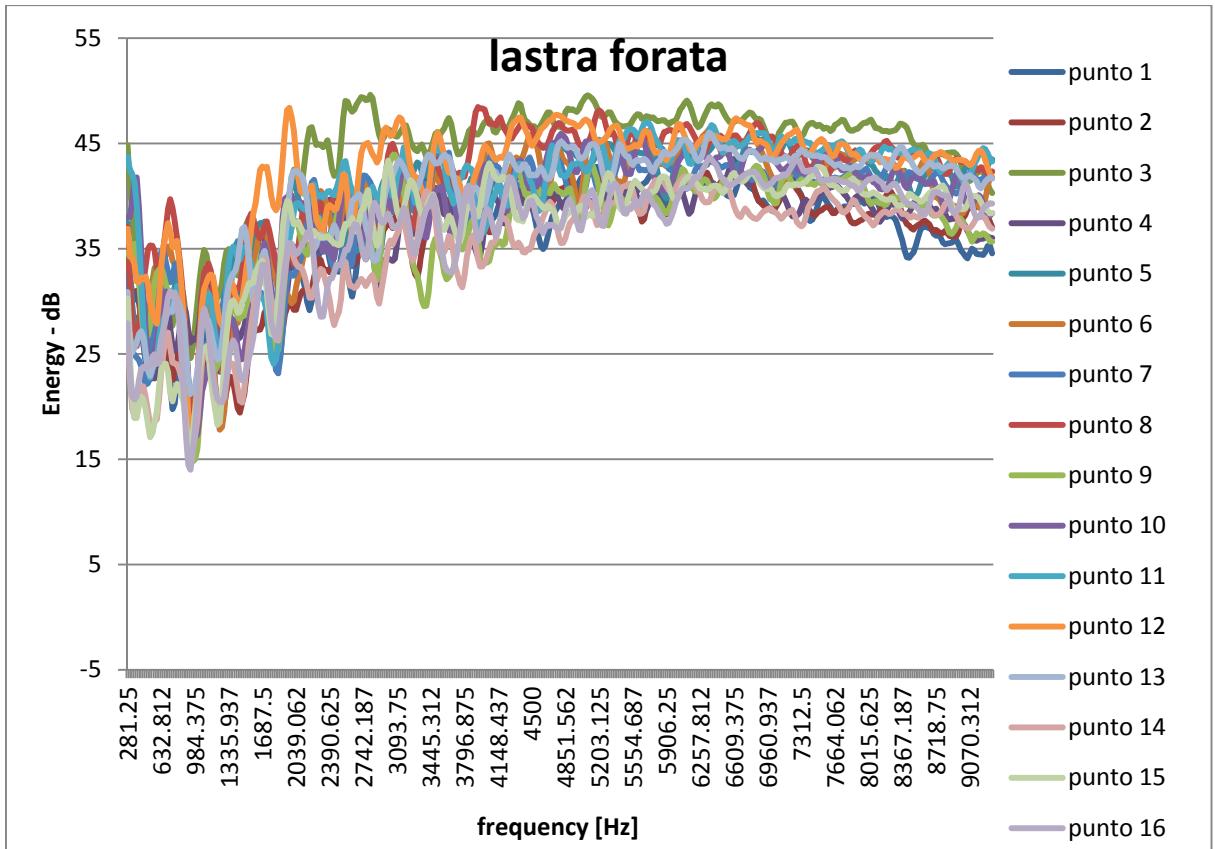


fig.6.7 - Spettri della lastra forata relativi all'intervallo dai 5000 ai 20000 campioni dopo l'impulso

### 6.3 Sperimentazioni effettuate: test a fatica e risultati

Poiché nella fase precedente (foratura con trapano), il danneggiamento provocato artificialmente è molto maggiore rispetto a quello dato dalla normale usura, in questa fase dello studio, abbiamo cercato di riprodurre un invecchiamento che meglio approssimi quello reale. Per fare questo abbiamo sottoposto una lastra ad una serie di prove a fatica. Ciò vorrebbe simulare quanto una lastra subisce con cicli termici naturali (gelo-disgelo) e carichi dovuti al peso proprio e all'azione del vento. La prova a fatica viene condotta applicando, tramite un'apposita macchina, un carico pulsante controllato, con una determinata frequenza. La nostra prova è stata realizzata utilizzando un supporto che ci forniva quattro punti di appoggio, realizzando quindi una prova a flessione su quattro punti.



*fig.6.8 - Vista laterale della lastra durante la prova*

Per determinare il carico dal quale partire per eseguire le prove, abbiamo dovuto fare alcune considerazioni sul sistema di carico, sulla resistenza caratteristica della lastra e sulle forze che sarebbero entrate in gioco durante tali prove.

Il momento massimo, naturalmente, risulta essere in mezzeria, tra i due coltelli superiori. In quella zona vale:

$$M_f = \frac{P(l-l_1)}{4} \quad (6.3.1)$$

Dove con  $P$  indichiamo il carico totale, cioè quello che indichiamo alla macchina, il quale sarà ripartito sulla struttura come  $\frac{P}{2}$ , a causa dei due coltelli, mentre con  $l$  e  $l_1$ , indichiamo rispettivamente la luce totale e la luce tra i due coltelli superiori.

È inoltre possibile calcolare il modulo di resistenza della sezione sulla quale agisce tale momento attraverso la formula:

$$W = \frac{b \cdot s^2}{6} \quad (6.3.2)$$

dove con  $b$  indichiamo la larghezza della lastra, mentre con  $s$  lo spessore. Conoscendo il momento e il modulo di resistenza è possibile calcolare lo sforzo agente perpendicolarmente alla struttura:

$$\sigma_z = \frac{M_f}{W} \quad (6.3.3)$$

Il momento flettente provocherà una flessione della lastra, il cui asse si discosterà dalla sua posizione iniziale di una quantità  $f_y$  che varia lungo l'asse e ha valore massimo in  $\frac{l}{2}$

$$f_y^{max} = \frac{M_f \cdot l^2}{8EI_x} \quad (6.3.4)$$

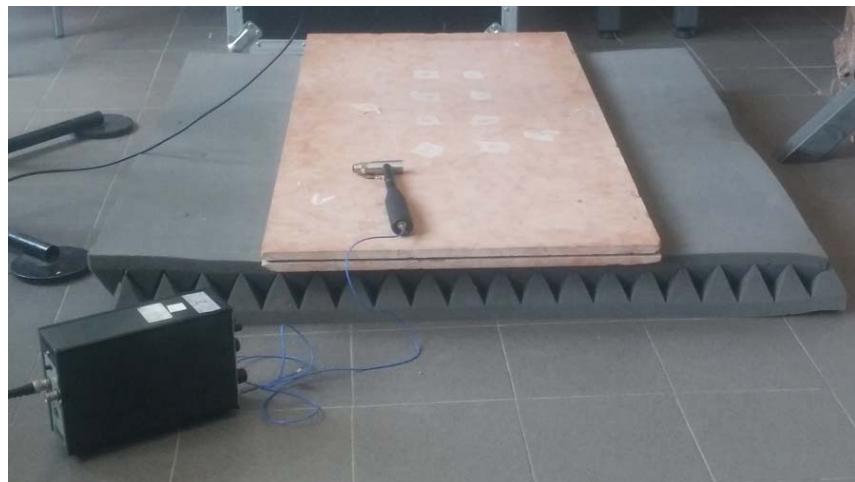
Per determinare quindi il carico da impostare per la prova, abbiamo determinato la resistenza caratteristica delle lastre, e di conseguenza abbiamo preso un valore di sicurezza pari al 30% del carico massimo.

Per determinare la resistenza del materiale, sono stati sfruttati i risultati di uno studio diretto dal Prof. Andrea Spagnoli, condotto in precedenza su 40 provini, 20 dei quali sono stati invecchiati mediante 36 cicli di gelo e disgelo, mentre i restanti 20 sono stati testati tali quali. Ogni provino misura 25x6x3 cm.

Secondo la norma europea UNI EN 123 del 1972 (Determinazione della resistenza a flessione sotto carico concentrato nelle pietre naturali), la resistenza caratteristica dei provini può essere determinata attraverso un metodo statistico. Calcolando, come descritto da tale norma, il carico caratteristico a rottura, abbiamo di conseguenza determinato la freccia massima della lastra, infine abbiamo determinato il 30% di tale carico.

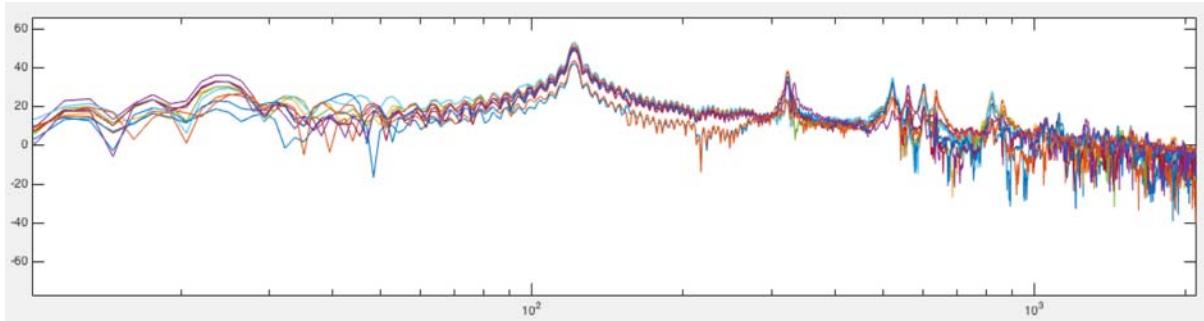
La prova a fatica che abbiamo condotto è di tipo pulsante. Come valore massimo abbiamo tenuto, fisso, -0,1 KN (tale valore risulta essere massimo poiché sulla lastra applichiamo una forza di compressione, quindi con valori negativi). La prova è stata condotta in controllo di spostamento.

Prima di cominciare ogni ciclo a fatica abbiamo sottoposto la lastra ai test acustici, in modo da aver una misura per ogni ciclo. Le misure sono state prese sulla struttura da noi realizzata e sul foam, e per ogni sessione sono stati percossi gli stessi 10 punti.

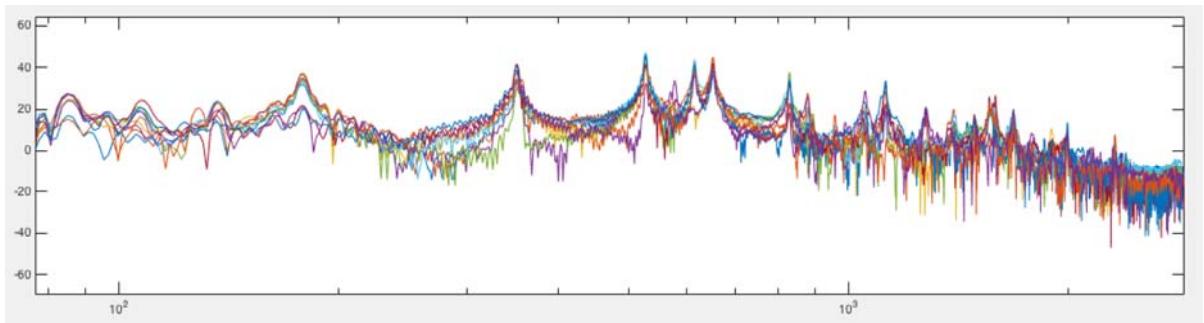


*fig. 6.9 - Lastra appoggiata su letto di foam*

Come prima cosa abbiamo misurato la lastra in condizioni normali.



*fig. 6.10 - Spettro dei 10 punti percossi su un letto di foam*

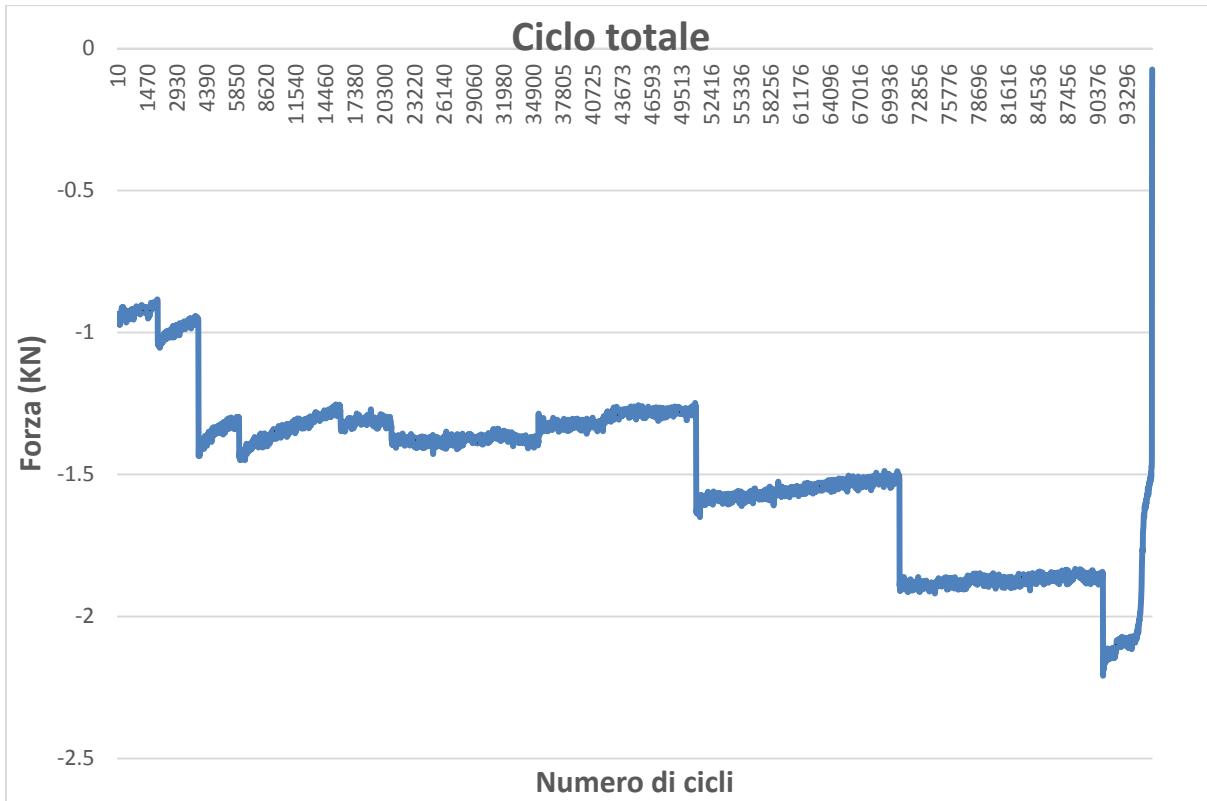


*fig.6.11 - Spettro dei 10 punti percossi sulla struttura*

Come si può notare dalle immagini, gli spettri delle lastre hanno una buona ripetibilità, e presentano picchi ben distinti, che rappresentano i modi di vibrare della lastra.

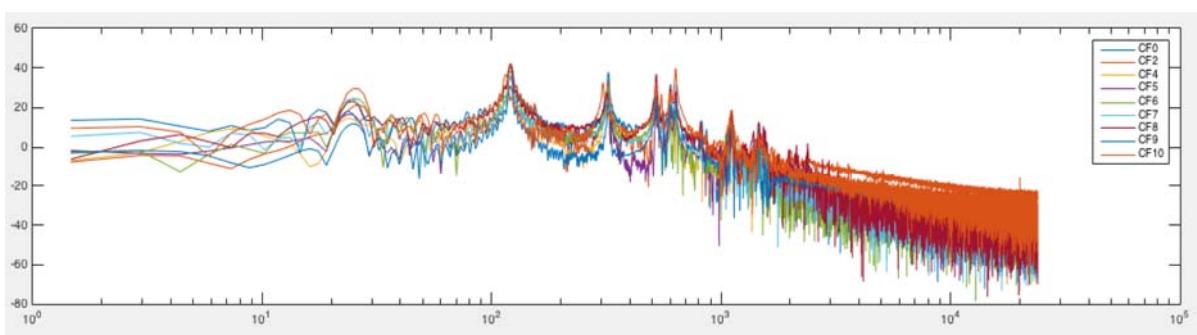
Sono stati effettuati 10 cicli a fatica.

Se durante una prova a fatica a controllo di spostamento, la forza necessaria ad ottenere un determinato spostamento prefissato diminuisce, significa che la lastra sta perdendo rigidezza.



*fig.6.12 - Grafico che mostra in successione i 10 cicli di carico*

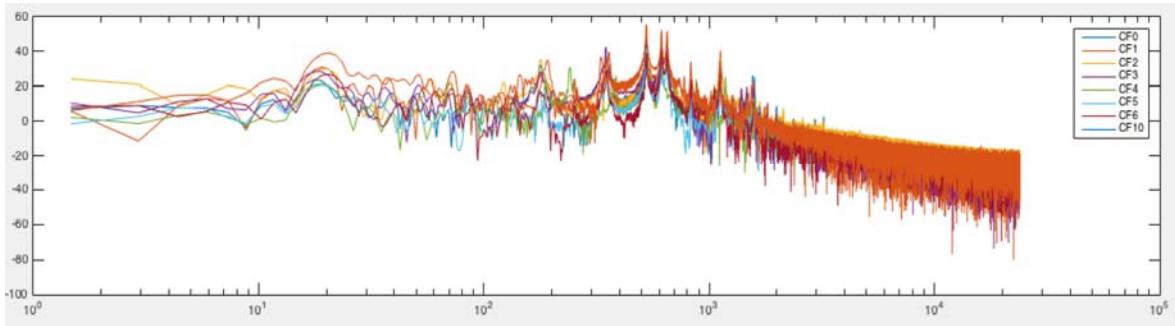
Durante le misurazioni acustiche abbiamo notato che inizialmente gli spettri sembravano presentare una decrescita dei picchi, ma successivamente questa tendenza non si è tenuta costante. Di seguito possiamo osservare i grafici relativi un unico punto, il punto 1, misurato sia sul foam che sulla struttura realizzata da noi.



*fig.6.13 - Variazione dello spettro relativo ad un punto, misurato su foam dopo ogni ciclo di carico*

Come si può notare dall' immagine, i vari spettri hanno una buona ripetibilità. Si ha un decadimento dello spettro all'inizio. Infatti i primi due spettri, relativi alla lastra in condizioni normali e dopo due cicli di carico, risultano essere sovrapposti, il che potrebbe voler dire che a causa di un numero scarso di cicli e con un valore basso di forza, non abbiamo rovinato la lastra.

Lo spettro relativo al quarto ciclo a fatica, invece si dispone sotto i primi due insieme però agli spettri relativi le altre fasi di carico. La nostra speranza era quella di poter osservare una tendenza maggiore dello spettro ad abbassarsi procedendo con i cicli di carico, ma ciò non si è verificato.



*fig.6.14 - Spettro relativo al punto 1 sulla struttura*

Come possiamo notare da queste ultime due immagini, anche sulla struttura si ha una buona ripetibilità delle misure, ma non si riesce ad individuare un andamento caratteristico per poter definire il reale affaticamento della struttura. Possiamo quindi ipotizzare che la lastra si sia effettivamente rovinata procedendo con le fasi di carico, ma in un modo diverso da quello che ci aspettavamo. La lastra, infatti, ha perso man mano la sua rigidezza, ma evidentemente al suo interno non si sono sviluppate fino alla rottura delle cricche o dei vuoti che ci permettessero di evidenziare meglio il fenomeno della fatica.

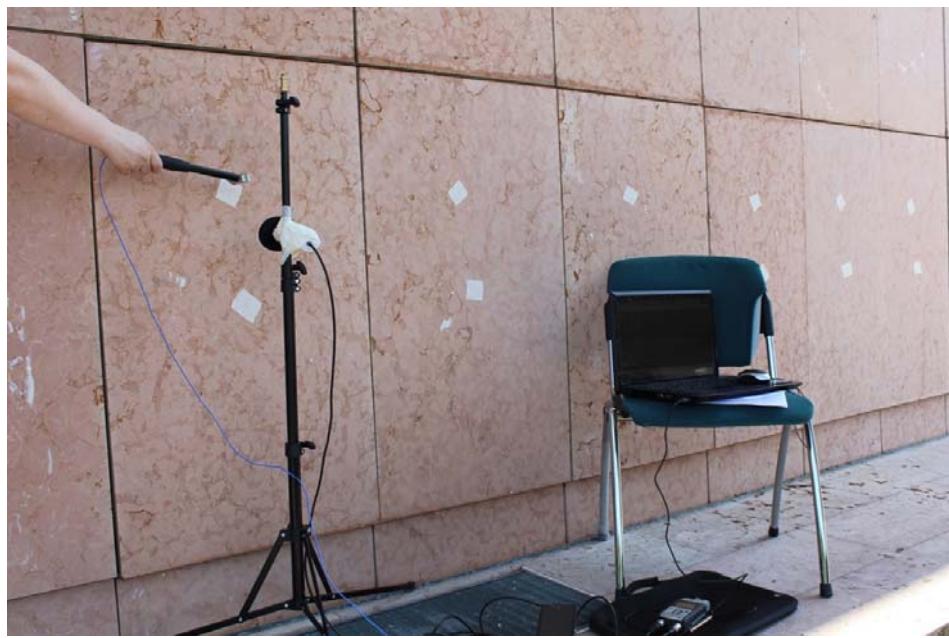
## 6.4 Sperimentazioni effettuate: Test in situ e risultati

Dopo aver effettuato le prove in laboratorio ci siamo recati presso il plesso polifunzionale del campus, per eseguire prove acustiche sulle lastre posate in opera.

La prova è stata eseguita seguendo gli stessi metodi applicati in precedenza e, naturalmente, impiegando gli stessi strumenti. Abbiamo innanzitutto scelto le lastre sulle quali eseguire l'analisi, prendendo quelle che si trovano sul primo corso dell'edificio, nella facciata orientata verso la mensa.

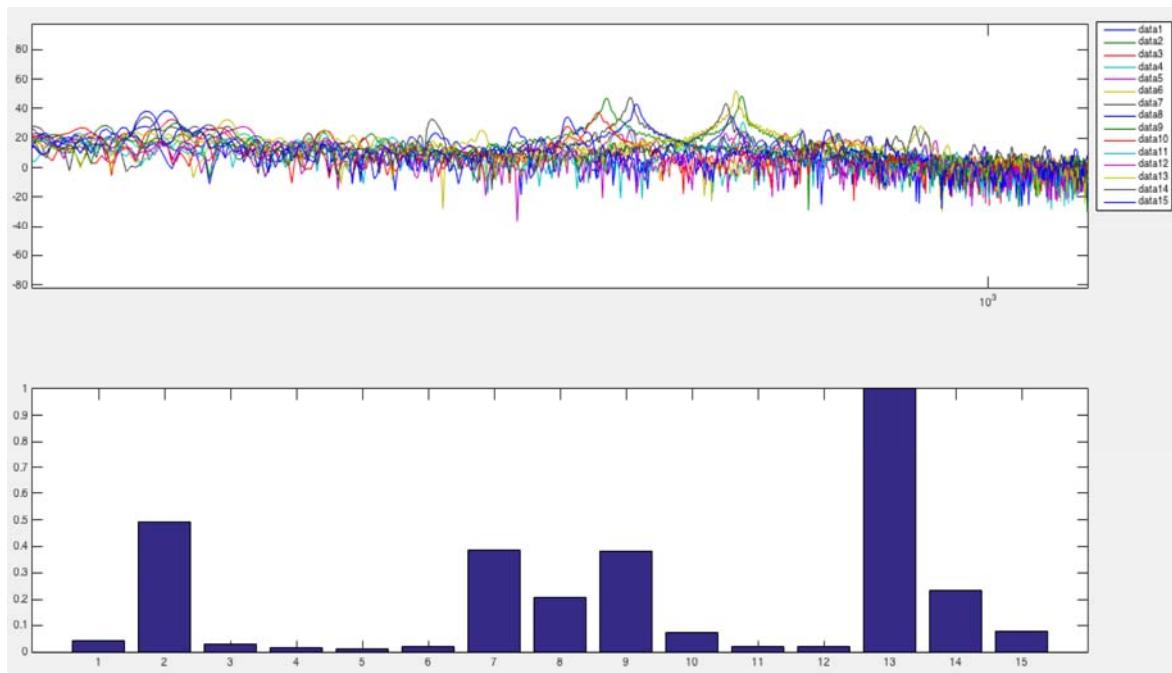
Abbiamo preso come riferimento 15 lastre sulle quali siamo andati a percuotere due punti: il punto centrale e un altro punto spostato di 25 cm verso l'alto e 2 cm a sinistra rispetto a quello centrale. Questo punto è stato scelto in modo da non trovarsi su nessun asse di simmetria della lastra.

In questa analisi abbiamo preso come riferimento solo due punti poiché, se il metodo dovesse funzionare, questo dovrebbe essere molto rapido da eseguire.



*fig.6.15 - Prove sulle lastre*

Delle 15 lastre percosse ve ne sono alcune con dimensioni diverse: infatti alcune misurano 52 cm di larghezza mentre altre sono di 63 cm di larghezza. Dopo aver effettuato l'analisi acustica su ognuna di esse, siamo tornati in laboratorio per analizzare i dati misurati.



*fig. 6.16 - Spettro non derivato delle 15 lastre*

Come si può vedere dal grafico, alcune lastre presentano dei picchi ben definiti, mentre altre hanno uno spettro più “piatto”. Per esempio, le lastre che misurano 52 cm di larghezza hanno il

primo picco circa a 550 Hz, mentre quelle con 62 cm di larghezza hanno il primo picco attorno ai 400 Hz. Per evidenziare questa caratteristica, abbiamo determinato un indice, rappresentato dall'istogramma sottostante gli spettri, dal quale riusciamo a discriminare le lastre il cui spettro sveduta in maniera significativa. Da questo indice, abbiamo potuto osservare che alcune lastre presentano uno spettro più "piccoso" : 2, 7 ,8 ,9 ,13, 14.

Ciò potrebbe significare che, le lastre che presentano un maggior numero di picchi sono lastre sane, cioè con i propri modi di vibrare ben definiti, oppure sono vincolate in maniera differente. Cambiano cioè le condizioni al contorno.

Per determinare in quale dei due casi ci troviamo abbiamo smontato due delle lastre testate, una caratterizzata da uno spettro ricco di picchi, ed una caratterizzata da uno spettro particolarmente "piatto" e le abbiamo sottoposte alle medesime prove in laboratorio. E' risultato che la lastra che presentava, in situ, spettro "piatto", dà luogo in questo caso ad uno spettro nel quale i modi risultano comunque evidenti. Ciò significa, senza ombra di dubbio, che le differenze rilevate nelle misure in situ, sono dovute a diverse condizioni di vincolo. Si è tornati a verificare tale ipotesi, ed effettivamente le lastre che presentavano uno spettro privo di picchi, erano fissate in maniera più salda all'intelaiatura metallica di sostegno.

## 6.5 CONSIDERAZIONI

Si è proceduto, per fasi successive, confrontando lastre presumibilmente integre ad altre danneggiate artificialmente. In una prima fase abbiamo creato un macrodanneggiamento, forando una lastra lungo una linea di separazione tra grani. In una seconda fase abbiamo sottoposto una lastra ad una serie di cicli a fatica, volendo approssimare l'effettiva usura di una lastra in esercizio. Sono state eseguite prove in laboratorio in due diverse configurazioni: montaggio simulante l'effettiva posa in opera ed appoggio simulante le condizioni di lastra libera. Successivamente sono state eseguite prove in situ su lastre appartenenti ad uno stesso corso.

Abbiamo sottoposto tutte le lastre ad una sollecitazione meccanica in più punti tramite martello strumentato con punta di plastica, acquisendo il suono generato per mezzo di un microfono omnidirezionale. Abbiamo analizzato i dati con il software Adobe Audition® e, successivamente, con uno script Matlab® confrontando le FFT e i Waterfall relativi ai diversi punti eccitati.

Dalle prove in laboratorio è emerso che il metodo acustico utilizzato discrimina in maniera evidente la lastra forata artificialmente da una lastra integra di uguale geometria. Non si sono tuttavia ottenuti gli stessi risultati nelle prove a fatica. La lastra, infatti, ha perso man mano la sua

rigidezza, ma al suo interno non si sono sviluppate fino alla rottura delle cricche o dei vuoti che ci permettessero di evidenziare il degrado strutturale tramite le prove acustiche. Queste tipologie di prove danno buoni risultati se applicate a materiali nei quali si ha uno sviluppo notevole di vuoti interni oppure di ampie inclusioni di materiali aventi impedenza acustica significativamente diversa dal materiale studiato. Non è così nel nostro caso, infatti l'impedenza acustica dell'argilla e del marmo risulta essere molto simile.

D'altronde il metodo si è rilevato efficace nell'evidenziare le diverse condizioni di montaggio, solo in apparenza uguali per ogni lastra. Si è potuto notare che alcune di esse risultano essere saldamente ancorate all'intelaiatura metallica, mentre altre no.

Di fatto, applicando il metodo acustico per l'individuazione delle disomogeneità interne alle lastre di marmo, esso non risulta efficiente nella distinzione di inclusioni o difetti interni alla lastra a meno che questi non abbiano dimensioni macroscopiche o caratteristiche acustiche molto differenti dalla normale composizione del marmo. Il metodo risulta invece molto efficiente nel valutare la diversa condizione di ancoraggio.

## 7. STUDI Sperimentali condotti: prodotti dell'industria alimentare (salami)

### 7.1 GENERALITA'

Nell'industria alimentare si ritrova frequentemente l'utilizzo di tecniche di percussione e auscultazione di prodotti per testarne il grado di maturazione (come per esempio nel caso delle angurie, dei meloni etc), la conformità a determinati standard qualitativi, o per individuare l'eventuale presenza di difetti quali mala compattazione di alimenti compositi, anomala maturazione, incursioni di colonie batteriche che abbiano attaccato il prodotto, e altro. Il caso più noto è quello delle forme di parmigiano. Esistono tradizionalmente figure professionali specializzate per la qualifica delle quali ad oggi vi sono elenchi, denominate "espertizzatori".



*fig. 7.1 - Strumenti tradizionali del battitore (martello, sonda, ago)*

Il caso esaminato è quello di un'industria produttrice di salami, la Cavalier Umberto Boschi di Felino (PR). I tipi di difetti che si presentano più frequentemente nei salami sono principalmente due: la presenza di cavità alveolari generate da colonie batteriche, che si verificano tipicamente nei pressi di una delle due estremità del salame, in particolare l'estremità che resta in basso durante il periodo di stagionatura (periodo nel quale il pezzo è appeso); e la non compattazione del prodotto (salami "grassi"), che dà luogo ad una diffusa marcescenza prematura la quale pregiudica totalmente il prodotto dal poter essere immesso sul mercato. Il difetto del primo tipo è dunque localizzato, e localizzato in una zona nota a priori, mentre il difetto del secondo tipo è diffuso.

L'obiettivo finale dello studio è la messa a punto di un tester utilizzabile in linea di produzione che sia di aiuto all'espertizzatore di salami nell'escludere dalla partita i pezzi inadeguati. Il tester fornirà un segnale meccanico e acquisirà la risposta del pezzo sollecitato. Dall'analisi dei segnali di input ed output verrà calcolato un indice che, espresso tramite un semaforo di immediata lettura (verde / rosso), e confrontato con una soglia determinata grazie al presente studio, supporterà l'espertizzatore nella selezione.



*fig. 7.2 - Espertizzatrice nelle normali condizioni operative*



*fig. 7.3 - Espertizzatrice spiega le differenze tra i pezzi commercializzabili e non*

Attualmente tale selezione viene eseguita tramite percussione manuale (crick del dito) ed analisi a orecchio. Il metodo è efficace, ma il gesto, eseguito centinaia di volte per turno di lavoro, costituisce un fattore di rischio per l'operatore secondo il TUSL (81/2008) in quanto rientra nella categoria dei gesti meccanici ripetuti. In secondo luogo, la figura dell'espertizzatore richiede una comprovata competenza ed esperienza; utilizzare un supporto in grado di fornire indici oggettivi

permetterebbe di trasferire parte del lavoro a maestranze non specializzate. Meccanizzare il metodo acustico per la discriminazione dei salami integri darebbe quindi alcuni vantaggi.

Si è dunque proceduto a determinare quale fosse il più efficace modo di percuotere: forma e materiale del battente, forza da imprimere, area di battitura, numero minimo di colpi per giungere ad una descrizione significativa mantenendosi in tempi rapidi. Infatti, attualmente gli espertizzatori impiegano pochi secondi (sull'ordine di 6-7 secondi) per l'esame di ogni pezzo.

Si è proceduto poi all'esame delle caratteristiche dello spettro derivante dalla percussione di pezzi integri e difettati, tenendo in considerazione le differenze tra difetti del primo e del secondo tipo. Tutti i test sono stati effettuati a parità di grado di stagionatura (lo studio è attualmente incompleto), andranno eseguite ulteriori analisi al variare dei giorni di stagionatura, la quale naturalmente costituisce una variabile importante nel processo.

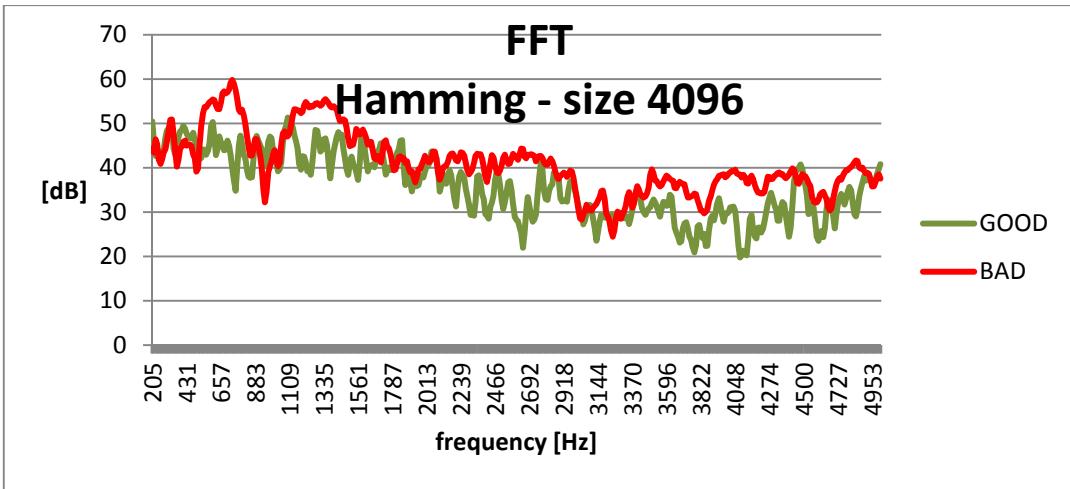
## **7.2 Sperimentazioni effettuate: Prima sessione di prove e risultati**

Allo scopo di valutare la fattibilità della messa a punto di un tester utilizzabile in linea di produzione che sia di aiuto all'espertizzatore nell'escludere dalla partita i pezzi inadeguati, si è fatto un sopralluogo in produzione per assistere alla selezione. Attualmente la scelta viene operata tramite percussione manuale ("pinghella" col dorso dell'unghia) dell'estremità del salame ed analisi a orecchio. Questa singola operazione permette di individuare entrambi i difetti che si presentano più di frequente: presenza di cavità all'estremità del salame (difetto localizzato) e mala compattazione della pasta (difetto diffuso).

Si è proceduto, in una prima fase, alla registrazione con un iPAD dell'attività dell'espertizzatore, che ha esaminato alcuni pezzi integri ed alcuni pezzi difettati.

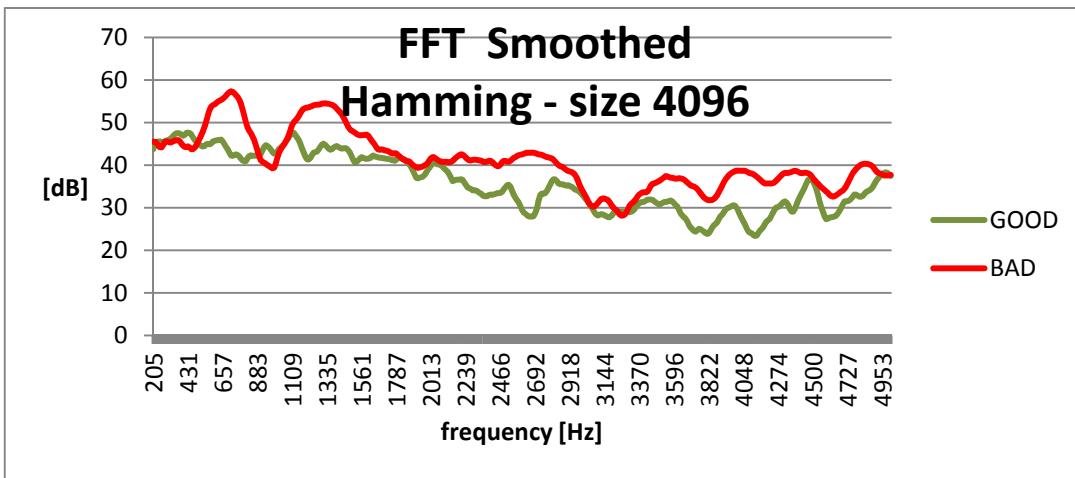
Le registrazioni sono state effettuate in bassa qualità e in condizioni di lavoro normale, principalmente allo scopo di documentare il metodo in uso attualmente. Per analizzarle è stato necessario correggerle ripulendole dal rumore di fondo.

Si presenta l'analisi in frequenza relativa alla percussione di due pezzi, uno integro (serie verde) ed uno da scartare (serie rossa).



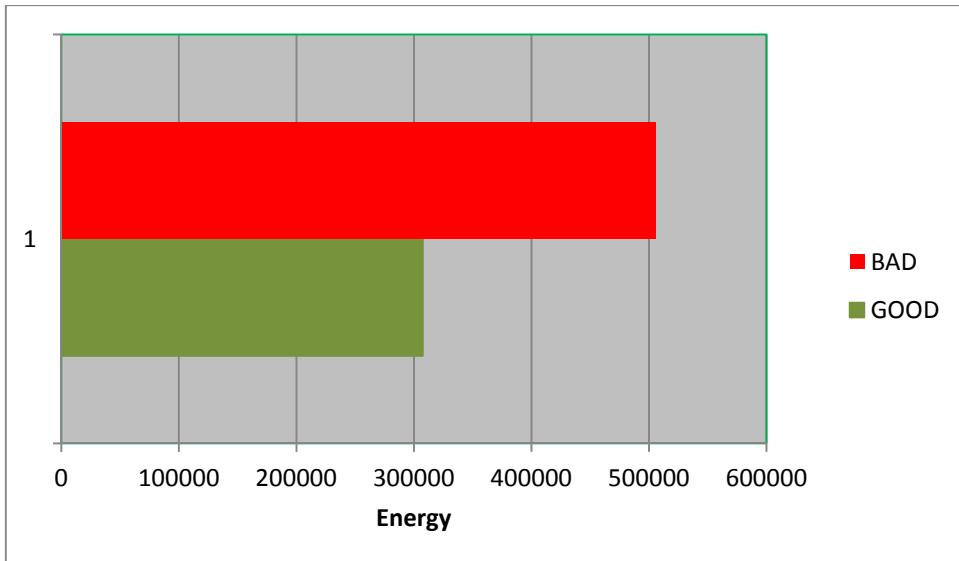
*fig. 7.4 - FFT medie: confronto tra campioni integri e non*

Per una lettura più efficace si è operata una media mobile su 11 linee spettrali (la lunghezza della media mobile è arbitraria e scelta in modo da migliorare la leggibilità del chart senza perdere le informazioni utili). Vedere grafico successivo.



*fig. 7.5 - FFT medie sottoposte a media mobile: confronto tra campioni integri e non*

Per quantificare le differenze negli spettri, si è scelto come parametro l'energia in una banda (larga). La banda da scegliere è quel range di frequenza in cui è evidente la differenza di risposta tra pezzo integro e non; nel caso specifico, si trova tra i 200 Hz e i 5 kHz.



*fig. 7.6 - Istogramma di raffronto energetico tra pezzi integri e non*

appare già evidente, analizzando questa prima serie di dati dati, che i pezzi difettati presentano un'energia decisamente più alta, nonché un livello sonoro evidentemente più alto. La differenza di livello non è stata graficata in quanto, essendo state fatte le misure con iPad sprovvisto di un microfono calibrato, non è stato possibile tarare il trasduttore. Per lo stesso motivo, i valori numerici che compaiono sugli assi dei chart sopra non sono da considerarsi precisi, ma traslati di una costante ignota.

### **7.3 Sperimentazioni effettuate: sessioni successive di prove e risultati**

Dopo questi primi risultati si è gettata la base per procedere ad una sessione di registrazione più organica, che è stata organizzata nel seguente modo:

- Preparazione di un certo numero di campioni integri (20) e uno stesso numero di campioni difettati (20 pezzi con il difetto tipo I e 20 pezzi con il difetto tipo II). Tutti i pezzi da scegliersi a parità di stagionatura e da identificare con un numero di riconoscimento progressivo.
- Percussione e registrazione dei segnali sia in ambiente di lavoro (laddove viene attualmente eseguita la selezione) che in ambiente silenzioso, così da poter quantificare l'incidenza del rumore di fondo ambientale.

Si è proceduto alla percussione manuale con l'aiuto dell'espertizzatore, e alla percussione con martello strumentato.

Si sono dunque ottenuti, dopo l'elaborazione, quattro set di dati, per ognuno dei quali si distinguono le tre serie preventivamente preparate di pezzi:

"Normali" (N), cioè adeguati alla messa sul mercato

"Buchi" (B), che presentano difetto localizzato di tipo I

"Grassi" (G), che presentano difetto diffuso di tipo II

AMBIENTE / INPUT	MARTELLO STRUMENTATO	PINGHELLE
RUMOROSO (STABILIMENTO)	N - B - G	N - B - G
SILENZIOSO	N - B - G	N - B - G

Si sono effettuate misure in due diverse giornate, 17 luglio e 3 settembre. Si riportano qui di seguito i principali risultati ottenuti dalla sessione del 17 luglio.

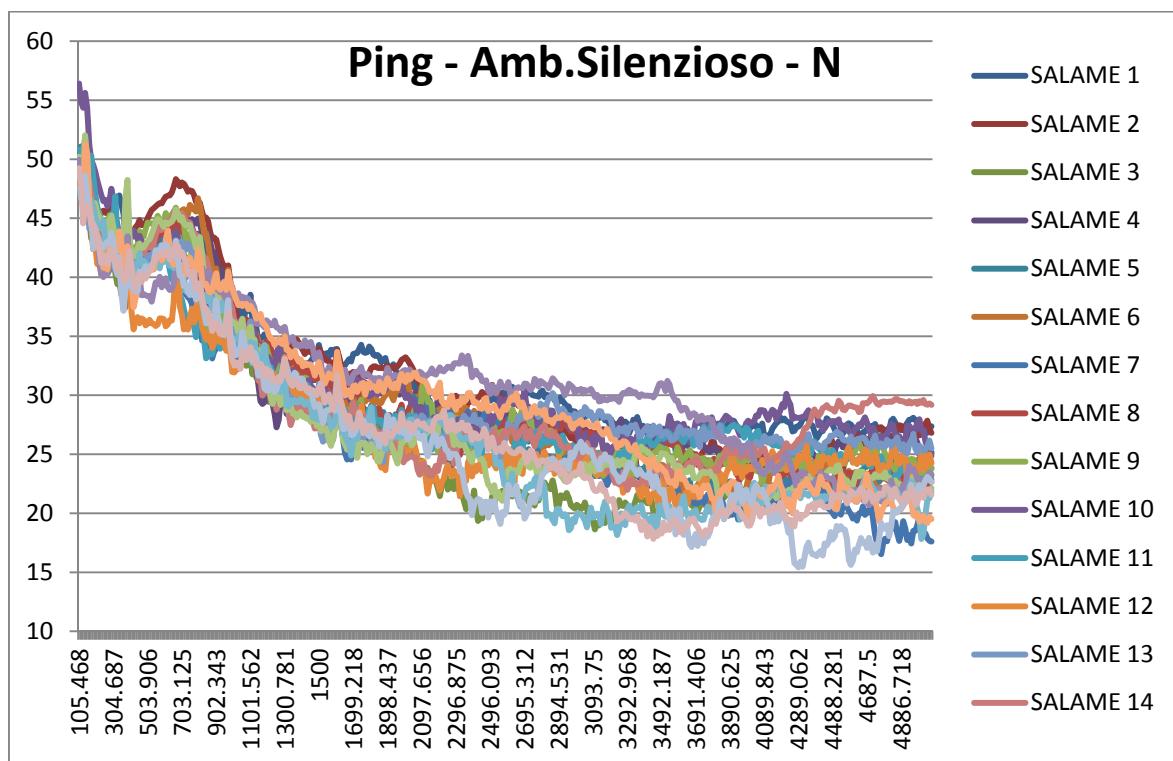


fig. 7.7 - FFT relative ai campioni integri - prova con pinghelle - ambiente silenzioso

E' sopra graficata l'FFT di ogni singolo pezzo esaminato, della partita (preselezionata) di pezzi integri. In ascissa le frequenze in ordinata l'energia.

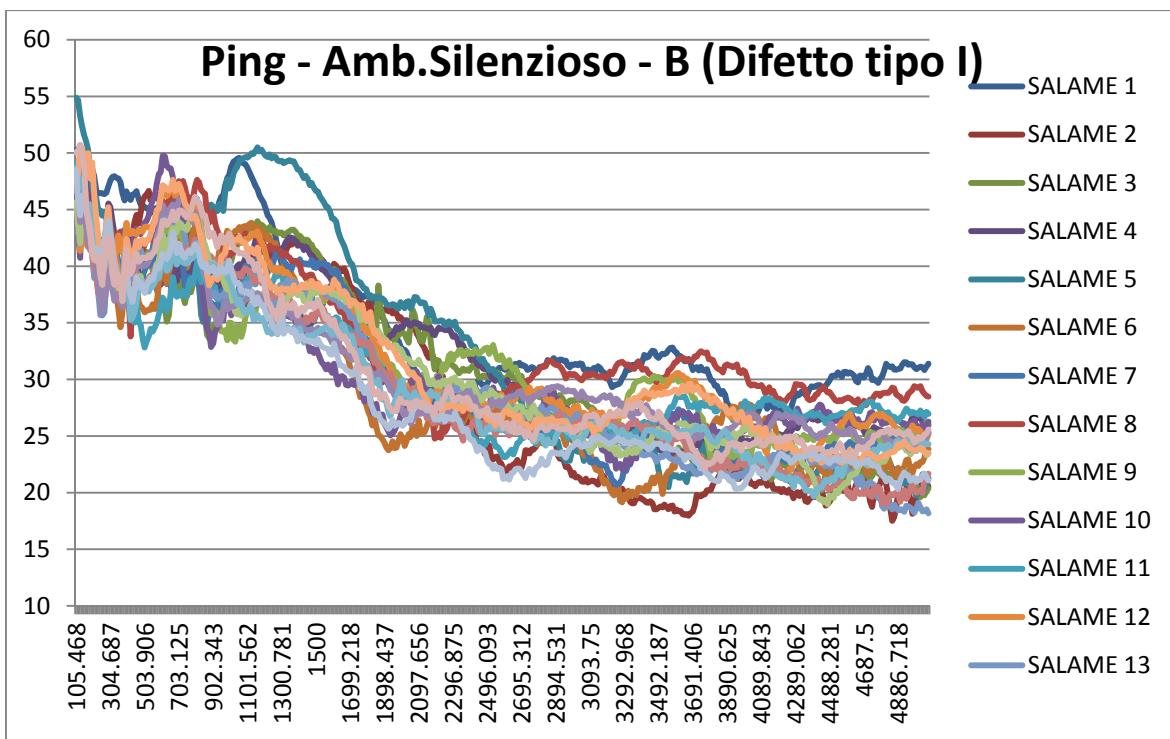


fig. 7.8 - FFT relative ai campioni "buchi" - prova con pinghelle - ambiente silenzioso

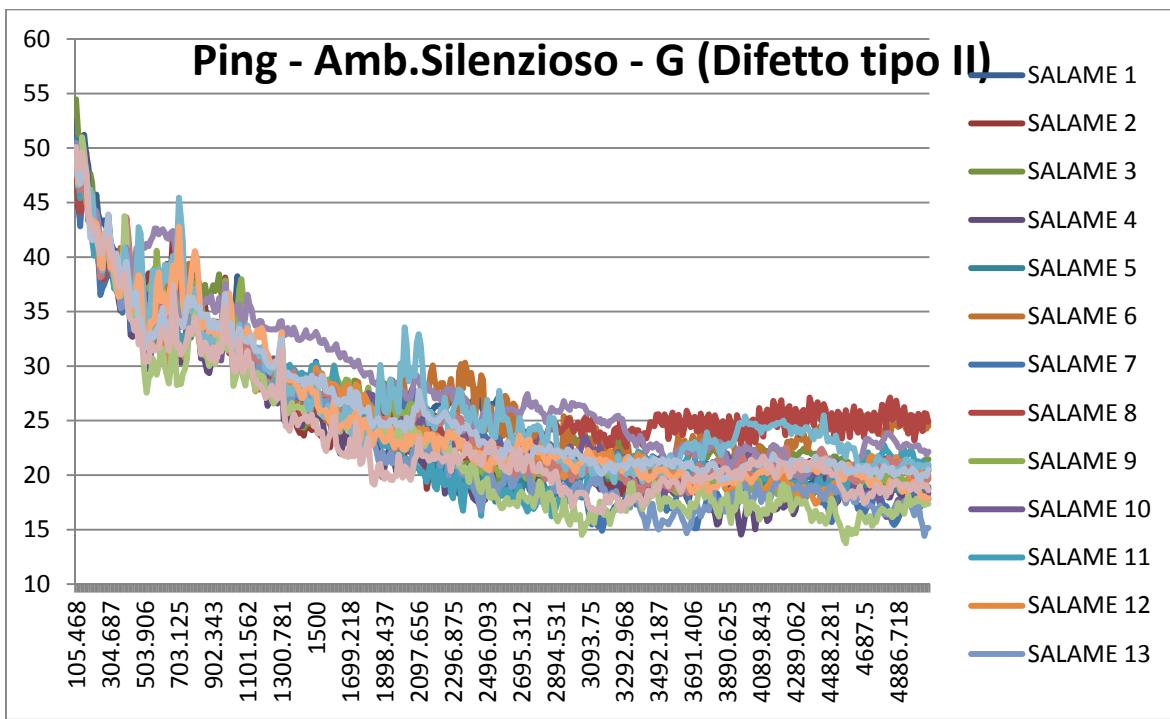


fig. 7.9 - FFT relative ai campioni "grassi" - prova con pinghelle - ambiente silenzioso

Sono sopra graficate le FFT di ogni singolo pezzo esaminato della partita (preselezionata) di pezzi fallati. In ascissa le frequenze in ordinata l'energia.

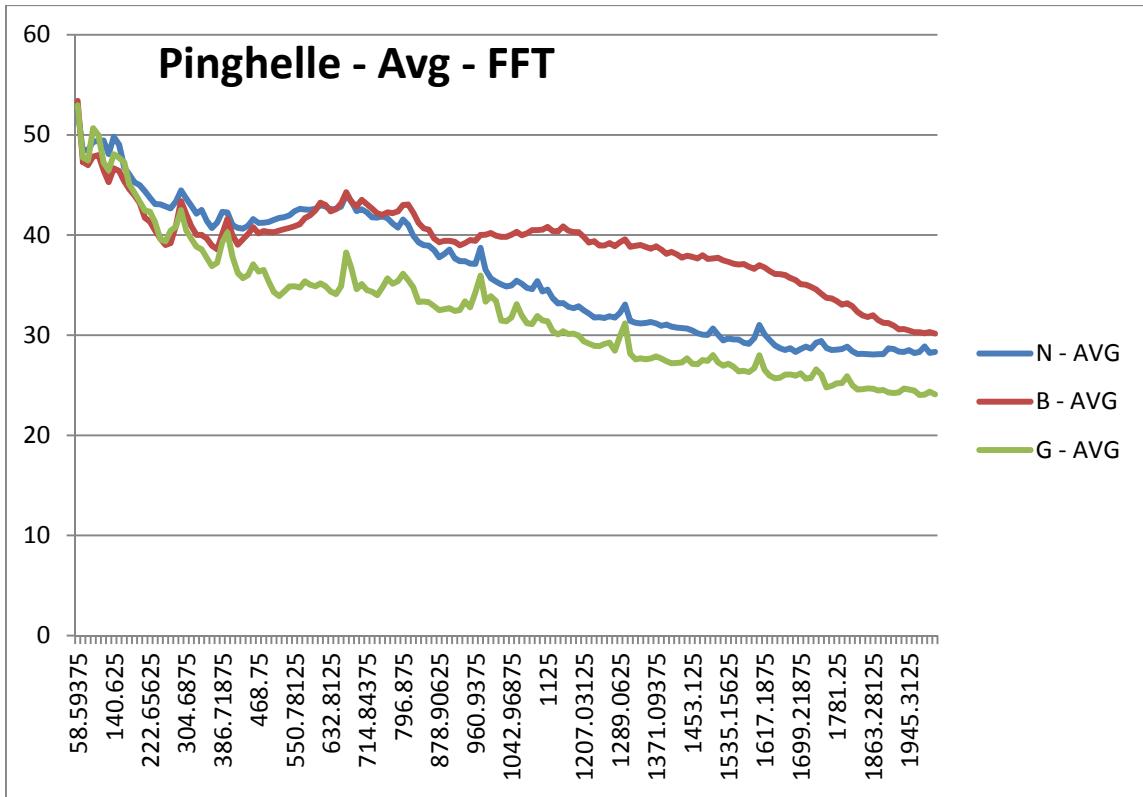


fig. 7.10 - FFT Confronto tra media dei campioni sani (N) e dei difettati tipo I (B) e tipo II (G) - prova con pinghelle - ambiente silenzioso

E' sopra graficata l'FFT mediata sui 20 pezzi esaminati: la curva blu si riferisce ai pezzi integri, la rossa ai fallati. In ascissa le frequenze in ordinata l'energia. Salta all'occhio l'incrocio tra le due curve (verificatosi alla stessa frequenza anche nelle misure fatte in ambiente rumoroso, qui non riportati). Questa proprietà potrà essere sfruttata per creare un indice che discrimin i campioni.

Si tratta semplicemente di un rapporto tra la quantità di energia in "bassa" frequenza e la quantità di energia in "alta" frequenza. La frequenza limite di suddivisione è stata scelta come il punto di intersezione tra le due curve medie riportate in figura 7.9.

$$INDEX1 = \left( \frac{\sum f_{lower}^2}{\sum f_{higher}^2} \right)^2 \quad (7.3.1)$$

In cui:

$$f_{lower} < f_{cross} < f_{higher} \quad (7.3.2)$$

Dove per  $f_{cross}$  s'intende quella frequenza in cui s'incrociano le FFT relative ai pezzi integri e non (fig. 7.9). I termini della somma sono stati quadrati per enfatizzare ulteriormente la discriminazione dei pezzi.

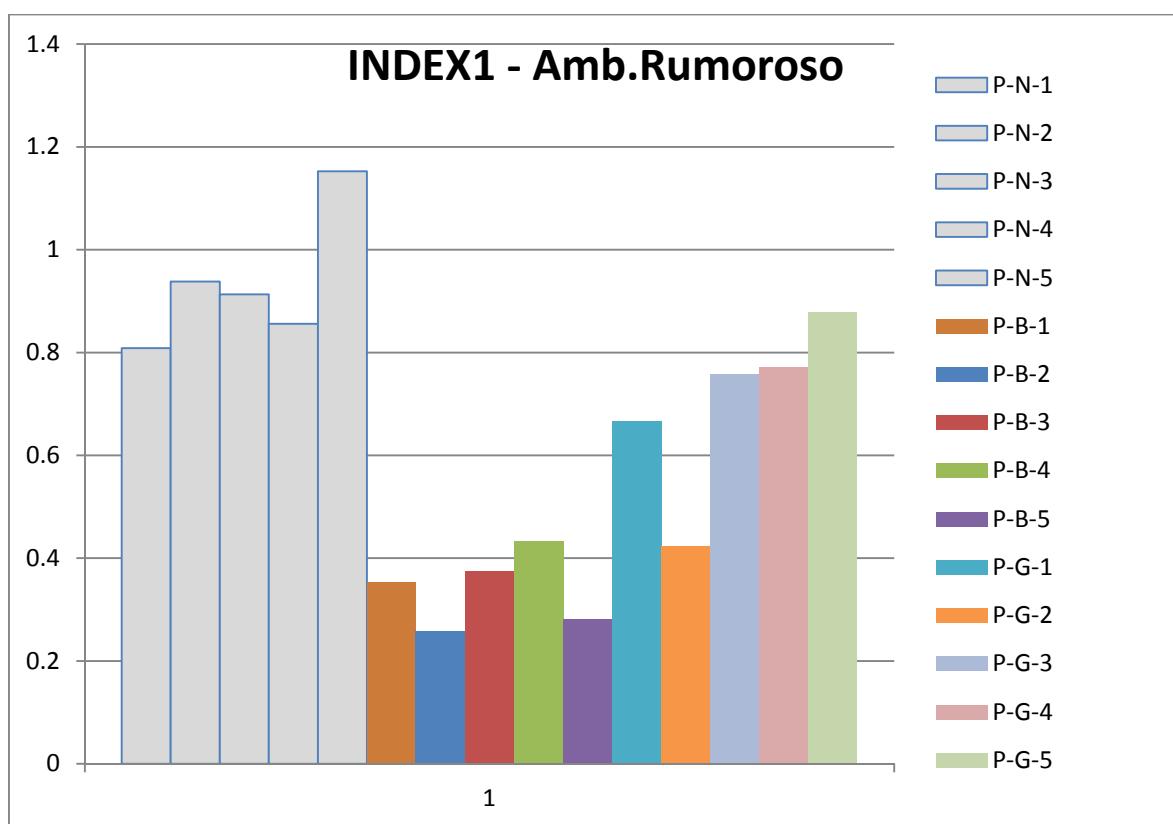
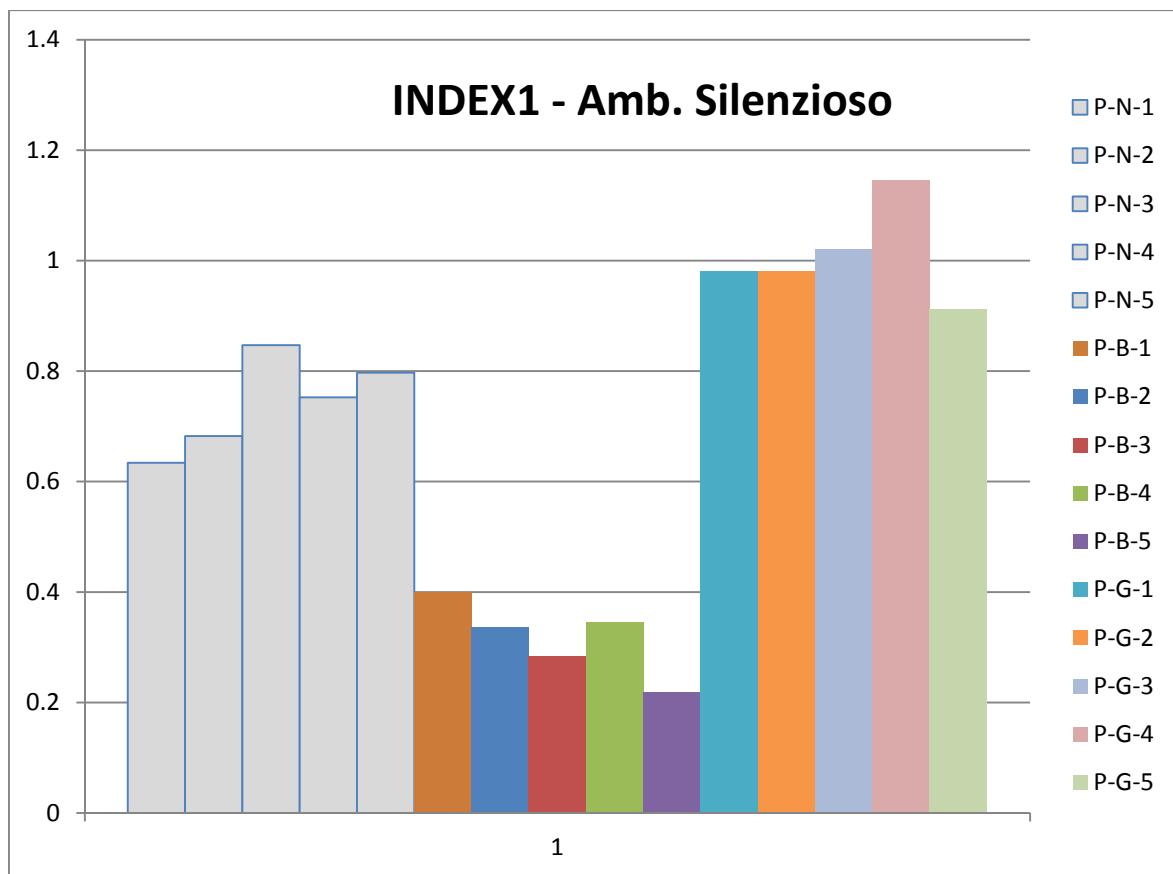


fig. 7.11 -7.12 Indice di confronto 1 relativo alle misure in amb. silenzioso / rumoroso

Sopra, istogramma che evidenzia l'indice di confronto sviluppato. Si riporta un confronto tra 5 pezzi integri - a sinistra, in grigio - e 10 fallati - a destra, colorati. Il calcolo è stato effettuato per l'intera partita, con risultati analoghi. Se ne riportano solo 5 pezzi per tipo per comodità di lettura.

Nel caso delle misure in ambiente rumoroso, si è operato un denoising sui dati, semplicemente utilizzando la funzione interna di Audition® dandole in pasto, come campione di segnale pulito, la registrazione "a vuoto" che si è effettuata tra la battitura di un campione e il successivo. Questo procedimento è risultato sufficiente a ripulire il segnale e non si è dovuta operare una pulizia più raffinata. Ciò fa ben sperare per lo sviluppo del tester da usarsi in stabilimento.

Si noti inoltre, dalle figure 7.11 e 7.12, come la discriminazione tra pezzi integri e pezzi difettati tipo I sia ancora migliore in ambiente rumoroso. Riguardo ai difetti del tipo II, in ambiente silenzioso il valore di INDEX1 risulta nettamente più alto di quello relativo ai pezzi integri, mentre in ambiente rumoroso, esso si attesta a metà tra i pezzi integri e i pezzi difettati tipo I. Evidentemente il rapporto tra alte e basse frequenze, spostandosi in ambiente rumoroso, s'impenna maggiormente proprio per i pezzi con difetti di tipo II. Sapendo che il livello di rumorosità varia da un momento all'altro della giornata lavorativa, ciò porta e non rendere utilizzabile INDEX1 per discriminare i difetti tipo II, mentre lo si ritiene molto valido, indipendentemente dal livello di rumorosità, per i difetti tipo I.

Riguardo ai pezzi grassi (difetto II) tuttavia, si noti che questi possono essere distinti semplicemente effettuando una somma totale di energie, in quanto come si nota dalla fig. 7.10, queste sono più basse in tutto il range considerato. Si introduce per questa ragione:

$$INDEX2 = \sum_{f_{min}}^{f_{max}} f_i^2 \quad (7.3.3)$$

Si procederà dunque al calcolo di due indici, con INDEX1 si individueranno i pezzi con difetto tipo I e con INDEX2 i difetti tipo II.

Esaminiamo ora le prove con martello strumentato. In questo caso, si è proceduto ad una duplice elaborazione: dapprima si sono semplicemente calcolate le FFT elaborando i dati acquisiti con il microfono, così come si era fatto per le "pinghelle", e successivamente si è calcolata la funzione di trasferimento H1 tra output ed input, sfruttando anche i dati acquisiti dalla cella di forza del microfono. Diversamente dal caso dei solai, in cui anche trascurando la correlazione con l'energia in ingresso, si ottenevano dei buoni risultati, e differentemente dalla sollecitazione con pinghelle in cui avveniva la stessa cosa, nel caso di sollecitazione dei salami con martello strumentato, è necessario il calcolo della funzione di trasferimento H1 per avere dei risultati significativi.

Prima di procedere a mediare si è fatta una media mobile su ogni FFT (lunga 15 campioni) in modo da smussarne i picchi.

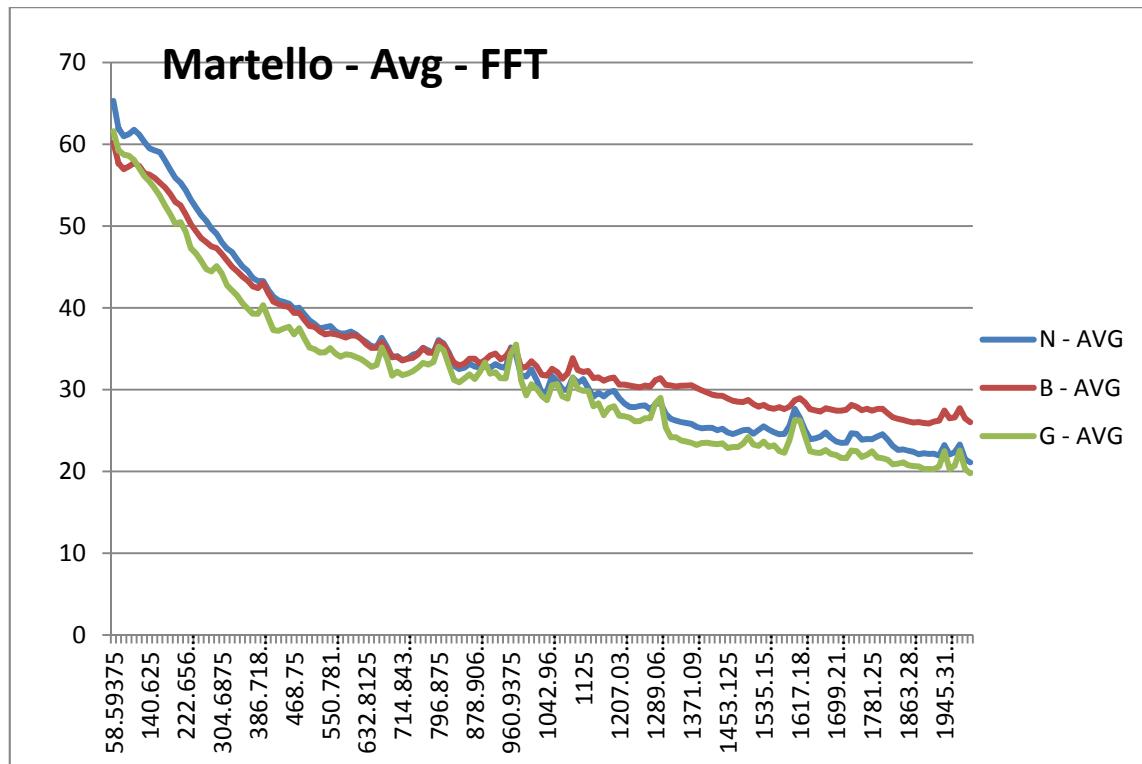
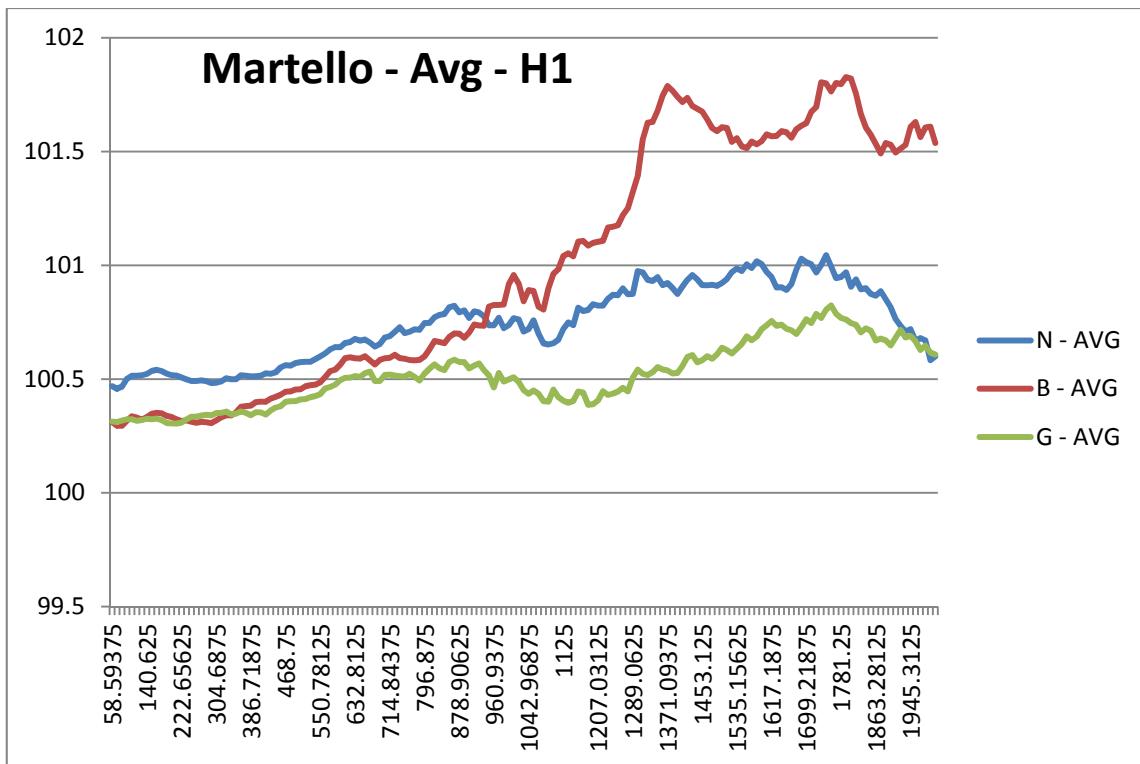


fig. 7.15 - FFT Confronto tra media dei campioni sani (N) e dei difettati tipo I (B) e tipo II (G) - prova con martello - ambiente silenzioso

Le curve sopra riportate appaiono piuttosto "impaccate". Permangono sia una minor energia totale dei pezzi G (difetto tipo II) rispetto agli altri pezzi, che il punto di rotazione circa a 700 Hz tra le restanti due curve, perciò valgono ancora, in linea di principio, le considerazioni fatte per il set up precedente, ma in questo caso le distinzioni sono più sottili; si ritiene perciò meno affidabile estrapolare gli indici da questi dati.

Si procede dunque al calcolo della funzione di trasferimento H1.



*fig. 7.16 - H1 Confronto tra media dei campioni sani (N) e dei difettati tipo I (B) e tipo II (G) - prova con martello - ambiente silenzioso*

Graficando la funzione di trasferimento H1 dei dati acquisiti con sollecitazione tramite martello strumentato si ottiene, similmente all'elaborazione FFT dei test con pinghelle, un punto di incrocio delle due curve medie N e B. Mentre nel caso delle FFT questa si verificava circa a 700 Hz qua si verifica attorno ai 900 Hz (occorre tenerne conto nel momento in cui si calcola l'indice di confronto, per determinare la  $f_{cross}$ ). La variazione non stupisce in quanto, naturalmente, si tratta di due quantità differenti. Si tiene però presente che il valore di frequenza a cui avviene la rotazione potrebbe essere influenzato da altri fattori come ad esempio il grado di stagionatura; perciò il valore riscontrato in questa sessione di misure, fino a che non si faranno ulteriori prove, lo si ritiene valido solo per questa sessione e non estendibile con certezza.

## 7.4 CONSIDERAZIONI

L'obiettivo di questo studio condotto presso la ditta "Cavalier Boschi" di Felino (PR), è determinare la fattibilità di un tester utilizzabile in linea di produzione che sia di aiuto all'espertizzatore. Dalle analisi effettuate su un campione statisticamente significativo di pezzi integri e di pezzi difettati (distinguendo, come spiegatoci da tecnici esperti dell'industria alimentare, i due tipi principali di degradazione che si presentano frequentemente nei salami) è risultato che il tester può essere facilmente realizzato. Implementerà al suo interno un semplice algoritmo che calcolerà due indici dal valore dei quali scatterà un semaforo rosso o verde a seconda, rispettivamente, che il pezzo testato sia da escludere dalla partita di vendita o meno. E' stato verificato che le prove possono essere condotte anche in stabilimento, senza necessità di spostarsi in un ambiente silenzioso o di utilizzare microfoni ultradirettivi per l'acquisizione: anche un microfono omnidirezionale può andare bene.

Si sono infatti acquisiti i dati ottenuti con trasduttori microfonici a diverse direttività (non sono stati qui riportati i risultati di tale confronto) in ambiente rumoroso, e si è visto che non è necessario impiegare un microfono direttivo. Anzi, in taluni casi potrebbe compromettere negativamente le prove. Si è anche visto che il microfono non deve stare troppo vicino al pezzo durante la battitura, ma è bene che vi stia a una quarantina di centimetri almeno.

E' invece opportuno, per misure in stabilimento, applicare un minimo di denoising al segnale acquisito, ripulendolo almeno grossolanamente dal rumore di fondo. Tutti i risultati riportati nei paragrafi precedenti relativi alle misure in stabilimento, hanno subìto questo processo.

## 8. CONCLUSIONI E SVILUPPI FUTURI

Questo lavoro di tesi si è incentrato su diagnosi acustico-vibrazionali non distruttive per il monitoraggio dello stato interno di strutture. Dopo un'attenta ricerca bibliografica sullo stato dell'arte, si è proceduto a testare personalmente metodi noti e non, al fine di verificarne potenzialità, limiti, campi di applicazione. In tutti i casi si sono svolte prove in laboratorio e in situ. Si riporta un prospetto schematico dei test eseguiti, rimandando, per osservazioni più approfondite, ai paragrafi intitolati: "considerazioni" presenti nei capitoli dedicati.

STRUTTURA ESAMINATA	INPUT	OUTPUT	RISULTATI
Pareti divisorie interne in cartongesso	Altoparlante dodecaedrico	Array microfonico 32 capsule	POSITIVI
Solai interni in laterocemento	Battitore non strumentato	Microfono omnidirezionale	POSITIVI
Lastre in marmo di rivestimento per facciate ventilate	Martello strumentato	Accelerometro piezoelettrico	NEGATIVI
Prodotti dell'industria alimentare (salami)	Martello strumentato	Microfono omnidirezionale	POSITIVI

L'impiego della tecnica della mappatura acustica con array microfonico Eigenmike® - applicata nel presente studio alla verifica dell'isolamento acustico "locale" di partizioni verticali interne - ha fornito risultati positivi. Grazie all'analisi delle mappe isofoniche ottenibili mediante sollecitazione acustica ed acquisizione con array microfonico sferico, abbiamo verificato che è possibile determinare correttamente le zone in cui si hanno cadute di potere fonoisolante di parete, nonché gli intervalli di frequenza a cui tali cadute si verificano. Lo script utilizzato per l'elaborazione di questi dati in particolare, è stato sviluppato in precedenza dall'ing. Alberto Amendola.

Per le verifiche di sfondellamento dei solai in laterocemento, si è sfruttando il principio di dipendenza tra l'integrità interna del solaio e l'omogeneità degli spettri relativi ai suoni generati dalla percussione dell'intradosso. Si è eseguita un'analisi comparata tra prove in laboratorio e in opera su tre solai di riferimento: uno certamente sfondellato, uno quasi certamente integro ed un ultimo a rischio sfondellamento, verificando la bontà del metodo sviluppato. Si sono testati vari set-up di misura, il migliore dei quali è costituito da un battitore meccanico non strumentato,

appositamente costruito, e da un microfono omnidirezionale. Per l'analisi dei dati si è sviluppato, in collaborazione con l'ing. Lorenzo Chiesi, un apposito script in ambiente Matlab®.

Nell'ambito dei test sul lastre di rivestimento in marmo, si è proceduto, per fasi successive, confrontando lastre presumibilmente integre ad altre danneggiate artificialmente. In una prima fase abbiamo creato un macrodanneggiamento forando una lastra. In una seconda fase abbiamo sottoposto una lastra a cicli a fatica, simulandone l'usura in esercizio. Abbiamo analizzato i dati con un'evoluzione dello script Matlab® sviluppato nello studio sui solai, migliorato per l'occasione. I metodi testati discriminano la lastra forata da una lastra integra di uguale geometria. Non si sono tuttavia ottenuti gli stessi risultati confrontando la lastra integra con quella sottoposta a cicli a fatica. Ciò si spiega con il fatto che i metodi testati funzionano bene laddove l'onda s'imbatte in un significativo salto d'impedenza acustica, in caso contrario non funzionano. Essendo argillose le inclusioni nel marmo, ed avendo marmo e argilla impedenze simili, le inclusioni non vengono rilevate. Così come non vengono rilevate microcricche.

Da ultimo, si sono applicati i metodi studiati al controllo di qualità dei salami. Tradizionalmente tale controllo avviene imprimendo una "pinghellata" (crick del dito) ed ascoltando ad orecchio. Si sono ottenuti ottimi risultati e si sono individuati indici semplici che, implementati in un tester portatile, potranno coadiuvare l'espertizzatore nel controllo di qualità. Il metodo prevede di imprimere i colpi con martelletto strumentato anziché con il dito, tutelando gli operatori da malattie professionali, e - per la sua semplicità - potrà essere utilizzato anche da personale non qualificato.

## 9. BIBLIOGRAFIA

- [1] A. Farina, *Dispense del corso di Acustica applicata*, Facoltà di Ingegneria, Università degli studi di Parma, 2013-2014
- [2] Zollo, Herrero, Emolo, *Terremoti ed onde: introduzione alla sismologia sperimentale*, e-book, 2003
- [3] M. Luise, G. M. Vitetta, *Teoria dei segnali*, McGraw-Hill, 2009
- [4] A. Gozzi, *Ultrasuoni: Fenomenologia, stato della tecnica, ricerca ed applicazioni innovative nell'industria dell'imbottigliamento*, Tesi di laurea A.A. 2003-2004
- [5] K. Ono, *New goals for AE in materials research – Beyond the Millennium*, Elsevier, 2000
- [6] S. Yuyama, M. Ohtsu, *AE evaluation in concrete*, Beyond the Millennium, Elsevier, 2000
- [7] I. Papa, *Localizzazione di difetti in materiali compositi mediante applicazione di tecniche di emissione acustica*, Tesi di dottorato A.A. 2010-2011
- [8] L. Predari, *Metodi acustici e vibrazionali per l'individuazione di difetti in intonaci ed affreschi*, Tesi di laurea A.A. 2008-2009
- [9] S. Pelosi, *Metodiche avanzate di misura dell'isolamento acustico*, Tesi di laurea A.A. 2012-2013
- [10] A. Farina, *Simultaneous measurement of impulse response and distortion with a swept-sine technique*, 2010
- [11] P. Fausti, *Acustica in edilizia*, Pubblicazioni Rockwool
- [12] P. Bonfiglio, N. Prodi, F. Pompoli, A. Farina, *On the use of a p-u sound intensity probe for the qualification of complex surface properties*, 2006
- [13] M. Ebri, *Analisi acustiche e vibrazionali per il monitoraggio dei laterizi nei solai*, Tesi di laurea A.A. 2013-2014
- [14] M. Catania, *Sfondellamento dei solai in latero-cemento*, Dario Flaccovio Editore
- [15] E. Cavalca, *Analisi acustiche per il monitoraggio dei rivestimenti in lastre di marmo nel plesso polifunzionale del campus di Parma*, Tesi di laurea A.A. 2014-2015
- [16] A.M. Ferrero, M. Migliazza, A. Spagnoli, *Un modello teorico per lo studio del fenomeno di imbarcamento in rivestimenti di marmo soggetti a cicli termici*
- [17] M. Pieri, *I marmi d'Italia: graniti e pietre ornamentali*, Hoepli, 1964.
- [18] G. Sciuto, *Caratteristiche e prove non distruttive dei materiali lapidei*, Gangemi, 2003