

situazione per i segnali 5, 8 che evidenziano il picco a 14.2 Hz, come d'altronde doveva verificarsi rappresentando un modo locale di quella porzione di struttura.

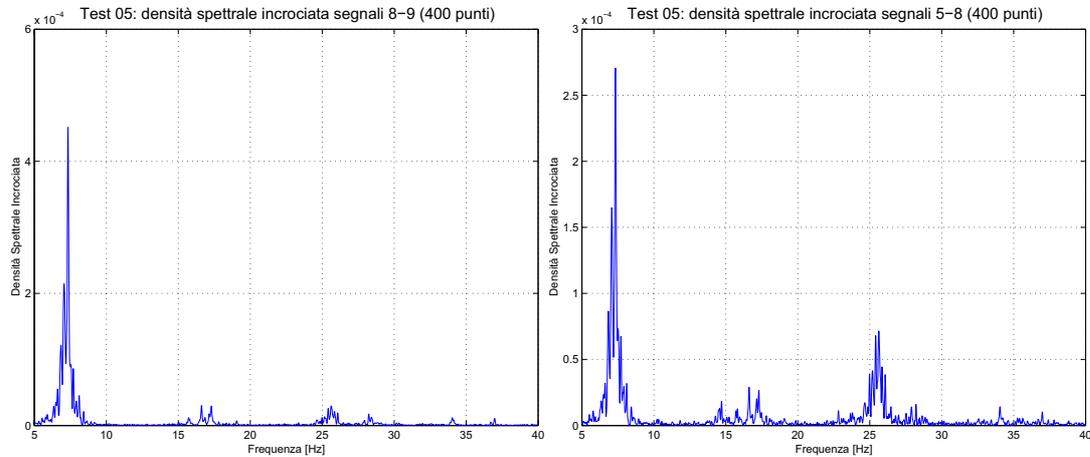


Figura 47 – Densità spettrale incrociata test a05. Tra i segnali 8-9 non si vede nulla, mentre sembra chiara la presenza tra i segnali 5-8 del picco a 14.2 Hz.

Grazie ai dati analizzati è possibile trarre un'interessante considerazione: i risultati migliori si ottengono per un lato della struttura quando si colpisce il lato opposto; ossia per avere dei “buoni” risultati sul lato sinistro occorre colpire il lato destro. Tale conclusione è stata confermata anche dalla coerenza dei segnali. Infatti, pur risultando una coerenza piuttosto bassa, segno evidente di una struttura molto rumorosa, è evidente che colpendo a destra la coerenza è migliore a sinistra e viceversa (figura 48, 49), almeno in corrispondenza delle frequenze più basse.

È doveroso ricordare che dalla coerenza ci si aspettava qualcosa di più in termini di localizzazione del danno, risultati purtroppo non ottenibili a causa della mancanza di tempo. A tale fine potrebbe essere interessante redire una mappatura sistematica delle coerenze e analizzare poi i risultati.

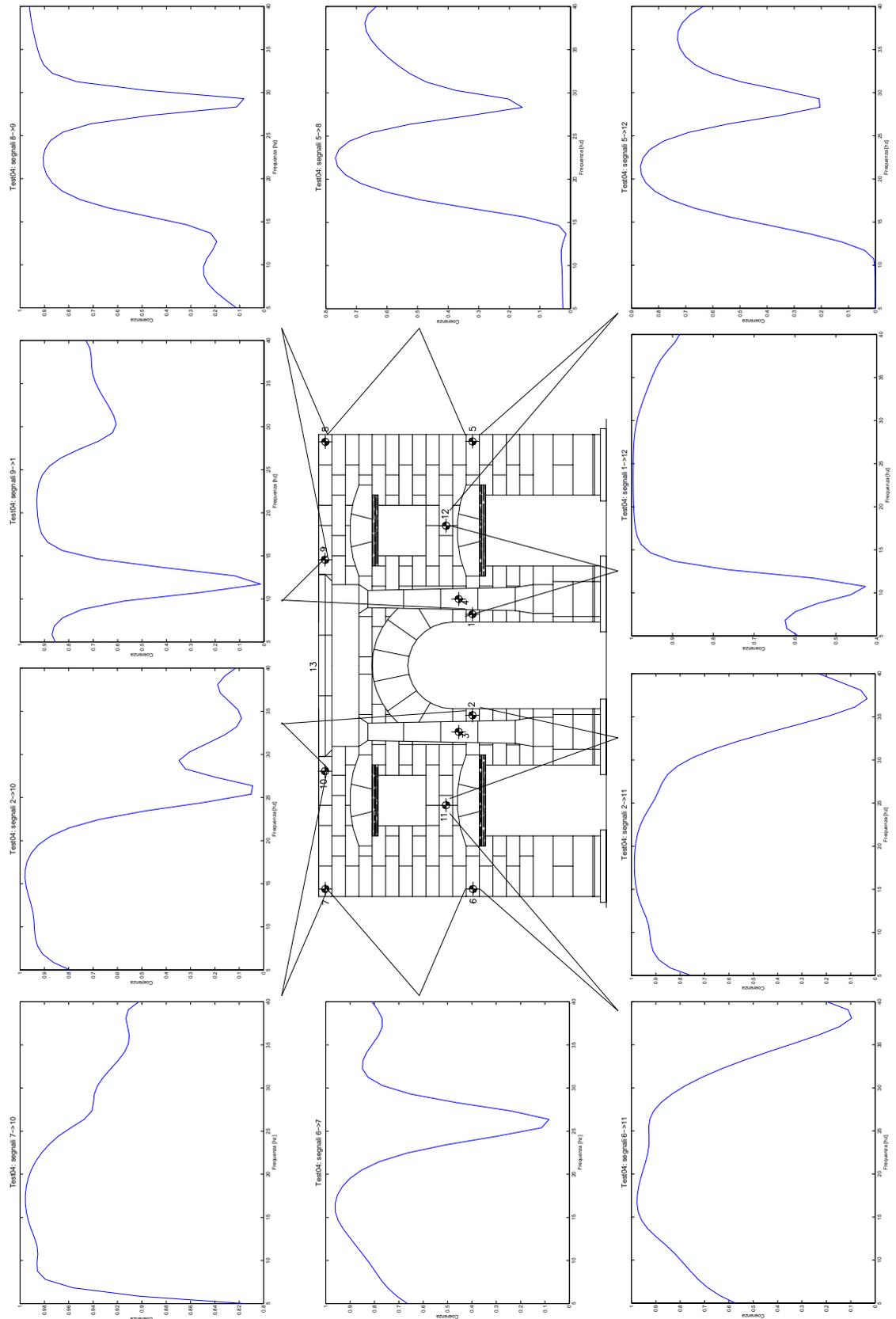


Figura 48 – Coerenza dei segnali del test a04.

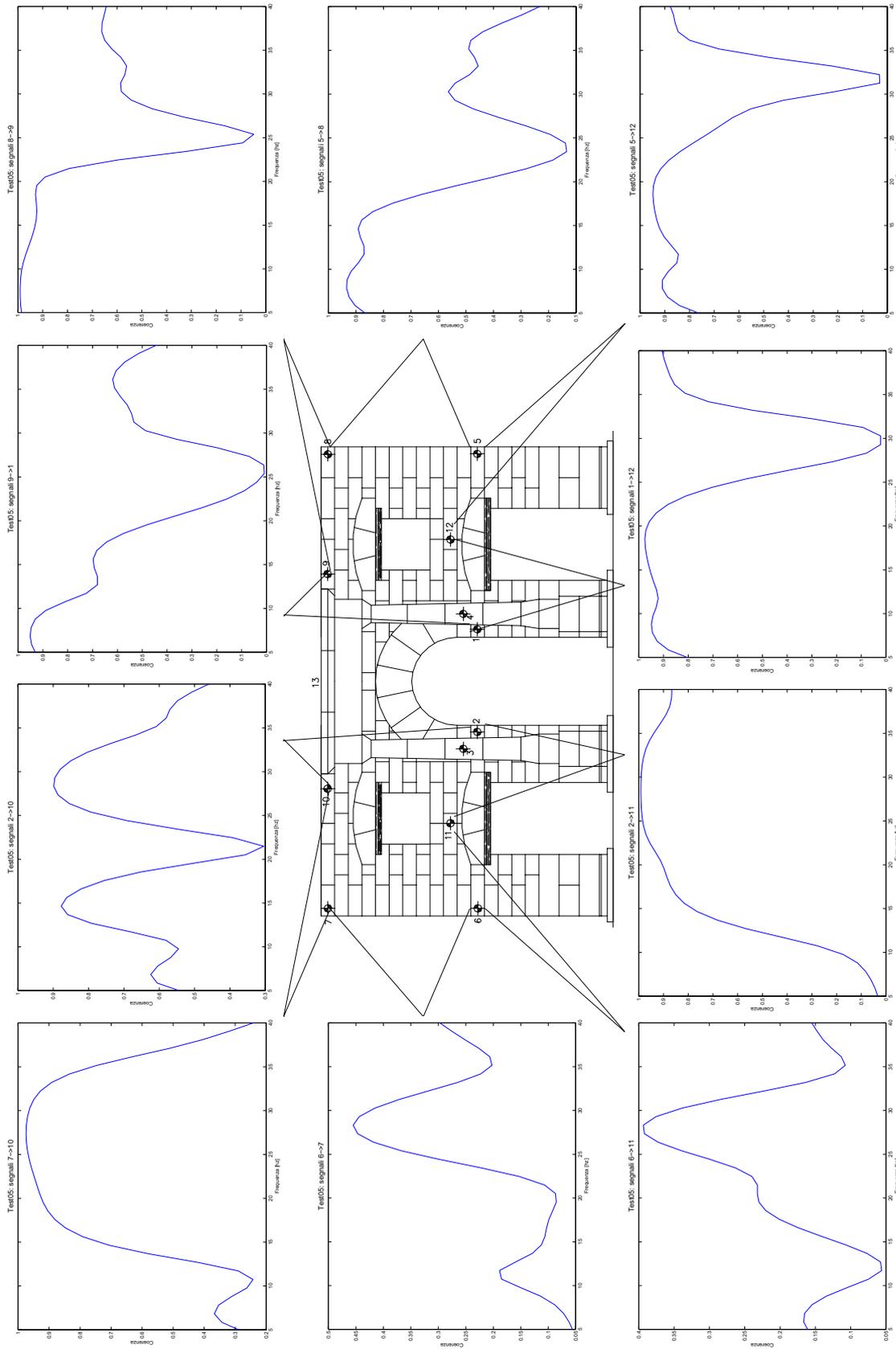


Figura 49 - Coerenza dei segnali del test a05.

Per concludere, con l'analisi dei segnali nel piano della struttura, si ritiene interessante notare che, anche nel caso di martello strumentato, si verifica la diminuzione della frequenza con l'aumento dell'eccitazione come già affermato al paragrafo "Analisi dei segnali pre-risarcitura" a pag. 117 a proposito delle prove con lo shaker. Questo fatto dipende, probabilmente, dal comportamento non lineare della struttura. Quindi un'energia maggiore invalida l'ipotesi di piccoli spostamenti. In aggiunta alle figure già riportate, nel seguito se ne riporta un'altra nella quale è possibile vedere tale fenomeno non solo sul picco a frequenza più alta, ma anche su quello a frequenza più bassa. L'altezza dei picchi dipende anch'essa dal contenuto energetico e quindi dalla maggiore o minore eccitazione. L'andamento asimmetrico dei picchi, in corrispondenza delle frequenze di risonanza, è un segno evidente del comportamento non lineare della struttura [37].

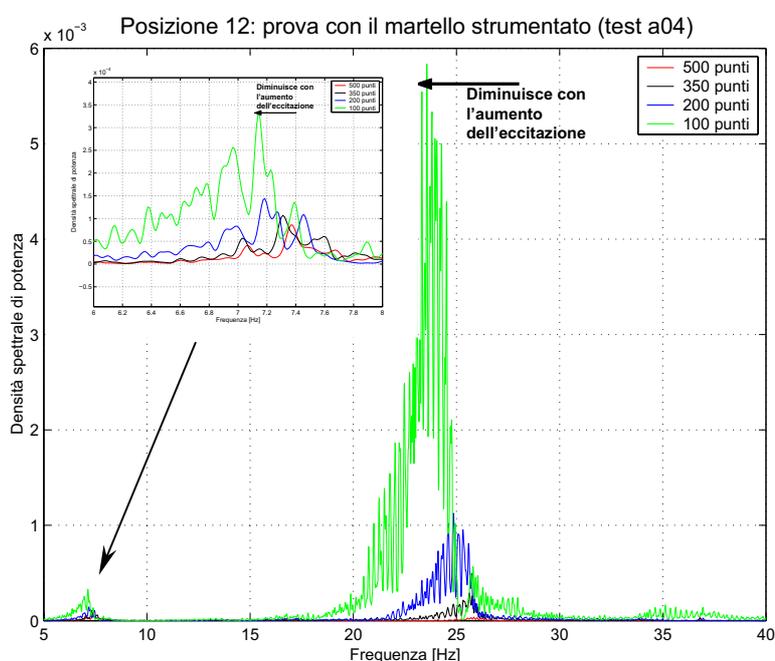


Figura 50 – Visualizzazione della diminuzione di frequenza all'aumentare dell'eccitazione.

### Segnali fuori piano

Per quanto riguarda le frequenze fuori piano, è lecito pensare siano piuttosto basse, in considerazione del fatto che lo spessore della facciata è sottile rispetto alle altre dimensioni. L'analisi dei segnali 14, 15 e 16, cioè quelli provenienti dagli accelerometri posti ai lati della facciata di Palazzo Geraci, risulta abbastanza semplice rispetto all'analisi di quelli nel piano della stessa. L'individuazione delle forme modali fuori piano non risulta per niente agevole, in quanto il numero di

sensori è insufficiente, soprattutto per le frequenze più alte. In effetti, trovare le forme modali fuori piano, esula dagli intenti della tesi, per questo si ritiene sia sufficiente l'aver determinato le frequenze fuori piano. Le frequenze fuori piano più evidenti sono:

- 2.8 Hz
- 4.4 Hz
- 13 Hz

Tali valori non sono da considerarsi fissi, in quanto sensibili a variazioni; costituiscono pertanto un valore rappresentativo di un certo range.

Come si nota in figura 51, i primi due picchi di risonanza sono piuttosto evidenti. A questi corrispondono rispettivamente il primo modo flessionale e il primo modo torsionale. Come già detto, oltre tali valori l'identificazione è più complessa.

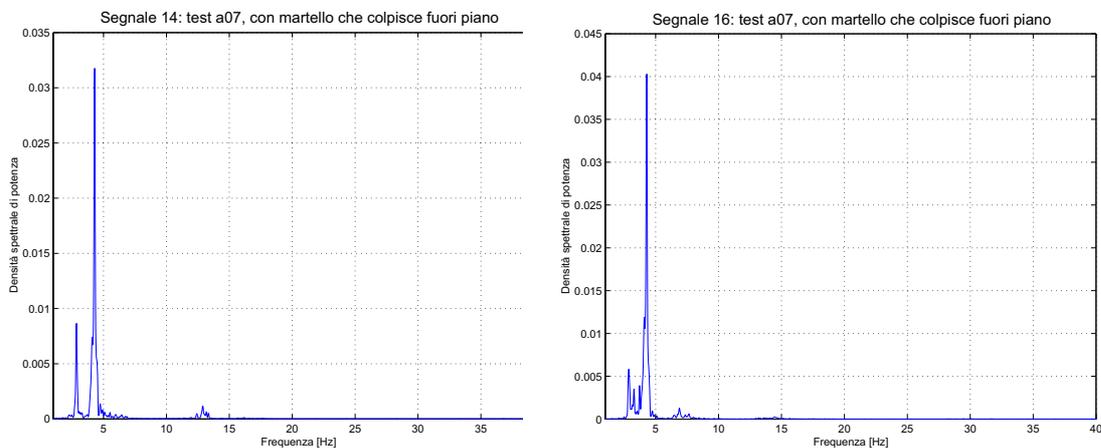


Figura 51 – Segnali 14 e 16 fuori piano del test a07.

## Le colonne

Le colonne non presentano un comportamento simile tra loro, in quanto alcune frequenze appartengono all'una ma non all'altra. Tale diversità può essere dovuta al fatto che sono costituite da grossi blocchi di calcarenite, connessi insieme tramite un contatto maschio-femmina (vedi pag. 90) e malta: da qui si può ipotizzare il comportamento anomalo delle colonne.

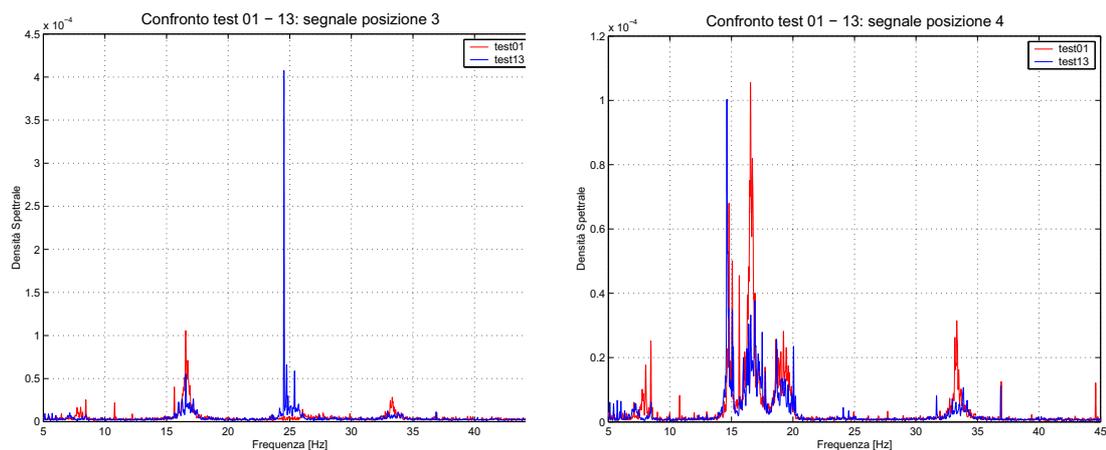


Figura 52 - Confronto della risposta delle colonne nel caso di test con rumore ambientale. A sinistra la colonna di sinistra e a destra la colonna di destra.

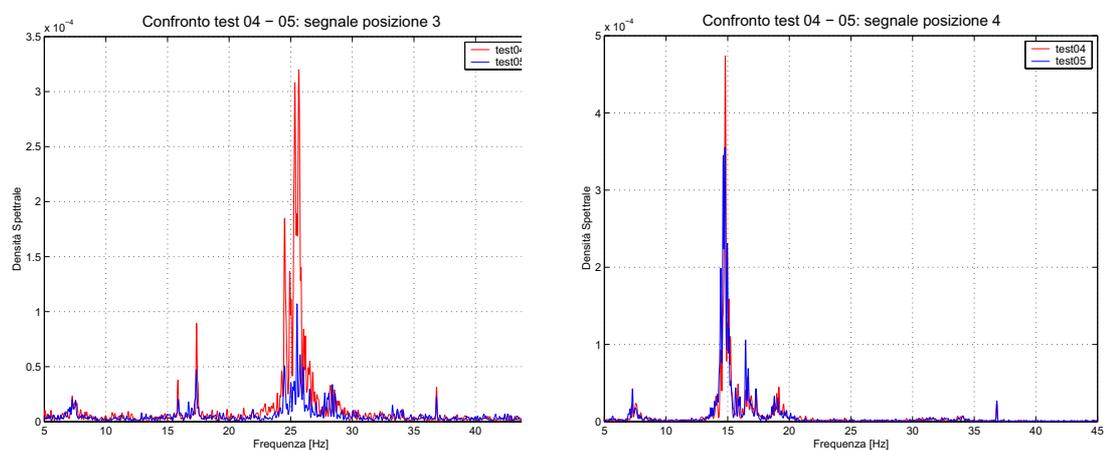


Figura 53 - Confronto della risposta delle colonne nel caso di test con il martello. A sinistra la colonna di sinistra e a destra la colonna di destra.

Analizzando i grafici delle figure 52 e 53, in cui si riportano le densità spettrali di potenza di ciascuna colonna, è possibile osservare che le risposte ottenute dalle prove ambientali presentano lievi differenze tra loro, ma gli andamenti sono gli stessi. Dal confronto dei test ambientali con i test con il martello, emergono poche disuguaglianze, tuttavia sembra che questi ultimi forniscano risultati migliori, in considerazione del fatto che i picchi di risonanza sono più delineati.

Anche se non afferente alle disquisizioni in corso, è interessante far notare che, nella prova a01, è possibile osservare il fenomeno dell'aliasing in corrispondenza della frequenza prossima a 45 Hz. Infatti tale frequenza ne rispecchia un'altra speculare rispetto 50 Hz, essendo la frequenza di campionatura di 100 Hz. Nella prova a13,

campionata a 200 Hz è infatti sparito il picco vicino ai 45 Hz ed è rimasto lo speculare.

Il picco a 50 Hz è in realtà un disturbo dovuto alla rete elettrica italiana che trasmette a tale frequenza.

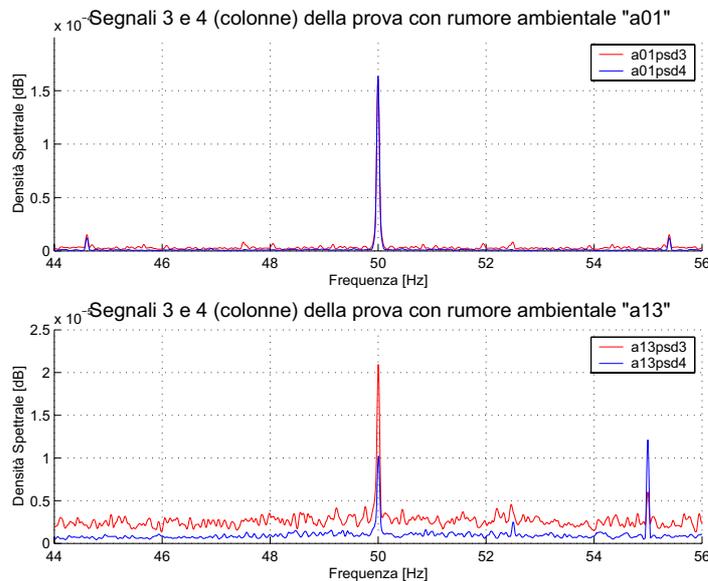


Figura 54 - Esempio del fenomeno di aliasing.

Le frequenze proprie fondamentali delle colonne sono:

- |  |  |
|--|--|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>➤ colonna sinistra:</li> <li>➤ 7.3 Hz</li> <li>➤ 15.8 Hz</li> <li>➤ 17.4 Hz</li> <li>➤ 25.5 Hz</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>➤ colonna destra:</li> <li>➤ 7.3 Hz</li> <li>➤ 14.8 Hz</li> <li>➤ 16.6 Hz</li> <li>➤ 19.0 Hz</li> </ul> |
|--|--|

Non si esclude che alcuni di questi valori siano caratteristici di moti dell'intera struttura, come in effetti si può notare, quando vengono estrapolate dai risultati sperimentali le frequenze proprie assunte come valori finali dell'analisi.

## *Le frequenze proprie pre-risarcitura*

Dall'analisi dei dati e dalle figure precedenti emerge che i picchi di risonanza della struttura non sono ben delineati, ma presentano situazioni di incertezza. Una stessa frequenza, a seconda della prova analizzata, subisce lievi spostamenti, in base all'eccitazione che è in gioco. Studiando in maniera approfondita ogni singolo segnale, si vede come il valore sia incerto anche all'interno della stessa prova. Al

riguardo si riporta un grafico, ottenuto con le nuove tecniche di analisi nel dominio tempo-frequenza, rappresentante la densità spettrale di potenza nel tempo: sezionando il grafico con piani perpendicolari all'asse del tempo si ottengono le variazioni della densità spettrale di potenza nel tempo.

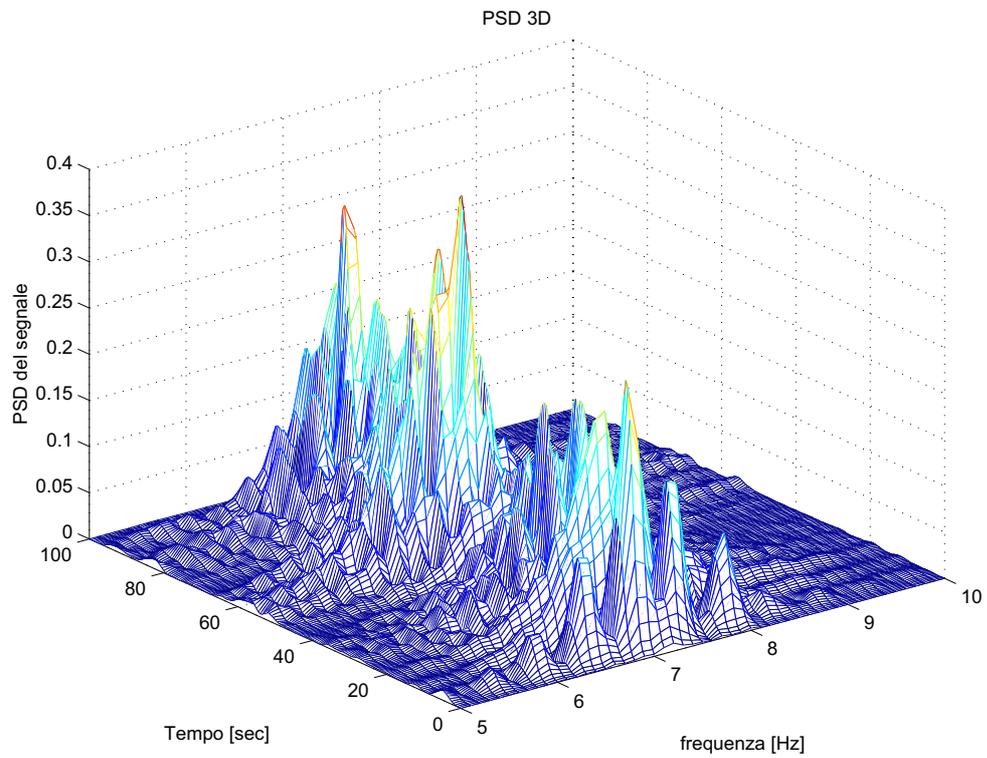


Figura 55 – Rappresentazione, nel dominio tempo-frequenza, delle densità spettrali di potenza in funzione del tempo. Il segnale è proveniente da una prova con il martello strumentato (sensore 1).

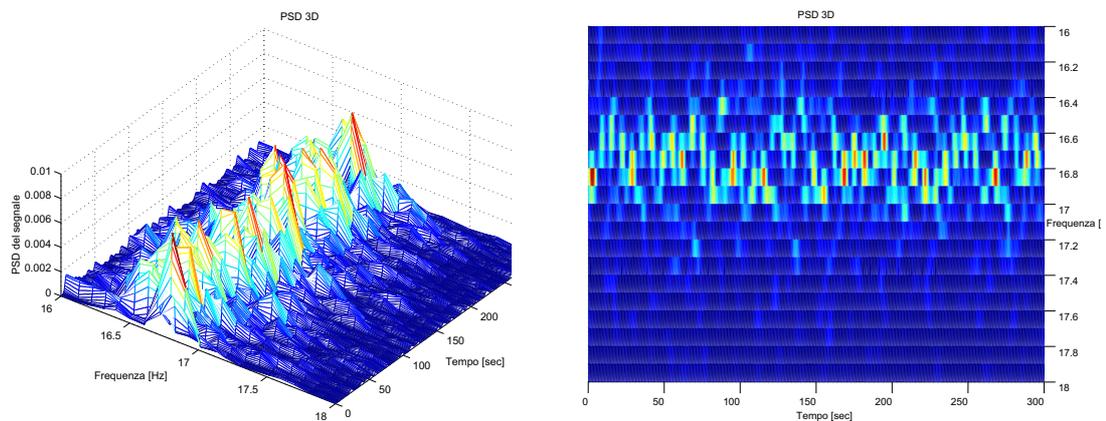


Figura 56 – Particolare tra i 16 e i 18 Hz della densità spettrale di potenza nel tempo. A destra visione nello spazio, a sinistra visione dall'alto dello stesso segnale.

La visione tridimensionale nel dominio tempo-frequenza è poco comprensibile. Per l'interpretazione dei risultati, è preferibile una visualizzazione dall'alto, come in figura 56 a destra, molto simile agli spettrogrammi utilizzati in campo acustico.

Risulta pertanto comprensibile che i valori sotto riportati, indicanti le frequenze proprie della struttura nel piano, sono da intendersi come rappresentativi di un certo range. Tali valori sono:

Modo	Frequenza [Hz]	Modo	Frequenza [Hz]
1	7.5	4	16.5
2	14.2	5	25.2
3	15.6		

Ciascuna frequenza identifica un modo di vibrare della struttura. Le forme modali associate a tali frequenze verranno rappresentate nel capitolo successivo, nel quale si effettuerà un confronto con le forme modali ottenute dalla modellazione agli elementi finiti.

## *Analisi dei segnali post-intervento*

I test, realizzati dopo l'intervento, sono in numero inferiore rispetto a quelli eseguiti prima delle iniezioni di malta. Sono stati svolti due test ambientali e quattro test con il martello, colpendo per due di questi sul lato sinistro e per gli altri due sul destro.

Le prove con rumore ambientale sono identiche tra loro ed evidenziano un aumento della prima frequenza della struttura.

Tra i test con il martello sono state prese in considerazione le prove x05 e x06, eseguite colpendo rispettivamente nella posizione 5 e 6 in direzione parallela alla facciata. Sono state studiate queste ultime poiché l'ampiezza dell'accelerazione è confrontabile con quelle pre-intervento. Sia dall'analisi dei test con rumore ambientale sia da quelli con martello, è evidente un incremento della prima frequenza: infatti si è passa da un range di 7-8 Hz a 8.7-9 Hz, ovvero è stato registrato un aumento circa del 14%. Questo è senz'altro dovuto al fatto che la lesione era localizzata in punto "strategico" per la rigidità del primo modo, infatti la lesione rendeva in parte vana la partecipazione del piedritto destro; con le iniezioni tale collaborazione è stata in parte ristabilita.

Dal confronto dei test x05 e x06 è emerso come la struttura abbia modificato il suo comportamento, evidenziando una monoliticità prima non riscontrata; gli andamenti

delle densità spettrali di potenza sono, infatti, sovrapponibili. Questo emerge anche dal fatto che il range di variazione delle frequenze è minore rispetto alla situazione pre-intervento, a conferma di una struttura monolitica.

Come è possibile notare dalle seguenti figure, che rappresentano la densità spettrale incrociata, il picco a 14.2 Hz non è più visibile, segno evidente che le iniezioni di malta hanno avuto successo per quanto riguarda la solidarizzazione della parte destra al resto della struttura.

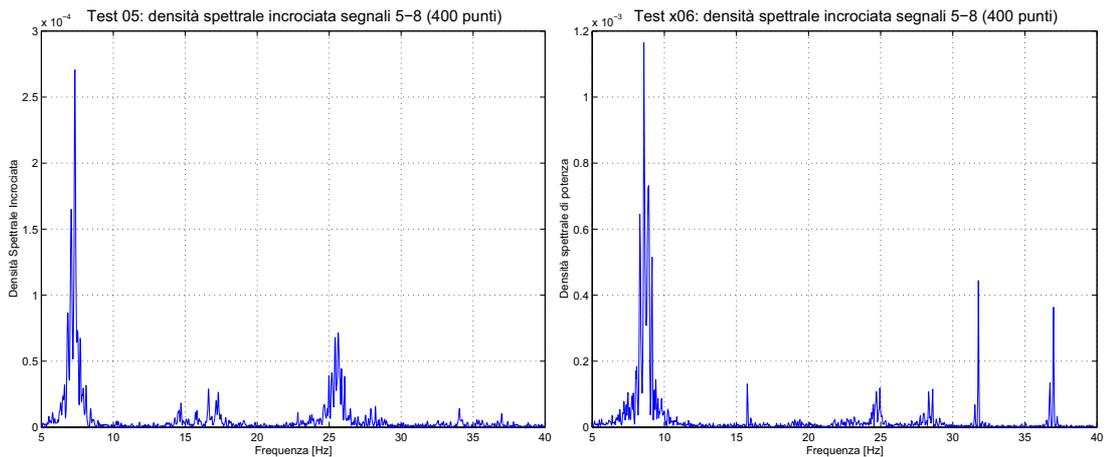


Figura 57 - Densità spettrale incrociata dei sensori 5 e 8 prima e dopo l'intervento.

Un ottimo risultato è stato ottenuto confrontando la coerenza, infatti, come è possibile vedere dalle figure sottostanti, la caduta di coerenza che si verificava nella prima campagna non si verifica nella seconda, segno evidente di un avvenuto ripristino della continuità a cavallo della lesione.

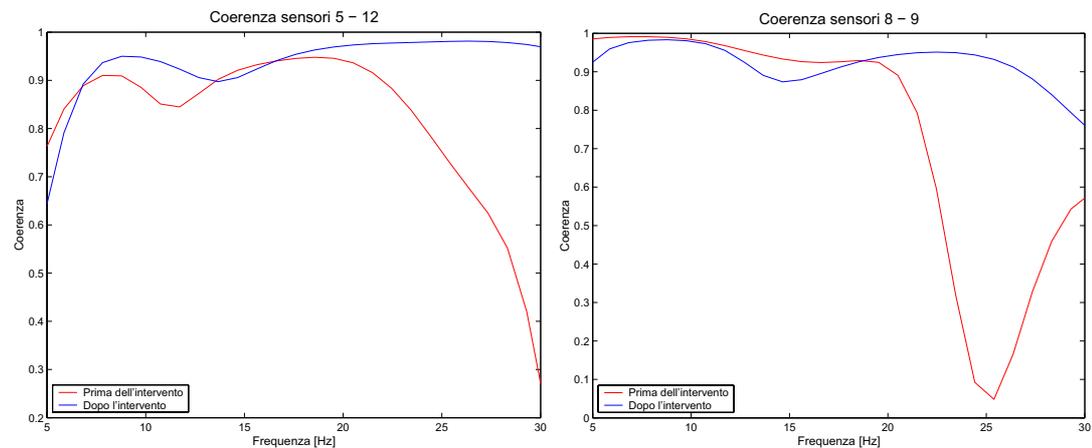


Figura 58 – Coerenza dei sensori a cavallo della lesione.

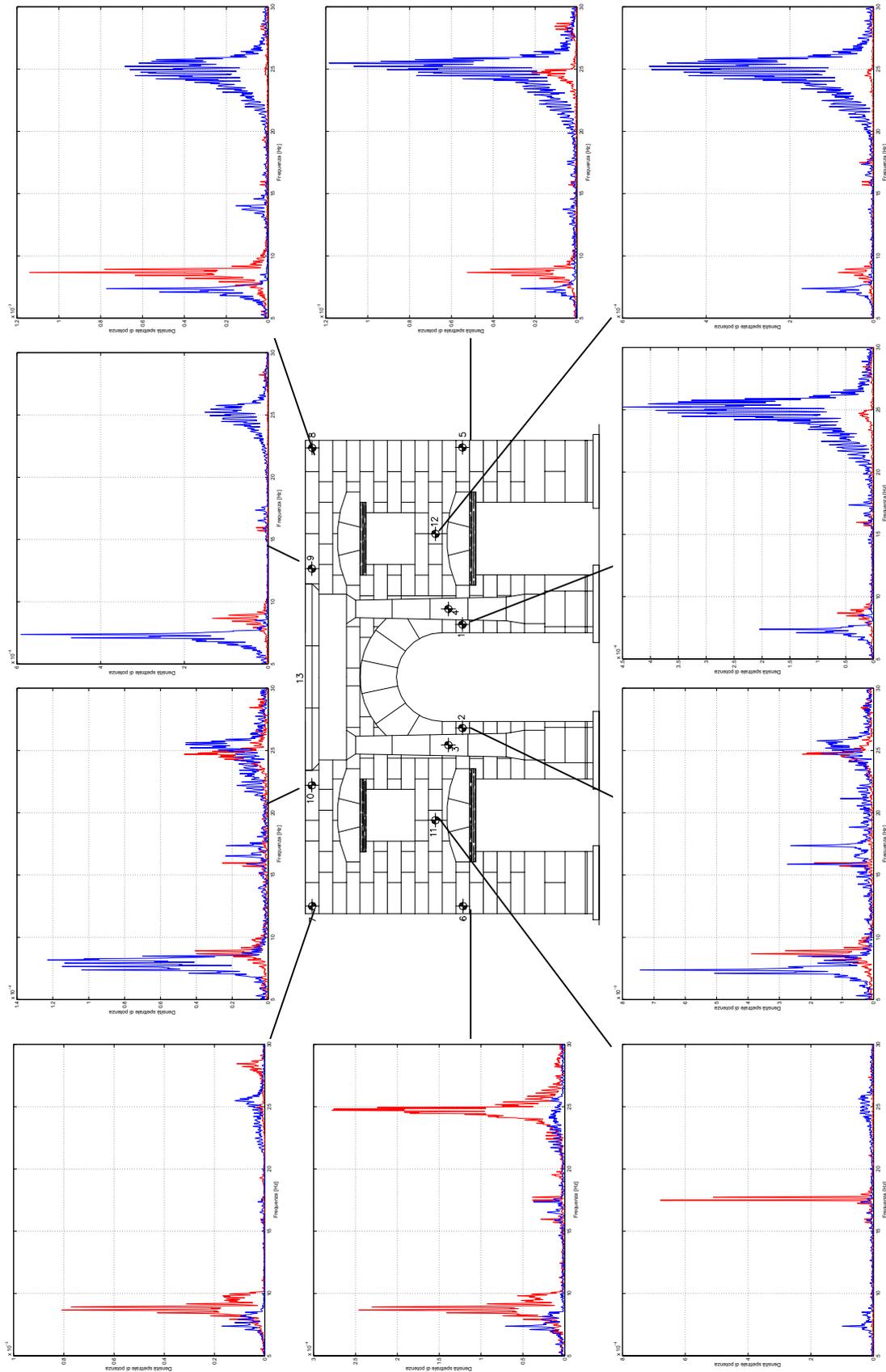


Figura 59 - Confronto test con il martello con 400 punti elisi (in rosso il test x05 e in blu il test a04).

Le indagini effettuate dimostrano come, seppure con alcuni limiti, sia possibile utilizzare delle prove non distruttive (di identificazione dinamica) per valutare l'integrità di un manufatto.

