

# **Sistema innovativo basato su sensori accelerometrici MEMS per l'individuazione e l'evoluzione di uno stato fessurativo su strutture in muratura**

*G. Mannara; N. Ciancia; N. Barbati; S. Infante  
STRAGO Ricerche S.r.l.*

## **SOMMARIO**

Il controllo del degrado legato all'insorgenza di un quadro fessurativo è particolarmente sentito per le opere in muratura soprattutto nell'ambito dei trasporti dove sono richiesti elevati standard di sicurezza.

Le tecniche di diagnostica basate sull'impiego di sensori tradizionali permettono di controllare l'evoluzione di un fenomeno fessurativo localizzato già in atto, senza fornire indicazioni sull'instaurarsi di uno nuovo. D'altronde, uno studio completo necessita di un sistema di misura in continuo e distribuito nello spazio.

Nel campo della diagnostica si è ormai orientati al monitoraggio di grandezze caratterizzanti dinamicamente la struttura. In quest'ultimo settore l'introduzione di sensori accelerometrici MEMS, ad alto contenuto tecnologico e a basso costo, permette di rivoluzionare il concetto di monitoraggio, favorendo la creazione di reti distribuite su più punti di misura.

A questo scopo, tramite numerosi test condotti sia in laboratorio sia su strutture reali, sono state messe a punto delle tecniche innovative di individuazione e monitoraggio di fessure con misure accelerometriche. Parallelamente è stata sviluppata una rete prototipale (wired/wireless) di MEMS a intelligenza distribuita con tecniche di elaborazione implementate in loco. Un confronto continuo tra diversi stati di misura consente di trasferire in remoto non soltanto i risultati delle elaborazioni ma anche di gestire fenomeni di criticità.

## Introduzione

Le indagini e i controlli non distruttivi nel settore civile hanno assunto negli ultimi anni una sempre maggiore rilevanza soprattutto nel controllo della sicurezza delle strutture in condizioni di esercizio. L'efficienza strutturale delle opere, sia di antica che di recente costruzione, sempre più spesso viene valutata osservando l'evoluzione nel tempo di alcuni parametri (ritenuti maggiormente significativi) con tecniche di monitoraggio.

Una delle problematiche più frequenti per il controllo della sicurezza delle strutture, in particolare per quelle in muratura, è l'analisi del quadro fessurativo, ovvero dell'insieme di fessure visibili ed invisibili su un'opera o un elemento strutturale esistente, derivante da uno stato di dissesto o di degrado<sup>1</sup>.

La fessura è generata da azioni di trazione, che vincono la resistenza a trazione del materiale, slabbrandolo in maniera più o meno evidente, con forme, inclinazioni e tipologie che forniscono indicazioni complesse e di non facile interpretazione.

Interesse fondamentale per lo strutturista che si occupa di queste problematiche è poter valutare l'evoluzione temporale del quadro fessurativo e l'insorgenza in tempo reale di nuove lesioni. Il danneggiamento si manifesta attraverso fessure che tendono ad aumentare la loro estensione nel tempo, per effetto delle deformazioni viscosi. In tale ottica è molto importante poter valutare se i danneggiamenti riscontrati sono ormai assestati ad una condizione di stabilità o, al contrario, sono in avanzamento e quindi fonte di maggior rischio. Tale quesito rappresenta il momento centrale dell'osservazione critica della struttura e si risolve in un programma di "monitoraggio".

Questa problematica è certamente sentita nel caso di ponti in muratura, per i quali il continuo passaggio di mezzi, e quindi di sollecitazioni indotte alla struttura, determina presumibilmente un'evoluzione continua del quadro fessurativo che non può essere certamente misurata attraverso le periodiche visite di ispezione.

Nel seguito si illustra il progetto di un sistema di monitoraggio dinamico, effettuato con accelerometri di nuova concezione, che possa soddisfare le suddette esigenze in maniera efficace. Nell'ottica di implementare questo prototipo si sono sviluppate delle tecniche di rilevazione e controllo delle fessure; queste metodologie sono state applicate e testate su alcune strutture di cui si illustreranno in seguito i risultati.

## Sistemi di Monitoraggio

In passato, il controllo delle opere di ingegneria civile veniva generalmente esaminato attraverso delle ispezioni visive; in situazioni di potenziale pericolo si procedeva alla realizzazione di prove in situ appositamente progettate e condotte. Lo sviluppo tecnologico, soprattutto nel campo della sensoristica, ha poi orientato le metodologie di controllo al rilevamento di grandezze statiche con tecniche di diagnostica strumentale. Sempre più spesso, però, l'efficienza strutturale viene valutata osservando l'evoluzione nel tempo di alcuni parametri significativi tramite un monitoraggio. Per definizione, il monitoraggio di un'opera serve a valutare la variazione di un parametro rispetto a misure effettuate precedentemente; la modalità con cui si effettuano queste misure varia in funzione di ciò che si vuole monitorare e del tipo di opera, sebbene una distinzione fondamentale venga effettuata proprio in base alla distribuzione delle misure nel tempo,

---

<sup>1</sup> Per dissesto di un elemento strutturale si intende la condizione statica per mezzo della quale un insieme di forze genera crisi in un manufatto, mentre il degrado deriva da una situazione di incuria o di vetustà degli elementi strutturali.

differenziando il monitoraggio “discreto” dal monitoraggio “in continuo”<sup>2</sup>. Lo sviluppo e la diffusione tecnologica delle strumentazioni di misura hanno visto l’affermazione del monitoraggio continuo, che ha il vantaggio di porsi come sistema di controllo e di sicurezza in tempo reale. I sistemi di monitoraggio in continuo sono costituiti da unità di acquisizione, elaborazione e trasferimento in remoto dei dati elaborati, eliminando la necessità di recarsi fisicamente sul luogo in cui è installato l’impianto. Questa scelta presenta il vantaggio di ridurre notevolmente i costi dovuti all’esecuzione in diversi momenti di campagne di misura, poiché elimina la necessità di dover installare più volte l’intero sistema di misura; tuttavia essa comporta l’inconveniente di installare in maniera permanente sulla struttura dei sensori spesso molto costosi. Infatti, benché la disponibilità di nuove tecnologie sia stata accompagnata da una continua diminuzione dei costi, i sistemi di monitoraggio tradizionali basati sul rilevamento di grandezze statiche sono caratterizzati comunque dall’essere localizzati nello spazio. Infatti, per la misura delle grandezze rilevate da questo tipo di sistemi (forze, deformazioni, inclinazioni, fessurazioni, ecc.) si utilizzano sensori specifici posizionati in punti scelti opportunamente nei pressi della sede di un fenomeno già in atto. In altre parole per applicare tecniche di monitoraggio tradizionale con profitto è necessario aver già riscontrato uno stato di degrado sull’opera.

Si consideri ad esempio la problematica del rilievo di un quadro fessurativo.

In questo caso il monitoraggio può avvenire in maniera discreta mediante fotografie chiare e ben catalogate o in maniera continua mediante misurazioni effettuate con un estensimetro della variazione di distanza tra due o più placchette estensimetriche applicate ai lati delle fessure. L’installazione di un siffatto sistema di monitoraggio, però, deve essere stato preceduto a monte dall’esecuzione di osservazioni visive che abbiano rilevato la presenza della fessura (ammesso che la stessa fosse rilevabile visivamente<sup>3</sup>).

Al contrario, un ottimo sistema di monitoraggio dovrebbe fornire informazioni sul quando e dove si sta verificando un problema: ovvero essere non soltanto continuo nel tempo ma anche distribuito nello spazio, il che implica un aumento dei punti di misura che sia però al tempo stesso caratterizzato da costi contenuti.

Per raggiungere tali obiettivi non determinando un aumento dei costi è necessario:

- Individuare una sensoristica a basso costo;
- Mettere a punto un sistema di acquisizione ed elaborazione continua dei dati on-site;
- Determinare una modalità di trasmissione in tempo reale delle informazioni.

Effettuare una verifica di questo tipo con sensori tradizionali come i fessurimetri implicherebbe la necessità di “disseminare” un numero di sensori estremamente elevato sull’opera senza che sia garantita l’individuazione e la localizzazione del danno.

### **Sistemi di monitoraggio dinamici**

Attualmente, la frontiera del monitoraggio è rappresentata dalla realizzazione di sistemi di monitoraggio basati sullo studio del comportamento dinamico dell’opera; questi sistemi impiegano sensori accelerometrici. L’accelerometro, rispetto ai sensori di natura statica,

---

<sup>2</sup> Storicamente i monitoraggi a più lungo termine sono di natura discreta e sono stati caratterizzati da una serie di prove volte a valutare l’evoluzione dei parametri strutturali nel tempo e l’insorgere di danni sviluppatasi a partire dagli anni ‘60 (ovvero da quando gli sviluppi tecnologici hanno consentito tali prove) fino ad oggi; in questo senso esistono numerose esperienze negli USA (un esempio è la nota *libreria Millikan* della California).

<sup>3</sup> Occorre infatti tener presente che molto spesso i fenomeni di ammaloramento sono visibili sulle strutture solamente in una fase avanzata.

descrive il comportamento di un'intera struttura (o di una sua parte macroscopica), rendendo i rilievi effettuati meno dipendenti dal punto di misura specifico.

Con questo tipo di sensori è possibile effettuare analisi di vario genere. È possibile, ad esempio, indagare il comportamento dinamico globale dell'opera attraverso l'esecuzione di misure finalizzate alla caratterizzazione dinamica o alla valutazione di un degrado, studiando ad esempio il modo in cui si trasmettono le vibrazioni all'interno del materiale costituente la struttura. In particolare quest'ultimo tipo di applicazione appare adatto a riconoscere fenomeni di degrado al loro insorgere, specie se accompagnato dall'installazione di una capillare rete di sensori in grado di localizzare con precisione un'eventuale criticità. Ovviamente l'insorgenza del degrado, come ad esempio la formazione di una fessura e la sua propagazione, potrà essere rilevata dal confronto degli ultimi rilievi con quelli precedenti.

Per la realizzazione pratica di sistemi di monitoraggio siffatti si pone tuttavia in maniera rilevante il problema del costo della sensoristica. In quest'ultimo settore l'introduzione dei dispositivi MEMS, ad alto contenuto tecnologico e a basso costo, ha permesso di rivoluzionare il concetto di monitoraggio.

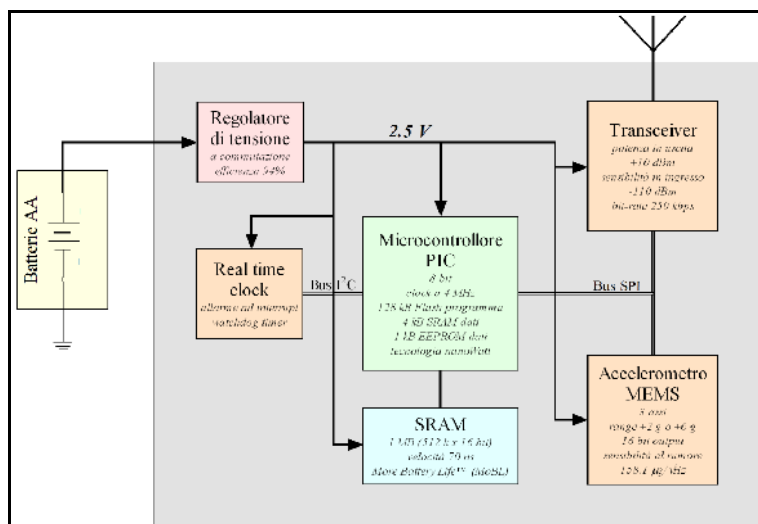
### Sensori accelerometrici MEMS

La tecnologia MEMS, che ha conosciuto negli ultimi anni uno sviluppo considerevole (si pensi alle applicazioni nei comuni airbag delle automobili), consente di incorporare dispositivi meccanici di dimensioni micrometriche nei chip a semiconduttore. I sensori basati su tale tecnologia sono caratterizzati da dimensioni ridotte e costi contenuti.

Basandosi su dispositivi appartenenti a questa famiglia, STRAGO Ricerche ha progettato e realizzato un sistema di misura ad intelligenza distribuita che integra, oltre ad un accelerometro MEMS ad uscita digitale, un'unità di elaborazione e un sistema di trasmissione dati.

Il punto di partenza del sistema di misura è costituito da un elemento sensibile in tecnologia MEMS. Le caratteristiche dei sensori che adottano questa tecnologia ben si adattano ad un utilizzo orientato alla misurazione di parametri di oggetti di grandi dimensioni. Infatti, le procedure di analisi di tipo dinamico si avvantaggiano di un numero quanto più elevato possibile di punti di misura al fine di ottenere un modello realistico del comportamento della struttura in esame. L'elaborazione centralizzata di segnali provenienti da un numero molto elevato di sensori pone però seri problemi in termini di efficienza.

Dall'esigenza di superare questi problemi deriva, dunque, la scelta di un approccio di tipo distribuito all'elaborazione dei dati; in questo modo è possibile anche fornire delle indicazioni in tempo reale sullo stato dei sistemi oggetto della misura. Il diffondersi sempre più rapido negli ultimi anni di dispositivi a logica programmabile ha permesso di affiancare al sensore un'unità di elaborazione con microcontrollore.



Si è quindi progettato e realizzato un prototipo di rete ad intelligenza distribuita caratterizzato dall'essere continuo nel tempo e spazialmente distribuito soddisfacendo le esigenze di un moderno sistema di monitoraggio ovvero con capacità di determinare e localizzare il verificarsi di nuovi eventi.

Tuttavia affinché questo prototipo possa fornire indicazioni su uno stato fessurativo si sono dovute parallelamente mettere a punto delle tecniche di elaborazione di segnali dinamici che permettano di monitorare l'evoluzione di fessure preesistenti e il rilevamento di nuovi fenomeni. Queste tecniche, una volta validate, dovranno poi essere implementate sulle unità di elaborazione.

### **Tecniche per la rilevazione di fessure**

Una metodologia per individuare uno stato di danneggiamento collegabile ad uno stato fessurativo deve essere in grado di individuare la presenza, o la formazione, di una fessura, sfruttando modalità di elaborazioni dei dati quanto più semplici possibili al fine di favorire l'implementazione nel prototipo della rete MEMS.

Lo sviluppo della procedura si è articolato in sintesi nei seguenti passi:

- Definizione di un approccio metodologico di carattere generale con messa a punto delle tecniche di elaborazione dati in relazione alla strumentazione impiegata.
- Esecuzione di prove sperimentali su siti campione con fessure pre-esistenti o create ad hoc per simulare il verificarsi di una nuova lesione su una struttura sana.

Per valutare la presenza di uno stato fessurativo su un mezzo, le grandezze da studiare possono essere di tipologia differente e vanno dalla valutazione delle modalità di trasmissione delle onde meccaniche tra coppie di sensori contigui a metodi più elaborati che confrontano funzioni di risposta in frequenza e di coerenza, in ogni singolo punto di misura, confrontando stati diversi di una struttura. Poiché quest'ultimo approccio permette di osservare effetti di degrado prevalentemente da un punto di vista globale si è preferito orientare la scelta della metodologia verso l'analisi delle onde meccaniche trasmesse tra sensori contigui, metodologia che consente di ottenere informazioni più di dettaglio.

Quando un corpo viene perturbato ad una delle sue estremità, la perturbazione si propaga in esso in un certo tempo (finito) sotto forma di onde meccaniche. Queste si propagano da uno strato del mezzo sollecitato ad uno successivo con un certo ritardo determinato dal tipo di sollecitazione che ha causato la perturbazione, dall'inerzia delle particelle materiali formanti il sistema, dal tipo di legame esistente tra esse, dai vincoli esterni, ecc. La presenza di imperfezioni o disomogeneità nel corpo, provoca l'insorgere di fenomeni di scattering che si manifestano con la presenza di sfasamenti temporali, echi spuri, riverberi e, in generale, attenuazione dell'onda.

L'approccio è quindi quello di studiare eventuali distorsioni e sfasamenti delle onde di trasmissione dovuti alle lesioni. Infatti, ponendo una griglia di sensori a distanza fissa disposti su una struttura omogenea e sollecitando quest'ultima ad una sua estremità le onde di vibrazione si propagano nel mezzo attenuandosi prevalentemente in funzione della distanza. Ulteriori fenomeni di ritardo o distorsione del segnale sono dunque da imputare a irregolarità nel mezzo.

Per valutare allora su una qualunque struttura la presenza di una lesione o di un danno con una griglia di sensori si possono confrontare gli stessi punti di misura prima e dopo il verificarsi di un evento, oppure si possono confrontare coppie di misura analoghe adducendo variazioni locali dei parametri di studio alla presenza di una criticità.

In dettaglio i parametri da valutare possono essere di due tipi:

- Studio degli sfasamenti o distorsioni dei primi picchi di arrivo delle onde meccaniche dovute ad una sollecitazione.
- Studio delle funzioni di correlazione che consentono di valutare le differenze complessive tra diversi segnali misurati.

Un approccio basato sullo studio degli sfasamenti o le distorsioni dei picchi di primo arrivo è certamente più indicato anche per valutare fenomeni già esistenti. Infatti, in una struttura composta da materiale continuo, differenze di scarti temporali o di ampiezze di picco tra diverse coppie di sensori poste alla stessa distanza e allineate in una direzione, non possono che essere imputate a discontinuità o disomogeneità di carattere locale e quindi presumibilmente a lesioni.

Quest'approccio, sebbene dal punto di vista teorico sia affascinante e di sicuro successo, si scontra con due problematiche di carattere pratico. La prima è che le onde viaggiano nei materiali ad alta velocità e pertanto richiedono un passo temporale molto stretto nella registrazione (alte frequenze di campionamento) per essere studiate in maniera corretta. La seconda è che se le sollecitazioni non hanno un carattere impulsivo lo studio dei picchi di arrivo risulta improponibile.

Tuttavia per valutare nel complesso se due segnali sono tra loro “simili” nel tempo esistono delle funzioni matematiche create ad hoc, funzioni di cross-correlazione normalizzate. In tal modo se si orienta l'applicazione di tali funzioni ad estratti di segnale molto prossimi all'arrivo della sollecitazione si possono valutare globalmente, e quindi non solo per i primi picchi, tutti i fenomeni di ritardo, sfasamenti, distorsione legati alla normale attenuazione geometrica o alla presenza di criticità. È evidente infatti che tutte le coppie di sensori debbano restituire valori simili di questa funzione eccetto per la coppia relativa ai sensori situati ai due lati della frattura.



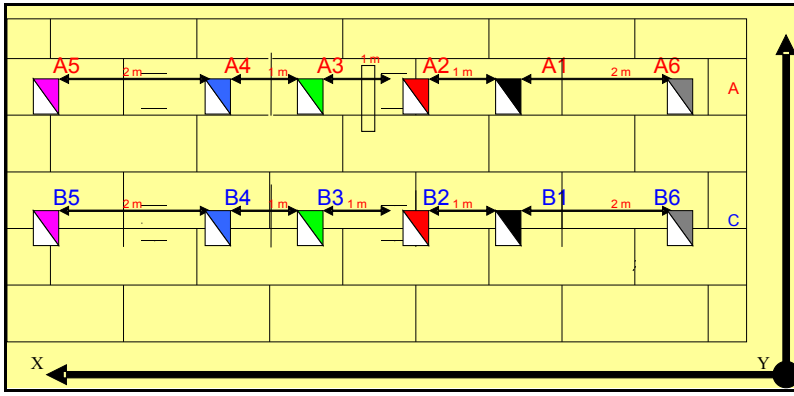
### **Esempi applicativi**

Si illustreranno nel seguito le modalità di prova e i risultati ottenuti in campo su due strutture reali. La strumentazione impiegata è composta da un acquirente di classe PXI a 24 bit prodotto dalla National Instruments e accelerometri Episensor ES-U della Kinemetrics. Per fornire impulsi controllati si è impiegato un martello strumentato.

### **Studio di una fessura su un muretto di tufo**

Si è strumentato il muretto di tufo in figura con una griglia lineare di sensori aventi nel centro una discontinuità creata da una piccola fessura riempita in maniera grossolana con della malta. L'idea di partenza è di evidenziare a seguito di una sollecitazione fornita all'estremità del muretto delle differenze di comportamento dei sensori posti a cavallo della zona danneggiata. In particolare osservare i picchi di primo arrivo delle accelerazioni valutando differenze nei tempi e nelle ampiezze lungo la linea di misura.

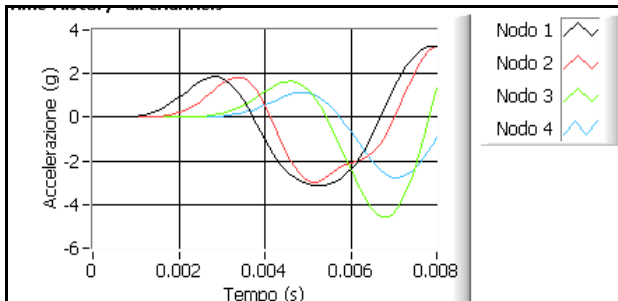




In una prima fase, prova A, il muretto in questione è stato strumentato con sei accelerometri (A1-A6) disposti in direzione X secondo il successivo schema di misura. In seguito, prova B, sei sensori (B1-B6) sono stati disposti allo stesso modo in un settore privo di danni. Il muretto è stato sollecitato alle sue estremità

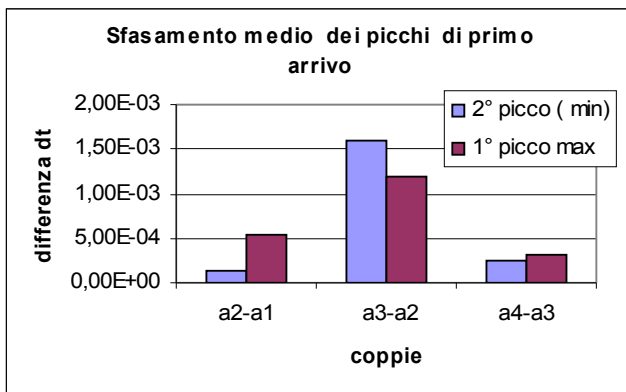
battendo nei punti A e C con un martello strumentato. Si riportano alcune immagini delle fasi di prova.

Si consideri la disposizione della Prova A, con sollecitazione applicata in direzione X nel punto A. Si è effettuata un'analisi dei picchi di primo arrivo registrati con gli accelerometri. Per semplicità si sceglie di riportare i risultati per i nodi A1, A2, A3, A4.



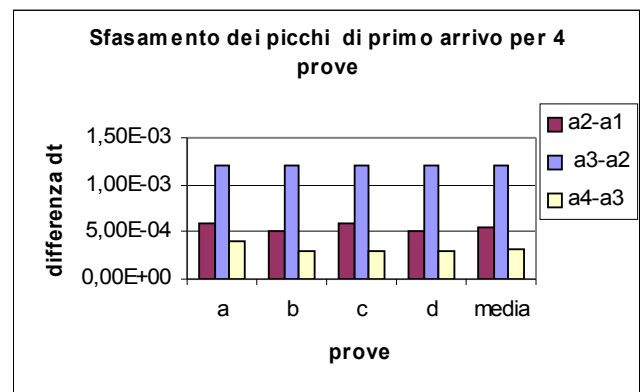
Si riportano le time history “zoomate” sul primo arrivo di segnale che evidenziano, già in maniera visiva, una netta distorsione del segnale nel nodo 3 legata all'effetto della fessura.

Per un'elaborazione quantitativa, si rilevano i tempi dei primi due picchi (massimo e minimo) nei 4 segnali e si effettua una differenza di questi tempi per le tre coppie contigue: A2-A1, A3-A2, A4-A3. Poiché i sensori sono a distanza identica e il mezzo è nel complesso omogeneo non dovrebbero esserci ritardi significativi nella differenza di tempo valutata per le tre coppie, a meno che non ci siano degli effetti di scattering. Il seguente istogramma riporta i valori medi di questi intervalli mediati su un numero significativo di prove. Dai grafici si evidenzia che il tempo di trasmissione del segnale tra i sensori a cavallo della fessura è maggiore. I risultati sono ripetitivi per diverse prove, come si evince dal successivo istogramma.



Tra l'altro il comportamento anomalo della

coppia A3-A2 si osserva anche fornendo una sollecitazione in direzione ortogonale al muro. A questo punto può essere interessante valutare le funzioni di cross-correlazione normalizzate<sup>4</sup> e verificare il valore nel punto medio di questa funzione per un estratto di



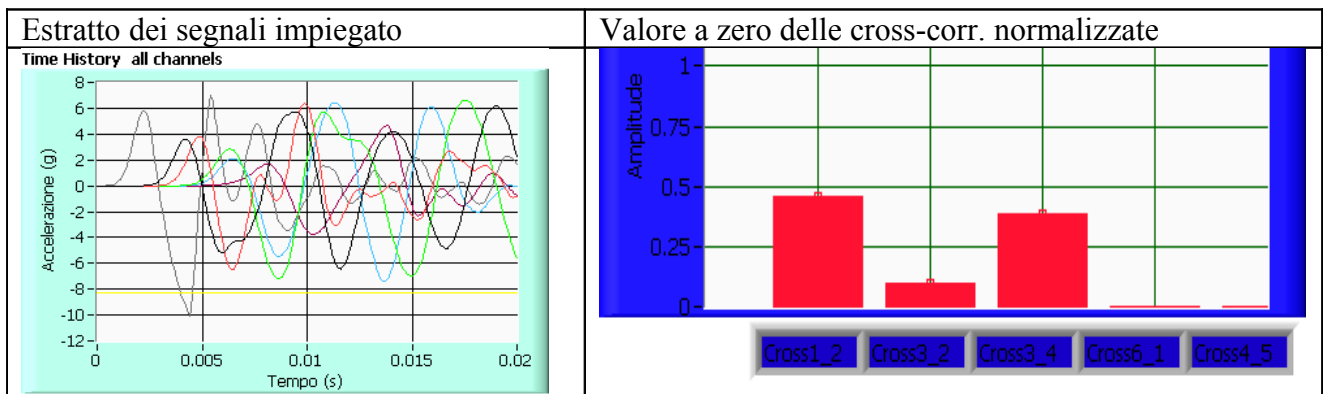
<sup>4</sup> La funzione di cross-correlazione è una misura della similarità tra due differenti segnali ed è quindi una quantità utile nel determinare la differenza temporale tra tali segnali. Dal rapporto tra la cross-correlazione e il prodotto delle deviazioni standard dei due segnali si ricava la cross-correlazione normalizzata. In caso di buona correlazione tra i due segnali, ovvero di comportamento simile, la funzione ora definita ha un valore medio nullo ed un picco in corrispondenza di  $t = 0$ . Il picco risulta tanto più prossimo ad 1 quanto più i due segnali sono simili.

segnale prossimo alla sollecitazione rappresentato con un istogramma dei valori nel punto centrale delle funzioni calcolate per le diverse coppie.

Si verifica quindi che anche la funzione di cross-correlazione riesce ad esprimere l'anomalia tra A3 e A2 così come riscontrato in precedenza, quindi anche questo metodo permette di ottenere una stima quantitativa degli effetti di sfasamento tra i punti di misura svincolandoci dall'osservazione dettagliata dei picchi.

Nella prova B sono state svolte le stesse operazioni in una zona integra. In questo caso sia i valori dei ritardi fra i picchi sia i valori delle funzioni cross-correlazione normalizzati sono risultati pressoché costanti tra le diverse coppie.

### Analisi di un quadro fessurativo su una cupola prima e dopo l'intervento di risanamento.

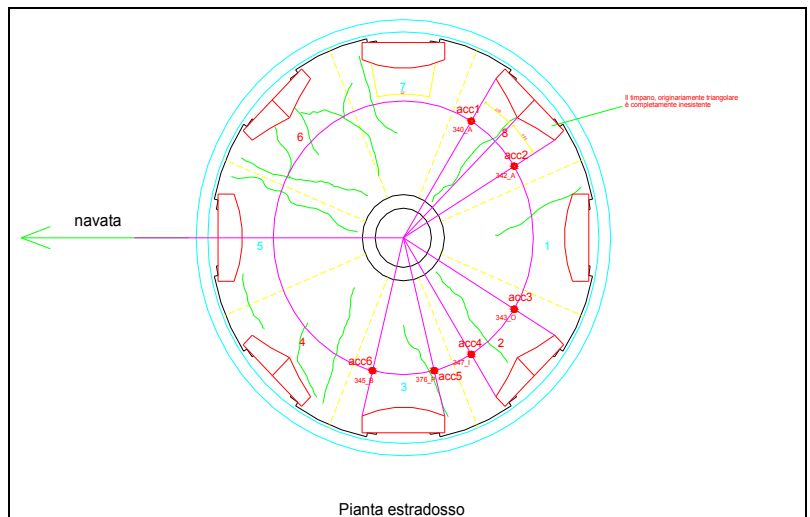


Sulla cupola della chiesa di S. Maria a Nola (NA) si sono svolte due sessioni di prove disponendo dei sensori accelerometrici a cavallo di tre fessure. La seconda sessione di prove si è svolta a valle di un intervento di risanamento delle fessure suddette.

Nello schema della cupola a seguire si riporta la disposizione dei sensori (Acc1...Acc6).

La procedura di prova è la seguente:

1. Fornire delle sollecitazioni di diversa entità con il martello strumentato nei diversi punti di misura con le lesioni non riparate.
2. Procedere allo stesso modo con le lesioni riparate.
3. Elaborare delle procedure di confronto tra i due casi e determinare eventuali differenze che possano mostrare l'effetto dell'intervento.



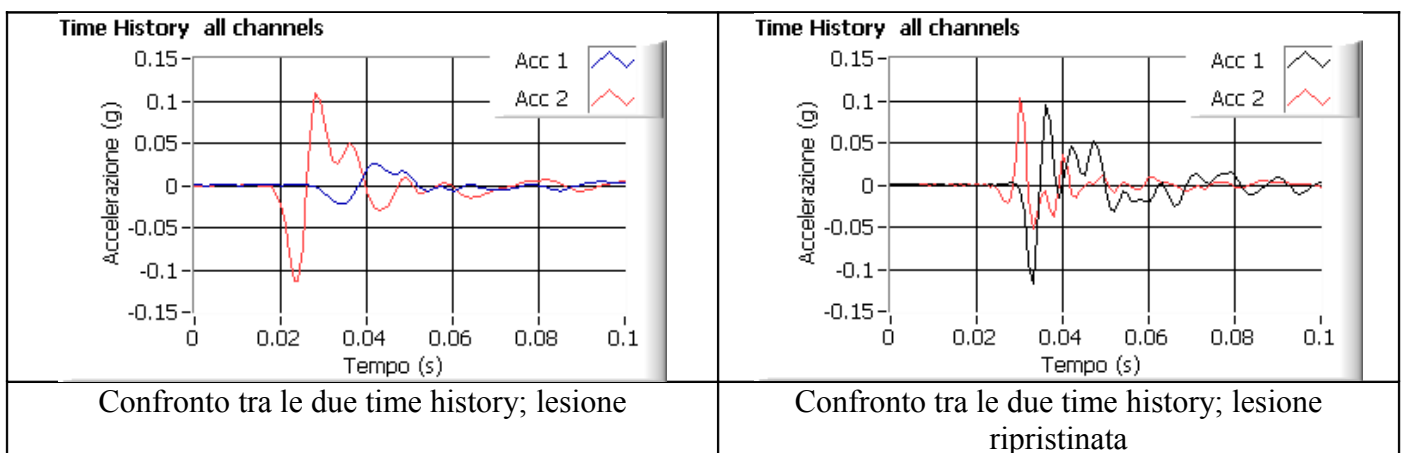
In figura si evidenziano alcune fasi delle prove:

Come esempio si considerino i punti Acc1 e Acc2. Si riportano due grafici con le accelerazioni registrate nei punti Acc1 e Acc2 con sollecitazione fornita nel punto Acc2. L'attenuazione del segnale tra due punti di misura dipende chiaramente dalla distanza e dal mezzo in cui si propaga l'onda; in ogni caso ci si aspetta che il segnale, nel propagarsi da un nodo all'altro, tenda ad attenuarsi maggiormente in presenza di fessure. Nel grafico di confronto si evidenzia come sia l'attenuazione che il ritardo del segnale sono



notevolmente maggiori quando è presente la lesione.

Naturalmente queste considerazioni di carattere visivo e qualitativo trovano anche dei riscontri quantitativi nello studio dei tempi di primo arrivo dei picchi. In un istogramma si riportano i valori medi ottenuti da diverse acquisizioni con sollecitazioni di entità diversa per evidenziare se il ritardo di propagazione (delay) delle onde meccaniche tra le coppie di sensori in questione sia minore dopo l'intervento di ripristino. Si confrontano i risultati ottenuti con lo stesso principio e con punto di battuta in Acc1.



Tali riduzioni dei delay si riscontrano anche sulle altre fessure, pertanto con la procedura proposta, che effettua delle misure prima e dopo l'intervento, si riesce a valutare l'efficacia del ripristino.

## Conclusioni

Nel campo della valutazione della sicurezza strutturale una notevole innovazione è stata rappresentata dall'applicazione di nuove metodologie di monitoraggio dinamico in continuo. Le recenti innovazioni nel campo della sensoristica (accelerometri MEMS) con relativo abbattimento dei costi, parallelamente allo sviluppo tecnologico dei sistemi di acquisizione, elaborazione e trasferimento dati, hanno aperto la strada alla progettazione di sistemi di monitoraggio distribuiti spazialmente. La STRAGO Ricerche ha realizzato un prototipo di questo tipo da impiegare per il controllo del degrado legato all'insorgenza di un quadro fessurativo.

A questo scopo sono state implementate e testate su siti campione delle tecniche di rilevazione e controllo delle fessure tramite accelerometri, seguendo due approcci differenti.

Le prove effettuate hanno avuto esito positivo, il che dimostra la notevole versatilità dello strumento accelerometro. Gli ultimi sviluppi tecnologici e soprattutto l'introduzione di sensori basati su tecnologia MEMS a basso costo aprono quindi nuove strade alle metodologie di monitoraggio, che risultano dunque sempre più orientate al controllo in tempo reale delle opere.