# POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Civile

Tesi di Laurea Magistrale

# La tecnica dell'Emissione Acustica per la diagnosi di strutture e infrastrutture: Il caso-studio della galleria a Borgo Ticino



Relatore: Prof. Alberto Carpinteri **Candidata:** Francesca Quinterno

**Correlatori:** Dr. Amedeo Manuello Bertetto Dr. Gianni Niccolini

A.A. 2016/2017

A mio nonno, che ora non c'è più, ma che avrebbe voluto un Ingegnere in famiglia

### Ringraziamenti

Ed eccoci qua, dopo anni di studio la mia carriera universitaria si sta per concludere. Sono stati anni faticosi, che mi hanno però permesso di crescere sia professionalmente sia umanamente, ottenendo ottimi risultati e altrettante soddisfazioni. È arrivato quindi il momento di ringraziare tutti coloro che sono stati al mio fianco durante questo percorso.

Ringrazio anzitutto il Professor Alberto Carpinteri, che ho avuto l'onore di avere come relatore, e i miei correlatori, il Dottor Amedeo Manuello Bertetto e il Dottor Gianni Niccolini, i quali con pazienza mi hanno guidato e sostenuto, fornendomi tutti gli strumenti necessari per condurre questo lavoro di ricerca. Un pensiero va anche alle persone che mi hanno aiutato e consigliato nella stesura della tesi, fornendomi preziosi consigli e critiche costruttive.

Un ringraziamento particolare va ai miei amici di sempre e a quelli conosciuti in questo ultimo anno di università per il loro continuo supporto e incoraggiamento.

Ma se sono arrivata fin qui lo devo a loro, Daniela e Franco, i miei amati genitori: grazie davvero, senza il vostro affetto e instancabile sostegno (morale ed economico) non avrei potuto raggiungere questo traguardo. A voi va e andrà sempre la mia immensa riconoscenza.

Il ringraziamento più caloroso va al mio fidanzato Mattia, per così tanti motivi che mi è impossibile elencarli tutti! In particolare grazie perché con amore e tanta pazienza sei sempre stato al mio fianco e hai sempre creduto in me più di quanto abbia fatto io stessa.

Infine ringrazio me stessa, per la diligenza e la costanza negli studi, perché non mi sono mai persa d'animo nonostante le difficoltà incontrate.

Torino, Dicembre 2017

### Sommario

La tesi di Laurea Magistrale è dedicata alla tecnica non-distruttiva dell'Emissione Acustica intesa come strumento per la diagnosi di strutture e infrastrutture. La trattazione inizia illustrando i principi fondamentali della suddetta tecnica, fornendo altresì una spiegazione in termini di meccanica della frattura. Nei materiali solidi, infatti, lesioni (anche microscopiche) in espansione rilasciano spontaneamente energia, sotto forma di particolari segnali ultrasonici, chiamati emissioni acustiche. Sensori dedicati "auscultano" le strutture, captando le emissioni acustiche già durante le fasi iniziali del processo di danneggiamento. Dopo aver presentato la strumentazione utilizzata, vengono descritti nel dettaglio i metodi di analisi dei dati e di localizzazione delle sorgenti (fessure), con alcuni approfondimenti sul mondo frattale e sull'analogia con i terremoti. L'individuazione e l'analisi di questi veri e propri precursori della frattura consentono di anticipare e prevenire eventuali collassi strutturali.

L'ultima parte di questo lavoro è dedicata alla presentazione di due applicazioni strutturali: la prima riguarda il processo di fessurazione di un'opera infrastrutturale, la galleria a Borgo Ticino, mentre la seconda ha come argomento il monitoraggio di un edificio di civile abitazione.

## INDICE

### Ringraziamenti

### Sommario

Introduzione	.1
--------------	----

### I CAPITOLO

L'Emissione Acustica: generalità2		
Il ruolo dei controlli non distruttivi	2	
Le ricerche scientifiche	3	
Le origini concettuali	4	
Il fenomeno	4	
	sione Acustica: generalità Il ruolo dei controlli non distruttivi Le ricerche scientifiche Le origini concettuali Il fenomeno	

### **II CAPITOLO**

L'Emiss	ione Acustica: la meccanica della frattura	6
II.1	L'energia dissipata	
<b>II.2</b>	Il fenomeno dello <i>snap-back</i>	
II.3	L'energia di frattura e lo <i>snap-back</i>	9
<b>II.4</b>	L'energia emessa	

### **III CAPITOLO**

L'Emissione Acustica: la strumentazione		
III.1 I si	stemi di acquisizione dati	
III.1.1	Aparecchiatura Atel	
III.1.2	Apparecchiatura USAM	
III.1.3	AEmission System	
III.2 I se	ensori	

### **IV CAPITOLO**

2'Emissione Acustica: la tecnica	
IV.1 Ring – Down Counting e Counting of Events	
IV.2 Analisi parametrica	
IV.2.1 Classificazione delle fratture attive	
IV.3 Natural Time Analysis	

### **V CAPITOLO**

L'Emissione Acustica: le interpretazioni		
V.1	Interpretazione frattale: il $\beta_t$	
V.2	Emissioni acustiche e sismi: il <i>b</i> -value	
V.2	2.1 Il caso del b <sub>collasso</sub>	
V.3	La localizzazione delle sorgenti AE	

### **VI CAPITOLO**

Il monitoraggio di un'infrastruttura: la galleria a Borgo Ticino41		
<b>VI.1</b>	Inquadramento	
<b>VI.2</b>	Rilievo fotografico	44
<b>VI.3</b>	Analisi e Grafici	
<b>VI.4</b>	Localizzazione	
<b>VI.5</b>	Conclusioni	59

### **VII CAPITOLO**

Il monitoraggio di un edificio civile		60
VII.1	Inquadramento	
VII.2	Rilievo fotografico	
VII.3	Analisi e Grafici	
VII.4	Natural Time Analysis	
VII.5	Conclusioni	
Riferime	enti bibliografici	75

### Introduzione

La frattura è un fenomeno complesso che può verificarsi o per la propagazione improvvisa di una frattura singola senza precursori apprezzabili (comportamento perfettamente fragile), oppure al culmine di un danneggiamento progressivo, caratterizzato da un rilascio spontaneo di energia elastica durante la fessurazione del materiale (comportamento quasi - fragile). Infatti, l'evoluzione delle microfratture in un materiale sottoposto a sforzo o deformazione causa una ridistribuzione delle tensioni interne, sotto forma di onde elastiche transitorie, chiamate emissioni acustiche. Tecnicamente, l'espressione "emissione acustica" (*Acoustic Emission*, nel seguito AE) è usata per indicare una classe di fenomeni in cui determinate sorgenti localizzate, a causa di un rapido rilascio di energia, generano delle onde elastiche transitorie, tipicamente sviluppando fessure, all'interno di un materiale<sup>1</sup>. Altri termini utilizzati in letteratura includono "emissione di onde di stress" e "attività microsismica". La normativa ISO 22096 – *Condition monitoring and diagnostic of machines – Acoustic Emission* – dà la seguente definizione:

"The term "acoustic emission" is used to describe the spontaneous elastic energy released by a process in the form of transient elastic waves."

L'emissione acustica è un fenomeno che si verifica spesso nella vita quotidiana e può riguardare diverse scale di intensità: il rumore emesso quando una latta è sotto tensione oppure viene piegata è un tipico esempio di AE su piccola scala<sup>2</sup>. Un terremoto è un esempio di AE su larga scala<sup>3</sup>. Il meccanismo della generazione AE è lo stesso, sia esso un microcrack o un terremoto.

L'emissione acustica è da tempo riconosciuta come una tecnica valida per il monitoraggio in tempo reale di strutture metalliche e in composito, utile per migliorare la sicurezza e ridurre i costi di manutenzione nelle applicazioni strutturali e industriali. Può essere usata come tecnica di monitoraggio indipendente, o a supporto di altre tecnologie, per l'analisi delle condizioni di un manufatto. Prevede l'uso di opportuni strumenti di misura quali trasduttori, amplificatori, filtri e sistemi informatici per l'acquisizione dati.

Una caratteristica interessante dell'AE è la sua capacità di individuare i difetti. Diversi studi hanno stabilito che il fenomeno dell'emissione acustica varia in funzione del tipo di danneggiamento in atto nel materiale. In generale, nel corso dell'evoluzione del danneggiamento si osserva un aumento delle emissioni acustiche sia in numero sia in ampiezza, e un abbattimento delle frequenze negli stadi avanzati del processo. Quest'ultimo fenomeno suggerisce la transizione da un regime di microfessurazione a uno in cui si formano macrofessure che alla fine conducono al collasso strutturale.

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Ohtsu, 1996.

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Miller, 1936.

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup> Katsuyama, 1994.

### I CAPITOLO

### L'Emissione Acustica: generalità

L'Emissione Acustica è una tecnica di controllo non distruttivo in quanto non prevede alcuna immissione di energia all'interno dei materiali. Si basa sull'acquisizione di segnali ultrasonori, di solito di frequenza tra i 20 kHz ed 1 MHz, emessi spontaneamente da un materiale sotto sforzo per effetto di fenomeni irreversibili quali danneggiamento, microfessurazione, degradazione, corrosione. Si tratta di una tecnica dinamica e passiva-ricettiva che analizza gli impulsi ultrasonori emessi da una fessura proprio nel momento in cui si genera. In contrasto con la tecnica ultrasonora non si deve misurare la risposta ad un'eccitazione acustica artificiale e ripetibile dall'oggetto in prova, poiché vengono valutati i segnali sonori prodotti dai difetti: ogni crescita di un difetto è un evento unico e non può essere riprodotto. Questa tecnica, quindi, permette di effettuare una diagnosi precoce di danno strutturale incipiente mediante captazione di segnali precursori della frattura.

#### I.1 Il ruolo dei controlli non distruttivi

Sotto la denominazione di controlli non distruttivi (CND) si raggruppa un insieme di esami, prove e rilievi condotti impiegando metodi che non alterano il materiale e non richiedono la distruzione o l'asportazione di campioni dalla struttura in esame, finalizzati alla ricerca e all'identificazione di difetti presenti nella struttura stessa. Come abbreviazione si usa spesso la sigla NDT, derivata dall'espressione inglese *Non Destructive Testing*, o la sigla PnD, derivata dall'espressione "Prove non Distruttive". La finalità di tutti i controlli non distruttivi è in ogni caso la sicurezza, la cui presenza viene verificata in termini di rispondenza a requisiti di affidabilità e di conformità al progetto secondo i quali un determinato prodotto è stato concepito e realizzato. I controlli non distruttivi rivestono un ruolo fondamentale in tre diversi ambiti:

- <u>in fase di collaudo</u>, cioè quando il prodotto viene testato prima di venire utilizzato;
- <u>in fase di controllo</u>, cioè durante la vita utile del prodotto, quando si rende necessario effettuare un monitoraggio della qualità e/o della sicurezza;
- <u>in fase di diagnostica</u>, cioè quando, rilevata la presenza di un malfunzionamento, si rende necessaria la ricerca della causa, la valutazione dell'entità del problema da cui il

malfunzionamento stesso dipende, nonché la raccolta di informazioni di carattere generale dalle quali dipende l'intervento risolutivo.

In ambito civile, inoltre, non è improbabile imbattersi in strutture abitative vetuste, di cui non si possono avere conoscenze precise; in tali casi, l'applicazione di metodi non distruttivi consente la raccolta delle informazioni necessarie.

Di grande importanza è la possibilità di impiegare i metodi non distruttivi per effettuare un monitoraggio completo e continuativo di parametri significativi in periodi più o meno lunghi per il controllo dello stato dei difetti all'interno di un materiale o di una struttura. È possibile ad esempio mantenere sotto controllo lo stato di avanzamento di un quadro fessurativo ritenuto pericoloso o valutare, nel corso della sua vita utile, l'inflessione di un ponte.

La tecnica AE, inoltre, rappresenta l'unico metodo che può essere utilizzato per monitorare i difetti durante la produzione e fornisce informazioni utili non solo sulla loro presenza, ma anche sulle loro criticità.

#### I.2 Le ricerche scientifiche

Le emissioni acustiche furono rilevate per la prima volta nella roccia, nel legno e nel metallo negli anni Trenta. Secondo Drouillard (1996) la prima persona che registrò segnali AE fu Kishinoue (1934). In un articolo giapponese nel 1934, infatti, Kishinoue descrisse un metodo sperimentale per individuare gli urti elastici (AE) durante la piegatura delle tavole di cedro, pini e cipressi giapponesi. I segnali furono registrati su una pellicola cinematografica mentre lo strumento fu sviluppato da Haeno (1930). A differenza di Drouillard, Isono (1984) ha riferito che Förster in Germania è stata la prima persona a rilevare ed indagare i segnali AE: Förster rilevò un piccolo suono durante la crescita di alcune piante utilizzando strumenti di amplificazione e registrazione<sup>4</sup>. A metà degli anni '30 egli sviluppò un sistema che aveva teoricamente lo stesso metodo di elaborazione del sistema AE attualmente utilizzato. Mogi (1962), invece, studiò la generazione AE in roccia in relazione ai terremoti.

L'esempio più noto del fenomeno AE è l'effetto "Kaiser" per i metalli, riscontrato da Kaiser nel 1953: quando i materiali sono sottoposti a carichi ciclici con stress crescente, l'AE non è rilevabile fino a quando il livello di stress in precedenza applicato viene superato. L'applicazione più ovvia dell'effetto Kaiser è quella di determinare il massimo stress precedente applicato che si verifica in una struttura. La sua applicazione al calcestruzzo è stata discussa poiché alcune ricerche<sup>5</sup> dimostrano che per questo materiale l'effetto Kaiser è solo temporaneo: dopo un lungo periodo di tempo, il calcestruzzo, infatti, può "guarire".

Per i materiali compositi esiste un fenomeno simile, il rapporto Felicity, utilizzato per stimare il grado di deterioramento durante il carico<sup>6</sup>: un rapporto di Felicity inferiore all'unità indica danni.

<sup>&</sup>lt;sup>4</sup> Reich e Förster, 1932.

<sup>&</sup>lt;sup>5</sup> Nielsen e Griffen, 1977.

<sup>&</sup>lt;sup>6</sup> Fowler, 1986.

Dopo il lavoro di Kaiser, la ricerca sulle AE è progredita negli Stati Uniti. Schofield (1958) ha usato per primo il termine emissione acustica, in sostituzione ai termini precedentemente usati come "emissione di onde di stress", "attività microsismica" e "rumore". Negli anni Ottanta, Ohtsu ha applicato la teoria dell'identificazione delle sorgenti valida per i terremoti all'analisi delle forme d'onda AE, utilizzando la teoria sismica per caratterizzare la cinematica delle fonti di crack nel calcestruzzo<sup>7</sup>.

#### I.3 Le origini concettuali

Questa tecnica originariamente veniva utilizzata per rilevare fessure e deformazioni plastiche nei metalli, poi è stata applicata agli studi e alla ricerca nel settore delle rocce e successivamente estesa ad una vasta gamma di materiali. La tecnica AE ha conseguito enorme successo in alcuni campi della diagnostica sui materiali, specie laddove applicata a manufatti in esercizio (impianti in pressione, serbatoi e carpenteria metallica). Recentemente l'uso della tecnica AE si è diffuso anche per i materiali in conglomerato cementizio. Il calcestruzzo differisce dai materiali sopra citati per la sua eterogeneità, la sua alta attenuazione e le grandi dimensioni delle strutture realizzate con esso<sup>8</sup>. Nonostante queste difficoltà, la tecnica AE può essere utilizzata con successo per monitorare in modo non distruttivo l'integrità strutturale e caratterizzare il comportamento delle strutture in calcestruzzo quando subiscono deformazioni, fratture o entrambe.

Il calcolo automatico e la capacità di acquisire una mole ingente di dati da più sorgenti contemporaneamente (sistemi multi-canale) ha permesso di affrontare alcune problematiche complesse che riguardano innanzitutto la modellistica del materiale, e successivamente alcune ipotesi di modello per la meccanica della frattura del composito. La capacità di acquisizione veloce, elaborazione e visualizzazione in tempo reale costituisce, inoltre, il salto di qualità necessario per rendere l'applicazione della AE sufficientemente raffinata per un utilizzo ingegneristico.

#### I.4 Il fenomeno

Tutti i solidi hanno una certa elasticità: essi si deformano sotto l'azione di carichi esterni e tornano nella configurazione iniziale quando scaricati. Lo sforzo più elevato sopportabile e la conseguente deformazione elastica dipendono dalla capacità del corpo di immagazzinare energia elastica. Superando il limite elastico, nei materiali fragili, si verifica immediatamente la frattura. Nei materiali dotati di elevata plasticità, invece, la frattura si presenta soltanto successivamente alla deformazione. Se il materiale sottoposto a trazione presenta un difetto (per esempio nei giunti saldati, una inclusione non metallica, una bolla di gas o simili), l'innesco del danno avverrà più probabilmente intorno a tali difetti nativi in quanto verosimilmente punti più fortemente sollecitati. In prossimità dei difetti, infatti, il campo

<sup>&</sup>lt;sup>7</sup> Ohtsu e Ono, 1984, Ohtsu, 1988, Ohtsu et al.

<sup>&</sup>lt;sup>8</sup> Ohtsu, 1996.

di stress viene ulteriormente amplificato<sup>9</sup>. Nei materiali eterogenei (rocce, calcestruzzo, compositi) la frattura avviene al culmine di un danneggiamento progressivo dovuto ai carichi applicati o alla severità delle condizioni ambientali (corrosione, degrado,..). In particolare, il processo di microfratturazione è accompagnato da un veloce moto di dislocazione a cui è associato un rapido rilascio spontaneo di energia sotto forma di onde elastiche transitorie<sup>10</sup>, o emissioni acustiche (AE). L'evento di emissione acustica si manifesta come un'onda elastica che si propaga attraverso il materiale verso la superficie dell'elemento e può essere rilevata da sensori appropriati che la trasformano in segnale elettrico. L'onda di sforzo transitoria termina quando viene raggiunta una nuova configurazione di equilibrio, in cui le forze risultanti che agiscono su ciascun elemento di volume svaniscono (Figura 1). Il segnale AE porta con sé una certa quantità di informazioni che lo caratterizzano, individuandone l'origine e la provenienza. Esso si genera solo quando la cricca cresce oppure quando i suoi bordi si toccano l'un l'altro. Le fratture sono sorgenti AE solo quando si propagano.



Figura 1. Emissione acustica generata dalla formazione di un microcrack rappresentata in tre fasi: avviamento a partire da un punto debole, propagazione, arresto quando si raggiunge una configurazione di equilibrio.

<sup>&</sup>lt;sup>9</sup> Pollock, 1968.

<sup>&</sup>lt;sup>10</sup> Analogia con gli eventi sismici.

### **II CAPITOLO**

### L'Emissione Acustica: la meccanica della frattura

Nella Meccanica della Frattura Elastica Lineare (LEFM) la dissipazione di energia dovuta alla nascita e crescita delle fessure si manifesta in una zona infinitesima attorno all'apice della fessura, dove il campo tensionale è considerato infinito. Nei materiali "reali", invece, questo fenomeno, che anticipa l'avanzamento del crack, si presenta in una zona chiamata "di danneggiamento" posta di fronte all'apice della fessura, di dimensioni finite e dove lo stato di tensione è limitato dalla resistenza stessa del materiale ( $\sigma_u$ ).

Mentre i materiali duttili presentano comportamenti simili a trazione e a compressione, quelli fragili mostrano attitudini considerevolmente diverse. Il calcestruzzo, ad esempio, è duttile in compressione e fragile in trazione, e presenta una resistenza ultima a compressione che è circa un ordine di grandezza superiore a quella a trazione. La fragilità e la duttilità di una struttura sono definite facendo riferimento, oltre che alla dimensione della struttura stessa, alla resistenza e alla tenacità del materiale e dipendono dalla temperatura ambientale. Due caratteristiche intrinseche del materiale e una caratteristica geometrica della struttura costituiscono infatti la base minima per poter prevedere il tipo di risposta struttura. Inoltre, la duttilità non è una caratteristica del materiale bensì una caratteristica dell'intera struttura. Mantenendone invariati materiale e forma geometrica, e aumentandone la scala dimensionale, si riscontra infatti, anche in laboratorio, per tutti i materiali, siano essi metallici, polimerici, ceramici o cementizi, una netta transizione verso comportamenti di tipo fragile, con una caduta improvvisa della capacità di carico e una propagazione rapida della fessura. Al contrario, con provini di dimensioni modeste si ha un comportamento di tipo duttile e una propagazione lenta della fessura.

#### II.1 L'energia dissipata

Un metodo per descrivere coerentemente i materiali quasi-fragili a comportamento elasto-*softening*, è quello di utilizzare il *Modello della fessura coesiva*, articolato in una coppia di leggi costitutive:

• relazione *tensione–deformazione*: descrive il comportamento elastico incrudente del materiale integro sino alla tensione massima  $\sigma_u$ , compresi scarichi. Figura 2 (a);

• relazione *tensione–apertura della fessura*: descrive il comportamento *softening*, incrudimento negativo, del materiale fessurato, sino all'apertura critica  $w_c$ , oltre la quale si annulla l'interazione tra le facce della fessura. Figura 2 (b).

In questi materiali l'energia viene quasi esclusivamente dissipata sulla superficie della fessura; nel caso più generale di comportamento elastico, incrudente e *softening*, l'energia viene dissipata sia nel volume del materiale integro sia sulla superficie della fessura.



Figura 2. Energia dissipata

Mentre il ramo decrescente  $\sigma(\varepsilon)$  dipende dalla base di misura utilizzata, per esempio dalla lunghezza  $l_0$  tra due punti per i quali si vuole misurare lo spostamento relativo, il diagramma  $\sigma(w)$ , che rappresenta la tensione trasmessa attraverso una fessura, in funzione dell'apertura della fessura stessa, risulta essere una vera caratteristica del materiale. Questa legge di decadimento indica un indebolimento dell'interazione all'aumentare della distanza tra le facce del crack. Quando w raggiunge il valore limite  $w_c$  l'interazione si spegne e la fessura diviene una sconnessione completa che divide in due parti distinte il provino. L'area sottesa dalla curva  $\sigma(w)$ , Figura 2 (b), rappresenta l'energia dissipata sull'unità di superficie, ossia l'energia assorbita dal provino durante la propagazione della fessura fino al completo collasso. Questa quantità prende il nome di Energia di frattura,  $G_{IC}$ :

$$G_{IC} = \int_{o}^{w_{c}} \sigma(w) dw$$

Essendo la legge coesiva  $\sigma(w)$  una caratteristica del materiale, che dipende dalla struttura intima e dai meccanismi di danneggiamento del materiale stesso, anche l'energia di frattura  $G_{IC}$  risulta essere una proprietà intrinseca del materiale.

L'area tratteggiata riportata in Figura 2 (a) rappresenta, invece, l'energia dissipata nell'unità di volume. L'energia totale dissipata è data, quindi, dalla somma di quella dissipata nel volume e quella sulla superficie del crack.

#### II.2 Il fenomeno dello snap-back

Il *softening* a pendenza positiva (*snap-back*) rappresenta un fenomeno appartenente alla Teoria delle Catastrofi: si tratta di un ramo, del grafico  $\sigma - \varepsilon$ , a pendenza positiva che può essere rilevato sperimentalmente solo se la prova di carico è condotta controllando l'apertura delle labbra della fessura (CMOD<sup>11</sup>).

In Figura 3 è riportato l'andamento della forza in funzione dell'allungamento  $(F - \Delta l)$  per diverse distanze dei trasduttori di misura. Come si può vedere, all'aumentare di  $l_0$  si ottengono tratti elastici a rigidezza calante e tratti *softening* a pendenza negativa crescente e, oltre un certo limite, a pendenza positiva (tratto UQ). Se il processo di carico è condotto controllando la dilatazione convenzionale  $\varepsilon$ , o analogamente il  $\Delta l$ , una volta raggiunto il punto U si ha una caduta verticale del carico fino ad incontrare il tratto di *softening* inferiore che è a pendenza negativa. Il tratto UQT viene così ignorato e diventa virtuale: per rilevarlo sperimentalmente è necessario condurre la prova controllando l'apertura w della fessura.

Sul piano  $\sigma - \varepsilon$  la transizione appena descritta è rappresentata da un unico tratto elastico lineare e da un ventaglio di rami *softening* al variare della lunghezza.



Figura 3. Curve di risposta sul piano F –  $\Delta l e \sigma - \epsilon$ 

<sup>8</sup> 

<sup>&</sup>lt;sup>11</sup> Crack Mouth Opening Displacement.

La pendenza positiva del ramo *softening* si può anche giustificare, oltre che in termini di energia dissipata, per la derivazione analitica della funzione  $\varepsilon(\sigma)$ ; si hanno tratti di *softening* a pendenza positiva per:

$$l_0 > E / \left| \frac{d\sigma}{dw} \right|_{max}$$

cioè quando la lunghezza del provino, o meglio la distanza  $l_0$  tra i punti di cui si stima lo spostamento relativo, è superiore al rapporto tra il modulo elastico e il massimo modulo tangente della legge coesiva.

#### **II.3** L'energia di frattura e lo snap-back

L'energia di frattura rappresenta uno dei parametri capaci di misurare la tenacità del materiale<sup>12</sup> e, a seconda del valore assunto, si può descrivere il suo comportamento strutturale. Se si sottopone una lastra di calcestruzzo ad una prova di flessione su tre punti (*Three Point Bending Test*), al variare della profondità relativa a/h della fessura iniziale, per  $G_{IC} = 0.05 \ kg/cm$  e  $h = 15 \ cm$  si ottiene il grafico, in termini di curva carico-freccia, riportato in Figura 4.



Figura 4. Risposta strutturale in termini di curva carico – freccia\_ $G_{IC} = 0.05 \ kg/cm$ 

Come si può notare, all'aumentare del rapporto a/h si ottiene un decremento di rigidezza e di capacità di carico insieme ad un incremento di duttilità. La coda della risposta  $P - \delta$  risulta insensibile alla lunghezza della fessura inziale. Se si diminuisce la tenacità del materiale, ad esempio impostando  $G_{IC} = 0.01 \ kg/cm$ , si osservano le stesse tendenze del caso precedente ma le risposte appaiono più fragili (Figura 5). In particolare, la curva corrispondente a a/h = 0, ossia provino integro, mostra un marcato fenomeno di *snap-back* (tratto BC): esso scompare per a/h > 0.25.

<sup>&</sup>lt;sup>12</sup> A valori elevati dell'energia di frattura corrispondono tenacità maggiori.



Figura 5. Risposta strutturale in termini di curva carico – freccia\_ $G_{IC} = 0.01 \ kg/cm$ 

In Figura 6 sono riportati i diagrammi del carico *P* in funzione dell'apertura delle labbra della fessura (CMOD).



Figura 6. Diagramma di P in funzione dell'apertura delle labbra della fessura

Con il materiale a maggiore tenacità la fessura tende ad aprirsi prima del raggiungimento del carico massimo, mentre con quello più fragile la fessura si apre esattamente in corrispondenza del carico massimo e continua ad aprirsi in modo monotono al diminuire del carico in fase *softening*.

L'infragilimento della risposta strutturale prodotto dall'abbassamento della tenacità  $G_{IC}$  del materiale può essere generato anche da una dilatazione della scala dimensionale *b*. In Figura 7 si riportano le risposte strutturali della lastra considerata in precedenza per  $G_{IC} = 0.05 kg/cm$  e quattro diverse dimensioni: (*a*) h = 10 cm; (*b*) h = 20 cm; (*c*) h = 40 cm; (*d*)h = 80 cm.



Figura 7. Risposta strutturale in funzione di diverse altezze del provino

Con  $h = 10 \ cm$  la risposta è di tipo *softening* per ogni profondità della fessura iniziale mentre con  $h = 20 \ cm$  si ha una caduta pressochè verticale della capacità di carico per la lastra inizialmente integra. Con  $h = 40 \ cm$  si registra invece un chiaro fenomeno di snap-back che, con  $h = 80 \ cm$ , si trasforma in una cuspide particolarmente acuminata.

Tutto ciò che si è detto può essere riassunto in modo unitario e sintetico tramite la variazione di un numero di fragilità adimensionale, di tipo energetico<sup>13</sup>:

$$s_E = \frac{G_{IC}}{\sigma_u h}$$

<sup>&</sup>lt;sup>13</sup> Carpinteri, 1984.

Da questo parametro se ne può ricavare un secondo, che permette di identificare la presenza dello *snap-back*:

$$B = \frac{s_E}{\varepsilon_u \lambda}$$

Si è in presenza di ramo *softening* a pendenza positiva, nel caso di provino sottoposto a flessione su tre punti e a prova di trazione, se *B* risulta rispettivamente  $\leq \frac{1}{3} e \leq \frac{1}{2}$ .

In Figura 8 si riporta un esempio di risposta carico-freccia in forma adimensionale, per a/h = 0.1,  $\varepsilon_u = 0.87 \times 10^{-4}$ , v = 0.1, l = 4h, al variare di  $s_E$ .



Figura 8. Grafico Carico - Freccia adimensionale

È evidente come, al variare di  $s_E$  su quattro ordini di grandezza, la forma della curva muti totalmente, da duttile a fragile. Per  $s_E < 10.45 \times 10^{-5}$  il ramo *softening* acquista, per un tratto, pendenza positiva e quindi si verifica lo *snap-back*.

#### II.4 L'energia emessa



Figura 9. Grafico  $\sigma - \varepsilon$ , presenza dello snap – back

In Figura 9, si riportano i possibili rami di un grafico  $\sigma - \varepsilon$ : il softening a pendenza negativa rappresenta una condizione di stabilità, mentre quello a pendenza positiva è indice di una situazione di allarme. Infatti, l'area tratteggiata (ABDC), compresa tra il ramo di snap-back e quello che si avrebbe se la prova fosse a controllo di spostamento (deformazione), corrisponde all'energia che viene emessa dal provino durante la rottura. Questa energia può essere emessa o sotto forma di energia cinetica, causando una vera e propria esplosione del provino, o tramite la formazione di onde di pressione, vibrazioni. In questo caso si parla di emissioni acustiche che, rilevate da appositi sensori, permettono di prevenire il verificarsi di eventi catastrofici, dalla scala del laboratorio a quella delle strutture. Si può quindi dire che l'energia di emissione acustica è proporzionale all'energia emessa durante la frattura: si tratta di un'energia in più, che non viene assorbita dal materiale.

Nei materiali fibro-rinforzati o nei compositi, il meccanismo di fratturazione si manifesta in modo diverso, in quanto le zone fessurate crescono più lentamente. Questo è dovuto alla complessità ed eterogeneità della struttura che permette all'energia di dissiparsi in diversi modi. Inoltre, l'interfaccia tra i componenti, matrice e fibre, e la stessa eterogeneità del materiale, agiscono come meccanismo di arresto delle fessure, fornendo ulteriore resistenza e generando una risposta strutturale di tipo quasi duttile.

Il calcestruzzo armato presenta un comportamento molto simile a quello sopra descritto: è costituito infatti da una matrice cementizia eterogenea con annegate all'interno delle barre di armatura di acciaio. La sua risposta strutturale può essere spiegata facendo riferimento alla teoria del "*Bridged Crack*", secondo la quale le fibre, o armature, fanno da cucitura alle fessure presenti nella matrice.

Per i materiali rinforzati<sup>14</sup> si definisce il numero di fragilità  $N_P$  dato dalla seguente espressione:

$$N_P = \frac{f_y h^{1/2}}{K_{IC}} \rho$$

<sup>&</sup>lt;sup>14</sup> Carpinteri, 1981.

in cui:

- $\rho = \frac{A_s}{A}$ : percentuale di armatura;
- $f_y$ : tensione di snervamento dell'acciaio;
- *h*: altezza della sezione del provino testato  $\rightarrow$  indica la scala;
- *K<sub>IC</sub>* : tenacità alla frattura della matrice (valore critico del fattore di intensificazione degli sforzi).

Le Figure 10, 11 e 12 riportano i diagrammi teorici adimensionali, relativi ad una trave in cemento armato inflessa, ottenuti per differenti numeri di fragilità, che presentano in ascissa la rotazione normalizzata  $\frac{\phi}{\phi_0}$  ed in ordinata il momento di frattura adimensionalizzato  $\frac{M_F}{K_{IC}h^{1.5}b}$  (*b* rappresenta la base della sezione). Il numero di armature presenti è pari a 10.



Figura 10. Diagramma momento-rotazione con  $N_P = 0.1$ 



Figura 11. Diagramma momento-rotazione con  $N_P = 0.4$ 



Figura 12. Diagramma momento-rotazione con  $N_P = 0.7$ 

Come si può notare, si ha una transizione nella risposta globale che passa da *strain-softening* per  $N_P = 0.1$ , a *strain-hardening* per  $N_P = 0.7$ : all'aumentare del numero di fragilità si ha una minor fragilità e quindi una maggior sicurezza. Un incremento del numero di fragilità si può ottenere variando ad esempio la percentuale di armatura presente nella sezione (percentuali maggiori conducono a numeri di fragilità più elevati) oppure variando, a parità di area totale degli elementi di rinforzo, l'altezza della sezione (altezze minori definiscono  $N_P$  maggiori). Tutti e tre i grafici presentano un primo tratto caratterizzato da discontinuità localizzate che danno alla curva l'aspetto a dente di sega (*saw-tooth appearance*). Tale tratto definisce la risposta della sezione al propagarsi della fessura finché questa non raggiunge l'ultima fibra.

Le discontinuità presenti nei grafici, il cui numero è funzione del numero di fibre presenti all'interno della matrice, sono indice di instabilità locali e possono essere spiegate dai ripetuti arresti con successiva propagazione della fessura, dovuti all'azione *bridging* delle fibre e all'eterogeneità della matrice cementizia. In particolare le cuspidi identificano i punti in cui la fessura inizia a propagarsi in modo instabile ed improvviso, mentre i punti di minimo rappresentano i punti in cui la fessura si arresta. Si può inoltre notare la presenza di molti tratti di *snap-back* (*snap-back* progressivo) e quindi di aree corrispondenti ad energia emessa dal materiale durante la propagazione delle fessure. La parte terminale delle singole curve di ricarico, dal punto di minimo alla cuspide, è sempre lineare, confermando l'esistenza di una azione localizzata che incrementa la tenacità e quindi la capacità portante della sezione mentre la fessura rimane di lunghezza costante (arresto).



Una situazione diversa si ha nel caso di n° 2 armature e  $N_P = 0.9$  (Figura 13).

Figura 13. Diagramma momento-rotazione con  $N_P = 0.9$ 

A seguito della prima azione di richiusura della fessura (tratto con partenza dal punto B), si raggiunge il punto C: se la prova è condotta a spostamento controllato si ha un tratto di *snap-back* (propagazione instabile) e si raggiunge il punto D, mentre se è a carico controllato, dal punto C si "salta", a carico costante, direttamente al punto C". Quest'ultimo fenomeno è noto come *snap-through*: si tratta di un brusco cambio di configurazione, in cui la fessura si apre in modo smisurato a seguito del passaggio da una condizione instabile ad una stabile. Una volta raggiunto C", aumentando il carico, si ha ancora un incremento della tenacità e quindi della capacità portante della sezione (margine di sicurezza), fino al punto E. Il tratto E-F rappresenta, invece, lo snervamento delle armature, dopo il quale si ha il raggiungimento della condizione ultima. Mentre lo *snap-back* è dovuto sostanzialmente alla rottura fragile del calcestruzzo, lo *snap-through* è causato dallo sfilamento, snervamento e incrudimento delle barre di armatura.



Figura 14. Snap-back e snap-throug

#### **III CAPITOLO**

### L'Emissione Acustica: la strumentazione

#### III.1 I sistemi di acquisizione dati

Inizialmente la registrazione e l'elaborazione di grandi quantità di dati di emissione acustica rappresentava una vera e propria limitazione. I recenti sviluppi nella tecnologia informatica hanno notevolmente ridotto questi limiti<sup>15</sup>.

Nel corso degli anni il monitoraggio AE è cambiato: inizialmente si contava semplicemente il verificarsi degli eventi, con lo scopo di estrarre diversi parametri, come per esempio il tempo di arrivo o l'ampiezza del segnale. Questa procedura fa riferimento all'analisi parametrica di cui si parlerà nel Capitolo IV. Un ulteriore passo avanti è stata l'analisi e la memorizzazione delle forme d'onda complete di una serie temporale di eventi AE. Questa procedura è denominata tecnica AE basata sui segnali. Una condizione preliminare per questo progresso è stato sicuramente il miglioramento del sistema di registrazione. L'oscilloscopio, infatti, è stato sostituito da un registratore transitorio multicanale con elevata frequenza di campionamento, capacità di memorizzazione elevata e brevi intervalli di tempo durante i quali lo strumento non è in grado di accettare nuovi dati. Recentemente è stato proposto un nuovo sistema di monitoraggio basato su una rete di sensori wireless per grandi strutture<sup>16</sup>.

Se si analizza nel dettaglio l'evoluzione della strumentazione si possono apprezzare maggiormente i cambiamenti: all'inizio si utilizzava il sistema "Atel", che prevedeva solamente il conteggio dei segnali senza permettere la localizzazione. Successivamente si è fatto uso dell'apparecchiatura "USAM", molto simile alla precedente ma con la possibilità di localizzare la sorgente di emissione. Ora si utilizza il "AEmission System" che può trasmettere i dati a distanza ed effettuare un'analisi automatica direttamente in situ.

<sup>&</sup>lt;sup>15</sup> Kawamoto e Williams, 2002.

<sup>&</sup>lt;sup>16</sup> Grosse, 2004.

#### III.1.1 Apparecchiatura Atel

Si tratta di un sistema in cui i trasduttori sono impostati su una frequenza – banda larga - tra 100 kHz e 400 kHz e consiste in (Figura 15):

- un amplificatore;
- un filtro Pbs;
- un misuratore di soglia;
- un contatore di oscillazioni;
- un registratore.

Il livello di soglia (*threshold*) è impostato a 100  $\mu$ V ed è amplificato a 100 mV, con un guadagno di 60 dB, mentre il limite del conteggio di oscillazioni è fissato a 255 ogni 120 secondi. La metodologia di analisi usata con questa apparecchiatura è la "*Ring-Down Counting*". Questa tecnica, però, considera anche altre procedure: per esempio, è possibile considerare tutte le oscillazioni prodotte da un singolo segnale di emissione acustica come un unico evento e quindi sostituire il "*Ring\_Down Counting*" con il "*Counting of Events*" (Capitolo IV). L'apparecchiatura Atel non permette la localizzazione della sorgente di emissione acustica.



Figura 15. Sistema Atel

#### III.1.2 Apparecchiatura USAM

Si tratta di un sistema in cui i trasduttori sono impostati su una frequenza – banda larga - tra 50 kHz e 800 kHz e consiste in:

- n° 6 sensori pre-amplificati, ognuno dei quali è collegato ad un'unità che registra i segnali. Tali unità possono lavorare indipendentemente oppure possono essere sincronizzate tra di loro;
- n° 1 unità centrale per la fase di sincronizzazione;
- n° 1 misuratore di soglia.

Tramite questa elaborazione si può determinare il grado di danneggiamento della struttura utilizzando un'analisi di tipo parametrico – si estrapolano i parametri ritenuti fondamentali - e si possono localizzare le microfessure; non presenta, però, un sistema di analisi automatica dei dati.

#### III.1.3 AEmission System

Si tratta di un sistema che permette l'individuazione e la localizzazione di aree danneggiate senza conoscerne "a priori" la posizione. Non prevede nessuna immissione di energia all'interno dei materiali - approccio non invasivo, indicato per il monitoraggio di elementi particolarmente delicati e di pregio, come strutture di interesse storico e artistico – e può essere utilizzato per monitorare attrezzature mentre sono in funzione (ad esempio nell'industria). È composta da un'unità di lettura, una serie di sensori e un software di elaborazione dati. I segnali sono captati attraverso speciali sensori che vengono forniti con l'apparato, applicati alla struttura da monitorare e collegati tramite cavi ad una centralina che contiene all'interno un software. Gli output vengono quindi salvati all'interno della memoria della centralina e processati; possono anche essere trasmessi per via telematica ad una stazione ricevente consentendo una valutazione a distanza e in tempo reale dell'evoluzione dei fenomeni di danneggiamento e di degrado delle strutture. La peculiarità di questo sistema rispetto alle apparecchiature precedenti è, oltre alla possibilità di trasmettere in tempo reale i dati a distanza, quella di effettuarne un'analisi automatica, ossia una prima elaborazione - estrapolazione di parametri statistici direttamente in situ (Figura 16). La possibilità di mantenere sotto controllo anche grandi elementi strutturali permette un risparmio di tempo e denaro per tutti i sistemi e le costruzioni che necessitano di un monitoraggio continuo. L'obiettivo finale è comunque quello di poter monitorare in continuo e contemporaneamente più strutture, e volendo più siti, a distanza.

Le principali caratteristiche di questo sistema sono<sup>17</sup>:

- Identificazione del danneggiamento accumulato nella struttura attraverso il conteggio cumulato nel tempo dei segnali di emissione acustica;
- Valutazione dell'evoluzione del danneggiamento della stabilità della struttura monitorata;
- Localizzazione tridimensionale delle sorgenti di danneggiamento con l'individuazione delle fratture in fase di avanzamento.



Figura 16. Principio di funzionamento AEmission System

<sup>&</sup>lt;sup>17</sup> Le caratteristiche tecniche dell'AEmission System sono state reperite da Lunitek S.r.l.

#### III.2 I sensori

I sensori comunemente utilizzati possono essere suddivisi in due categorie:

- a banda larga;
- risonanti.

I trasduttori a banda larga presentano una risposta in frequenza piatta, sono sensibili allo stesso modo a tutte le frequenze per cui trattano tutti i segnali in maniera uguale. Ciò determina una gamma di frequenze più ampia ma una sensibilità inferiore. Da queste considerazioni ne consegue che se il segnale è "piccolo" non viene percepito.



Figura 17. Trasduttore a banda larga

Figura 18. Risposta piatta

I sensori risonanti, invece, sono più sensibili a determinate frequenze, che dipendono dalla frequenza di risonanza dei cristalli presenti all'interno. Un tipico sensore AE trasforma vibrazioni elastiche, vale a dire onde di stress, di ampiezza da 9 a 10 mm in segnali elettrici di ampiezza da 6 a 10 V.



Figura 19. Trasduttore risonante

Figura 20. Risposta ad alta sensibilità a certe frequenze

I sensori più utilizzati sono quelli piezoelettrici (PZT, piombo-zirconato di titanio): essi sono robusti e più sensibili rispetto ad altri tipi di sensori (come i capacitivi, elettrodinamici o laser-ottici). La sensibilità di un sensore piezoelettrico può raggiungere valori al di sopra dei 1000 V/µm. La loro struttura è riportata in Figura 21.



Figura 21. Struttura di un sensore piezoelettrico

L'AEmission System utilizza questo tipo di sensori, con frequenza di risonanza di circa 65 kHz.

Nel caso di monitoraggio di strutture grandi e complesse si utilizzano maglie (*array*) di sensori che permettono di localizzare meglio le sorgenti AE e quindi l'eventuale danneggiamento del materiale.

#### **IV CAPITOLO**

### L'Emissione Acustica: la tecnica

La tecnica dell'emissione acustica (AET) si basa sul rilevamento delle emissioni acustiche e sulla loro conversione in segnali di tensione tramite l'utilizzo di appositi sensori. I segnali di emissione acustica sono rilevati attraverso trasduttori, applicati sulla superficie dell'elemento monitorato, che sfruttano la capacità di alcuni cristalli di produrre segnali elettrici ogni volta che sono sottoposti a stress meccanico ( $10^{-9}$  mm  $\rightarrow 10^{-6}$  V).

L'evoluzione del danneggiamento è caratterizzata da un aumento sia del numero di emissioni acustiche nell'unità di tempo sia della loro ampiezza, ma anche da un abbattimento delle frequenze. Inizialmente i sensori ricevono solo segnali ad alta frequenza<sup>18</sup> (50 kHz – 1 MHz), ultrasonici, che sono sintomo della comparsa di microfessure (dell'ordine del millimetro). Successivamente si ha un aumento di questi segnali e l'arrivo di emissioni acustiche a bassa frequenza (1 – 10 kHz), ossia appartenenti al campo dell'udibile, che portano ad un incremento delle microfessure e l'instaurarsi di macrofessure (dell'ordine di questi segnali a bassa frequenza e il calo delle emissioni acustiche ultrasoniche indicano che il processo è dominato dalla propagazione di macrofessure che portano al collasso della struttura (fenomeno del "*crackling*"). In Figura 22 sono riportati, in termini di emissioni acustiche ultrasoniche ed udibili, i risultati di una prova di compressione su un provino di materiale eterogeneo caricato fino a rottura. La comparsa di emissioni di ampiezza crescente nel tempo è anch'esso sinonimo di un'evoluzione della danneggiamento: è noto, infatti, che l'ampiezza delle onde è proporzionale alla dimensione della frattura sorgente delle stesse.



Figura 22. Emissioni acustiche ad alta e bassa frequenza ottenute da un provino caricato fino a rottura

<sup>&</sup>lt;sup>18</sup> Si tratta di precursori migliori perché anticipano maggiormente il collasso.

I segnali di AE (gli output) che provengono dai trasduttori sono amplificati e, prima di procedere alla loro elaborazione, vengono filtrati tramite l'adozione di un'opportuna soglia, in modo tale da escludere il rumore di fondo (*background noise*), come per esempio le vibrazioni derivanti dalla strumentazione meccanica o dipendenti dalle condizioni ambientali nelle quali si svolge il monitoraggio. La soglia è impostata dall'utilizzatore al valore più opportuno: si considerano solo i segnali che superano tale soglia. A questo punto i segnali di emissione acustica possono essere registrati e processati (Figura 23).



Figura 23. Schema dell'apparato sperimentale

L'intensità di un evento è misurata dal numero di oscillazioni N<sub>T</sub> che cresce con l'ampiezza del segnale. Esistono due diversi metodi di conteggio delle emissioni acustiche: il "*Ring-Down Counting*" e il "*Counting of Events*".

#### IV.1 Ring – Down Counting e Counting of Events

Il principio del *Ring–Down Coun*ting è quello di contare il numero di attraversamenti del valore di soglia da parte di un segnale<sup>19</sup>. Il *Counting of Events*, invece, è una procedura secondo cui ogni segnale, ossia l'insieme di tutte le oscillazioni associate ad un microcrack, è interpretato come un singolo evento. Il principio del conteggio degli eventi è semplicemente quello di contare il numero di segnali che supera una determinata tensione di soglia<sup>20</sup>: il primo attraversamento è quello che fa avanzare il conteggio (Figura 24).

<sup>&</sup>lt;sup>19</sup> Pollock, 1973; Brindley et al., 1973.

<sup>&</sup>lt;sup>20</sup> Brindley et al., 1973.



Figura 24. Ring - Down Counting vs. Counting of Events

#### IV.2 Analisi parametrica

Di tutto il segnale registrato solo alcune parti risultano essere importanti e significative per comprendere il fenomeno; i parametri più importanti sono (Figura 25):

- <u>Hit</u>: segnale che supera il valore di soglia (*threshold*) e avvia l'acquisizione del sistema. È il parametro principale per il conteggio e il riconoscimento dell'attività AE.
- <u>Tempo di arrivo t</u>: tempo assoluto che rappresenta il primo attraversamento della soglia da parte del segnale;
- <u>Ampiezza di picco A (amplitude)</u>: intensità del picco massimo del segnale, espresso in Volt o in Decibel;
- <u>Counts</u>: numero di attraversamenti del valore di soglia;
- <u>Durata</u> (*duration*): intervallo di tempo tra il primo e l'ultimo attraversamento della soglia (*trigger*). La durata ha un valore massimo da assegnare al sistema di registrazione. Questo è per evitare anche che un hit abbia durata infinita;
- <u>Rise time *RT* (*tempo di crescita*): intervallo di tempo tra il primo superamento di soglia e l'ampiezza di picco. Può essere strettamente connesso alla tipologia di frattura;</u>
- <u>Energia *E*</u>: area sottesa dalla curva che rappresenta il segnale avente come limite inferiore il valore di soglia;
- <u>Root mean square *RMS*</u>: radice quadrata media del rumore di fondo continuo.



Figura 25. Parametri caratteristici di un segnale AE

Passando al dominio delle frequenze con la trasformata di Fourier si possono ottenere altri due parametri significativi (Figura 26):

- <u>Baricentro della frequenza</u>: frequenza ottenuta dal rapporto tra la somma di ampiezze delle frequenze e la somma delle ampiezze;
- <u>Frequenza di picco</u>: nel dominio delle frequenze indica il punto in cui si presenta il picco massimo [KHz].



Figura 26. Le frequenze di un segnale AE

Gli eventi, spesso, possono essere prodotti non sono solo dai difetti che si vogliono controllare, ma anche da valori di picco del rumore di fondo, il quale qualche volta può anche superare un threshold alto. Quindi è molto importante saper determinare ciò che è utile da ciò che è indesiderato: nella maggior parte dei casi segnali con meno di tre passaggi di soglia e durate minori di 3 µS possono essere considerati conseguenza di rumore. Infatti, segnali molto brevi potrebbero indicare picchi di rumore elettrico, specialmente se arrivano a tutti i canali nello stesso istante.

#### IV.2.1 Classificazione delle fratture attive

Per classificare le fratture attive si calcola il "*Rise Angle*" (RA), dato dal rapporto tra il "*RiseTime*" (RT) – intervallo di tempo tra il primo attraversamento del valore di soglia e l'istante in cui si raggiunge l'ampiezza di picco – e la massima ampiezza di ciascun segnale (A).

$$RA = \frac{RT}{A}$$



Figura 27. Rise Angle

A seconda dell'ordine di grandezza assunto dal Rise Angle si possono avere due tipi di frattura (Figura 27):

- Modo 1: crack di trazione, distacco, RA basso;
- Modo 2: crack dovuto al taglio, scorrimento, RA alto.

Un altro parametro usato per classificare il modo di fessurazione è l' "Average Frequency" (AF), ottenuto dal rapporto tra il numero di attraversamenti del valore di soglia e la durata del segnale.

Dalla combinazione dei due parametri - *Rise Angle* e *Average Frequency* – si ottiene un'ulteriore classificazione secondo cui a piccoli RA e ad alte frequenze corrispondono fratture di trazione, mentre a grandi valori di RA e a basse frequenze si ha un crack di taglio (Grafico 1).



Grafico 1. RA – AF

#### **IV.3** Natural Time Analysis

Per cercare di predire il momento in cui un elemento stia per collassare a causa della formazione e della propagazione di difetti o fessure preesistenti, nel 2001<sup>21</sup> si è sviluppato un metodo alternativo ed innovativo, basato sull'analisi di serie temporali di eventi in termini di "Natural Time  $\chi$ ". Le analisi delle serie di tempo, associate ad un sistema complesso, secondo il tempo naturale può fornire informazioni utili e può rivelare alcune proprietà solitamente non riscontrabili se si studia il sistema con riferimento al tempo convenzionale. Negli anni vari autori<sup>22</sup> hanno analizzato, in questo "nuovo" dominio di tempo, dati appartenenti a diversi campi di studio, come per esempio della Biologia, Cardiologia, Fisica, Scienze Ambientali, Geofisica, Fisica dei Sistemi Complessi, Fisica Statistica e Sismologia. Infatti, questo nuovo tipo di analisi è stato inizialmente dimostrato per le rocce e applicato ai terremoti. Esperimenti effettuati in laboratorio mostrano che, in fase di transizione vetrosa, a causa del processo di (ri)orientamento di dipoli elettrici e della presenza di una pressione critica, viene emessa energia meccanica che, per le caratteristiche degli atomi coinvolti, viene trasformata in impulsi elettrici. Le caratteristiche di questi impulsi sono molto simili a quelle delle attività elettromagnetiche sismiche (SES - Seismic Electric Signals), ossia variazioni a bassa frequenza ( $\leq 1$  Hz) del campo elettrico terrestre (E) che si è scoperto precedere i terremoti di parecchie ore o addirittura di alcuni mesi. Una volta registrate si può procedere alla loro elaborazione in termini di dominio di tempo naturale e stimare così il verificarsi di un evento sismico con una precisione migliore (circa pochi giorni) rispetto a quella calcolata con i mezzi finora disponibili.

Nell'ambito dei fenomeni critici<sup>23</sup> il processo di fessurazione è visto come uno stato critico di un sistema dinamico e il problema dell'individuazione dei precursori di frattura, indici del crollo finale di elementi strutturali, viene trasformato nell'indagine di indicatori che rivelano l'ingresso in uno "stato critico".

Applicata alle serie temporali di AE, la *Natural Time Analysis* fornisce l'opportunità di avere un approccio "sistematico" per comprendere il processo di fessurazione e riveste un ruolo importante nel predire eventi catastrofici ed irreversibili imminenti<sup>24</sup>. In una serie temporale di *N* eventi,  $NT_{\chi}$  è l'ordine di accadimento di ogni evento diviso per il numero di eventi; il k-esimo evento di una serie temporale è:

#### $\chi_k = k/N$

I suoi valori sono sempre numeri razionali discreti, compresi nell'intervallo (0; 1].

<sup>&</sup>lt;sup>21</sup> Varotsos et al., 2001; 2002a,b.

<sup>&</sup>lt;sup>22</sup> Vargas et al., 2015, Flores – Márquez et al., 2014; Ramirez – Rojas et al., 2011, Rundle et al., 2012; Holliday et al., 2006.

<sup>&</sup>lt;sup>23</sup> Bak et al., 1989; Stanley, 1999.

<sup>&</sup>lt;sup>24</sup> Varotsos, Sarlis, Skordas; Varotsos et al., 2011 – 2011b – 2013.



Grafico 2. Trasformazione da tempo convenzionale a tempo naturale

Nei grafici sopra riportati è indicata la trasformazione di una serie temporale di eventi dal dominio del tempo convenzionale al dominio NT, mantenendo solo l'ordine normalizzato di accadimento e l'energia di ogni evento, mentre si trascura l'intervallo di tempo effettivo tra due eventi consecutivi.

L'analisi in termini di *natural time* è condotta studiando l'evoluzione della coppia ( $\chi_k$ ,  $p_k$ ), dove  $p_k$ è l'energia normalizzata del k-esimo evento, ossia la probabilità di osservare il k/N evento:

$$p_k = \frac{Q_k}{\sum_{i=1}^N Q_i}$$

La serie temporale  $\{p_k\}$  nel dominio NT può essere considerata come una distribuzione di probabilità della variabile stocastica  $\chi_k$  (Grafico 3):



Grafico 3. Energia in funzione del tempo naturale

con:

- $0 < p_k < 1$
- $\sum_i p_i = 1 \rightarrow$  in accordo con Kolmogorov (1956)
- $p_k \equiv p(\chi_k)$  probabilità di osservare un evento al *Natural Time*  $\chi_k$ .
- $\mu = \langle \chi \rangle$
- $\sigma^2 = \langle \chi^2 \rangle \langle \chi \rangle^2$ : la varianza  $\sigma^2$  è un parametro chiave per identificare l'avvicinamento ad uno stato critico.

Quando un nuovo evento di emissione acustica arriva,  $\chi_k$  e  $p_k$  vengono riscalate (Grafico 4):

$$k/N \rightarrow k/(N+1)$$

$$Q_k / \sum_{i=1}^N Q_i \rightarrow Q_k / \sum_{i=1}^{N+1} Q_i$$



La varianza  $\sigma^2$  varia al verificarsi di eventuali AE eventi aggiuntivi (<u>parametro evolutivo</u>). Si dimostra che i sistemi dinamici entrano nella fase critica quando  $\sigma^2$ , evolvendo evento dopo evento, si avvicina al valore 0.07. Vengono quindi definite due condizioni che, se entrambe soddisfatte<sup>25</sup>, identificano l'ingresso del sistema monitorato in uno stato critico (Grafico 5):

• La varianza  $\sigma^2$  tende al valore 0.07 "scendendo dall'alto":

$$\sigma^2 \equiv 0.07$$

L'entropia S(\*) deve essere inferiore a quella corrispondente al rumore di base (distribuzione uniforme), che indica la casualità, (p<sub>k</sub> = 1/N), S<sub>u</sub> = <sup>ln2</sup>/<sub>2</sub> - <sup>1</sup>/<sub>4</sub> = 0.0966, quando σ<sup>2</sup> coincide con 0.07:

$$S < S_u$$
 quando  $\sigma^2 \equiv 0.07$ 

<sup>&</sup>lt;sup>25</sup> Vallianatos et al., 2013; Hloupis et al., 2015; Hloupis et al., 2016.



**Grafico 5.** Evoluzione di  $\sigma^2(k_1) \in S$  in funzione del numero cumulato di eventi di emissione acustica N

La linea orizzontale tratteggiata indica il valore  $\sigma^2 \equiv 0.07$ , mentre quella tratto-punto rappresenta il limite dell'entropia  $S_u = 0.0966$ ; la linea verticale mostra, invece, il punto di inizio della criticità. (\*) L'entropia S della distribuzione nel dominio del *Natural Time* è così definita:

$$S = \langle \chi \ln \chi \rangle - \langle \chi \rangle \ln \langle \chi \rangle$$
$$\langle \chi \ln \chi \rangle = \sum_{k} p_{k} \chi_{k} \ln \chi_{k}$$
### **V CAPITOLO**

### L'Emissione Acustica: le interpretazioni

#### V.1 Interpretazione frattale: il $\beta_t$

Recentemente i dati di emissione acustica sono stati interpretati dagli autori sulla base delle teorie statistiche e frattali della frammentazione, secondo cui durante il danneggiamento si ha la seguente legge di scala:

$$W \propto N \propto V^{D/3}$$

- *W*: energia dissipata;
- *V*: volume del provino,
- *D*: esponente frattale, compreso tra 2 e 3 → se D = 3 il danneggiamento si sta sviluppando in tutto il volume;
- N: numero totale di eventi AE che la struttura emette durante il danneggiamento.

Il livello di danneggiamento in una struttura si ottiene dai dati di emissione acustica registrati da un suo provino di riferimento, testato fino a rottura. Da questo si può ricavare il numero critico di eventi di AE per la struttura,  $N_{max}$ , cioè il numero totale di eventi che si possono manifestare prima del raggiungimento della condizione critica (collasso).

$$N_{max} = N_{max,r} \left(\frac{V}{V_r}\right)^{D/3}$$

- $N_{max}$ : numero critico di eventi AE che porta al collasso della struttura;
- $N_{max,r}$ : numero critico di eventi AE che porta il provino a rottura;
- *V* : volume della struttura;
- $V_r$  : volume del provino.

Un'ulteriore legge di scala che permette di conoscere il numero massimo di eventi di emissione acustica che una struttura emette prima di giungere a collasso è la seguente:

$$\frac{N}{N_{max}} = \left(\frac{t}{t_{max}}\right)^{\beta_t} \tag{4.1}$$

- N: numero totale di eventi AE ottenuti durante il monitoraggio della struttura;
- *t* : tempo di monitoraggio;
- $t_{max}$  : vita utile assunta per la struttura.

L'energia dissipata durante il processo di danneggiamento (W) segue anche la seguente legge di scala:

$$W \propto N \propto t^{\beta_t} \tag{4.2}$$

In entrambe le espressioni, (4.1) e (4.2), compare l'esponente  $\beta_t$ : noto come *time – scaling*, è l'esponente frattale della legge di potenza ed esprime la velocità con cui evolve il danno. Il suo valore può essere compreso tra 0 e 3,  $0 \le \beta_t \le 3$ , e può anche essere un numero non intero.

A seconda del valor assunto da  $\beta_t$  è possibile fare una previsione delle condizioni di stabilità della struttura (Grafico 6):

- β<sub>t</sub> < 1 : la struttura evolve verso una condizione di stabilità il grafico presenta una concavità verso il basso;
- $\beta_t \cong 1$ : il processo è metastabile, evolve linearmente nel tempo;
- $\beta_t > 1$ : il processo diventa instabile, evolve rapidamente nel tempo il grafico presenta una concavità verso l'alto.



Grafico 6. Numero di eventi AE vs tempo

Il Grafico 6 descrive anche le tre fasi di creep tipiche di un processo di danneggiamento:

- Fase di creep primario, a cui corrisponde una diminuzione di energia;
- Fase di creep secondario, che presenta un quantitativo di energia costante,
- *Fase terziaria*, durante la quale si ha un aumento di energia e il danneggiamento instabile porta a collasso.

Si può quindi notare come il  $\beta_t$  abbia una "funzione predittiva".

#### V.2 Emissioni acustiche e sismi: il b-value

Negli anni 60 si ipotizza che i terremoti superficiali siano causati dalla frattura fragile della crosta terrestre quando è sottoposta a sforzi interni. Per verificare sperimentalmente questa idea Mogi (1962) studia le emissioni acustiche rilasciate da campioni di laboratorio sotto sforzo, con l'idea che se la frattura è la causa dei sismi superficiali allora tra i due processi devono emergere delle similitudini. L'organizzazione spazio-temporale degli eventi di frattura è regolata da alcune leggi di scala statistica, valide dalla microscala (come verificato sperimentalmente grazie alle emissioni acustiche) alla scala dei terremoti. Tra queste, le più importanti sono la legge di Gutenberg – Richter per la distribuzione delle magnitudo e la legge di Omori per il decadimento nel tempo delle scosse di assestamento rispetto alla scossa principale.

La magnitudo secondo la tecnica delle emissioni acustiche è definita dalla seguente espressione:

$$M = \log_{10} A_{max} + f(r)$$

- $A_{max}$ : massima ampiezza del segnale, misurata in  $\mu$ V;
- f(r): correzione che tiene conto che l'ampiezza è funzione della distanza *r* tra la sorgente e il sensore, e decresce con la distanza.

In sismologia i terremoti di grande magnitudine si verificano meno frequentemente di quelli a bassa intensità; questa considerazione trova voce nella relazione proposta da Gutenberg e Richter (1954). Mogi verifica per primo che anche la distribuzione statistica delle ampiezze delle emissioni acustiche obbedisce alla legge di Gutenberg – Richter dedotta originariamente per i terremoti nel 1935 e successivamente applicata alle  $AE^{26}$ :

$$\log N (\geq M) = a - bM$$

Questa relazione esprime il numero N di eventi AE con magnitudo  $\ge M$  (M = dB/20, magnitudo di soglia); a e b sono costanti positive e variano a seconda del sito. In particolare, la costante b, nota come b-value, è la pendenza negativa del grafico Log N ( $\ge M$ ) vs. M ed esprime il livello di danneggiamento raggiunto in un corpo o in una struttura (Grafico 7). Il suo valore, infatti,

<sup>&</sup>lt;sup>26</sup> Ohtsu, Shiotani, Sammonds, Carpinteri.

cambia sistematicamente con la crescita della frattura: b diminuisce se il danneggiamento aumenta. L'attività AE e la sismicità<sup>27</sup> possiedono valori di b molto simili: ciò testimonia che hanno le stesse proprietà di scala.

La magnitudo M, ossia l'ampiezza, di ogni segnale di emissione acustica è proporzionale all'area S della frattura<sup>28</sup>:

 $M \propto S$ 

- Microfessure (piccole aree di frattura): generano piccole ampiezze di segnale;
- Macrofessure (grandi aree di frattura): producono grandi ampiezze del segnale.



Grafico 7. "b-value"

Avvicinandosi al collasso si manifestano eventi sempre più importanti per cui N diventa elevato: la pendenza del grafico tende ad essere orizzontale mentre b diminuisce. Infatti:

- Grandi valori di b ( > 1.7 ): molti eventi AE di piccola ampiezza rispetto a quelli di grande ampiezza → <u>Distribuzione dominata da microfessure</u>
- Medi valori di  $b (1.2 \le b \le 1.7) \rightarrow \underline{Le \ macrofessure \ iniziano \ ad \ apparire}$
- Piccoli valori di b (1 < b < 1.2): gli eventi AE di grande ampiezza aumentano → <u>Comparsa di</u> <u>macrofessure</u> → <u>Collasso<sup>29</sup></u>

Si evince quindi che il *b*-value ha una "funzione descrittiva" volta ad evidenziare il livello di danneggiamento raggiunto e può essere assunto come un valido indicatore del livello di tensione raggiunto nelle strutture oggetto di monitoraggio.

Negli ultimi anni si è quindi verificato un interesse nel monitoraggio con la tecnica dell'emissione acustica correlato ai fenomeni ambientali. Diversi casi nel territorio italiano e studi effettuati supportano l'ipotesi che un incremento dell'attività AE può essere dovuto ad una ridistribuzione delle tensioni della crosta terrestre, causa del verificarsi di un evento sismico<sup>30</sup>. In accordo con le ricerche condotte da

<sup>&</sup>lt;sup>27</sup> Il valore di b è pressoché costante.

<sup>&</sup>lt;sup>28</sup> Ciò è stato verificato sperimentalmente.

<sup>&</sup>lt;sup>29</sup> Osservato sperimentalmente nei monitoraggi con la tecnica dell'emissione acustica.

<sup>&</sup>lt;sup>30</sup> Gregori et al., 2004; Gregori et al., 2005; Carpinteri et al., 2007; Niccolini et al., 2011.

Dobrovolsky et al<sup>31</sup>., si può assumere che la zona di preparazione sia un cerchio con centro nell'epicentro dell'imminente terremoto. Il raggio r del cerchio, chiamato "raggio di tensione", è dato dalla relazione:

$$r = 10^{0.433M + 0.6}$$

in cui M è la magnitudo del sisma e r è espresso in km. Tutti i precursori sismici, incluse le AE, ricadono all'interno di questo cerchio.

Un altro modo per esprimere la legge di Richter, con riferimento alle emissioni acustiche, è il seguente:

$$N (\ge L) = cL^{-2b} \tag{4.3}$$

- N: numero totale di eventi generati dalle fratture di dimensioni  $\geq L$ ;
- *L* : dimensione lineare delle fratture;
- *c* : constante che rappresenta il numero totale di AE eventi;
- 2b = D : dimensione frattale del dominio danneggiato → b è lo stesso presente nella legge di Richter.

Tale relazione mette in evidenza l'aspetto frattale della legge ed è sostanzialmente identica alla distribuzione cumulativa proposta da Carpinteri, che permette di ottenere la probabilità che un difetto di dimensione  $\geq L$  sia presente in un corpo:

$$P \ (\geq L) \propto L^{-\gamma}$$

in cui il numero di difetti con dimensione  $\geq L$  è:

$$N^*(\geq L) = N_{tot} L^{-\gamma} \tag{4.4}$$

- γ : esponente che misura il grado di disordine, come per esempio la varietà di dimensione dei difetti;
- $N_{tot}$  : costante che rappresenta il numero totale di difetti in un corpo.

Uguagliando le distribuzioni (4.3) e (4.4) si ha:

$$2b = \gamma$$

<sup>&</sup>lt;sup>31</sup> Studi condotti nel 1979.

Come mostrato da Carpinteri<sup>32</sup>  $\gamma = 2$  è l'esponente della distribuzione statistica delle dimensioni dei difetti che ne riflette l'autosomiglianza; ciò significa che la massima dimensione del difetto è proporzionale alla dimensione caratteristica della struttura.

 $\gamma = 2$  significa che la frattura si sta propagando lungo una superficie – superficie principale di frattura - che porterà a collasso l'elemento strutturale. Se  $\gamma = 3$  le fratture si organizzano non lungo una superficie ma all'interno di un volume, per cui vi è un certo margine di sicurezza prima del raggiungimento della condizione critica. Come si è detto, per capire l'evoluzione delle fratture all'interno del corpo si valuta il *b*-value.

Inoltre, l'esponente  $\gamma = 2$  corrisponde al massimo disordine nella distribuzione delle dimensioni dei difetti e corrisponde al <u>valore di collasso:</u>

$$b_{collasso} = 1$$

che viene raggiunto durante la propagazione della frattura finale che porta al collasso della struttura. Questo è stato dimostrato teoricamente tramite un modello statistico dal Professor Carpinteri.

Il *b*-value è quindi un indice rilevante per esprimere il livello di danneggiamento strutturale ma, allo stesso tempo, può essere un importante strumento per monitorare l'attività sismica locale. Sebbene distinguere il "tremore" della crosta terrestre dalle altre sorgenti di emissione acustica (danneggiamenti strutturali e disturbi ambientali) sia estremamente difficile, lo studio di *b* porta a poter considerare l'emissione acustica come un efficiente precursore sismico. A seguito di numerosi monitoraggi e test condotti si è visto, infatti, che le emissioni acustiche presentano picchi di ampiezza che corrispondono ai più importanti eventi sismici includenti l'area in esame e questi sono spesso seguiti da una diminuzione del *b*-value, che tende al valore unitario.

#### V.2.1 Il caso del *b*<sub>collasso</sub>

La distribuzione delle microfessure nei materiali non omogenei (rocce, calcestruzzo,..) può essere statisticamente espressa definendo una funzione di densità di probabilità *p*:

$$p(L,\theta,\varphi)$$

- L: lunghezza della microfrattura;

-  $\theta$ ,  $\varphi$ : orientamento della microfrattura (latitudine e longitudine).

Si assume una distribuzione di tipo isotropico: non è presente una direzione preferenziale di propagazione delle fessure per cui p non è più funzione dell'orientamento ma solo della lunghezza L:

p (L)

Questa considerazione è corretta per materiali come il calcestruzzo, ma non per esempio per il legno.

<sup>&</sup>lt;sup>32</sup> Int. J. of Solids and Structures, vol. 31, pp. 291-302, 1994.

V CAPITOLO

L'insieme delle fratture all'interno di un corpo definisce un dominio di danneggiamento di dimensione *D*; possono essere identificati due casi limite (Figura 28):

- microfessure diffuse nel volume:  $D \le 3 \rightarrow \underline{primo \ step \ di \ danneggiamento}$
- una sola superficie di frattura:  $D \cong 2 \rightarrow \underline{step finale di danneggiamento} = \underline{collasso}$





Lo stato di danno accumulato è la sovrapposizione di questi due casi. Inoltre, quanto più è grande il corpo (di dimensione *s*), maggiore è la cricca che si sviluppa all'interno:

$$L_{MAX} \propto s^{\delta}$$

Tenuto cono delle precedenti considerazioni si ha:

$$p(L) \propto L^{-\gamma - 1}$$

$$\downarrow$$
Carpinteri<sup>33</sup> :  $N (\geq L) \propto L^{-\gamma}$ 

$$\downarrow$$

$$\gamma \equiv \frac{D}{\delta}$$

<sup>&</sup>lt;sup>33</sup> Carpinteri, 1986, 1989, 1994; Carpinteri et al., 2006, 2007.

La frattura, sorgente di emissione acustica, obbedisce alla legge di Gutenberg – Richter:

$$N (\geq L) \propto L^{-2b}$$

$$\downarrow$$

$$\gamma = 2b$$

$$\downarrow$$

$$b = \frac{D}{2\delta}$$

$$L_{MAX} \propto s^{\delta} \rightarrow L_{MAX} \propto k^{\delta}$$

k : fattore di scala

 $s(k) \propto k$ 

Paradosso: se  $\delta > 1$  la più grande cricca risulta essere di dimensioni maggiori dello stesso corpo per scale sufficientemente grandi. Il limite superiore del valore di  $\delta$  risulta quindi essere 1:

$$\delta_{up} = 1$$

In prossimità del collasso, il danneggiamento si concentra sulla superficie di frattura che si propaga più rapidamente (D = 2), la cui dimensione lineare  $L_{MAX}$  è proporzionale alla dimensione caratteristica del corpo ( $\delta = 1$ ):

$$b = \frac{D}{2\delta} \rightarrow b_{low} = \frac{D_{low}}{2\delta_{up}} = 1 \quad (D_{low} = 2)$$

Ciò indica  $b_{collasso} = 1$  come un limite inferiore ai *b*-value comunemente osservati nei monitoraggi tramite la tecnica dell'emissione acustica su provini caricati fino a rottura.<sup>34</sup>

<sup>&</sup>lt;sup>34</sup> Carpinteri, Lacidogna, Niccolini, 2006; Carpinteri, Lacidogna, Niccolini, Puzzi, 2007.

#### V.3 La localizzazione delle sorgenti AE

La tecnica dell'emissione acustica permette di localizzare il danneggiamento senza conoscere a priori la posizione dell'area "difettosa". La localizzazione si effettua sfruttando i metodi utilizzati in sismologia in quanto le emissioni acustiche generate dal processo di fessurazione corrispondono a quelle generate da un terremoto, però su piccola scala.

Si è detto che un evento di emissione acustica viene prodotto da un rapido e spontaneo rilascio di energia elastica dovuto al movimento di una dislocazione. Tale dislocazione locale è la sorgente di un'onda elastica che si propaga in tutte le direzioni (è simile a un terremoto con epicentro nel difetto su scala microscopica). Su una superficie piana l'onda si propaga sotto forma di cerchi concentrici attorno alla sua sorgente (Figura 29). Durante la propagazione l'onda si attenua. La massima distanza alla quale l'evento AE può essere ancora rilevato dipende da vari parametri legati alle proprietà del materiale, alla geometria del corpo e all'ambiente. Ad esempio sulle superfici metalliche piane o cilindriche, gli eventi possono essere ancora rilevati a distanza di alcuni metri, il che è uno dei grandi vantaggi di questa tecnica e pertanto l'AE testing può effettivamente coprire aree che non sono accessibili con altri metodi di indagine.



Figura 29. Propagazione del segnale di emissione acustica

In funzione della posizione della sorgente, l'onda raggiunge il sensore con un certo ritardo. La localizzazione delle fessure può essere effettuata studiando i tempi di arrivo delle onde di emissione acustica a diversi trasduttori (triangolazione, Figura 30).



Figura 30. Schematizzazione rete di trasduttori

La distanza tra la sorgente, di coordinate (x, y, z), e il generico sensore,  $(x_i, y_i, z_i)$ , si ottiene da:

 $d_i = [(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z - z_i)^2]^{1/2}$ 

Considerando due sensori, lo spazio percorso dal segnale è così espresso:

$$d_2 = v(t_2 - t_0)$$
  $d_1 = v(t_1 - t_0)$ 

 $t_0$  è l'istante di partenza dell'onda dalla sorgente e v è la velocità del segnale – onda sferica – nel mezzo, entrambi incogniti. Le due differenze di tempo rappresentano dei tempi assoluti, anch'essi non noti: è necessario quindi introdurre il tempo relativo di arrivo del segnale ai due sensori, ottenuto sottraendo  $d_1$  da  $d_2$ :

$$d_2 - d_1 = v(t_2 - t_1) = v \,\Delta t_{21}$$

Riassumendo si ha:

- Parametri noti:
- posizione dei sensori  $(x_i, y_i, z_i)$ ;
- tempo di arrivo  $t_i$  del segnale ai sensori.
- <u>Parametri incogniti:</u>
- posizione della sorgente di emissione acustica (x, y, z);
- velocità di propagazione v del segnale onda nel mezzo.

È quindi necessario un sistema di quattro equazioni per poter risolvere il problema. Scegliendo un sensore di riferimento, ad esempio il numero 1, per ottenere le quattro incognite, e quindi effettuare una localizzazione tridimensionale, sono necessari cinque trasduttori. Le equazioni da scrivere sono del tipo:

$$d_i - d_1 = v \, \Delta t_{i1}$$
 con  $i = 2, ..., 5$ 

Se si vuole invece effettuare una localizzazione bidimensionale sono necessari quattro sensori mentre nel caso monodimensionale ne occorrono tre. La posizione della sorgente così ottenuta presenta un'ottima precisione – pochi mm su un metro.

Sfruttando la capacità di calcolo di un normale personal computer, la posizione può essere determinata in tempo reale ed i risultati possono essere illustrati con strumenti grafici su un display. La localizzazione della sorgente è uno strumento estremamente potente nell'analisi dell'emissione acustica e può essere utilizzato per monitorare una struttura estremamente grande con un numero minimo di sensori.

### **VI CAPITOLO**

# Il monitoraggio di un'infrastruttura: la galleria a Borgo Ticino

### VI.1 Inquadramento

In questa sezione si descrive un'applicazione strutturale della tecnica dell'Emissione Acustica volta a valutare lo stato fessurativo raggiunto dalla galleria B4 lungo la S.S. n. 32 "Ticinese" in ordine ai lavori di adeguamento alla classe C1 della S.S. n. 32 dalla progressiva 23+300 alla progressiva 27+000 e della variante di Borgo Ticino dalla 27+000 alla progressiva 31+000.



Figura 31. Estratto catastale delle opere in progetto



Figura 32. Vista dal satellite della galleria B4 e di Via Lazzaretto



Figura 33. Prospetto principale della galleria B4

Si tratta di una galleria di circa 100.95 m, presenta un raggio interno di 7.41 m ed è realizzata in conci prefabbricati in cemento armato, di spessore 0.45 m, incernierati alla base e in chiave. La struttura ad arco deve sostenere, oltre al peso proprio, anche quello di circa 5.00 m di terreno di riporto e i carichi variabili dovuti al traffico presente su una strada comunale (Via Lazzaretto) che, in sommità, taglia ortogonalmente la galleria.



Figura 34. Sezione tipo galleria B4



Figura 35. Vista in pianta della galleria B4



Figura 36. Dettagli cerniere in chiave e al piede

### VI.2 Rilievo fotografico



Figura 37. Entità delle fessure presenti

L'intervento si è reso necessario in quanto, al termine della costruzione, sono iniziate a comparire le prime fessure, con sviluppo longitudinale e passo regolare (Figura 37). Con il tempo il danneggiamento è peggiorato: attualmente lo stato fessurativo si estende per circa 40 metri su un totale di circa 100 metri e i crack presentano anche andamento circonferenziale.

Si è quindi deciso di monitorare due conci, i più sollecitati, ossia quelli posti esattamente al di sotto della strada. Di seguito si riporta la disposizione dei sensori.



Figura 38. Disposizione sensori



Figura 39. Sensore n° 7



Figura 40. Sensore nº 8



Figura 42. Sensore n° 6



Figura 41. Sensore n° 5



Figura 44. Sensore n° 3



Figura 43. Sensore n° 4



Figura 46. Sensore nº 1



Figura 45. Sensore nº 2



Figura 47. Particolare fessura

Come si può notare in Figura 47, si tratta di fessure molto estese, in alcuni casi anche "passanti" all'interno dei singoli conci.

### VI.3 Analisi e Grafici

Il monitoraggio è effettuato in continuo a partire dalle ore 16.25 di lunedì 2 ottobre 2017. Per valutare l'evoluzione temporale dello stato fessurativo della galleria B4 "Ticinese" mediante il conteggio dei segnali AE si è utilizzata l'apparecchiatura AEmission System a 8 canali, ossia 8 sensori piezoelettrici (PZT). Figura 48.



Figura 48. Apparecchiatura utilizzata - AEmission System

Si sono quindi impostati i valori di soglia (Tabella 1):

	CH.0	CH.1	CH.3	CH.4	CH.5	CH.6
Valore di soglia (mV)	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0

La numerazione dei canali è sfalsata di un'unità rispetto a quella dei sensori: infatti, al CH.0 corrisponde il sensore 1, al CH.1 il 2 e così via. In Tabella 1 non sono presenti i canali 2 e 7, corrispondenti ai sensori 3 e 8: essi sono stati disattivati in quanto estremamente sensibili ai rumori provenienti dall'ambiente esterno.

La strumentazione AEmission utilizzata esegue già una prima elaborazione dei dati: la centralina contenente il software e a cui sono collegati i sensori non appena si preme il pulsante "*Start Acquisition*" crea e apre il file sorgente AE - Events, nel quale vengono memorizzati tutti gli eventi di emissione acustica che si verificano. Selezionando "*Stop Acquisition*" il precedente file viene chiuso, salvato e sottoposto ad una preliminare elaborazione svolta interamente dal software presente all'interno. Il

numero di eventi presenti in questo file è molto elevato, perché non ancora depurato di tutti i rumori e "falsi segnali": viene così creato il file AE – *Sorted*, analogo al file sorgente ma più "ordinato" e quindi più leggibile. Questi file sono degli script in Python che sono integrati nel software dell'AEmission System, ma possono anche essere usati per la post-elaborazione, volta ad ottenere risultati più raffinati ed attendibili. L'elaborazione dei dati è così strutturata:

- Si impostano la durata minima del segnale e il numero minimo di attraversamenti del valore di soglia (*threshold*) definito in precedenza;
- Si definiscono, all'interno di uno script in Python (file *Metadata*), i valori di soglia in frequenza (20 kHz) e in ampiezza (1 mV);
- Un software analogo a quello presente all'interno della centralina elabora il file *AE Events*, creato dall'AEmission System, e il file *Metadata*, fornendo i risultati dell'analisi.

Il primo scaricamento dei dati è stato effettuato mercoledì 18 ottobre 2017: sono quindi trascorse circa 380 ore dall'inizio del monitoraggio. Considerando segnali di durata almeno 3 µs e con almeno 3 attraversamenti del valore di soglia impostato, si ottengono i seguenti risultati:



Grafico 8. Dall'alto verso il basso: conteggio cumulato dei segnali AE; conteggio orario; serie temporali degli eventi classificati per frequenza (kHz) e per ampiezza (mV)

Il Grafico 8 mostra la presenza di circa 250 eventi di emissione acustica: la cumulata ha un andamento crescente nel tempo e ciò indica la presenza di fenomeni irreversibili di danneggiamento in evoluzione dinamica. Il conteggio orario mostra in media 5-10 eventi per ora mentre le sezioni f(kHz) e A(mV) riportano le frequenze e le ampiezze di ciascun evento. Come si può notare, si raggiungono picchi di 150-170 kHz e di 5-6 mV.

Il brusco "salto" iniziale, a cui corrispondono 40 eventi per ora, 300 kHz di frequenza e circa 2 mV di ampiezza, è dovuto alle azioni meccaniche effettuate durante il riposizionamento del sistema di allarme installato per preservare la centralina dell'AEmission System.

L'ultimo scaricamento dei dati è stato effettuato il giorno lunedì 6 novembre 2017: sono trascorsi quindi circa 35 giorni dall'inizio del monitoraggio. Per avere un quadro più preciso e completo della situazione in oggetto si è deciso di elaborare tutti i dati a disposizione, considerando anche quelli già precedentemente analizzati. Si imposta quindi la durata minima dei segnali a 3 µs e si fissa il numero minimo di oscillazioni a 3. Il numero totale di eventi di emissione acustica a cui si perviene è 144, inferiore rispetto al precedente in quanto depurato da tutti i rumori, sia elettrici sia derivanti dall'ambiente esterno. La maggior parte dei segnali è stata registrata dai sensori n° 1 e 2, ossia quelli posti più in basso. Di seguito sono riportati i risultati ottenuti dall'analisi.









Grafico 9. Dall'alto verso il basso: conteggio cumulato dei segnali AE; conteggio giornaliero; serie temporali degli eventi classificati per frequenza (kHz) e per ampiezza (mV)

Il Grafico 9 mostra una cumulata dei segnali nel tempo con andamento crescente ed una media di 5 eventi per giorno. Si è quindi di fronte ad un'accelerazione del processo di danneggiamento, ad una fase di relativa instabilità che caratterizza in particolare la parte inferiore dei conci monitorati. Le frequenze risultano maggiormente collocate nell'intervallo tra 0 e 50 kHz, anche se vi sono picchi di 150-180 kHz. Le ampiezze sono all'incirca tra 0 e 5 mV ma vi sono alcuni eventi importanti, intorno al decimo, ventesimo e trentesimo giorno, che presentano 28, 15 e 12 mV.

Per comprendere quale sia il livello di danneggiamento raggiunto dalla galleria sono stati estrapolati i b-value, stimati a partire dai valori di ampiezza (A) di ciascun segnale di emissione acustica trasformati in magnitudo (M) grazie alla legge:

$$M = \log_{10} A$$

Per ogni blocco di eventi, impostando delle magnitudo di soglia (per esempio 3, 3.1,..), si valuta il numero (N) di eventi con magnitudo superiore a quella definita, lo si trasforma in logaritmo e si ottiene così il grafico log N ( $\geq M$ )vs. M. Il b-value ne rappresenta la pendenza negativa.

Nel caso in esame si è deciso di effettuare l'analisi considerando blocchi da 50 eventi non sovrapposti, da 50 eventi con sovrapposizione di 20 eventi ciascuno e infine da 30 eventi non sovrapposti. Un esempio di quanto è stato fatto è riportato nel Grafico 10. Il cerchio tratteggiato in rosso indica il *b*-value corrispondente al range di eventi considerato.



Grafico 10. b-value relativo al blocco da 50 eventi non sovrapposti, considerando gli eventi dal nº 51 al nº 100

Calcolati tutti i *b*-value, per ogni blocco li si diagramma in funzione del tempo, ottenendone l'andamento (Grafico 11).





Grafico 11. Dall'alto verso il basso: b-value 50 eventi non sovrapposti, 50 eventi sovrapposti, 30 eventi non sovrapposti

Come si può notare dal Grafico 11, variando i pacchetti di eventi si ottiene all'incirca il medesimo andamento del *b*-value e ciò dimostra la robustezza di questo metodo per l'analisi dei segnali di emissione acustica. Per tutti e tre i casi esaminati si ha una diminuzione del *b*-value tra l'inizio del monitoraggio e il decimo giorno, raggiungendo il valore di circa 1.20. Questa decrescita corrisponde all'evento di ampiezza 28 mV, indicando la presenza di un quadro fessurativo dinamico. Infatti, come già spiegato nel Capitolo V, il valore ottenuto appartiene al range in cui vi è la comparsa di macrofessure. Proseguendo fino al termine del periodo analizzato, il suo valore continua ad essere prossimo a 1.20.

Per comprende la velocità con cui evolve il danneggiamento e fare un'ulteriore previsione sulla stabilità della struttura è necessario valutare il valore assunto dal  $\beta_t$ . Esso è stato ottenuto diagrammando il numero di eventi di emissione acustica cumulato nel tempo in funzione del tempo stesso. Il  $\beta_t$  è l'esponente della legge di potenza che ne deriva.

In riferimento al caso riportato nel Grafico 10, si riporta nel Grafico 12 il corrispondente  $\beta_t$ . Il cerchio tratteggiato in blu rappresenta il  $\beta_t$  relativo al range di eventi considerato.



Grafico 12.  $\beta_t$  relativo al blocco da 50 eventi non sovrapposti, considerando gli eventi dal nº 51 al nº 100

Considerando gli stessi blocchi di eventi utilizzati per l'analisi del *b*-value, si diagrammano i valori di  $\beta_t$  in funzione del tempo e si ottengono i seguenti trend:





Grafico 13. Dall'alto verso il basso:  $\beta_t$  50 eventi non sovrapposti, 50 eventi sovrapposti, 30 eventi non sovrapposti

Come si può notare dal Grafico 13, l'andamento nei tre casi risulta essere pressoché simile. Dopo una prima fase di decrescita si ha un aumento fino a raggiungere 0.9. L'avvicinamento al valore unitario,  $\beta_t \cong 1$ , è sinonimo di un processo metastabile in cui il danno evolve linearmente nel tempo. Questo incremento corrisponde al tratto di diminuzione del *b*-value e all'istante in cui si verifica l'evento di ampiezza 28 mV. Tutte queste coincidenze implicano che intorno al decimo giorno, all'interno dei conci monitorati, lo stato fessurativo sia avanzato, confermando lo stato di instabilità in cui si trova la struttura.

Inoltre, il blocco da 30 eventi non sovrapposti mostra, tra il venticinquesimo e il trentacinquesimo giorno, un'ulteriore crescita del  $\beta_t$  e ciò avviene proprio nel periodo in cui si ha anche un aumento dell'ampiezza dei segnali (in questo intervallo di tempo, infatti, è presente un evento con ampiezza 12 mV).

### VI.4 Localizzazione

L'analisi condotta mostra dunque la presenza di fenomeni irreversibili di danneggiamento in evoluzione dinamica, di fessure che si stanno propagando. Per poter effettuare la localizzazione di queste sorgenti di emissione acustica si definisce un sistema di riferimento locale, Figure 49 e 50, e si determinano le coordinate (X, Y, Z) dei sensori, riportate in Tabella 2.



Figura 49. Sistema di riferimento, vista frontale



Figura 50. Sistema di riferimento, prospetto laterale

	SENS. 1	SENS. 2	SENS. 3	SENS. 4	SENS. 5	SENS. 6	SENS. 7	SENS. 8
X [m]	1.83	2.73	1.68	2.69	3.14	1.17	1.96	2.70
Y [m]	0.85	0.98	1.29	1.58	1.80	2.28	3.13	3.08
Z [m]	3.48	3.72	4.23	4.64	4.90	5.43	6.14	6.11

Tabella 2. Coordinate cartesiane sensori

Impostando come velocità di propagazione 3500 m/s, l'analisi fornisce come risultato la presenza di n° 3 sorgenti di emissione acustica, ossia fessure che durante il periodo di monitoraggio si sono propagate. Come si può vedere dalla Tabella 3 e dai Grafici 14 e 15, sono localizzate nella parte inferiore dei conci, tra i primi quattro sensori: infatti, quelli che hanno contato la maggior parte degli eventi sono i numeri 1 e 2. Mentre le prime due sorgenti presentano un solo fenomeno di propagazione, la numero 3 avanza in quattro step successivi, a partire dal ventiquattresimo giorno, a ritmo quasi costante. Il numero di sensori che hanno permesso di identificare questa fessura sono due, come anche per la sorgente n° 2, mentre la prima è stata localizzata tramite tre sensori. In particolare, è interessante osservare come quest'ultima sorgente sia avanzata il nono giorno, periodo nel quale si osserva la rapida decrescita del *b*-value e il conseguente aumento del  $\beta_t$ .

Tabella 3. Caratteristiche sorgenti

	X [m]	Y [m]	Z [m]	Tempo [days]	TOT. SENSORI
Sorgente n° 1	1.938	1.578	4.524	9.16	3
Sorgente n° 2	2.280	0.915	3.600	16.90	2
Sorgente n° 3	2.485	1.320	4.190	24.67	2
Sorgente n° 3	2.485	1.320	4.190	26.90	2
Sorgente n° 3	2.485	1.320	4.190	29.90	2
Sorgente n° 3	2.485	1.320	4.190	31.00	2



Grafico 14. Posizione sorgenti di emissione acustica\_vista frontale





Grafico 15. Posizione sorgenti di emissione acustica\_profilo laterale

#### VI.5 Conclusioni

Il quantitativo di eventi di emissione acustica ottenuti dimostra la presenza di fessure attive all'interno dei conci monitorati. Le analisi condotte non solo lo confermano ma hanno anche permesso di fotografare il possibile andamento della condizione di instabilità in cui si trova attualmente la galleria. Quella che si presenta è la fase di comparsa dei precursori della frattura, ossia una situazione potenzialmente critica: la criticità si riscontra per lo più nella parte inferiore della galleria dove sono state localizzate le tre sorgenti. In particolare per la fessura n° 3 sono stati riscontrati più step di propagazione, vicini tra loro: la situazione pertanto sembra essere destinata a peggiorare.

### **VII CAPITOLO**

## Il monitoraggio di un edificio civile

### **VII.1 Inquadramento**

In questa sezione si descrive un'applicazione della tecnica dell'Emissione Acustica volta a valutare il livello di danneggiamento raggiunto da un immobile privato, posto al quinto piano (interno 27, scala A) di una palazzina ubicata in Genova, Corso Europa 183. Il fabbricato si trova nella zona urbana denominata "San Martino" e risulta essere libero su tutti i lati, senza essere in aderenza con nessun altro edificio. Si riporta di seguito la mappa con l'indicazione dell'edificio, la vista del satellite ed il prospetto principale lato C.so Europa.



Figura 51. Mappa dell'ubicazione dell'edificio - C.so Europa 183, Genova



Figura 52. Vista dal satellite dell'edificio – C.so Europa 183, Genova



Figura 53. Vista dal satellite dell'edificio – C.so Europa 183, Genova



Figura 54. Prospetto principale dell'edificio lato C.so Europa



Figura 55. Prospetto principale dell'edificio lato C.so Europa

Come si osserva dalle fotografie inerenti i prospetti principali (Figure 54 e 55), l'edificio risulta avere n° 5 piani fuori terra, un piano sottotetto e n° 2 piani interrati. Presenta una pianta irregolare poligonale con n° 5 lati; l'altezza complessiva dal piano strada è di circa 21 m, l'altezza di interpiano è di circa 3.00 m, mentre quella dei due livelli interrati varia tra 3.50 m e 4.20 m. La struttura portante è in cemento armato ordinario e il sistema costruttivo è a telaio con gli elementi verticali (pilastri) disposti lungo le murature perimetrali ed in posizione centrale.



Figura 56. Pianta estratto catastale dell'immobile ubicato in Genova, VC.so Europa 183, piano V, interno 27, scala A

L'intero alloggio (Figura 56) è caratterizzato da un ampio e diffuso quadro fessurativo per cui, solo dopo un attento e meticoloso sopralluogo è stato possibile scegliere su quali elementi strutturali concentrare l'analisi. Si è deciso quindi di sottoporre a monitoraggio due pareti ed un pilastro come indicato in Figura 57.



Figura 57. Disposizione sensori

Scelto un sistema di riferimento locale per ogni blocco (pareti e pilastro), si riportano di seguito le coordinate dei sensori.



Figura 60. Sensori 3, 4 e 6\_ pilastro

Figura 61. Sensore 5\_pilastro

### VII.2 Rilievo fotografico



Figura 62. Sensori 1 e 2\_parete nº 1

La parete mostrata in Figura 62 presenta una fessura con andamento a "gradini" per cui si è deciso di porre due sensori (numeri 1 e 2) per controllarne l'evoluzione. Inoltre, nella stessa stanza è presente un altro crack che "taglia" diagonalmente il soffitto e si congiunge alla precedente fessura (Figura 63).



Figura 63. Fessure presenti nella stanza
La parete in Figura 64 presenta, invece, una fessura pressoché verticale non molto "aperta". Da una prima analisi visiva sembrerebbe un crack che non ha ancora avuto il tempo di svilupparsi o la cui crescita si è arrestata in una fase natale. Si sono quindi applicati due sensori (numeri 7 e 8).



Figura 64. Sensori 7 e 8\_parete nº 2

Il pilastro, invece, è caratterizzato da un crack molto esteso ed aperto, con rigonfiamento e sollevamento delle zone interessate (Figura 65). Si è quindi deciso di concentrare un maggior numero di sensori (3, 4 e 6) per meglio monitorare la situazione. Un ulteriore sensore – il numero 5 – è stato posto sul lato destro del pilastro (Figura 66) per avere la possibilità di effettuare la localizzazione nel caso la fessura fosse attiva.



Figura 65. Sensori 3, 4 e 6\_ pilastro



Figura 66. Sensore 5\_pilastro

Per evidenziare l'ampia diffusione di crepe che caratterizzano l'intero appartamento, di seguito viene riportata una rassegna di fotografie riguardanti le stanze maggiormente fessurate (Figura 67).



Figura 67. Quadro fessurativo

## VII.3 Analisi e Grafici

Il monitoraggio dell'appartamento è durato circa un mese (mese di agosto), periodo nel quale è stata valutata l'evoluzione temporale del danneggiamento mediante il conteggio dei segnali AE. Per comprendere se le fessure fossero ancora in evoluzione o se il fenomeno fessurativo non fosse più in essere (situazione stabile) è stata utilizzata l'apparecchiatura AEmission System a otto canali e si è seguita la stessa procedura applicata nel monitoraggio dell'opera infrastrutturale (Capitolo VI).

Si impostano quindi i valori di soglia in frequenza (20 kHz) e in ampiezza (0.5 mV), si inseriscono le coordinate dei sensori e, essendo questi disposti a blocchi, si indica, volta per volta, il numero dei canali su cui si vuole porre l'attenzione durante l'analisi.

Partendo dalla parete n° 1, e quindi dai sensori n° 1 e 2, si considerando solo segnali di durata almeno 3  $\mu$ s e con almeno 3 attraversamenti del valore di soglia impostato, ottenendo i seguenti risultati:



Grafico 16. Eventi AE\_sensori 1 e 2\_parete n°1

Il Grafico 16 mostra la presenza di soli due eventi di emissione acustica, uno in corrispondenza dei primi giorni e il secondo intorno al quindicesimo giorno. La cumulata presenta un andamento crescente nel tempo - quasi lineare - mentre le ampiezze degli eventi registrati sono di qualche unità. Si desume quindi che la fessura presente nella parete sia pressoché "stabile".

La parete n° 2 presenta un solo sensore funzionante, il numero 7, in quanto l'8 è stato disattivato perché troppo sensibile al rumore di fondo. Analizzando i dati di output ottenuti, si nota che non sono presenti eventi di emissione acustica registrati dal sensore n° 7 per cui si può dedurre che la fessura sia stabile.

Per il pilastro (sensori n° 3, 4, 6 e 5), invece, si è deciso di effettuare un'analisi più approfondita in quanto il suo quadro fessurativo risulta essere molto esteso e profondo. Inizialmente si considerano

segnali di durata almeno 2  $\mu$ s e con almeno 2 attraversamenti del valore di soglia impostato (oscillazioni), ottenendo i seguenti risultati:



Grafico 17. Eventi AE sensori 3, 4, 6 e 5 pilastro  $\Delta t$  almeno 2µs e almeno 2 oscillazioni

Il Grafico 17 mostra la presenza di 241 eventi di emissione acustica. La cumulata dei segnali nel tempo presenta un andamento crescente con in media 10 eventi per giorno. In corrispondenza del ventesimo giorno si raggiungono 4000 kHz di frequenza e 14 mV di ampiezza. Si presume quindi che sia avvenuto qualcosa all'interno del pilastro. La quantità dei segnali registrati permette di definire i valori, e quindi il possibile andamento, del  $\beta_t$  e del *b*-value. Come si può notare il  $\beta_t$  cresce linearmente nel tempo, da 0.4 raggiunge il valore di circa 0.9, mentre il *b*-value diminuisce nel tempo, da 1.65 raggiunge 1.20. Gli eventi di piccola ampiezza e bassa frequenza, quasi uniformemente distribuiti nel tempo, potrebbero però essere dovuti alla presenza di rumore elettrico, il quale è sempre uguale a se stesso sia in termini di distribuzione temporale sia come ampiezza. Si è deciso quindi di approfondire l'analisi aumentando la durata minima del segnale da 2 µs a 3 µs e il numero minimo di oscillazioni, da 2 a 3.



Si ottengono così i seguenti risultati:

Grafico 18. Eventi AE\_sensori 3, 4, 6 e 5\_pilastro\_  $\Delta t$  almeno 3µs e almeno 3 oscillazioni

Come si può notare dal Grafico 18 il numero totale di eventi di emissione acustica si riduce notevolmente: si contano infatti 18 eventi, di cui 5 concentrati in circa 30 minuti in prossimità del ventesimo giorno. La cumulata presenta un andamento fino al quinto giorno crescente nel tempo, quasi stabile tra i giorni quinto e ventesimo, un "salto" repentino in prossimità del ventesimo giorno ed infine una crescita pressoché lineare nel tempo. Il "salto", che corrisponde ai 5 eventi di cui prima, risulta essere di notevole importanza e probabile sintomo di fessure attive all'interno del pilastro. Inoltre, proprio in corrispondenza dei cinque segnali di emissione acustica, si raggiungono 4000 kHz di frequenza e 14 mV di ampiezza. Si tratta quindi di eventi energetici importanti che confermano quanto detto per il grafico precedente.

Se si esamina il file AE – *Sorted* generato dall'analisi si nota che gli eventi sono registrati solo dai sensori n° 5 e 6 (il sensore n° 3 era stato disattivato mentre il n° 4 non ha registrato alcun evento). Avendo pochi dati a disposizione ed essendo questi captati solo da due sensori<sup>35</sup>, non è possibile né effettuare una localizzazione delle possibili sorgenti AE né definire gli andamenti di  $\beta_t$  e di *b*-value.

<sup>&</sup>lt;sup>35</sup> Due sensori che registrano degli eventi di emissione acustica sono condizione necessaria ma non sufficiente per poter effettuare una localizzazione.

## **VII.4 Natural Time Analysis**

Per avere un'ulteriore spiegazione del processo in atto è stata effettuata la Natural Time Analysis. Come si può notare dal Grafico 19, l'entropia *S* risulta essere inferiore al valore 0.0966 mentre la varianza  $\sigma^2$  non raggiunge il valore 0.07, ma risulta inferiore. Secondo questa analisi, quindi, l'elemento non si trova ancora in una condizione di criticità ma, visti i pochi dati a disposizione, la sua attendibilità è da verificarsi.



Grafico 19. Natural Time Analysis

## VII.5 Conclusioni

Nonostante il monitoraggio abbia fornito solamente un'esigua quantità di eventi di emissione acustica, in totale circa una ventina, è stato possibile effettuare l'elaborazione dei dati e comprendere l'evoluzione del quadro fessurativo. Da quanto ottenuto, le due pareti sembrano stabili; il pilastro, invece, è caratterizzato da alcuni segnali "importanti" che indicano la presenza di fenomeni irreversibili di danneggiamento. Sarebbe quindi necessario effettuare un ulteriore monitoraggio così da poterne controllare l'evoluzione.

## **Riferimenti bibliografici**

Aki, K., 'Maximum likelihood estimates of *b* in the formula  $\log N = a - bm$  and its confidence limits', *Bull. Earthquake Res. Inst., Tokyo Univ*, vol. 43, pp. 237-239, 1965.

Bocca, P. e Carpinteri, A., 'Snap-back fracture instability in rock specimens: Experimental detection through a negative impulse', *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 35, pp. 241-250, 1990.

Brindley, B.J., Holt, J. e Palmer, I.G., 'Acoustic Emission-3: The Use of Ring-Down Counting', *Non-Destructive Testing*, vol. 6, pp. 299-306, 1973.

Carpinteri, A., 'Scienza delle Costruzioni', vol. 1 e 2, Pitagora Editrice, Bologna, 1992.

Carpinteri, A., 'Mechanical Damage and Crack Growth in Concrete: Plastic Collapse to Brittle Fracture', *Martinus Nijhoff Publishers*, Dordrecht, 1986.

Carpinteri, A., Scaling laws and renormalization groups for strength and toughness of disordered materials', *International Journal of Solids and Structures*, vol. 31, pp. 291-302, 1994.

Carpinteri, A., 'Cusp catastrophe interpretation of fracture instability', *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, vol. 37, pp. 567-582, 1989a.

Carpinteri, A., 'Softening and snap-back instability in cohesive solids', *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, vol. 28, pp. 1521-1537, 1989.

Carpinteri, A., 'Snap-back and hyperstrength in lightly reinforced concrete beams', *Magazine of Concrete Research*, vol. 40, pp. 209-215, 1988.

Carpinteri, A., 'A catastrophe theory approach to fracture mechanics', *International Journal of Fracture*, vol. 44, pp. 57-69, 1990.

Carpinteri, A., 'Limit analysis for elastic-softening structures: Scale and slenderness influence on the global brittleness', in Structure and Crack Propagation in Brittle Matrix Composite Materials (Proc. Euromech Colloquium, vol. 204, Warsaw, Poland, 1985), Eds. A.M. Brandt, I.H. Marshall, Elsevier Applied Science, London, pp. 497-508, 1986.

Carpinteri, A. e Pugno, N., 'Fractal fragmentation theory for shape effects of quasi-brittle materials in compression', *Magazine of Concrete Research*, vol. 54 no.6, pp. 473-480, 2002b.

Carpinteri, A., Lacidogna, G., e Pugno, N., 'A fractal approach for damage detection in concrete and masonry structures by acoustic emission technique', *Acoustique et Techniques*, vol. 8, pp. 31-37, 2004.

Carpinteri, A., Lacidogna, G., e Niccolini, G., 'Critical Behaviour in Concrete Structures and Damage Localization by Acoustic Emission', *Key Engineering Materials*, vol. 312, pp. 305-310, 2006a.

Carpinteri, A., Lacidogna, G. e Pugno, N., 'Richter's laws at the laboratory scale interpreted by acoustic emission', *Magazine of Concrete Research*, vol. 58, pp. 619-625, 2006f.

Carpinteri, A., Lacidogna, G. e Pugno, N., 'Structural damage diagnosis and lifetime assessment by acoustic emission monitoring', *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 74, pp. 273-289, 2007b.

Carpinteri, A., Lacidogna, G. e Pugno, N., 'Time-Scale Effects During Damage Evolution: a Fractal Approach Based on Acoustic Emission', *Strength. Fracture and Complexity*, vol. 3, pp. 127-135, 2005.

Carpinteri, A., Lacidogna, G., e Manuello, A., 'An experimental study on retrofitted fiber-reinforced concrete beams using acoustic emission', in *Fracture Mechanics of Concrete Structures, Proceedings of the 6th International FraMCoS Conference, Catania, Italy*, vol. 2, pp. 1061-1068, 2007d.

Carpinteri, A., Lacidogna, G., Manuello, A., 'Damage mechanisms interpreted by acoustic emission signal analysis', in *Damage Assessment of Structures DAMAS 2007* (Proceedings of the 7th International Conference, Torino, Italy, 2007e.

Carpinteri, A., Lacidogna, G., Niccolini, G. e Puzzi, S., 'Critical Defect Size Distributions in Concrete Structures Detected by the Acoustic Emission Technique', *Meccanica*, 2007i.

Carpinteri, A., Lacidogna, G., Niccolini, G. e Puzzi, S., 'Morphological Fractal Dimension Verus Power-Law Exponent in the Scaling of Damaged Media', *International Journal of Damage Mechanics*, 20071.

Carpinteri, A. e Lacidogna, G., 'Structural monitoring and diagnostics by the acoustic emission technique', *Proceedings of the 9th International Congress on Sound and Vibration* (ICSV9), Orlando, Florida (2002a), paper 166.

Carpinteri, A., Lacidogna, G. e Niccolini, G., 'Crack localisation in a large-sized R.C. beam through the acoustic emission technique', *Proc. 17th Congr. of Theoretical and Applied Mechanics (AIMETA)* (2005a), CD-Rom, Paper No. 238.

Carpinteri, A., Niccolini, G. e Lacidogna, G., 'Structural Stability Assessment Of Double Girder Crane By Acoustic Emission Technique', *Proceedings of the 14<sup>th</sup> International Conference on Fracture*, Rhodes, Greece, June 18-23, 2017. Colombo, S., Main, I.G. e Forde, M.C., 'Assessing Damage of Reinforced Concrete Beam Using b-Value Analysis of Acoustic Emission Signals', *ASCE Journal of Materials in Civil* Engineering, vol. 15, No. 3, pp. 280-286, 2003.

Drouillard, T.F., 'A history of acoustic emission', Journal of Acoustic Emission, vol. 14, pp. 1-34, 1996.

Geiger, L., 'Probability method for the determination of earthquake epicentres from the arrival time only', *Nachrichten von der Koniglichen Gesellschaft der Wissenschaften zu Gottingen*, vol. 4, pp. 331-349, 1910.

Green, A.T., 'Necessity-The mother of acoustic emission testing (1961-72)', *Material Evaluation*, vol. 43, pp. 600-610, 1985.

Gregori, G.P., Paparo, G., Poscolieri, M. e Zanini, A., 'Acoustic emission and released seismic energy', *Natural Hazards and Earth System Sciences*, vol. 5, pp. 777-782, 2005.

Grosse, C. U., Finck, F., Kurtz, J. H. e Reinhardt, H. W., 'Monitoring techniques based on wireless AE sensors for large structures in civil engineering', *Proc. 26th European Conference on Acoustic Emission Testing (EWGAE)*, Berlin, pp. 843-856, 2004.

Grosse, C. U., Reinhardt, H. W. e Dahm, T., 'Localization and classification of fracture types in concrete with quantitative acoustic emission measurement techniques', *NDT Int.*, vol. 30, pp. 223-230, 1997.

Gutenberg, B. e Richter, C. F., 'Seismicity of the Earth and Associated Phenomena', *Princeton University Press, Princeton*, 1954.

Haeno, S., 'The radio-seismograph', *Japanese Journal of Astronomy and Geophysics*, vol. 8, pp. 39-50, 1930.

Hloupis, G., Stavrakas, I., Pasiou, E. D., Triantis, D. e Kourkoulis, S. K., 'Natural time analysis of acoustic emissions in Double Edge Notched Tension (DENT) marble specimens', *XXIII Italian Group of Fracture Meeting, IGFXXIII, Procedia Engineering*, vol. 109, pp. 248-256, 2015

Isono, E., 'The original researcher of so-called acoustic emission', *Journal of the Japanese Society for Non-Destructive Inspection*, vol. 33, pp. 529-53, 1984.

Kaiser, J., 'Erkenntnisse und Folgerungen aus der Messung von Geräuschen bei Zugbeanspruchung von metallischen Werkstoffen' (Information and conclusions from the measurement of noises in tensile stressing of metallic materials), *Archiv für das Eisenhüttenwesen*, vol. 4, pp. 43-45, 1953.

Katsuyama, K., In situ application for the use of AE, Tokyo IPC Press, 1994.

Kishinoue, T., 'An experiment on the progression of fracture', JIshin, vol. 6, pp. 25-31, 1934.

Köppel, S. e Grosse, C.U., 'Advanced Acoustic Emission Techniques for Failure Analysis in concrete', *Proceedings of 15th World Conference on Nondestructive Testing*, Roma, 2000.

Landis, E.N. e Baillon, L., 'Experiment to relate acoustic emission energy to fracture energy of concrete', *Journal of Engineering Mechanics*, vol. 28, pp. 698-702, 2002.

Lockner, D., 'Brittle fracture as an analog to earthquakes: can acoustic emission be used to develop a viable prediction strategy', *J. Acoust. Emission*, vol. 14, pp. 88-101, 1996.

Mogi, K., 'Study of elastic shocks caused by the fracture of heterogeneous materials and its relation to earthquake phenomena', *Bulletin of Earthquake Research Institute*, vol. 40, pp. 125-173, 1962.

Niccolini, G., Manuello, A., Marchis, E. e Carpinteri, A., 'Signal frequency distribution and natural time analyses from acoustic emission monitoring of an arched structure in the Racconigi Castle', *Politecnico di Torino*, 2017.

Niccolini, G. e Schiavi, A., 'Emissioni acustiche e emissioni elastiche in solidi sottoposti a compressione', *Associazione Italiana di Acustica, 38° Convegno Nazionale*, Rimini, 8-10 giugno 2011.

Niccolini, G., Schiavi, A., Tarizzo, P., Carpinteri, A., Lacidogna, G. e Manuello, A., 'Emissioni acustiche a bassa frequenza durante le prove di compressione di materiali', *Associazione Italiana di Acustica*, 37° *Convegno Nazionale*, Siracusa, 26-28 maggio 2010.

Nondestructive Testing Handbook, 'Acoustic Emission Testing', 3rd Ed., vol. 6, ASNT, Columbus OH, USA, 2005.

Normativa ISO 22096:2007, 'Condition monitoring and diagnostics of machines - Acoustic emission'.

Ohtsu, M. e Sakata, Y., 'Nondestructive crack identification by acoustic emission analysis and ultrasonic frequency response', *Nondestructive testing of concrete elements and structures*, vol. 23, pp. 171-181, 1991.

Ohtsu, M., 'The history and development of acoustic emission in concrete engineering', *Magazine of Concrete Research*, vol. 48, pp. 321-330, 1996.

Pollock, A.A., 'Acoustic Emission-2: acoustic emission amplitudes', *Non-Destructive Testing*, vol. 6, pp. 264-269, 1973.

Richter, C.F., 'Elementary seismology', W.H. Freeman and Company, San Francisco and London, 1958.

RILEM Technical Committee TC212-ACD, 'Acoustic Emission and related NDE techniques for crack detection and damage evaluation in concrete: Test method for classification of active cracks in concrete by Acoustic Emission', *Mater. Struct.*, vol. 43, pp. 1187-1189, 2010.

Sarlis, N., 'Entropy in Natural Time and Associated Complexity Measures', 2017, 19(4), 177; doi:10.3390/e19040177

Scherbakov, R. e Turcotte, D.L., 'Damage and self-similarity in fracture', *Theoretical and Applied fracture Mechanics*, vol. 39, pp. 245-258, 2003.

Schofield, B.H., Bareiss, R.A. e Kyrala, A.A., 'Acoustic emission under applied stress', *WADC Tech. Rep. Boston, MA: Lessells and* Associated, pp. 58-194, 1958.

Shiotani, T., Fujii, K., Aoki, T. e Amou, K., 'Evaluation of progressive failure using AE sources and improved *b*-value on slope model tests', *Prog. Acoust. Emission VII*, pp. 529-534, 1994.

Swindlehurst, W., 'Acoustic Emission-1: Introduction', *Non-Destructive Testing*, vol. 6, pp. 152-158, 1973.

Varotsos P., Sarlis N. e Skordas E., 'Natural Time Analysis of critical phenomena', vol. 108, pp. 11361-11364, 2011.

Varotsos P., Sarlis N. e Skordas E., 'Natural Time Analysis: The new view of time. Precursory Seismic Electric Signals, Earthquakes and other Complex Time-Series', Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2011a.

Varotsos P., Sarlis N. e Skordas E., 'Spatio-Temporal Complexity Aspects on the Interrelation between Seismic Electric Signals and Seismicity', *Practica of Athens Academy*, vol. 76, pp. 294-321, 2001.

Varotsos P., Sarlis N., Skordas E., Tanaka, H. e Lazaridou, M., 'Additional evidence on some relationship between seismic electric signals and earthquake source parameters', *Acta Geophysica Polonica*, vol. 53, No. 3, pp. 293-298, 2005.