
Capitolo quinto

Analisi dei segnali

In campo sperimentale non è difficile imbattersi in affermazioni e risultati tra loro discordanti, soprattutto nel campo della caratterizzazione dinamica. Basti pensare alla differenza di risultati a cui può portare la sperimentazione. A titolo di esempio si riportano due esperienze di “damage detection”²¹ recentemente presentate ad un convegno²² di ingegneria strutturale. La prima sperimentazione, condotta dal Dr. Kullaa, ha portato alla conclusione che, attraverso prove di caratterizzazione dinamica, è possibile localizzare una massa posata su una struttura. Il secondo esperimento, svolto dall’EMPA²³, consiste nell’effettuare una prova di caratterizzazione dinamica su un ponte²⁴ integro, in seguito praticare un danno considerevole, consistente nell’asportazione di una porzione orizzontale di pila, e ripetere i test; dall’analisi dei dati raccolti è emerso che c’è stata una modifica del comportamento ma la fonte non è localizzabile. La differenza fondamentale tra le due affermazioni precedenti consiste nel contesto in cui si svolgono le sperimentazioni: infatti la prima si basa su una struttura costruita in laboratorio mentre la seconda su una struttura reale. Questa è una constatazione da non trascurare quando vengono presentati dei risultati sperimentali, in quanto nei casi reali l’individuazione del comportamento è molto più complessa. Nel presente lavoro la sperimentazione si è svolta su un modello aderente alla realtà, quindi esemplifica bene una situazione che si può presentare nella pratica.

Una volta acquisiti i segnali occorre analizzarli: ciò richiede una certa sensibilità ed esperienza da parte dell’operatore. Nel caso di acquisizione nel tempo, è buona norma visualizzare a video le accelerazioni, in modo da individuare a priori se ci sono segnali che non vanno bene. Le cause per cui un segnale non è nitido possono essere diverse:

- Qualcosa nella strumentazione non funziona, ad esempio lo stesso accelerometro oppure un cavo danneggiato o ancora una BNC mal collegata. Tale tipologia di problema la si può risolvere a priori, prima dell’acquisizione vera e propria, facendone una a vuoto con gli accelerometri ancora smontati, in modo da non dover poi smontare un accelerometro eventualmente mal funzionante;
- Rumore di fondo dovuto a disturbi elettrici, collegamenti ossidati, attrezzatura insufficiente;

²¹ Termine con cui è indicato la determinazione della presenza del danno e la sua localizzazione.

²² European Meeting on Intelligent Structures, 22-28 Settembre 2001, Ischia.

²³ Laboratorio federale di prova dei materiali e di ricerca, Svizzera.

²⁴ Ponte che, dovendo essere demolito per ricostruirlo ad un livello inferiore e più largo, è stato concesso all’EMPA per effettuare prove di “damage detection”.

- Rumore della struttura. Se due accelerometri sono vicini ci si aspetta un comportamento simile, ma se c'è una crepa tra i due un sensore potrebbe essere disturbato più dell'altro.

La distinzione tra le ultime due cause non è semplice e dipende soprattutto dall'esperienza e dallo "spirito ingegneristico" del singolo individuo.

Per lo svolgimento della tesi sono state eseguite diverse tipologie di test, in base alla strumentazione utilizzata, per poi eseguire un confronto tra i vari metodi. Il confronto è stato eseguito analizzando la densità spettrale di potenza²⁵, considerata come la funzione che permette di prendere visione dei risultati nel modo più oggettivo²⁶.

Le densità spettrali di potenza rappresentate nel seguito hanno subito una "lisciatura" (smooth), che consente una visione più chiara dei risultati. Tale operazione consiste nel sostituire ad un certo numero di punti un unico punto. Così facendo, ovviamente, la sensibilità della prova²⁷ si riduce. Nelle analisi eseguite tale operazione è stata fatta in modo tale che il Δf fosse pari a 0.1 Hz per tutte le prove.

Dopo le operazioni preliminari è possibile individuare le frequenze della struttura, mentre per le forme modali si rimanda al capitolo successivo, in cui si effettua un confronto tra le forme modali sperimentali e quelle ottenute dal modello numerico.

²⁵ L'analisi nel dominio del tempo ha luogo mediante la determinazione della funzione di autocorrelazione $R_x(\tau)$, che è una funzione matematica che descrive la relazione esistente tra lo spostamento di un punto x al tempo t e lo spostamento dello stesso punto al tempo $(t + \tau)$, cioè dopo un ritardo τ . L'espressione numerica della funzione di autocorrelazione è la seguente:

$$R_x = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x(t) \cdot x(t + \tau) dt$$

La densità spettrale di potenza non è altro che la trasformata di Fourier dell'autocorrelazione, si può scriverla come:

$$S_x(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} R_x(\tau) e^{-j\omega\tau} \cdot d\tau$$

e rappresenta la distribuzione di potenza del segnale in un certo intervallo di frequenza.

²⁶ Infatti la densità spettrale di potenza è fine a se stessa e non è dipendente da scelte, come ad esempio lo è la funzione di trasferimento per quanto riguarda il segnale di riferimento.

²⁷ Si ricorda che la risoluzione in frequenza è data, secondo la [2.17], da $1/T_{TOT}$, dove T_{TOT} è la durata in secondi della prova. Quindi più lunga è la prova e maggiore è la risoluzione, e quindi maggiore la lisciatura a parità di risoluzione finale dei vari test.

Analisi dei segnali pre-risarcitura

Nel seguito sono riportati i risultati dell'analisi dei dati provenienti dalla seconda serie di test, svolti con l'analizzatore. Esaminando i risultati delle varie prove si può osservare che quelle svolte con rumore ambientale sono le più semplici da analizzare e da interpretare. Purtroppo i due test ambientali non danno gli stessi risultati, ma vi sono delle differenze confermate anche dai test svolti con il martello.

I test eseguiti con martello strumentato, utilizzato unicamente come forzante, forniscono risultati, più semplici da interpretare, soprattutto se analizzati con l'accorgimento di eliminare l'effetto della parte iniziale di ogni martellata. L'eccitatore elettrodinamico fornisce risultati non facilmente comprensibili; questo, probabilmente, è dovuto al fatto che l'eccitazione sviluppata era molto elevata.

Nei test con martello gli accelerometri prossimi al punto di impatto sono caratterizzati da un'ampiezza molto elevata rispetto agli altri segnali, come d'altronde ci si poteva aspettare, e spesso danno luogo a risultati non soddisfacenti.

Nell'analisi dei segnali sono stati considerati per comodità tre casi studio:

- i segnali nel piano della facciata;
- i segnali fuori piano;
- le colonne.

Prima di descrivere i risultati della seconda serie di test, si preferisce evidenziare ciò che si è ottenuto dalla prima serie di prove, ovvero quelle con realizzate con l'analizzatore. Come anticipato al paragrafo "I test pre-intervento" a pag. 107, i risultati sono a carattere generale, piuttosto che specifici per la struttura in esame.

Come primo risultato è stata notata la variazione dei picchi di risonanza in seguito alla presenza o meno dello shaker sulla struttura. Al riguardo si riporta in figura 40 il confronto tra due test realizzati con il martello strumentato e l'analizzatore. La differenza tra i due picchi non è trascurabile: ciò dovrebbe far riflettere ogni qualvolta si utilizza un eccitatore su una struttura di modeste dimensioni, ad esempio ad una passerella pedonale. La presenza dello shaker influisce sulle frequenze della struttura sia per mezzo della sua massa sia per la posizione che occupa; risulta infatti evidente come la disposizione dello shaker vada a modificare in prevalenza la frequenza associata alla prima forma modale nel piano rispetto ad altre. Dal punto di vista qualitativo, la presenza dello shaker comporta un abbassamento della

frequenza, come peraltro era prevedibile pensando alla relazione che intercorre tra la frequenza e la massa di un oscillatore semplice²⁸.

Tutti i test sono stati eseguiti con lo shaker sulla struttura, anche se questo non veniva utilizzato, al fine di poterli poi confrontare tra loro.

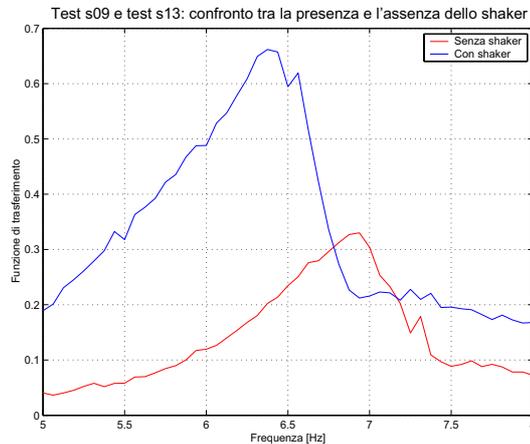


Figura 40 - Confronto tra la presenza o meno dello shaker sulla struttura.

Dai primi test è stato inoltre possibile verificare la dipendenza dei picchi dall'eccitazione fornita alla struttura. Infatti agendo sulla manopola che regola l'intensità di corrente fornita allo shaker si possono notare dei cambiamenti nei valori delle frequenze proprie. L'intensità di corrente è correlata con l'ampiezza di movimento dello shaker; di conseguenza maggiore è il percorso che le masse devono percorrere a parità di frequenza e maggiore è l'eccitazione trasmessa alla struttura. Si può quindi affermare che con l'aumentare dell'eccitazione si ha un abbassamento delle frequenze.

²⁸ Tale relazione risulta essere $\omega = \sqrt{k/m}$ dove $\omega = \text{frequenza}$, $k = \text{rigidezza}$, $m = \text{massa}$.

Bisogna, però, precisare che la comparazione della struttura con un oscillatore semplice non è proprio corretta ma per una semplice e chiara esemplificazione del fenomeno la si può considerare efficiente.

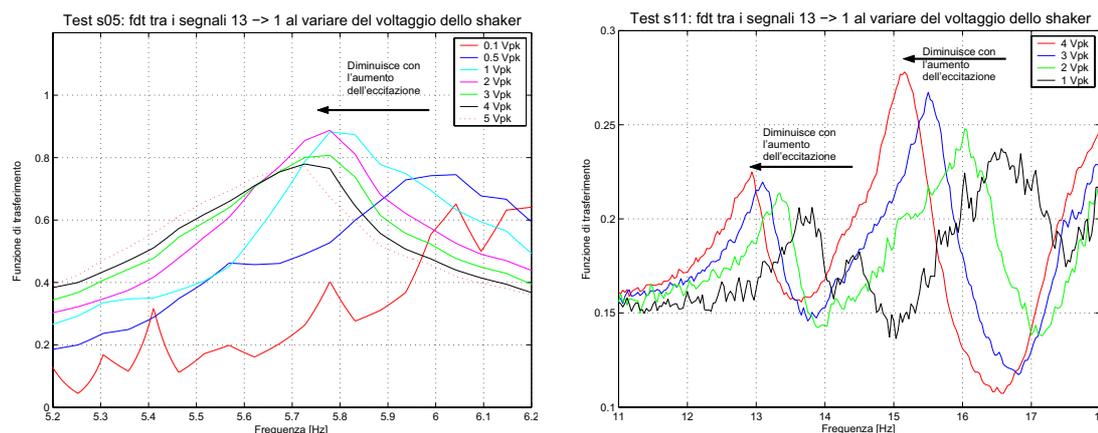


Figura 41 – Esempi di variazione della posizione dei picchi al variare dell'intensità della forzante con prove eseguite con lo shaker (nelle due figure i picchi non sono rappresentativi della stessa frequenza).

Occorre però precisare che quest'ultima osservazione deriva da prove che, proprio per l'eccessiva eccitazione, non hanno portato a risultati soddisfacenti per la caratterizzazione della struttura, e pertanto si preferisce fare affidamento ai test svolti nella seconda serie di test.

I segnali nel piano della facciata

Nel seguito sono presentati i risultati ottenuti dalla seconda serie di test svolti con l'acquisizione.

A pagina 121 è visibile un confronto, basato sulle densità spettrali di potenza, tra le due prove ambientali. Si può notare la somiglianza tra i due test, pur essendoci delle piccole differenze. Prima fra tutte la mancanza nel test a13 di picchi netti come nella a01, infatti, come è possibile notare, questi assumono andamenti frastagliati. Inoltre in alcuni segnali del test a13, in prossimità dei 25 Hz, sono presenti dei picchi che non ritroviamo nel test a01; tali picchi sono presenti nei segnali 1-5-8-12 e nel 9 anche se lievemente, cioè in quasi tutti i segnali posizionati sulla parte destra della struttura (si veda figura 37), tali da evidenziare un moto di una parte della struttura.

Queste differenze possono essere dovute ad una variazione della forza eccitante, per cui in base all'intensità assunta da quest'ultima, si instaurano nuovi meccanismi e compaiono nuove frequenze; sembra che la situazione tenda ad evolvere con l'aumento dell'eccitazione. È da precisare che la zona dove sono stati eseguiti i test è praticamente priva di traffico veicolare e pertanto l'effetto del vento risulta essere preponderante. Il giorno del test a13 il vento era più sostenuto rispetto al giorno del test a01. Inoltre, come si vedrà in seguito, l'ipotesi di una maggiore eccitazione viene

confermata anche dai test con il martello, mentre con lo shaker sono stati ottenuti risultati scadenti, forse in seguito ad un'eccitazione troppo elevata per una struttura di questo tipo.

Per analizzare i test con il martello, affinché il trattamento del segnale abbia un esito positivo e non dia luogo a frequenze spurie, è necessario eliminare la parte iniziale dell'impatto del martello sulla struttura. Per raggiungere tale scopo è stata elaborata una routine in Matlab[®] che esclude dal segnale dell'accelerazione, subito prima dell'impatto del martello, un numero arbitrario di punti. Quanto si è vicini al momento dell'urto, tanto maggiore è l'eccitazione della struttura. Quindi agendo sul numero di punti in maniera appropriata è possibile evidenziare l'andamento dei segnali al variare dell'intensità della forzante.

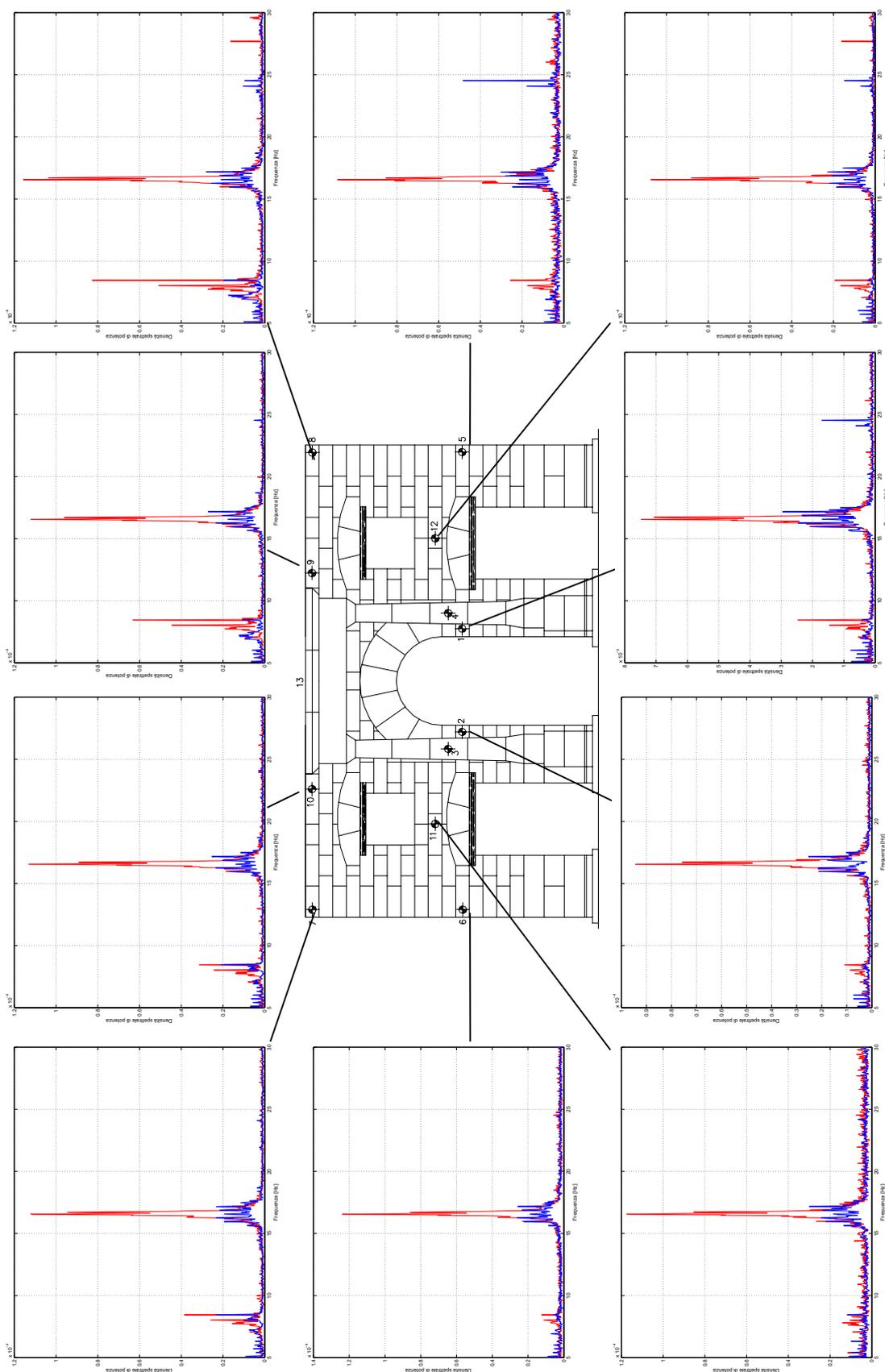


Figura 42 - Confronto tra le due prove ambientali per quanto riguarda i segnali nel piano (in rosso il test a01 e in blu il test a13).

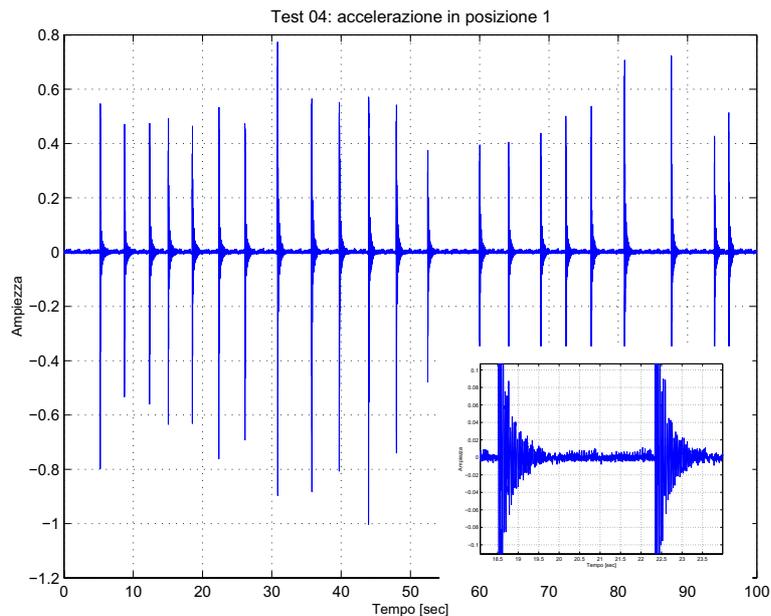


Figura 43 - Rappresentazione nel dominio del tempo di un segnale ottenuto da una prova con eccitazione il martello (campionamento a 500 Hz).

Nei grafici successivi è indicato in legenda il numero di punti rimossi dal segnale originario. È bene ricordare che i test a04 e a05 sono stati effettuati con un campionamento a 500 Hz, è quindi semplice risalire all'intervallo di tempo sottratto. Il segnale registrato visualizza la durata della martellata con il consecutivo tempo di smorzamento, come è visibile in figura 43, che è di poco superiore ad 1 secondo. Sempre con riferimento ai test a04 e a05, il segnale registrato lontano dall'impatto, ad esempio a 650 punti dopo ogni martellata (praticamente si tratta di rumore ambientale), permette di ottenere qualitativamente gli andamenti delle prove ambientali, in particolare modo quelli del test a13. Infatti, come già nella prova 13, anche nei due test con il martello è presente, su alcuni segnali, il picco prossimo ai 25 Hz, inoltre risultano frastagliate le frequenze a 16 Hz e a 34 Hz.

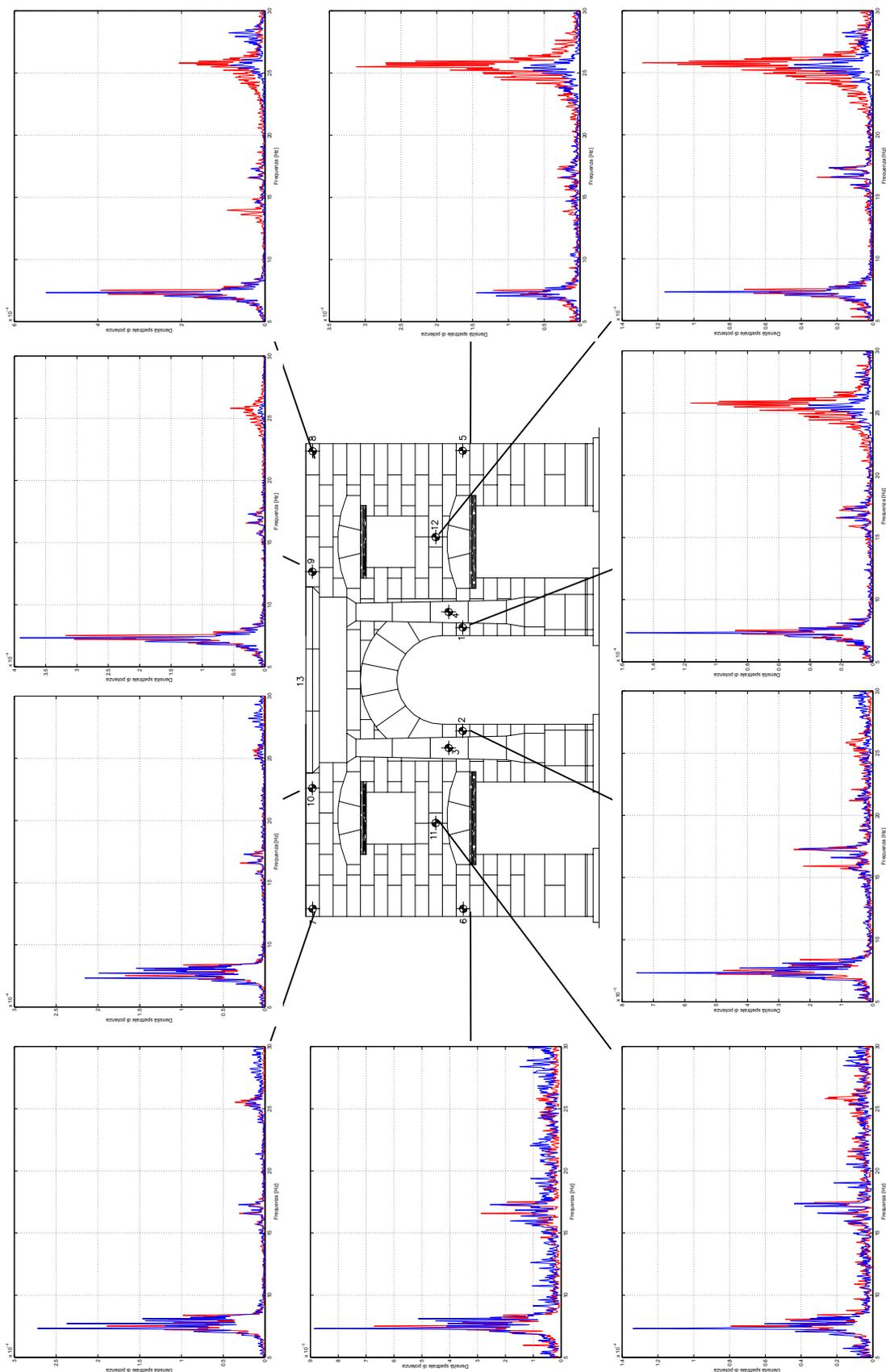


Figura 44 - Confronto test con il martello con 400 punti elisi (in rosso il test a04 e in blu il test a05).

Considerando il test a04, con un minore numero di punti elisi rispetto ai precedenti 650, si ottiene un incremento del picco a 25 Hz su tutti i segnali, anche dove prima non era presente. In particolare, elidendo 100 punti sono stati ottenuti andamenti delle frequenze poco nitidi e sono insorte nuove frequenze, per cui si presume che ad un livello così elevato di intensità del colpo si instaurino non linearità rilevanti.

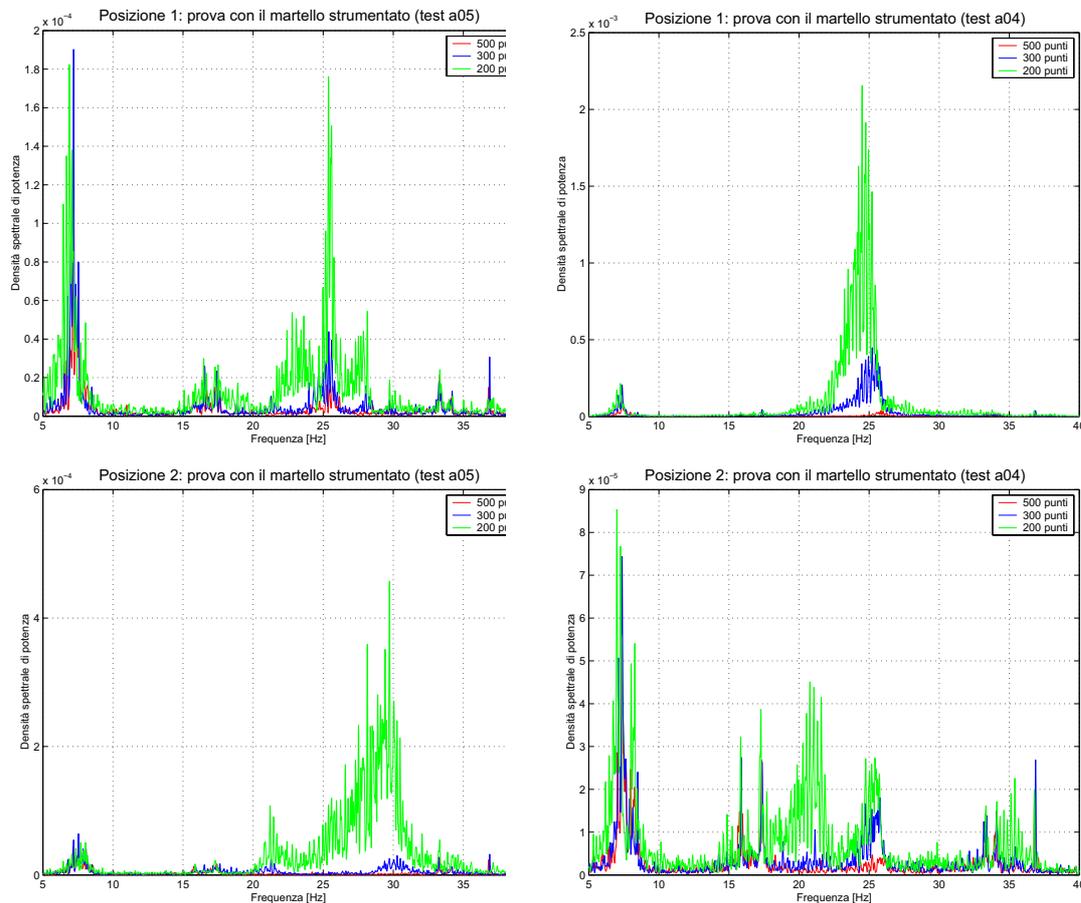


Figura 45 - Rappresentazione dei segnali 1 e 2, al variare del punto di impatto del martello. A sinistra si è colpito nella posizione 6 (lato sinistro della struttura) mentre a destra si è colpito in 5 (lato destro della struttura).

Dall'analisi congiunta dei test a04 e a05 è possibile constatare che per valori non troppo elevati dell'eccitazione gli andamenti delle densità spettrali di potenza non cambiano, ma con l'aumentare della forzante i risultati appaiono tra loro differenti. Infatti, come si vede dalla figura 45, colpendo ad esempio il lato destro, i segnali su quel lato evidenziano un picco in particolare mentre i segnali sull'altro lato sono più ricchi di frequenze. Questo fatto non si verifica a basse eccitazioni. Inoltre la situazione a 16 Hz, che nelle prove ambientali è discrepante, sembra essere più

chiara e più propensa ai risultati del test a13, a dimostrazione che maggiore energia è impegnata nel test a13 piuttosto che a01.

Comunque sia il test a04 che a05 danno un risultato concordante: con le prove con il martello si evidenzia un picco intorno ai 14 Hz che nelle ambientali non era presente. Tale picco manifesta la propria presenza soltanto nei segnali 5 e 8, di cui si riportano le densità spettrali di potenza nella figura 46, evidenziando probabilmente un cinematismo locale della struttura.

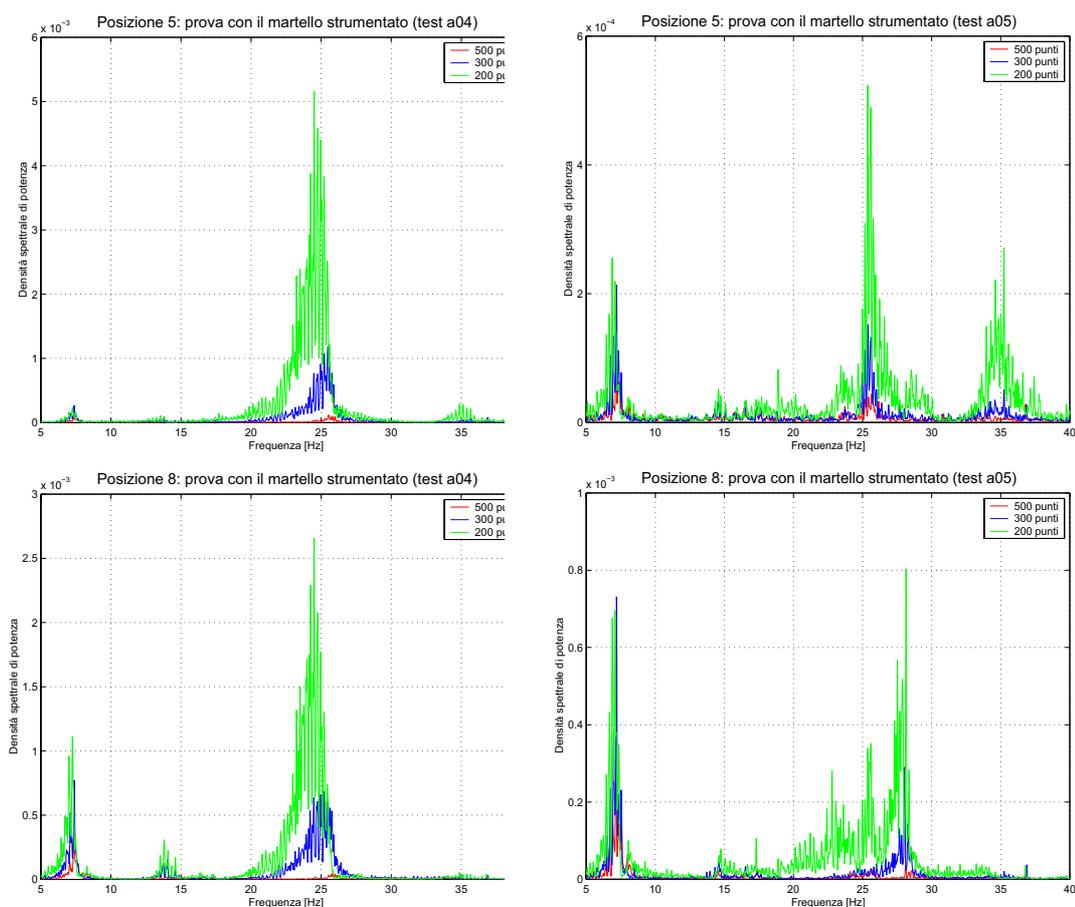


Figura 46 – Confronto delle densità spettrali di potenza dei segnali 5 e 8 dei test a04 e a05.

L'analisi attraverso la densità spettrale incrociata (cross spectral density) è altrettanto efficace, infatti appare chiara la presenza di un moto locale sul lato destro, sintomatico di un dissesto. Anche per questo caso sono riportate alcune immagini, in particolare modo della zona dove è stato identificato il dissesto. Dalla densità spettrale incrociata dei segnali 8, 9 non risulta nulla intorno ai 14 Hz, segno evidente che i due segnali non sono soggetti entrambi a quella frequenza; diversa è la