



POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Civile

Tesi Magistrale

Monitoraggio del Duomo di
Lecce con la Tecnica delle
Emissioni Acustiche

Relatori:

Prof. Amedeo Manuello Bertetto

Candidato:

Mario Balestra
S255634

Anno
Accademico
2020/21

Sommario

I danni provocati dai fenomeni di degrado, dovuti principalmente ad una mancata manutenzione, e dagli eventi sismici verificatisi negli ultimi decenni in Italia, hanno messo in evidenza la grande fragilità del nostro patrimonio architettonico e storico-artistico.

Negli ultimi anni sono quindi stati sviluppati degli approcci ingegneristici volti non solo al miglioramento della sicurezza strutturale ma anche al monitoraggio, mediante georadar o dispositivi ultrasonici.

In questa tesi, nello specifico, sarà analizzato il monitoraggio mediante emissioni acustiche (EA), andando a spiegare inizialmente la letteratura scientifica da cui trae origine, ovvero la Meccanica della Frattura Elastica Lineare, e successivamente il suo impiego nella pratica, valutando l'evoluzione nel tempo di un sistema di fratture presenti nel Duomo di Lecce.

Trattandosi di una tecnica di controllo non distruttiva e non invasiva risulta di ideale applicazione nelle strutture storiche per valutarne il danneggiamento e l'evoluzione nel tempo. Quando una fessura si propaga infatti vengono emesse delle onde ultrasoniche dovute al rapido rilascio di energia.

Dato che queste onde sono comprese in un range che varia tra i 50kHz e 1MHz sono stati utilizzati dei sensori piezoelettrici a larga banda, prodotti dalla società Lunitek SRL, applicati direttamente sulle fessure. In questo modo è possibile non solo localizzare il punto di origine della fessurazione ma anche la sua evoluzione, andando a stabilirne la pericolosità o stabilità nel tempo.

Inoltre la possibilità di acquisire velocemente i dati e valutarli in tempo reale costituisce il punto di forza della metodologia applicata.

Abstract

The damage caused by the phenomena of decay, mainly due to a lack of maintenance, and by the seismic events that have occurred in recent decades in Italy, have highlighted the great fragility of our architectural and historical-artistic heritage.

In recent years, therefore, engineering approaches have been developed aimed not only at improving structural safety but also at monitoring, using georadar or ultrasonic devices.

Specifically, in this thesis, monitoring by acoustic emissions (EA) will be analyzed, initially explaining the scientific literature from which it originates, namely the Mechanics of Linear Elastic Fracture, and subsequently its use in practice, evaluating the evolution over time of a system of fractures present in the Cathedral of Lecce.

As this is a non-destructive and non-invasive control technique, it is ideally applied in historical structures to evaluate their damage and evolution over time. In fact, when a crack propagates, ultrasonic waves are emitted due to the rapid release of energy.

Since these waves are included in a range that varies between 50kHz and 1MHz, wide band piezoelectric sensors were used, produced by the company Lunitek SRL, applied directly on the slots. In this way it is possible not only to locate the point of origin of the crack but also its evolution, establishing its danger or stability over time.

Furthermore, the ability to quickly acquire data and evaluate them in real time is the strength of the methodology applied.

Indice

1. Introduzione: Il Duomo di Lecce
 - 1.1 La storia del Duomo di Lecce
2. L'emissione acustica
 - 2.1 Meccanica della frattura
 - 2.1.1 Modello della Fessura Coesiva
 - 2.1.2 Snap-back
 - 2.1.3 Emissione di energia
 - 2.2 Strumentazione per l'acquisizione dati
 - 2.3 Applicazioni nel monitoraggio strutturale
 - 2.3.1 Classificazione delle fessure
 - 2.3.2 Individuazione delle sorgenti
 - 2.4 Interpretazione dei dati con criterio frattale
 - 2.4.1 Magnitudo in termini di AE ed analisi del b-value
 - 2.5 Zona monitorata e strumentazione utilizzata
 - 2.6 Obiettivi
3. Monitoraggio della torre sinistra
 - 3.1 Rilievo fotografico e modellazione
 - 3.2 Modello agli elementi finiti
 - 3.3 Analisi dei dati
4. Conclusioni
5. Bibliografia

Lista delle figure

Figura 1.1 Campanile del Duomo di Lecce

Figura 1.2 Facciata laterale del Duomo di Lecce

Figura 1.3 Facciata principale del Duomo di Lecce

Figura 1.4 Cripta del Duomo di Lecce

Figura 2.1 Transizione duttile-fragile (Carpinteri 1992)

Figura 2.2 Leggi costitutive (Carpinteri 1992)

Figura 2.3 Metodo di propagazione della fessura (Carpinteri 1992)

Figura 2.4 Fasi di formazione di una fessura (Carpinteri 1992)

Figura 2.5 Softening (Carpinteri 1992)

Figura 2.7 Snap-back (Carpinteri 1992)

Figura 2.8 Curve di risposta (Carpinteri 1992)

Figura 2.9 Risposta del provino in calcestruzzo (Carpinteri 1992)

Figura 2.10 Risposta del provino in malta (Carpinteri 1992)

Figura 2.11 Risposta strutturale al variare dell'altezza (Carpinteri 1992)

Figura 2.12 Numero di fragilità energetico e transizione duttile-fragile (Carpinteri 1992)

Figura 2.13 Energia rilasciata (Carpinteri 1992)

Figura 2.14 Sensore schematizzato

Figura 2.15 Sistema Atel

Figura 2.16 Sistema USAM

Figura 2.17 Schema di funzionamento dell'AEmission System

Figura 2.18 Classificazione fessure

Figura 2.19 Grafico RA-AF

Figura 2.20 Schematizzazione rete di trasduttori

Figura 2.21 Eventi AE nel tempo

Figura 2.22 Relazione di Gutenberg-Richter

Figura 2.23 Variazione del b-value con l'ampiezza

Figura 2.24 Andamento del b-value della sequenza di eventi sismici di Amatrice-Norcia (*Gulia and Wiemer 2019*)

Figura 2.25 Andamento del b-value della sequenza di eventi sismici di Kumamoto (*Gulia and Wiemer 2019*)

Figura 2.26 Particolare delle arcate adiacenti alla zona monitorata

Figura 2.27 Zona di applicazione dei sensori

Figura 2.28 Centralina Aemission – Lunitek srls

Figura 3.1 Vista in pianta della zona monitorata

Figura 3.2 Vista in sezione della zona monitorata

Figura 3.3 Vista frontale dell'ingresso principale

Figura 3.4 Vista in pianta dell'ingresso principale

Figura 3.5 Vista in sezione dell'ingresso principale

Figura 3.6 Modello grafico della zona di studio

Figura 3.7 Particolare del soffitto ligneo della navata centrale

Figura 3.8 Proprietà del materiale utilizzato

Figura 3.9 Carico dovuto al peso delle volte

Figura 3.10 Sovraccarico permanente

Figura 3.11 Carico distribuito relativo al peso della muratura

Figura 3.12 Sovraccarico applicato sulla zona calpestabile

Figura 3.13 Vincoli sui nodi alla base

Figura 3.14 Modello FEM iniziale con elementi semplici

Figura 3.15 Modello FEM con spessori

Figura 3.16 Modello FEM con discretizzazione nodi finale

Figura 3.17 Applicazione dei moltiplicatori ai carichi

Figura 3.18 Andamento delle tensioni S_{xx}

Figura 3.19 Particolare delle tensioni S_{xx} nella zona di applicazione dei sensori

Figura 3.20 Particolare delle tensioni S_{xx} nell'intorno della finestra

Figura 3.21 Particolare delle tensioni S_{xy} nella zona di applicazione dei sensori

Figura 3.22 Particolare delle tensioni S_{xy} nell'intorno della finestra

Figura 3.23 Centralina AEmission

Figura 3.24 Posizione dei tre blocchi fessurativi

Figura 3.25 Finestra inserimento coordinate zona di studio

Figura 3.26 Sistema di riferimento sensori

Figura 3.27 Coordinate relative sensori

Figura 3.28 Visualizzazione 3D dei sensori

Figura 3.29 Definizione dei parametri di soglia

Figura 3.30 Picco delle vibrazioni registrate dall'INGV

Lista grafici

Grafico 1 N° eventi cumulati

Grafico 2 Cumulata degli eventi fino al 29 giugno

Grafico 3 Andamento della frequenza degli eventi fino al 29 giugno

Grafico 4 Eventi AE per secondo degli eventi fino al 29 giugno

Grafico 5 Beta-T events degli eventi fino al 29 giugno

Grafico 6 Cumulata degli eventi tra il 29 giugno e il 6 luglio

Grafico 7 Andamento della frequenza degli eventi tra il 29 giugno e il 6 luglio

Grafico 8 Eventi AE per secondo degli eventi tra il 29 giugno e il 6 luglio

Grafico 9 Beta-T events degli eventi tra il 29 giugno e il 6 luglio

Grafico 10 Cumulata degli eventi tra il 6 luglio e il 12 luglio

Grafico 11 Andamento della frequenza degli eventi tra il 6 luglio e il 12 luglio

Grafico 12 Eventi AE per secondo degli eventi tra il 6 luglio e il 12 luglio

Grafico 13 Andamento complessivo del Beta-T Events

Capitolo 1

1. Il Duomo di Lecce

Il Seicento e il Settecento vedono l'affermarsi del Barocco nel panorama artistico nazionale. Lecce non sarà esente dall'influenza di questa nuova corrente artistica e anzi, contribuirà alla creazione di un Barocco con delle caratteristiche così specifiche da prendere il nome di Barocco Lecce. La peculiarità è data dall'utilizzo di una pietra locale molto tenera, la cosiddetta pietra leccese, su cui verranno ricavati dettagli decorativi quali ad esempio fiori, putti e ghirlande.

Una delle più grandi espressioni del Barocco Lecce è il Duomo di Lecce, ubicato all'interno dell'omonima Piazza del Duomo, e affiancato dal campanile, dall'Episcopio e dal Palazzo dell'antico seminario.



Figura 1.1 – Campanile del Duomo di Lecce



Figura 1.2 – Facciata laterale del Duomo

In figura 1.1 si può notare come una delle caratteristiche principali, giunti in Piazza del Duomo, è l'essere accolti non dalla facciata principale bensì da quella laterale, più ricca e fastosa, così come imposto dai canoni del barocco. La facciata principale invece è disposta lateralmente, rivolta verso l'Episcopio.



Figura 1.3 – Facciata principale del Duomo

Si può notare come la facciata principale sia nettamente più semplice e lineare, suddivisa in due ordini conclusi da un timpano e scanditi verticalmente in tre sezioni da quattro paraste scanalate coronate da capitello corinzio, di cui le due interne si prolungano nel timpano.

Nella classicità della facciata, tra le statue di S. Pietro e S. Paolo nelle nicchie laterali, spicca il grande portone bronzeo realizzato in occasione del Giubileo del 2000 dallo scultore Armando Marrocco per volontà dell'arcivescovo Cosmo Francesco Ruppi.

1.1 La storia del duomo di Lecce

La struttura attuale è relativamente più giovane rispetto alle altre chiese del leccese, frutto di tre riedificazioni avvenute nel giro di circa 500 anni. I primi documenti storici relativi all'età normanna fanno risalire al 1144 la costruzione di un primo campanile. Questo tuttavia crollò a causa di una insufficiente stabilità strutturale. Solo nel 1230 il vescovo Roberto Volturio fece ricostruire il Duomo e il campanile. Quest'ultima, in occasione del Concilio di Trento del 1658, venne demolita poiché troppo piccola per ospitare tutti i fedeli.

Riedificata per volontà del vescovo Luigi Pappacoda, la progettazione venne affidata all'architetto leccese Giuseppe Zimbalo, che ne condusse i lavori dal 1659 al 1670, realizzando una chiesa con pianta a croce latina sviluppata su tre navate.

La Cattedrale sorge quindi sui resti di una antica struttura, ancora osservabile nella cripta cinquecentesca situata al di sotto del presbiterio, circa 3m al di sotto del piano stradale.



Figura 1.4 – Cripta del Duomo

Spicca il contrasto esistente tra la ricchezza della chiesa superiore e la sobrietà della cripta. A differenza della chiesa superiore la cripta ha una pianta a croce greca con 3 navate, caratterizzata da volte a crociera sostenute da 54 colonne e 38 semicolonne monolitiche con base attica e capitelli romanici a dado.

Capitolo 2

2. L'emissione acustica

Nella letteratura scientifica si parla di esperimenti per la valutazione delle emissioni acustiche già a partire dal 1933, anno in cui il Prof. F. Kishinouye effettuò degli esperimenti sul legno. Solamente a partire dal 1950 la ricerca scientifica si focalizzò sulle emissioni acustiche in quanto tali, andando a studiare l'assenza di emissioni acustiche in diversi materiali soggetti a livelli di tensioni inferiori a quelli applicati precedentemente sugli stessi materiali.

Questi studi, effettuati da J.Kaiser, permisero di definire *l'effetto Kaiser*, ovvero tutti i materiali sottoposti a cicli di sollecitazioni con carichi sempre maggiori non emettono EA finché il livello di stress precedente non è stato superato.

L'effetto Kaiser è tutt'oggi largamente utilizzato nello studio dei dati di emissioni acustiche, poiché permette di valutare lo stress massimo a cui è stata assoggettata una struttura nel tempo.

Bisognerà però aspettare fino al 1960 per vedere le emissioni acustiche utilizzate come strumento di controllo non distruttivo e il 1969 per la fondazione della prima compagnia di AE a opera di P. Knauss.

Attualmente la tecnica delle emissioni acustiche è una tecnica di monitoraggio ampiamente utilizzata, specialmente nei manufatti in esercizio, per identificare i difetti e i danni nelle strutture. In particolare si monitora la propagazione della frattura e si valuta il livello del danno. Infatti questa tecnica rende possibile una stima dell'energia emessa durante la propagazione della frattura e quindi di ottenere informazioni sulla durabilità e la performance della struttura, stimando il tempo in cui avverrà collasso strutturale.

Indipendentemente dal fatto che si studi un materiale elastico o uno plastico, il fenomeno di fessurazione è sempre accompagnato dall'emissione di onde elastiche che si propagano all'interno dei materiali. Per tale motivo la strumentazione tradizionale affonda le sue radici nella Meccanica della Frattura.

2.1 Meccanica della frattura

Dagli studi effettuati sulla Meccanica della Frattura Elastica Lineare (LEFM) prima da Griffith, e poi ampliati da Westergaard e Williams, è stato messo in evidenza come la dissipazione di energia dovuta alla formazione e alla propagazione delle fessure avvenga in una zona infinitesima nell'intorno dell'apice della fessura, detta tip, in cui vi è una singolarità tensionale. Al tip infatti l'apertura della fessura è nulla e il campo tensionale tende all'infinito.

La presenza di un asintoto verticale al tip però non è coerente con l'esistenza di una resistenza intrinseca del materiale σ_u . Nella realtà quindi esiste una zona plastica di dimensioni finite all'apice della fessura in cui vi è dissipazione non lineare di energia.

La resistenza deve quindi essere messa a confronto con la tenacità del materiale, così da definire, in funzione della scala dimensionale dell'elemento, la duttilità o la fragilità della struttura stessa.

Questa distinzione è fondamentale poiché a materiali duttili corrisponde una propagazione lenta della fessura, viceversa a materiali fragili corrisponde una propagazione repentina della fessura.

Resistenza e tenacità però non possono essere confrontate direttamente perché dimensionalmente diverse. Per tale motivo, per descrivere il comportamento strutturale della struttura, bisogna tenere in considerazione le dimensioni fisiche della struttura considerata.

In via generale si può affermare che in solidi relativamente piccoli si ha comportamento duttile, mentre in solidi relativamente grandi si ha comportamento fragile. All'aumentare della scala strutturale vi è quindi una transizione duttile-fragile tra collasso plastico e frattura fragile.

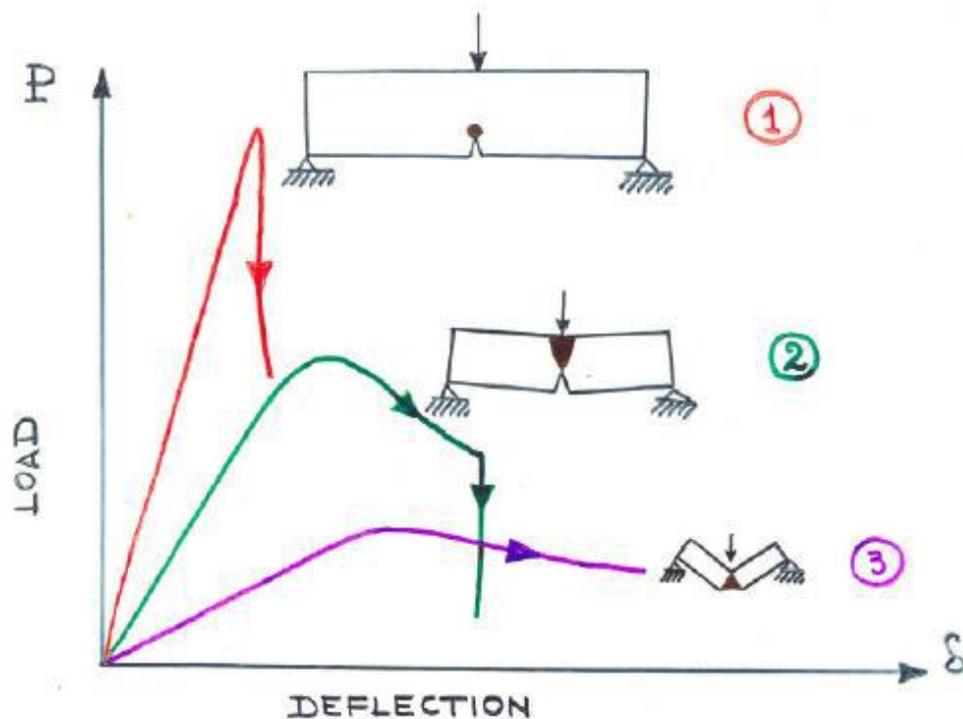


Figura 2. 1- Transizione duttile-fragile

Sperimentalmente, effettuando una prova di flessione su tre punti e mantenendo costanti forma e materiali, si assiste ad una transizione verso comportamenti fragili con una caduta improvvisa delle capacità di carico e una propagazione rapida della fessura aumentandone la scala, come mostrato in figura 2.

2.1.1 Modello della Fessura Coesiva

Per descrivere accuratamente il comportamento di questi materiali quasi-fragili il modello più adatto è quello della Fessura Coesiva. In tale modello si va ad ipotizzare l'esistenza di una zona al di sopra dell'apice della fessura, detta zona di processo o zona plastica, in cui avvengono fenomeni non lineari e dissipativi di tipo microscopico.

Se la zona di processo è sufficientemente piccola rispetto alla fessura reale è possibile studiare il problema con la meccanica della frattura elastico lineare. Il crack coesivo infatti contiene come caso limite la meccanica della frattura lineare come fenomeno di snap-back.

Per questo modello si utilizzano quindi due leggi costitutive abbinate:

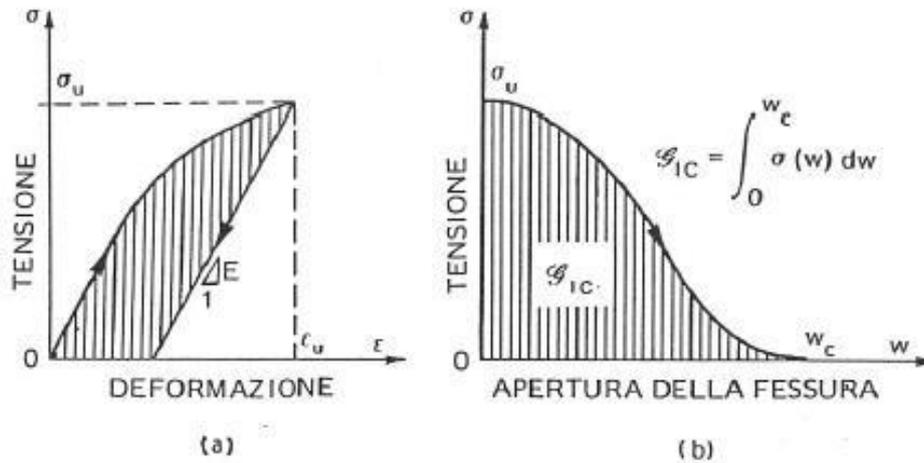


Figura 2. 2 - Leggi costitutive

- a. Una relazione tensione-deformazione che permette di rappresentare il comportamento elastico ed incrudente del materiale integro fino al raggiungimento della tensione massima ultima σ_u .
- b. Una relazione tensione-apertura della fessura che descrive il comportamento softening del materiale sino all'apertura critica w_c , superata la quale si annullano le forze di interazione tra le facce della fessura e quest'ultima diventa una sconnessione che divide il provino in due parti separati.

L'area sottesa dalla curva (a) in figura 2.1.1 rappresenta l'energia dissipata per unità di volume mentre l'area sottesa dalla curva (b) in figura 2.1.1 rappresenta l'energia dissipata per unità di superficie. Quest'ultima solitamente è indicata con G_{IC} ed è detta Energia di Frattura, ovvero l'energia assorbita dal provino durante la propagazione della fessura sino ad arrivare a rottura.

$$G_{IC} = \int_0^{w_c} \sigma(w) \partial w$$

Il pedice I sta ad indicare il metodo di propagazione della fessura, ovvero:

- I. Modo I: apertura della fessura
- II. Modo II: scorrimento
- III. Modo III: scivolamento fuori dal piano

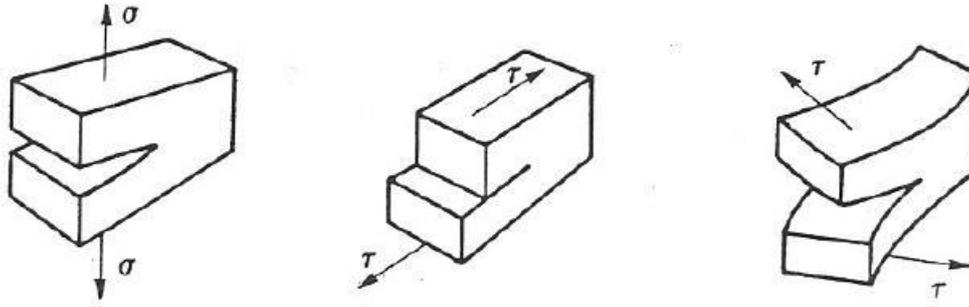


Figura 2.3 – Metodi di propagazione della fessura (Carpinteri 1992)

In questi materiali l'energia viene dissipata quindi sia nel volume del materiale integro che sulla superficie del crack.

2.1.2 Snap-back

Data una geometria semplice, ovvero una barra sottoposta a trazione centrata, si può supporre che la fessura si trasmetta in maniera simmetrica e che sia uniforme.

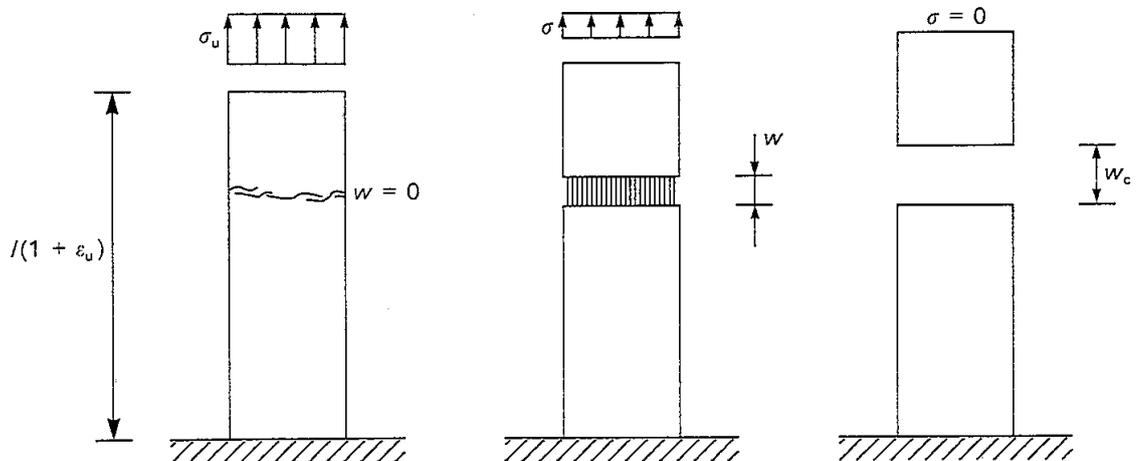


Figura 2.4 – Fasi di formazione di una fessura

Come illustrato in figura 2.4, possiamo andare a distinguere tre diverse fasi:

- I. Fase elastica senza deformazioni sino alla formazione della prima fessura. Subito dopo si perde l'elasticità lineare
- II. Fase di softening con apertura della fessura e conseguente diminuzione della tensione σ
- III. Completa separazione delle due parti della barra. La tensione va a 0 e l'apertura della fessura è quella critica

Riscrivendo le relazioni in funzione di σ è possibile individuare due domini con condizioni allo spostamento:

$$\sigma = E \frac{\delta}{l} \quad \text{per } \delta < \epsilon_u l \quad ; \quad \sigma = 0 \quad \text{per } \delta > w_c$$

Quindi in funzione dello spostamento δ , che rappresenta l'apertura della fessura, si vanno a individuare tre comportamenti diversi:

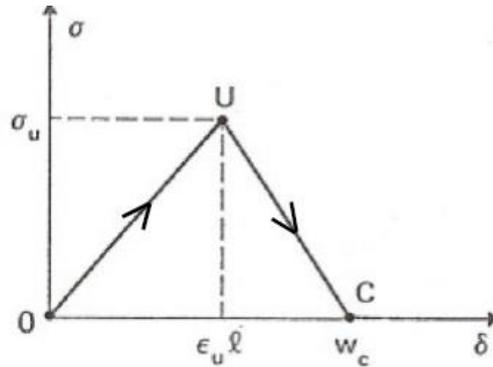


Figura 2. 5 – Softening

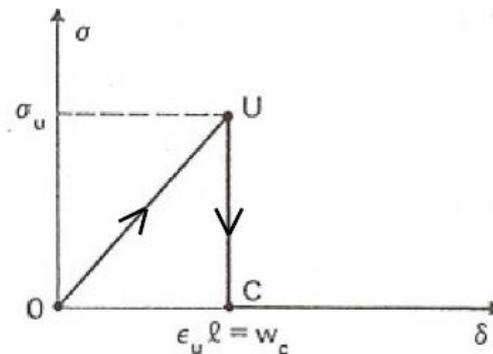


Figura 2. 6 – Situazione limite

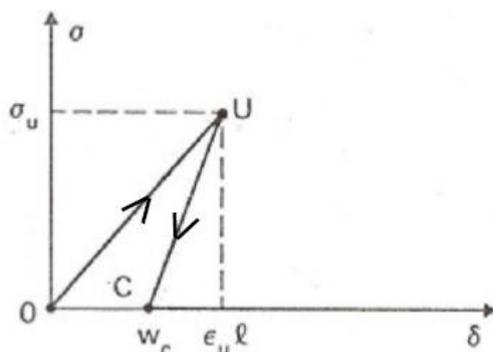


Figura 2. 7 – Snap-back

- I. Softening: si verifica quando $\frac{d\delta}{d\sigma} < 0$, ovvero $w_c > \epsilon_u l$
- II. Situazione critica: $w_c = \epsilon_u l$
- III. Snap-back: c'è andamento softening a pendenza positiva. Si verifica quando $\frac{d\delta}{d\sigma} > 0$, ovvero $w_c < \epsilon_u l$

Il ramo di snap-back può essere valutato mediante una prova di carica andando a valutare l'allontanamento delle due facce della fessura (CMOD).

Come mostrato in figura 2.8, andando a modificare la distanza tra i trasduttori di misura, si può valutare la variazione della forza in funzione dell'allungamento ($F-\Delta l$).

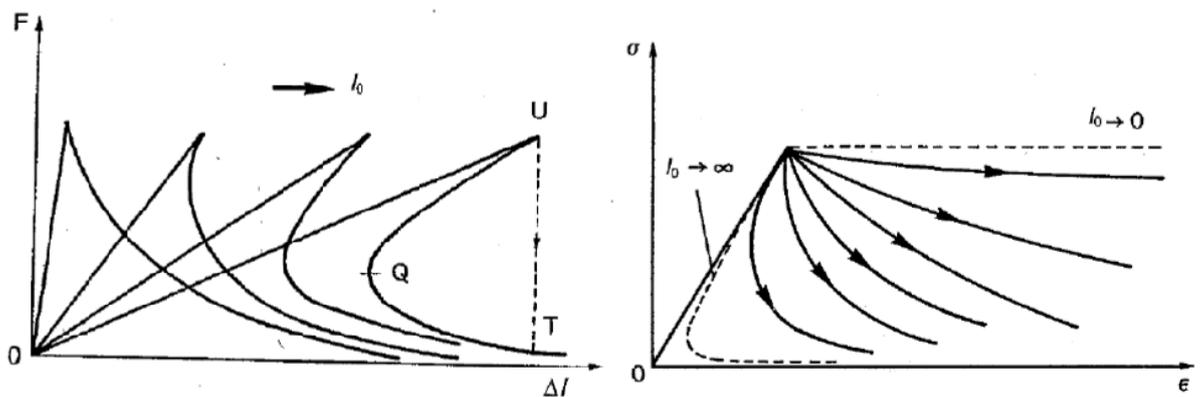


Figura 2. 8 – Curve di risposta (Carpinteri 1992)

Lo snap-back è rappresentato dal tratto UQT. Questo ramo non sarebbe valutabile effettuando una prova a controllo di spostamento e deformazione, poiché si salterebbe direttamente al tratto softening inferiore a pendenza negativa (tratto UT).

Sul piano σ - ϵ invece la transizione è rappresentata da un solo tratto elastico lineare e da una serie di rami softening compresi tra due valori limiti:

- $l_0 \rightarrow 0$: risposta perfettamente plastica
- $l_0 \rightarrow \infty$: risposta che tende al comportamento elastico

Analiticamente si può affermare che si verificherà snap-back quando la lunghezza del provino è maggiore del rapporto tra il modulo elastico e il massimo modulo tangente della legge coesiva.

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

Dunque si avrà una variazione nella risposta al variare della lunghezza l_0 , ovvero la distanza tra i punti in cui si stima la distanza relativa. Si ha una transizione duttile-fragile, tendendo ad un comportamento fragile all'aumentare della dimensione del provino.

Sperimentalmente ciò è stato messo in evidenza sottoponendo un provino di calcestruzzo ed uno in malta ad una prova di trazione su tre punti (TPBT). Il calcestruzzo è caratterizzato da una energia di frattura

$G_{IC} = 0.05 \frac{Kg}{cm}$, mentre nella malta sarà pari a $G_{IC} = 0.01 \frac{Kg}{cm}$. Si valuta quindi la risposta dei materiali in termini di carico-freccia al variare della profondità relativa $\frac{a}{h}$ della fessura iniziale.

In figura 2.9 è rappresentata la risposta del provino in calcestruzzo, che è una risposta di tipo softening. All'aumentare della profondità relativa $\frac{a}{h}$ si ha una diminuzione di capacità di carico e rigidezza ma un aumento della duttilità. Tutte le curve presentano la medesima coda, che dunque risulta indipendente dalla lunghezza della fessura iniziale a_0 .

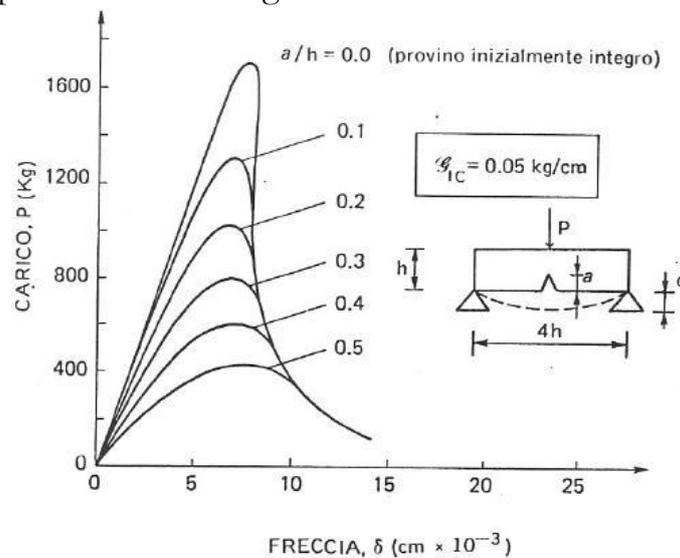


Figura 2.9 – Risposta del provino in calcestruzzo (Carpinteri 1992)

In figura 2.10 invece è rappresentata la risposta strutturale della malta, che è un materiale più fragile rispetto al calcestruzzo. La tendenza delle curve rimangono simili ma il comportamento è più fragile e con un marcato fenomeno di snap-back.

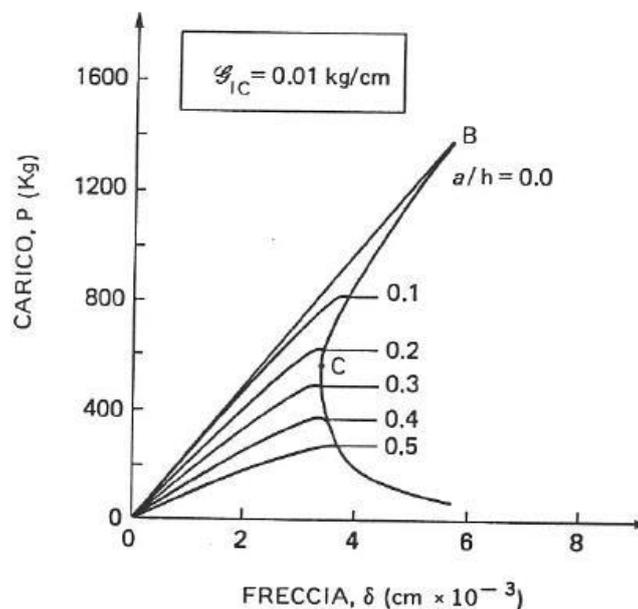


Figura 2.10 – Risposta del provino in malta (Carpinteri 1992)

L'infragilimento della risposta strutturale dovuta alla diminuzione della tenacità del materiale può essere ricavata andando ad effettuare i medesimi test ma variando le altezze dei provini.

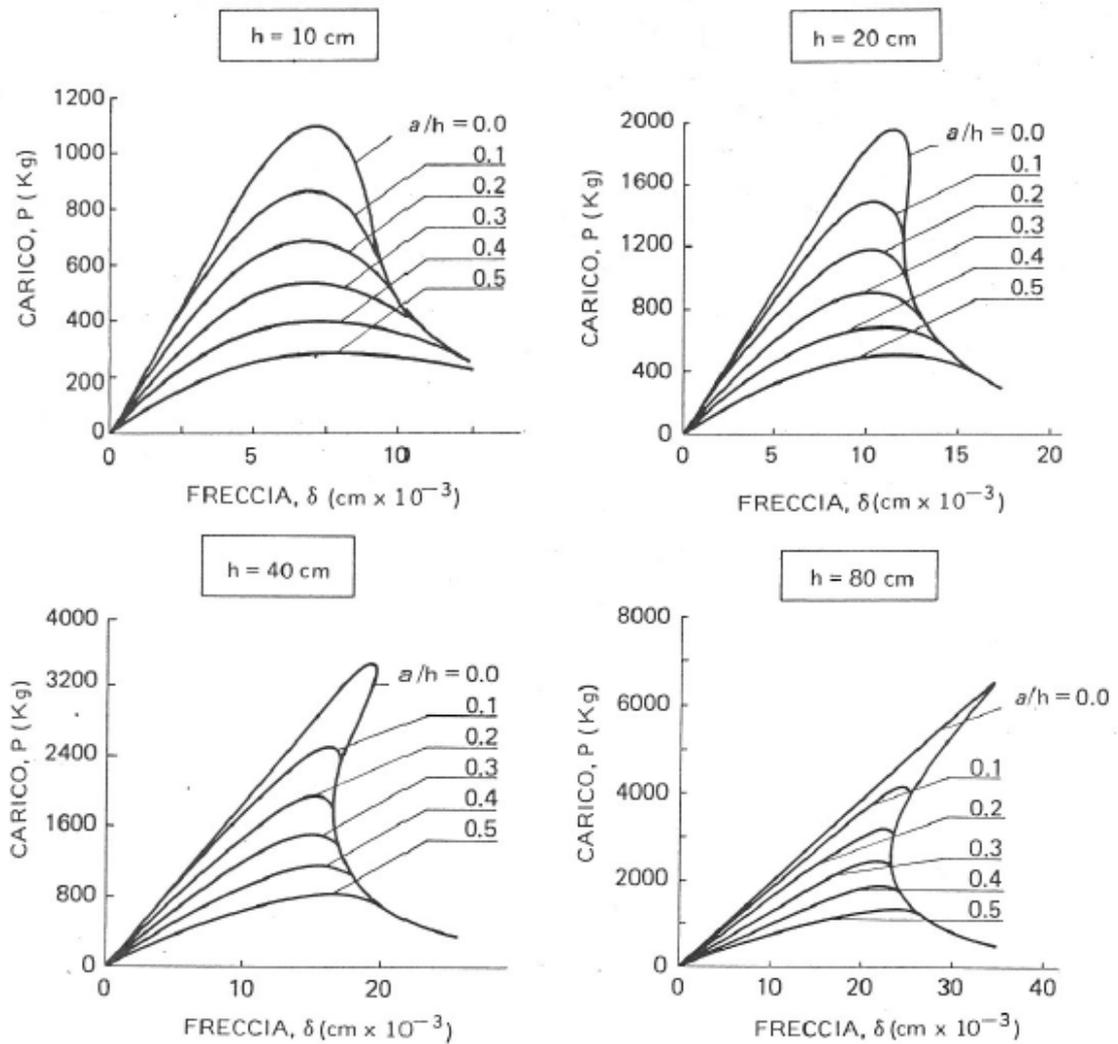


Figura 2.11 – Risposta strutturale al variare dell'altezza (Carpinteri 1992)

Considerando quindi lo stesso materiale si nota un aumento della fragilità all'aumento dell'altezza dei provini.

Sperimentalmente si è quindi messo in evidenza come la risposta duttile o fragile di una struttura dipenda da più parametri, quali dimensione del provino ed energia di frattura. Questa dipendenza dalle proprietà del materiale e dalla scala strutturale possono essere espresse mediante un solo parametro, ovvero il numero di fragilità energetico.

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

In figura 2.12 si può notare come all'aumentare della altezza h del provino vi sia una diminuzione del numero di fragilità energetico.

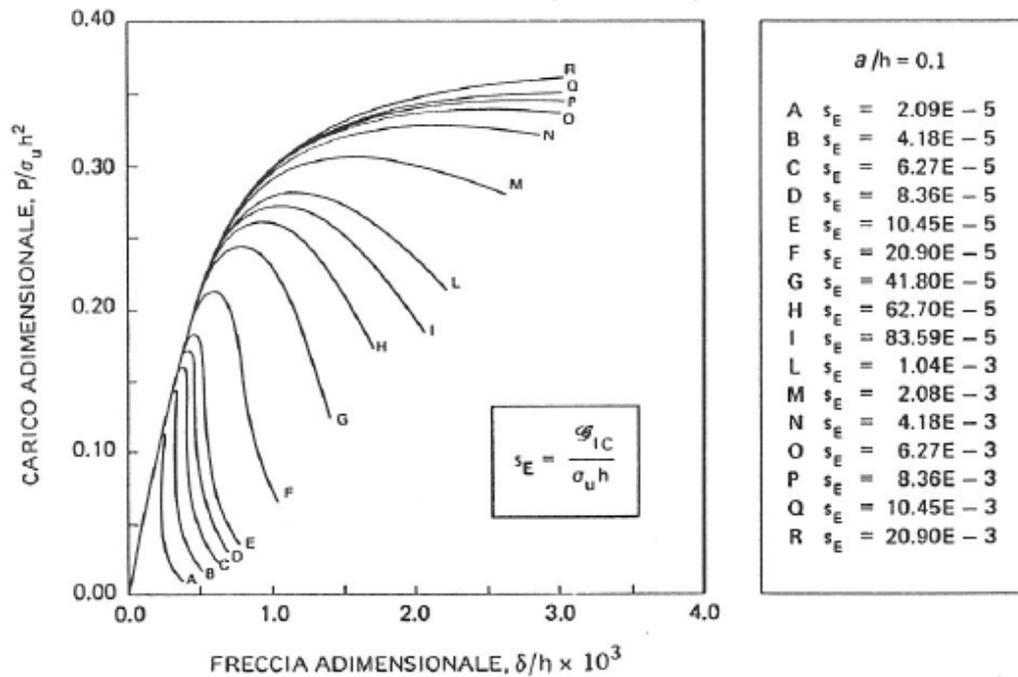


Figura 2.12 – Numero di fragilità energetico e transizione duttile-fragile (Carpinteri 1992)

In funzione del numero di fragilità energetico e della snellezza λ del provino, mediante la legge di Irwin, è possibile trovare la condizione di snap-back, ovvero il “Numero di fragilità globale”.

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

La instabilità del provino dunque dipende unicamente da questo parametro. In funzione del tipo di prova distinguiamo due condizioni di instabilità:

- I. $B < \frac{1}{3}$ per una prova di flessione su tre punti
- II. $B < \frac{1}{2}$ per una prova di trazione

Nel caso di materiali fibro-rinforzati, quali ad esempio il calcestruzzo armato, l'eterogeneità del materiale consente una dissipazione dell'energia differente poiché l'armatura tende a richiudere la fessura. In tal caso si fa riferimento al “Bridged Crack Model”, che differisce dal precedente per il numero di fragilità, che in questo caso deve tenere conto della presenza delle barre di armatura.

$$N_P = \frac{f_y \sqrt{h}}{K_{IC}} \rho$$

Dove:

- f_y è la tensione di snervamento dell'acciaio
- h è l'altezza del provino
- ρ è la percentuale di armatura
- K_{IC} è la tenacità a frattura del materiale

2.1.3 Emissione di energia

Come mostrato in figura 2.13, il fenomeno di instabilità è sempre accompagnato dall'emissione di energia.

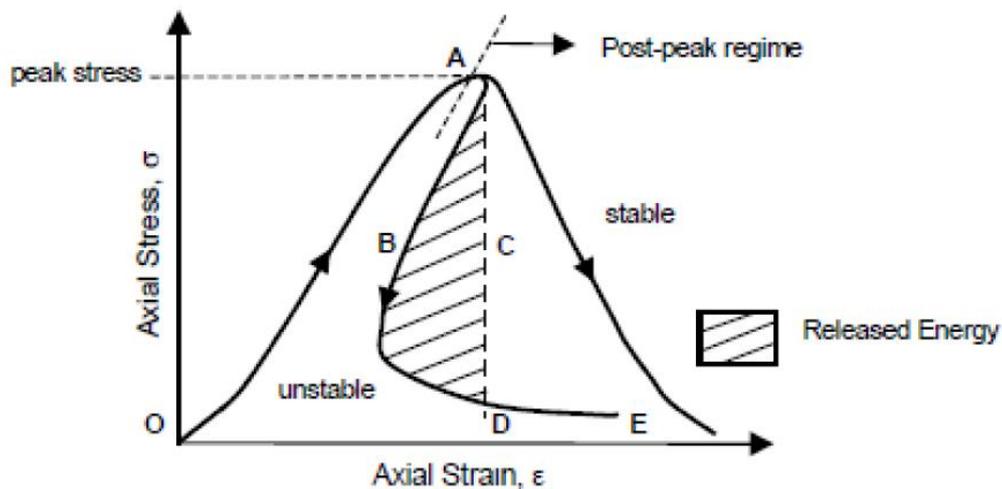


Figura 2.13 – Energia rilasciata

Questa energia può essere rilasciata sia sotto forma di energia cinetica, con conseguente distruzione del provino, o sotto forma di onde di pressione. Queste onde di pressione non sono altro che le emissioni acustiche e permettono, attraverso specifici sensori, di prevedere il verificarsi di eventi catastrofici, poiché l'energia emessa non viene assorbita dal materiale ma trasmessa all'esterno.

2.2 Strumentazione per l'acquisizione dati

Per individuare le onde di pressione che si propagano nel materiale al momento della fessurazione si utilizzano dei trasduttori applicati sulla superficie che permettono di ricevere e registrare le onde.

Questi trasduttori non sono altro che sensori piezoelettrici dotati di una pastiglia in materiale ceramico, quale ad esempio piombo zirconato di titanio (PZT), che sfruttano la capacità di alcuni materiali di produrre segnali elettrici ogni qual volta sono sottoposti a stress meccanico.

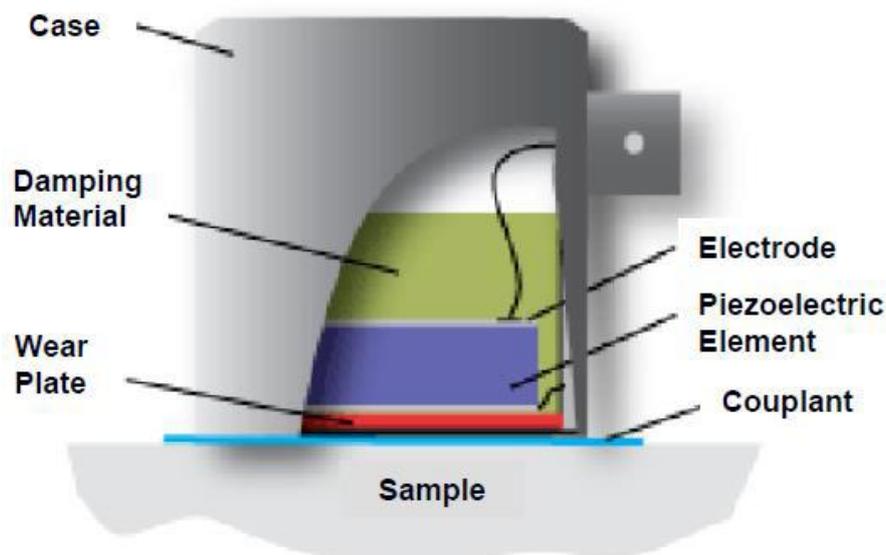


Figura 2.14 – Sensore schematizzato

Come è possibile notare dalla schematizzazione del sensore in figura 2.14, il segnale captato è amplificato e trasformato in un segnale elettrico e filtrato, mediante l'utilizzo di un materiale smorzante, per eliminare frequenze indesiderate quali ad esempio le vibrazioni stesse della strumentazione.

Nel corso degli anni la strumentazione si è evoluta, implementando la possibilità di localizzare la fonte e l'analisi a distanza.

2.2.1 Strumentazione Atel

La strumentazione Atel è stata la prima utilizzata nello studio delle emissioni acustiche.

I sensori piezoelettrici sono settati su frequenze che variano tra i 100 kHz e i 400 kHz ed è costituita da:

- Amplificatore
- Filtro PBS
- Misuratore di soglia
- Contatore di oscillazioni
- Registratore

Il segnale emesso, rappresentato come un'onda sinusoidale smorzata, viene analizzato da un sistema che conta le emissioni che superano una certa soglia misurata in volt (V).

Per eliminare le frequenze indesiderate viene fissato un limite di soglia ("threshold") pari a $100 \mu\text{V}$, poi amplificato fino a 100 mV , e viene posto un limite di 255 oscillazioni ogni 120 secondi nel conteggio delle oscillazioni totali.

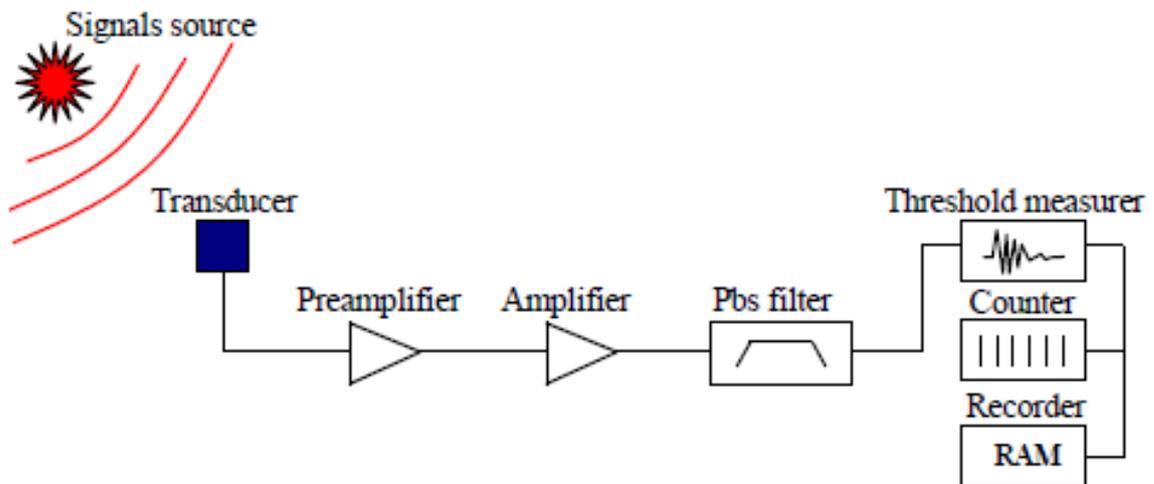


Figura 2.15 – Sistema Atel

Con questa strumentazione è possibile utilizzare due differenti metodi di analisi.

Il metodo "Ring-Down counting" che permette di identificare i difetti tramite le loro emissioni acustiche e il metodo "Counting of events" che, per tener conto delle proprietà del materiale piezoelettrico e del suo smorzamento, considera tutte le oscillazioni prodotte da un singolo segnale come un solo evento.

2.2.2 Strumentazione USAM

Utilizzando questa strumentazione è possibile localizzare il punto del provino in cui vi sono i microcrack. La strumentazione infatti consiste in:

- 6 sensori preamplificati
- 6 storage per i dati
- 1 unità centrale per la sincronizzazione della fase
- 1 misuratore di soglia

In questo caso i sensori sono settati su un range differente che varia tra i 50 kHz e gli 800 kHz.

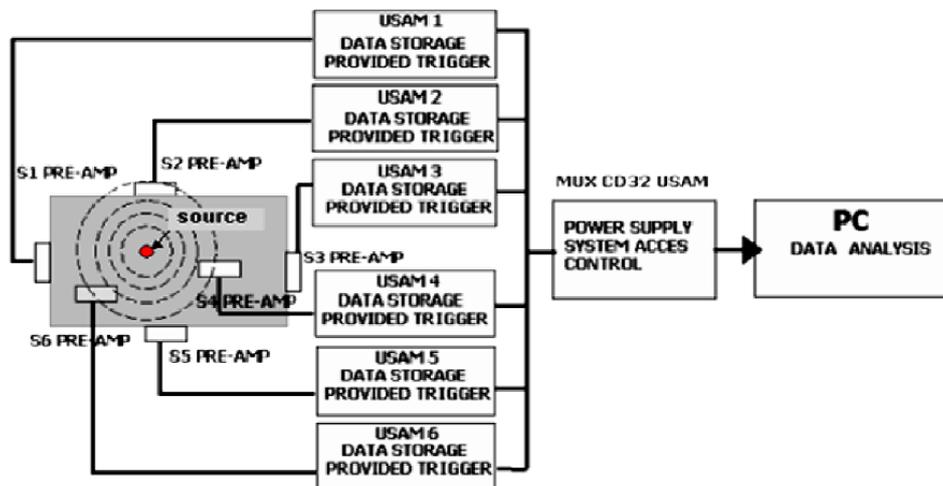


Figura 2.16 – Sistema USAM

2.2.3 Aemission System

L' Aemission system permette non solo di individuare le zone danneggiate, e valutarne lo sviluppo nel tempo, ma anche localizzare le sorgenti di danneggiamento all'interno della struttura.

Si tratta di un metodo innovativo che permette di processare una grande quantità di dati in breve tempo e di analizzarli da remoto. Per tale motivo si tratta di un sistema particolarmente indicato per il monitoraggio di strutture delicate o di strutture in funzione, essendo non invasivo e non prevedendo immissione di energia all'interno del manufatto.

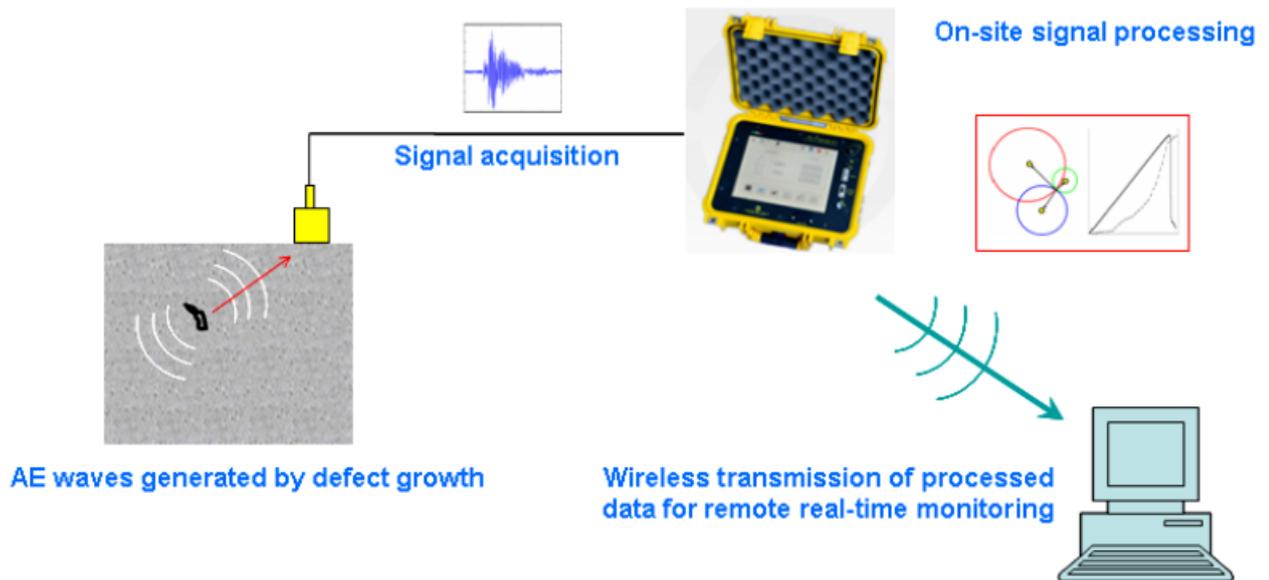


Figura 2.17 – Schema di funzionamento dell'Aemission System

2.3 Applicazioni nel monitoraggio strutturale

Il progredire del danneggiamento è accompagnato sia da un aumento nel tempo delle emissioni acustiche e della loro ampiezza sia da una diminuzione delle frequenze. Si passa infatti da frequenze di 50 kHz – 1 MHz nel momento in cui si forma la micro fessura sino ad arrivare a frequenze nel campo dell'udibile, variabili tra 1 kHz e 10 kHz, al passaggio da micro a macro fessura.

Lo studio dell'ampiezza delle emissioni permette inoltre una valutazione del grado di danneggiamento della struttura, dato che l'ampiezza del segnale è proporzionale alla dimensione della sorgente.

Non occorrerà studiare quindi tutto il segnale captato ma basterà valutarne alcuni parametri fondamentali, ovvero:

- Ampiezza di picco A : picco massimo di intensità raggiunto dal segnale
- Rise Time RT : tempo necessario a raggiungere la massima ampiezza misurato a partire dal primo superamento di soglia.

2.3.1 Classificazioni delle fessure

Noti l'ampiezza di picco, A , e il Rise Time, RT , è possibile classificare le fessure mediante un ulteriore parametro, il Rise Angle RA ricavabile dal rapporto tra Rise Time ed Ampiezza. Questo parametro permette di conoscere l'origine delle fessure, ovvero se sono dovute a sforzi di taglio o di trazione.

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

In base al valore di RA è possibile classificare le fessure in due modi:

- Modo 1: RA basso. Il crack si amplifica a causa di forze di trazione
- Modo 2: RA alto. Il crack, dovuto a forze di taglio, tende a scorrere.

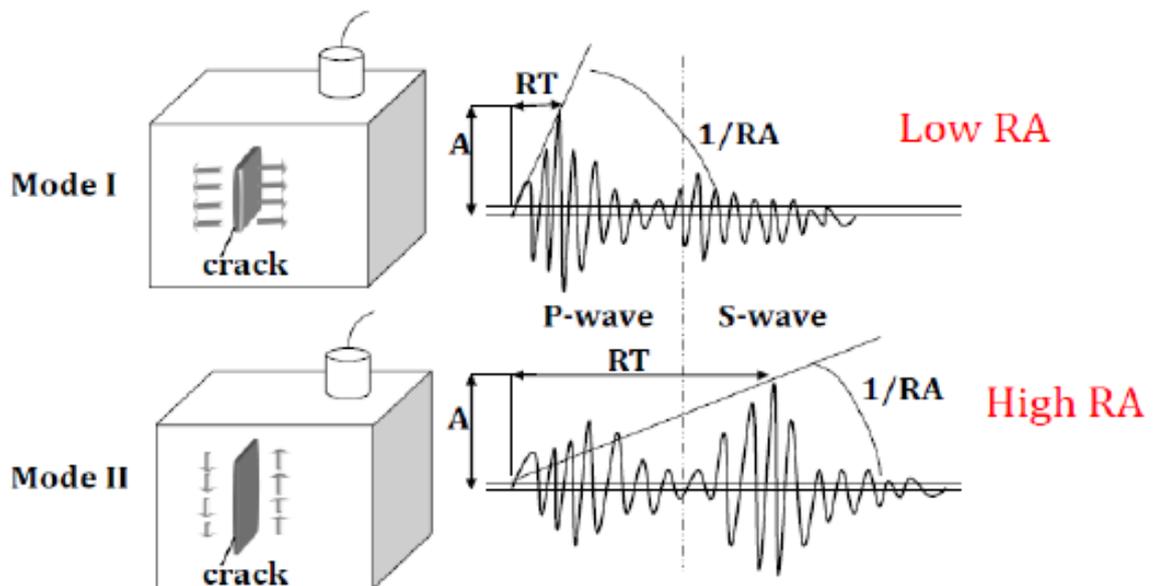


Figura 2.17 – Classificazione fessure

Analizzando il Rise Angle in funzione dell' Average Frequency AF , ovvero il rapporto tra il numero di attraversamenti del valore di soglia e la durata del segnale, è possibile classificare ulteriormente la fessura.

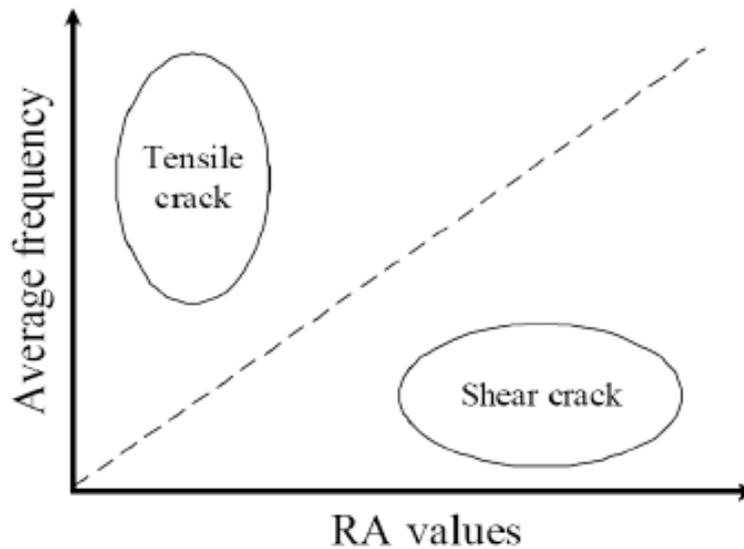


Figura 2.18 - Grafico RA-AF

Come è possibile notare in figura 2.18, in un sistema di riferimento RA-AF, tutti i punti ricadenti al di sotto della bisettrice rappresentano fessure di Modo 2, mentre i punti al di sopra rappresentano fessure di Modo 1.

2.3.2 Localizzazione delle sorgenti

È possibile conoscere il punto di origine del danneggiamento andando a sfruttare le tecniche utilizzate nello studio degli eventi sismici, essendo una emissione acustica equiparabile alle onde prodotte da un sisma ma in piccola scala.

Durante la propagazione l'onda si attenua, e quindi la massima distanza a cui potrà essere rilevata dipende anche dalle proprietà del materiale, dalla geometria del corpo e da parametri ambientali.

Nota la posizione dei sensori, in funzione della distanza della sorgente da essi, l'onda sarà captata in tempi diversi dai vari sensori e quindi effettuando una triangolazione sui vari ritardi si potrà localizzare la sorgente.

Ipotizzando che la sorgente sia localizzata in un punto di coordinate (x_0, y_0, z_0) e c sia la velocità di propagazione dell'onda nel mezzo, il tempo necessario a percorrere lo spazio dalla fonte al trasduttore, posto in un punto di coordinate (x_a, y_a, z_a) , sarà:

$$T_A = \frac{\sqrt{(x_0 - x_a)^2 + (y_0 - y_a)^2 + (z_0 - z_a)^2}}{c}$$

Questo valore però non può essere utilizzato poiché non è noto il tempo assoluto dell'evento ma solo quello relativo ai vari sensori. Si procede dunque andando a riscrivere l'equazione in funzione del tempo di arrivo di un'onda ad un trasduttore di riferimento.

$$\Delta t_A = \frac{\sqrt{(x_0 - x_a)^2 + (y_0 - y_a)^2 + (z_0 - z_a)^2}}{c} - T_R$$

Si ottiene dunque un sistema di quattro equazioni in quattro incognite, ovvero coordinate della sorgente ed il tempo di arrivo al sensore di riferimento.

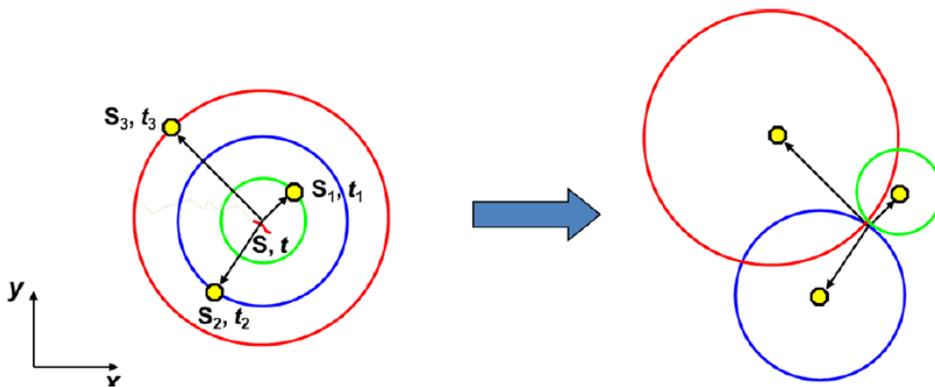


Figura 2.19 - Schematizzazione della rete di trasduttori

La posizione della sorgente può essere determinata rapidamente e con una precisione di pochi millimetri su metro. Se si volesse localizzare la sorgente in uno spazio 3D infatti basterebbe utilizzare 4 trasduttori. Numero di trasduttori che scende a 3 per una valutazione bidimensionale e a 2 per una monodimensionale.

2.4 Interpretazione dei dati con criterio frattale

Negli ultimi anni, sulla base delle teorie statistiche e dei frattali di frantumazione, il danneggiamento della struttura è stato ricondotto ad una legge di scala semplice tale per cui l'energia dissipata è proporzionale al numero totale di eventi di emissioni acustiche che a sua volta è proporzionale al volume del provino elevato ad un esponente frattale.

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

- W: energia dissipata
- N: numero di emissioni acustiche durante il danneggiamento
- V: volume del provino
- D: esponente frattale compreso tra 2 e 3, dove D=3 rappresenta emissione su tutto il volume

Per calcolare il numero massimo di eventi AE sopportabili dalla struttura è possibile portare a collasso un provino del materiale e, mediante tale legge di scala, individuare la condizione critica pria di giungere a collasso:

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

- N_{max} : numero critico di eventi AE che porta a collasso la struttura
- $N_{max,R}$: numero critico di eventi AE che porta a collasso il provino
- V: volume struttura
- V_R : volume provino
- D: esponente frattale

Gli studi effettuati nell'ambito dei frattali di frantumazione hanno messo in evidenza come il processo dissipativo segua un'ulteriore legge di scala dipendente dal tempo.

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

Il numero massimo di eventi di emissione acustica che la struttura può sopportare sarà quindi ricavabile per mezzo di una ulteriore relazione ottenuta da prove sperimentali effettuate su provini.

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

- N: numero totale di eventi AE ottenuti durante il monitoraggio
- t: tempo di monitoraggio
- t_{max} : vita utile della struttura
- β_t : esponente frattale, detto time-scaling, compreso tra 0 e 3 ma con valori anche non interi.

Il coefficiente frattale di time-scaling β_t rappresenta la velocità con cui evolve il danno. Il suo valore, ricavabile dai dati registrati, permette di fare una previsione sulla stabilità della struttura.

In generale si possono distinguere tra macro casi:

- $\beta_t < 1$: il processo è stabile ed il grafico presenta concavità verso il basso
- $\beta_t \cong 1$: il processo è metastabile ed evolve nel tempo in modo lineare
- $\beta_t > 1$: il processo è instabile e degenera rapidamente nel tempo. Il grafico presenta concavità verso l'alto

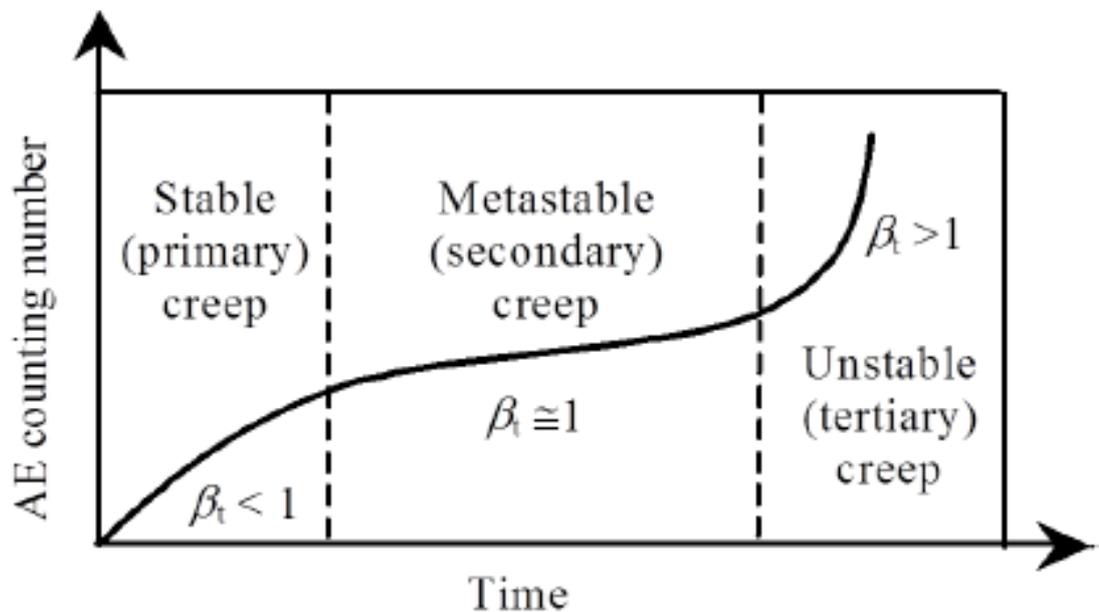


Figura 2.20 – Eventi AE nel tempo

In funzione del valore di β_t è possibile quindi distinguere le tre fasi che tipicamente caratterizzano il processo di danneggiamento di una struttura, ovvero:

- Creep primario: vi è una diminuzione di energia
- Creep secondario: l'energia rimane costante
- Creep terziario: vi è un aumento di energia e un conseguente accumulo di danneggiamento sino a giungere a rottura.

2.4.1 Magnitudo in termini di AE ed analisi del b-value

Negli ultimi decenni sono state studiate nel dettaglio le similitudini tra eventi sismici ed emissioni acustiche arrivando a definire la magnitudo in termini di emissioni acustiche come:

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

- A_{max} : ampiezza massima del segnale espressa in μV
- $f(r)$: funzione di aggiustamento, dipendente dalla struttura, che tiene in conto che l'ampiezza è una funzione decrescente della distanza r tra il sensore e la sorgente.

Gli eventi sismici di grande magnitudo però avvengono meno frequentemente di quelli di piccola magnitudo, perciò, per tenerne conto, si utilizza la relazione formulata da Gutenberg e Richter nel 1935 e applicata alle emissioni acustiche nel 1954:

$$\log_{10}N(\geq m) = a - bm$$

- N : numero cumulato di eventi AE con magnitudo maggiore o uguale ad m
- $a-b$: costanti, positive, che variano in base alla regione

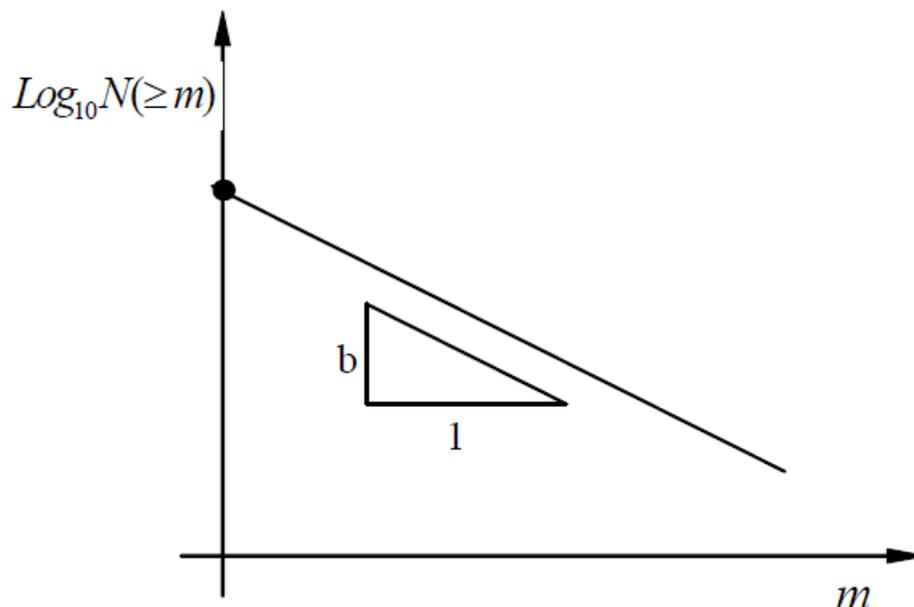


Figura 2.21 - Relazione di Gutenberg-Richter

Nello specifico la costante b , nota come b -value, rappresenta la pendenza negativa della distribuzione delle ampiezze e può essere utilizzato come un indicatore del grado di danneggiamento della struttura. Il suo valore

infatti varia al progredire del processo di fessurazione, diminuendo quando il provino va a rottura.

Dato che il valore del b-value misurabile in un sisma è molto simile a quello che è possibile ritrovare in un evento AE, sperimentalmente si è dimostrato che così come per il sisma anche per gli eventi AE la magnitudo, ovvero l'ampiezza di ogni segnale, è proporzionale all'area S della frattura.

$$A \propto S$$

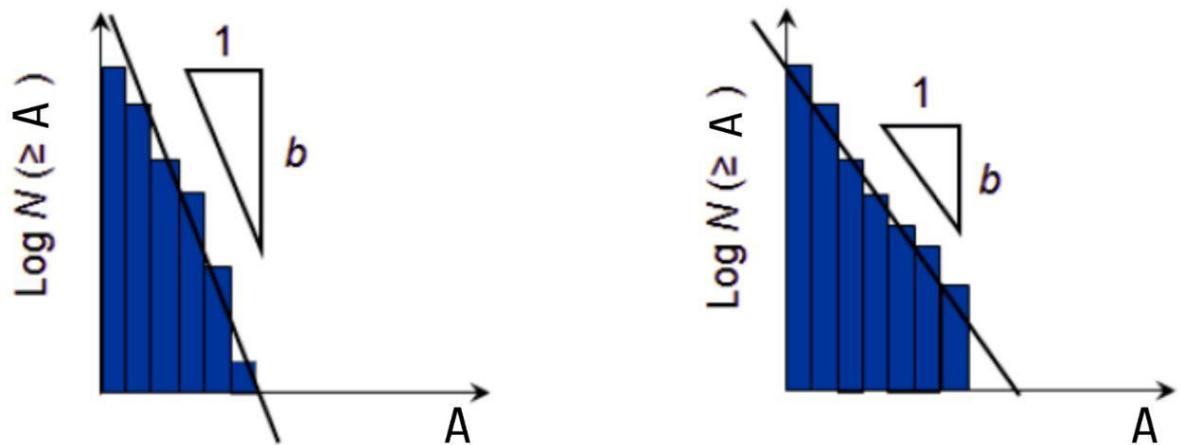


Figura 2.22 – Variazione del b-value con l'ampiezza

Ciò significa che le micro fessure generano segnali di piccola ampiezza mentre le macro fessure generano segnali di grande ampiezza.

In base al valore del b-value possiamo quindi distinguere tre casistiche:

- Valori elevati di b ($b > 1.7$): molti eventi AE di piccola ampiezza e quindi presenza specialmente di micro fessure
- Valori medi di b ($1.2 < b < 1.7$): vi è una progressiva formazione di macro fessure
- Valori bassi di b ($1 < b < 1.2$): vi è un incremento degli eventi AE di grande ampiezza sino al collasso per $b=1$

Questo metodo ci permette quindi di individuare la condizione critica di danneggiamento, corrispondente a $b \cong 1.5$, e di intervenire prima che possa portare al collasso della struttura.

2.5 Zona monitorata e strumentazione utilizzata

Allo stato attuale le strutture murarie della cattedrale presentano un quadro fessurativo in continua evoluzione, in particolar modo su elementi portanti quali colonne ed arcate di connessione tra la navata centrale e le laterali.



Figura 2.25 – Particolare delle arcate adiacenti alla zona monitorata

La zona monitorata è stata individuata in una porzione di arco della torre sinistra, andando a disporre, sull'arco adiacente all'organo, un sistema di acquisizione di dati di emissione acustica a 8 canali.



Figura 2.26 – Zona di applicazione dei sensori

Il monitoraggio è stato effettuato in continuo, utilizzando come strumento di acquisizione l'Aemissioni system (figura 2.27), in grado di fornire una prima elaborazione dei dati raccolti e di valutare la cumulata dei segnali di AE e la successiva classificazione sia per frequenza che per ampiezza.



Figura 2.27 – Centralina Aemission – Lunitek srls

2.6 Obiettivi

L'obiettivo di questo lavoro di tesi è quello di fornire un quadro completo dello stato di danneggiamento del Duomo di Lecce.

L'utilizzo di una tecnica non distruttiva come quella delle emissioni acustiche permette di tenere sotto controllo il propagarsi di micro-fessure all'interno delle strutture della cattedrale e di localizzare tridimensionalmente e con precisione la posizione del danneggiamento.

In tal modo, a seconda dei risultati forniti dallo studio dei dati, sarà possibile programmare degli eventuali interventi di restauro e consolidazione efficaci e al tempo stesso circoscritti.

Capitolo 3

3. Monitoraggio della torre sinistra – Inquadramento

Ad un prima analisi visiva si è riscontrata la presenza di un sistema fessurativo presente nella quasi totalità delle strutture murarie della cattedrale, pertanto, in seguito ad un primo sopralluogo più approfondito, è stata scelta come area di studio una porzione della torre sinistra.

Questa zona infatti presenta un sistema fessurativo più giovane, il cui andamento nel tempo può dare informazioni importanti sullo stato di salute della cattedrale.

Il monitoraggio è stato effettuato in continuo per più di tre mesi, a partire dal 20 febbraio sino al 29 giugno.

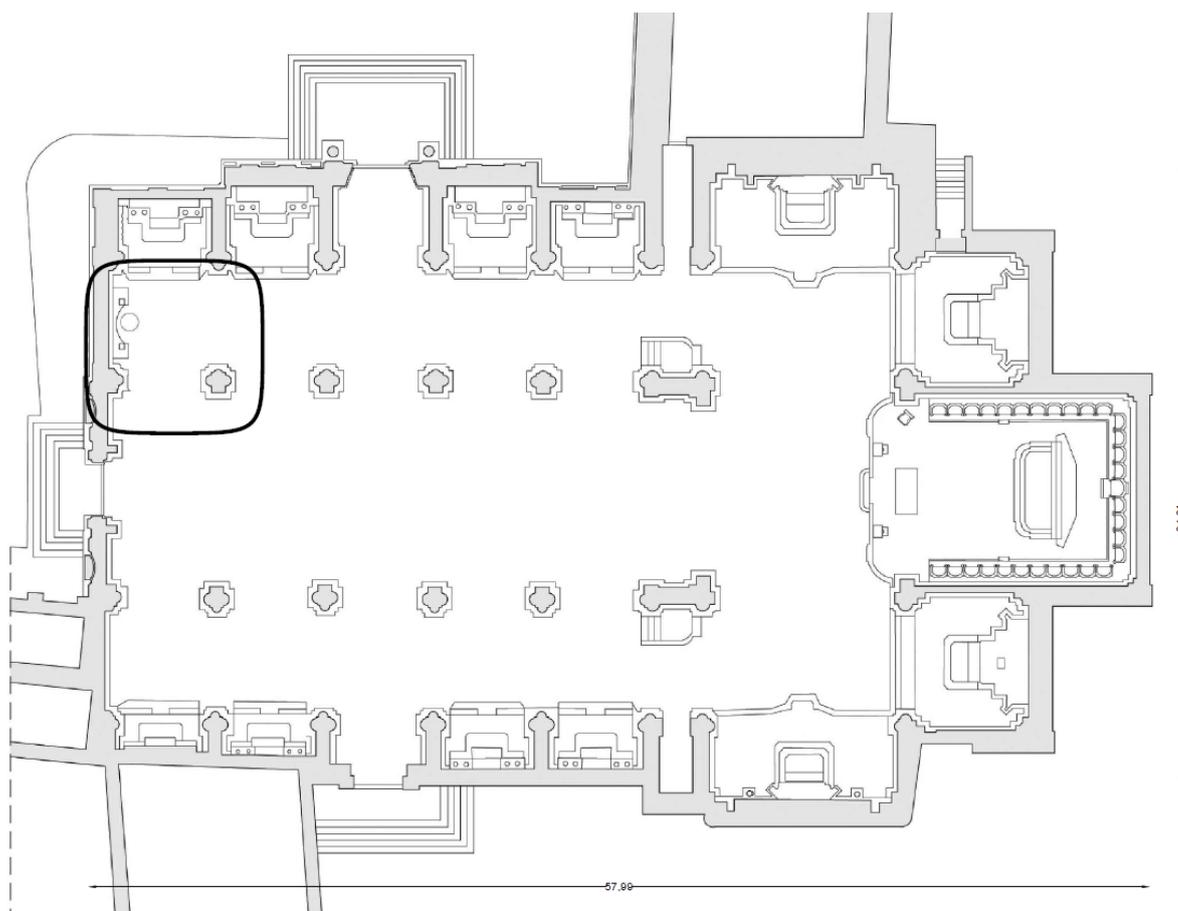


Figura 3.1 – Vista in pianta della zona monitorata

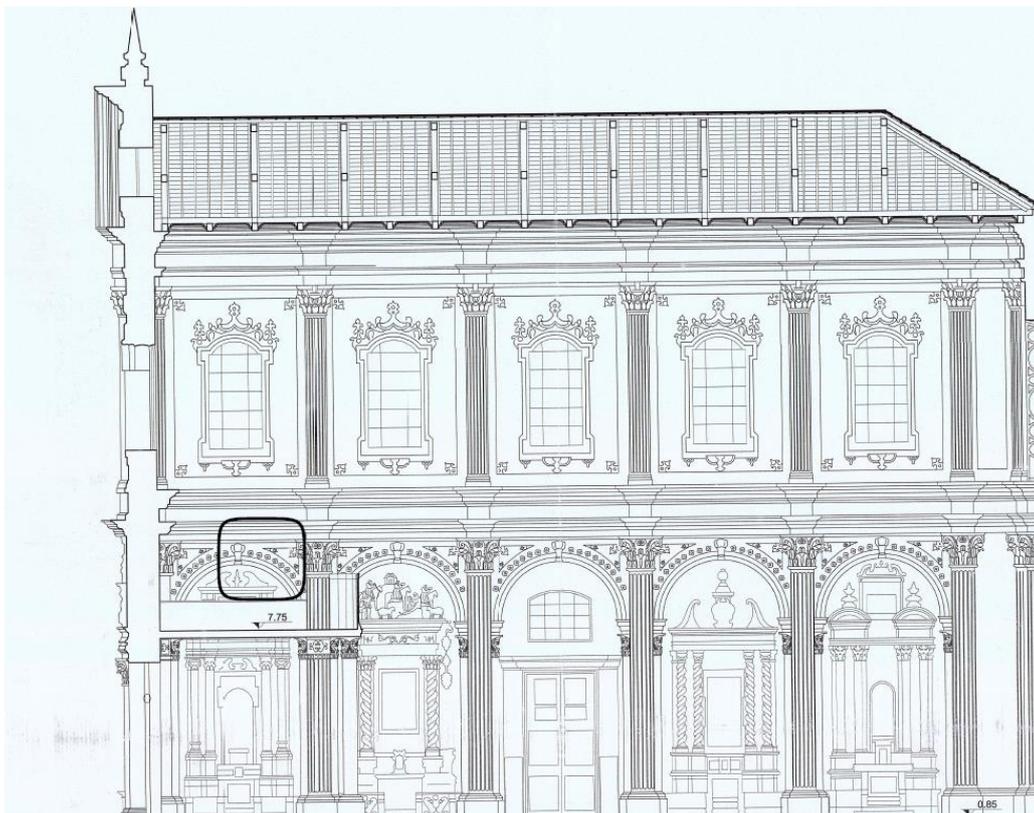


Figura 3.2 – Vista in sezione della zona monitorata

3.1 Rilievo fotografico e modellazione

Per avere un modello grafico della porzione di struttura monitorata si è fatto seguire, alla prima fase di rilievo visivo, un secondo rilievo fotografico e geometrico.

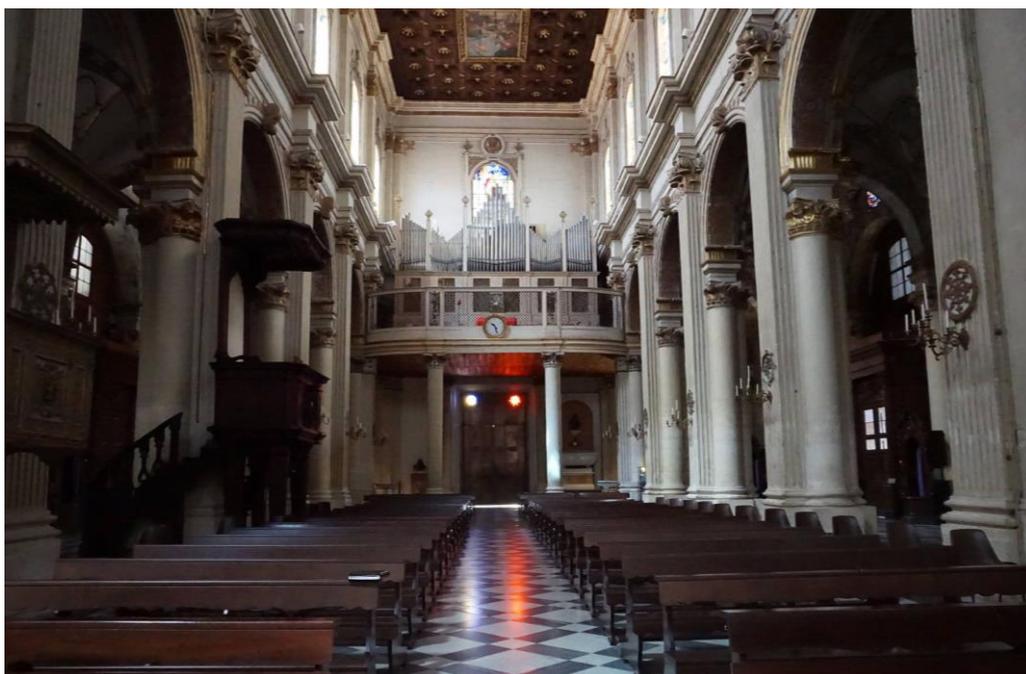


Figura 3.3 – Vista frontale dell'ingresso principale

Il rilievo fotografico e geometrico ha permesso la trasposizione su AutoCAD delle misure e degli elementi decorativi e strutturali caratterizzanti l'ingresso principale del duomo, come mostrato in figura 3.4 e 3.5.

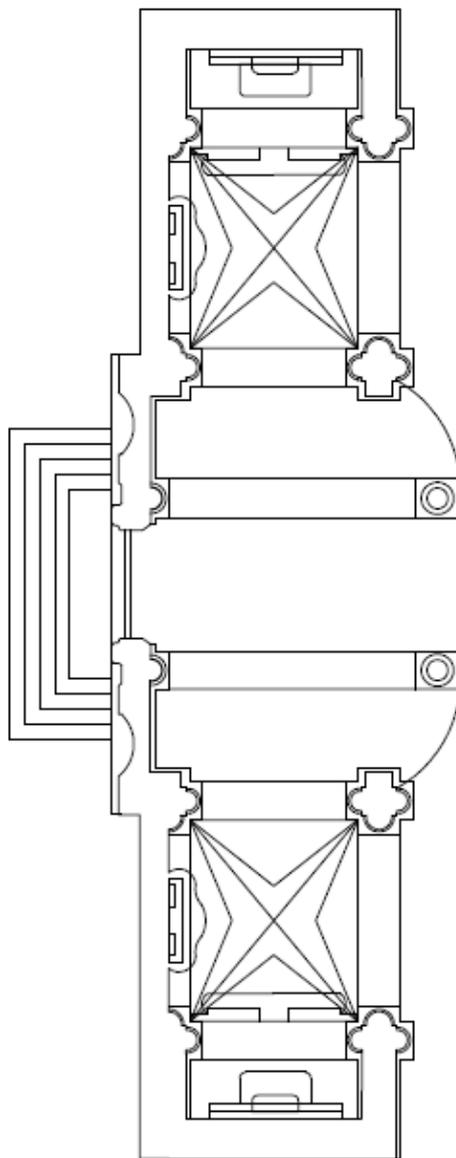


Figura 3.4 – Vista in pianta dell'ingresso principale

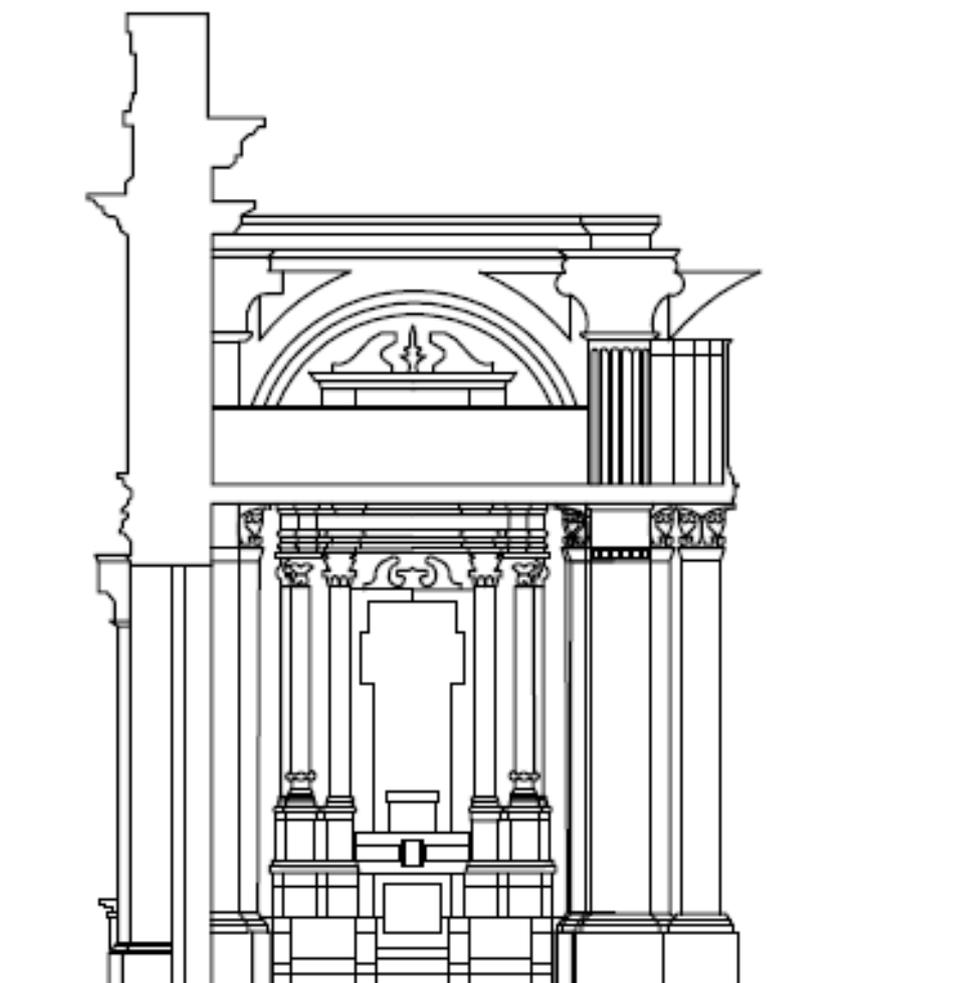


Figura 3.5 – Vista in sezione dell'ingresso principale

Il dwg di pianta e sezione è stato poi esportato su SketchUp in modo tale da ottenere la rappresentazione grafica della zona monitorata (figura 3.6).

Il modello grafico, nello specifico, è realizzato ponendo in primo piano la navata centrale, con il soppalco su cui è localizzato l'organo, e la navata sinistra su cui sono stati disposti i sensori.



Figura 3.6 – Modello grafico della zona di studio

3.2 Modello agli elementi finiti

Il rilievo geometrico ha permesso anche una modellazione agli elementi finiti della volta. La volta nello specifico è una volta a spigolo, altresì nota come volta a stella leccese.

Questa tipologia di volta è tipica dell'architettura salentina e nasce per far fronte agli inconvenienti delle volte a crociera all'incrocio delle unghie, soprattutto nella copertura di spazi rettangolari.

Viene realizzata dall'incrocio di due volte a botte, che formano una volta a crociera, aggiungendo poi su quest'ultima degli elementi della volta a vela.

Per la realizzazione del modello si è prima schematizzata la struttura della volta su AutoCAD e la si è poi esportata su MasterSap 2020. Attorno alla struttura della volta si è poi costruita la struttura muraria, ponendo particolare attenzione nella rappresentazione del muro finestrato su cui scarica la navata centrale.



Figura 3.7 – Particolare del soffitto ligneo della navata centrale

Il programma permette di definire in fase iniziale gli elementi strutturali e il materiale da assegnare ai vari elementi.

Utilizzando la banca dati del software si è modellata la struttura utilizzando elementi gusci, piastre e lastre con spessore di 60 cm e utilizzando la muratura come materiale dei vari elementi.



Figura 3.8 – Proprietà del materiale utilizzato

Per simulare le condizioni di carico standard si è deciso di utilizzare tre condizioni di carico ovvero il sovraccarico permanente, il peso proprio delle volte e, per simulare lo spessore di materiale e la zona calpestabile sovrastante la volta, un sovraccarico tipico degli ambienti affollati. Data la bassa sismicità della zona non si è applicato nessun carico orizzontale al fine di effettuare l'analisi.

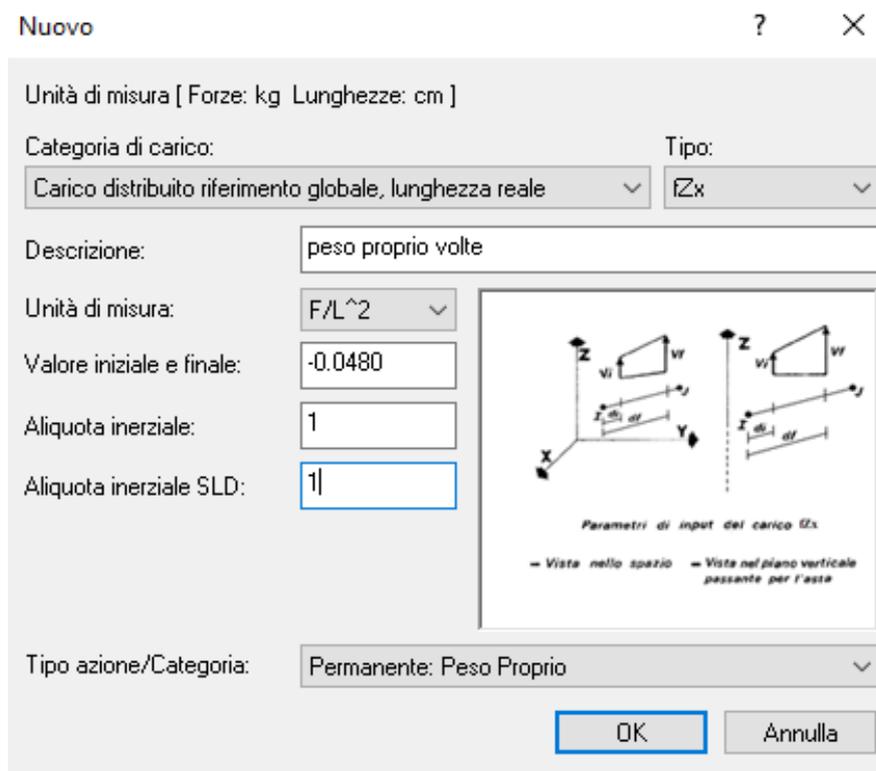


Figura 3.9 – Carico dovuto al peso delle volte

Nuovo ? X

Unità di misura [Forze: kg Lunghezze: cm]

Categoria di carico: Tipo:

Descrizione:

Unità di misura:

Valore iniziale e finale:

Aliquota inerziale:

Aliquota inerziale SLD:

Parametri di input del carico Ez.

- Vista nello spazio - Vista nel piano verticale passante per l'asta

Tipo azione/Categoria:

Figura 3.10 – Sovraccarico permanente

Nuovo ? X

Unità di misura [Forze: kg Lunghezze: cm]

Categoria di carico: Tipo:

Descrizione:

Unità di misura:

Valore iniziale e finale:

Aliquota inerziale:

Aliquota inerziale SLD:

Parametri di input del carico Ez.

- Vista nello spazio - Vista nel piano verticale passante per l'asta

Tipo azione/Categoria:

Figura 3.11 – Carico distribuito relativo al peso della muratura

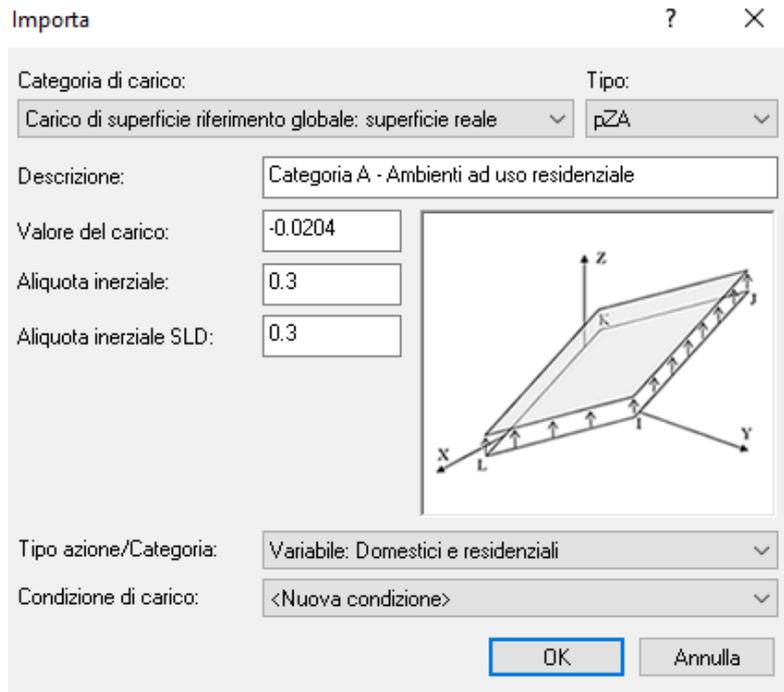


Figura 3.12 – Sovraccarico applicato sulla zona calpestabile

Basandosi sul DWG importato da AutoCAD si è costruito un primo modello utilizzando degli elementi triangolari e quadrangolari semplici e ripetitivi come mostrato in figura 3.13. Si può notare come le pareti, aventi tutte spessore di 60 cm, racchiudano al loro interno la volta. Quest'ultima contribuisce ad assorbire il sovraccarico sulla zona calpestabile esterna e scaricarla sugli archi in muratura.

L'obiettivo del modello è quello di studiare l'andamento delle tensioni nella facciata finestrata, su cui si scarica la navata centrale, avente un'ampiezza totale di 9 m. Dato che la zona di interesse è quella relativa alla posizione dei sensori, il modello non prende in considerazione il colonnato sottostante, andando quindi ad inserire degli incastri alla base degli archi, in corrispondenza degli innesti sulle colonne.

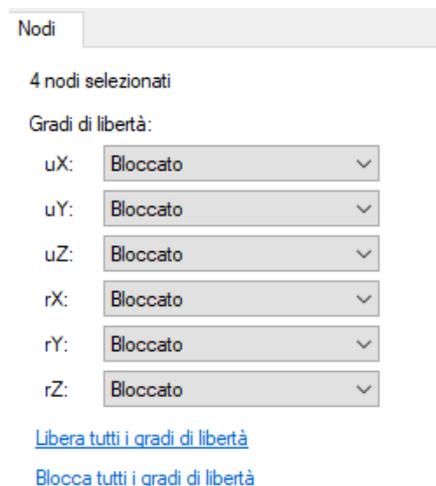


Figura 3.13 – Vincoli sui nodi alla base

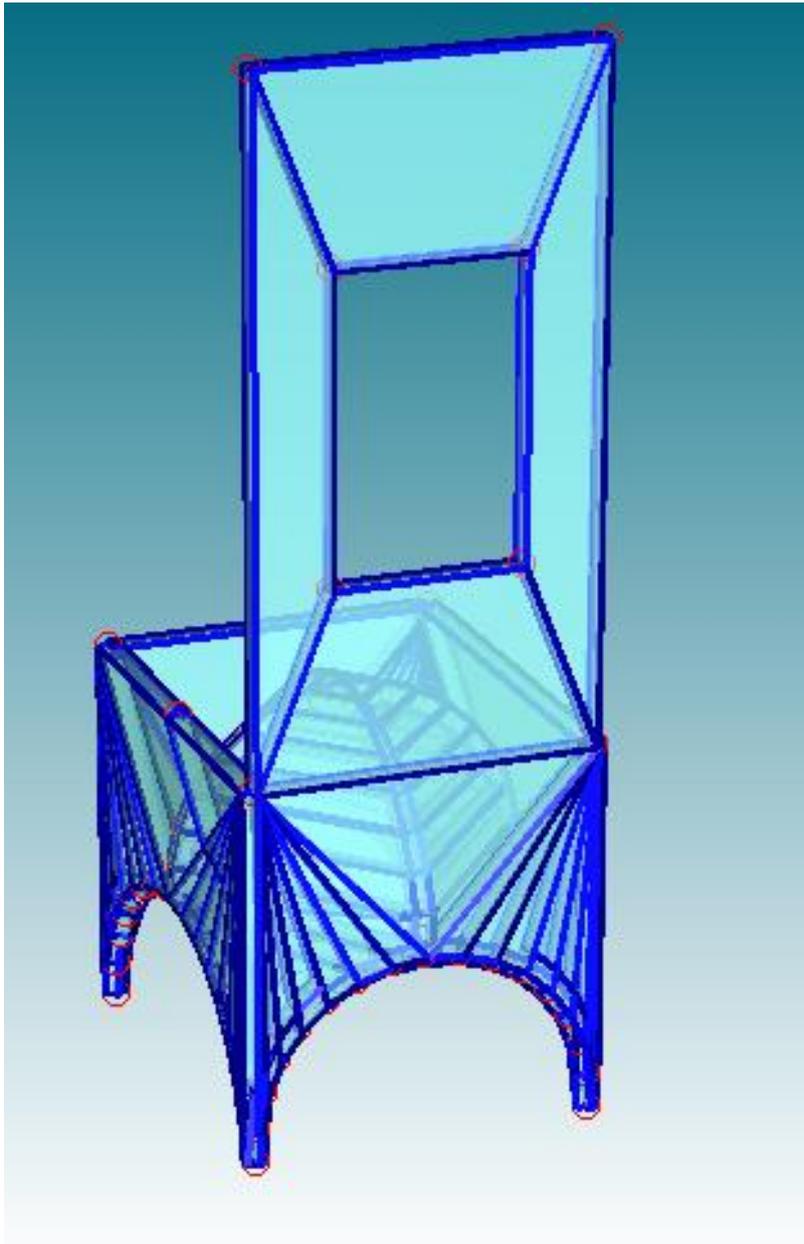


Figura 3.14 – Modello FEM iniziale con elementi semplici

Il passo successivo è stato l'infittimento della mesh, effettuando inizialmente un infittimento congruente, in modo tale da rispettare la complanarità dei nodi e successivamente una suddivisione di ogni elemento in elementi per lo più rettangolari aventi dimensioni minime di 10 cm per lato.

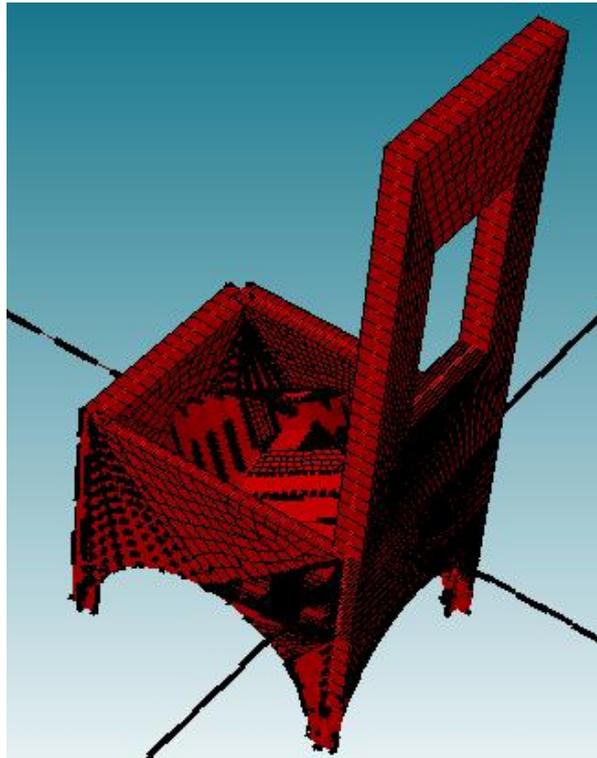


Figura 3.15 – Modello FEM con spessori

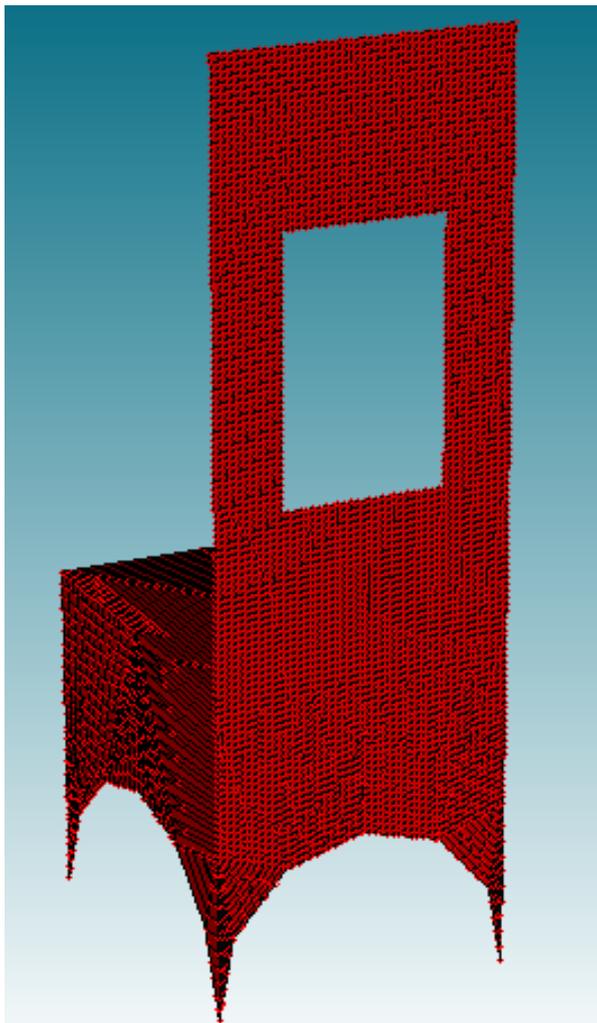


Figura 3.16 – Modello FEM con discretizzazione nodi finale

Alla fase di modellazione è seguita quella di applicazione dei carichi.

Descrizione	Cond...	Multiplica...	Ultima operazione
<input checked="" type="checkbox"/> 1 Categoria A - Ambienti a...	Cond...	1.00	Sostituisci 1
<input checked="" type="checkbox"/> 2 peso proprio volte	Cond...	1.00	Sostituisci 1
<input checked="" type="checkbox"/> 3 sovraccarico permanente	Cond...	1.00	Sostituisci 1
<input type="checkbox"/> 4 muratura	Cond...		

Nessun carico selezionato

Moltiplicatore:

Effetto sui carichi preesistenti:

Figura 3.17 – Applicazione dei moltiplicatori ai carichi

Dato che sui vari elementi vanno a scaricarsi carichi dovuti a navate con ampiezze differenti si è fatto fronte al problema andando ad applicare dei moltiplicatori ai carichi. Ad esempio sulla facciata vetrata di nostro interesse sono stati applicati i soli carichi dovuti al peso proprio e al sovraccarico della navata centrale mentre il carico dovuto alla muratura, seppur quasi trascurabile, è stato applicato con un fattore moltiplicativo progressivo in funzione della sua altezza.

Sulla copertura calpestabile invece si è applicato anche il sovraccarico previsto dalla normativa per gli edifici di Categoria A, essendo questo l'ideale per una zona soggetta a pochissimi affollamenti come quella considerata.

Il modello è realizzato utilizzando come grandezza di riferimento Kg e centimetri, pertanto i risultati sono espressi in kg/cm^2 .

Il calcolo della struttura ci ha permesso di valutare graficamente l'andamento delle tensioni.

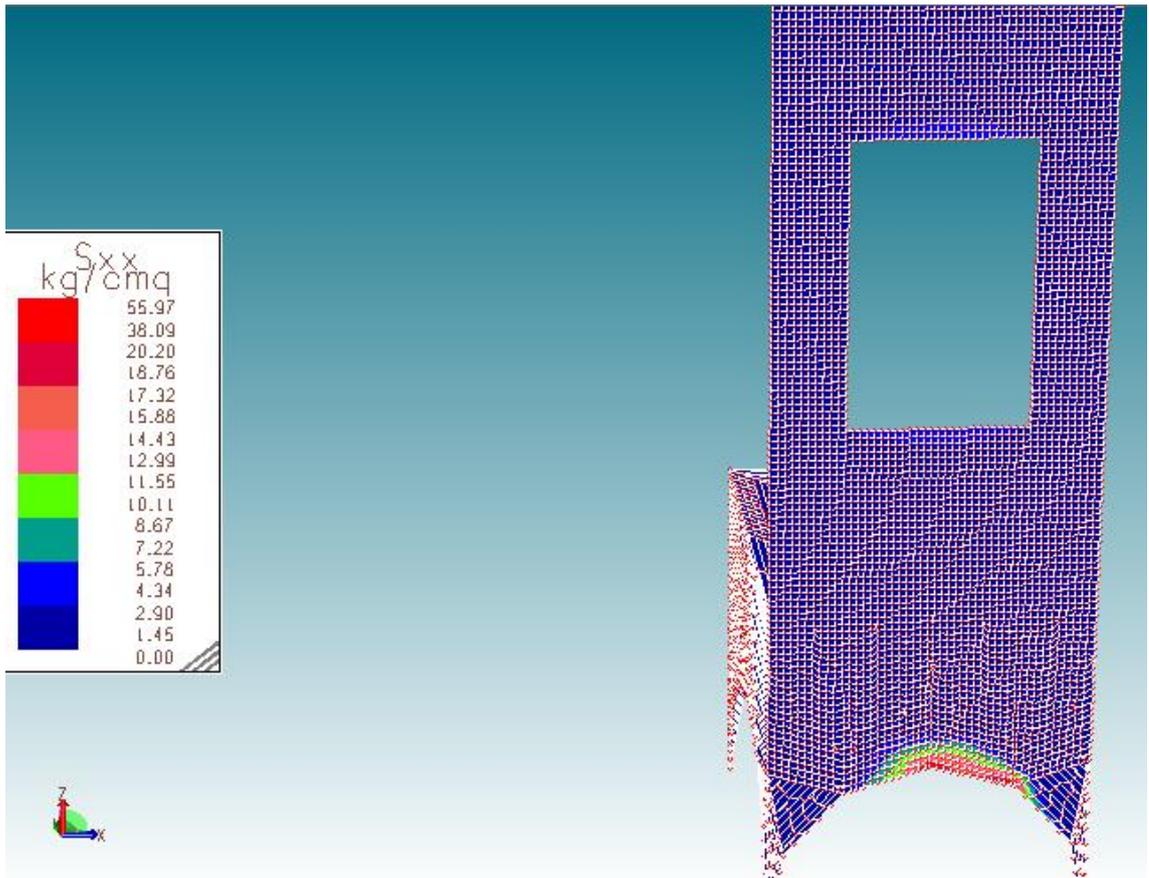


Figura 3.18 – Andamento delle tensioni S_{xx}

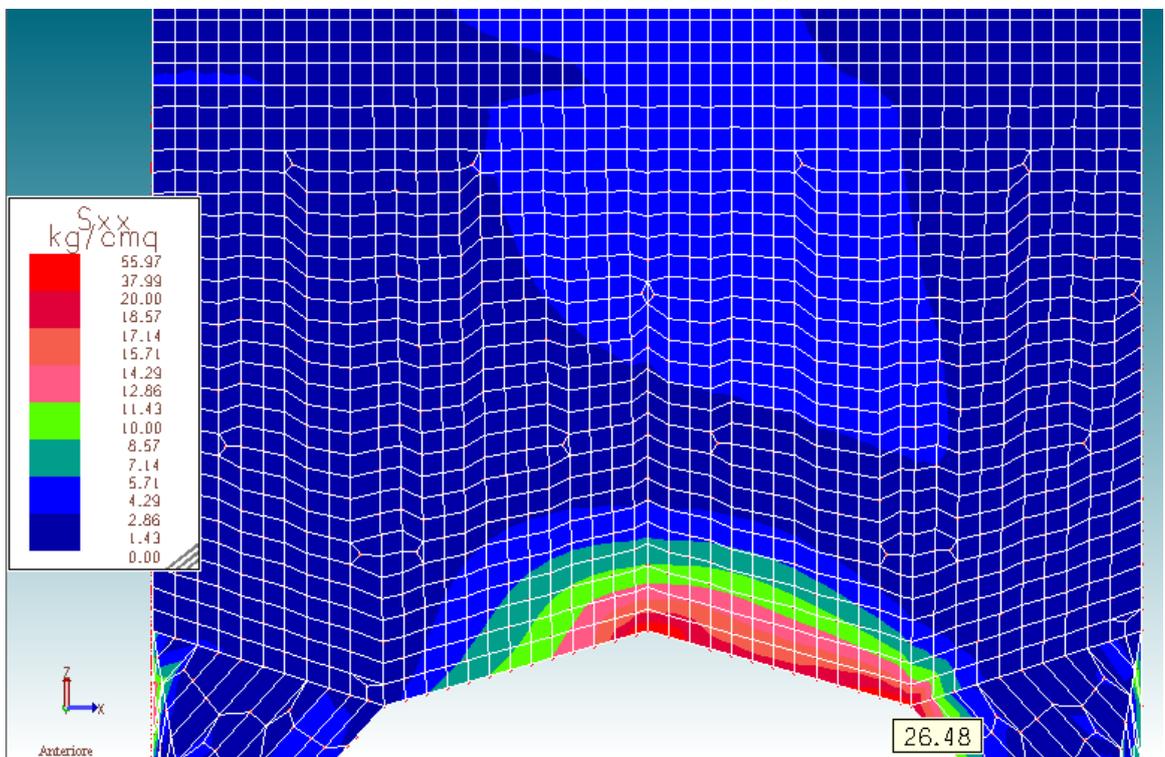


Figura 3.19 – Particolare delle tensioni S_{xx} nella zona di applicazione dei sensori

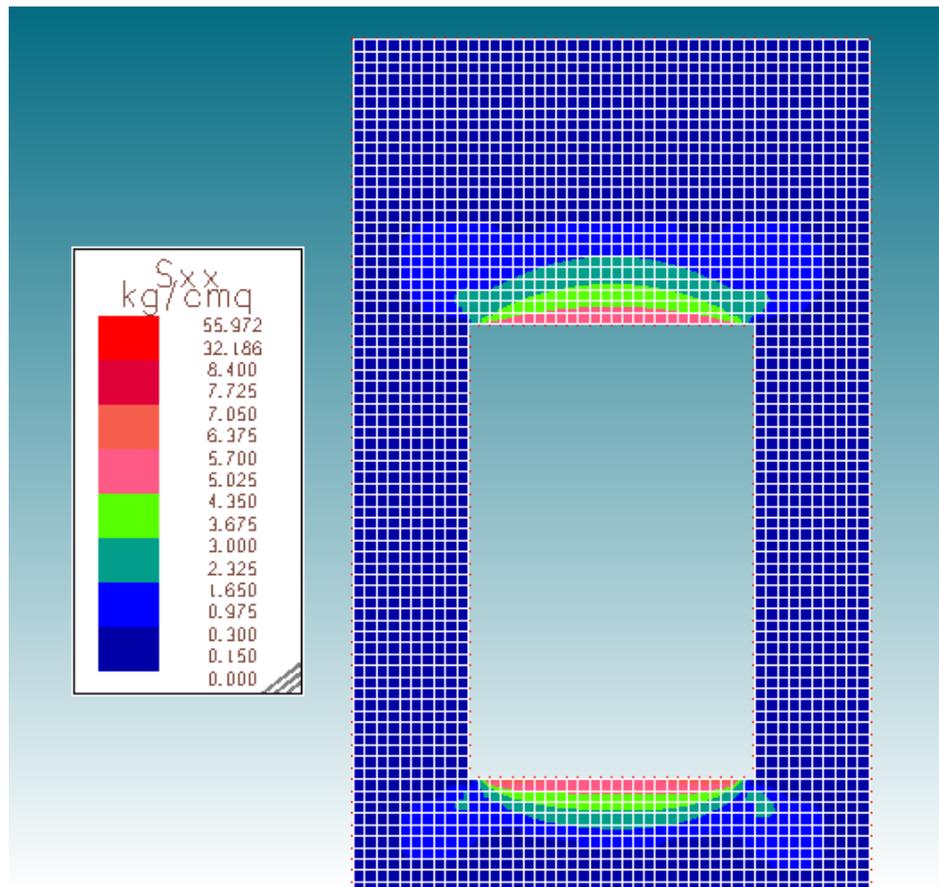


Figura 3.20 – Particolare delle tensioni S_{xx} nell'intorno della finestra

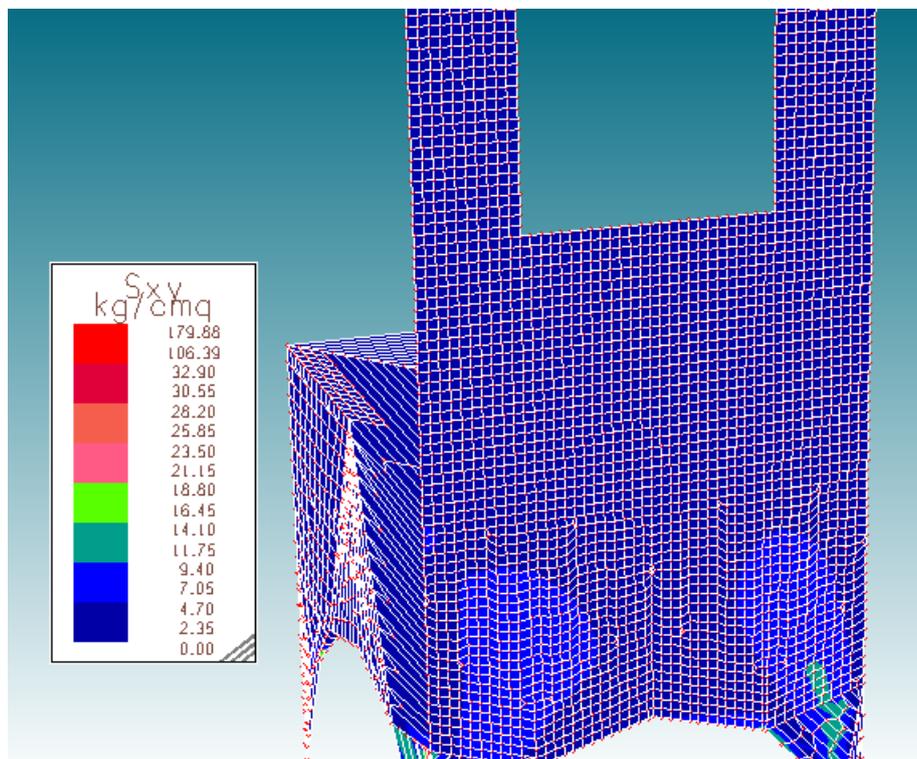


Figura 3.21 – Particolare delle tensioni S_{xy} nella zona di applicazione dei sensori

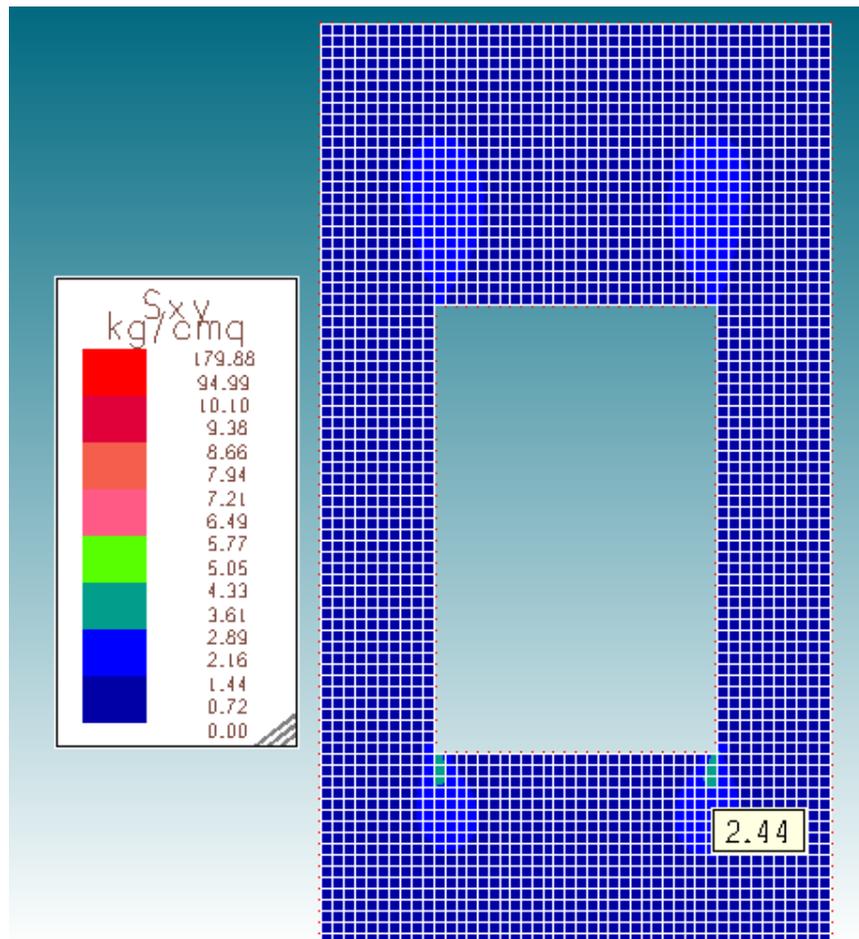


Figura 3.22 – Particolare delle tensioni S_{xy} nell'intorno della finestra

I risultati ottenuti sono in linea con le aspettative. È evidente una concentrazione delle tensioni nell'intorno della finestra con valori comunque accettabili nell'intorno dei 3 kg/cm^2 per S_{xx} e con un picco di 2.44 per S_{xy} .

Per quanto riguarda però la zona di studio in prossimità dell'arcata si nota come i carichi dovuti alla navata centrale e quelli scaricati dalla volta provocano un incremento notevole delle tensioni con valori di picco vicini ai 27 kg/cm^2 .

Questa concentrazione degli sforzi in corrispondenza di queste due zone permette di giustificare la fessurazione diffusa riscontrata in seguito al primo sopralluogo e in particolare l'andamento perpendicolare al suolo con cui si sviluppano.

La scelta di posizionare i sensori in questa zona si rivela quindi ottima per poter indagare gli effetti che queste tensioni possono produrre nel tempo.

3.3 Analisi dei dati

Il monitoraggio è stato effettuato in continuo per una durata di 4 mesi a partire dal 20 febbraio 2021 alle 11.22. L'ultimo scaricamento dei dati è stato effettuato il 29 giugno, per un totale di 129 giorni di monitoraggio.



Figura 3.23 – Centralina Aemission

La centralina utilizzata è dotata di otto canali di acquisizione ma nello studio sono stati utilizzati 6 sensori, ritenuti sufficienti a coprire il quadro fessurativo presente sulla volta.

Una prima analisi dei file evento scaricato ha messo in evidenza la presenza di un gran numero di dati, superiore ai 35000, da sottoporre però a una successiva analisi più accurata e ad una depurazione.

Questa prima analisi ha però permesso di individuare i blocchi fessurativi indicati in rosso in figura 3.23 come poco reattivi se non nell'ultimo periodo di monitoraggio.

La maggior parte dei dati a nostra disposizione provengono invece dai sensori posti sulla fessura indicata in verde in particolare dal sensore 4, il secondo a partire dal basso, che nei nostri dati sarà rappresentato dal CH5 essendo la numerazione della centralina sfasata di un'unità.

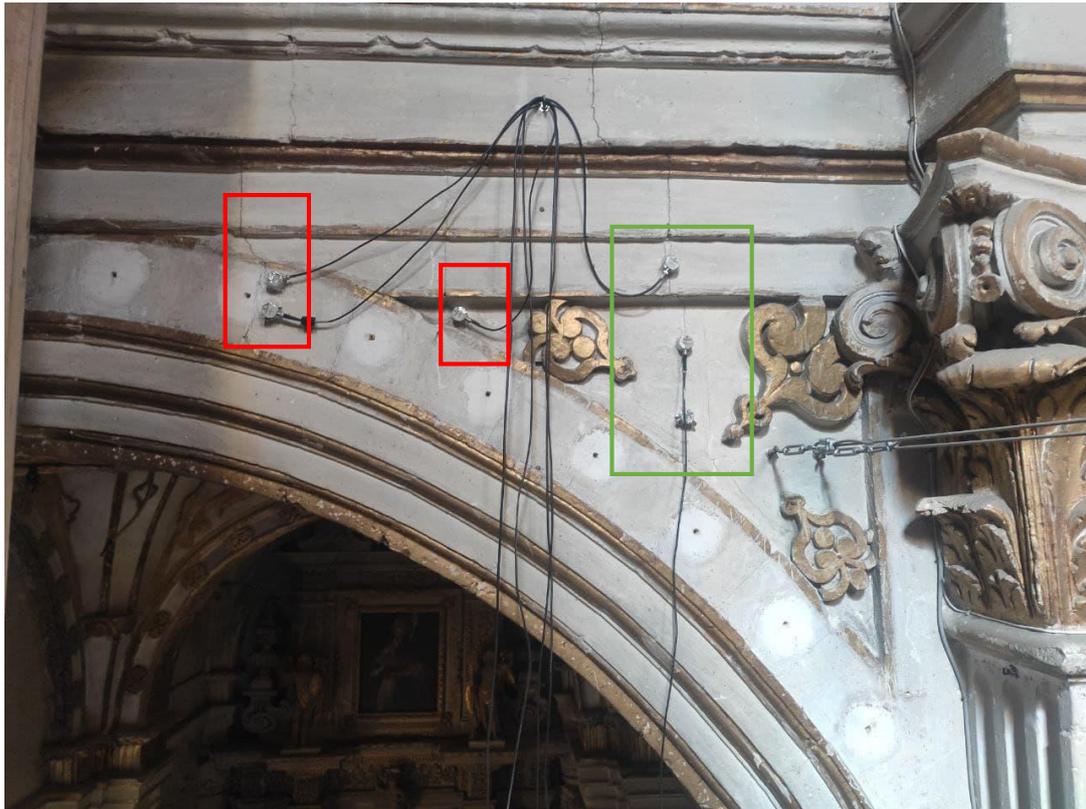


Figura 3.24 – Posizione dei tre blocchi fessurativi

Analizzando i dati iniziali, senza effettuare nessuna depurazione basata su durata e frequenza degli eventi, e diagrammandoli in funzione del tempo si è ottenuto il Grafico 1. Tale grafico mostra una cumulata degli eventi nel tempo con andamento crescente, sinonimo di un processo fessurativo in continua evoluzione.

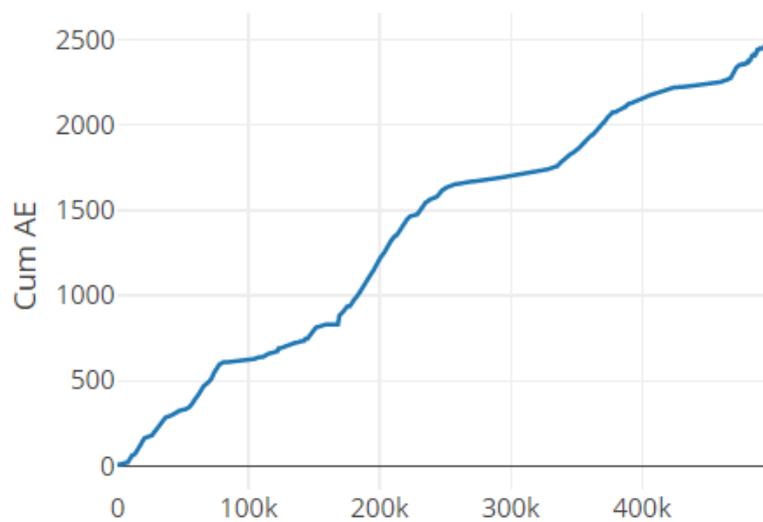


Grafico 1 – N° Eventi cumulati

Per ottenere dei valori che permettano di validare l'andamento mostrato sino ad ora, i dati sono stati elaborati mediante uno script Python. Tale script, tramite server locale, ci permette di visualizzare graficamente l'elaborazione numerica dei dati.

Innanzitutto è necessario inserire le coordinate del luogo oggetto di studio come mostrato in figura 3.24.

Add a New Site

Column	Type	Value
sitecode	varchar(45)	<input type="text"/>
sitedesc	varchar(128)	<input type="text"/>
lat	decimal(11,8)	<input type="text"/>
lon	decimal(11,8)	<input type="text"/>
address	varchar(45)	<input type="text"/>
city	varchar(45)	<input type="text"/>
zipcode	varchar(45)	<input type="text"/>
country	varchar(45)	<input type="text"/>

Add New Site

Figura 3.25 – Finestra inserimento coordinate zona di studio

Nella fase successiva si impostano le coordinate spaziali dei sensori, a partire da un sistema di riferimento relativo da noi fissato nello spigolo in alto a destra di figura 3.25, in corrispondenza del fregio decorativo.

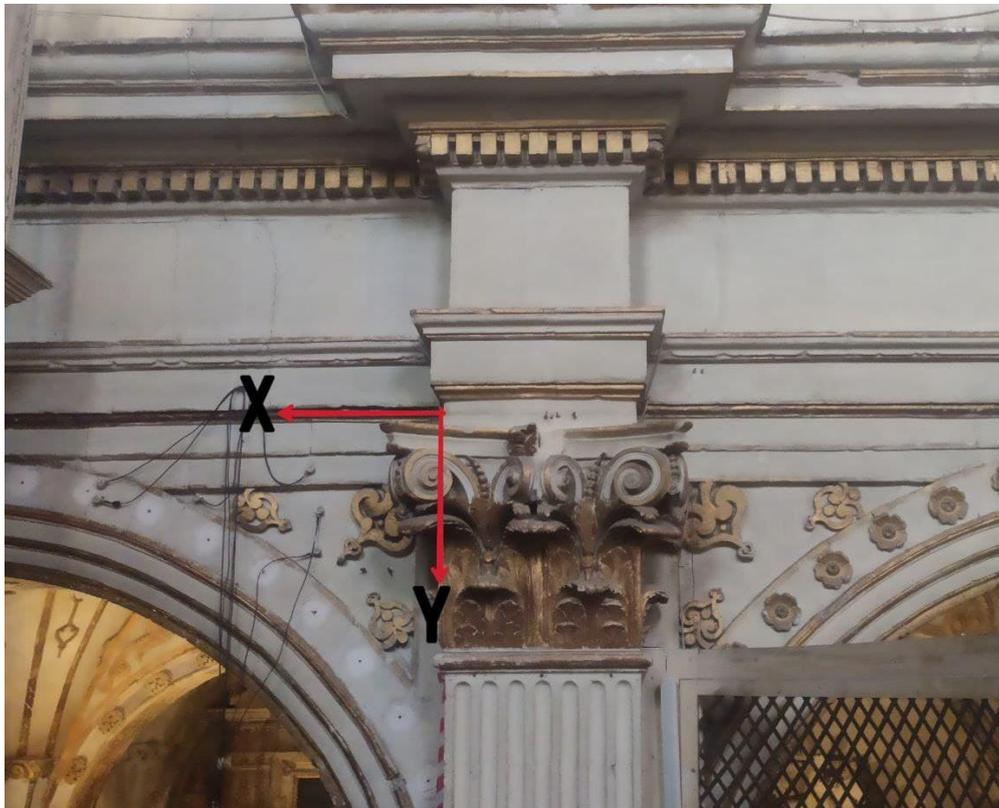


Figura 3.26 – Sistema di riferimento sensori

Sensor Configuration Panel			
Sensor #	X Coord	Y Coord	Z Coord
1	162.0	23.0	0.0
2	161.0	14.0	0.0
3	113.0	21.0	0.0
4	53.0	8.0	0.0
5	49.0	29.0	0.0
6	50.0	50.0	0.0

Figura 3.27 – Coordinate relative sensori

Come è possibile notare in figura 3.26 tutti i sei sensori hanno coordinata z pari a zero. Il posizionamento dei sensori infatti è avvenuto in maniera tale che le posizioni scelte fossero complanari o comunque tali che la differenza lungo l'asse z fosse trascurabile. In tal modo infatti il processo di calcolo si snellisce notevolmente.

L'inserimento delle coordinate permette anche una visualizzazione 3d dei sensori nello spazio (figura 3.27).

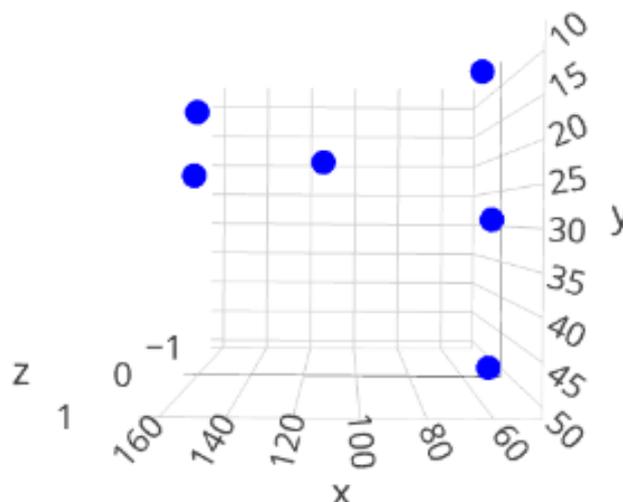


Figura 3.28 – Visualizzazione 3D dei sensori

La fase successiva prevede la definizione dei parametri atti ad effettuare una scrematura dei dati, ovvero la definizione della soglia minima, espressa in mV, della frequenza minima di soglia, espressa in KHz, e del numero di eventi per il calcolo del b-value e del BetaT.

In questo caso si è impostata una soglia minima di 0.5 mV e frequenza minima di soglia di 10 KHz.

Prefisso File Setup:	20210628185958_	Set Opti
Rateo di Conteggio:	sec	Seco
Soglia Minima:	0.1 mV	- 0.1 <input type="range"/> 10.00 +
Frequenza Minima di Soglia:	1 KHz	- 1 <input type="range"/> 100 +
Num. Eventi per calcolo B-value e BetaT:	3 eventi	- 3 <input type="range"/> 500 +
Velocità Onde Elastiche:	50 m/s	- 50 <input type="range"/> 4000 +
Scala Temporale Grafici:	sec	Seco

Figura 3.29 – Definizione dei parametri di soglia

Essendo i dati relativi all'ultima fase del monitoraggio i più significativi al fine di studiare l'andamento fessurativo, si riportano di seguito i grafici ottenuti dall'analisi ristretta a tali valori.

Data la grande quantità di dati si è dovuta suddividere la prima analisi in tre blocchi relativi all'intervallo di tempo che va da inizio monitoraggio al 29 giugno, dal 30 giugno al 6 luglio e dal 7 al 12 luglio.

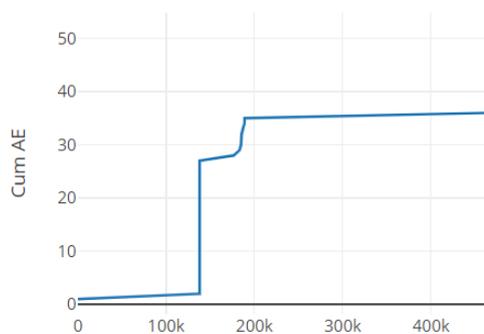


Grafico 2 - Cumulata degli eventi fino al 29 giugno

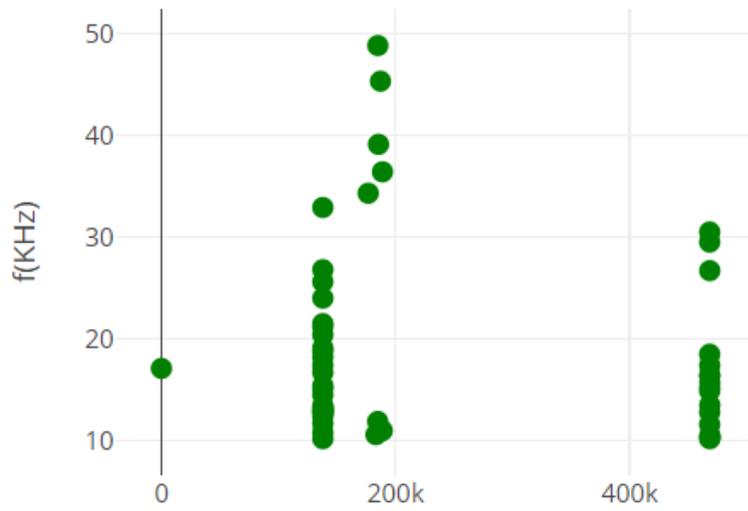


Grafico 3 - Andamento della frequenza degli eventi fino al 29 giugno

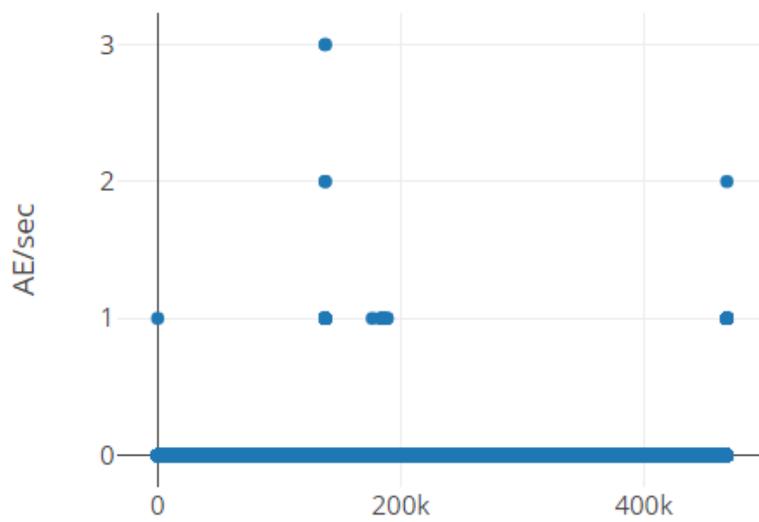


Grafico 4 - Eventi AE per secondo fino al 29 giugno

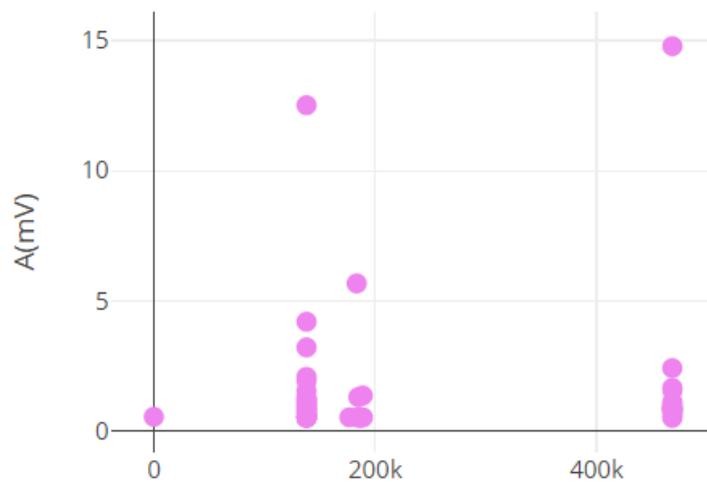


Grafico 5 - Andamento delle ampiezze degli eventi fino al 29 giugno

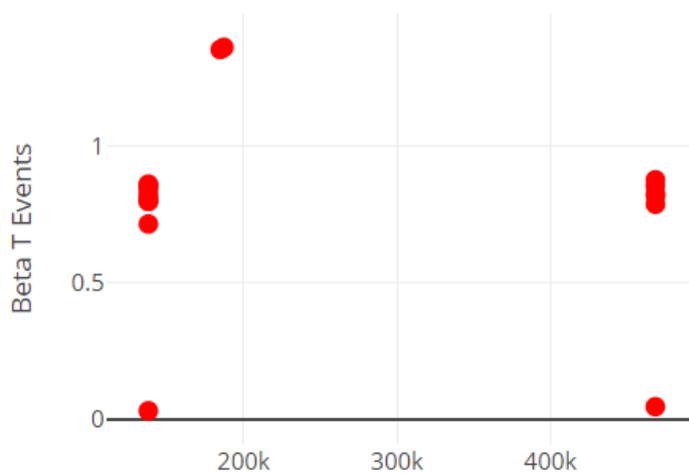


Grafico 6 - BetaT events degli eventi fino al 29 giugno

Come è possibile notare nel grafico 3 l'andamento delle frequenze è molto variabile ma la maggior parte dei dati si attestano in un range che va dai 10 ai 30 KHz.

Al contrario le emissioni acustiche per secondo e le ampiezze presentano un andamento di più semplice lettura, attestandosi nel primo caso principalmente in una emissione per secondo e nel secondo caso in una ampiezza media compresa tra i 0 e i 5 mV.

Nel grafico 6 è possibile invece valutare l'andamento del BetaT che presenta, nella fase iniziale, un rapido incremento in corrispondenza dell'incremento di eventi evidenziato nel grafico 2. Ciò implica che lo stato fessurativo sta avanzando.

Questo incremento è seguito da un assestamento intorno ad un valore unitario nella seconda parte, sinonimo di un processo di crescita delle fessure di tipo metastabile, in cui il danno evolve linearmente nel tempo.

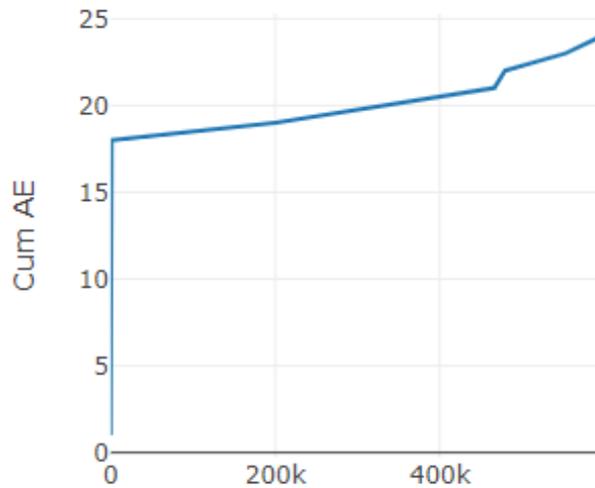


Grafico 7 - Cumulata degli eventi tra il 29 giugno e il 6 luglio

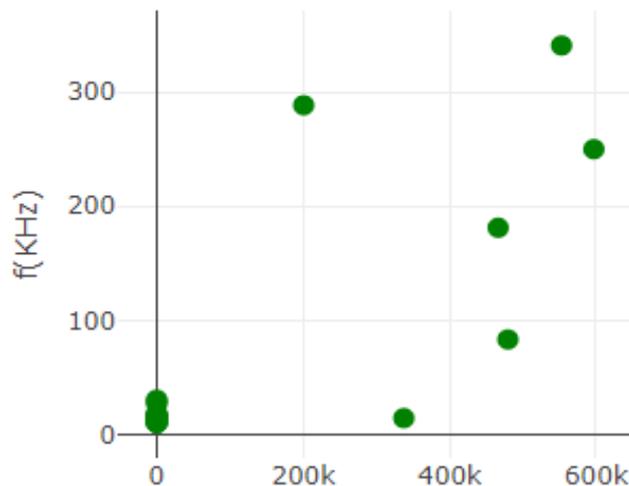


Grafico 8 - Andamento della frequenza degli eventi tra il 29 giugno e il 6 luglio

Nel secondo blocco di eventi è possibile notare una maggiore variabilità delle frequenze raggiunte ma ampiezze per lo più comprese nel range 0-3 mV. L'incremento del BetaT mostrato in figura 11 coincide con il maggior numero di eventi registrati tra il 29 e il 30 giugno, indice quindi di una evoluzione della frattura.

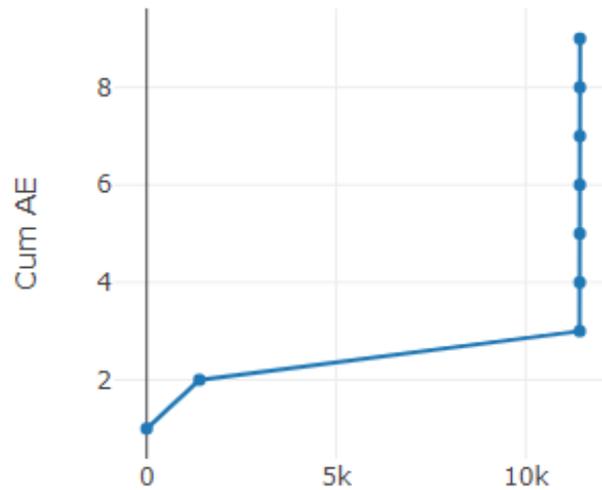


Grafico 12 - Cumulata degli eventi tra il 6 luglio e il 12 luglio

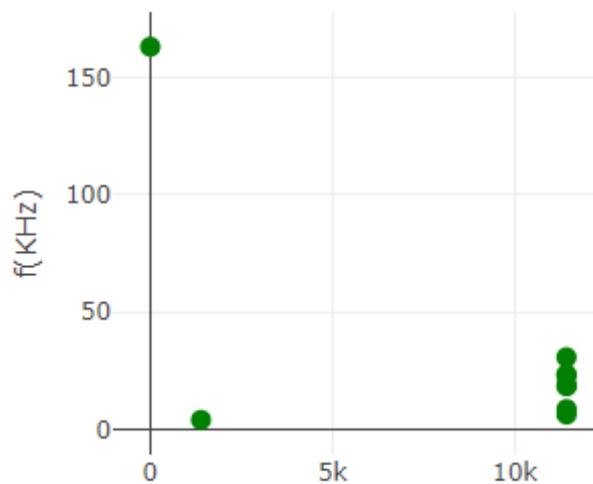


Grafico 13 - Andamento delle frequenze degli eventi tra il 6 luglio e il 12 luglio

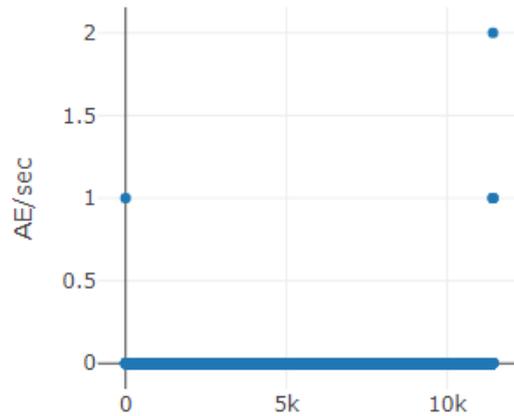


Grafico 14 - Eventi AE per secondo degli eventi tra il 6 luglio e il 12 luglio

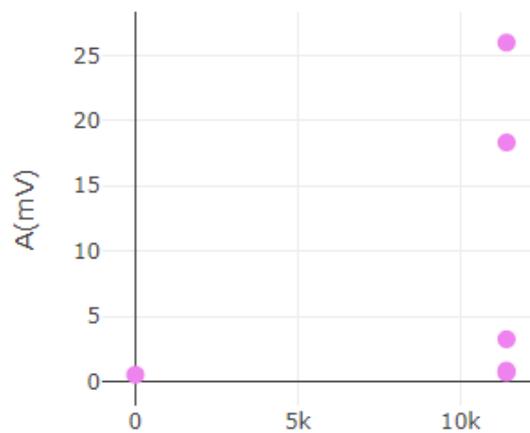


Grafico 15 - Andamento delle ampiezze degli eventi tra il 6 luglio e il 12 luglio

Nell'ultimo blocco di eventi è possibile notare come l'andamento delle emissioni sia sempre crescente ma in questo caso vi è una rapida impennata nelle emissioni tra l'11 e il 12 luglio. Tale impennata di eventi è accompagnata da una grande variazione nelle ampiezze raggiunte così come nelle frequenze.

Tale concentrazione di eventi AE però potrebbe essere dovuta ad azioni umane. L'Istituto nazionale di geofisica e vulcanologia (INGV) ha recentemente pubblicato la registrazione di un sismografo che mostra le vibrazioni prodotte dai tifosi italiani nel corso della finale degli Europei, nella serata di domenica 11 luglio. Tali eventi, rinominati dal sismologo Marco Mucciarelli come 'Football Quake', possono essere facilmente distinti dai rumori di fondo.

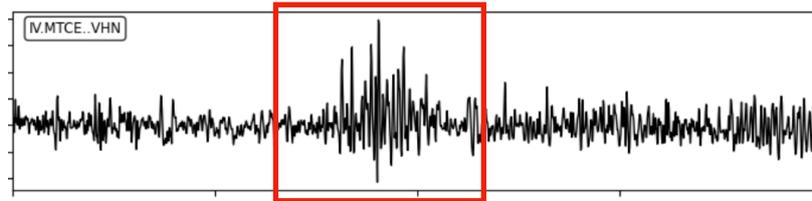


Figura 3.30 – Picco delle vibrazioni registrati dall'INGV

Essendo la strumentazione posizionata nel cuore di Lecce è facile supporre che questo incremento delle emissioni sia dovuto principalmente alla presenza di folla nella zona antistante il Duomo che ad una propagazione della fessura.

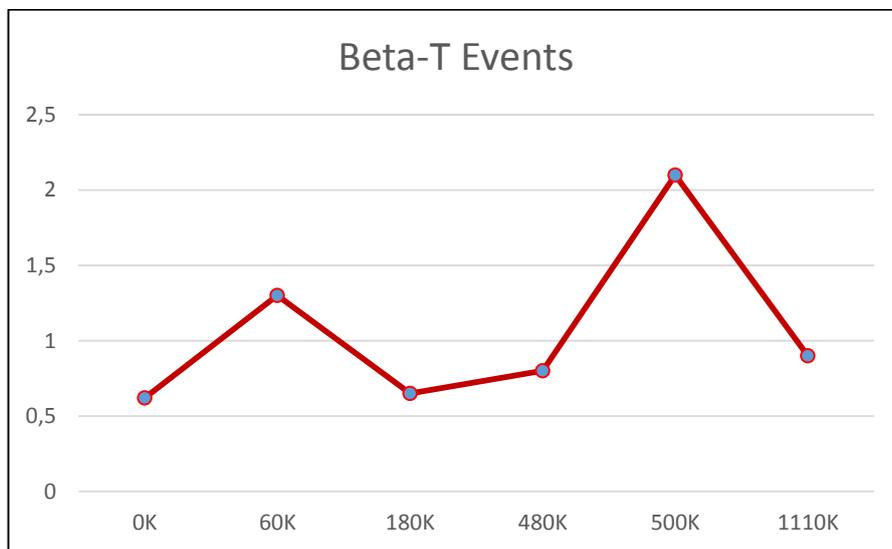


Grafico 16 – Andamento complessivo Beta-T

Combinando i dati tra loro si nota come il Beta-T, eccezion fatta per un evento, si attesta nell'intorno del valore unitario, sinonimo di un processo fessurativo stabile, che evolve linearmente nel tempo.

Per valutare il b-value invece è necessario continuare il lavoro di monitoraggio in modo tale da avere un campione di dati più robusto che permetta una valutazione accurata del suo andamento.

4 – Conclusioni

In questa tesi si è monitorato il Duomo di Lecce con la tecnica delle emissioni acustiche, andando ad applicare i sensori piezoelettrici sulla volta della navata laterale adiacente all'ingresso principale.

I dati raccolti hanno permesso la valutazione del βt , indicatore dello stato di danneggiamento raggiunto nella struttura.

La modellazione della volta e della muratura sovrastante mediante il software MasterSap 2000 ha consentito la realizzazione di una analisi agli elementi finiti i cui risultati concordano con quelli ottenuti dai sensori. L'analisi statica mostra infatti un incremento delle tensioni verticali nell'intorno della finestra e nella parte centrale dell'arco, ovvero le zone in cui sono stati riscontrati la maggior parte degli eventi fessurativi.

Il numero di dati ottenuti in seguito alla fase di filtraggio non sono in numero tale da permettere di validare i risultati con assoluta certezza ma si reputa necessario continuare il lavoro di monitoraggio nei prossimi mesi in modo tale da ottenere un campione abbastanza significativo. In tal modo sarà possibile anche valutare l'andamento del b-value.

Ciò nonostante i dati ottenuti ci permettono una valutazione del quadro fessurativo in atto e di dimostrare come all'interno delle strutture monitorate siano presenti fessure attive.

Capitolo 5 - Bibliografia

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

Campioni d'Europa!,
<https://ingvterremoti.com/2021/07/12/campioni-deuropa/>,
12/07/21

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

Carpinteri, Alberto. 1992. "Scienza Delle Costruzioni", Vol.1. Bologna: Pitagora Editrice.

Carpinteri, Alberto. 1992. "Scienza Delle Costruzioni", Vol.2. Bologna: Pitagora Editrice.

Carpinteri, Alberto and Giuseppe Lacidogna. 2008. *Acoustic Emission and Critical Phenomena : From Structural Mechanics to Geophysics*.

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., 'Softening and snap-back instability in cohesive solids', *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, vol. 28

Carpinteri, A., Lacidogna, G. e Pugno, N., 'Richter's laws at the laboratory scale interpreted by acoustic emission', *Magazine of Concrete Research*

Lunitek, 'Modello AEmission', <https://www.lunitek.it/listing/micro-siesmic-and-structural-monitoring/>, 29/06/21

Michele Giannone, 2013, *La Cattedrale di Lecce*, Lecce, Edizioni Grifo.

Ohtsu, M., 'The history and development of acoustic emission in concrete engineering', *Magazine of Concrete Research*

Richter, C. F. 1958. "Elementary Seismology."

RILEM Technical Committee TC212-ACD. 2010. "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."

Swindlehurst, W., 'Acoustic Emission-1: Introduction', *Non-Destructive Testing*

Sumire Kawamoto, R. Sam Williams. 2002, 'Acoustic Emission and Acousto-Ultrasonic Techniques for Wood and Wood-Based Composites', United States Department of Agriculture

Palcom Social Media Marketing, *'Le volte a stella nel Salento, tra arte e antropologia'*, <http://www.voltestella.it/le-volte-a-stella-nel-salento/>, 14/06/2021.

Wikipedia, 'Volta a stella', https://it.wikipedia.org/wiki/Volta_a_stella, 29/06/2021