



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PARMA

FACOLTÀ DI INGEGNERIA

CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA MECCANICA

**SVILUPPO E VALIDAZIONE Sperimentale di una
TECNICA NON DISTRUTTIVA PER IL MONITORAGGIO
DELLO STATO DI SALUTE DI AFFRESCHI ANTICHI**

Relatore:

Dott. Ing. Luca Collini

Correlatore:

Dott. Ing. Silvia Carra

Tesi di Laurea di:
Francesco Mangiavacca

Anno Accademico 2007/2008

Indice

Indice	- 2 -
1 Introduzione.....	- 3 -
2 Tecniche non distruttive per la diagnosi di affreschi antichi.....	- 5 -
2.1 L'affresco	- 5 -
2.1.1 Caratteristiche fisico-chimiche	- 5 -
2.1.2 Danneggiamenti negli affreschi.....	- 8 -
2.2 Le tecniche di monitoraggio più diffuse.....	- 11 -
2.2.1 Impact Test	- 11 -
2.2.2 Radiografia	- 11 -
2.2.3 Termografia	- 12 -
2.2.4 Ultrasuoni	- 13 -
2.2.5 Interferometria.....	- 14 -
2.2.6 Prospettiva Radar	- 14 -
2.3 Vibrometria Laser Doppler	- 16 -
2.3.1 Il Vibrometro Laser Doppler	- 16 -
2.3.2 Funzionamento.....	- 19 -
2.3.3 Caratteristiche.....	- 22 -
2.3.4 L'eccitazione strutturale.....	- 24 -
2.3.5 La restituzione dei dati	- 28 -
3 Attività sperimentale: convalida della tecnica LDV	- 31 -
3.1 Costruzione pannello di prova	- 31 -
3.2 Allestimento Set-Up.....	- 37 -
3.3 Acquisizione del segnale	- 39 -
3.3.1 Aspetti generali	- 39 -
3.3.2 Funzione di risposta in frequenza: FRF	- 40 -
3.3.3 Catena di misura	- 44 -
3.4 Dispositivo di interfaccia tra strumentazione e workstation	- 45 -
3.4.1 Front-End	- 45 -
3.5 Strumenti per l'eccitazione strutturale e l'acquisizione dei dati	- 47 -
3.5.1 Martello strumentato.....	- 47 -
3.5.2 Velocimetro Laser Polytec	- 49 -
3.5.3 Impianto acustico	- 52 -
4 Risultati e discussione.....	- 54 -
4.1 Eccitazione della struttura con il martello strumentato	- 54 -
4.2 Eccitazione della struttura con la cassa acustica	- 66 -
4.3 Discussione delle misure effettuate con il martello strumentato e confronto con le misure acustiche.....	- 78 -
4.3.1 Punti difettati	- 78 -
4.3.2 Punti non difettati	- 79 -
5 Conclusioni.....	- 80 -
Bibliografia	- 83 -
Appendice I: Risultati Numerici.....	- 84 -
Appendice II: La Biocalce®	- 88 -
Ringraziamenti	- 94 -

1 Introduzione

Durante gli ultimi anni hanno avuto notevole sviluppo tecniche che permettessero di determinare lo stato di conservazione dei beni artistici.

Le metodologie analitiche e le tecniche attualmente note in grado di individuare le caratteristiche chimico-fisiche delle opere d'arte fanno per lo più riferimento all'esperienza del restauratore, il quale, dopo un'ispezione manuale e visiva, è generalmente in grado di fornire un giudizio basato esclusivamente sulla sua esperienza [1.].

L'idea alla base delle nuove tecniche è quella di sostituire i sensi dell'uomo con strumenti di misura. In particolare i requisiti di queste nuove tecniche sono [2.]:

- Assoluta non intrusività;
- Misure remote;
- Banda di risposta estesa;
- Alta sensibilità;
- Registrazione digitale dei dati;
- Portabilità.

Tra le tecniche di monitoraggio non-distruttive si trovano sistemi di misura della radiazione termica tramite termografia infrarossa; sistemi basati su raggi X, ultrasuoni, interferometria o prospezione radar; ed infine sistemi basati sulla misura delle vibrazioni, come per esempio i sistemi LDV o SLDV (Scanning Laser Doppler Vibrometry), che sono l'oggetto di questa tesi.

L'applicazione del LDV alla diagnostica delle strutture o degli apparti decorativi si basa sulla considerazione che dalla misura delle vibrazioni se ne possa dedurre lo stato di conservazione. Quando

avviene la delaminazione, ossia il distacco dell'intonaco dal muro o da un altro strato di intonaco, si ha un aumento localizzato del valore della velocità di vibrazione della zona sollecitata.

L'obiettivo di questa tesi è la ricerca di una convalida sperimentale di questa tecnica, mediante la realizzazione di un pannello di prova in grado di imitare la struttura a strati dell'affresco.

Questo pannello è costituito da una mattonella di cemento sopra la quale è stato disposto uno strato di intonaco. Tra intonaco e cemento sono stati inseriti dischi di materiali diversi, aventi geometria e ubicazione note, al fine di simulare il vuoto che si viene a creare in seguito alla delaminazione.

Una volta adeguatamente vincolato, il pannello è stato sottoposto a prove prima di tipo invasivo (impact test) e poi di tipo non invasivo (test acustico). Le prove sono state effettuate sia puntando il laser al centro di ogni disco sia in punti sufficientemente lontani, dove si è supposto non sia presente la delaminazione.

Il fine delle prove è stato quello di creare un confronto tra i dati ottenuti in modo tradizionale e i dati ottenuti per via acustica, confrontando il diverso modo di vibrare di ogni punto difettato e dei punti non difettati.

Lo scopo generale dell'attività è quello di capire se e come è possibile determinare e monitorare lo stato di salute di affreschi antichi mediante strumenti che non ne richiedono l'accesso diretto.

2 Tecniche non distruttive per la diagnosi di affreschi antichi

2.1 L'affresco

L'affresco è la più diffusa tecnica di pittura su muro.

La sua applicazione ha conosciuto poche varianti nei secoli ed è rimasta nella sostanza inalterata fino ad oggi. La caratteristica principale dell'affresco è la resistenza della superficie pittorica, che non richiede alcuna vernice protettiva. La tecnica prevede, infatti, una completa integrazione del colore nella struttura cristallina del supporto su cui è applicato.

2.1.1 Caratteristiche fisico-chimiche

Un affresco è generalmente formato da due o più strati di intonaco stesi su di un muro; la struttura è circa la medesima sempre, anche se sono possibili piccole variazioni che dipendono dall'artista.

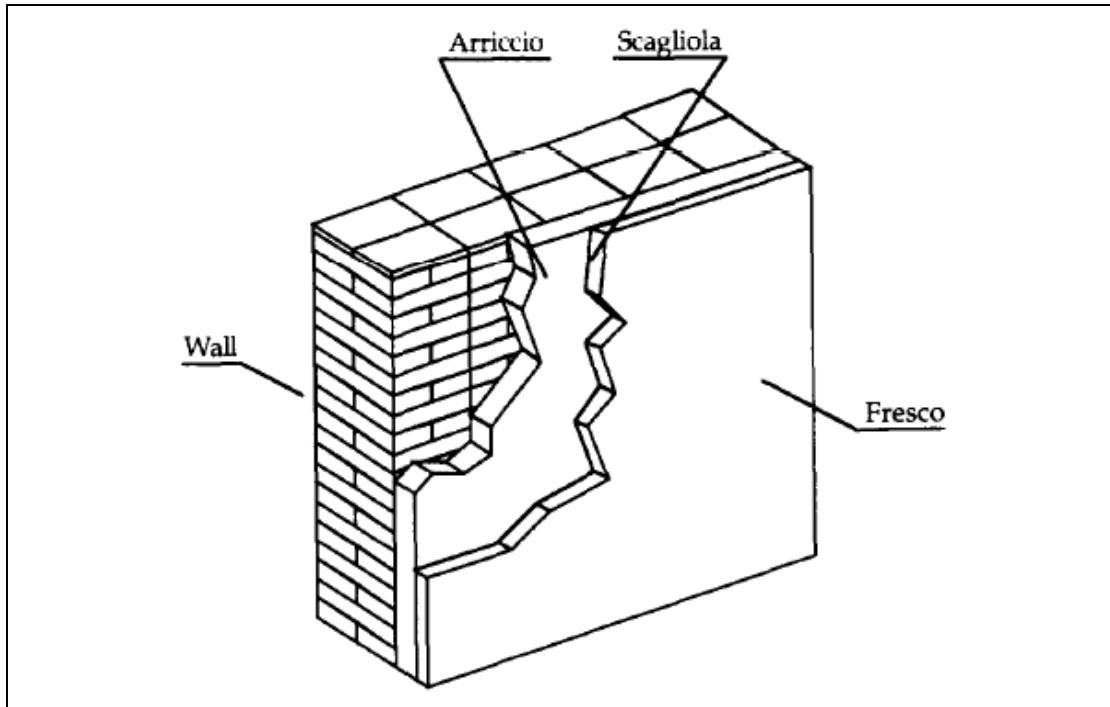


Figura 2-1 La struttura a strati di un affresco [3.]

La prima fase di un intervento di decorazione ad affresco prevede la stesura, sul muro ben lisciato, di uno strato alquanto spesso di un impasto relativamente grossolano di calce e sabbia, detto arriccia, con lo scopo di preparare una superficie uniforme.

Al di sopra dell'arriccia si appone un più sottile intonaco, formato da sabbia e calce, che prende il nome di scagliola. Sopra tale intonaco ancora umido si procede alla stesura del colore.

La calce preparata secondo il metodo tradizionale consiste in frammenti di pietra (carbonato di calcio), cotti in forno a carbone (calce viva).

Mescolata ad acqua e lasciata riposare per almeno sei mesi, la calce viva si trasforma in calce spenta, idrossido di calcio. Stesa sull'arriccia e ricoperta dallo strato di colore, la calce spenta, grazie all'azione dell'anidride carbonica presente nell'aria, torna a trasformarsi in carbonato di calcio e dunque in un composto minerale stabile e resistente, una vera e propria pietra.

La calce spenta $\text{Ca}(\text{OH})_2$ si combina con l'anidride carbonica dell'aria (CO_2) e riforma il carbonato di calcio (CaCO_3) secondo la reazione chimica [4.]:

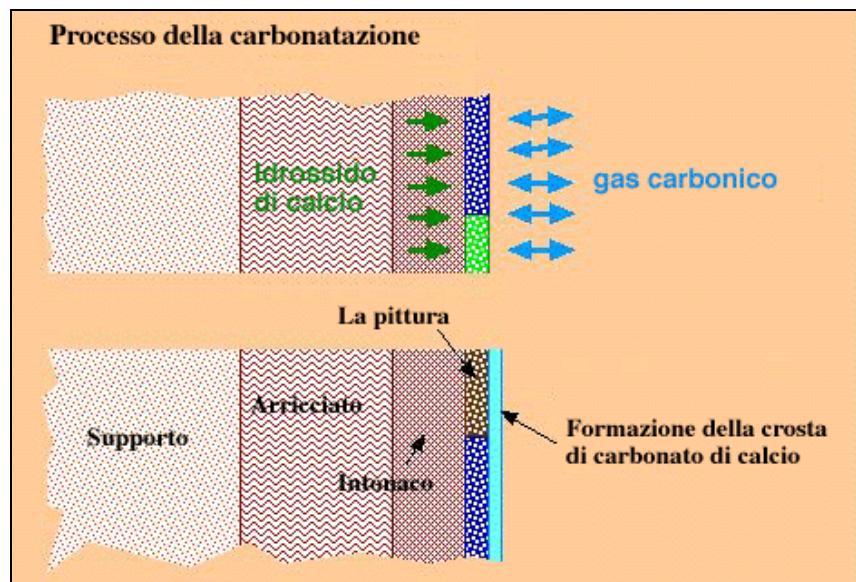
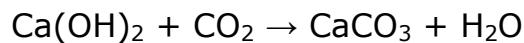


Figura 2-2 Formazione del carbonato di calcio

L'affresco quindi si presta bene alle caratteristiche dell'arte religiosa che propone ampie superfici da decorare, dal romanico fino a diciannovesimo secolo.

Occorre inoltre evidenziare che la tecnica dell'affresco impone tempi di esecuzione assai stretti, poiché il colore va steso rapidamente finché lo strato di intonaco è umido.

2.1.2 Danneggiamenti negli affreschi

Gli affreschi, in quanto dipinti murali, risentono di particolari fattori ambientali e inquinanti. I principali fattori ambientali che incidono sullo stato di conservazione sono l'umidità, i sali solubili, le escursioni termiche, le vibrazioni e gli agenti biologici. I principali inquinanti sono H₂O, gas acidi (prevalentemente SO_x), CO₂, materiale particellare ed idrocarburi pesanti.

I danni che entrambi i fattori possono provocare sugli affreschi possono essere superficiali (erosione, colorimento o sporcamento) o interni.

Oggetto di questo studio sono solo i danni interni per l'affresco, tra i quali i più rilevanti sono la delaminazione e/o il distacco degli strati di cui è composto.

Tipicamente, vi è un difetto localizzato iniziale che causa il non perfetto contatto tra gli strati.

Progressivamente, a causa dell'aria e dell'umidità che sono intrappolati nelle cavità creata dalla mancanza di aderenza, la regione delaminata propaga. L'affresco può subire danni enormi, fino alla vera e propria separazione fisica di uno strato rispetto all'altro o di alcune parti di esso.

Anche se non avviene il distacco, la delaminazione produce in ogni caso delle cavità che possono danneggiare l'estetica dell'affresco e la perdita di un'opera d'arte.

Sono riportati nelle figure seguenti alcuni affreschi dove si può vedere chiaramente il distacco degli strati d'intonaco.



Figura 2-3 **Madonna Della Scala**, Antonio Allegri detto il Correggio, 1522-23,
Parma, Galleria Nazionale



Figura 2-4 **Creazione degli animali, Creazione di Adamo, Creazione di Eva e Peccato originale**, Paolo Uccello, 1425, Firenze, Santa Maria Novella



Figura 2-5 **Battesimo di Cristo e Natività**, Maestro del 1388, XIV sec,
San Giorgio in Lemine

Per molte opere d'arte, la giusta conservazione è ottenuta dal controllo delle condizioni ambientali. Ciò è possibile per esempio per le opere d'arte contenute nei musei, ma non per gli affreschi. Questi non possono essere rimossi dal muro su cui sono stati dipinti e spesso non è possibile controllarne le condizioni ambientali.

Una considerazione importante è che gli affreschi generalmente si trovano in posti di difficile accesso, come muri o cupole, generalmente di grandi dimensioni. Inoltre, poiché i luoghi in cui si trovano hanno rilevanza religiosa e culturale e presentano alti flussi di visitatori, la tecnica di monitoraggio deve non ostacolare il normale uso dell'edificio. Diventa quindi di fondamentale importanza ridurre il più possibile l'intrusività del sistema di misura sull'affresco, evitando se possibile installare dei sensori sulla superficie. A questo si adattano molto bene gli strumenti ottici.

2.2 Le tecniche di monitoraggio più diffuse

Le tecniche d'indagine non distruttive sono numerose. Di seguito sono elencate le più diffuse che, insieme alla vibrometria, nell'ambito della diagnostica fisica, sono anche non invasive [5.].

2.2.1 Impact Test

La tecnica di monitoraggio comunemente usata è l'*Impact test*: il restauratore batte con le nocche delle dita (o con un piccolo martello) sulla superficie del muro e ascolta il suono prodotto dal corpo. Il restauratore può distinguere differenze nel suono prodotto e accorgersi quando è presente un distacco.

Questo metodo presenta grossi limiti. Innanzitutto fa riferimento esclusivamente all'esperienza e all'abilità del restauratore, non fornendo risultati quantitativi. E' un metodo soggettivo e non ripetibile, fornisce un'indicazione istantanea dello stato di salute dell'affresco e quindi di non è idoneo per monitorare eventuali difetti nel tempo; necessita inoltre di tempi lunghi.

Un ulteriore svantaggio di questo metodo è legato al fatto che la misura è intrusiva e richiede l'accesso fisico di un operatore in tutti i punti in cui è necessario effettuare l'analisi. Questo inoltre implica l'impiego di impalcature che ostacolano il normale utilizzo dell'edificio in cui l'opera d'arte è conservata.

2.2.2 Radiografia

Per opere d'arte più piccole, è possibile ricorrere a mezzi standardizzati d'indagine, quali ad esempio i raggi X, che presentano tuttavia altre limitazioni, quali la necessità di spostare l'opera dalla sua sede abituale e la non generale applicabilità.

Quando i raggi X o Y (onde elettromagnetiche ad alta energia) attraversano un oggetto, vengono assorbiti in funzione dello spessore e della densità della materia attraversata. La presenza di un'anomalia di densità all'interno dell'oggetto è evidenziata dalla variazione di attenuazione di tali radiazioni. Il metodo è in grado di rilevare difetti di tipo volumetrico (vuoti, inclusioni) o planare (cricche). Scegliendo opportunamente l'energia, è possibile ispezionare quasi tutti i materiali: i campi di applicazione risultano, pertanto, molto ampi.

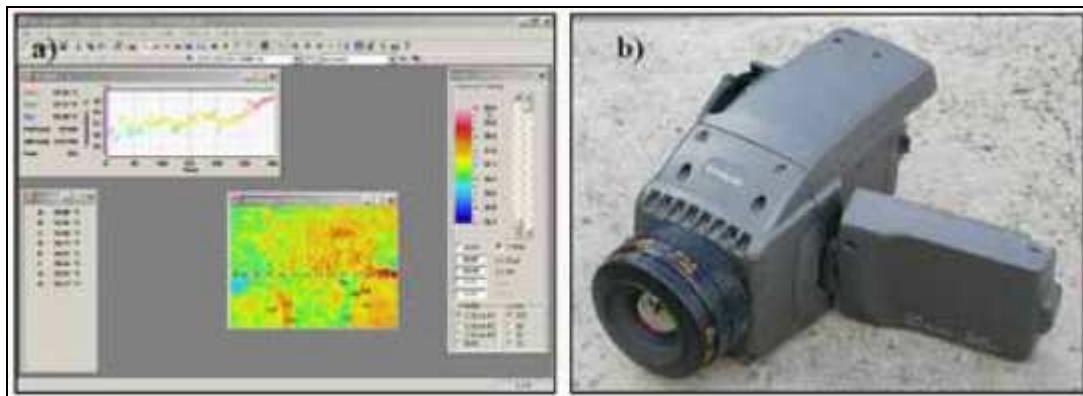
2.2.3 Termografia

Il metodo si basa sul rilevamento delle onde elettromagnetiche nella banda dell'infrarosso emesse dai corpi in funzione della loro temperatura. Il test consiste nella misura della distribuzione superficiale di temperatura di un materiale a seguito di una sollecitazione di origine termica. Eventuali anomalie presenti in tale distribuzione sono indice di un possibile difetto. È in grado di rilevare anomalie strutturali e funzionali di materiali, componenti e strutture complesse. Può essere utilizzato su qualunque tipo di materiale con qualche difficoltà per i buoni conduttori.



Figura 2-6 Sistema radiante per sollecitazione termica [6.]

La sollecitazione termica è studiata in modo da non apportare un livello troppo elevato di calore sull'oggetto per non comprometterne lo stato di conservazione e progettata in modo tale da ottenere un'area irraggiata in cui il flusso termico è uniforme.



**Figura 2-7 a) Esempio di termogramma in fase di elaborazione
b) Telecamera AVIO TVS-600 [6.]**

Nonostante tempi di indagine ridotti, consente di identificare la presenza di differenti materiali e di eventuali disomogeneità (tamponeature, distacco di intonaci, presenza di impianti, presenza e diffusione umidità).

2.2.4 Ultrasuoni

Il metodo è basato sui fenomeni della riflessione e diffrazione che un'onda acustica ultrasonora subisce quando, viaggiando all'interno di un materiale, incontra un ostacolo alla sua propagazione. Consente di rilevare difetti anche profondi sia di tipo volumetrico (inclusioni e bolle) che planare (cricche e delaminazioni).



Figura 2-8 Sistema C-SCAN ad ultrasuoni del Centro Ricerche ENEA di Brindisi [5.]

2.2.5 Interferometria

Controllo basato sul fenomeno di interferenza ottica che si verifica sovrapponendo due immagini di un oggetto illuminato da una sorgente monocromatica e coerente (luce laser), la cui superficie si deforma impercettibilmente, nella direzione di osservazione, quando gli viene imposta una sollecitazione. Consente di rilevare anomalie strutturali e funzionali di materiali e componenti. Può essere utilizzato su qualunque tipo di materiale.

2.2.6 Prospettiva Radar

Metodologia di indagine geofisica applicabile a qualsiasi mezzo denso a bassa conducibilità (in particolare a sottosuolo, manufatti, strutture murarie ecc.), che consente l'acquisizione di informazioni della struttura interna del mezzo indagato. Il radar è un'apparecchiatura ricetrasmettente in grado di inviare impulsi elettromagnetici e di ricevere l'eco riflesso dalle superfici di discontinuità di materiali a differente caratteristica dielettrica presenti

all'interno del mezzo indagato (stratificazioni di materiali, fratturazioni, cavità, delaminazioni).

Particolari caratteristiche distintive della metodologia sono velocità di esecuzione, elevata probabilità di rilevazione degli oggetti nascosti, elevata risoluzione e precisione di localizzazione.

2.3 Vibrometria Laser Doppler

La vibrometria laser è una tecnica innovativa che permette di rilevare la velocità di vibrazione degli elementi esaminati senza prevederne il contatto; consente di pervenire ad una caratterizzazione qualitativa e quantitativa di rivestimenti superficiali e strutture murarie.

2.3.1 Il Vibrometro Laser Doppler

Fin dall'avvento del laser negli anni sessanta, la metrologia ottica ha fornito tecniche preziose per la misura di grandezze meccaniche, specialmente nei casi in cui sono richiesti trasduttori senza contatto. I vantaggi maggiori di queste tecniche risiedono nella già indicata assenza di contatto tra trasduttore e misurando, nell'estrema sensibilità degli strumenti, nella capacità di acquisire informazioni nei domini dello spazio, del tempo e della frequenza in maniera molto dettagliata.

Quando si parla di misura di vibrazioni, uno strumento ottico molto potente è il Laser Doppler Vibrometer (LDV), che può misurare accuratamente velocità puntuali per mezzo di tecniche interferometriche.

Come già menzionato, l'idea alla base del Laser Doppler Vibrometer è la sostituzione dei sensi dell'uomo con un sistema di misura in grado di acquisire informazioni ed eventualmente di elaborarle. A questo strumento occorre generalmente associarne un altro in grado di eccitare la struttura: attuatori acustici, piezoelettrici o meccanici che fanno vibrare le superfici.

Il LDV è in grado di studiare il modo in cui esse vibrano e di tracciare mappe 2D o 3D. Il principio alla base di questa tecnica d'analisi è che una determinata area di un affresco in cui sia presente un difetto vibra "a una velocità maggiore" delle aree circonstanti.

La tecnica LDV permette di ottenere informazioni quantitative sul difetto e sulla sua evoluzione temporale, può essere inoltre applicata anche a strutture massive come torri o chiese.

Il Laser Doppler Vibrometer (o Scanning Laser Doppler Vibrometer (SLDV)) è stato utilizzato per il monitoraggio dello stato di salute di molte opere artistiche, come quadri, affreschi, mosaici, ceramiche o sculture.

Questo metodo presenta i requisiti citati nell'introduzione [2.]:

- Assoluta non intrusività;
- Misure remote;
- Banda di risposta estesa;
- Alta sensibilità;
- Registrazione digitale dei dati;
- Portabilità.



Figura 2-9 Il vibrometro laser Doppler a scansione

Generalmente tutti questi sistemi sono controllati da PC e permettono di ottenere dati digitali che possono essere trasferiti in altre applicazioni.

Sono presenti inoltre alcuni svantaggi. Innanzi tutto il sistema di misura deve essere completamente isolato dalle vibrazioni del terreno, che possono nascere per molte ragioni, basta pensare a una strada circostante. Queste sono una fonte di inquinamento dei risultati. Un altro problema non trascurabile è che questo metodo è applicabile a grandi strutture e necessita di una distanza tra strumento e oggetto di almeno 10-15 m.

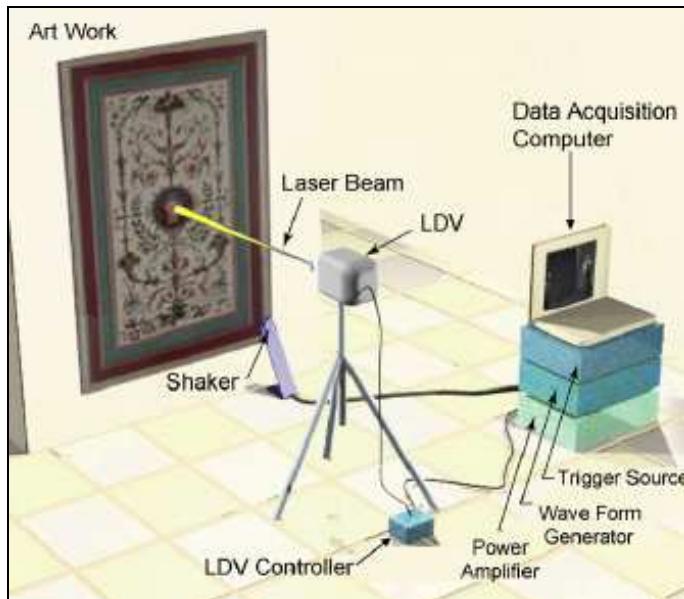


Figura 2-10 Schema di un esperimento con LDV per l'analisi non distruttiva di un affresco [7.]

2.3.2 Funzionamento

Questo strumento usa l'effetto Doppler per acquisire a distanza la velocità di vibrazione. L'effetto Doppler, o spostamento Doppler della frequenza, è dovuto al moto relativo della sorgente e dell'osservatore: quando la sorgente di un'onda e un osservatore sono in moto relativo, c'è una differenza tra la frequenza emessa dalla sorgente e la frequenza ricevuta dall'osservatore.

Le vibrazioni superficiali inducono lo spostamento Doppler della frequenza (*Doppler frequency shift*) sul raggio laser incidente, questo *shift* è connesso linearmente alla componente della velocità nella direzione del raggio.

Uno schema caratteristico di interferometro è quello di Mach-Zender come mostrato in figura.

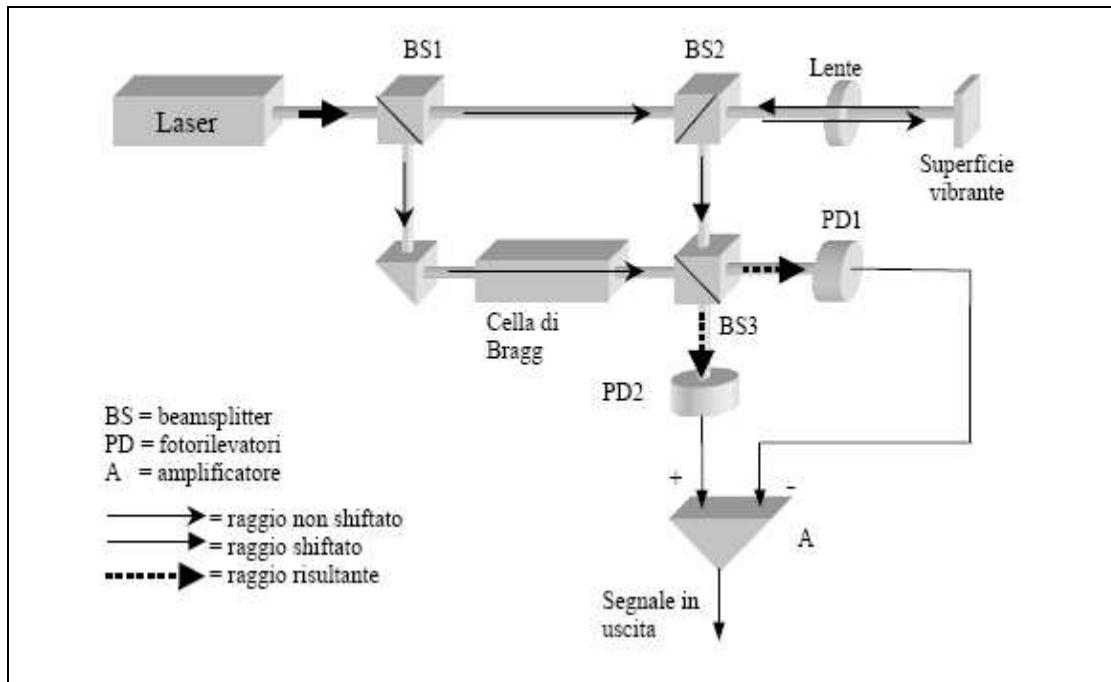


Figura 2-11 Schema di un vibrometro [8.]

Un ostacolo è il fatto che lo spostamento Doppler generalmente è molto minore della frequenza fondamentale del laser, circa 0.92%. Per superare questo problema si fa ricorso all'interferometria.

La luce del laser viene divisa in un "raggio di riferimento" e un "raggio di misura" da un divisore di fascio (*Beam Splitter 1* (BS1)). Quest'ultimo passa attraverso un altro separatore (BS3) e viene concentrato da una lente sulla superficie vibrante. Il raggio riflesso torna in BS3 che lo devia in BS2. In BS2 il raggio riflesso interferisce con il "raggio di riferimento".

L'intensità risultante dalla combinazione dei due raggi varia sinusoidalmente con la differenza di fase dei due raggi che può essere costante o meno a seconda che l'oggetto sia fermo o vibri a velocità v .

Nel primo caso la differenza di fase è costante e determinata unicamente dal cammino ottico L percorso dalla luce tra la superficie e il beamsplitter BS2. Se invece la superficie si muove, la differenza di fase diventa tempo variante e in questo secondo caso è possibile esprimere la fase come prodotto di una pulsazione variabile nel tempo (frequenza istantanea) per il tempo stesso; il valore di questa frequenza è pari al valore dello spostamento in frequenza (effetto Doppler) dovuto a v . Come è infatti ben noto qualunque onda riflessa da una superficie in movimento subisce uno *shift Doppler* f_D della propria frequenza proporzionale alla velocità della superficie (v) e alla lunghezza d'onda (λ) della radiazione:

$$f_D \propto 2v/\lambda$$

Generalmente i vibrometri utilizzano He-Ne lasers e il *doppler frequency shift* f_D risulta circa 3.16 kHz ogni mm/s.

I segnali ottici vengono poi convertiti in segnali elettrici dai *photo detectors* PD1 e PD2. Il segnale risultante in uscita dall'amplificatore operazionale è:

$$s(t) \propto A^2 \cos(2f_D t)$$

dove A è l'ampiezza del raggio laser.

Gli ultimi componenti necessari sono un fotodiodo (o una coppia) e un demodulatore FM che estrae dal segnale Doppler il valore di v come una tensione analogica. Per determinare anche la direzione del vettore velocità istantanea si possono utilizzare celle di Bragg (come mostrato in figura) o una manipolazione elettronica dei raggi ricombinati. In ambedue i casi, questi dispositivi introducono uno *shift* in frequenza in uno dei rami dell'interferometro o nel segnale del fotodiodo e permettono di riconoscere il verso attraverso la sovrapposizione di un vettore 'virtuale' di velocità.

Tutti i sistemi SLDS sono gestiti da un PC, per cui i risultati sono forniti in vari formati digitali (immagini BMP o JPG, file UFF, TXT, filmati AVI) facilmente trasferibili a pacchetti software esterni di *post processing* o analisi dei dati.

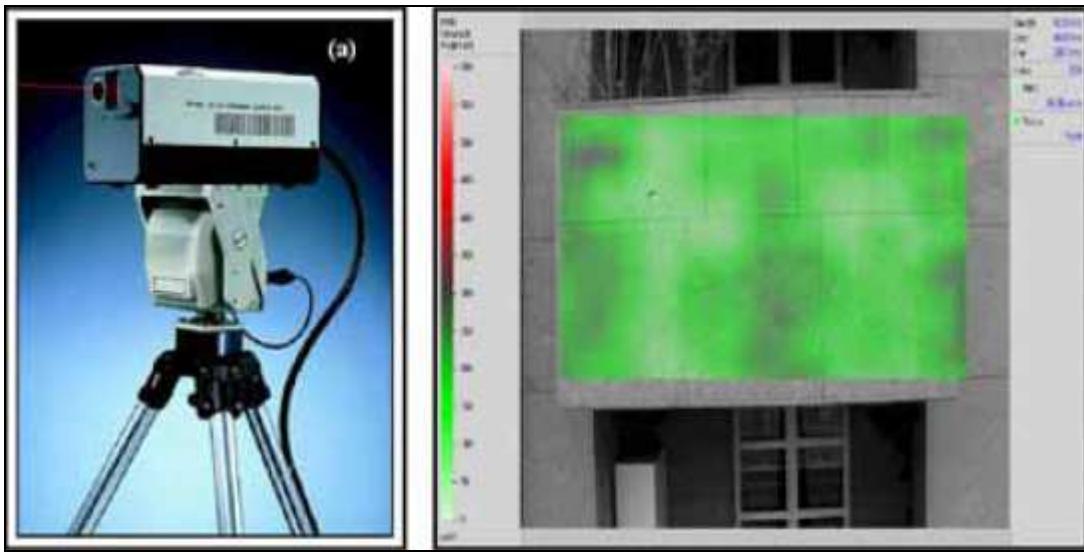


Figura 2-12 Testa ottica di un vibrometro commerciale e mappa di vibrazione misurata [6.]

2.3.3 Caratteristiche

Lo Scanning Laser Doppler Vibrometer può eseguire velocemente una serie di misure di velocità senza contatto su una griglia di punti della struttura sotto test: i moderni SLDV possono esplorare fino a 100 punti al secondo, per un numero totale di punti superiore ai 100.000.

Nella maggior parte dei casi il *range* di velocità di un SLDV è di 10 m/s, con un limite superiore di frequenza di 200 kHz. La risoluzione è dell'ordine del $\mu\text{m}/\text{s}$ e la potenza del raggio laser del decimo di mW.

Una potenza così ridotta garantisce la non intrusività dello strumento di misura, preservando l'oggetto da eventuali danneggiamenti, e non arreca pericolo per l'ambiente circostante, quindi non richiede misure di sicurezza.

Le caratteristiche elencate, insieme a quella di permettere misure senza contatto, rendono la vibrometria laser Doppler a scansione una tecnologia indicata per situazioni in cui l'uso di sistemi a con-

tatto, ad es. gli accelerometri, non è possibile o è comunque sconsigliato, come nel caso di strutture ad alta temperatura, strutture non raggiungibili da operatore umano, strutture leggere o mobili, sulle quali in generale non sia possibile applicare sensori, proprio come nel caso del monitoraggio dello stato di salute di beni culturali.

In tutti questi casi l'impiego di accelerometri può inficiare l'accuratezza delle misure per l'effetto di massa aggiunta o addirittura danneggiare in modo più o meno importante la struttura stessa. Inoltre, se il numero di punti su cui devono essere eseguite le misure è grande, sarebbe necessario posizionare sulla struttura un numero equivalente di trasduttori, un'operazione sicuramente lunga e costosa.

Generalmente il segnale laser deve passare attraverso un filtro passa-alto a causa della presenza quasi ovunque di vibrazioni a bassa frequenza, come per esempio quelle generate da una strada trafficata. In molti casi filtrare i segnali disturbanti risulta particolarmente impegnativo, per cui si ricorre all'isolamento acustico dell'area di lavoro.

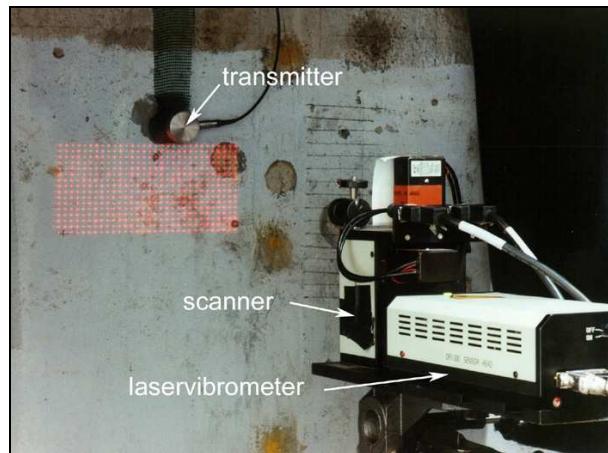


Figura 2-13 Un sistema SLDV

2.3.4 L'eccitazione strutturale

La sollecitazione della struttura viene solitamente eseguita per via aerea tramite onde sonore emesse da sistemi di altoparlanti o a contatto utilizzando eccitatori piezoelettrici, agitatori (o *shakers*, che possono essere meccanici, idraulici o elettrodinamici) o *impact hammers*.

Nel primo caso si configura un sistema di misura completamente non invasivo, per cui si riescono a misurare oggetti posti a diversi metri di distanza dall'operatore, senza la necessità di contatto diretto con l'oggetto. Le onde sonore emesse da un sistema remoto di altoparlanti può indurre vibrazioni in ogni punto dell'affresco, se viene trasmessa sufficiente energia dall'aria al muro. Onde acustiche possono essere prodotte in un ampio spettro di frequenze, così da poter eccitare alla frequenza di risonanza l'area danneggiata dell'affresco. In questo caso la misura della forza eccitatrice o della pressione risulta particolarmente complessa, solo lo spettro della frequenza o l'ampiezza della vibrazione possono essere utilizzate per osservare la presenza di difetti. Per l'eccitazione acustica di strutture massive si ricorre a fonti di un maggiore livello di sollecitazione, come per esempio martelli pneumatici, in quanto facilmente reperibili.



Figura 2-14 Sistemi di altoparlanti

Tra i dispositivi meccanici si trovano vibrodine (attrezzature di eccitazione in grado di erogare forze dinamiche rigorosamente sinusoidali unidirezionali) e manovellismi in grado di eseguire prove di tipo armonico con frequenza regolabile, generando carichi anche molto elevati e garantiscono elevata robustezza con costi limitati. Non sono però in grado di eseguire vibrazioni random e presentano notevoli problemi di regolabilità, dovuti alla limitatissima possibilità di utilizzare il controllo elettronico (il che, peraltro, li rende più semplici, affidabili ed economici).

Esistono, nonostante siano poco diffusi, anche *shaker* idraulici e elettrodinamici. I primi sono costituiti da attuatori idraulici controllati elettronicamente, in grado di esprimere forze molto elevate che consentono un ottimo controllo della legge di moto, ma trovano un limite nel campo di frequenza (generalmente inferiore ai 200 Hz) e nella velocità di punta (generalmente inferiore ad 1.5 m/s). Gli *shaker* elettrodinamici, controllati elettronicamente, rispetto agli idraulici riescono a funzionare su una gamma di frequenza molto più ampia (fino a 2 kHz nelle taglie maggiori, oltre 10 kHz i modelli più piccoli), ma sono più limitati per quanto riguarda la forza esprimibile e la corsa effettuabile.

Operando con eccitatori piezoelettrici, occorre che l'oggetto sia manipolabile, ma la frequenza di lavoro può essere facilmente portata a 1 MHz, con impulsi d'ingresso di entità relativamente elevata. L'ordine di grandezza delle pressioni sviluppate sulla superficie, rispetto a quella apportata da un colpo di nocca, è di circa 1/10000 per la sollecitazione acustica e di circa 1/25 considerando l'eccitatore piezoelettrico.

Gli *impact hammers* hanno una massa che va da pochi grammi a 2 kg ed sono lo strumento più diffuso per la misura della mobilità delle strutture. La forza d'impatto può essere controllata dall'operatore e può essere limitata variando la massa inerziale del martello. Una forte limitazione di questo metodo è dovuto all'applicazione sulla superficie soffice di un affresco. Se la forza eccede una certa intensità questo deforma elasticamente e l'informazione è compromessa. Il vantaggio principale è che fornisce il valore esatto della forza d'impatto e permette di conoscere il livello di energia sufficiente per indurre vibrazioni nel muro, senza causare danni. Un grosso problema è comunque dovuto all'irripetibilità dell'impatto, come intensità e come punto di applicazione e direzione del vettore forza.

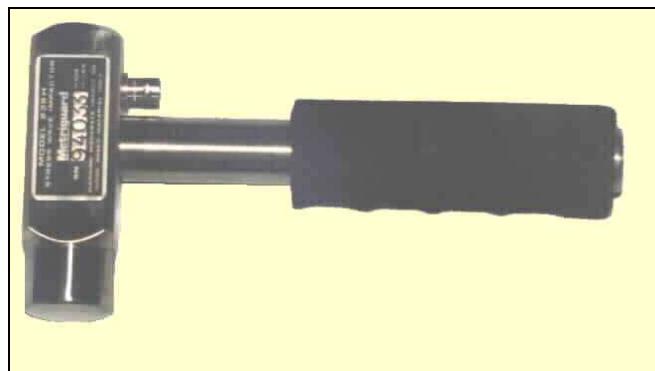


Figura 2-15 Martello strumentato, o *Impact Hammer*

Con questo metodo è possibile identificare i difetti in base alla frequenza contenuta nel suono emesso. Questa procedura permette una valutazione qualitativa dell'impulso *Frequency Response Function*¹ (FRF) sul muro.

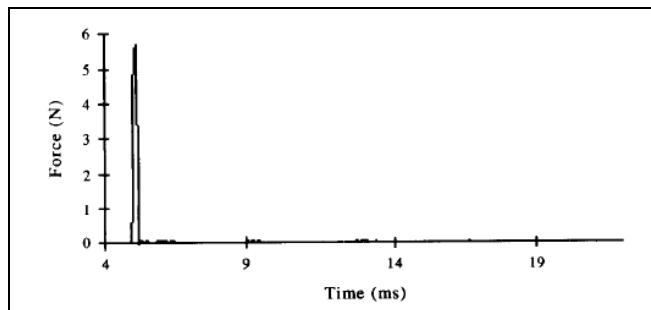


Figura 2-16 Tipico impulso generato da un *impact hammer* [3.]

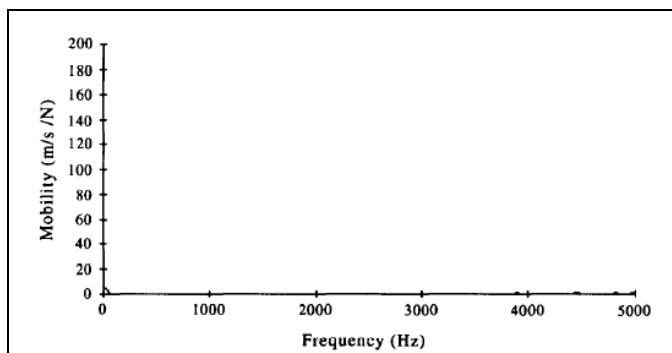


Figura 2-17 Tipico modulo FRF in assenza di difetto [3.]

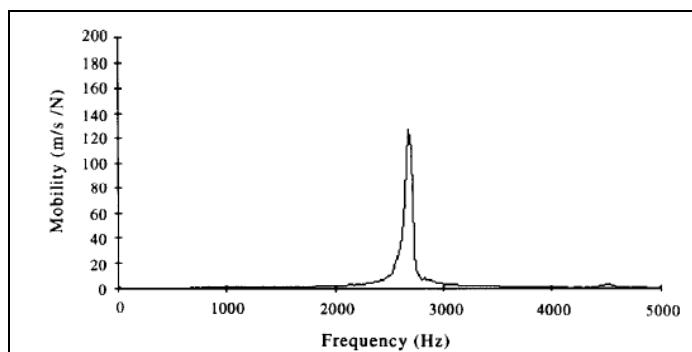


Figura 2-18 Tipico modulo FRF in presenza di difetto [3.]

¹ La Frequency Response Function (spesso indicata con FRF) è una funzione di trasferimento, espresso nel dominio delle frequenze. Generalmente sono funzioni complesse, con parte reale e parte immaginaria. Queste possono inoltre essere rappresentate come ampiezza e fase. Un FRF esprime la risposta strutturale a una forza applicata in funzione della frequenza, questa può essere espressa in termini di spostamento, velocità o accelerazione.

2.3.5 La restituzione dei dati

La restituzione dei dati avviene principalmente tramite mappe a colori riportanti i valori misurati sovrapposti ad un'immagine dell'oggetto esaminato; in questo modo, anche personale non esperto ha un'immediata percezione dello stato di degrado della struttura esaminata.

L'uso del SLDV riguardo il problema dell'analisi strutturale e del monitoraggio di difetti si basa sul principio che è possibile valutare lo stato di salute di un oggetto dall'analisi delle sue vibrazioni. Generalmente si può ottenere un valore medio della velocità di vibrazione superficiale punto per punto con la *RMS (Root Mean Square²) analysis* o ottenere informazioni spettrali di ogni punto analizzato con la *FFT (Fast Fourier Transform³) analysis*.

I file forniti dall'SLDV possono essere interpretati come funzioni in uno spazio tridimensionale. Le prime due dimensioni sono semplicemente le coordinate spaziali, la terza coordinata è la frequenza. Il valore della funzione corrisponde alla velocità in un particolare punto nello spazio tridimensionale.

² In matematica, Root Mean Square, (spesso indicata con RMS), nota anche come Valore Efficace, è una misura statistica di una grandezza variabile. Risulta particolarmente utile quando la grandezza in esame assume valori sia positivi che negativi, come le funzioni seno e coseno. Dati n valori, la il valore RMS si calcola:

$$x_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i^2} = \sqrt{\frac{x_1^2 + x_2^2 + \dots + x_n^2}{n}}$$

³ La trasformata di Fourier veloce (spesso indicata come FFT, dall'inglese Fast Fourier Transform) è un algoritmo ottimizzato per calcolare la trasformata di Fourier discreta (detta DFT) e la sua inversa. La FFT è di grande importanza per una grande varietà di applicazioni, dall'elaborazione di segnali digitali alla soluzione di equazioni differenziali alle derivate parziali agli algoritmi per moltiplicare numeri interi di grandi dimensioni. La trasformata discreta di Fourier (DFT) fornisce, a partire da una sequenza di N valori nel dominio del tempo, $x(k)$, una ulteriore sequenza di N valori, $X(n)$, rappresentanti i campioni della trasformata di Fourier della sequenza di partenza. Se la sequenza di valori $x(n)$ è ricavata a partire da un segnale analogico $x(t)$, sottoposto ad un processo di campionamento, il risultato della DFT sono nient'altro che i campioni della trasformata di Fourier $X(f)$ di tale segnale analogico.

Nell'esempio seguente [7.] sono rappresentati graficamente i dati estratti da un SLDV dal North Lunette Fresco in Speakers Appropriations Committee Room of the Capitol.

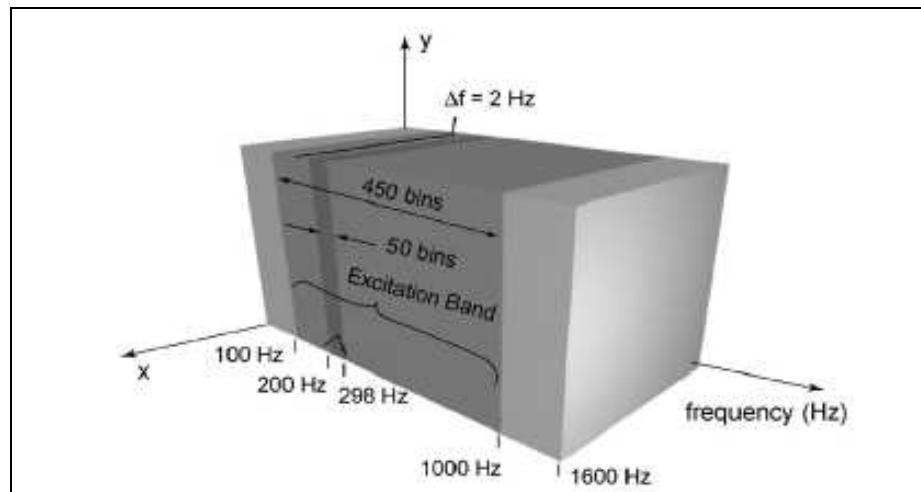


Figura 2-19 Rappresentazione grafica dei dati tridimensionali forniti dal vibrometro laser doppler [7.]



Figura 2-20 Affresco nella lunetta nord, House Appropriations Committee Room [7.]

Nella figura seguente sono rappresentate le risposte di ogni punto eccitato a diverse frequenze. Confrontando tra loro le immagini si può notare come la velocità di alcuni punti è alta in tutto il *range* di frequenze. In questi punti la sottostruttura è stata compromessa.

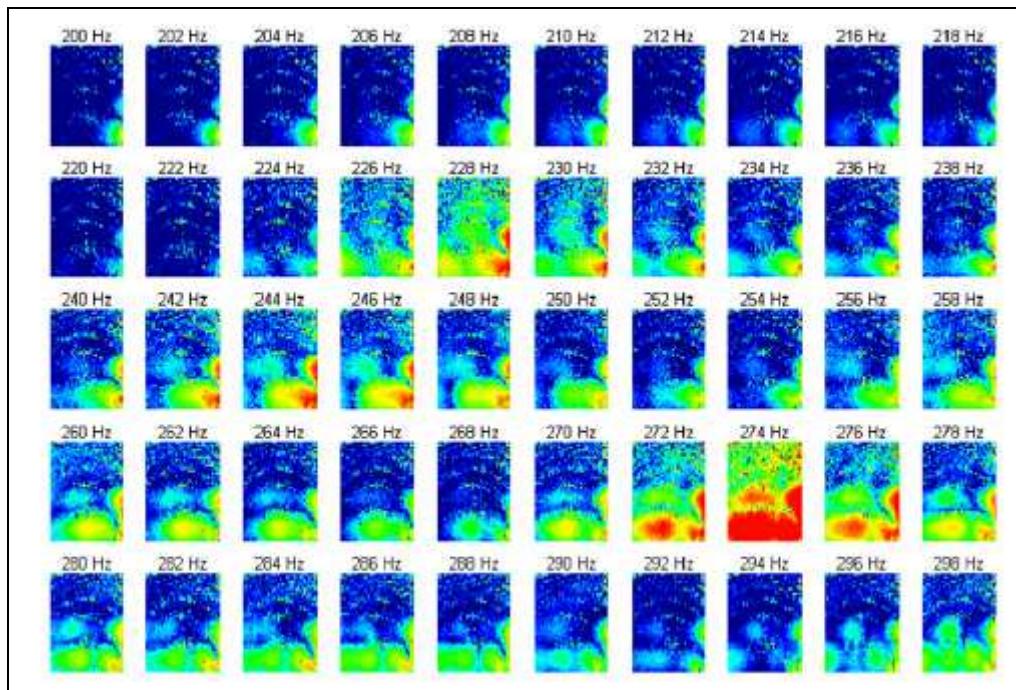


Figura 2-21 Ampiezza della funzione di trasferimento forza-velocità nella regione esaminata in un range di frequenza di 200-298 Hz [7.]

3 Attività sperimentale: convalida della tecnica LDV

3.1 Costruzione pannello di prova

Al fine di investigare sulla possibilità di usare la vibrometria laser per la diagnosi dello stato di salute di affreschi antichi, in particolare per il rilevamento delle delaminazioni, è stato costruito un pannello di prova, simulante la struttura a strati dell'affresco.

Il pannello in esame è costituito da una piastrella di cemento di dimensioni $0,5 \times 0,5 \text{ m}^2$ sulla quale sono stati disposti 9 dischi con geometria, materiale e ubicazione note. L'adesione tra dischi e cemento è garantita interponendo un sottile strato di colla.

Lo scopo è quello di emulare il vuoto che si viene a creare, in seguito al distacco tra gli strati di intonaco o tra l'intonaco e il muro, una volta avvenuta la delaminazione.

Sopra il cemento è stato in seguito disposto uno strato di intonaco spesso 8 mm.

Si è scelto per semplicità di realizzare un pannello a un solo strato.

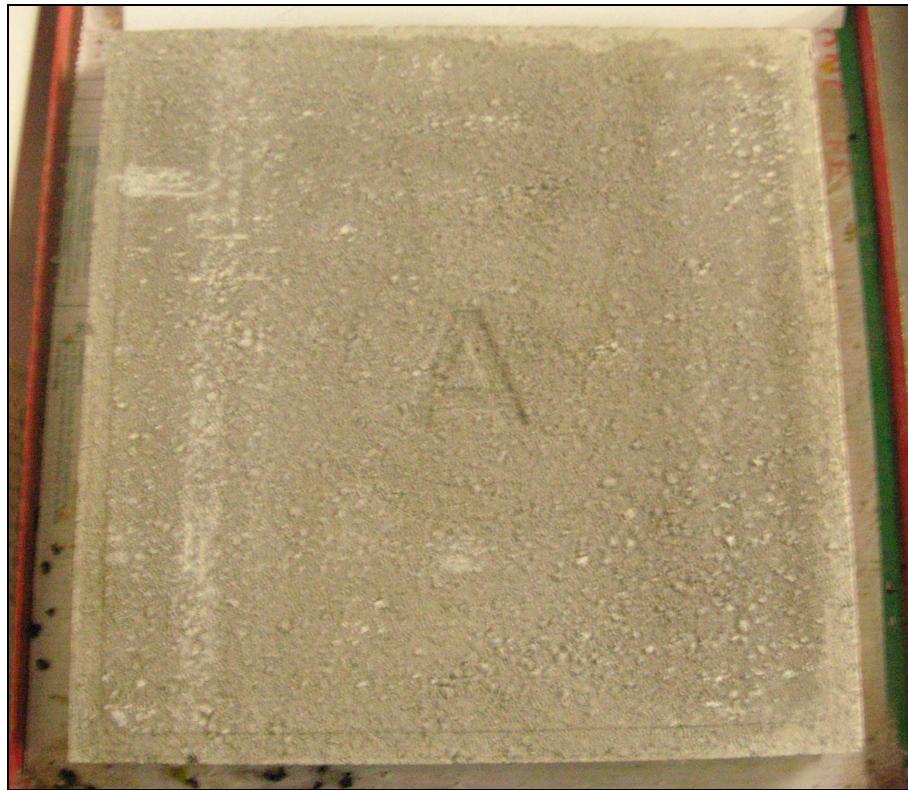


Figura 3-1 La base di cemento

I dischi hanno tutti geometria simile: sono cilindrici, con un diametro di 80 mm e uno spessore variabile tra gli 0,1 mm e i 2,5 mm. Il centro di ogni disco dista 160 mm dal centro di un disco adiacente e 90 mm dal bordo.

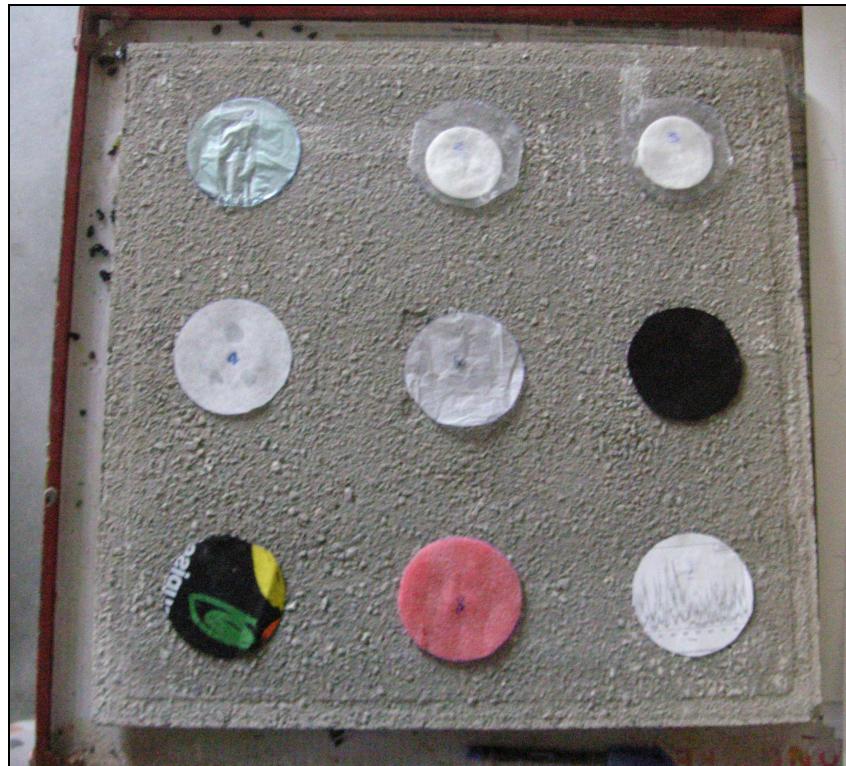


Figura 3-2 L'ubicazione dei dischi

Il pannello è stato suddiviso in una griglia.

A ogni riga è stata assegnata una lettera (A-B-C) e a ogni colonna un numero (1-2-3). Questo per poter conoscere la tipologia del disco al momento della rilevazione dei dati.

In questo modo si potrà sapere se un materiale si presta meglio di un altro all'emulazione del vuoto dovuto alla delaminazione.

Per i materiali si è cercato qualcosa che fosse particolarmente cedevole e che non assorbisse eccessiva acqua, in modo da non alterarne la concentrazione nell'intonaco.

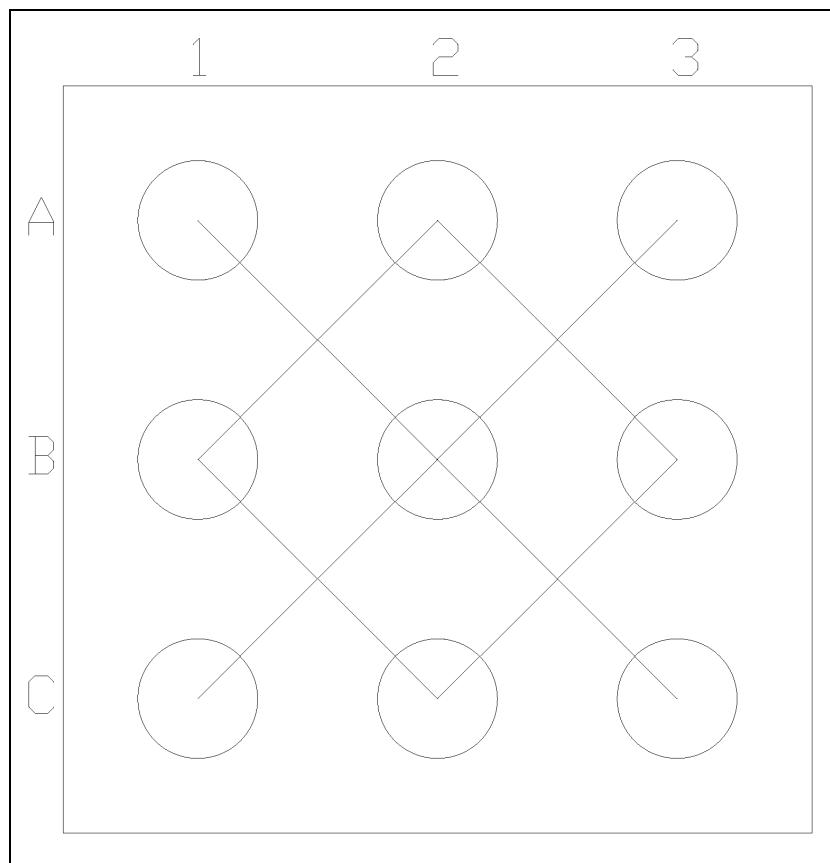


Figura 3-3 La griglia dei dischi

I materiali introdotti nelle varie posizioni della griglia sono rintracciabili nella tabella seguente, nella quale sono indicati anche i relativi spessori:

POSIZIONE	MATERIALE
A-1	Busta da freezer in PE, 2 strati da 0,0125 mm
A-2	Busta di plastica (2 strati da 0,05 mm) + cotone idrofilo = 1,50 mm
A-3	Portacampioni (2 strati da 0,055 mm) + cotone idrofilo = 1,50 mm
B-1	Tessuto non tessuto (Tyvek) 0,20 mm
B-2	Carta velina 0,02 mm
B-3	Feltro 0,75 mm
C-1	Cotone da tessuto 0,22 mm
C-2	Polietilene espanso 2,50 mm
C-3	Carta da disegno 0,10 mm

Una volta che la colla si è asciugata si è provveduto ad inumidire fino a saturazione il cemento. Questo assorbe molta acqua, che diffonde all'interno del materiale abbastanza velocemente. Applicare l'intonaco sul cemento asciutto significa alterare la concentrazione d'acqua negli strati interni dell'intonaco stesso, causandone una maggiore fragilità e sgretolabilità.

Il passo successivo è la scelta della calce. Si è preferito utilizzare un premiscelato industriale piuttosto che realizzare la malta con sabbia e calce, questo per motivi di tempo, di precisione di esecuzione e di economicità, essendo il costo del premiscelato circa uguale alla somma dei costi di calce e sabbia.

Si è scelta una malta che non contenesse cemento, in quanto queste hanno tempi di asciugatura notevolmente minori.

L'intonaco è stato realizzato con 5 kg di Calce e circa 1 litro d'acqua, mescolati lentamente fino ad avere una miscela sufficientemente omogenea.

Il premiscelato scelto è stato Biocalce®, tutte le caratteristiche sono esposte nella scheda tecnica in appendice.



Figura 3-4 Il pannello dopo la stesura dell'intonaco

Durante la stesura si è cercato di mantenere lo stato superficiale il più omogeneo possibile, per fare questo si è fatto ricorso a strumenti come cazzuola e frattazzo. Una superficie troppo corrugata e ricca di imperfezioni potrebbe alterare la lettura del laser. Per facilitare la lettura dei dati si provvede poi a lisciare con carta vetrata i punti dove sarà eseguita la lettura.

Nessun colore è stato aggiunto alla superficie, quindi il muro appare di colore grigio. In questo esperimento si è deciso infatti di ignorare il colore superficiale, che non dovrebbe alterare le misurazioni effettuate degli strumenti ottici [3.].

3.2 Allestimento Set-Up

Prima di procedere alle prove sperimentali è stato necessario allestire un set-up in grado di vincolare la struttura e mantenerla più rigida possibile durante le prove. Per rendere minima l'influenza del vincolo sul modo di vibrare del pannello si è cercato di creare un vincolo il più possibile uniforme sul perimetro della struttura. Se così non fosse, i punti più vicini al vincolo vibrerebbero con una velocità minore rispetto ai punti più lontani.

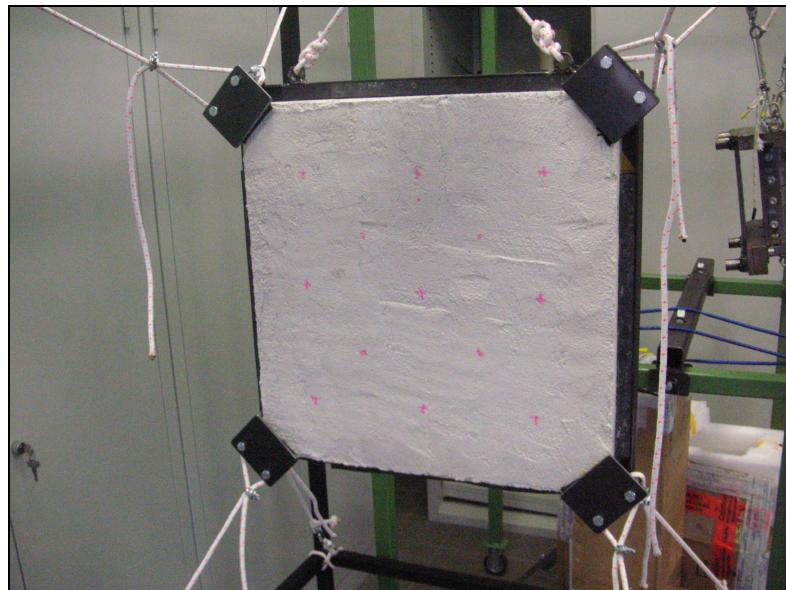


Figura 3-5 Vincolamento della struttura

È stata quindi realizzata una cornice in acciaio nella quale inserire il pannello. Tra pannello e cornice è stato necessario aggiungere uno strato in caucciù, un idrocarburo polimero ottenuto naturalmente dall'estrazione di alcune piante, al fine di smorzare vibrazioni della struttura.

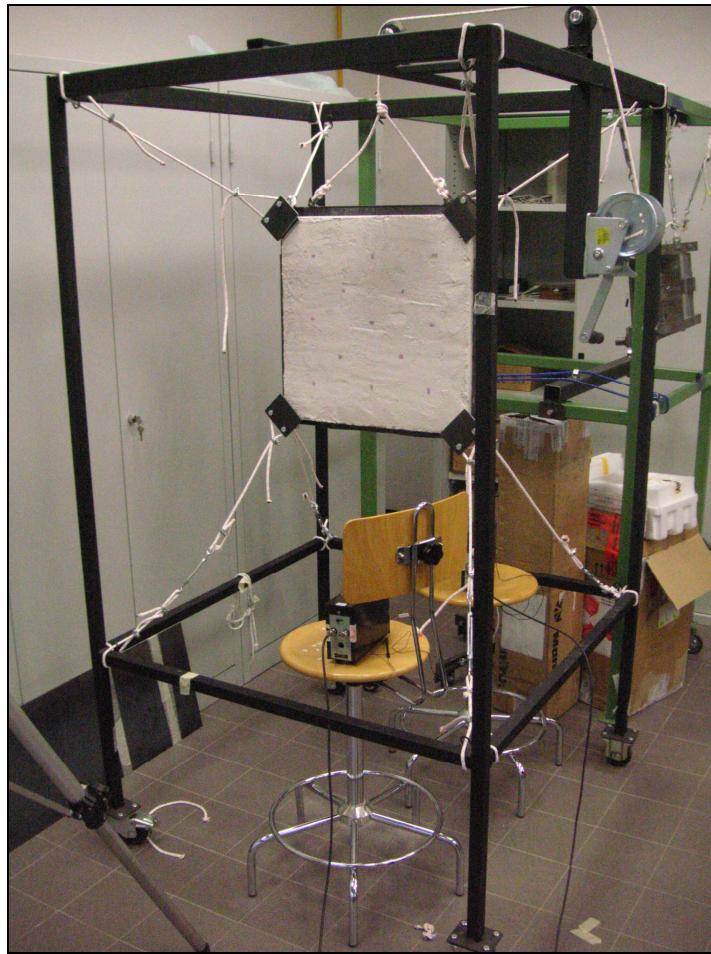


Figura 3-6 Pannello vincolato alla struttura di supporto

La cornice è stata fissata alla struttura di supporto mediante corde e tiranti. Le corde sono state fatte passare per ciascuno degli 8 vertici; ai 4 inferiori sono stati aggiunti dei tiranti per regolare il tiro delle corde.

3.3 Acquisizione del segnale

3.3.1 Aspetti generali

La forzante applicata alla struttura per eccitarla e la conseguente vibrazione di risposta sono, rispettivamente, generate ed acquisite sotto forma di segnali; per questo motivo è necessario utilizzare una funzione di trasferimento che permetta di correlare il segnale in uscita a quello in ingresso. La funzione di trasferimento del sistema che si sta studiando si basa sul campionamento del segnale in ingresso (forza) e quello in uscita (spostamento). Durante il campionamento, il sistema è soggetto a numerosi errori e, per minimizzarli, si ricorre a particolari funzioni capaci di rendere l'analisi sperimentale dei fenomeni vibratori molto precisa.

Se $a(t)$ è un generico segnale misurato in ingresso e $A(f)$ e $A^*(f)$ rispettivamente la sua trasformata nel dominio delle frequenze ed il complesso coniugato, si definiscono:

- "Auto-Power-Spectrum" o "Autospettro"

$$G_{AA}(f) = A^*(f) \cdot A(f)$$

Tale funzione rappresenta l'energia fornita al sistema dal segnale in ingresso in una determinata banda di frequenza.

- "Autocorrelazione"

$$R_{aa}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} a(t) \cdot a(t + \tau) d\tau$$

Essa rappresenta l'antitrasformata della funzione $G_{AA}(f)$ e fornisce informazioni sulla periodicità o meno del segnale in ingresso.

3.3.2 Funzione di risposta in frequenza: FRF

Per un generico sistema lineare tempo invariante (ovvero per il quale vale il principio di sovrapposizione degli effetti e la cui caratteristica non è funzione di t) si definisce "funzione di trasferimento" il rapporto, nel dominio delle frequenze, fra "uscita" e corrispondente "ingresso".

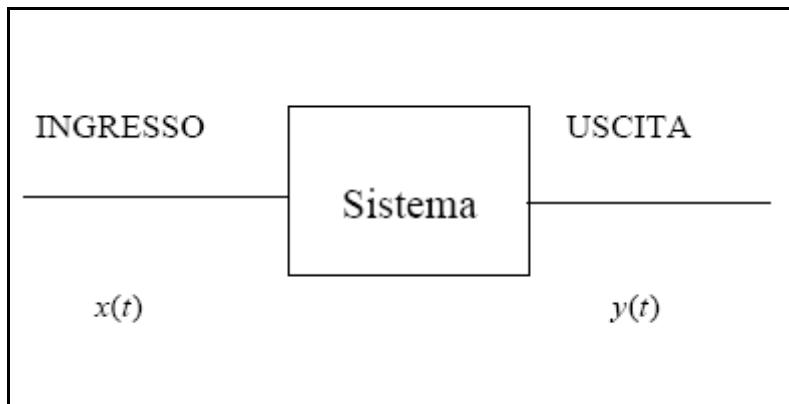


Figura 3-7 Schema a blocchi del sistema

- $x(t)$: funzione in ingresso
- $y(t)$: funzione in uscita

Nel caso dei sistemi vibranti interessa conoscere il rapporto fra un fenomeno vibratorio in uscita ed uno in ingresso; poiché tale rapporto è funzione della frequenza, la corrispondente "funzione di trasferimento" è detta anche, più propriamente, "funzione di risposta in frequenza" (FRF) del sistema:

$$H(f) = FRF = \frac{Y(f)}{X(f)}$$

dove $Y(f)$ e $X(f)$ sono i segnali di uscita ed ingresso rispettivamente, acquisiti nel tempo con medie sincrone e trasformati nel dominio delle frequenze ricorrendo alla “Fast Fourier Transform” (FFT). Sperimentalmente, per minimizzare l’inevitabile presenza di segnali di interferenza, di seguito e comunemente definiti “rumore”, si utilizzano funzioni differenti per il calcolo della FRF, in relazione al fatto che si consideri più significativo il “rumore” non correlato al segnale in uscita, in ingresso o ad entrambi.

Nello specifico si avranno:

$$H_1(f) = \frac{G_{xy}(f)}{G_{xx}(f)}$$

Questa funzione si utilizza qualora si desideri eliminare il rumore non correlato sull’uscita;

$$H_2(f) = \frac{G_{yy}(f)}{G_{yx}(f)}$$

Questa funzione si utilizza qualora si desideri eliminare il rumore non correlato sull’ingresso;

$$H_v(f)$$

Questa funzione si basa su di un algoritmo che utilizza un metodo statistico (principio dell’approssimazione quadratica media) per minimizzare il rumore sia sull’ingresso che sull’uscita.

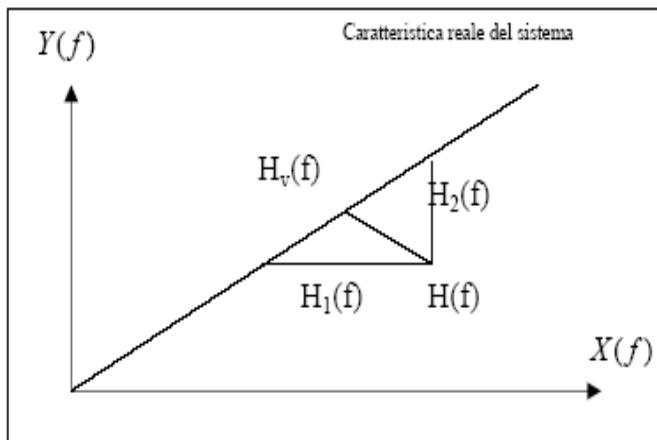


Figura 3-8 Figura 4.4 Principio di calcolo della FRF

Si definisce, infine, "Coerenza", la funzione:

$$\gamma^2 = \frac{|G_{xy}|}{G_{xx} \cdot G_{yy}}, \quad 0 \leq \gamma \leq 1$$

Essa stabilisce l'errore quadratico medio che si commette nell'acquisizione della FRF.

Se tale funzione assume un valore unitario non si è rilevato "rumore" non correlato sulle misurazioni.

La funzione risposta in frequenza è, dunque, un tipo particolare di funzione di trasferimento; essa è di grande interesse nell'analisi sperimentale delle vibrazioni.

Se si è in campo lineare, conoscere la funzione di risposta in frequenza del sistema rispetto ad un ingresso impulsivo, consente di determinare l'uscita per qualunque generico segnale d'ingresso.

Nello studio in oggetto per determinare la risposta in frequenza si considerano due segnali: l'ingresso è rappresentato dalla sollecitazione trasmessa al sistema tramite una forzante di opportuno valore mentre l'uscita è rappresentata dalla vibrazione del sistema,

che viene rilevata misurando la velocità di un punto del sistema tramite un dispositivo Laser.

La conseguente FRF avrà le dimensioni di una velocità diviso una forza, quindi $[(\text{m/s}) / \text{N}]$.

La forzante che costituisce l'ingresso del sistema può venire applicata con diverse tecniche; le più diffuse prevedono una forza sinusoidale a frequenza variabile, applicata con un apposito strumento chiamato eccitatore elettromagnetico o, più comunemente, shaker.

La FRF è una funzione complessa in quanto caratterizzata da un modulo e una fase o, in maniera equivalente, da una parte reale e da una parte immaginaria.

Tale funzione dipende anche dal punto e dalla direzione prescelti per l'ingresso e l'uscita e, per ricavarla, occorre un analizzatore multicanale al quale possono pervenire contemporaneamente i segnali relativi all'ingresso (eccitazione) e all'uscita (risposta del sistema).

In figura si riporta uno schema della successione di operazioni cui vengono sottoposti i segnali disponibili all'uscita grazie ad opportuni sensori; tali segnali sono generalmente continui se considerati nel dominio del tempo.

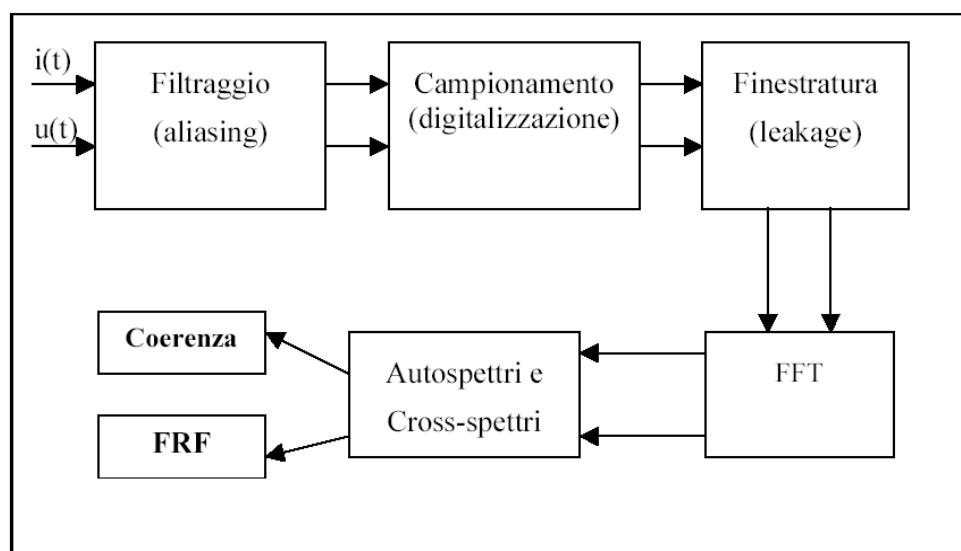


Figura 3-9 Successione di operazioni cui vengono sottoposti i segnali

La FRF può essere rappresentata in vari modi ma il metodo più comune è la rappresentazione tramite modulo e fase.

Nel diagramma del modulo ad ogni frequenza propria della struttura corrisponde un picco più o meno evidenziato a seconda dello smorzamento; nel diagramma della fase si evidenzia la corrispondente variazione (di 180° se lo smorzamento è nullo).

3.3.3 Catena di misura

Lo schema riassuntivo che descrive i principali componenti e strumenti utilizzati per le analisi vibratorie nel loro insieme è mostrato in figura.

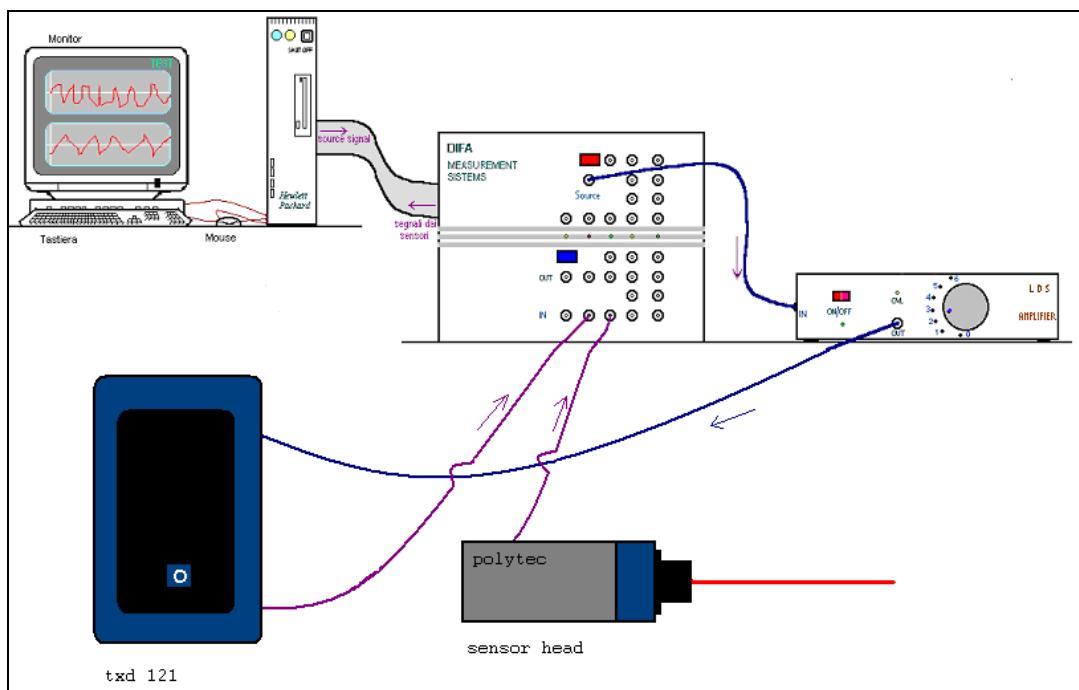


Figura 3-10 Catena di misura

3.4 Dispositivo di interfaccia tra strumentazione e workstation

3.4.1 Front-End

La forzante applicata alla struttura di cui si deve studiare il comportamento vibratorio viene generata attraverso predeterminati segnali in forma numerica (o digitale) in uscita da workstation a tale funzione dedicate; risulta quindi necessario convertirli in segnali analogici in grado di guidare l'amplificatore e quindi gli strumenti di eccitazione. L'operazione inversa (conversione AC/DC) è invece richiesta per poter acquisire ed elaborare al computer i dati provenienti dai sensori.

Si rende in seguito necessaria un'amplificazione di carica, ovvero la trasformazione dei deboli segnali forniti dai trasduttori, in segnali in tensione.

Tutte queste funzioni, nella catena di misura adottata, sono svolte da un apparecchio detto "Front-End", della ditta olandese DIFA Measuring Systems B.V.

Il modello è lo Scadas Q Bundle SC 206/1 Q.

Si tratta di un sistema elettronico di acquisizione dati ad alta velocità, programmabile e ad architettura modulare: esso comprende una struttura di base (mainframe) che può essere personalizzata aggiungendo moduli diversi, come filtri, amplificatori, circuiti a ponte e multiplexers (per l'input), e/o generatori di rumore casuale e di forme d'onda arbitrarie (per l'Output).

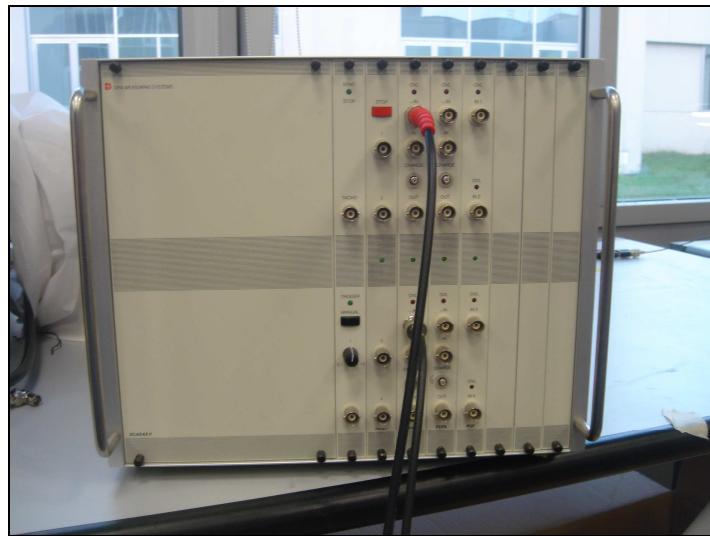


Figura 3-11 Front-End Scadas Q

Il "mainframe" del modello adoperato comprende:

- il microprocessore di controllo "SCADAS II Q";
- sei alloggiamenti per i moduli di input e output, più uno per il modulo di generazione ("QRAN" oppure "QDAC");
- un convertitore A/D a 12 bit e 800 Hz;
- un contatore di clock programmabile a cristalli e circuiti di trigger;
- un buffer (512 kb di memoria) a logica "First In - First Out" (FIFO);
- la presa per l'alimentazione dalla rete elettrica.

Il tutto viene comandato dal software installato sulla workstation, tramite appositi file di configurazione e le interfacce di tipo IEEE-488 e RS-232.

Nell'apparecchio a disposizione sono disponibili solo sei canali per l'input e due per l'output rispettivamente.

3.5 Strumenti per l'eccitazione strutturale e l'acquisizione dei dati

3.5.1 Martello strumentato

Per eccitare il sistema, prima di compiere le prove acustiche, è stato usato un martello strumentato.

Di seguito è riportato il libretto con le specifiche del costruttore relative alla cella di carico impiegata in configurazione di martello strumentato.

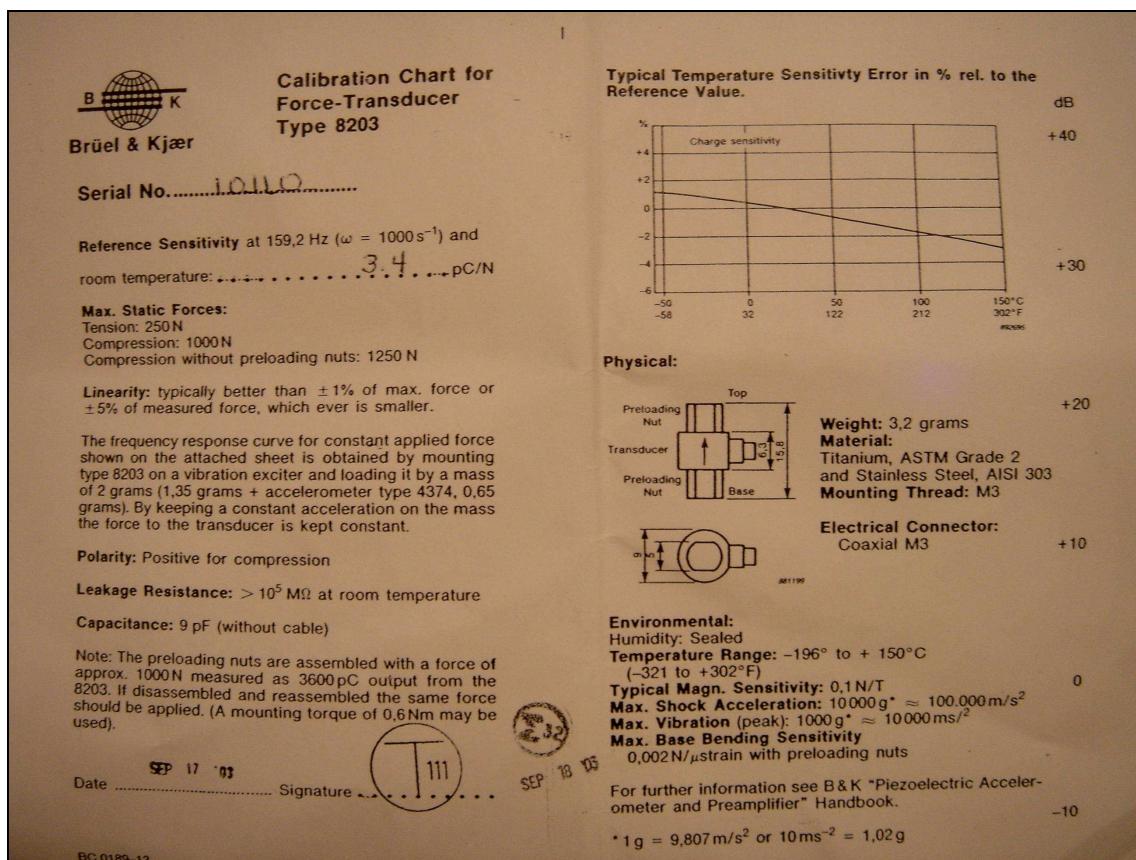


Figura 3-12 Caratteristiche tecniche del martello strumentato

Il martello strumentato risulta composto da una cella di carico Brüel & Kjaer (per la precisione si tratta della Force Transducer/Impact Hammer Type 8203 dell'azienda Brüel & Kjaer), la

quale presenta elevata sensibilità ai carichi bassi. I materiali di cui è composta sono titanio e acciaio e per questo ha un peso minore rispetto agli altri sensori disponibili. Esternamente si presenta come un cilindro alle cui basi sono avvitati alcuni bulloni di precarico con fori filettati, utilizzati nell'alloggiamento degli afferraggi per l'astina eccitatrice. La massa della cella è di 3,2 g con i bulloni di precarico in configurazione shaker e di 1,6 g senza, ovvero in configurazione martello. Il diametro è di 9 mm e l'altezza di 15,8 mm con i due bulloni e di 6,3 mm senza. La sensibilità di riferimento è di $3.4 \frac{pC}{N}$. L'errore di linearità rimane sempre dell'ordine dell'1% sia in eccesso che in difetto.



Figura 3-13 Cella di carico, collegamento filettato e basetta

Lo schema di montaggio della cella di carico con gli altri componenti che formano il martello strumentato è riportata nella figura seguente.

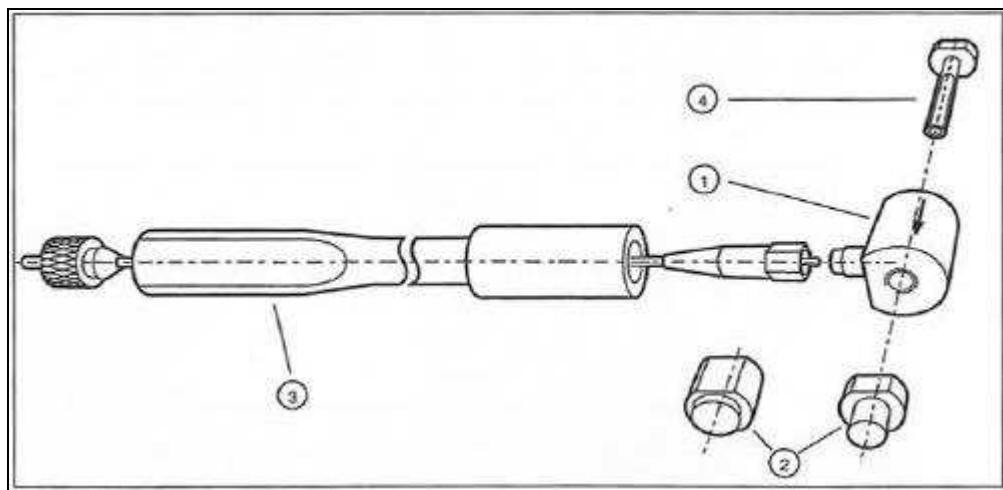


Figura 3-14 Configurazione martello strumentato: 1) cella di carico; 2) testa del martello; 3) impugnatura; 4) vite di fissaggio

3.5.2 Velocimetro Laser Polytec

I Velocimetri Laser Doppler sono sistemi di misura che non necessitano di contatto diretto con l'oggetto di analisi e vengono utilizzati per compiere misure di velocità e spostamento su superfici mobili, come ad esempio lastre di materiali metallici, carta, tessuti.

La misurazione ottica senza contatto permette un'accuratezza molto elevata, viene quindi utilizzata in misurazioni ad alta complessità dove i sensori a contatto non possono essere utilizzati per svariate ragioni.

I Velocimetri Laser per superfici si basano sul principio Laser Doppler, determinando il valore della frequenza del raggio laser riflesso da un oggetto in movimento. La tecnica LDV permette misure su superfici calde, microscopiche o delicate, anche sott'acqua, senza effetti di massa aggiunta.

Gli apparati Polytec utilizzati nello studio, al contrario dei convenzionali metodi senza contatto che misurano solo il valore assoluto della velocità, sono anche in grado di determinare variazioni di direzione nonché condizioni di arresto, il tutto con grande precisione.

ne. Per la misura dell'ampiezza di vibrazione si è impiegato un vibrometro Laser Doppler Polytec, modello OFV-5000.

L'apparecchio utilizzato è costituito da due parti fondamentali:

- Il controller, modello OFV-5000
- La testa-sensore, modello OFV-505



Figura 3-15 Controller OFV-5000

Il controller OFV-5000 rende disponibili in uscita sia la velocità che lo spostamento, a seconda del decoder di cui viene fornito.

Vari settaggi ed opzioni del controller permettono di coprire un campo di ampiezze sino ad una velocità massima di 10 m/s e ad una frequenza di 20 MHz.

La testa-sensore OFV-505 si distingue per l'eccellente sensibilità ottica e per la messa a fuoco automatica e motorizzata del raggio laser; inoltre per semplificare l'utilizzo ogni posizione di fuoco può essere memorizzata per essere eventualmente riutilizzata.



Figura 3-16 Testa - sensore OFV-505 montata sul supporto

Si riportano le principali caratteristiche:

- Facilità d'uso;
- Laser a bassa potenza, visibile, sicuro per gli occhi (classe 2), di grande sensibilità;
- Controllo del fuoco motorizzato, sia manuale agendo direttamente sulla testa, sia in automatico attraverso il pannello di controllo del controller OFV 5000. Vi è inoltre la possibilità di memorizzare la posizione del fuoco;
- controllo automatico del fuoco: il sensore testa può rilevare automaticamente la qualità del segnale di ritorno e di conseguenza aggiustare il fuoco per ottimizzare il segnale (autofocus).

3.5.3 Impianto acustico

L'impianto acustico utilizzato per eccitare la struttura è composto da un amplificatore e una cassa acustica.

L'amplificatore è il modello RMX 2450 prodotto dalla QSC audio.



Figura 3-17 Amplificatore RMX 2450

Le principali caratteristiche sono:

- Potenza in uscita per canale = 650 W
- Impedenza = 4 Ω
- Bridged mono = 8 Ω min
- Distorsione < 0,02%
- Peso = 20,2 kg
- Alimentazione = 230 V - 50 / 60 Hz

La cassa acustica utilizzata è il modello TXD 121 prodotto dalla Turbosound.

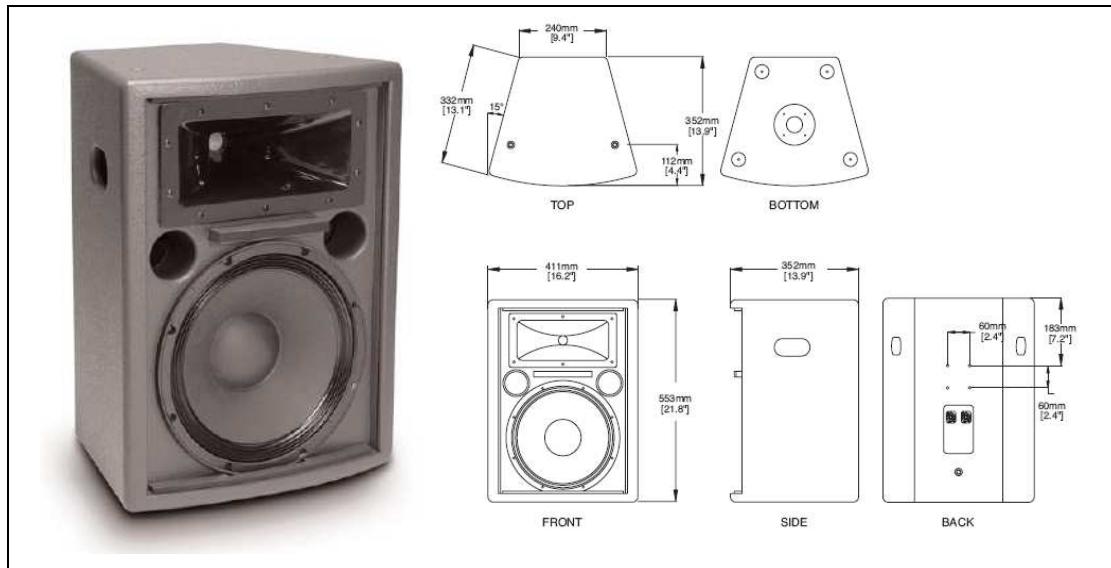


Figura 3-18 Cassa acustica TXD 121

Le principali caratteristiche sono:

- Potenza = 600 W
- Impedenza = 8 Ω
- Massimo SPL = 128 dB
- Peso = 20 kg
- Dispersione = 20° H x 40° V

4 Risultati e discussione

4.1 Eccitazione della struttura con il martello strumentato

POSIZIONE	MATERIALE	1	2	3	A	B	C
A-1	Busta da freezer in PE						
A-2	Busta di plastica + cotone idrofilo						
A-3	Portacampioni + cotone idrofilo						
B-1	Tessuto non tessuto (Tyvek)						
B-2	Carta velina						
B-3	Feltro						
C-1	Cotone da tessuto						
C-2	Polietilene espanso						
C-3	Carta da disegno						

L'eccitazione della struttura con il martello strumentato ha anticipato le prove acustiche. Sono state effettuate misurazioni con il laser al centro di ognuno dei 9 dischi, più in 4 punti ciascuno dei quali compreso tra 4 dischi adiacenti, equidistanti dai centri. Questi punti sono stati assunti come "sani", ossia sono stati considerati sufficientemente distanti da ogni disco per subirne l'effetto.

I punti analizzati sono stati quindi 13.

Il fine di questa attività è stata quella di realizzare le FRF per ciascun punto. Confrontare i diagrammi dei punti "sani" con quelli dei punti "difettati" permette, infatti, di poter vedere quali picchi sono quelli propri della struttura e quali sono quelli legati ai difetti.

Inoltre ha permesso di trovare il range di frequenze nel quale effettuare le analisi acustiche.

Sono di seguito riportati le FRF risultanti, nel range 50 Hz – 4250 Hz.

I punti non difettati sono indicati con:

- I: quello compreso tra A1, A2, B1, B2
- II: quello compreso tra A2, A3, B2, B3
- III: quello compreso tra B1, B2, C1, C2
- IV: quello compreso tra B2, B3, C2, C3

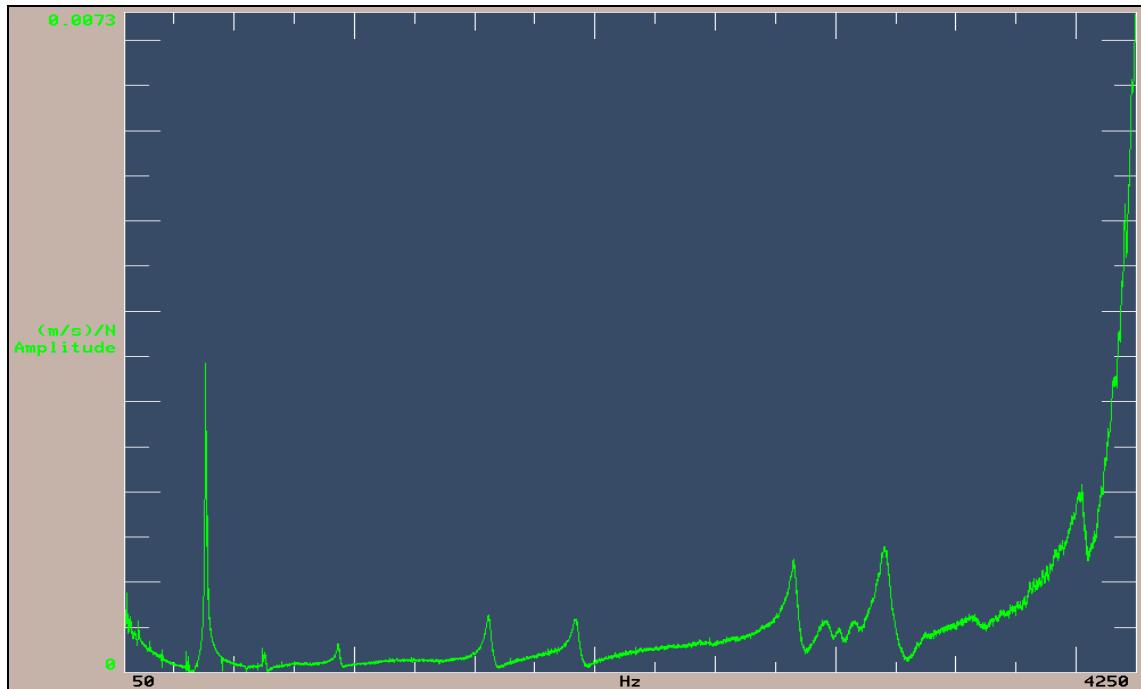


Figura 4-1 FRF del difetto in posizione A1

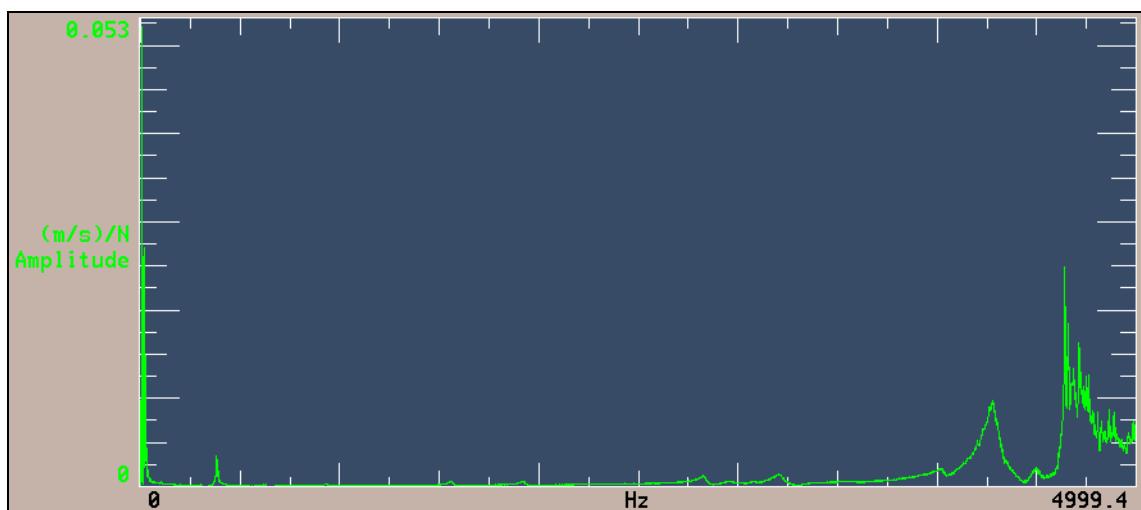


Figura 4-2 FRF del difetto in posizione A1 in un range più ampio

Il punto in posizione A1 presenta un comportamento diverso dagli altri, in particolare cresce molto dopo i 4250 Hz, per questo motivo è stato rappresentato anche in un range più ampio.

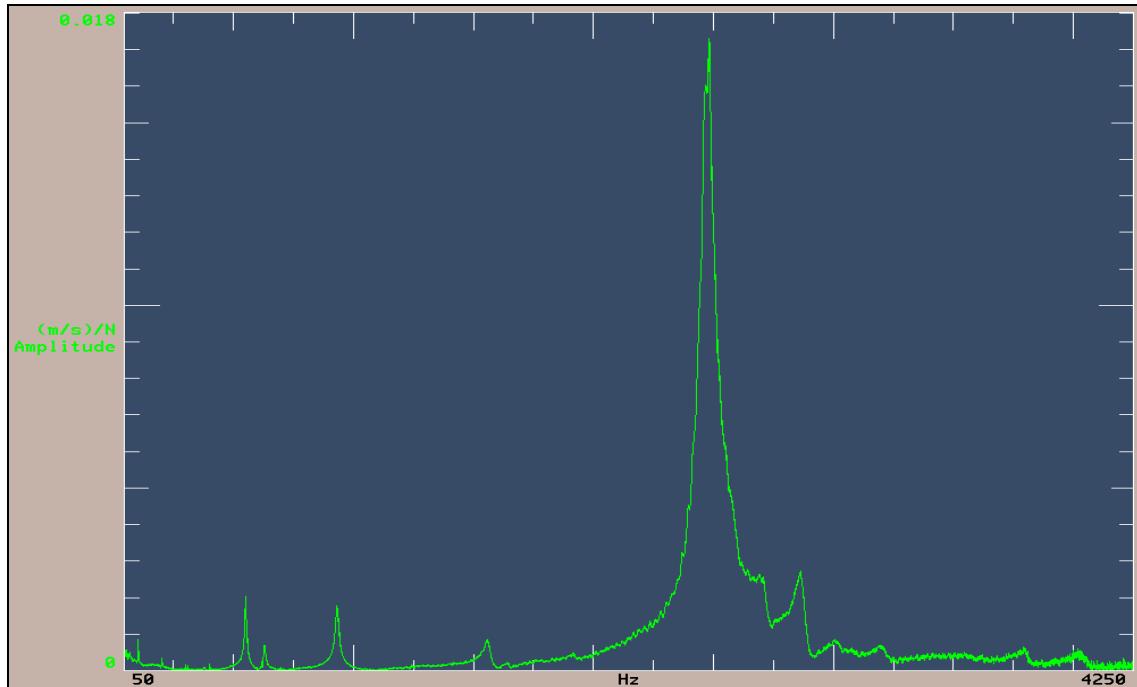


Figura 4-3 FRF del difetto in posizione A2

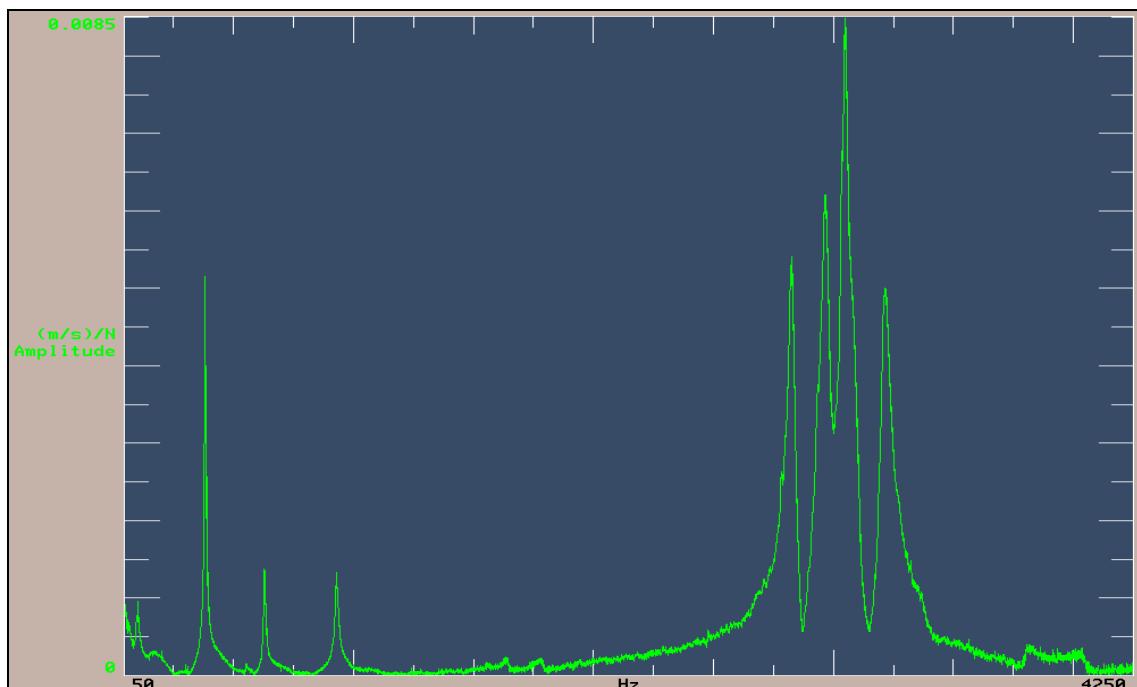


Figura 4-4 FRF del difetto in posizione A3

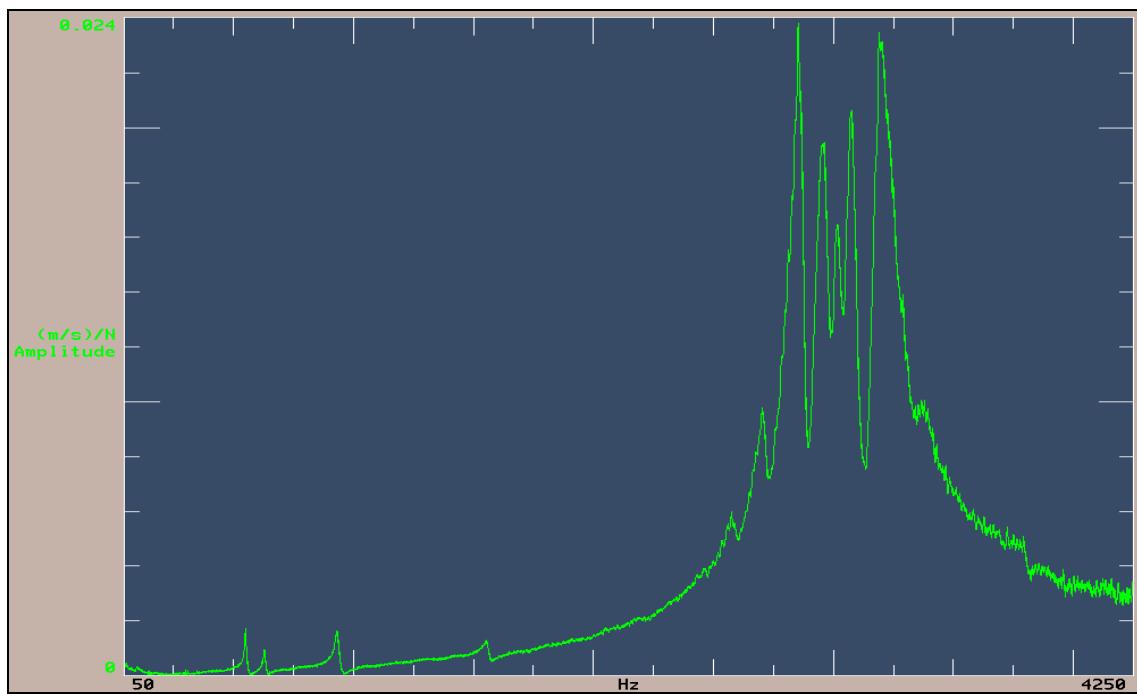


Figura 4-5 FRF del difetto in posizione B1

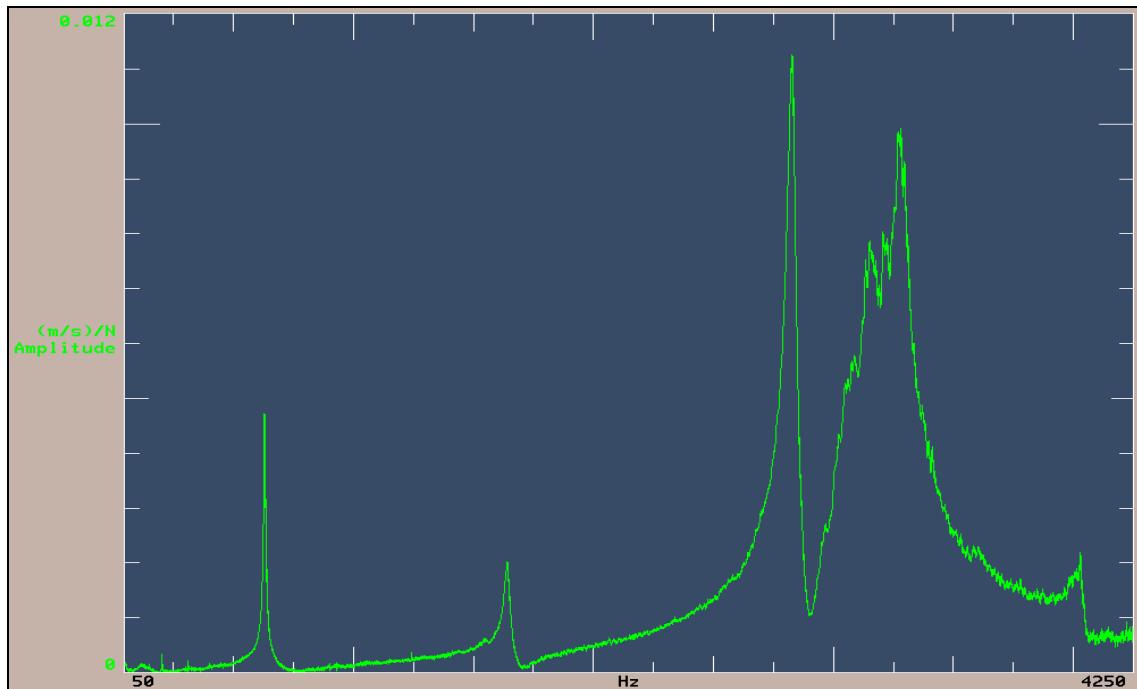


Figura 4-6 FRF del difetto in posizione B2

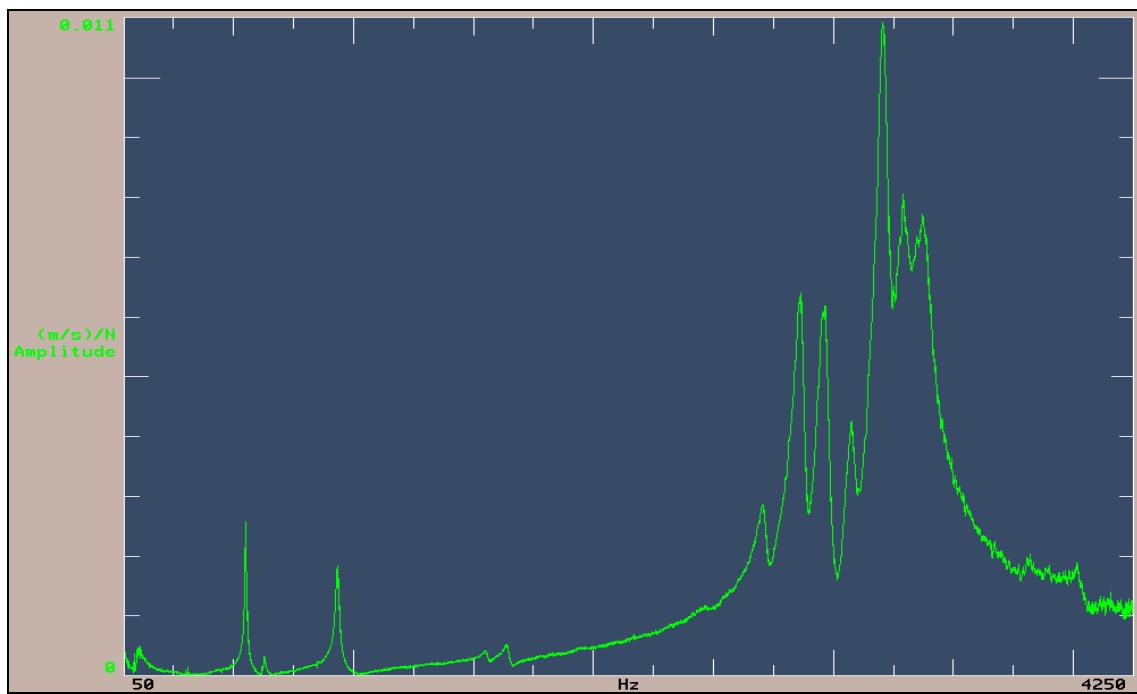


Figura 4-7 FRF del difetto in posizione B3

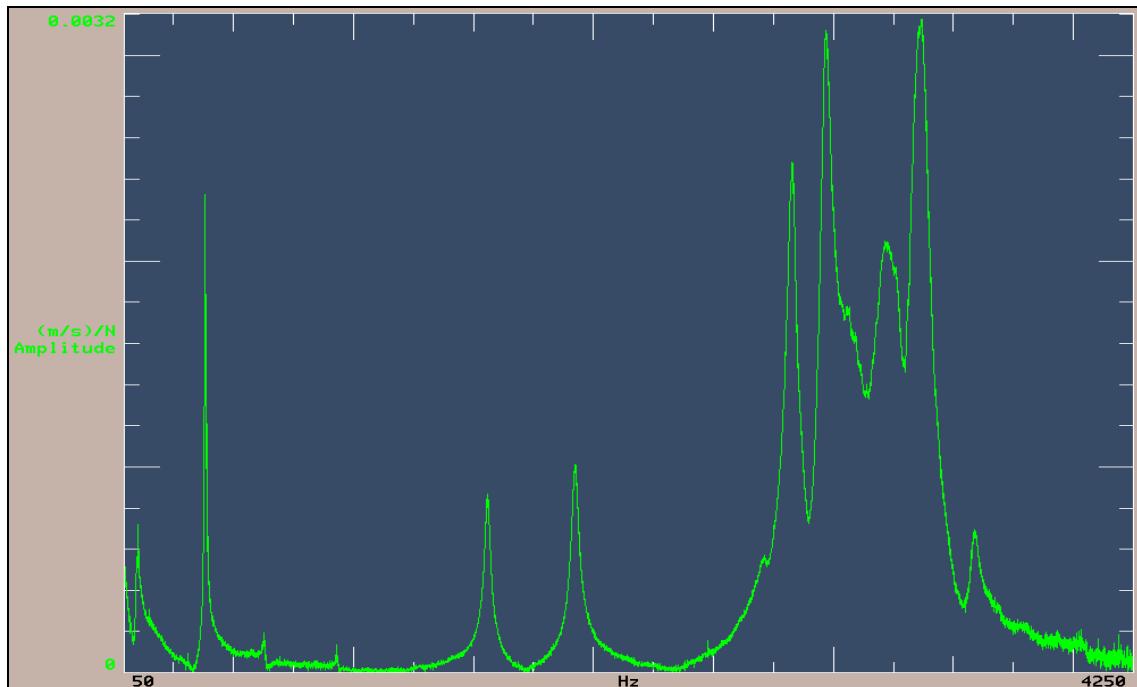


Figura 4-8 FRF del difetto in posizione C1

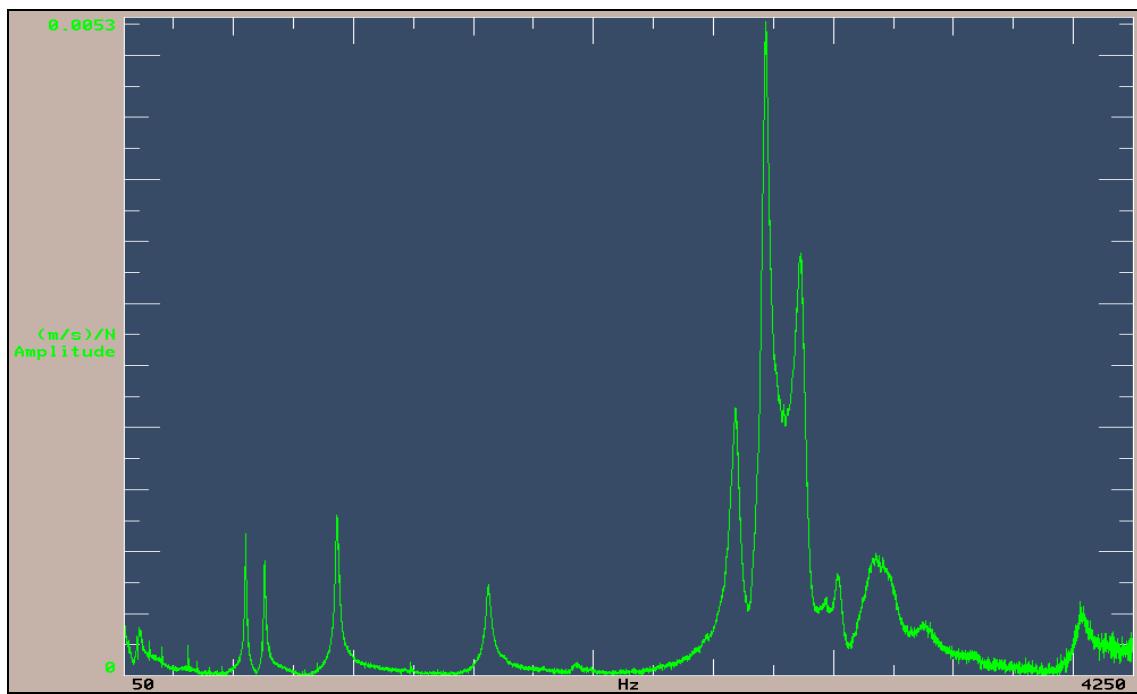


Figura 4-9 FRF del difetto in posizione C2

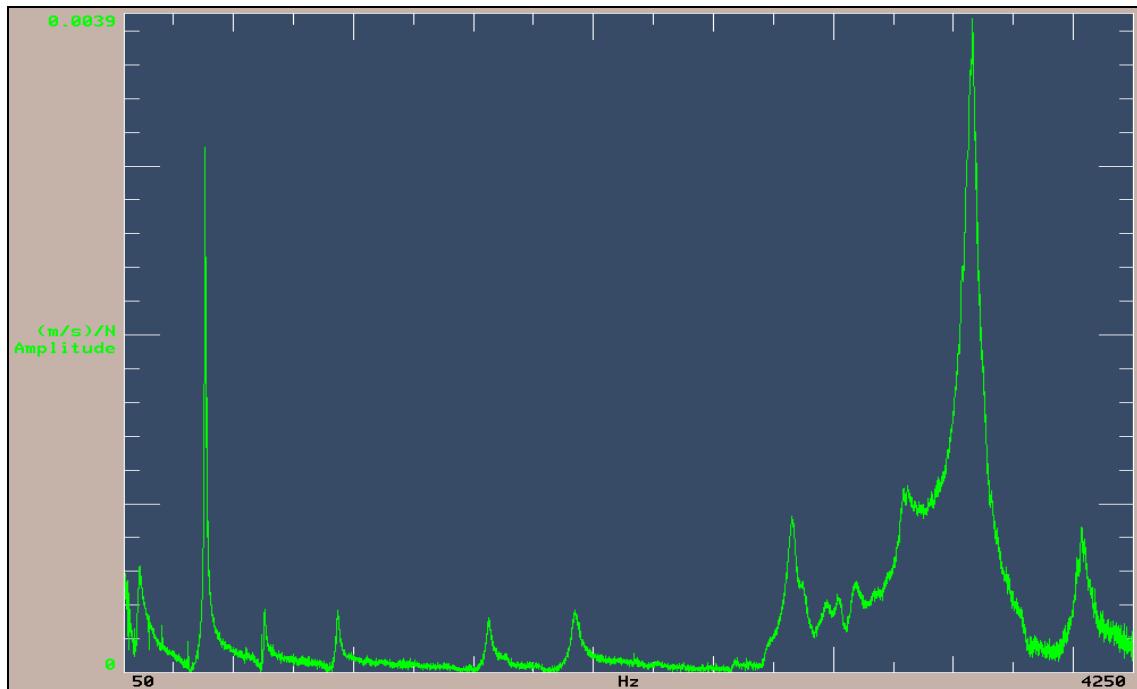


Figura 4-10 FRF del difetto in posizione C3

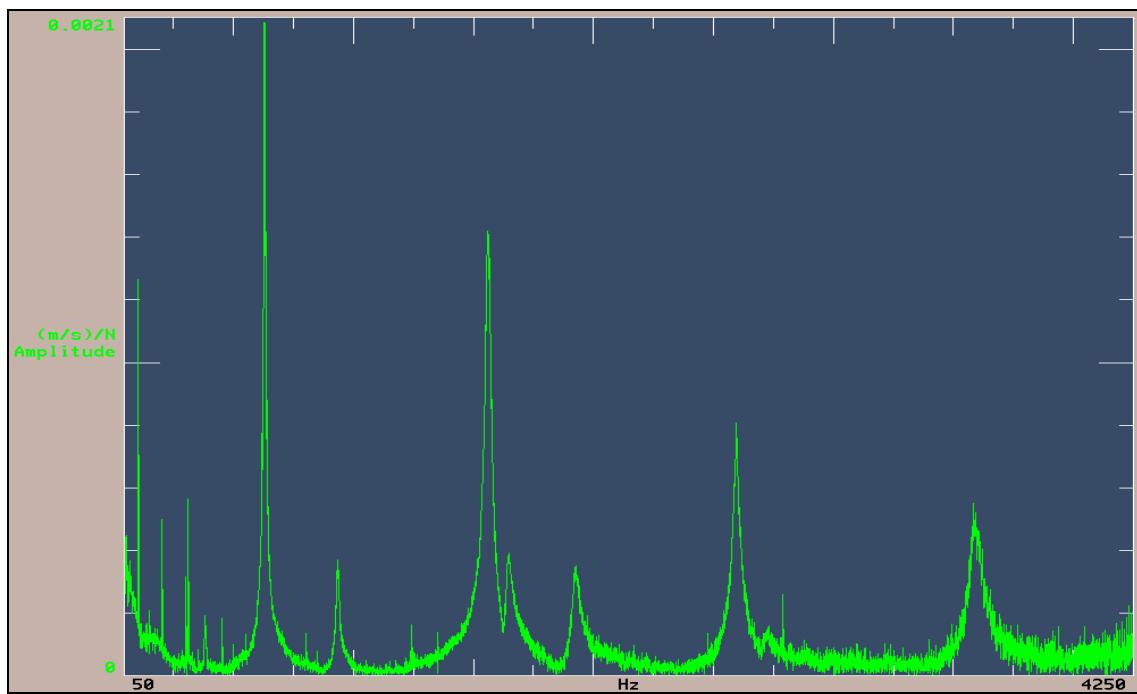


Figura 4-11 FRF del punto non difettato I

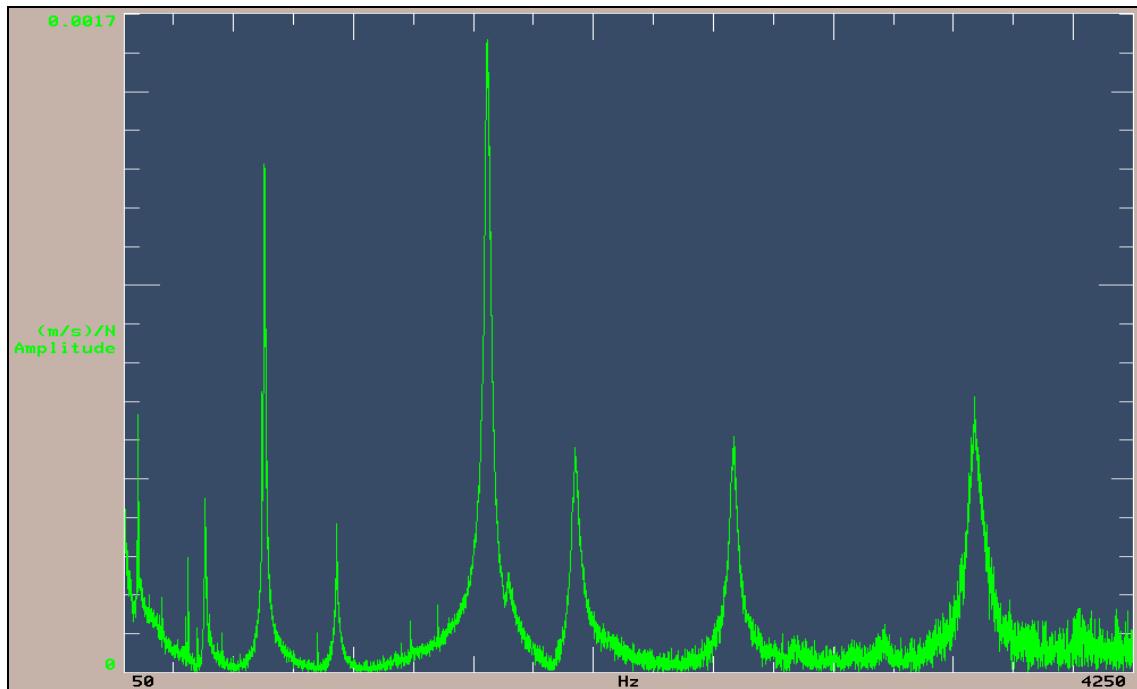


Figura 4-12 FRF del punto non difettato II

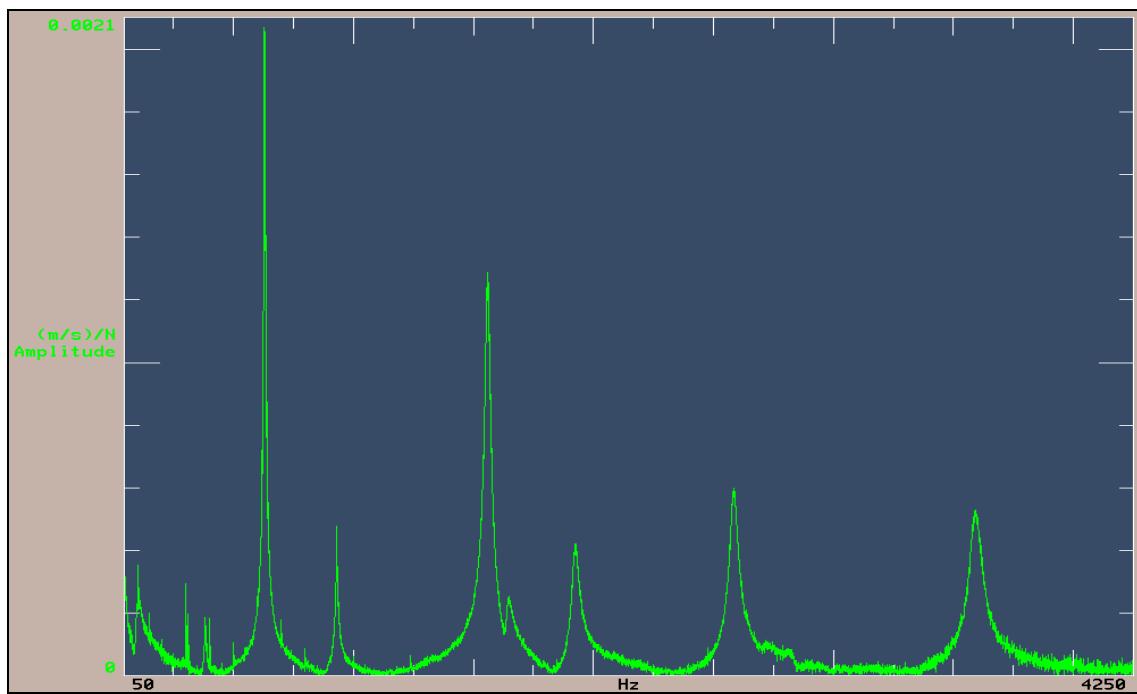


Figura 4-13 FRF del punto non difettato III

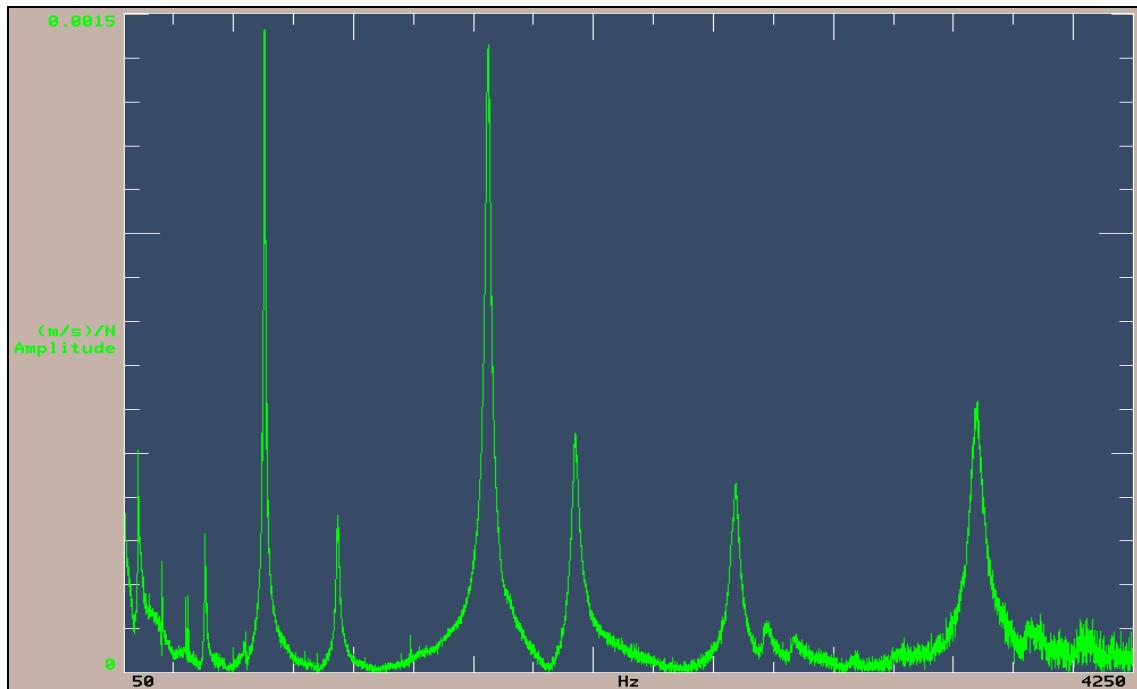


Figura 4-14 FRF del punto non difettato IV

Questi diagrammi forniscono nel dominio delle frequenze un rapporto tra la velocità superficiale del pannello e la forza d'impatto del martello. Questa grandezza, definita mobilità, può essere considerata come l'inverso dell'impedenza meccanica.

Al fine di ridurre il rumore e l'influenza della poca ripetibilità della forza d'impatto, per ogni punto è stata fatta una media tra 4 successive misure. In seguito è stato realizzato il diagramma della coerenza.

Confrontando le varie FRF si può notare che in una zona compresa tra i 2500 Hz e i 3500 Hz, i punti difettati presentano dei picchi che nei non difettati sono assenti.

Al di fuori di questo range ci sono numerosi picchi; questi non sono stati considerati perché si trovano sia nelle FRF dei punti difettati che in quelle dei punti non difettati, e quindi probabilmente corrispondono a frequenze di risonanza della struttura.

A basse frequenze, sotto i 30 Hz, i punti hanno comportamento diverso. Si è notato che i picchi sotto i 30 Hz dipendono fortemente dalle condizioni di vincolo, perché puntando il laser nello stesso punto e tirando o allentando i tiranti collegati alle corde che vincolano la struttura, ne escono fuori dei grafici estremamente diversi. Per questo motivo la zona sotto i 50 Hz non è stata indagata.

Nel range 2500 Hz – 3500 Hz la coerenza dei punti difettati è molto più alta di quella dei punti "sani", come si può vedere (in rosso) nelle due figure seguenti.

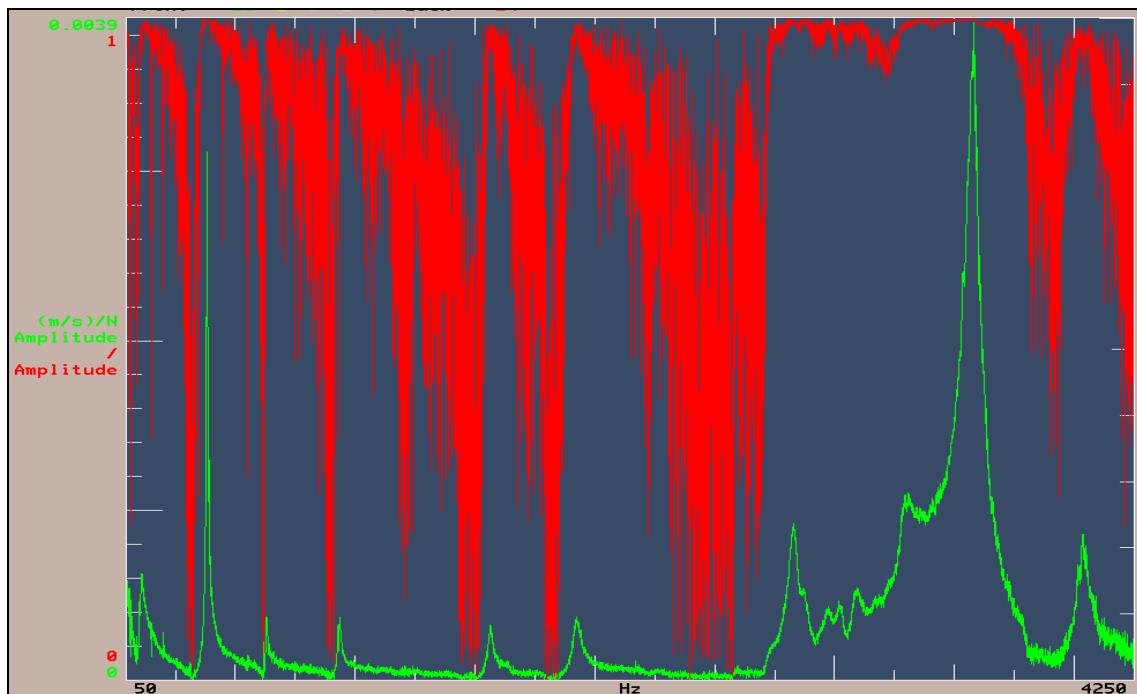


Figura 4-15 Coerenza (in rosso) relativa al punto C3, difettato

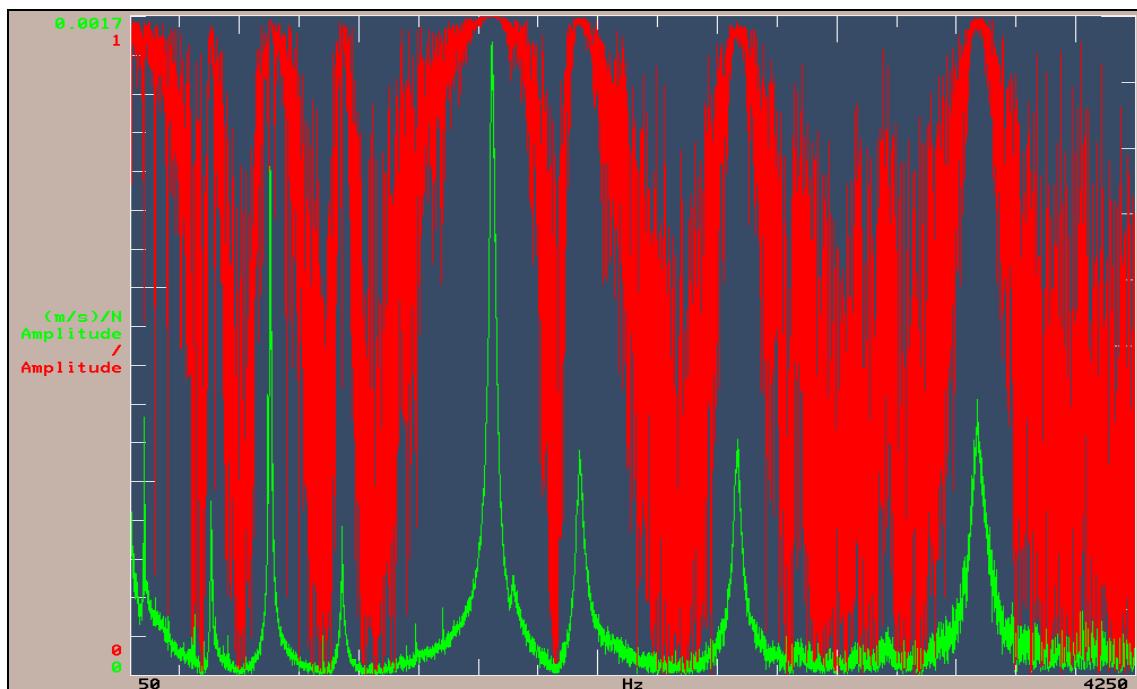


Figura 4-16 Coerenza (in rosso) relativa al punto II, non difettato

I risultati ottenuti con il martello strumentato risultano estremamente chiari rappresentando nello stesso diagramma con la stessa scala le FRF relative ai vari punti difettati e non difettati.

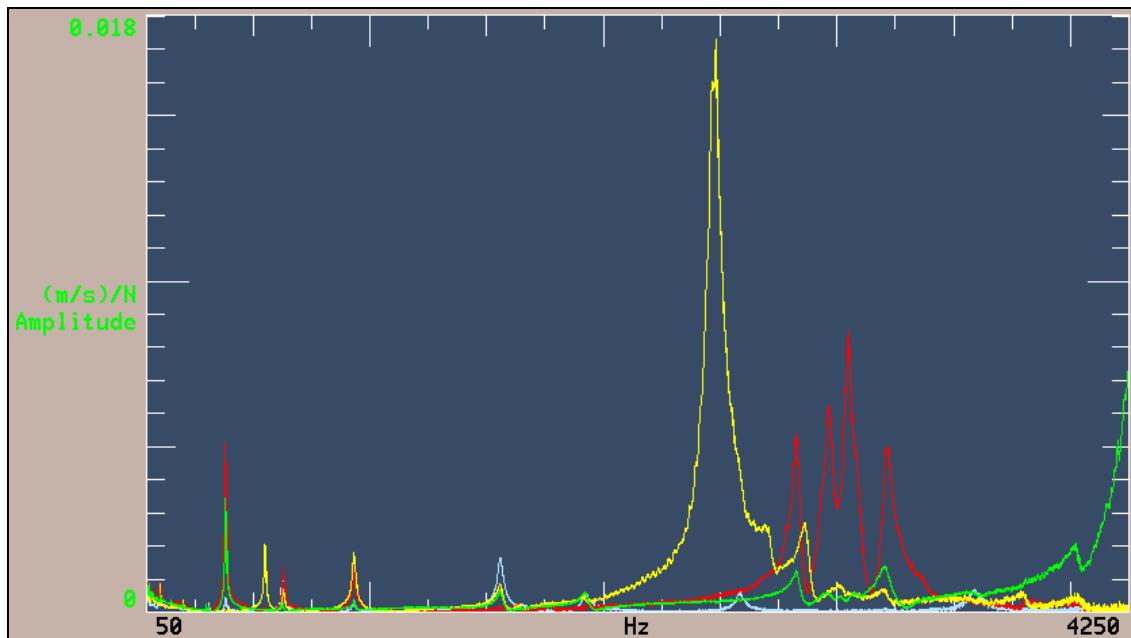


Figura 4-17 Confronto delle FRF tra i punti difettati 1 (in verde), 2 (in giallo), 3 (in rosso) e il punto non difettato II (in grigio)

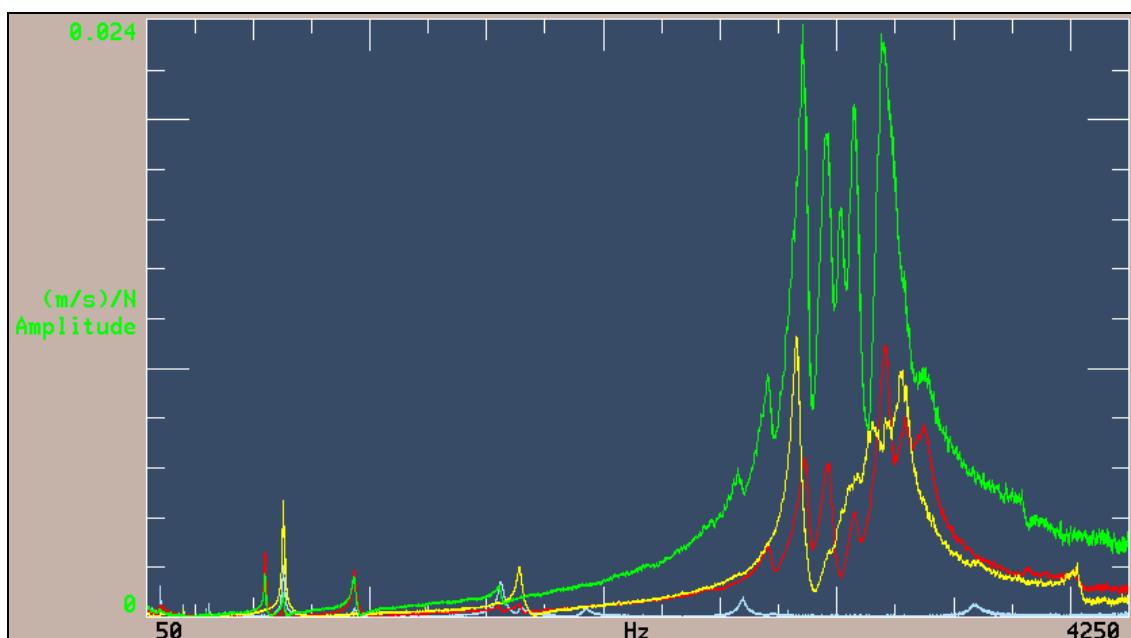


Figura 4-18 Confronto delle FRF tra i punti difettati 4 (in verde), 5 (in giallo), 6 (in rosso) e il punto non difettato I (in grigio)

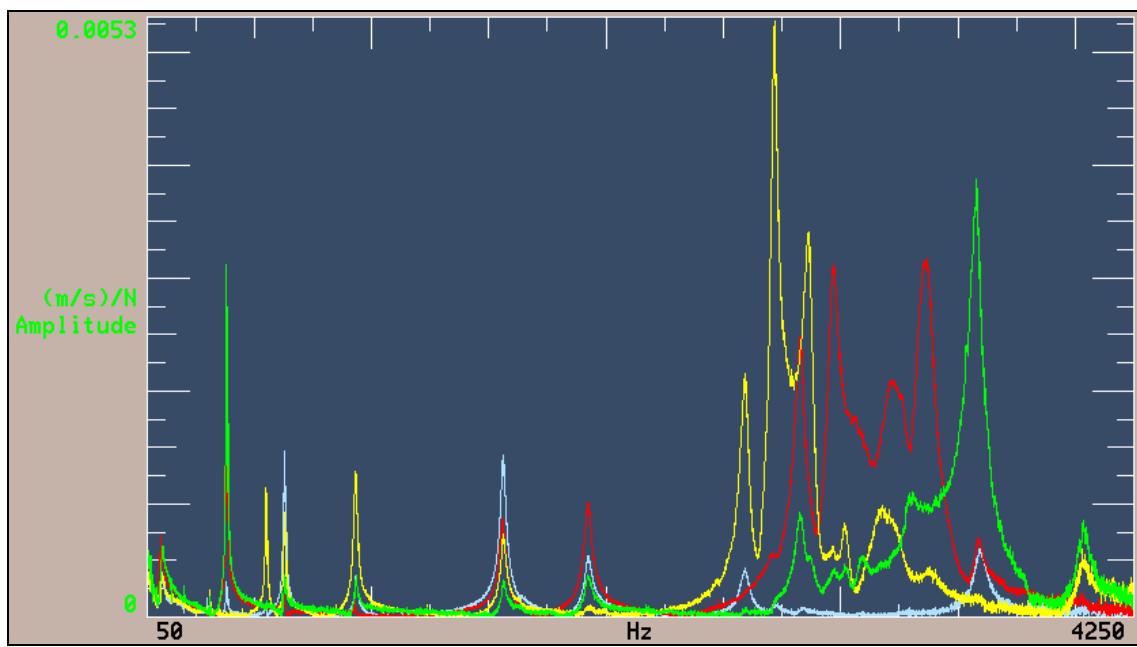


Figura 4-19 Confronto delle FRF tra i punti difettati 7 (in rosso), 8 (in giallo), 9 (in verde) e il punto non difettato IV (in grigio)

4.2 Eccitazione della struttura con la cassa acustica

L'eccitazione acustica offre la possibilità di superare la necessità di accesso fisico al punto di misura; infatti il suono emesso da una cassa acustica può indurre vibrazioni in qualunque punto sulla superficie del pannello, sempre che una quantità sufficiente di energia sia trasferita dall'aria al pannello.

Le onde acustiche possono essere prodotte in un ampio range di frequenze. In particolare il segnale di eccitazione utilizzato è stato di tipo *burst-random* su un range di frequenze compreso tra 700 Hz e 8000 Hz.

La misura esatta della forza di input in questo caso risulta però particolarmente complessa: la misura esatta delle FRF risulta pertanto non pratica. Volendo realizzare la FRF sarebbe infatti consigliabile misurare il segnale di eccitazione tramite un microfono posizionato in prossimità della superficie del pannello, in corrispondenza del punto di misura del laser.

In questo caso l'autospettro del segnale di velocità misurato può essere sufficiente per osservare la presenza di difetti.

Una prima serie di misure è stata fatta al fine di individuare la configurazione migliore in cui mettere la cassa, il laser e il pannello. Per fare ciò si è giocato sull'altezza della cassa rispetto al suolo, sulla distanza e sull'orientazione relativa cassa - pannello.

Sono state provate diverse soluzioni:

Cassa a terra o cassa a 55 cm dal suolo

Distanza relativa cassa – pannello 50 cm, 90 cm o 250 cm

Orientazione relativa cassa – pannello 0°, 45°, 90°, 180° o 270°.

Il difetto preso in esame è stato sempre quello in posizione C2.

Ne sono risultati i seguenti autospettri:

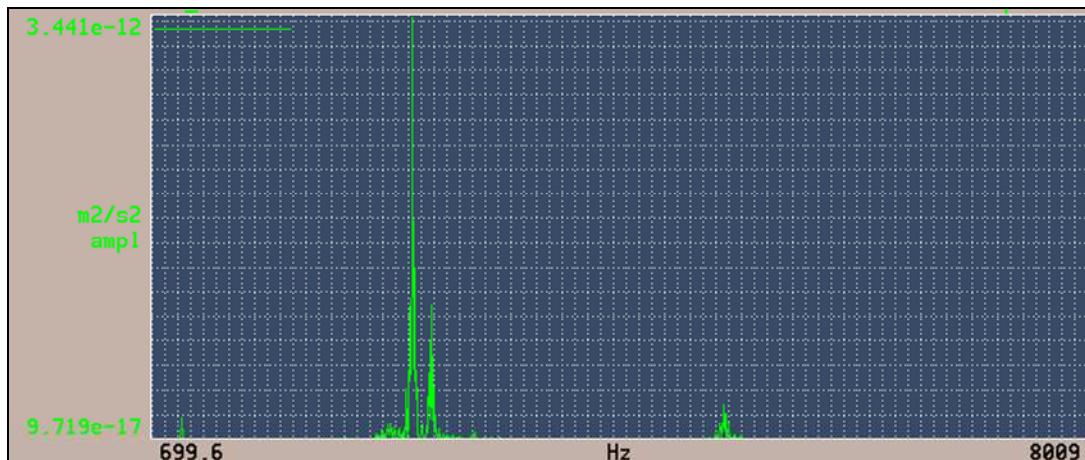


Figura 4-20 Cassa a terra, distanza 50 cm, orientazione 0°

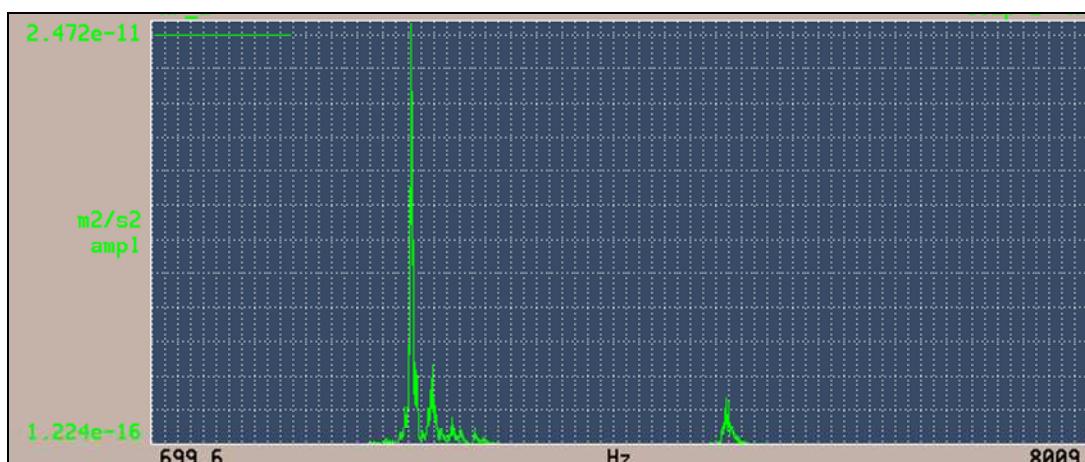


Figura 4-21 Cassa a 55 cm dal suolo, distanza 50 cm, orientazione 0°

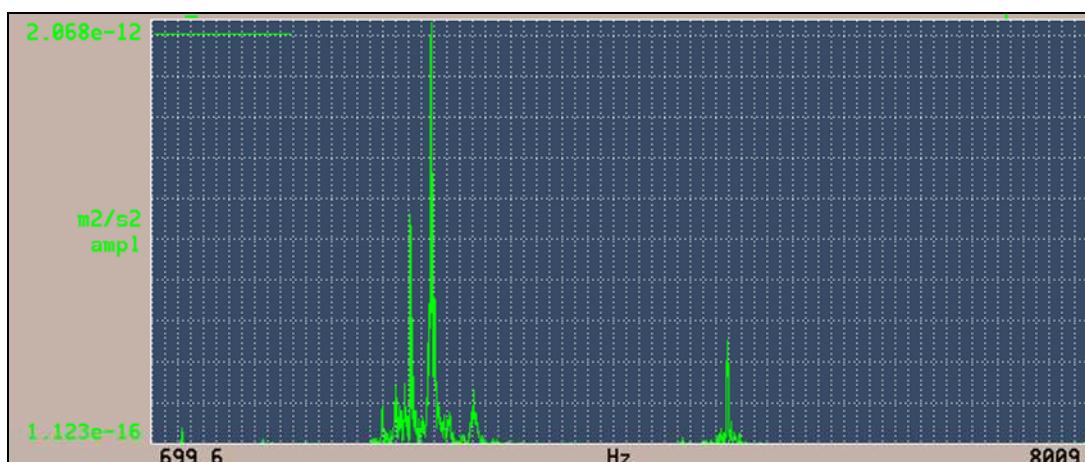


Figura 4-22 Cassa a terra, distanza 90 cm, orientazione 0°

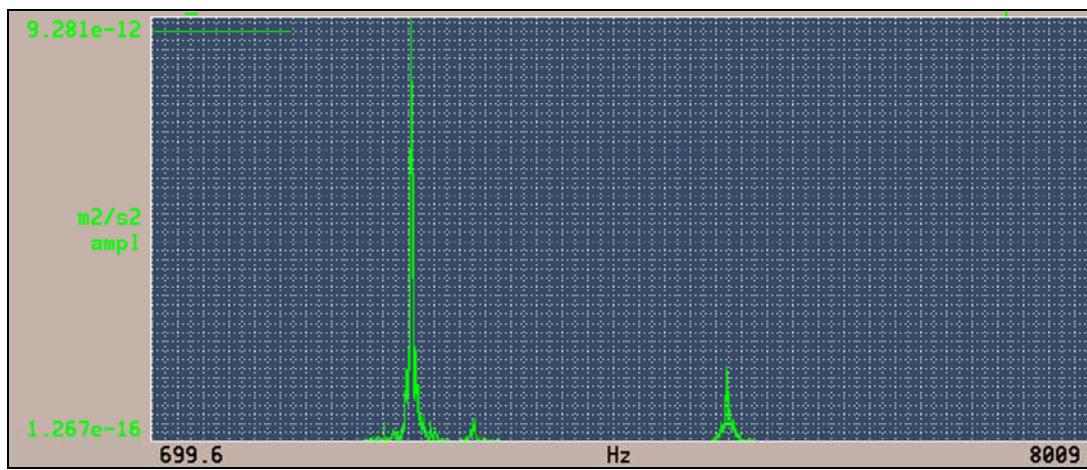


Figura 4-23 Cassa a 55 cm dal suolo, distanza 90 cm, orientazione 0°

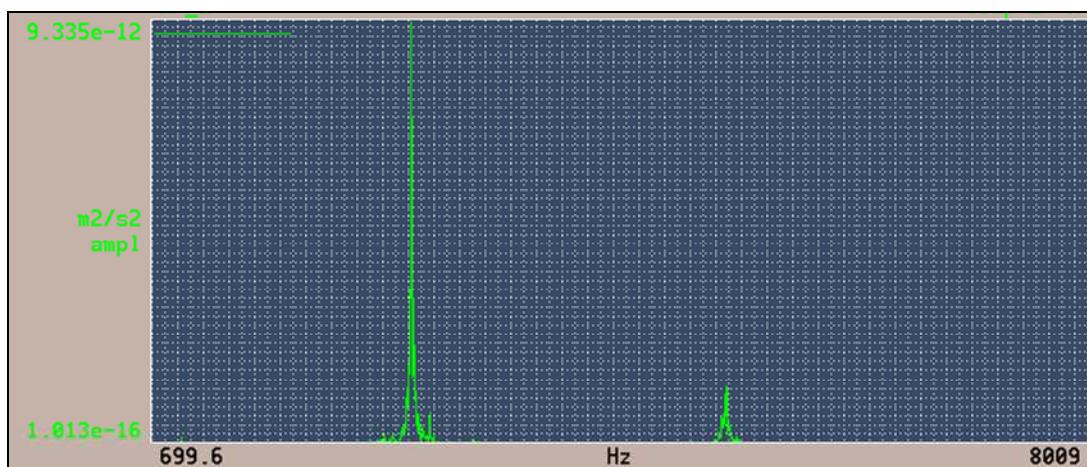


Figura 4-24 Cassa a 55 cm dal suolo, distanza 90 cm, orientazione 45°

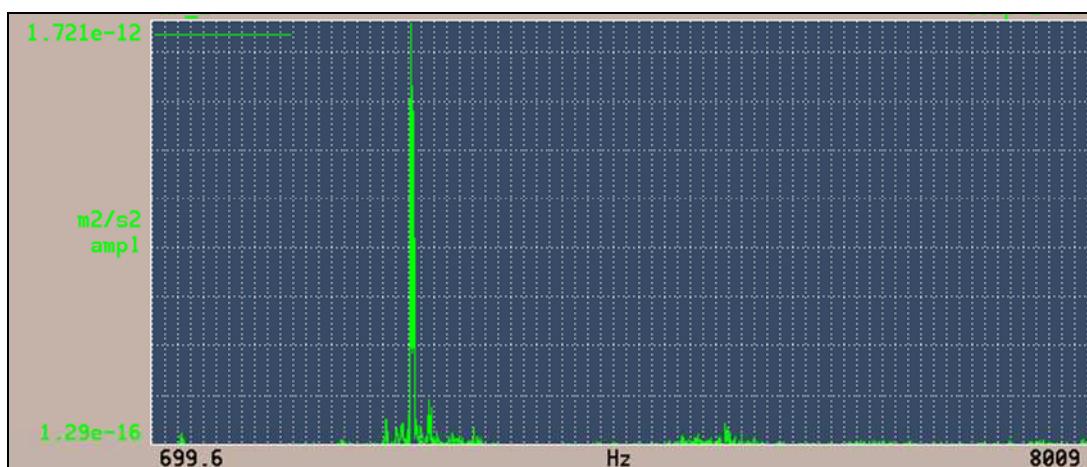


Figura 4-25 Cassa a 55 cm dal suolo, distanza 90 cm, orientazione 90°

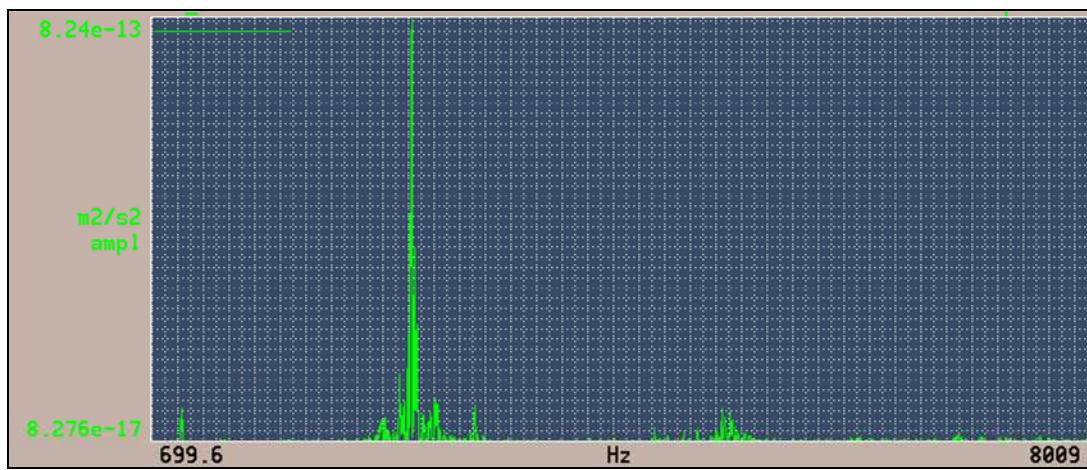


Figura 4-26 Cassa a 55 cm dal suolo, distanza 90 cm, orientazione 270°

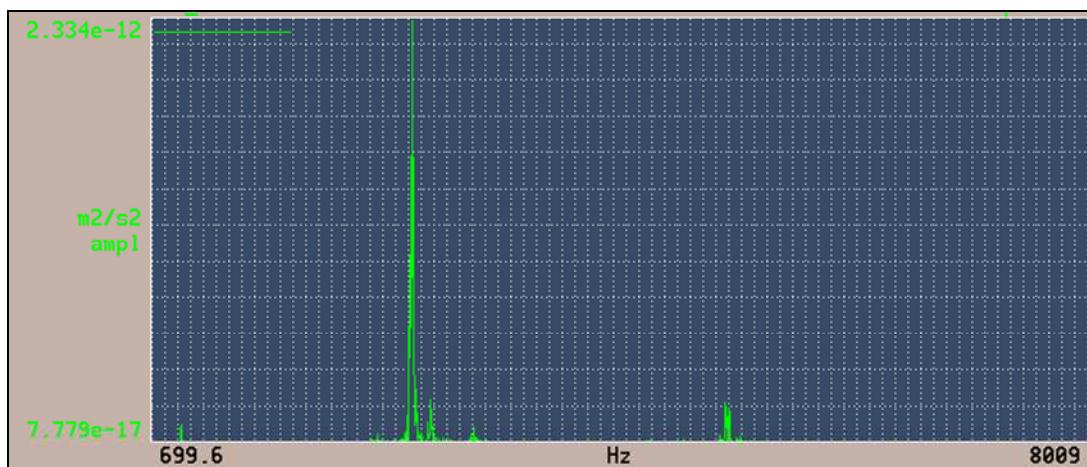


Figura 4-27 Cassa a terra, distanza 250 cm, orientazione 180°

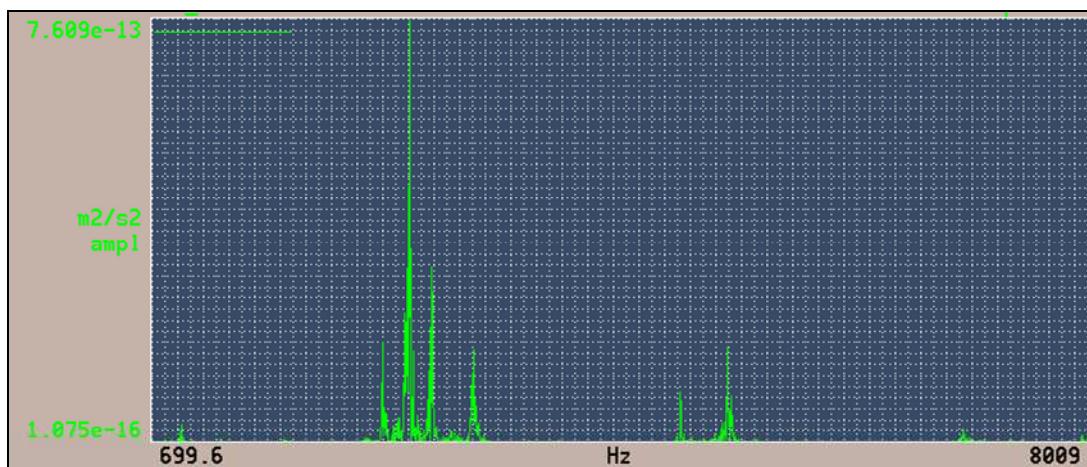


Figura 4-28 Cassa a 55 cm dal suolo, distanza 250 cm, orientazione 180°

Nelle varie configurazioni provate si distingue la zona (2500 Hz – 3500 Hz) in cui sono evidenti i picchi ad alta mobilità delle zone difettate, notati nelle FRF degli esperimenti con il martello. In più emerge un'altra zona analoga, attorno ai 5500 Hz – 5600 Hz. Essendo però queste frequenze non indagate dalle prove di tipo *impact*, non è stato possibile effettuare un confronto.

Tutte le configurazioni permettono di distinguere il difetto. Quella in cui la cassa è rivolta a 270° è quella che ha dato il segnale di qualità inferiore: quando l'onda sonora è rivolta verso la parete (come nei casi 90° e 180°) il segnale viene riflesso e i grafici sono più puliti, il rapporto segnale-rumore è maggiore. A 270° le casse sono rivolte verso il laboratorio, il segnale quindi si disperde e si sporca.

Si è notato che più che la distanza o l'altezza della cassa il fattore che influisce maggiormente sulla qualità del segnale è l'orientazione relativa della cassa con il pannello, come si può vedere dai diagrammi di coerenza in seguito riportati.

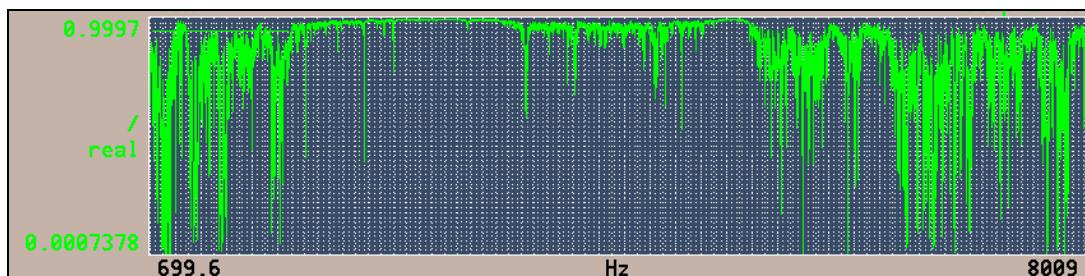


Figura 4-29 Coerenza con orientazione relativa 0°

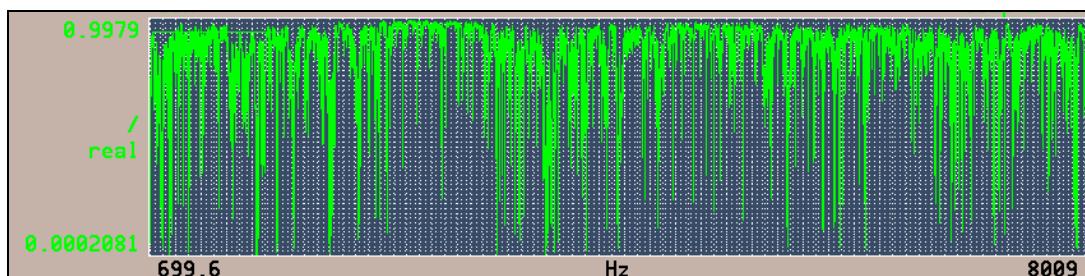


Figura 4-30 Coerenza con orientazione relativa 90° (verso la parete)

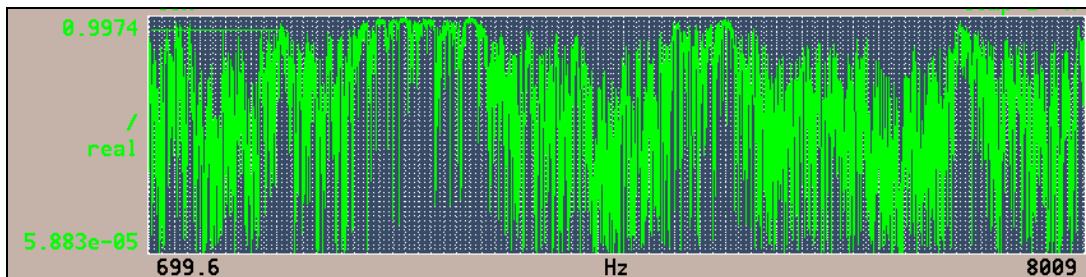


Figura 4-31 Coerenza con orientazione relativa 180°

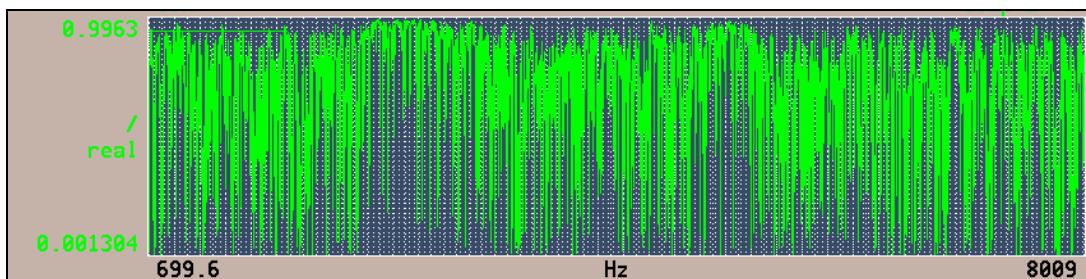


Figura 4-32 Coerenza con orientazione relativa 270° (verso il laboratorio)

Si può vedere come la coerenza sia prossima a 1 in tutto il range caratteristico del difetto quando l'orientazione è 0°, in quanto prevale l'onda diretta, e come va progressivamente sporcandosi al crescere dell'angolo.

Sono state quindi realizzate le prove acustiche puntando il laser nei 13 punti analizzati con il martello. La configurazione scelta è quella che vede le casse affacciate frontalmente al pannello (orientazione 0°), distanti 120 cm da esso e sollevate rispetto al suolo di 55 cm.

La distanza maggiorata rispetto alle prove precedenti serve a minimizzare la differenza delle distanze tra la cassa e i vari punti.

Sono in seguito riportati gli autospettri risultanti.

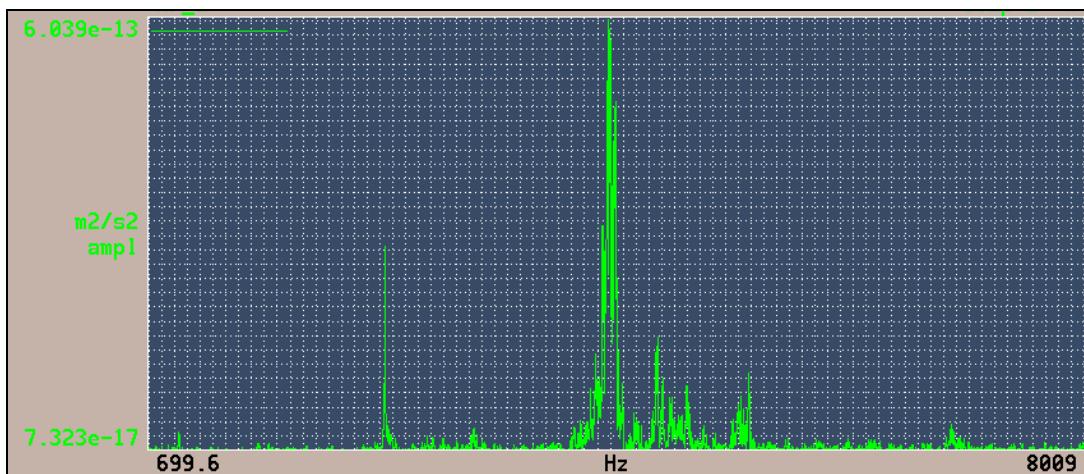


Figura 4-33 Autospettro del difetto in posizione A1

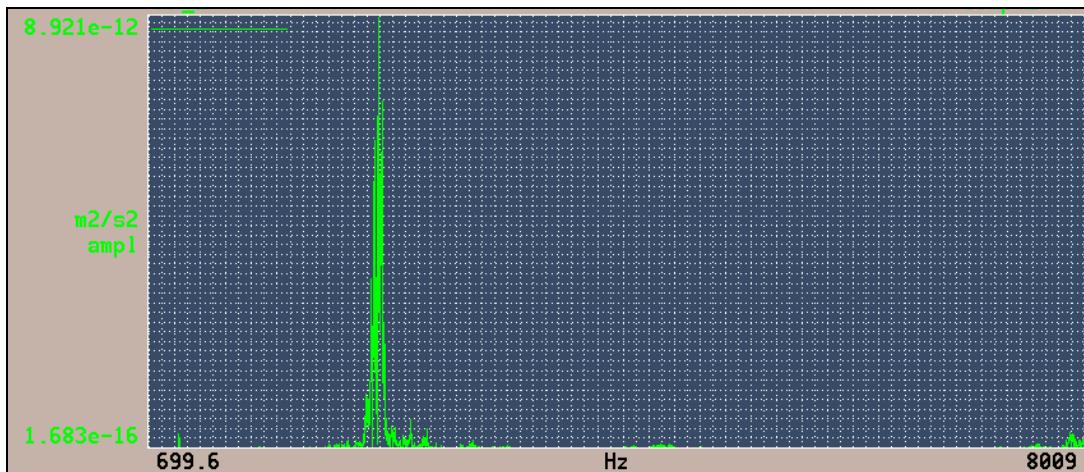


Figura 4-34 Autospettro del difetto in posizione A2

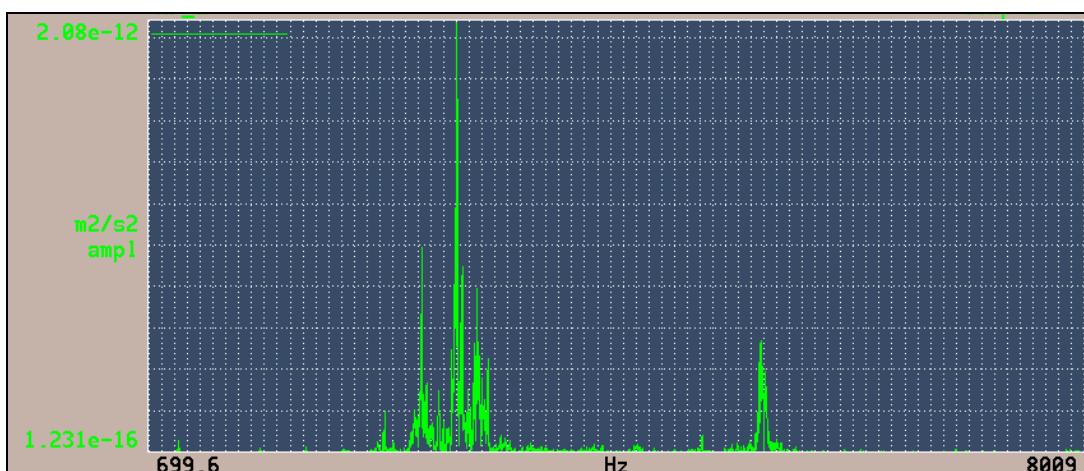


Figura 4-35 Autospettro del difetto in posizione A3

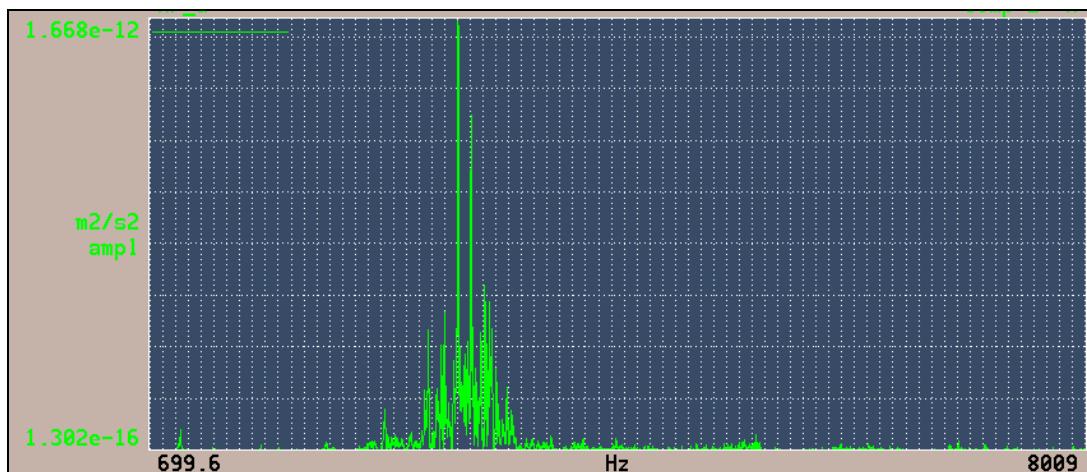


Figura 4-36 Autospettro del difetto in posizione B1

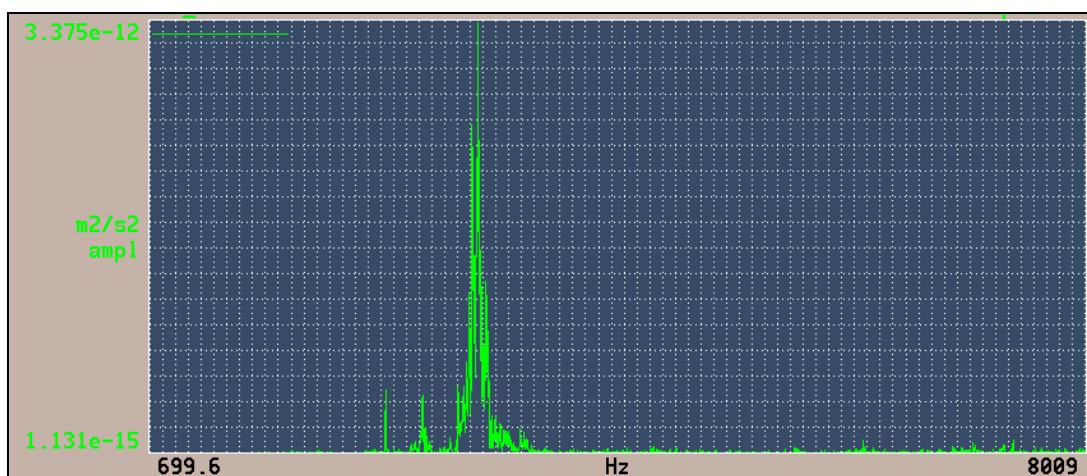


Figura 4-37 Autospettro del difetto in posizione B2

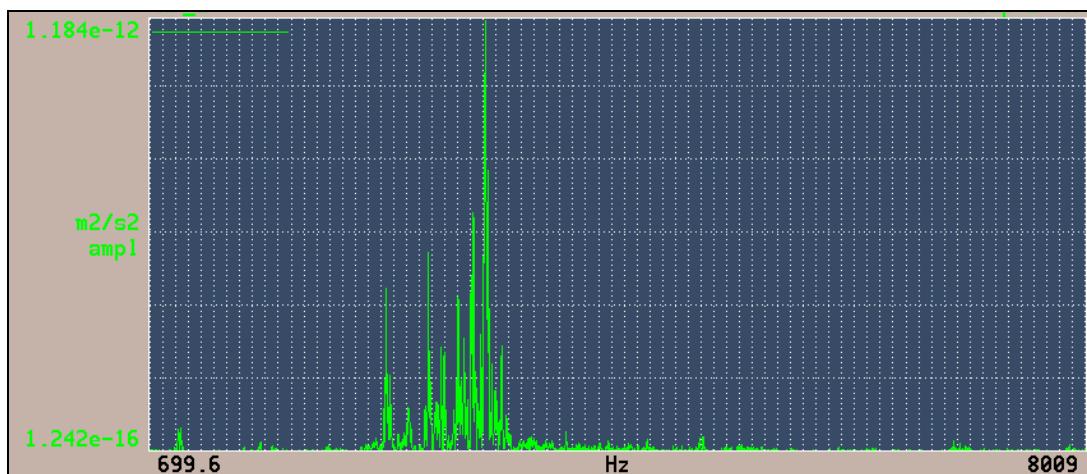


Figura 4-38 Autospettro del difetto in posizione B3

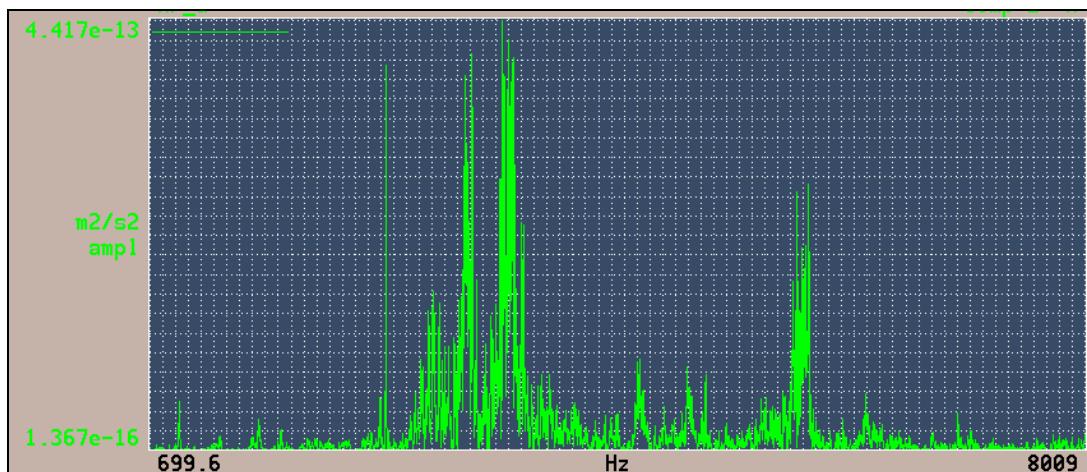


Figura 4-39 Autospettro del difetto in posizione C1

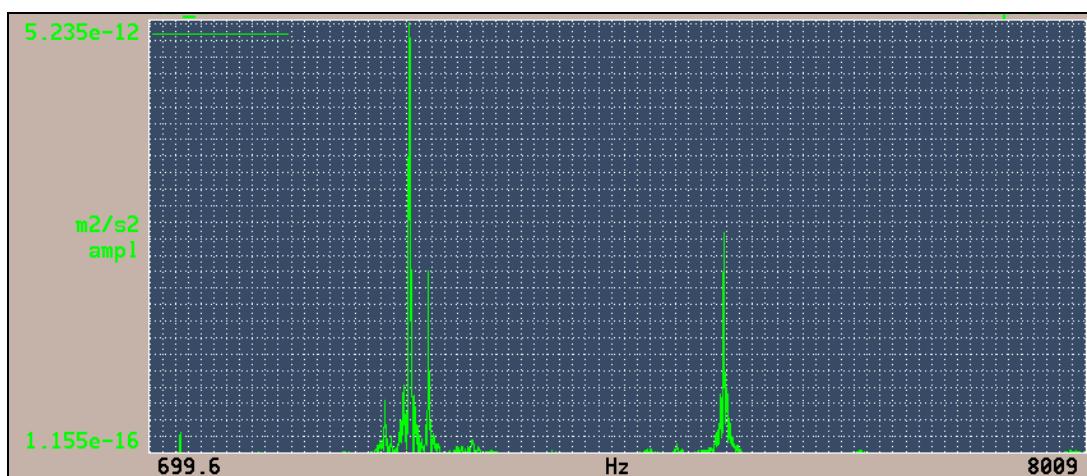


Figura 4-40 Autospettro del difetto in posizione C2

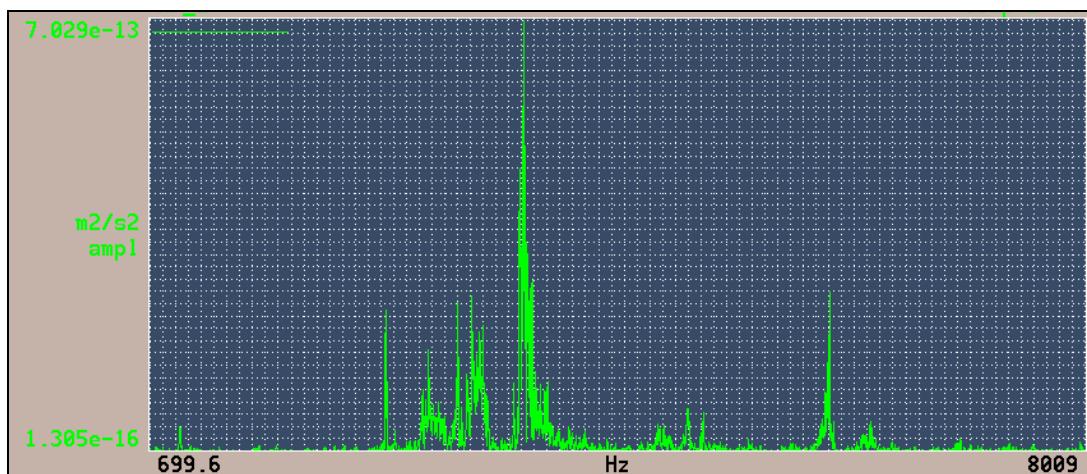


Figura 4-41 Autospettro del difetto in posizione C3

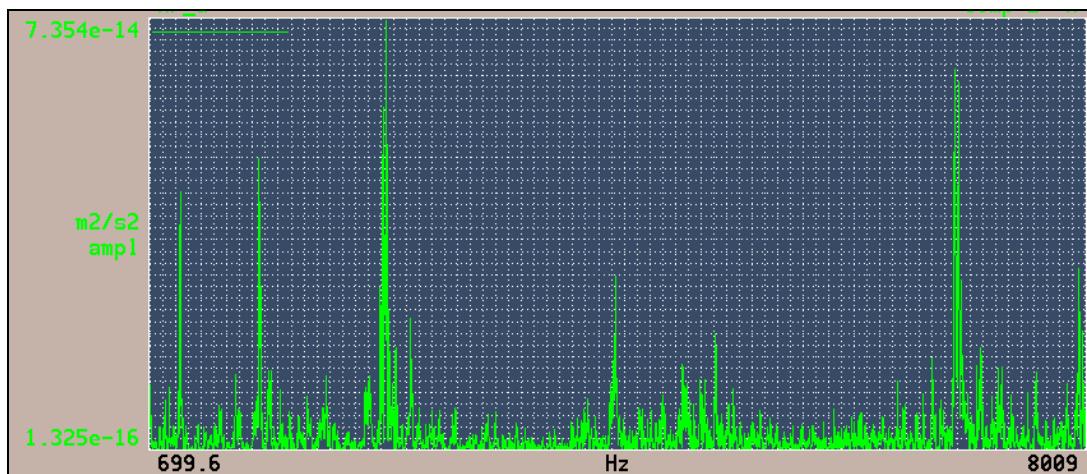


Figura 4-42 Autospettro del punto non difettato I

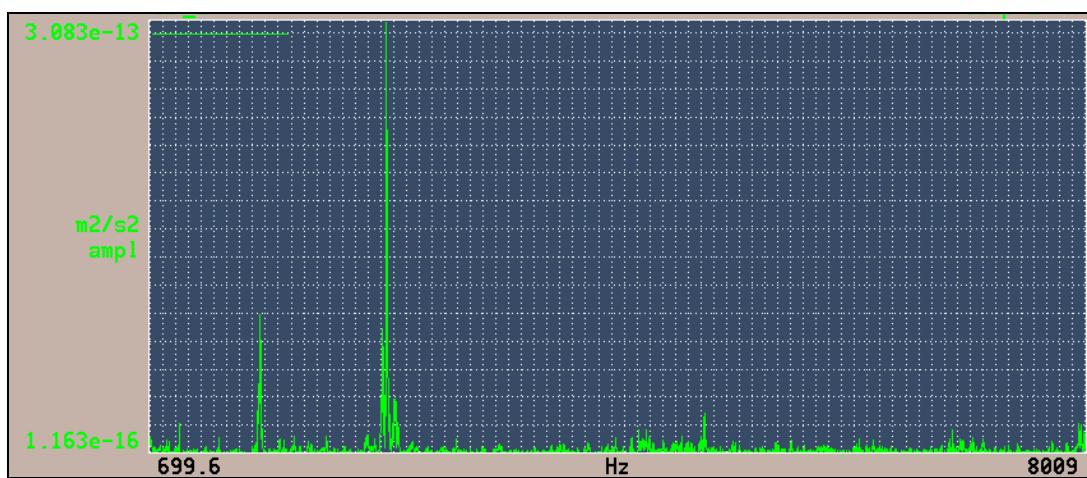


Figura 4-43 Autospettro del punto non difettato II

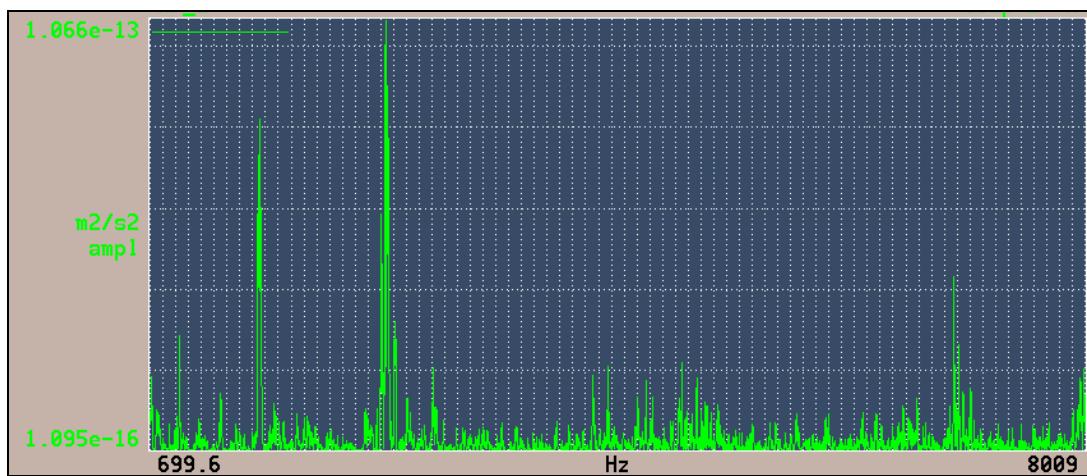


Figura 4-44 Autospettro del punto non difettato III

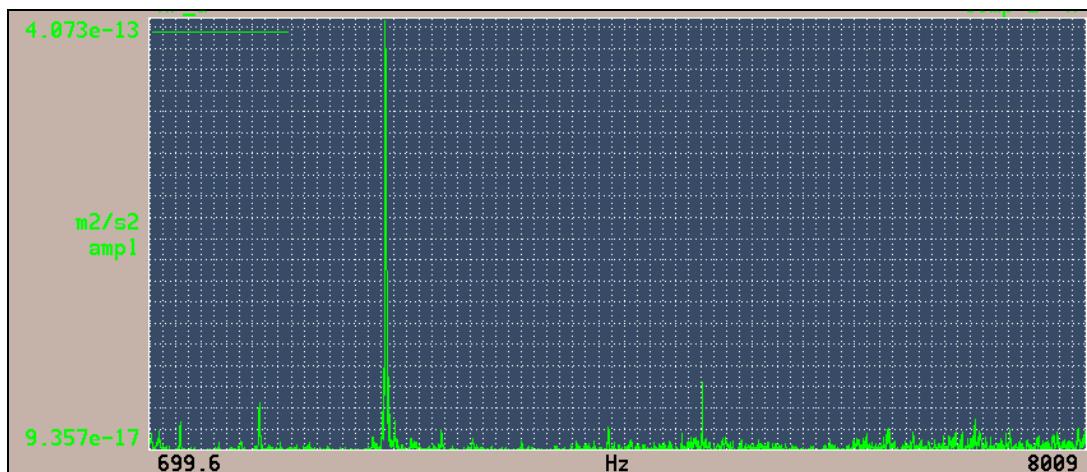


Figura 4-45 **Autospettro del punto non difettato IV**

Per completezza sono stati realizzati anche per le prove acustiche i grafici delle FRF, utilizzando come valore di input il segnale uscendo dalle casse. Questo chiaramente non corrisponde esattamente con il valore effettivo sulla superficie del pannello, in quanto parte dell'energia viene assorbita dall'aria.

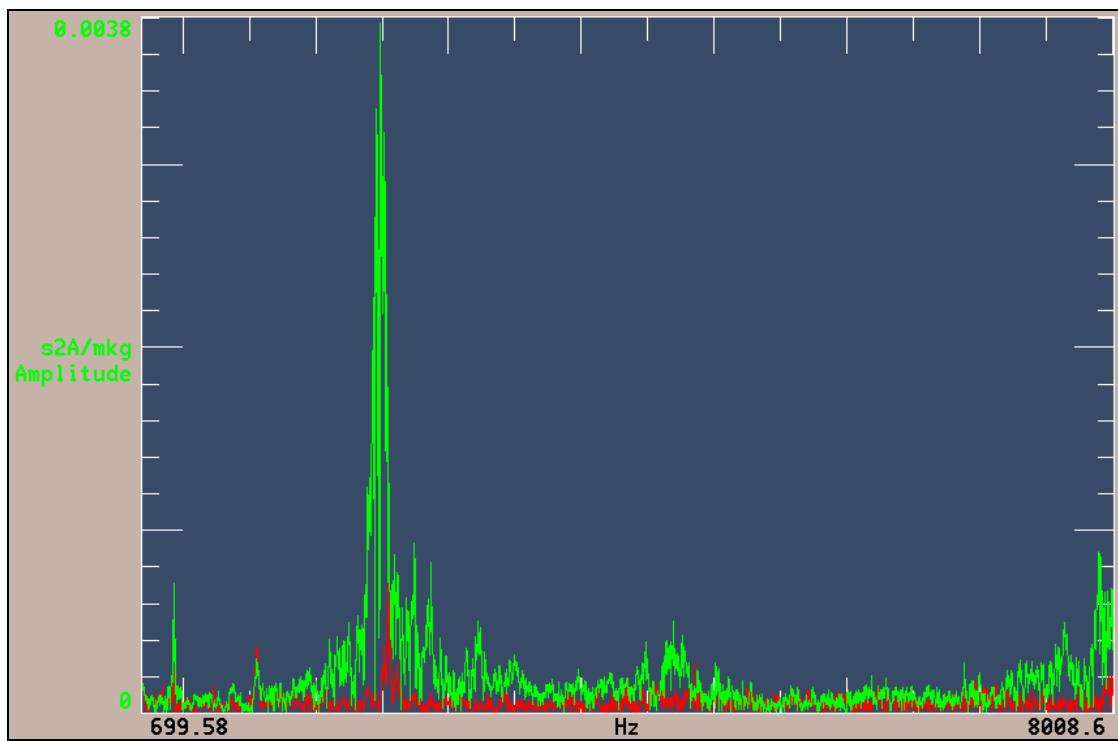


Figura 4-46 Confronto delle FRF tra il punto difettato 2 (in verde) e il punto non difettato II (in rosso)

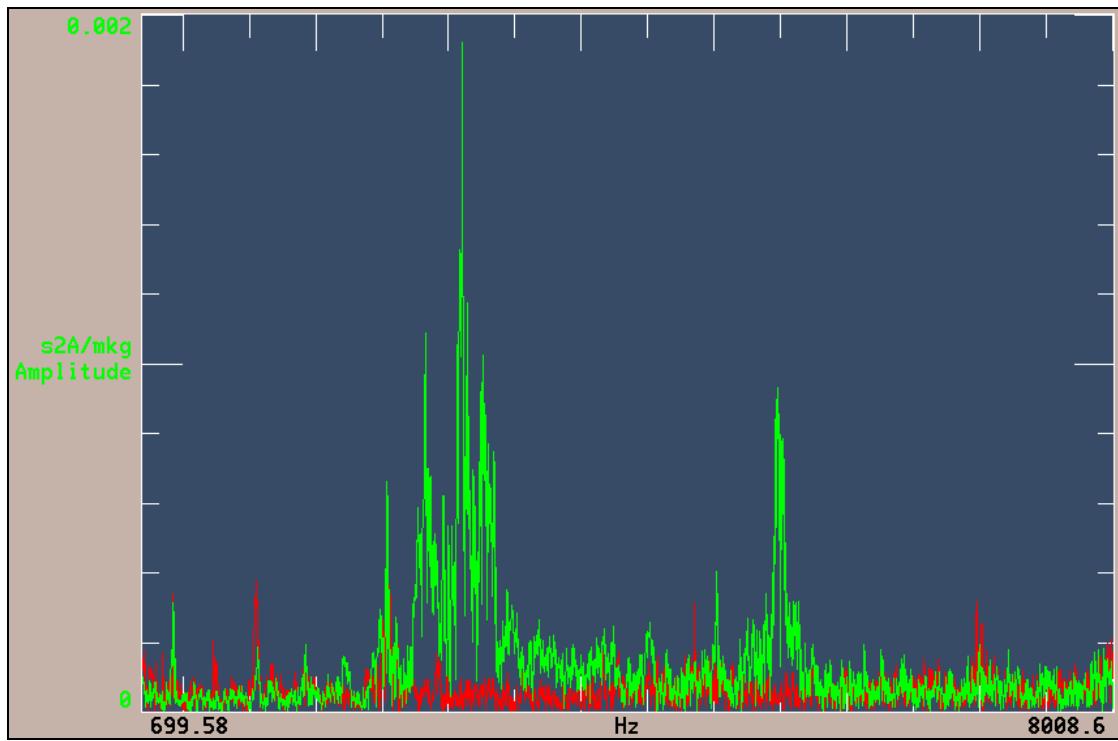


Figura 4-47 Confronto delle FRF tra il punto difettato 3 (in verde) e il punto non difettato III (in rosso)

4.3 Discussione delle misure effettuate con il martello strumentato e confronto con le misure acustiche

Per una maggior chiarezza sulla lettura dei dati è riportata in appendice, per ciascuno dei 13 punti analizzati, la frequenza di ogni picco con il corrispondente valore, ottenute dalle FRF delle prove con il martello strumentato. Sono riportate in grassetto le misure del range di interesse.

4.3.1 Punti difettati

Effettuando un confronto con gli autospettri generati per eccitazione acustica, si trova che anche questi hanno un range di frequenze in cui il valore della funzione cresce molto, di uno o due ordini di grandezza. Il range corrisponde proprio a quello caratteristico dei non difettati, e per ogni punto analizzato corrisponde perfettamente ai precedenti valori in grassetto.

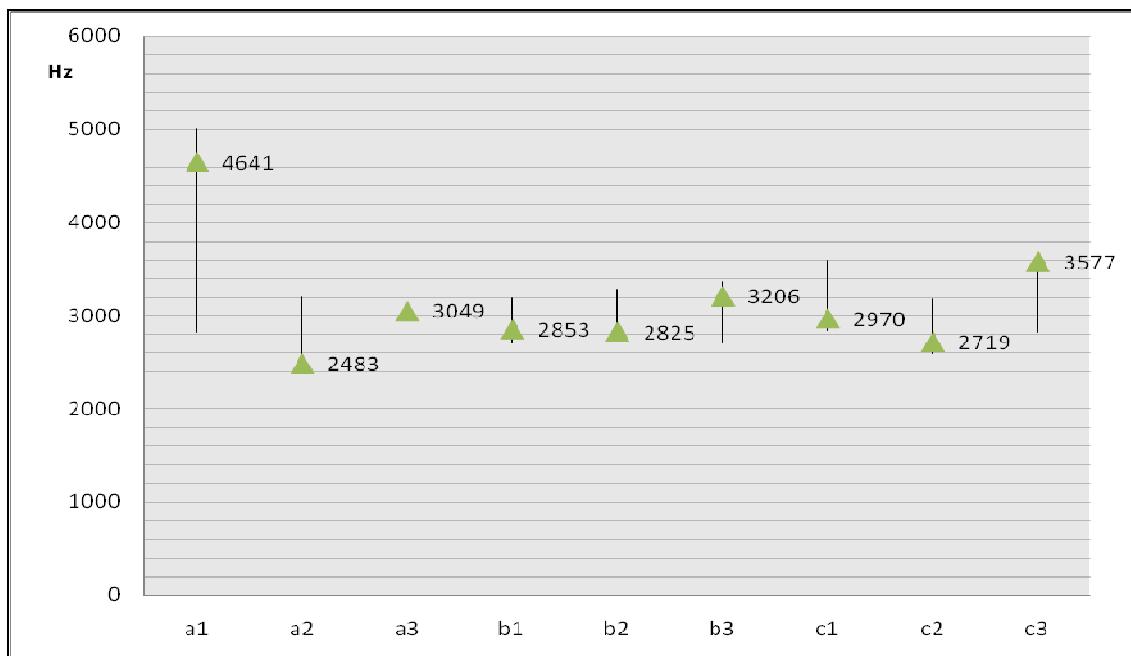


Figura 4-48 Range di frequenze caratteristico di ogni difetto negli autospettri (linea nera) e frequenza in cui la mobilità è massima nelle FRF (triangolo verde)

È stata inoltre indagata l'eventuale corrispondenza tra mobilità della FRF nei vari punti difettati e spessore del disco con il quale è stato realizzato il difetto.

Nel grafico seguente sono confrontati i valori, prendendo per ogni punto il massimo valore assunto dalla FRF. Si deduce che non c'è una legame diretto tra spessore (linea blu) e mobilità (linea rossa).

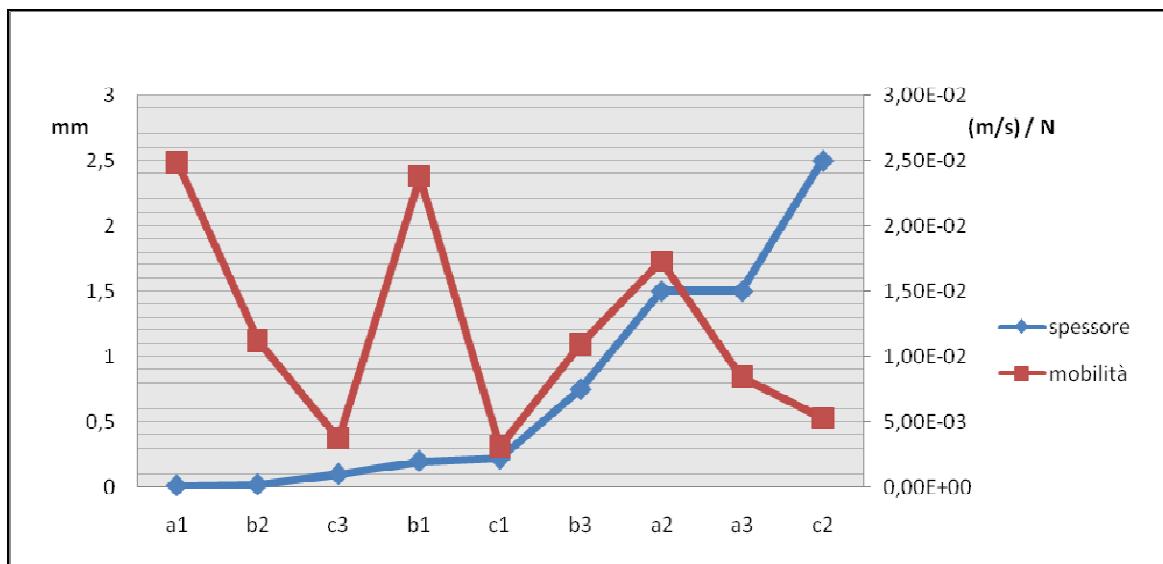


Figura 4-49 Confronto tra spessore e massima mobilità nei punti difettati

4.3.2 Punti non difettati

Quello che emerge leggendo questi dati è che nei punti non difettati la mobilità è minore che nei punti difettati, in particolare sono presenti solo alcuni picchi, che possiamo pensare essere picchi di risonanza della struttura. Si vede chiaramente anche dagli autospettri generati per eccitazione acustica che tra 2500 Hz e 3500 Hz la funzione assume valori estremamente bassi. In particolare non presenta, per nessuno dei 4 punti, picchi di valore significativo.

5 Conclusioni

L'attività svolta ha posto l'attenzione sull'applicabilità di una tecnica completamente non invasiva, basata su un sistema acustico di eccitazione strutturale e di un sistema ottico di misura delle vibrazioni, per la diagnosi e il monitoraggio dello stato di salute di affreschi antichi. Sono state svolte inizialmente prove di tipo *impact* con il martello strumentato per avere informazioni sul comportamento dinamico e vibratorio della struttura, in particolare del diverso modo di vibrare dei punti difettati e non difettati. Per avere una tecnica completamente non invasiva, l'eccitazione del martello è stata successivamente sostituita dall'eccitazione acustica.

Dalla lettura dei grafici ottenuti è possibile trarre le seguenti conclusioni:

1. L'analisi delle FRF ottenute con i test con il martello strumentato ha dimostrato che vi sono sostanziali differenze nel modo superficiale di vibrare tra punti difettati e non difettati. Risultano quindi evidenti l'applicabilità di questa metodologia nella diagnosi degli affreschi e l'efficacia dell'analisi delle FRF nell'identificazione di eventuali delaminazioni tra lo stato di intonaco e il muro. Si è mostrato che nei test con il martello strumentato la mobilità dipende fortemente dal tipo di difetto ed è molto maggiore che nei punti non difettati.
2. La forma delle FRF dei punti difettati dipende fortemente dal materiale utilizzato per emulare il vuoto. Il massimo valore della mobilità però non è direttamente proporzionale allo spessore. Fattori che potrebbero influenzare la forma delle FRF potrebbero essere la massa, la densità, la costante elastica o il coefficiente di smorzamento del materiale.

3. I test sul pannello di prova confermano che i picchi caratteristici dei punti difettati, trovati con il martello strumentato, sono chiaramente visibili anche se il pannello è eccitato da onde acustiche. In entrambi i casi, in un range tra 2500 Hz e 3500 Hz, la funzione assume valori estremamente elevati se è presente un difetto mentre assume valori bassi e non presenta picchi di rilievo per i punti sani.
4. Utilizzando un sistema di eccitazione acustica non è possibile determinare, se non in maniera approssimativa, il valore della forza di input. Per questo motivo risultano particolarmente difficili la realizzazione e la lettura dei grafici delle FRF. Nelle prove svolte questo problema è stato risolto in quanto si sono rivelate sufficienti l'analisi dell'autospettro e della coerenza per individuare il *range* in cui si trovano i picchi caratteristici dei difetti. Sono state in ogni caso realizzate le FRF delle prove acustiche usando come input il segnale uscente dalla cassa.
5. Effettuando un confronto dei risultati con quelli ottenuti da esperimenti precedenti [3.] si nota come, realizzando le prove su un muro vero e non su un pannello di cemento, le FRF presentano comunque un *range* di frequenze superiori a 2000 Hz e inferiori a 4000 Hz dove la funzione cresce di uno o due ordini di grandezza solo se il difetto è presente. I diagrammi della coerenza sono simili a quelli ottenuti; anche in questo caso la forma delle funzioni dipende fortemente dalla tipologia di difetto.

6. Nelle prove svolte erano noti a priori posizione e dimensioni dei difetti; in questo caso è stato semplice, mediante un confronto tra i vari dati di output, vedere quale è la risposta dinamica nei punti con i difetti e come varia il comportamento in funzione del materiale con cui è stato emulato il vuoto. Questo va preso in considerazione applicando la metodologia al caso reale, in quanto per avere dati significativi su di una struttura, posta in eccitazione, della quale non si conosce la risposta dinamica occorre analizzare numerosi punti ed effettuare confronti tra questi. In particolare occorre osservare se si presenta un qualche *range* di frequenze nel quale alcuni punti misurano alti valori di ampiezza (in caso di autospettro) o mobilità (in caso di FRF), mentre altri punti presentano valori irrisori.

Bibliografia

1. P. Castellini, E. Esposito, N. Paone, E. P. Tomasini *Non-invasive measurement of damage of fresco paintings and icon by laser scanning vibrometer: experimental results on artificial samples and real works of art.* In Measurement 28 (2000)
2. E. Esposito, E. P. Tomasini *Non destructive techniques and instruments for the diagnostics of the Cultural Heritage*
3. P. Castellini, N. Paone, E.P. Tomasini *The Laser Doppler Vibrometer as an Instrument for Nonintrusive Diagnostic of Works of Art: Application to Fresco Painting.* In Optics and Lasers in Engineering 25 (1996)
4. L. Campanella et Al. *Chimica per l'Arte* Zanichelli Editore (2007)
5. *Analisi non distruttive* UNITÀ TECNICO-SCIENTIFICA MATERIALI E NUOVE TECNOLOGIE – ENEA
6. E. Esposito, A. Del Conte, A. Agnani, R. Stocco *Impiego integrato di strumentazione NDT nel parco archeologico di Pompei.* In Conoscere Senza Danneggiare (2006)
7. R. J. Prazenica, A. J. Kurdila, J. F. Vignola *Spatial filtering and proper orthogonal decomposition of scanning laser Doppler vibrometry data for the nondestructive evaluation of frescoes.* In Journal of Sound and Vibration 304 (2007)
8. E. Esposito *Laser Doppler Vibrometry*

Appendice I: Risultati Numerici

Punto A1

Hz	(m/s) / N
382	3,42e-03
620	1,96e-04
931	2,98e-04
1553	5,84e-04
1918	5,80e-04
2825	1,24e-03
2957	5,67e-04
3015	5,02e-04
3075	5,50e-04
3205	1,40e-03
3566	6,11e-04
4022	2,07e-03
4641	2,49e-02

Punto A2

Hz	(m/s) / N
550	2,04e-03
630	7,02e-04
931	1,73e-03
1559	8,50e-04
1918	4,93e-04
2483	1,73e-02
2689	2,58e-03
2864	2,65e-03
3000	8,49e-04
3197	6,53e-04
3803	4,67e-04

Punto A3

Hz	(m/s) / N
382	5,16e-03
630	1,37e-03
930	1,33e-03
1632	2,25e-04
1775	2,21e-04
2824	5,35e-03
2963	6,16e-03
3049	8,49e-03
3214	4,99e-03
3812	3,42e-04

Punto B1

Hz	(m/s) / N
550	1,72e-03
629	9,38e-04
930	1,59e-03
1559	1,26e-03
2575	5,83e-03
2702	9,75e-03
2853	2,38e-02
2957	1,94e-02
3016	1,65e-02
3075	2,06e-02
3191	2,36e-02

Punto B2

Hz	(m/s) / N
629	4,71e-03
1639	2,00e-03
2825	1,12e-02
3154	7,76e-03
3206	8,04e-03
3280	9,92e-03
4026	2,03e-03

Punto B3

Hz	(m/s) / N
550	2,48e-03
629	3,21e-04
933	1,83e-03
1544	4,27e-04
1639	5,22e-04
2702	2,86e-03
2862	6,40e-03
2964	6,18e-03
3076	4,25e-03
3206	1,09e-02
3290	8,01e-03
3371	7,72e-03

Punto C1

Hz	(m/s) / N
382	2,33e-03
629	1,93e-04
930	1,37e-04
1558	8,69e-04
1924	1,01e-03
2830	2,48e-03
2970	3,10e-03
3217	2,10e-03
3370	3,18e-04
3586	6,94e-04

Punto C2

Hz	(m/s) / N
550	1,14e-03
630	9,24e-04
931	1,29e-03
1564	7,21e-04
2594	2,12e-03
2719	5,27e-03
2865	3,41e-03
3016	8,27e-04
3176	9,35e-04

Punto C3

Hz	(m/s) / N
382	3,16e-03
630	3,76e-04
934	3,72e-04
1564	3,27e-04
1922	3,73e-04
2827	9,03e-04
2974	4,19e-04
3017	4,66e-04
3094	5,42e-04
3307	1,11e-03
3577	3,71e-03
4035	8,40e-04

Punto I

Hz	(m/s) / N
629	2,09e-03
935	3,62e-04
1559	1,42e-03
1649	3,74e-04
1926	3,40e-04
2597	7,37e-04
3581	4,78e-04

Punto II

Hz	(m/s) / N
383	4,24e-04
629	1,31e-03
931	2,15e-04
1556	1,62e-03
1925	5,81e-04
2583	5,73e-04
3586	6,53e-04

Punto III

Hz	(m/s) / N
629	1,99e-03
930	4,78e-04
1560	1,29e-03
1643	2,47e-04
1924	4,20e-04
2585	5,90e-04
3592	5,20e-04

Punto IV

Hz	(m/s) / N
382	3,15e-04
629	1,47e-03
934	3,59e-04
1562	1,41e-03
1922	5,45e-04
2590	4,28e-04
3600	6,19e-04

Appendice II: La Biocalce®



LA CALCE NATURALE CHE RESPIRA®

BIOCALCE®

INTONACO



NHL 3.5
EN 459-1
CALCE IDRAULICA
NATURALE



CCA
BEST
CALCE ECO
COMPATIBILE



SALUTE
RADON
ESENTE
POZZOLANA
NATURALE



SALUTE
ANTI-BATTERICO
NATURALE



CE
EN 998-1
INTONACO
NATURALE



RESTAURO
WTA
INTONACO
NATURALE
DI FONDO

Intonaco eco-compatibile di pura calce naturale NHL 3.5 conforme a norma EN 459-1 per l'intonacatura traspirante di murature nell'Edilizia del Benessere® e nel Restauro Storico posto sotto tutela dalle Soprintendenze dei Beni Ambientali e Architettonici. Testato e certificato come intonaco di fondo a norma WTA.

- *Naturale, poroso e altamente traspirante,
lascia il muro libero di respirare*
- *Protegge la muratura mantenendola
sana nel tempo*
- *Ideale per l'intonacatura delle facciate
di nuova costruzione, nel recupero
di pregio degli edifici e nel restauro storico*
- *Impasto morbido di facile applicazione
sia a mano che con l'impiego di intonacatrice*
- *Eco-compatibile, riciclabile come inerte*



BIOCALCE®
RESPIRA®

Codice Biocalce 20080409

BIOCALCE[®] INTONACO

CAMPI D'APPLICAZIONE

Intonacatura traspirante protettiva di murature portanti e di tamponamento in laterizio, mattone, tufo, pietra e miste interne ed esterne. Intonacatura raso pietra.

BIOCALCE INTONACO è particolarmente adatto per intonacare nell'Edilizia del Benessere[®] in Bioedilizia dove l'origine rigorosamente naturale dei suoi ingredienti garantisce il rispetto dei parametri fondamentali di porosità, igroscopicità e traspirabilità richiesti.

BIOCALCE INTONACO è idoneo per intonacature nel Restauro Storico la scelta di ingredienti della tradizione come calce naturale, pozzolana naturale, pietra, marmo e granito sapientemente dosati garantisce interventi conservativi nel rispetto delle strutture esistenti e dei materiali originari.

BIOCALCE INTONACO è testato e certificato come intonaco di fondo a norma WTA per spessori di intonaco superiori ai 4 cm nei risanamenti di murature umide e saline fuori terra prima dell'applicazione dell'intonaco di risanamento BIOCALCE ZOCCOLATURA.

Non utilizzare

Su supporti sporchi, decoesi, polverulenti, vecchie pitture o rasature. Asportare dalle superfici le incrostazioni saline interstiziali.

PREPARAZIONE DEI SUPPORTI

Il fondo deve essere pulito e consistente, privo di parti friabili, di polvere e muffe. Eseguire la pulizia delle superfici con idrosabbiatura o sabbiatura e successivo idrolavaggio a pressione per rimuovere completamente residui di precedenti lavorazioni (scialbi, vecchie rasature, concrezioni saline) che possano pregiudicare l'adesione. Asportare la malta d'allettamento inconsistente tra i conci murari. Utilizzare BIOCALCE MURATURA con la tecnica del rincoccio e/o del cuci-scuci per ricostruire le parti mancanti della muratura in modo da renderla planare. Bagnare sempre i supporti prima dell'applicazione dell'intonaco.

VOCE DI CAPITOLATO

Nell'Edilizia del Benessere[®] in Bioedilizia si realizzerà un intonaco ad altissima porosità, igroscopicità e traspirabilità per muri interni ed esterni con malta di pura calce idraulica naturale NHL 3,5, pozzolana naturale extrafine e inerti di sabbia silicea e calcare dolomitico in curva granulometrica 0-2,5 mm (tipo BIOCALCE INTONACO). Le caratteristiche richieste, ottenute esclusivamente con l'impiego di materie prime di origine rigorosamente naturale, garantiranno un'altissima traspirabilità dell'intonaco (coefficiente di resistenza al vapore acqueo $\mu \leq 6$), un'elevata porosità della malta indurita ($\geq 40\%$), una naturale conducibilità termica (pari a $0,54 \text{ W/mK}$) ed una notevole aria occlusa in fase d'impasto ($\geq 20\%$).

Nel Restauro Storico, inoltre, l'intonaco traspirante richiesto dovrà essere certificato WTA-Merkblatt 2-2-91 Sanierputzsysteme, raggiungendo i requisiti con il solo impiego di materie prime esclusivamente naturali.

L'intonaco naturale dovrà soddisfare anche i requisiti della norma EN 998/1 - GP / CS II / W1, adesione $0,2 \text{ N/mm}^2$, reazione al fuoco classe A1.

L'intonaco avrà uno spessore non superiore ai 20 mm, costituito da due strati dello spessore medio di 10 mm, fasce di livello, finitura a rustico sotto staggia, riquadratura di spigoli e angoli sporgenti, esclusi oneri per ponteggi fissi. L'applicazione sarà da eseguire a mano o con intonacatrice.

Resa BIOCALCE INTONACO $\approx 13 \text{ kg/m}^2$ per ogni cm di spessore.

Code B602 2018/05

MODALITÀ D'USO

Applicazione manuale: BIOCALCE INTONACO si prepara impastando 1 sacco da kg 25 con circa 5,1 litri d'acqua pulita in betoniera a tazza. L'impasto si ottiene versando prima l'acqua nella betoniera pulita ed aggiungendo poi tutta la polvere in unica soluzione. Attendere che il prodotto raggiunga la giusta consistenza in corso di miscelazione. Inizialmente (1-2 minuti) il prodotto appare asciutto; in questa fase non aggiungere acqua. Miscelare in continuo per 4-5 minuti fino ad ottenere una malta omogenea, soffice e senza grumi. Usare tutto il prodotto preparato senza recuperarlo nella successiva miscelata. Tenere il materiale immagazzinato in luoghi protetti dal caldo estivo o dal freddo invernale. Impiegare acqua corrente non soggetta all'influenza delle temperature esterne.

La qualità della malta, garantita dalla sua origine rigorosamente naturale, sarà compromessa dall'aggiunta di qualsiasi dose di cemento.

Applicazione meccanizzata: BIOCALCE INTONACO, grazie alla sua particolare finezza e plasticità tipica delle migliori calci idrauliche naturali, è ideale per applicazioni con intonacatrice. L'eccellente coesione della pasta allo stato fresco ne ha permesso la certificazione WTA con "l'estensione all'applicazione meccanizzata". Le prove di validazione di BIOCALCE INTONACO alle specifiche WTA sono state eseguite con intonacatrice Pft G4 attrezzata con i seguenti accessori: miscelatore alta turbolenza, statore/rotore D6-3 o D7-2,5, flangia di miscelazione rotoquiril, tubo portamateriale 25x37 mm, lunghezza metri 10/20 e lancia spruzzatrice.

BIOCALCE INTONACO si applica facilmente a cazzuola o a spruzzo come un intonaco tradizionale. Preparare il fondo eseguendo, se necessario, il rincoccio al fine di regolarizzare i supporti. Applicare il rinzaffo, formare le fasce di livello, intonacare, stagiare e frattazzare in fase di indurimento.

BIOCALCE INTONACO va posto in opera rispettando la regola d'arte in passate successive di spessore massimo di 2 cm anche se il prodotto sostiene spessori maggiori. Questo sistema tradizionale di applicazione evita la formazione di microfessure. I riporti d'intonaco su rinzaffo o precedenti passate devono avvenire quando lo strato sottostante è indurito. Si può ottenere la finitura desiderata in funzione della lavorazione scelta. Curare la maturazione del prodotto indurito inumidendolo nelle prime 24 ore.

Pulizia

BIOCALCE INTONACO è un prodotto naturale, la pulizia degli attrezzi si effettua con sola acqua prima dell'indurimento del prodotto.

ALTRÉ INDICAZIONI

Nell'intonacatura di murature d'epoca miste, oppure in muratura con zone tamponate in materiale diverso è consigliato l'inserimento nell'intonaco di una rete portaintonaco metallica o sintetica al fine di prevenire possibili fenomeni fessurativi.

Qualora si debba applicare BIOCALCE INTONACO su sottofondi compatti o inassorbenti applicare sempre preventivamente BIOCALCE RINZAFFO e verificarne l'avvenuta adesione.

LA CALCE NATURALE CHE RESPIRA®

DATI CARATTERISTICI

Tipo di malta	Malta per scopi generali per intonaci interni/esterni (GP)	EN 998-1
Natura chimica del legante	Pura Calce Idraulica Naturale NHL 3.5	EN 459-1
Intervallo granulometrico	0 - 2,5 mm	EN 1015-1
Massa volumica apparente della polvere	≈ 1,28 kg/dm³	UEAtc
Conservazione	≈ 12 mesi nella confezione originale	
Confezione	Sacchi 25 kg	

DATI TECNICI secondo Sistema di Qualità Biocalce

Acqua d'impasto	≈ 5,1 l / 1 sacco 25 kg	
Consistenza malta fresca 0'	≈ 174 mm	EN 1015-3
Massa volumica apparente della malta fresca	≈ 1,61 kg/dm³	EN 1015-6
Massa volumica apparente della malta indurita essicata	≈ 1,4 kg/dm³	EN 1015-10
pH impasto	≥ 12	
Aria occlusa / Aria occlusa intonacatrice	≥ 20%	EN 413-2
Temperatura limite di applicazione	da +5 °C a +35 °C	
Spessore max per strato	≈ 2 cm	
Resa	≈ 13 kg/m² per cm di spessore	

PRESTAZIONI FINALI

Coefficiente di resistenza alla diffusione del vapore acqueo (μ)	≤ 6	EN 1015-19
Assorbimento d'acqua per capillarità	Categoria W1	EN 998-1
Assorbimento idrico capillare W_{24}	≥ 1 kg/m²	EN 1015-18
Profondità d'infiltrazione dell'acqua 24 h	≥ 5 mm	EN 1015-18
Porosità	≥ 40%	WTA 2-2-91/D
Reazione al fuoco	Classe A1	EN 13501-1
Resistenza a compressione a 28 gg	Categoria CS II	EN 998-1
Aderenza al supporto (laterizio)	≥ 0,2 N/mm² - FP: B	EN 1015-12
Condutibilità termica ($\lambda_{10,4}$)	0,54 W/mK (valore tabulato)	EN 1745
Durabilità (al gelo-disgelo)	Valutazione basata sulle disposizioni valide nel luogo di utilizzo previsto della malta	EN 998-1
Indice di radioattività	I = 0,26	UNI 10797/1999

Rilevazione dati a 20 ± 2 °C di temperatura, 65 ± 5% U.R. e assenza di ventilazione. Possono variare in funzione delle specifiche condizioni di cantiere.

AWERTENZE

- Prodotto per uso professionale
- proteggere le superfici dal sole battente e dal vento
- curare la stagionatura inumidendo il prodotto indurito nelle prime 24 ore
- in caso di necessità richiedere la scheda di sicurezza
- per quanto non previsto consultare il Servizio Tecnico Info Biocalce Tel. 0536.811.516

Code Bio2 2008/03

BIOCALCE®
RESPIRA®

CERTIFICAZIONE ECO-COMPATIBILE

La Pura Calce Naturale NHL 3.5 di BIOCALCE soddisfa i requisiti stabiliti per il rilascio del Certificato di "Compatibilità Ambientale".

L'iter del Politecnico di Milano, Dipartimento di Scienze e Tecnologie dell'Ambiente Costruito - BEST, ha valutato una cospicua serie di parametri utili alla definizione di Compatibilità Ambientale:

- Inquinamento di natura chimica
è considerata innocua nei confronti dell'emissione di composti organici volatili (VOCs)
- Inquinamento di natura biologica
la naturale basicità della calce garantisce l'inattaccabilità del rivestimento da parte di muffe
- Inquinamento di natura fisica
i tenori di Urano 238, Torio 232 e Potassio 40 sono in accordo con i valori medi tipici delle calci idrauliche naturali
- Rilascio di prodotti di combustione nocivi
la natura incombustibile di BIOCALCE fa sì che non vengano emanati gas tossici di combustione
- Formazione di efflorescenze
la presenza di calcite ne riduce drasticamente la possibile comparsa

La Calce Idraulica Naturale di BIOCALCE, ha ricevuto quindi l'importante "Attestato di Conformità ai Criteri di Compatibilità Ambientale CCA" entrando nel novero dei prodotti eco-compatibili, ideali per il settore dell'Edilizia del Benessere®.

ATTESTATO DI MATERIALE NATURALE ECCELLENTE

La Pozzolana Naturale di BIOCALCE soddisfa i requisiti stabiliti per il rilascio dell'attestato di "Materiale Naturale Eccellente da Costruzione" certificato dall'Istituto Giordano.

Nel 1999 la Commissione Europea – Direttorato Generale "Ambiente, Sicurezza Nucleare e Protezione Civile" – ha pubblicato un documento contenente le linee guida riguardanti la radioattività naturale nei materiali da costruzione.

- Per identificare i materiali critici è stato stabilito un Indice di Radioattività "I". Il valore di controllo della radioattività ($I \leq 1$) è utilizzato per decidere se usare o meno un determinato materiale nella costruzione di un edificio.
- La maggior parte dei materiali attualmente in commercio presentano un "indice di radioattività" generalmente compreso fra 0,5 e 1 e pertanto, sebbene rientrino nei limiti stabiliti, se ne consiglia un estensivo impiego in edilizia.
- Solo pochissimi materiali possono vantare un basso "indice di radioattività" ($\leq 0,5$) e conseguente innocua presenza di gas radon all'interno degli edifici ($\leq 200 \text{ Bq/m}^3$).

I materiali che rispettano questo valore possono essere considerati esenti da qualsiasi restrizione, riguardo alla quantità impiegata e alla destinazione d'uso dell'edificio.

BIOCALCE, migliorata con Pozzolana Naturale, rientra nel limitato elenco dei materiali che hanno ottenuto l'attestato di "Materiale Naturale Eccellente da Costruzione" potendo vantare un "indice di radioattività" inferiore a 0,5, ideale per il settore dell'Edilizia del Benessere® in Bioedilizia.

GLI ELEMENTI NATURALI DI BIOCALCE INTONACO



Pura Calce
Naturale
NHL 3.5
Certificata



Pozzolana
Naturale
Extrafine
Certificata



Sabbieta
Silicea Lavata
di Cava Fluviale
(0.1-0.5 mm)



Sabbia
Silicea Lavata
di Cava Fluviale
(0.1-1 mm)



Calcare
Dolomitico
Granulato Medio
(0-2.5 mm)

Code B102 2008/03

La maggior parte delle malte e degli intonaci per Bioedilizia dichiara preferibilmente ciò che non è contenuto piuttosto che quanto vi è contenuto. Una maggiore trasparenza esigerebbe piuttosto una dichiarazione dell'origine naturale degli ingredienti effettivamente contenuti nel prodotto finito.

L'origine rigorosamente naturale di BIOCALCE tutela l'ambiente, il consumatore e la sua salute.

www.biocalce.it

BIOCALCE® è un brand di **KERAKOLL**
the innovation group

Via dell'Artigianato, 9 41049 SASSUOLO MO

Tel 0536.816.511 Fax 0536.816.581

Sistema Qualità Certificato ISO 9001 ICMQ N. 421

Info SERVIZIO TECNICO
Biocalce Tel. 0536.811.516

Biocalce®, La Calce Naturale che Respira®, Biocalce
Respira®, L'Edilizia del Benessere®, La Casa che Respira®
sono marchi registrati in Italia e in altri Paesi. © 2006.

Codice Biocalce
00000000000000000000000000000000

Le presenti informazioni sono aggiornate a Marzo 2008; si precisa che esse possono essere soggette ad integrazioni ed variazioni solo se entrate direttamente da parte di KERAKOLL SpA; pertanto eventuali aggiornamenti, si potrà consultare il sito www.biocalce.it. KERAKOLL SpA risponde, pertanto, della validità, effettività ed aggiornamento delle proprie informazioni solo se entrate direttamente dal suo sito.
La scheda tecnica è redatta in base alle nostre migliori conoscenze tecniche e applicative. Non potendo tuttavia intervenire direttamente sulle condizioni dei cantieri e sulla esecuzione dei lavori, essa rappresenta una indicazione di carattere generale che non vincola in alcun modo la nostra Compagnia. Si consiglia pertanto una prova preventiva al fine di verificare l'idoneità del prodotto all'impiego previsto.

Ringraziamenti

Desidero prima di tutto ringraziare il mio relatore Dott. Ing. Luca Collini per l'opportunità che mi ha dato con questa tesi, per la disponibilità e per la fiducia che ha dimostrato nei miei riguardi.

Un altro sentito ringraziamento è dovuto alla Dott.ssa Ing. Silvia Carra, che si è mostrata preziosissima per tutta l'attività di laboratorio e per la lettura dei risultati.

Un grande ringraziamento va alla Dott.ssa Arch. Elisa Adorni per l'indispensabile aiuto nella realizzazione del pannello di prova, al Dott. Ing. Fabio Bozzoli per i consigli sulla parte acustica, ai tecnici di laboratorio e a Marco Ganzaroli per il supporto nelle fasi di allestimento del set-up e acquisizione dei dati.