



Politecnico di Torino

DISEG – Dipartimento di Ingegneria Strutturale, Edile e
Geotecnica

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Civile

Monitoraggio con la Tecnica delle Emissioni
Acustiche della Torre Campanaria del Duomo di
Torino

Relatori:

Prof. Alberto Carpinteri

Prof. Amedeo Manuello Bertetto

Ing. Davide Masera

Candidato:

Antonio Perrone

Anno Accademico 2018/19

Abstract

During the last years several methods, direct and indirect, have been used for the monitoring of historical and civil structures and infrastructures. Among these: ultrasonic devices, georadar, and procedures based on thermic acquisition were employed in laboratory and in situ experiments.

Historical buildings, in fact, frequently show diffused cracks due to different phenomena (construction techniques, loading history). Non-destructive methods allow to evaluate the state of the damage of these structures and its time evolution. Recently, at the Politecnico di Torino have been conducted many studies through the application of a control method based on the spontaneous emission of elastic waves – the Acoustic Emission (AE) technique. By the AE monitoring, the signals, emitted by defects, are acquired by piezoelectric (PZT) sensors. The AE technique is ideally suited for use in the assessment of historic and monumental structures that are subjected to high, long-term loads, cyclic loads, or, more generally, are exposed to the seismic risk.

In the present thesis, the monitoring procedure based on AE technique has been studied and employed for the monitoring of the bearing masonry structures of one the most important building in the city of Turin - The Bell Tower of the city. In addition, the monitoring of the wood bearing frame of the bells was performed. The statistical analysis of β_t and b -value were computed during the monitoring time, giving evident information about the damage condition, the evolution of the monuments and the bell wood bearing structures inside the bell cell finished in 1723 by Filippo Juvarra. In the present study, an 8-channels AE data acquisition system was used to evaluate the time evolution of the crack network in the masonry ancient bell tower. The investigation has been carried out using several statistical analyses and parameters for the assessment of damage level reached in the monitored structure. The AE sensors have been positioned at the base of the tower between the first and the third level of the scaffolds.

In Chapter 1 the information about the use of the AE Technique in the scientific literature and employment as a monitoring method has been described. Moreover,

the theory of this technique has been introduced and correlated to basic Linear Elastic Fracture Mechanic concepts.

In Chapter 2 the history of the Bell Tower construction has been reported. It is also showed the numerical analysis of the Bell Tower; in fact, a FEM model has been developed starting from a geometric reconstruction by Midas (FEM). Both the static and dynamic analysis were confirmed by the results obtained with Acoustic Emission Technique.

Moreover, in Chapter 3 the wood bearing frame of the bells is studied; in fact, the wood structure has been analyzed by a geometric survey and by the interpretation of the damage evolution by AE. The structure has been monitored by AE for a period equal to a month. The evaluation of both β_t and b -value has provided several information about the damage level reached in the structure.

In Chapter 4 a correlation between the b -value analysis of the data acquired by AE and that one of the seismic events that has been recorded near the monitoring site (radius equal to 100 km) has been studied. This analysis follows the approach recently presented in an article published in “Nature”; the results show a correlation between the b -values monitored in tower and the forecasting of the seismic time series.

Sommario

Negli ultimi anni diversi metodi, diretti e indiretti, sono stati utilizzati per il monitoraggio di strutture storiche, civili e di infrastrutture. Tra questi: dispositivi ultrasonici, georadar, e procedure basate sull'acquisizione termica sono state utilizzate per esperimenti in laboratorio e in situ.

Gli edifici storici, infatti, presentano solitamente fessure diffuse a causa di diversi fenomeni (tecniche costruttive, storia di carico). I metodi non distruttivi consentono di valutare lo stato del danneggiamento di queste strutture e la sua evoluzione nel tempo. Recentemente, al Politecnico di Torino sono stati condotti diversi studi tramite l'applicazione di un metodo di controllo basato sull'emissione spontanea di onde elastiche – la tecnica di Emissione Acustica (EA). I segnali, emessi dai difetti, sono acquisiti da sensori piezoelettrici (PZT). La tecnica di EA è adatta per lo studio di strutture storiche e monumentali che sono soggette a carichi elevati, di lungo termine, ciclici, o, più generalmente, a rischio sismico.

Nella presente tesi, è stata studiata la procedura di monitoraggio tramite la tecnica di EA ed è stata applicata per il monitoraggio di una delle più importanti costruzioni in muratura della città di Torino - la Torre Campanaria della città. Inoltre, è stato effettuato il monitoraggio dell'incastellatura in legno delle campane. Le analisi statistiche del β_t e del b -value forniscono evidenti informazioni sul danneggiamento e sulle strutture di sostegno delle campane presenti all'interno della cella campanaria completata da Filippo Juvarra nel 1723. In questo studio, è stato utilizzato un sistema di acquisizione dati di EA a 8 canali per valutare l'evoluzione delle fessure presenti nella torre campanaria in muratura. L'indagine è stata eseguita utilizzando diverse analisi statistiche e parametri per la valutazione del livello di danneggiamento raggiunto nella struttura. I sensori di EA sono stati posizionati alla base della torre tra il primo e il terzo impalcato.

Nel Capitolo 1 viene descritto l'utilizzo della tecnica di EA nella letteratura scientifica e il suo impiego come metodo di monitoraggio. Inoltre, è stata introdotta la teoria di questa tecnica ed è stata correlata ai concetti basilari della Meccanica della Frattura Elastica Lineare.

Nel Capitolo 2 viene riportata la storia della Torre Campanaria. Vengono anche mostrate le analisi numeriche della torre; infatti, è stato sviluppato un modello FEM a partire da una ricostruzione geometrica tramite Midas (FEM). Sia l'analisi statica che quella dinamica confermano i risultati ottenuti con la tecnica di EA.

Inoltre, nel Capitolo 3 è stato studiato il telaio ligneo, sostegno delle campane; infatti, è stata effettuata sia un'indagine geometrica che la valutazione dell'evoluzione del danneggiamento tramite l'EA. Le strutture sono state monitorate per un periodo di un mese. La valutazione sia del β_t che del b -value ha fornito diverse informazioni sul livello di danneggiamento raggiunto nella struttura.

Nel Capitolo 4 è stata studiata una correlazione tra l'analisi del b -value dei dati acquisiti tramite le EA e del b -value relativo agli eventi sismici registrati nei pressi del sito di monitoraggio (in un raggio di 100 km). Questa analisi segue l'approccio recentemente presentato in un articolo pubblicato su "Nature"; i risultati mostrano una correlazione tra i b -value monitorati nella torre e la previsione della serie storica degli eventi sismici.

Indice

1. Introduzione: L'Emissione Acustica	1
1.1. La Meccanica della frattura (Carpinteri 1992)	2
1.2. La Strumentazione	10
1.3. La Tecnica.....	14
1.4. Le Interpretazioni e il Monitoraggio Strutturale.....	15
1.4.1. Classificazione delle fessure attive	15
1.4.2. Localizzazione delle sorgenti.....	17
1.4.3. Un criterio frattale per il monitoraggio strutturale.....	18
1.4.4. La distribuzione statistica degli eventi di emissione acustica: l'analisi del "b-value" (Anzani et al. 2008)	21
2. Il Campanile del Duomo di Torino	25
2.1. La storia della Torre Campanaria	28
2.2. Il monitoraggio del Campanile	33
2.3. La modellazione del Campanile	39
3. L'incastellatura delle campane	51
3.1. Rilievo geometrico e del degrado	54
3.1.1. Struttura a.....	55
3.1.2. Struttura b	68
3.2. Il monitoraggio della struttura lignea.....	86
4. Correlazione tra il monitoraggio strutturale e gli eventi sismici	93
4.1. Monitoraggio della Struttura Lignea.....	97
4.2. Monitoraggio della Torre Campanaria	103
Conclusioni	108
Bibliografia	110
Allegati.....	113

Lista delle figure

Figura 1. Leggi costitutive del modello coesivo (Carpinteri 1992).....	4
Figura 2. Modi di propagazione delle fessure (Carpinteri 1992).....	4
Figura 3. Curve di risposta nel piano $F-\Delta l$ e $\sigma-\varepsilon$ (Carpinteri 1992).....	5
Figura 4. Risposta della lastra in calcestruzzo (Carpinteri 1992).....	6
Figura 5. Risposta della lastra di malta (Carpinteri 1992).....	7
Figura 6. Risposta della lastra al variare della dimensione (Carpinteri 1992).....	7
Figura 7. Transizione duttile-fragile (Carpinteri 1992)	8
Figura 8. Grafico tensione deformazione	9
Figura 9. Schematizzazione di un sensore	10
Figura 10. Schematizzazione del sistema Atel	11
Figura 11. Schematizzazione del sistema USAM.....	12
Figura 12. Principio di funzionamento dell'“AEmission System”	13
Figura 13. Segnale registrato dal trasduttore	14
Figura 14. Schematizzazione del segnale (Carpinteri and Lacidogna 2006).....	14
Figura 15. Confronto tra il Ring-Down Counting e il Counting of Events (Carpinteri and Lacidogna 2006)	15
Figura 16. Rise Angle	16
Figura 17. Rise Angle - Average Frequency	16
Figura 18. Rete di trasduttori	18
Figura 19. Numero di eventi di EA nel tempo.....	20
Figura 20. Rappresentazione dell'equazione (1.17)	22
Figura 21. Crescita del "b-value" con l'ampiezza della dislocazione	23
Figura 22. Duomo di Torino e Torre Campanaria	25
Figura 23. Vista dalla Cella Campanaria	26
Figura 24. Vista dalla Cella Campanaria	26

Figura 25. Le strutture in muratura più alte di Torino (Manuello, Masera, and Carpinteri 2019).....	27
Figura 26. I macro-elementi della torre	27
Figura 27. Schematizzazione di un tipico muro a sacco	29
Figura 28. Sezione e Prospetto della parte Quattrocentesca del Campanile.....	29
Figura 29. Rappresentazione di Torino di Giovanni Tommaso Borgonio 1665-1666	30
Figura 30. Schizzo di Juvarra della sopraelevazione della Torre Campanaria	31
Figura 31. Pianta e prospetto della cella campanaria.....	32
Figura 32. Posizione dei sensori	33
Figura 33. Sistema di acquisizione dati utilizzato per il monitoraggio	34
Figura 34. Numero cumulato e giornaliero di eventi di EA	36
Figura 35. Numero cumulato e gionaliero di eventi di EA in seguito alla fase di filtraggio dei rumori.....	36
Figura 36. Andamento del b-value e del βt , valutati in finestre temporali di 200 eventi.....	37
Figura 37. Andamento del b-value e del βt , valutati in finestre temporali di 100 eventi.....	37
Figura 38. Localizzazione delle sorgenti degli eventi di Emissione Acustica.....	38
Figura 39. Modello geometrico della torre realizzato con il software Midas FX..	39
Figura 40. Differenze nella modellazione delle parti della torre	40
Figura 41. Aspetti di dettaglio della modellazione	41
Figura 42. Aspetti di dettaglio della modellazione	41
Figura 43. Capochiavi esterni e catene inserite nel modello	42
Figura 44. Calcolo del “Fattore di Confidenza”	43
Figura 45. Schematizzazione degli elementi considerati nel calcolo dei carichi verticali	44
Figura 46. Azione del vento.....	46

Figura 47. Tensioni valutate nell'analisi FEM	47
Figura 48. Particolare della zona in cui si ha il massimo valore di tensione	47
Figura 49. Tensione verticale al variare dell'altezza	48
Figura 50. Tensione verticale al variare del rapporto tra l'altezza della torre e lo spessore dei muri esterni.....	48
Figura 51. Primi tre modi di vibrare ottenuti dall'analisi modale	49
Figura 52. Foto della "Struttura a"	51
Figura 53. Foto della "Struttura b".....	52
Figura 54. Montaggio della campana a "Sistema Ambrosiano"	53
Figura 55. Elementi della "Struttura a" non ispezionabili	55
Figura 56. Elementi della "Struttura a" non ispezionabili	56
Figura 57. Quote di riferimento nella "Struttura a"	56
Figura 58. Profili metallici nel Ritto P8.....	57
Figura 59. Degrado e nodo presenti nel Ritto P8.....	58
Figura 60. Degrado e nodo presenti nel Ritto P8.....	59
Figura 61. Collegamento a "tenone e mortasa" tra il Ritto P8 e il Traverso T9	60
Figura 62. Collegamento tra il Ritto P8 e il Traverso T9	61
Figura 63. Nodo marcio nel Ritto P11	62
Figura 64. Degrado Ritto P13	64
Figura 65. Collegamento tra il Ritto P14 e il Traverso T11	65
Figura 66. Ancoraggio alla muratura del Traverso T9	66
Figura 67. Parte terminale del Traverso T10	67
Figura 68. Collegamento alla Torre del Traverso T11	67
Figura 69. Struttura per il suono delle campane	73
Figura 70. Nodo presente nel Ritto P4.....	74
Figura 71. Collegamento a "tenone e mortasa" tra il Ritto P4 e il Traverso T3	75

Figura 72. Collegamento a "tenone e mortasa" tra il Ritto P7 e il Traverso T5	77
Figura 73. Ancoraggio alla muratura del Traverso T1	78
Figura 74. Deterioramento presente nel Traverso T1	79
Figura 75. Collegamento tra il Traverso T2 e il Ritto P2 e la muratura della Cella Campanaria	80
Figura 76. Collegamento tra T3 e T1	81
Figura 77. Piastra metallica per il collegamento del telaio della campana	83
Figura 78. Nodi presenti nel Traverso T4	83
Figura 79. Collegamento tra T5 e T1	84
Figura 80. Collegamento del Traverso T5 con la muratura	85
Figura 81. Posizionamento dei sensori nella struttura lignea	86
Figura 82. Posizionamento dei sensori nella struttura lignea	86
Figura 83. Pianta della Cella Campanaria e posizione dell'elemento monitorato	87
Figura 84. Numero cumulato e per giorno di eventi di EA estratti dalla strumentazione	88
Figura 85. Numero cumulato e per giorno di eventi di EA	89
Figura 86. Andamento del b-value e del β_t , valutati in finestre temporali di 200 eventi	90
Figura 87. Andamento del b-value e del β_t , valutati in finestre temporali di 100 eventi	90
Figura 88. Posizione dei Sensori	91
Figura 89. Sorgenti di eventi di Emissione Acustica localizzate	92
Figura 90. Andamento del b-value della sequenza di eventi sismici di Amatrice-Norcia (Gulia and Wiemer 2019)	94
Figura 91. Magnitudo locali e b-value	95
Figura 92. Area in cui sono stati registrati gli eventi sismici considerati	97
Figura 93. Magnitudo locali originali e ridotte	98

Figura 94. b-value sismico e magnitudo locali	99
Figura 95. b-value sismico e magnitudo locali ridotte.....	100
Figura 96. Numero cumulato e per giorno di eventi di EA	101
Figura 97. Andamento del b-value di EA e delle magnitudo locali nel tempo....	102
Figura 98. Andamento del b-value di EA e delle magnitudo locali ridotte nel tempo	102
Figura 99. Magnitudo locali originali e ridotte.....	104
Figura 100. b-value sismico e magnitudo locali	105
Figura 101. b-value sismico e magnitudo locali	105
Figura 102. Andamento del b-value di EA e delle magnitudo locali nel tempo..	106
Figura 103. Andamento del b-value di EA e delle magnitudo locali ridotte nel tempo	106

Lista delle tabelle

Tabella 1. Diametro e Peso delle Campane	43
Tabella 2. Carichi verticali.....	45
Tabella 3. Calcolo Azione Sismica.....	45
Tabella 4. Analisi degli autovalori.....	49
Tabella 5. Masse modali partecipanti	50

Capitolo 1

1. Introduzione: L'Emissione Acustica

L'Emissione Acustica è una tecnica di controllo non distruttivo utilizzata per identificare i difetti e i danneggiamenti in elementi eterogenei. Le emissioni acustiche sono, infatti, onde ultrasoniche generate da un rapido rilascio di energia a sua volta causato da discontinuità o dalla propagazione di fessure nei materiali soggetti a stati di tensione o di deformazione. Il processo è simile a quello che si verifica nella sismologia, dove le onde elastiche generate dai terremoti raggiungono le stazioni di monitoraggio posizionate sulla superficie terrestre. L'Emissione Acustica consiste nel rilevare le onde emesse dai materiali, caratterizzate da frequenze tipicamente comprese tra 50kHz e 1 MHz, tramite sensori piezoelettrici a larga banda.

Numerosi furono i ricercatori che studiarono e analizzarono le emissioni acustiche; Drouillard descrisse l'evoluzione dello studio delle emissioni acustiche (Drouillard et al. 1996). Nonostante l'essere umano fu consapevole di questo particolare fenomeno fin dall'Età del Bronzo, il primo esperimento scientifico venne effettuato nel 1934 dal Prof. Fuyuhiko Kishinouye per registrare le emissioni acustiche del legno in maniera tale da studiare la frattura della crosta terrestre come causa dei terremoti e per risolvere il problema della distribuzione temporale degli eventi sismici. Solo negli anni '50 si ebbero sostanziali sviluppi nell'utilizzo di questa tecnica grazie al lavoro di Kaiser, studioso tedesco che può essere considerato il "padre" della tecnologia correlata alle emissioni acustiche; effettuò prove di trazione su diversi materiali per determinare:

- i rumori generati all'interno dei provini;
- i processi acustici;
- le frequenze;
- la relazione tra la curva tensione-deformazione e le frequenze registrate per i diversi livelli di carico.

La scoperta più significativa del suo lavoro fu il fenomeno dell'irreversibilità, noto come *Kaiser effect*, che può essere spiegato tramite le parole dello stesso: "As is

known, plastic strain, however slight, is irreversible. This suggests that the acoustic effects obtained in our experiments also involve irreversible processes”.

In seguito lo studio di questa tecnica è stato approfondito e sono state sviluppate diverse apparecchiature per l'acquisizione di dati in maniera tale da poter identificare i difetti e i danni presenti in diversi materiali, come metalli, vetro, legno, compositi, ceramici (Gholizadeh, Leman, and Baharudin 2015).

L'Emissione Acustica è dunque utilizzata nei diversi rami dell'ingegneria che prevedono un controllo qualità e un monitoraggio strutturale; in particolare, nell'ambito dell'ingegneria civile viene utilizzata per monitorare la propagazione delle fessure e per valutare il livello di danneggiamento delle strutture. Inoltre, nel corso degli anni, grazie ai concetti della meccanica della frattura, è stato possibile sviluppare un metodo frattale o multi-scala per prevedere lo sviluppo del danneggiamento e la vita residua di strutture in calcestruzzo armato e in muratura (Carpinteri and Lacidogna 2003, 2007).

1.1. La Meccanica della frattura (Carpinteri 1992)

Secondo la Meccanica della Frattura Elastica Lineare (Linear Elastic Fracture Mechanics, LEFM) la dissipazione di energia dovuta alla propagazione delle fessure si manifesta in una zona infinitesima nell'intorno dell'apice della fessura (*tip*) e in cui i campi tensionali risultano tendere all'infinito. Il campo tensionale nell'intorno di questa zona è stato ricavato da diversi studiosi; i più noti sono Griffith, Westergaard e Williams.

In realtà, presentando i materiali una resistenza intrinseca (σ_u), si ha una zona plastica all'estremità della fessura in cui si verificano fenomeni dissipativi non lineari; il comportamento dei materiali in questa regione è stato studiato e simulato da diversi modelli non lineari. È stato inoltre rivisto il concetto di fragilità o duttilità strutturale: una struttura è duttile se in grado di manifestare ampie deformazioni in campo plastico, ovvero dopo aver superato il comportamento elastico lineare, prima di giungere a rottura. La resistenza, tensione massima a cui può essere soggetto un materiale, e la tenacità, rapporto tra la deformazione ultima e la deformazione al limite elastico, definiscono la duttilità o la fragilità di una struttura ma, dal momento

che presentano diverse dimensioni fisiche, non possono essere direttamente confrontate; entra in gioco un ulteriore fattore necessario per determinare il comportamento strutturale, la dimensione fisica della struttura stessa. Si ha dunque un “effetto scala”, osservato anche in laboratorio, secondo il quale, a parità di materiale, si ha una diminuzione di duttilità con l'aumentare della scala dimensionale (Carpinteri 1982). Questo si verifica indipendentemente dal tipo di materiale, vale dunque per metalli, polimeri, ceramici e cementizi.

Per comprendere il comportamento dei materiali quasi-fragili si hanno diversi modelli di fratture non lineari; i principali sono:

- modello della zona di danneggiamento: consiste nel considerare il materiale, nella zona in prossimità del “tip” della fessura, caratterizzato da un modulo elastico inferiore rispetto a quello del materiale integro;
- modello della fessura coesiva;
- modello del “Bridged Crack”, utilizzato per elementi armati;
- modello micro-fessurato, che è un modello di dettaglio.

I due modelli che consentono un accurato studio dei materiali a comportamento elasto-softening (con softening si intende a incrudimento negativo) sono quello della fessura coesiva e del “Bridged Crack”; questi ipotizzano che si abbiano delle interazioni tra le facce della fessura nella zona in cui si verificano i fenomeni dissipativi e non lineari. Il primo è caratterizzato da due diverse leggi costitutive, rappresentate in Figura 1:

- legge tensione-deformazione: descrive il comportamento elasto-incrudente del materiale fino al raggiungimento della σ_u ;
- legge tensione-apertura della fessura: descrive il comportamento softening del materiale in seguito alla comparsa della fessura. Questo rimane valido sino a quando non si raggiunge un determinato valore di apertura della fessura, indicato con w_c , superato il quale si annulla l'interazione tra le facce della fessura.

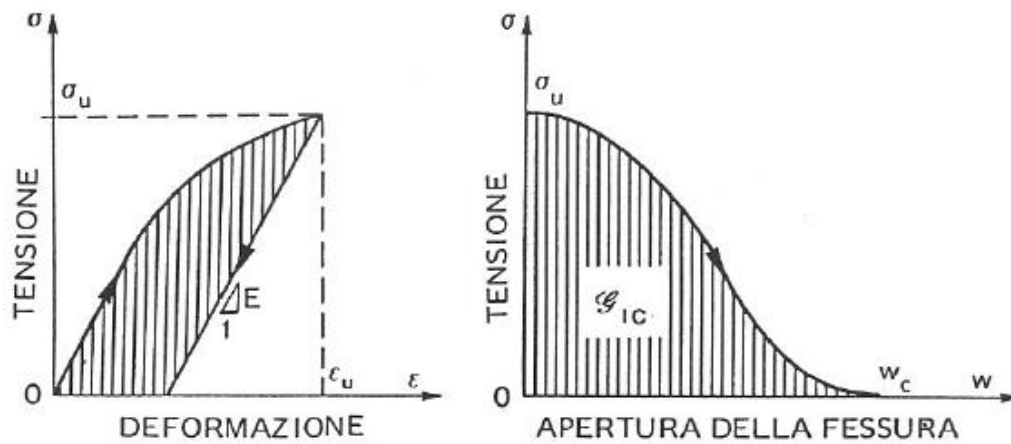


Figura 1. Leggi costitutive del modello coesivo (Carpinteri 1992)

L'energia viene dissipata sia nel volume del materiale integro che sulla superficie della fessura; è possibile osservare quanto affermato in Figura 1 dal momento che l'area sottesa dai due grafici rappresenta, rispettivamente, l'energia dissipata nell'unità di volume e quella dissipata per unità di superficie della fessura. Quest'ultima viene solitamente indicata con G_{IC} o con G_F e prende il nome di "Energia di frattura" e vale:

$$G_{Ic} = \int_0^{w_c} \sigma(w) dw \quad (1.1)$$

Il pedice "I" indica il modo in cui si propaga la fessura; se ne distinguono tre diversi, rappresentati in Figura 2:

- Modo I: apertura della fessura (opening);
- Modo II: scorrimento (sliding);
- Modo III: scivolamento fuori dal piano (tearing).

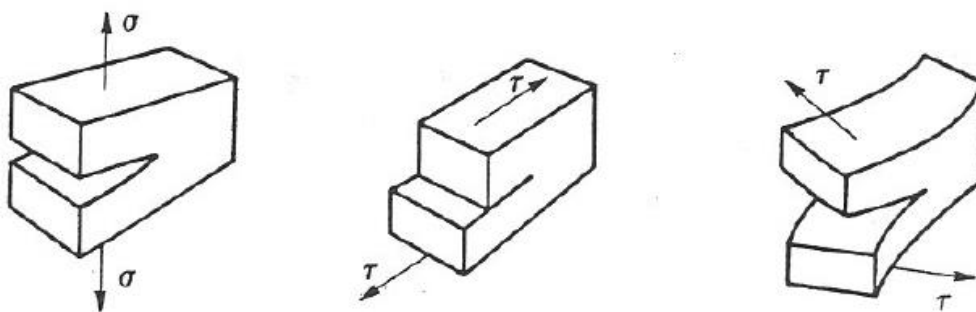


Figura 2. Modi di propagazione delle fessure (Carpinteri 1992)

Dal momento che l'energia viene dissipata in una zona localizzata, si è osservato in laboratorio che, variando la distanza tra i trasduttori, le curve di risposta variano, come mostrato in Figura 3. Nel piano Carico-Variazione di lunghezza ($F-\Delta l$), all'aumentare di l_0 , la pendenza del tratto elastico diminuisce mentre quella del ramo softening aumenta. Quando la contrazione del materiale integro, durante lo scarico, prevale sulla dilatazione della fessura, si ha un ramo softening a pendenza positiva; questo fenomeno prende il nome di “Snap-Back” ed è rappresentato dal tratto UQT. Per poter rilevare sperimentalmente il tratto relativo allo “Snap-Back” è necessario controllare la prova tramite una grandezza monotona crescente, come ad esempio l'apertura della bocca della fessura, in inglese “Crack Mouth Opening Displacement (CMOD). Controllando, al contrario, la prova con la deformazione, o lo spostamento, si avrebbe il salto UT ricadendo direttamente nel ramo softening a pendenza negativa. La risposta nel piano Tensione-Deformazione ($\sigma-\epsilon$) presenta invece un unico tratto rappresentante il comportamento elastico-lineare e diversi rami softening al variare di l_0 ; i casi limite sono:

- $l_0 \rightarrow 0$: risposta perfettamente plastica;
- $l_0 \rightarrow \infty$: il ramo softening tende a coincidere con quello elastico.

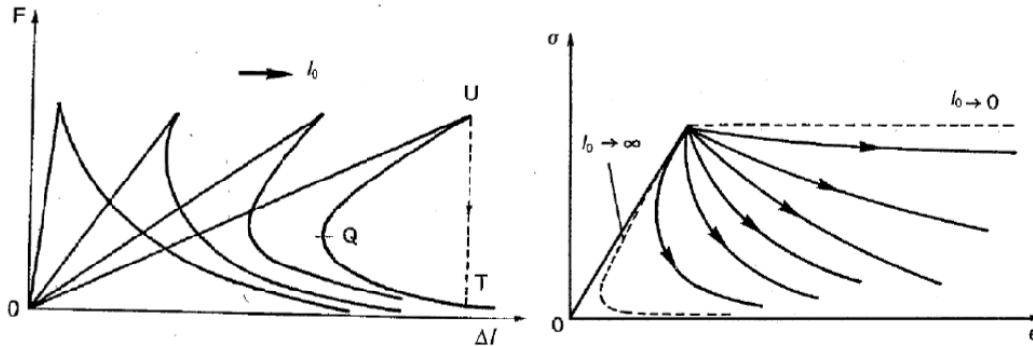


Figura 3. Curve di risposta nel piano $F-\Delta l$ e $\sigma-\epsilon$ (Carpinteri 1992)

Si può ricavare analiticamente la condizione per cui si verifica il fenomeno dello “Snap-Back” imponendo che la derivata di $\epsilon(\sigma)$ sia maggiore di zero; si ottiene:

$$l_0 > \frac{E}{\left| \frac{d\sigma}{dw} \right|_{\max}} \quad (1.2)$$

La condizione è che la lunghezza di controllo, o del provino, sia maggiore del rapporto tra il modulo elastico e la pendenza iniziale del ramo discendente della legge coesiva.

Dunque, al variare della dimensione si ha una variazione della risposta del provino e, in particolare, aumentando la dimensione il comportamento tende a diventare fragile; si ha una transizione duttile-fragile della risposta strutturale. Quest'ultima è stata osservata sperimentalmente effettuando una prova di flessione su tre punti (Three Point Bending Test, TPBT) su una lastra in due diverse condizioni: variando il materiale e la geometria. I due diversi materiali sono il calcestruzzo, caratterizzato da un'energia di frattura pari a $G_{Ic} = G_F = 0,05 \frac{kg}{cm}$, e la malta, $G_{Ic} = G_F = 0,01 \frac{kg}{cm}$. Le risposte, in Figura 4 e in Figura 5, sono entrambe rappresentate al variare della profondità adimensionalizzata della fessura a/h ; all'aumentare di quest'ultimo si ha una diminuzione della rigidezza e della capacità di carico ma un aumento di duttilità. Gli andamenti mostrano che la tenacità di un materiale dipende dall'energia di frattura, all'aumentare della quale si ha un aumento della tenacità; infatti, la risposta della malta è più fragile rispetto a quella del calcestruzzo e presenta per determinati valori di a/h un evidente snap-back.

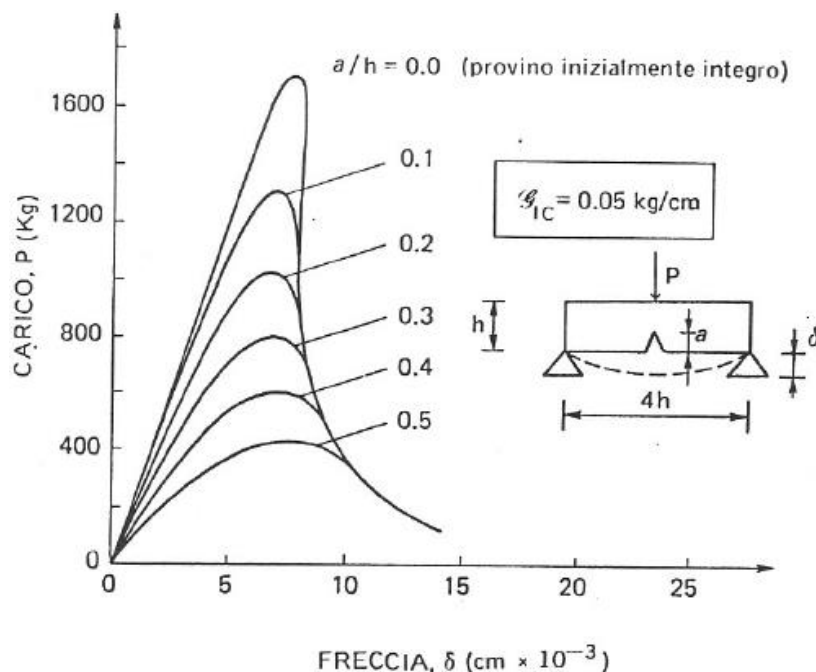


Figura 4. Risposta della lastra in calcestruzzo (Carpinteri 1992)

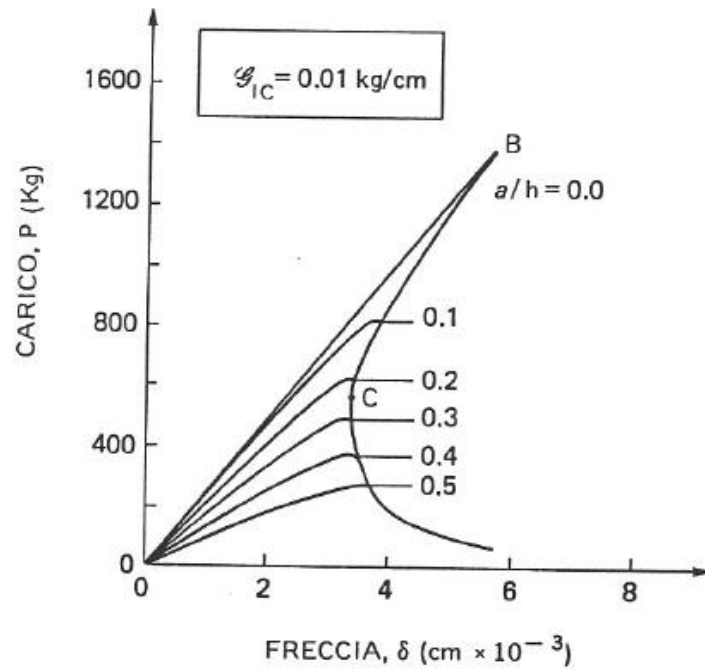


Figura 5. Risposta della lastra di malta (Carpinteri 1992)

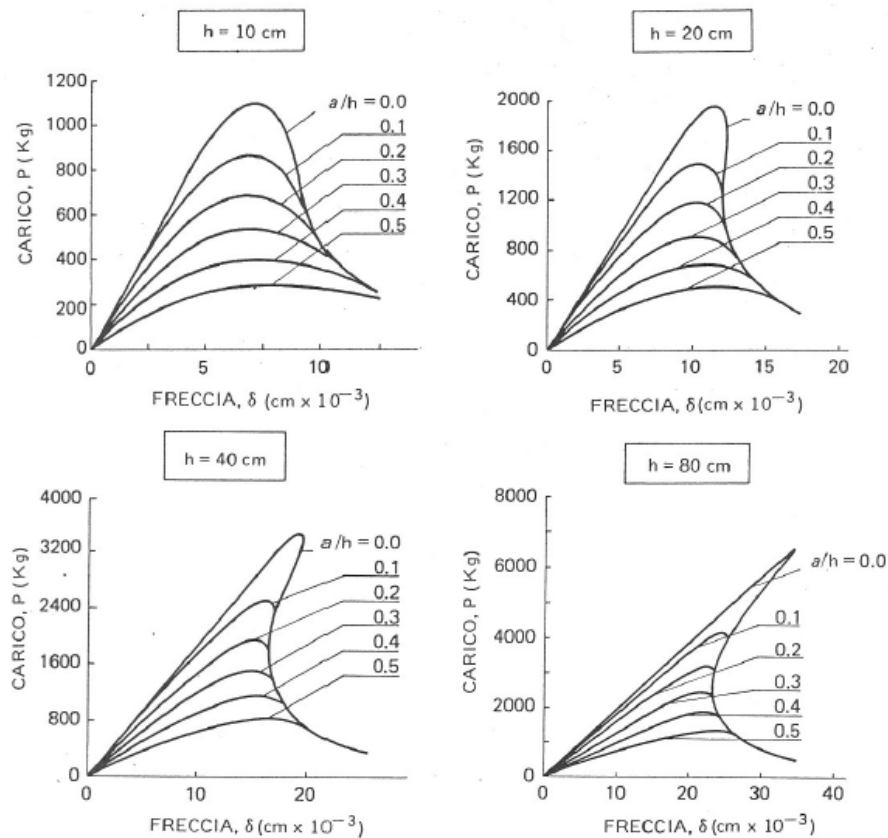


Figura 6. Risposta della lastra al variare della dimensione (Carpinteri 1992)

Eseguendo la prova sullo stesso materiale ma variando l'altezza del provino si osserva che la risposta strutturale diviene più “fragile”, in completa analogia con quanto si è riscontrato in precedenza, come si può osservare in Figura 6.

La duttilità/fragilità della risposta strutturale è influenzata da diversi parametri, energia di frattura e scala dimensionale; è possibile tuttavia cogliere la transizione duttile-fragile tramite un unico parametro, introdotto nel 1984 dal Prof. Carpinteri, che prende il nome di “numero di fragilità energetico”:

$$s_E = \frac{G_{Ic}}{\sigma_u h} \quad (1.3)$$

Dove con h si è indicata l'altezza del provino. Rappresentando la risposta al variare di questo parametro si osserva, in Figura 7, la transizione duttile-fragile.

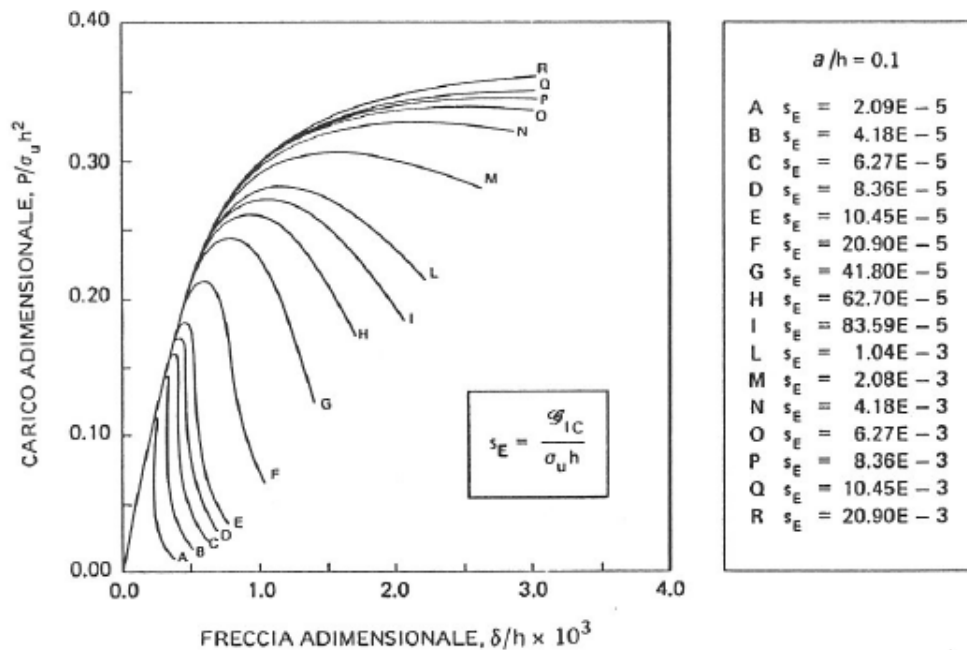


Figura 7. Transizione duttile-fragile (Carpinteri 1992)

Dal numero di fragilità energetico si può ricavare un ulteriore parametro, indicato solitamente con la lettera “B”, grazie al quale è possibile prevedere se si avrà o meno snap-back, ovvero se il processo di propagazione della fessura sarà soggetto ad instabilità. Si riporta in (1.4) la formulazione del parametro “B”:

$$B = \frac{s_E}{\varepsilon_u \lambda} \quad (1.4)$$

Dove con λ si intende la snellezza dell'elemento. La condizione per cui si ha instabilità dipende dal tipo di prova, in particolare:

- Per una prova di flessione su tre punti si ha instabilità se: $B \leq 1/3$;
- Per prova di trazione si ha instabilità se: $B \leq 1/2$.

La stabilità o instabilità del processo dipende, dunque, da quest'unico parametro. La Figura 8 mostra i possibili andamenti del ramo softening e mette in evidenza come, nel caso in cui si verifichi l'instabilità, si ha un rilascio di energia. Quest'ultima può essere emessa come energia cinetica, causando così un'“esplosione” del provino, o come onde di pressione; in quest'ultimo caso si parla di emissioni acustiche.

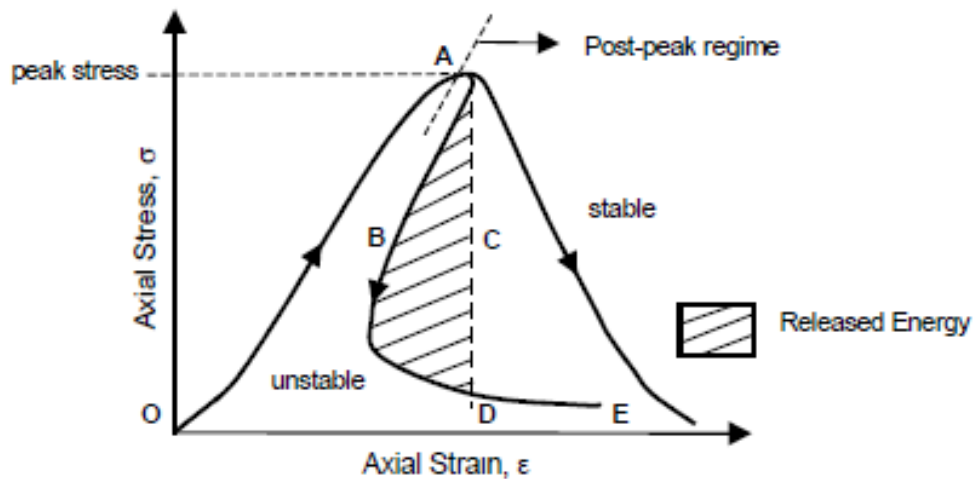


Figura 8. Grafico tensione deformazione

Il processo di fessurazione è più complicato per i materiali fibro-rinforzati e per i compositi a causa delle eterogeneità presenti. Come accennato in precedenza, il modello per il calcestruzzo armato è il “Bridged Crack Model”, secondo il quale le armature esercitano un'azione di richiusura della fessura. La differenza sostanziale con il modello precedentemente proposto è il numero di fragilità; quest'ultimo deve tenere in considerazione la presenza delle armature ed è:

$$N_p = \frac{f_y h^{1/2}}{K_{lc}} \rho \quad (1.5)$$

Dove:

- $\rho = \frac{A_s}{A}$ è la percentuale di armatura;
- f_y è la tensione di snervamento dell'acciaio;
- h è l'altezza del provino;
- K_{Ic} è la tenacità a frattura del materiale.

1.2. La Strumentazione

Come è stato accennato nel paragrafo precedente, la fessurazione è seguita dall'emissione di onde elastiche che si diffondono all'interno del materiale. Queste possono essere captate e registrate da trasduttori applicati sulla superficie degli elementi strutturali. I sensori generalmente utilizzati sono piezoelettrici con elementi realizzati con speciali ceramiche come, ad esempio, piombo zirconato di titanio (PZT); uno schema di un tipico sensore è rappresentato in Figura 9. I sensori sono in grado di produrre segnali elettrici ogni volta che sono soggetti a sforzi meccanici.

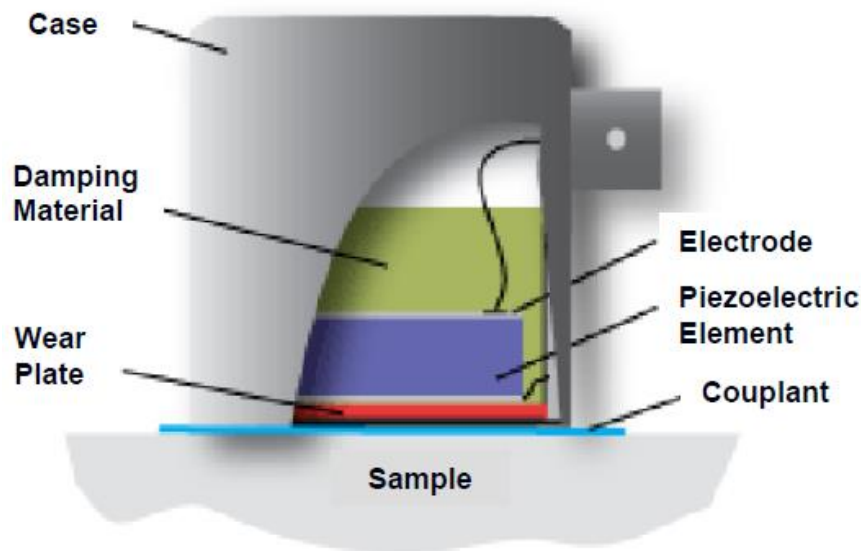


Figura 9. Schematizzazione di un sensore

Un tipico sistema di emissione acustica è caratterizzato da:

- Sensori;
- Pre-amplificatori che amplificano il segnale iniziale;

- Cavi che trasmettono i segnali;
- Dispositivo di acquisizione dati che converte il segnale da analogico a digitale, filtra i segnali, riconosce i segnali utili (*hits*) e ne sviluppa i parametri principali, analizza e rappresenta i dati.

Nel corso degli anni i sistemi di acquisizione dati si sono evoluti e si è passati dall'attrezzatura "Atel" a quella "USAM" fino alla diffusione della più recente strumentazione: l'"AEmission System".

Nel sistema di acquisizione "Atel" i sensori, trasduttori PZT, sono impostati su un range di frequenze compreso tra 100 kHz e 400 kHz. L'apparecchiatura, schematizzata in Figura 10, comprende:

- Amplificatore;
- Filtro Pbs;
- Misuratore di soglia;
- Contatore di oscillazioni;
- Registratore.

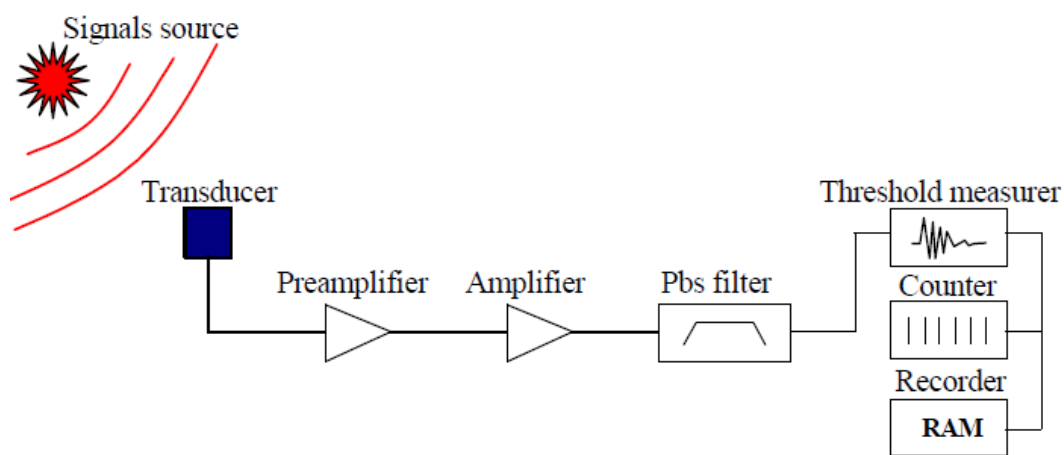


Figura 10. Schematizzazione del sistema Atel

Il valore di soglia (*threshold*) è 100 μ V e viene amplificato a 100 mV; si ha così un guadagno di 60 dB. Il limite del conteggio delle oscillazioni è di 255 ogni 120 s. Il metodo di analisi utilizzato con questa strumentazione è il "Ring-Down Counting" e viene utilizzato per l'identificazione di difetti. Tramite questa apparecchiatura, può essere utilizzata un'altra procedura che consiste nel considerare come un unico

evento tutte le oscillazioni prodotte da un segnale; si parla in questo caso di “Counting of Events”.

Il sistema di acquisizione dati “USAM” presenta delle caratteristiche diverse dal precedente. I sensori, trasduttori PZT, sono impostati su un range di frequenze compreso tra 50 kHz e 800 kHz. L'apparecchiatura, schematizzata in Figura 11, comprende:

- 6 sensori pre-amplificati;
- 6 unità di registrazione, collegate ai 6 sensori;
- Unità centrale per la fase di sincronizzazione;
- Misuratore di soglia.

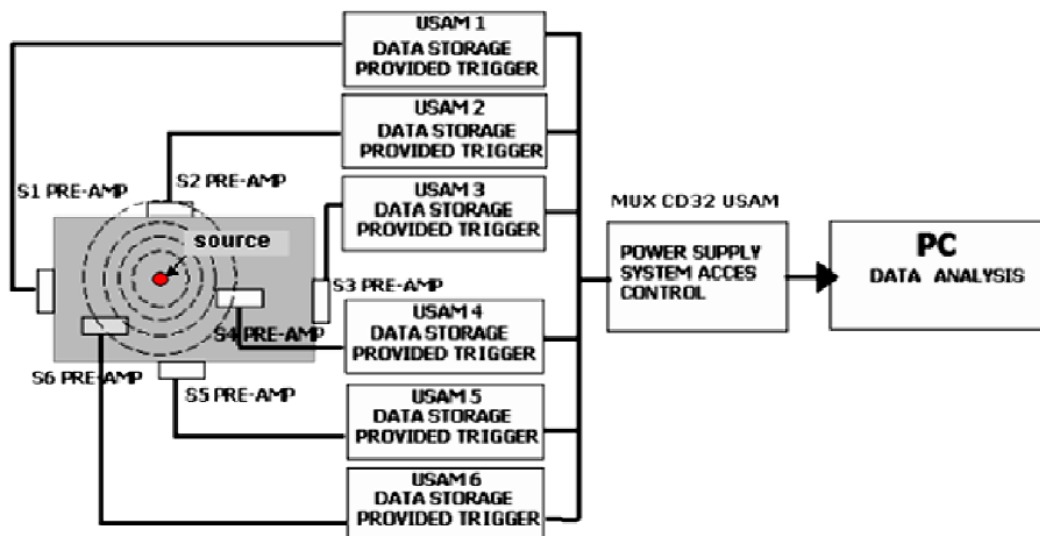


Figura 11. Schematizzazione del sistema USAM

Tramite questo sistema di acquisizione è possibile localizzare le micro-fessure e determinare lo stato del provino monitorato.

La forte necessità di studiare infrastrutture, edifici antichi e monumenti, richiede una trasmissione wireless e di processare una grande quantità di dati, consentendo un monitoraggio sia da remoto che in tempo reale per osservare l'evoluzione dei processi di danneggiamento strutturale. Per questo motivo, la cooperazione tra il gruppo di ricerca sulle Emissioni Acustiche del Politecnico di Torino e la società Italiana Lunitek SRL ha prodotto il “AEmission system” per il monitoraggio strutturale e sismico, basato sull'acquisizione e trasmissione dei dati di EA. Un

sistema di trasduttori PZT è collegato a un sistema multicanale, ognuno con una memoria di 64 Mb, che registra e processa automaticamente i parametri significativi di ogni segnale rilevato: numero cumulato di eventi, durata, ampiezza di picco, e “ring-down counts”, permettendo la localizzazione e la quantificazione del danneggiamento in situ dai parametri registrati. I dati processati vengono inviati periodicamente tramite un sistema GPRS/UMTS a un server remoto, rendendo possibile il monitoraggio continuo e simultaneo di elementi strutturali o di intere strutture, possibilmente situate in posti diversi. Ogni canale consiste in un convertitore di segnale da analogico a digitale (Analog to Digital Converter module) con una frequenza di campionamento che consente di misurare componenti di frequenza fino a 1 MHz, coprendo il tipico intervallo di frequenze dei trasduttori PZT a banda larga. Si riporta di seguito, in Figura 12, una schematizzazione del principio di funzionamento della più recente strumentazione.

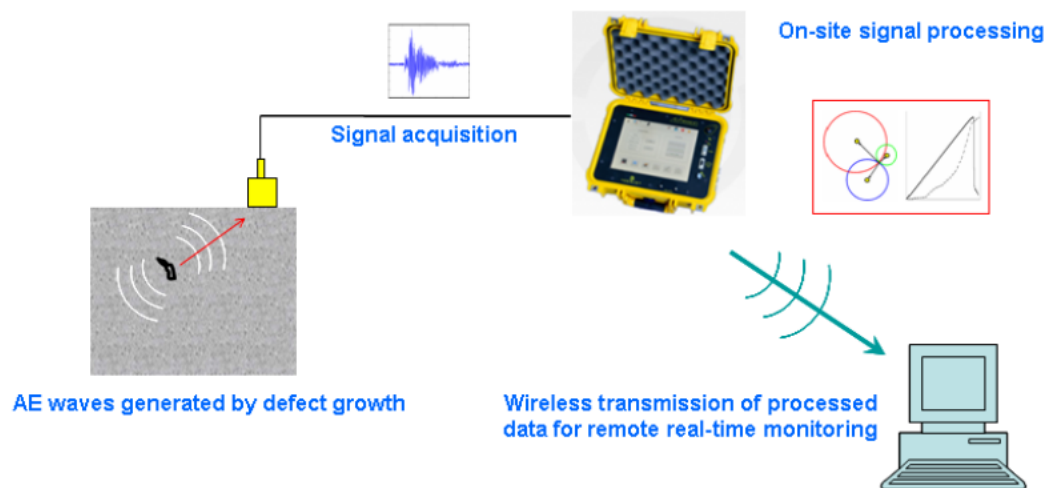


Figura 12. Principio di funzionamento dell'“AEmission System”

1.3. La Tecnica

Tramite le diverse tipologie di apparecchiature presentate nel paragrafo precedente, è possibile captare e registrare le onde che si propagano all'interno del materiale in seguito alla fessurazione; il segnale identificato dal sensore è rappresentato in Figura 13 mentre viene schematizzato in Figura 14.

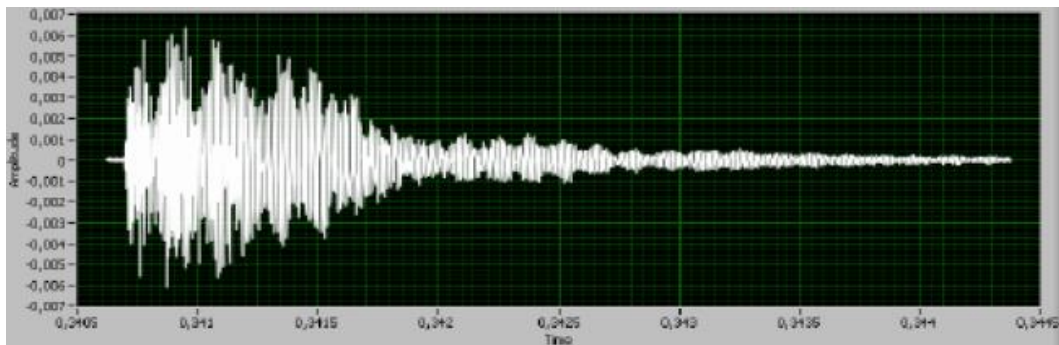


Figura 13. Segnale registrato dal trasduttore

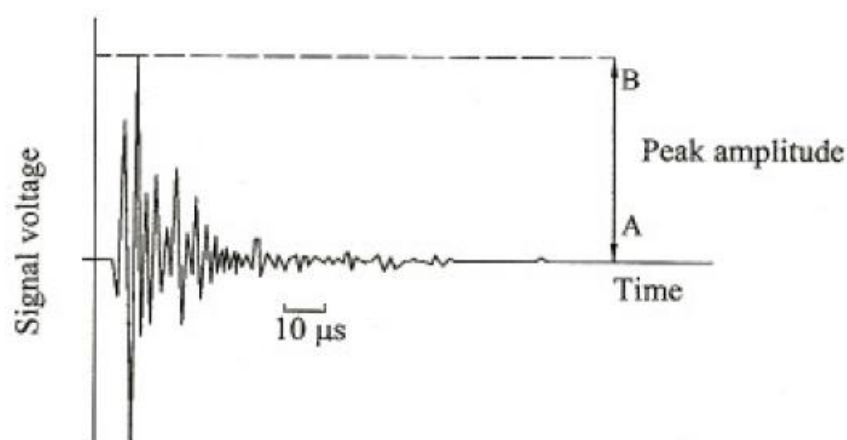


Figura 14. Schematizzazione del segnale (Carpinteri and Lacidogna 2006)

Il segnale viene pre-amplificato e trasformato in voltaggio elettrico; successivamente viene filtrato per eliminare le frequenze indesiderate, come ad esempio le vibrazioni causate dalla strumentazione che sono, solitamente, inferiori a 100 kHz. Fin qui il segnale può essere rappresentato, come osservato in precedenza, da un'oscillazione smorzata. Quest'ultimo viene dunque analizzato da un sistema di misurazione che conta le oscillazioni che superano il valore prestabilito. Questo metodo di analisi prende il nome di “Ring-Down Counting”

(Brindley, Holt, and Palmer 1973). In prima approssimazione, il numero di oscillazione N_T può essere correlato alla quantità di energia rilasciata durante il processo di carico. Questa tecnica considera anche altre procedure; in base alle caratteristiche del trasduttore, in particolare dello smorzamento, è possibile considerare tutte le oscillazioni prodotte da un singolo segnale di emissione acustica come un unico evento. Si sostituisce così il “Ring-Down Counting” con il “Counting of Events”, Figura 15.

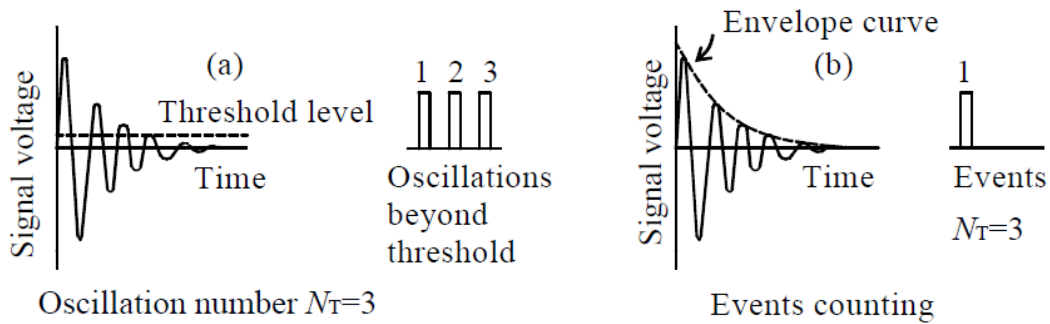


Figura 15. Confronto tra il Ring-Down Counting e il Counting of Events (Carpinteri and Lacidogna 2006)

1.4. Le Interpretazioni e il Monitoraggio Strutturale

Tramite questa tecnica è possibile monitorare la propagazione delle fessure e valutare il livello di danneggiamento in una struttura in esercizio. Si riesce inoltre a stimare la quantità di energia emessa durante la crescita delle fessure e a ottenere informazioni sulla durabilità delle strutture. Infine, una metodologia frattale o multi-scala consente di predire l'evoluzione del danneggiamento e il tempo di collasso della struttura monitorata.

1.4.1. Classificazione delle fessure attive

Uno dei parametri fondamentali per classificare le fessure e per comprendere se sono state originate da sforzi di trazione o di taglio è il “Rise Angle”, indicato con “RA” e mostrato in Figura 16. Questo è dato dal rapporto tra il “Rise Time”, indicato con “RT”, e l'ampiezza massima di ogni segnale “A”, misurata in Volt:

$$RA = \frac{RT}{A} = \frac{[ms]}{[V]} \quad (1.6)$$

Il “Rise Time” è il tempo in cui si raggiunge la massima ampiezza e viene misurato, in millisecondi, a partire dal primo attraversamento della soglia preimpostata.

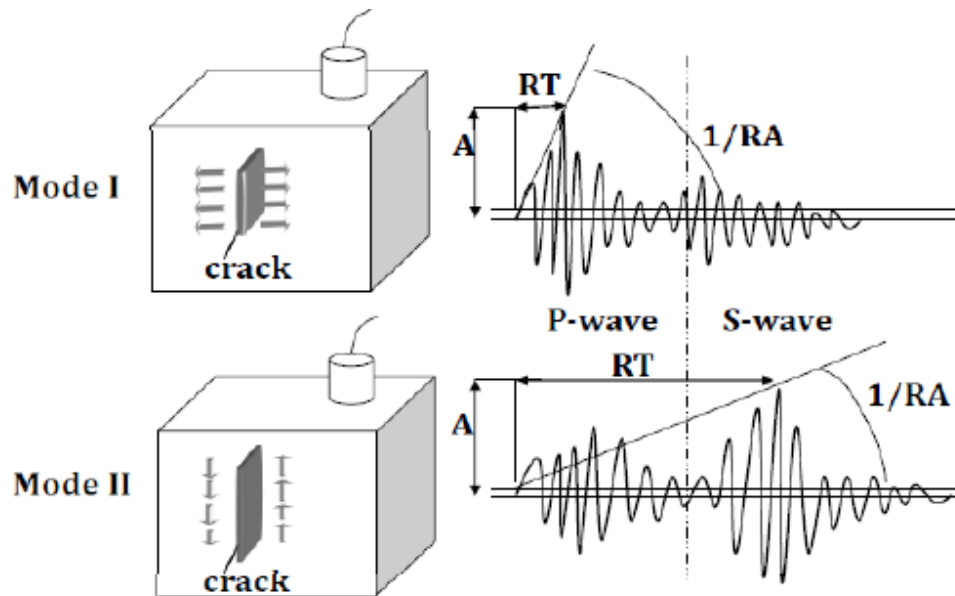


Figura 16. Rise Angle

L'ulteriore parametro necessario per la classificazione le fessure è l'“Average Frequency”, indicato con “AF”. Quest'ultimo si ottiene dal rapporto tra il “Ring-Down Count”, cioè il numero di attraversamenti della soglia, e la durata del segnale. Combinando questi due parametri è possibile ottenere la tipologia della fessura (RILEM Technical Committee TC212-ACD. 2010). La classificazione viene effettuata riportando su un sistema di assi cartesiani i due parametri, come mostrato in Figura 17.

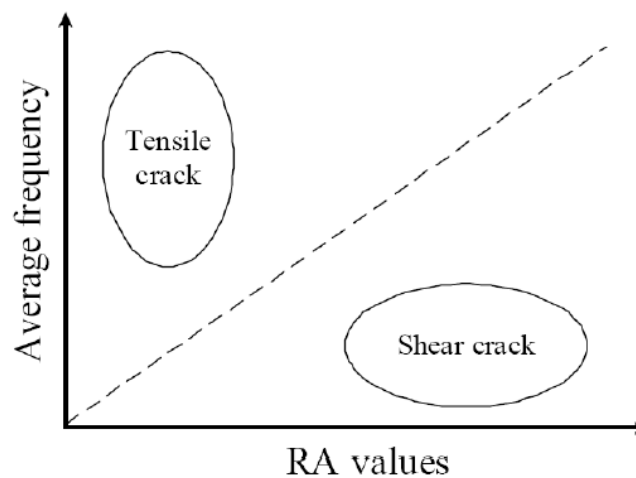


Figura 17. Rise Angle - Average Frequency

I punti che ricadono al di sotto della bisettrice sono rappresentativi di fessure di Modo II mentre quelli al di sopra di fessure di Modo I.

1.4.2. Localizzazione delle sorgenti

È possibile localizzare le sorgenti delle emissioni acustiche utilizzando le stesse metodologie della sismologia dal momento che gli eventi registrati dai sensori sono originati dal rilascio di energia causato dalla propagazione di una dislocazione. Quest'ultima è la sorgente di un'onda elastica che si diffonde all'interno del materiale; si ha dunque una totale analogia con gli eventi sismici. Il tempo in cui l'onda, viaggiando dalla sorgente situata in un punto di coordinate (x_0, y_0, z_0) , raggiunge il sensore situato in (x_A, y_A, z_A) può essere valutato tramite la seguente:

$$T_A = \frac{\left[(x_0 - x_A)^2 + (y_0 - y_A)^2 + (z_0 - z_A)^2 \right]^{\frac{1}{2}}}{c} \quad (1.7)$$

Dove con “c” si indica la velocità di propagazione dell'onda nel mezzo. Tuttavia la (1.7) non può essere utilizzata per la localizzazione in quanto non si conosce il tempo assoluto dell'evento; si conoscono soltanto i tempi di arrivo relativi Δt_A a ogni trasduttore. Si necessita dunque di un trasduttore di riferimento, identificato dal pedice “R”, in modo tale da riscrivere il sistema di equazioni sottraendo a entrambi i membri delle equazioni T_R . Il tempo relativo di arrivo del segnale al sensore A vale:

$$\Delta t_A = T_A - T_R = \frac{\left[(x_0 - x_A)^2 + (y_0 - y_A)^2 + (z_0 - z_A)^2 \right]^{\frac{1}{2}}}{c} - T_R \quad (1.8)$$

Le incognite sono il tempo di arrivo al sensore di riferimento T_R e la posizione della sorgente (x_0, y_0, z_0) ; si necessita di quattro equazioni e dunque di quattro sensori per la localizzazione della sorgente. Allo stesso modo, per la localizzazione bidimensionale sono necessari tre sensori e nel monodimensionale ne servono due.

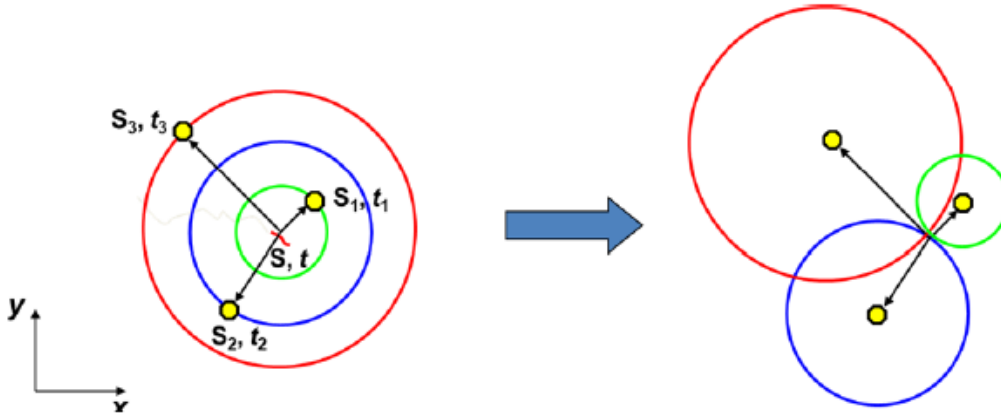


Figura 18. Rete di trasduttori

1.4.3. Un criterio frattale per il monitoraggio strutturale

Negli ultimi anni i dati di emissione acustica sono stati interpretati sulla base di teorie statistiche e frattali della frantumazione (Carpinteri, Lacidogna, and Pugno 2005, 2007); la densità di energia frattale, di dimensioni fisiche “anomale”, può essere considerata come un parametro indipendente dalla scala.

$$\Gamma = \frac{W_{\max}}{V^{D/3}} \quad (1.9)$$

Nell'equazione frattale (1.9) si è indicato con:

- Γ la densità di energia frattale;
- $W_{\max}$ l'energia dissipata totale;
- D l'esponente frattale compreso tra 2 e 3; il dominio frattale in cui avviene la dissipazione di energia è quindi compreso tra 2 e 3.

Durante la propagazione delle micro-fessure, gli eventi di EA possono essere registrati; dal momento che l'energia dissipata, “W”, è proporzionale al numero di eventi, “N”, anche la densità critica di eventi di emissione acustica può essere considerata come un parametro indipendente dalla scala.

$$\Gamma_{AE} = \frac{N_{\max}}{V^{D/3}} \quad (1.10)$$

Dove:

- Γ_{AE} è la densità critica di eventi di emissione acustica;
- N_{max} è il numero di eventi registrati alla tensione di picco, ovvero a σ_u .

L'equazione (1.10) mette in evidenza l'effetto del volume sul numero massimo di eventi di EA per un provino portato a rottura. Si è dunque considerata la validità, durante il danneggiamento, di una legge di scala che viene riportata in (1.11).

$$W \propto N \propto V^{D/3} \quad (1.11)$$

L'estensione del danneggiamento in una struttura può essere ricavata dai dati di emissione acustica registrati per un provino di riferimento, indicato col pedice "r", estratto dalla struttura e portato a rottura. La procedura si basa sull'assunzione che il livello di danneggiamento osservato nel provino di riferimento sia proporzionale a quello raggiunto nell'intera struttura prima del monitoraggio. Si ottiene dunque il numero critico di eventi di EA per la struttura, indicato con " N_{max} ", ovvero il numero massimo di eventi che si possono manifestare prima della condizione critica cioè prima che si raggiunga la tensione di picco. L'espressione ottenuta viene riportata in (1.12).

$$N_{max} = N_{max,r} \left(\frac{V}{V_r} \right)^{\frac{D}{3}} \quad (1.12)$$

Dove:

- N_{max} è il numero critico di eventi della struttura;
- $N_{max,r}$ è il numero critico di eventi del provino estratto dalla struttura;
- V è il volume della struttura;
- V_r è il volume del provino.

Il seguente rapporto definisce un parametro per descrivere il livello di danneggiamento in una struttura:

$$\eta = \frac{W}{W_{max}} = \frac{N}{N_{max}} \quad (1.13)$$

Esprimendo il precedente rapporto in funzione del tempo è possibile ottenere:

$$\eta = \frac{W}{W_d} = \frac{N}{N_d} = \left(\frac{t}{t_d} \right)^{\beta_t} \quad (1.14)$$

Dove:

- W_d e N_d non corrispondono necessariamente con W_{max} e N_{max} ; si ha infatti che $W_d \leq W_{max}$ e $N_d \leq N_{max}$;
- t_d è il tempo di monitoraggio;
- β_t è un'esponente frattale per l'energia rilasciata e prende il nome di "time-scaling".

Si ottiene dunque che il processo dissipativo segue un'ulteriore legge di scala:

$$W \propto N \propto t^{\beta_t} \quad (1.15)$$

Ricavando il valore dell'esponente frattale dai dati registrati è possibile predire le condizioni di stabilità della struttura monitorata; si distinguono tre diverse situazioni, riportate in Figura 19 e di seguito elencate:

- $\beta_t < 1$: il processo è stabile e si ha una concavità verso il basso;
- $\beta_t \cong 1$: il processo è metastabile;
- $\beta_t > 1$: il processo diventa metastabile.

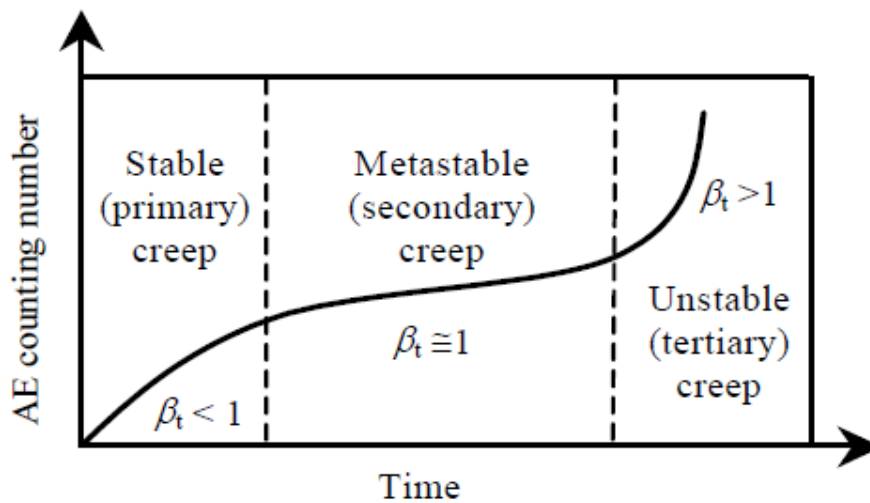


Figura 19. Numero di eventi di EA nel tempo

Si possono distinguere in questo modello le tre fasi di un tipico processo di danneggiamento:

- Fase di creep primario in cui si ha una diminuzione di energia;
- Fase di creep secondario in cui l'energia si mantiene costante;
- Fase di creep terziario in cui si ha una crescita dell'energia; in questa fase l'accumulo di danneggiamento instabile porta il provino alla rottura.

Il β_t ha dunque una funzione predittiva in quanto permette di prevedere il tempo in cui si raggiunge la condizione critica. Si riportano di seguito le fasi necessarie per la valutazione del t_{max} , ovvero della vita utile, della struttura:

- Valutazione in laboratorio dell'esponente frattale "D" dai provini estratti dalla struttura da monitorare;
- Ricavato D e $N_{max,r}$ è possibile, tramite la (1.12), ricavare N_{max} ;
- Dal monitoraggio in sito è possibile ricavare β_t ;
- Noti N e t dai dati registrati dai sensori è infine possibile ricavare, tramite la (1.14), t_{max} .

1.4.4. La distribuzione statistica degli eventi di emissione acustica: l'analisi del "b-value" (Anzani et al. 2008)

In analogia con i fenomeni sismici, la magnitudo viene definita, nel campo delle emissioni acustiche, come segue:

$$m = \text{Log}_{10} A_{max} + f(r) \quad (1.16)$$

In cui:

- A_{max} è l'ampiezza del segnale espressa in μV ;
- $f(r)$ è un fattore correttivo che tiene conto che l'ampiezza decresce con la distanza r tra la sorgente e il sensore.

In sismologia, la frequenza con cui si verificano i terremoti è correlata alla loro magnitudo; infatti, i meno intensi si verificano più frequentemente di quelli

caratterizzati da una magnitudo più elevata. Questo può essere quantificato tramite la legge empirica di Gutenberg-Richter (Richter 1958):

$$\text{Log}_{10}N(\geq m) = a - bm \text{ or } N(\geq m) = a - bm \quad (1.17)$$

Dove:

- N è il numero di terremoti con magnitudo $\geq m$ in una determinata area e in un determinato lasso di tempo;
- a e b sono costanti positive che variano in base alla regione.

L'equazione (1.17) è stata utilizzata per studiare le distribuzioni delle ampiezze delle emissioni acustiche; è stata ricavata un'analogia tra il processo di danneggiamento in una struttura e l'attività sismica in una regione della crosta terrestre. Di conseguenza, è stato possibile estendere l'utilizzo della legge di Gutenberg-Richter all'Ingegneria Civile. Secondo l'equazione (1.17), il “ b -value”, espressione con la quale si indica il parametro b , rappresenta il gradiente negativo del diagramma logaritmico-lineare tra la frequenza degli eventi di EA e la magnitudo e quindi la pendenza negativa della distribuzione delle ampiezze come mostrato in Figura 20.

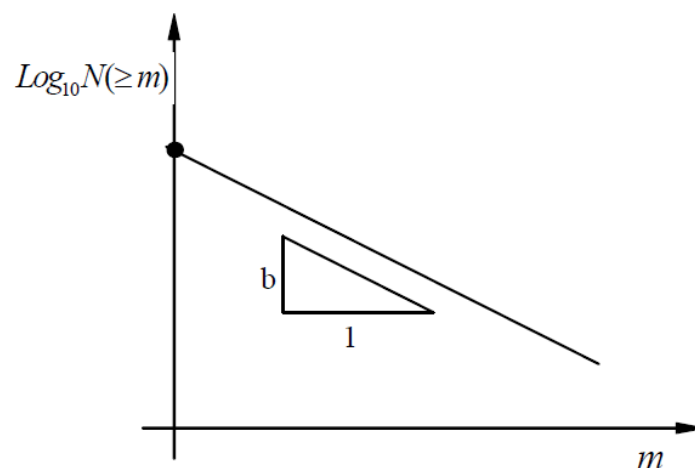


Figura 20. Rappresentazione dell'equazione (1.17)

Questo parametro cambia durante le diverse fasi del processo di danneggiamento e quindi può essere utilizzato per stimare lo sviluppo del processo di fessurazione; si registra una decrescita del “ b -value” quando il provino si avvicina alla rottura. È

è stato osservato in laboratorio che l'ampiezza, o magnitudo, di ogni segnale di EA è proporzionale all'area S della sorgente del difetto:

$$m \propto S \quad (1.18)$$

Di conseguenza, come si può osservare in Figura 21:

- Piccole aree di frattura, o micro-fessure, generano segnali di bassa ampiezza;
- Grandi aree di frattura, o macro-fessure, generano segnali di elevata ampiezza.

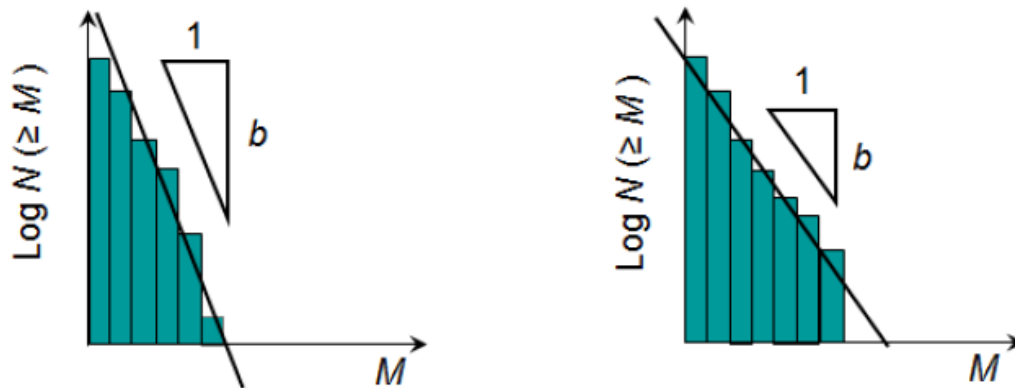


Figura 21. Crescita del "b-value" con l'ampiezza della dislocazione

Sulla base di quanto detto, è possibile distinguere tre diverse situazioni:

- Per elevati valori del "b-value", ovvero per $b > 1.7$, si ha un numero elevato di eventi di bassa ampiezza e quindi una distribuzione dominata da micro-fessure;
- Per valori intermedi, $1.2 < b < 1.7$, si iniziano a manifestare diverse macro-fessure;
- Per valori bassi, $1 < b < 1.2$, gli eventi di elevata ampiezza crescono fino a portare al collasso quando $b = 1$.

È stato osservato, sia nel monitoraggio in laboratorio che in strutture, che il valore minimo del "b-value" è proprio pari a 1. Questi risultati sono stati confermati anche dal punto di vista teorico tramite un'analogia con la sismologia; infatti, gli effetti

scala sulla dimensione delle fessure identificati con la tecnica delle emissioni acustiche comportano la validità della relazione:

$$N(\geq L) = c L^{-2b} \quad (1.19)$$

Dove:

- N è il numero cumulativo di eventi di emissione acustica generati dalle fessure caratterizzate da una dimensione caratteristica maggiore di L ;
- c è il numero totale di eventi;
- $D = 2b$ è un esponente frattale che rappresenta la dimensione del dominio danneggiato.

La distribuzione (1.19) è identica a quella proposta dal Prof. Carpinteri (Carpinteri 1994) secondo la quale il numero di fessure con una dimensione $\geq L$ contenuto in un corpo vale:

$$N^*(\geq L) = N_{tot} L^{-\gamma} \quad (1.20)$$

Nella precedente, γ è un esponente che rappresenta il grado di disordine e N_{tot} è il numero totale di fessure presenti nel materiale.

Dall'uguaglianza tra la (1.19) e la (1.20) si ottiene che:

$$2b = \gamma \quad (1.21)$$

Al momento del collasso infatti la dimensione del difetto è proporzionale alla dimensione strutturale e quindi la (1.20) è caratterizzata da un $\gamma = 2$ a cui corrisponde un $b = 1$. È stato inoltre dimostrato (Carpinteri 1994) che si ha $\gamma = 2$ in corrispondenza del massimo disordine nella distribuzione dei difetti.

Si comprende, dunque, che il “ b -value”, a differenza di β_t , ha una funzione descrittiva del livello di danneggiamento raggiunto.

Capitolo 2

2. Il Campanile del Duomo di Torino

La torre campanaria del Duomo di Torino si trova in Piazza San Giovanni ed è adiacente alla Cattedrale di San Giovanni Battista, Duomo della città di Torino, come si può osservare in Figura 22.



Figura 22. Duomo di Torino e Torre Campanaria

Le due strutture si trovano dunque al centro della città di Torino; la Piazza è infatti collegata a Piazza Castello tramite un passaggio porticato al lato di Palazzo Chiabrese e di Palazzo Reale. Inoltre, è a pochi passi dall'area archeologica e dall'antico teatro romano. Il campanile, non strutturalmente collegato al Duomo, fa oggi parte del Museo Diocesano di Torino ed è collegato alla Chiesa inferiore del Duomo tramite la galleria ipogea; attraversando quest'ultima è possibile osservare gli scavi delle fondamenta delle tre chiese, dedicate a San Salvatore, a Santa Maria di Dompno e a San Giovanni Battista. Queste ultime costituivano l'antica area sacra oggi occupata dalla Cattedrale di San Giovanni Battista. Raggiunta la base della torre è possibile salire i 210 gradini e raggiungere la cella campanaria, che ospita un concerto di quattro campane. Da un lato della cella è possibile osservare il centro

della città, Figura 23, mentre dall'altro il resto della città circondata dalle Alpi, Figura 24.



Figura 23. Vista dalla Cella Campanaria



Figura 24. Vista dalla Cella Campanaria

La torre campanaria presenta una pianta quadrata di lato pari a 9,71 metri e, con un'altezza di 63 metri, rappresenta il terzo edificio in muratura portante più alto di Torino. Come si può evincere dalla Figura 25, questa presenta un'altezza inferiore alla Basilica di Superga, alta 75 m, e al Campanile della Chiesa di Santa Zita, che, con un'altezza di 83 m, è la struttura in muratura più alta della città di Torino. In a Figura 26 sono riportati i diversi macro-elementi che costituiscono la torre: fondazione, basamento, fusto e cella campanaria. Il fusto e la cella campanaria, che presenta un telaio in muratura portante, sono caratterizzati da materiali diversi.

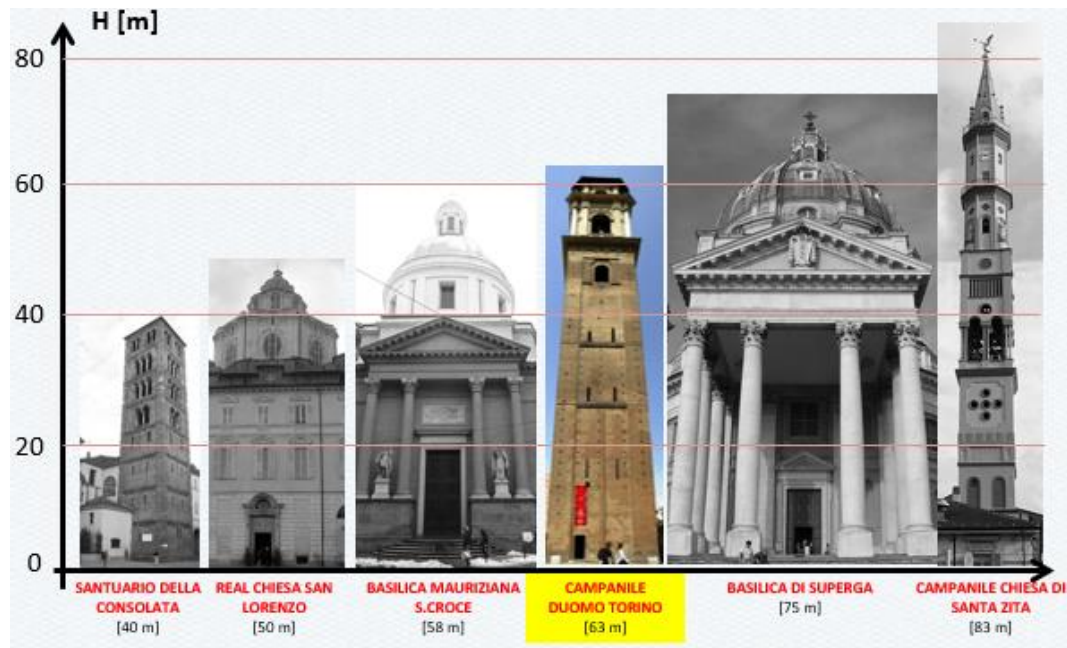


Figura 25. Le strutture in muratura più alte di Torino (Manuello, Masera, and Carpinteri 2019)

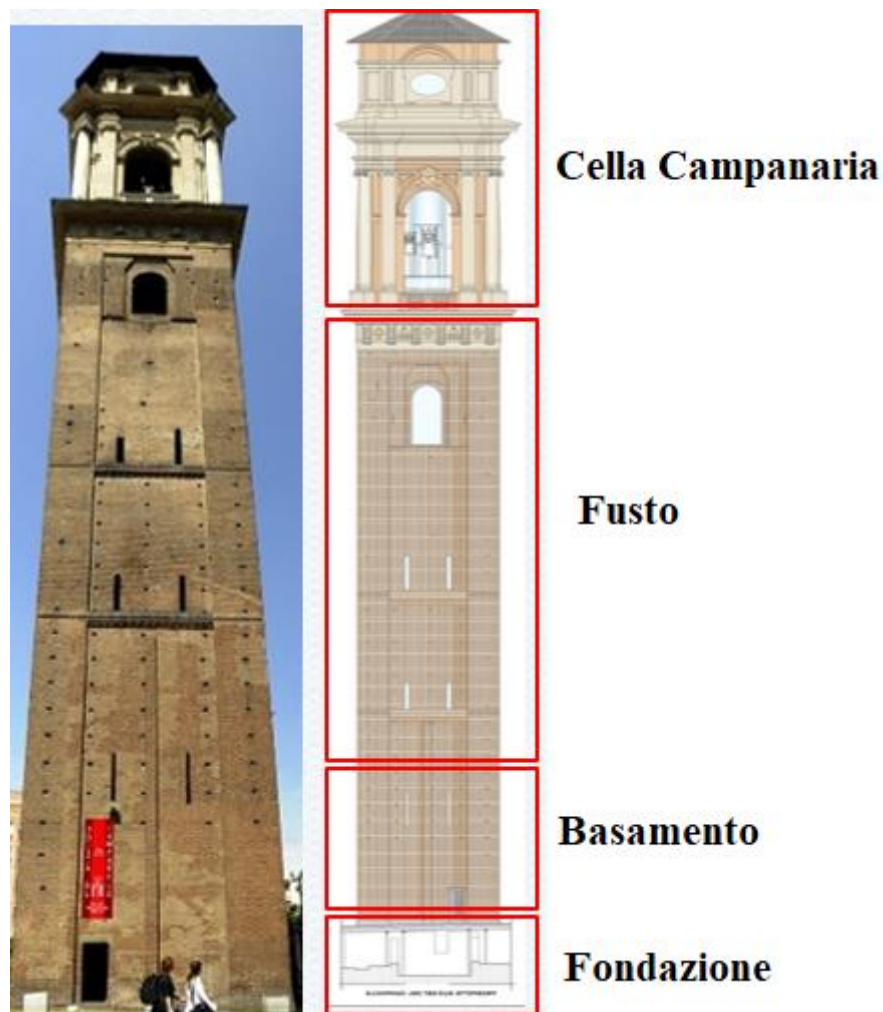


Figura 26. I macro-elementi della torre

2.1. La storia della Torre Campanaria

Le costruzioni risalenti all'epoca medievale possono essere classificate in quattro categorie prevalenti (Tosco 2003):

- Le architetture religiose, di cui fanno parte campanili, chiese, monasteri e conventi;
- Le architetture militari, tra le quali si hanno torri, recinti fortificati e castelli;
- Le architetture residenziali;
- Le architetture di servizio; all'interno di quest'ultima è possibile considerare mulini, ponti e acquedotti.

È possibile ipotizzare che inizialmente il campanile fosse nato come torre di avvistamento e che solo successivamente venne utilizzato come campanile; infatti, la maggior parte delle torri di una determinata altezza, in quel periodo, venivano realizzate con fini militari.

Il Campanile del Duomo di Torino venne edificato tra il 1468 e il 1470 per volere e a spese del vescovo della città Giovanni di Compey (Costa de Beauregard 1884; Dori and Dori 1881; Rondolino 1898); non si hanno informazioni sull'architetto che progettò la torre dal momento che il committente, a quel tempo, era la figura più importante e documentata.

Come si può osservare in Figura 28, che mostra una sezione e un prospetto della parte quattrocentesca del campanile, i muri perimetrali risultano essere molto spessi, con una dimensione di 2 m; è stato poi confermato l'utilizzo della tecnica "a sacco". La muratura "a sacco" è un tipo di muratura spesso utilizzata nella realizzazione di edifici storici e opere difensive e consiste in due paramenti esterni realizzati in pietra o in mattoni con funzione di cassero di contenimento, riempiti all'interno con una miscela di pietrisco e avanzi di lavorazione dei paramenti, legati da malta di cemento o di calce. Una schematizzazione di questa tecnica viene rappresentata in Figura 27.

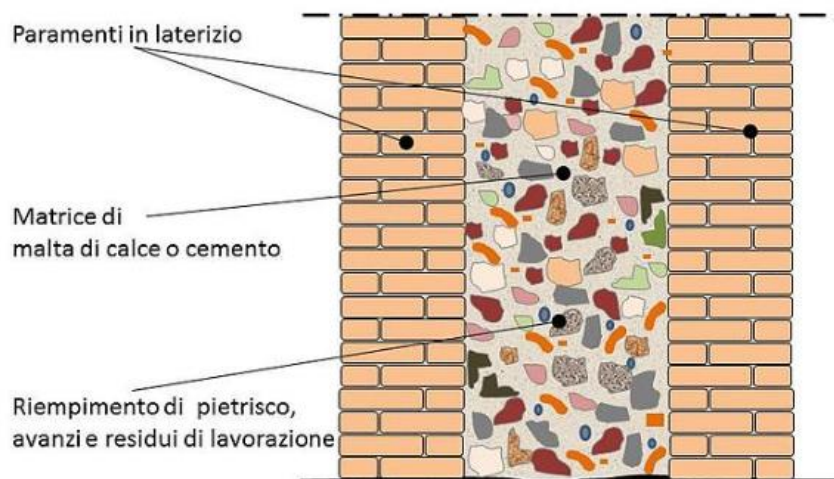


Figura 27. Schematizzazione di un tipico muro a sacco

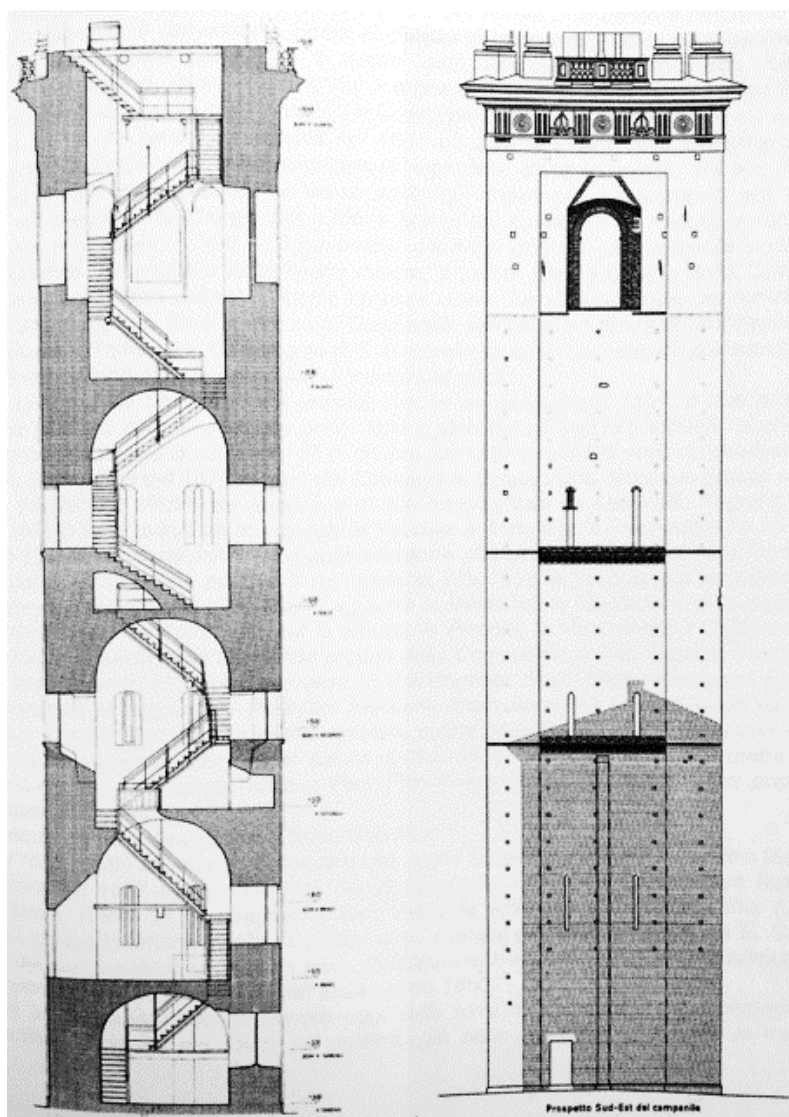


Figura 28. Sezione e Prospetto della parte Quattrocentesca del Campanile

Dalla sezione della parte quattrocentesca del Campanile, mostrata in Figura 28, è possibile osservare che la legatura delle murature perimetrali è stata realizzata tramite volte a botte che consentono l'individuazione di quattro ambienti sovrapposti con pavimenti a diverse quote: 0.00 m, 5.15 m, 12.15 m, 20.35 m, 29.85 m e 43.40; quest'ultima è la quota a cui si trova il pavimento ligneo dell'attuale cella campanaria. Si può infine osservare che il quinto pavimento, quello a 29.85 m, è illuminato da quattro finestroni a una quota circa pari a 33 metri. È probabile che l'antica cella campanaria si trovasse in corrispondenza di uno di questi finestroni (Dori and Dori 1881; Rondolino 1898).

Nel 1620 la Torre venne restaurata e consolidata; si hanno inoltre diverse raffigurazioni della città di Torino in cui è possibile notare la presenza di un orologio nel Campanile. Quest'ultimo deve essere stato sottratto ai tempi dell'usurpazione francese. Si riporta in Figura 29, una rappresentazione della città di Torino di Giovanni Tommaso Borgonio, risalente al 1665-1666, in cui si può apprezzare la presenza dell'orologio nella Torre.

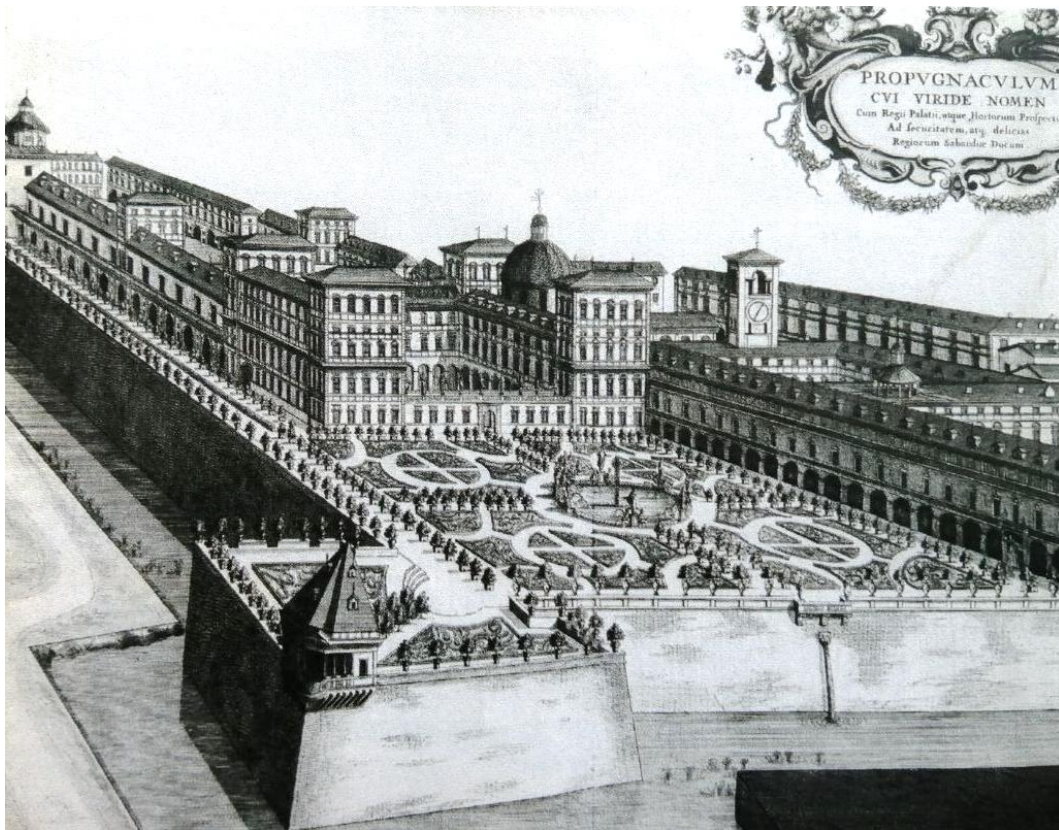


Figura 29. Rappresentazione di Torino di Giovanni Tommaso Borgonio 1665-1666

Il sovrano Vittorio Amedeo II, anche re di Sicilia, portò a Torino nel 1714 l'architetto siciliano Filippo Juvarra; quest'ultimo lasciò una significativa impronta, ancora oggi presente, nell'architettura di Torino costruendo diversi edifici: la Basilica di Superga, il Castello di Venaria, la Palazzina di Caccia di Stupinigi, il Castello di Rivoli, le chiese di Santa Cristina, San Filippo e della Madonna del Carmine. Oltre a queste strutture, gli fu commissionata la sopraelevazione della torre campanaria del Duomo di Torino. Questa era già stata pensata nel 1719, quando Luigi Andrea Guibert fu incaricato di valutare la possibilità di innalzare la torre di qualche metro; tuttavia, l'idea fu per un primo momento abbandonata.

Il cantiere per la sopraelevazione progettata da Juvarra, di cui si riporta uno schizzo in Figura 30, fu presumibilmente aperto nel 1720 e i lavori continuarono fino al 1723, quando vennero sospesi; furono portati a termine quelli relativi alla cella campanaria mentre non fu mai realizzata la cuspide.

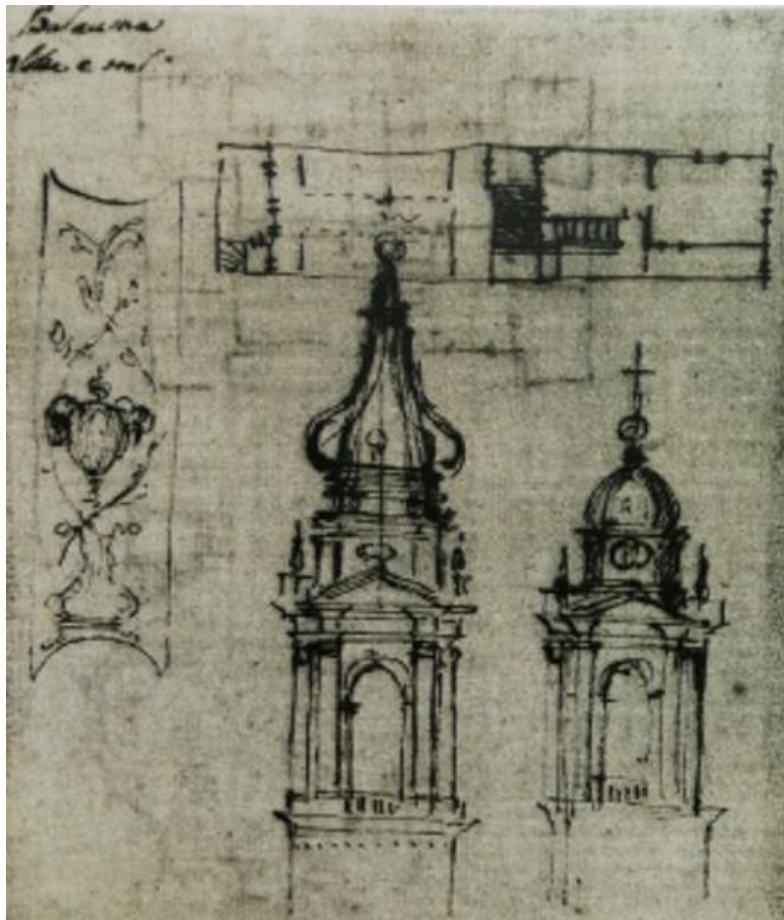


Figura 30. Schizzo di Juvarra della sopraelevazione della Torre Campanaria

Il progetto di sopraelevazione di Juvarra consisteva in una parte quattrocentesca, composta da architrave, fregio e cornicione, nella cella campanaria a pianta ottagonale, nella trabeazione ionica della cella e infine nella guglia a bulbo; quest'ultima non venne però realizzata anche se, negli anni seguenti, si è più volte pensato di completare l'opera iniziata da Juvarra. Si riportano di seguito, Figura 31, la pianta e il prospetto della sopraelevazione progettata da Juvarra, in cui è possibile apprezzare la guglia a bulbo.

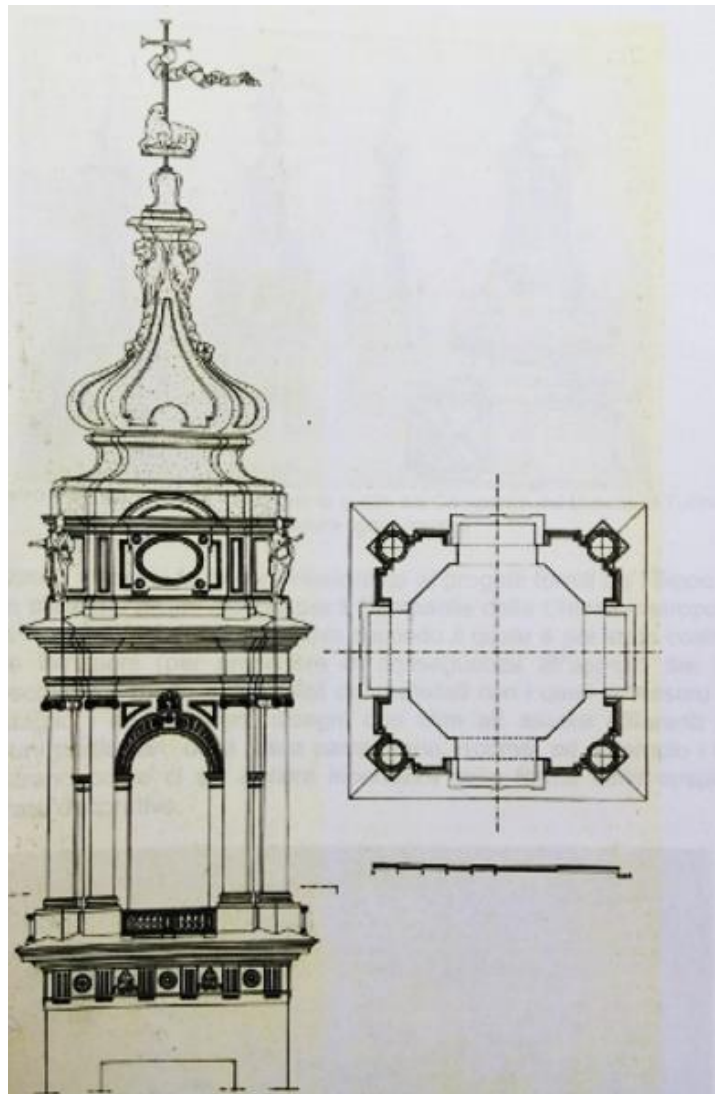


Figura 31. Pianta e prospetto della cella campanaria

La Torre Campanaria è stata restaurata nel 1998; quest'ultimo restauro ha reso possibile il suo inserimento all'interno del percorso del Museo Diocesano della Città di Torino, inaugurato nel 2008. Il percorso di visita termina infatti con la salita nella Torre.

2.2. Il monitoraggio del Campanile

La torre campanaria è stata monitorata con un sistema di acquisizione di dati di emissione acustica a 8 canali per valutare l'evoluzione nel tempo della rete di fessure presenti. I sensori sono stati posizionati alla base della torre tra il primo e il terzo livello dell'impalcato, come mostrato in Figura 32. La struttura è stata monitorata per un totale di due mesi; in particolare il monitoraggio è stato effettuato nei mesi di Giugno e Luglio 2018.

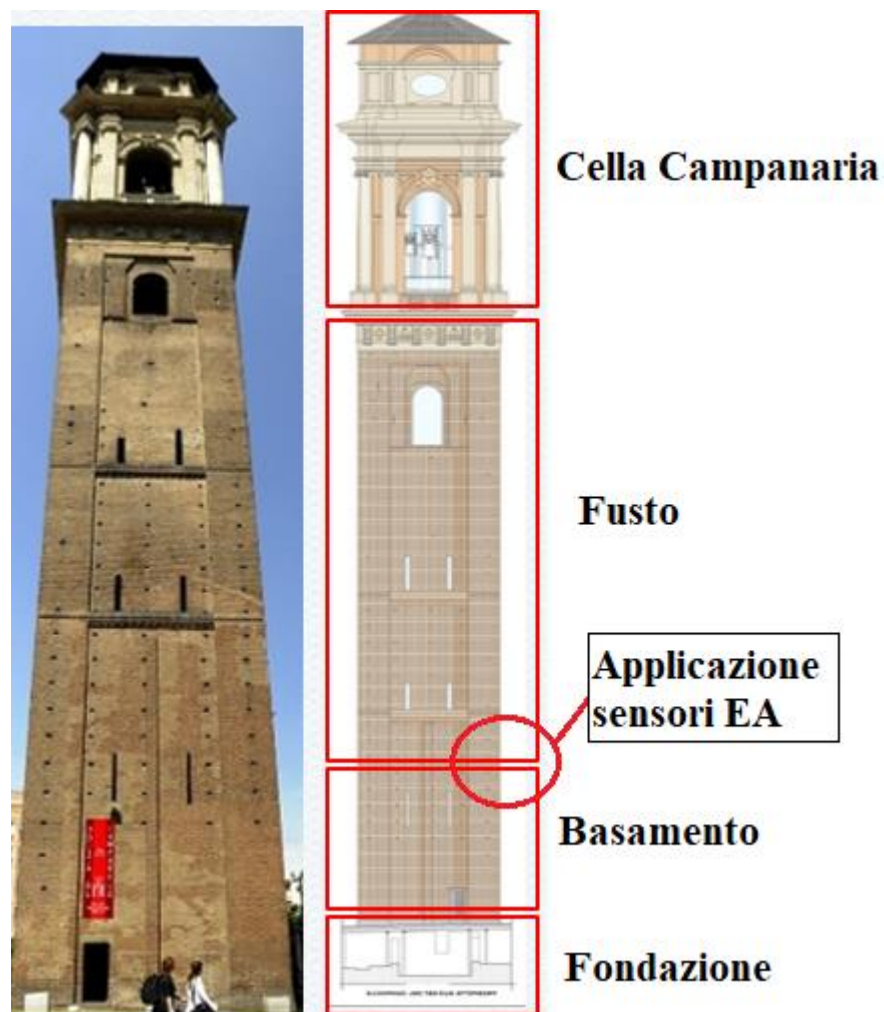


Figura 32. Posizione dei sensori

Lo studio consiste in diverse analisi statistiche e sono stati analizzati vari parametri per la valutazione del livello di danneggiamento della struttura monitorata (Carpinteri et al. 2008; Masera, Bocca, and Grazzini 2011; Niccolini et al. 2017).

La strumentazione per l'acquisizione dati utilizzata, l'AEmission System, esegue automaticamente diverse tipologie di analisi, che sono già state descritte nel capitolo precedente. Viene mostrato di seguito, Figura 33, il sistema di acquisizione dati utilizzato per il monitoraggio della Torre Campanaria.



Figura 33. Sistema di acquisizione dati utilizzato per il monitoraggio

Si riporta quindi una sintesi delle diverse fasi di analisi dei dati ottenuti.

Il primo parametro valutato è il numero cumulativo di segnali di emissione acustica N , ottenuto durante il periodo di monitoraggio. Un ulteriore parametro è η ; quest'ultimo rappresenta la dipendenza dal tempo del danneggiamento strutturale identificato nella fase di osservazione e può essere correlato alla velocità di propagazione delle micro fessure.

È stato espresso il rapporto tra il numero cumulativo di eventi di EA registrato durante il periodo di monitoraggio, N , e il numero ottenuto alla fine della fase di osservazione, N_d , in funzione del tempo, t .

$$\eta = \frac{E}{E_d} = \left(\frac{t}{t_d} \right)^{\beta_t} \quad (2.1)$$

Tramite la (2.1) si ricava il danneggiamento in funzione del tempo (Carpinteri et al. 2016; Carpinteri and Lacidogna 2006, 2008). Dalla (2.1) è possibile ricavare, utilizzando i dati ottenuti durante il periodo di osservazione, l'esponente β_i ed è dunque possibile fare una predizione sulla stabilità strutturale. Questa stessa valutazione può essere effettuata dalla distribuzione statistica delle magnitudo dei segnali di EA ricavata dalla legge di Gutenberg-Richter (Richter 1958):

$$\text{Log}_{10} N(\geq m) = a - bm \quad (2.2)$$

Dove:

- N è il numero di eventi di EA con magnitudo $\geq m$;
- a e b , o b -value, sono i parametri più adatti alla correlazione.

Il b -value, presente nella (2.2), è un parametro importante per la valutazione del danneggiamento delle strutture dal momento che decresce durante l'evoluzione del danno fino a raggiungere il suo valore critico, pari ad 1 (Carpinteri et al. 2008).

L'evoluzione del danneggiamento nella struttura in muratura è stata dunque descritta dalla valutazione dei diversi parametri presentati in precedenza.

Si riporta, in **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**, il numero cumulativo di eventi di emissione acustica e il numero di eventi registrato quotidianamente. Si osserva una concentrazione di eventi di Emissione Acustica nella parte centrale del periodo di monitoraggio; in questo periodo si ha infatti un incremento del numero cumulativo di eventi pari a 15000. È seguita una fase di filtraggio dei dati di emissione acustica durante la quale sono stati minimizzati i disturbi dell'ambiente e i rumori della strumentazione in maniera tale da effettuare uno studio accurato. Il risultato di questa fase viene riportato in Figura 35. I dati così ottenuti sono stati utilizzati per ricavare l'andamento nel tempo del b -value e del β_i ; la valutazione di questi parametri è stata effettuata analizzando finestre temporali di dimensione diversa. In particolare, è stata inizialmente effettuata una valutazione su gruppi di 200 eventi di EA, il cui risultato è mostrato in Figura 36, e successivamente di 100 eventi, il risultato ottenuto è mostrato in Figura 37.

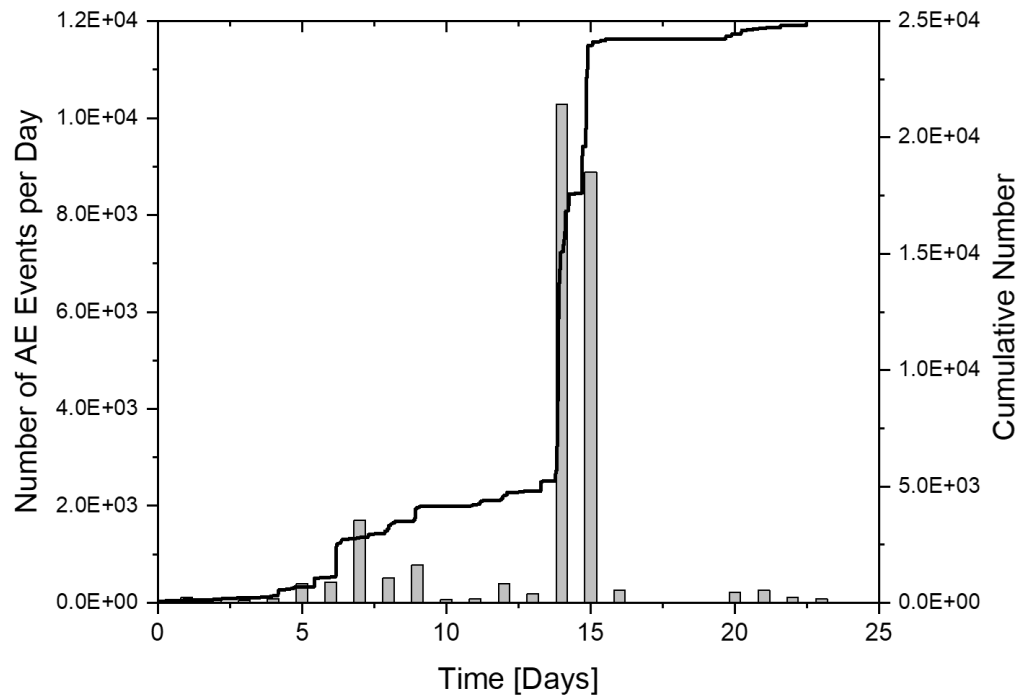


Figura 34. Numero cumulo e giornaliero di eventi di EA

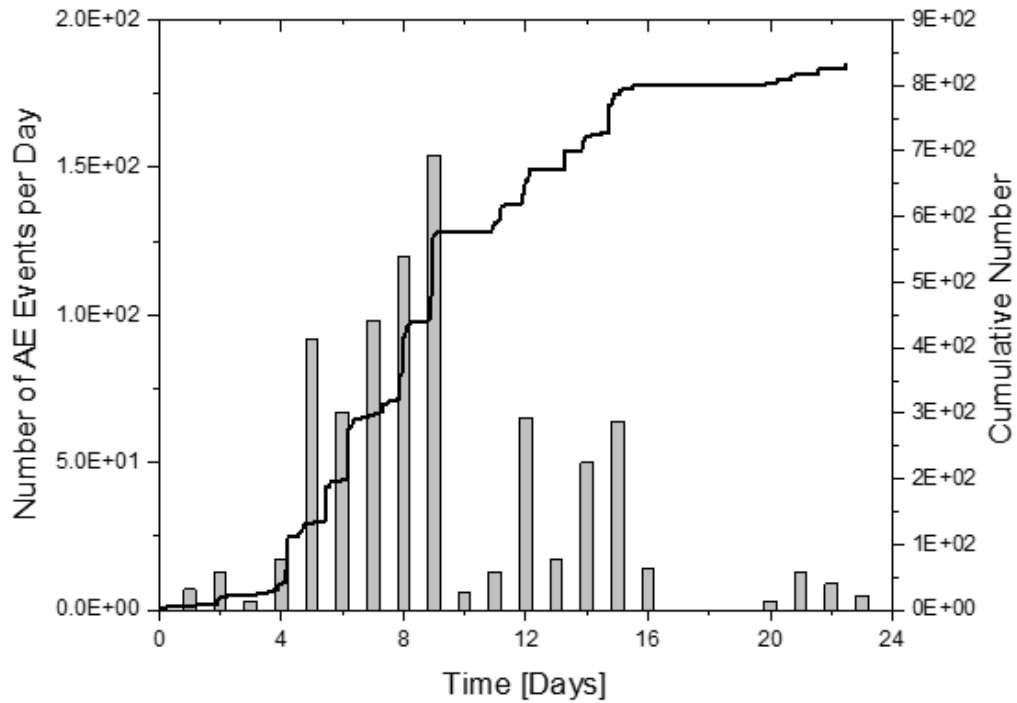


Figura 35. Numero cumulo e gionaliero di eventi di EA in seguito alla fase di filtraggio dei rumori

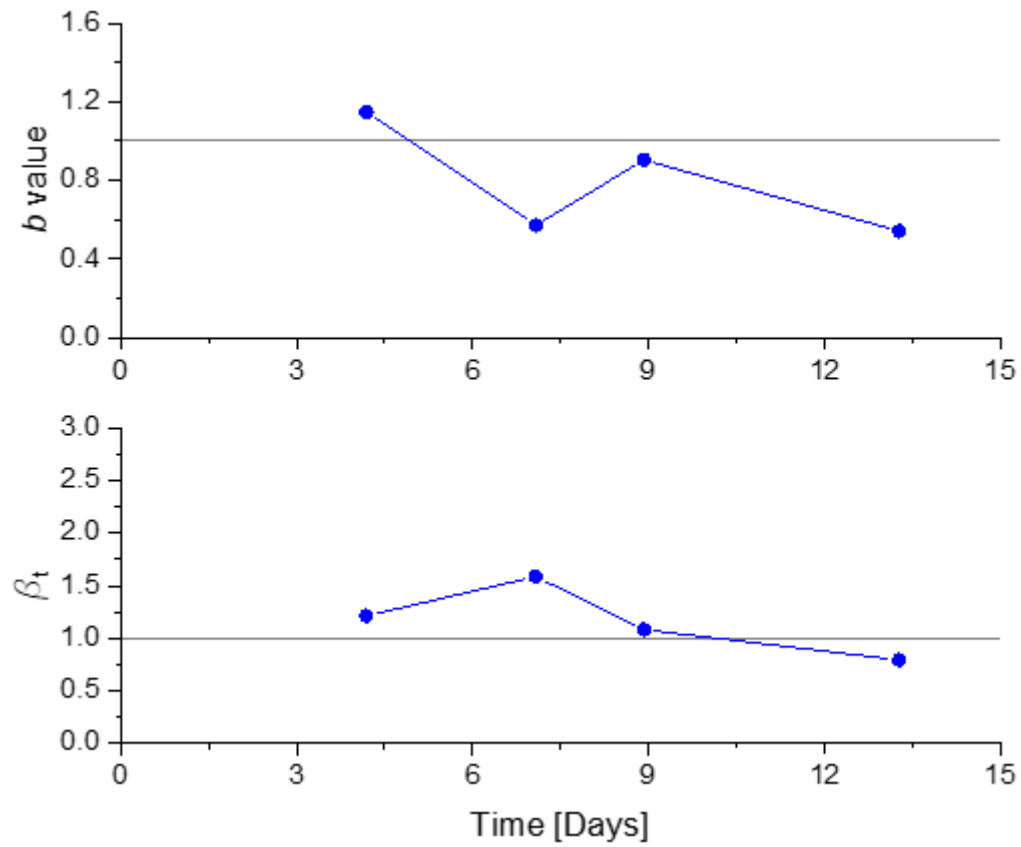


Figura 36. Andamento del b -value e del β_t , valutati in finestre temporali di 200 eventi

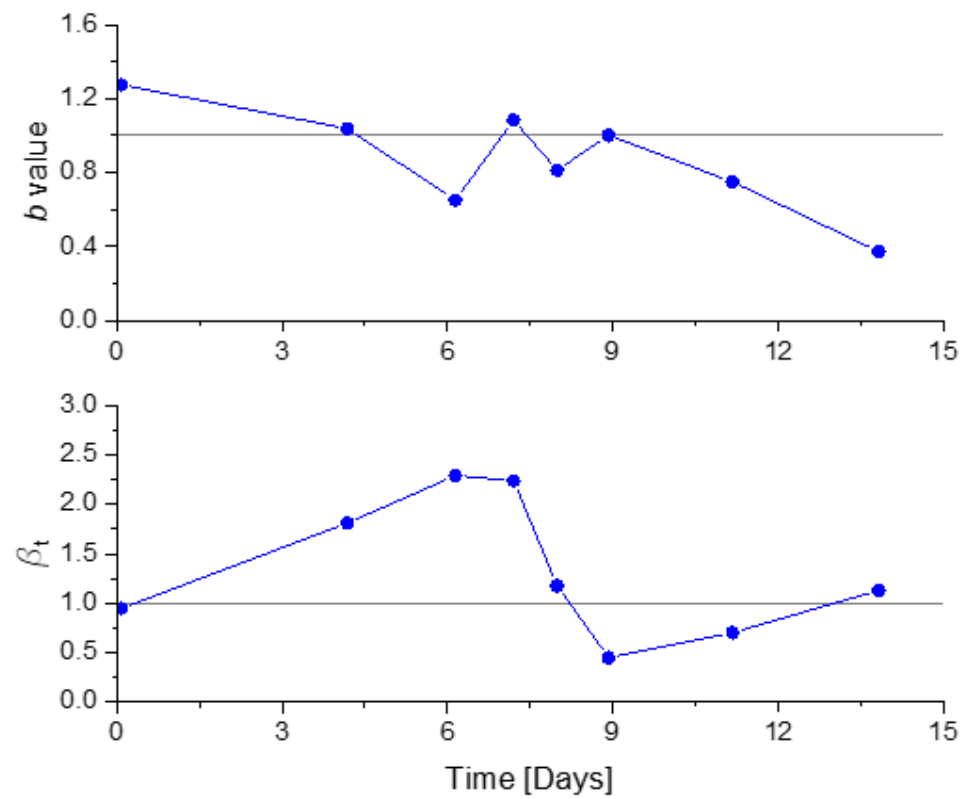


Figura 37. Andamento del b -value e del β_t , valutati in finestre temporali di 100 eventi

Sia in Figura 36 che in Figura 37, è possibile osservare che il b -value assume inizialmente valori maggiori di 1 e che successivamente subisce una decrescita fino a raggiungere valori inferiori a 1 nella fase terminale del monitoraggio. Questo andamento è compatibile con la decrescita delle macro-fessure localizzate alla base della torre. Nelle stesse figure viene riportato l'andamento del β_t : si osservano valori prossimi a 1; il risultato ottenuto evidenzia l'instabilità del processo di crescita delle fessure presenti.

Questi dati sono stati confrontati con i risultati ottenuti dalla modellazione agli elementi finiti della torre, descritta al paragrafo successivo.

È stata infine eseguita, secondo la procedura descritta nel capitolo precedente, la localizzazione delle sorgenti degli eventi di Emissione Acustica. Si riporta dunque, in Figura 38, la posizione dei sensori e le sorgenti localizzate; queste ultime sono state indicate con dei punti neri, per un totale di 46 sorgenti. Si può osservare che il numero maggiore di sorgenti è stato localizzato in prossimità delle aperture presenti nella zona inferiore della torre.

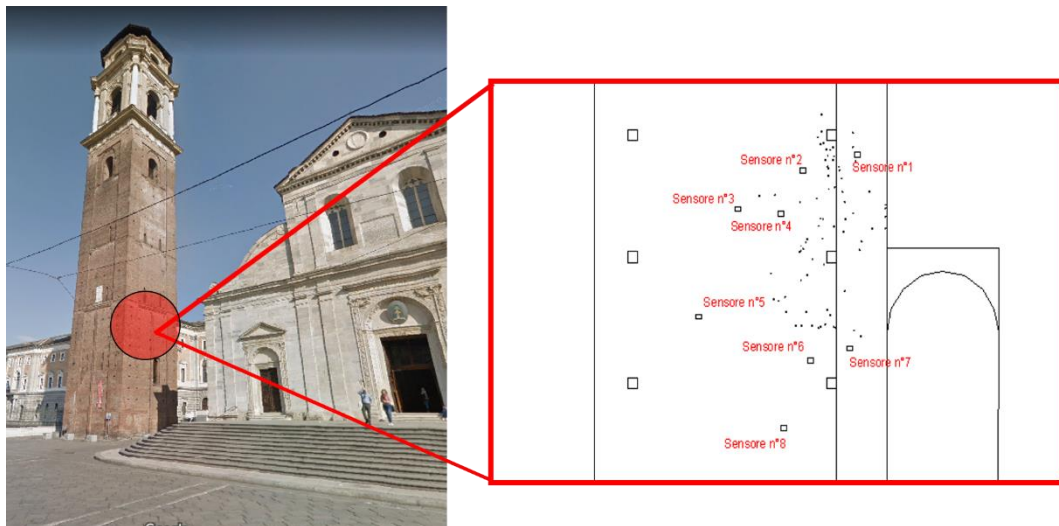


Figura 38. Localizzazione delle sorgenti degli eventi di Emissione Acustica

2.3. La modellazione del Campanile

Una prima fase di rilievo geometrico ha preceduto quella di modellazione; il rilievo del campanile è stato effettuato con uno strumento laser-scanner che permette di ottenere ogni piccolo dettaglio della struttura, definendo totalmente la geometria, sia interna che esterna.

Partendo dai risultati del rilievo è stato definito il modello agli elementi finiti con l'ausilio del software Midas FX, un modellatore geometrico tridimensionale. Tramite quest'ultimo è stato inizialmente definito il modello geometrico della torre, dal quale, grazie alla funzione di automeshing del software, è stato ricavato il modello FEM. È di seguito riportato, Figura 39, il modello geometrico ottenuto.

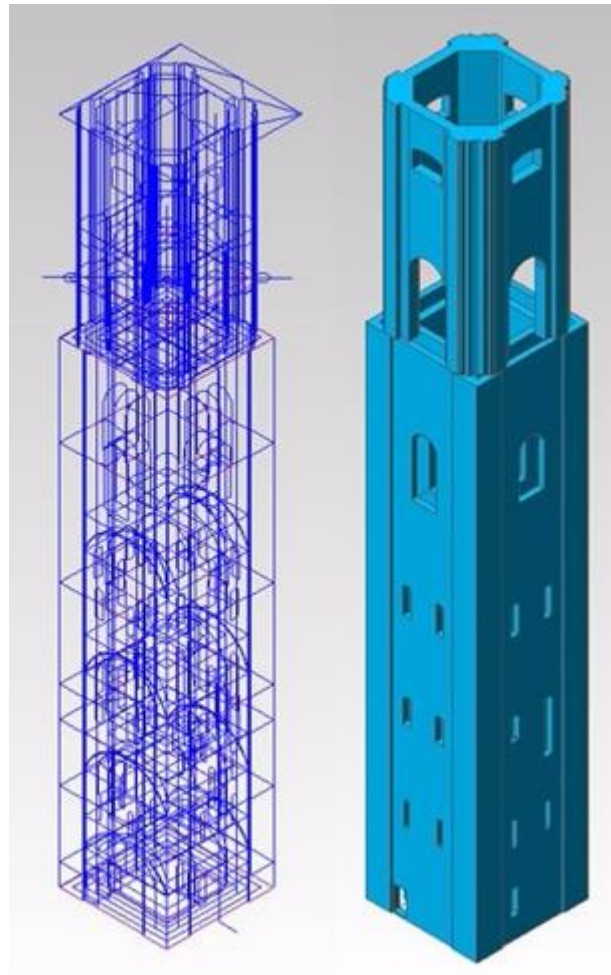


Figura 39. Modello geometrico della torre realizzato con il software Midas FX

Nella fase di “meshatura” sono stati assunti elementi piani di 3×10^2 mm per ogni lato; come risultato la mesh geometrica è costituita da 20954 nodi e da 21143

elementi, di questi ultimi 29 sono di tipo “Truss”, 162 di tipo “Beam” e 20952 di tipo “Plate”. Nel modello, oltre ai muri esterni di supporto, sono presenti altri elementi di piano (“floor elements”) ovvero le volte a botte; queste ultime sono state modellate anche con elementi tipo guscio 3D piatti.

È stata fatta particolare attenzione nella modellazione della connessione tra la parte Romana della torre e la cella campanaria di Juvarra, realizzata con diversi materiali e diverse forme come si può osservare in Figura 40.

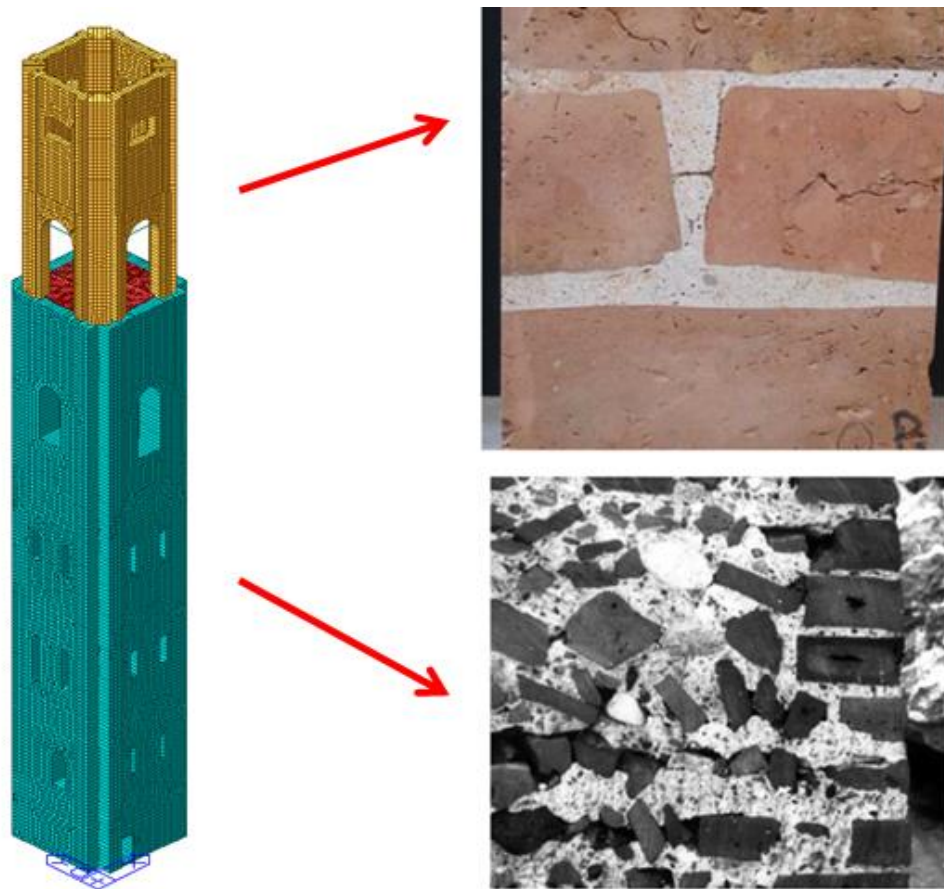


Figura 40. Differenze nella modellazione delle parti della torre

In particolare sono stati inseriti degli elementi sottili, osservabili nelle Figura 41 e Figura 42, che fungono da collegamento delle due diverse parti della Torre Campanaria; in questo modo il peso della Cella Campanaria viene scaricato gradualmente sulla parte quattrocentesca del Campanile. Sono state inoltre inserite all'interno del modello delle catene in corrispondenza dei “capochiavi” osservabili dall'esterno; i “capochiavi” esterni e le catene inserite sono osservabili in Figura 43. In quest'ultima si può osservare che alcune catene non circoscrivono la Torre;

questo è dovuto al fatto che sono state inserite soltanto in corrispondenza dei “capochiavi” visibili esternamente. L’operazione risulta quindi a favore di sicurezza, essendo sicuramente le catene in numero inferiore a quelle realmente presenti.

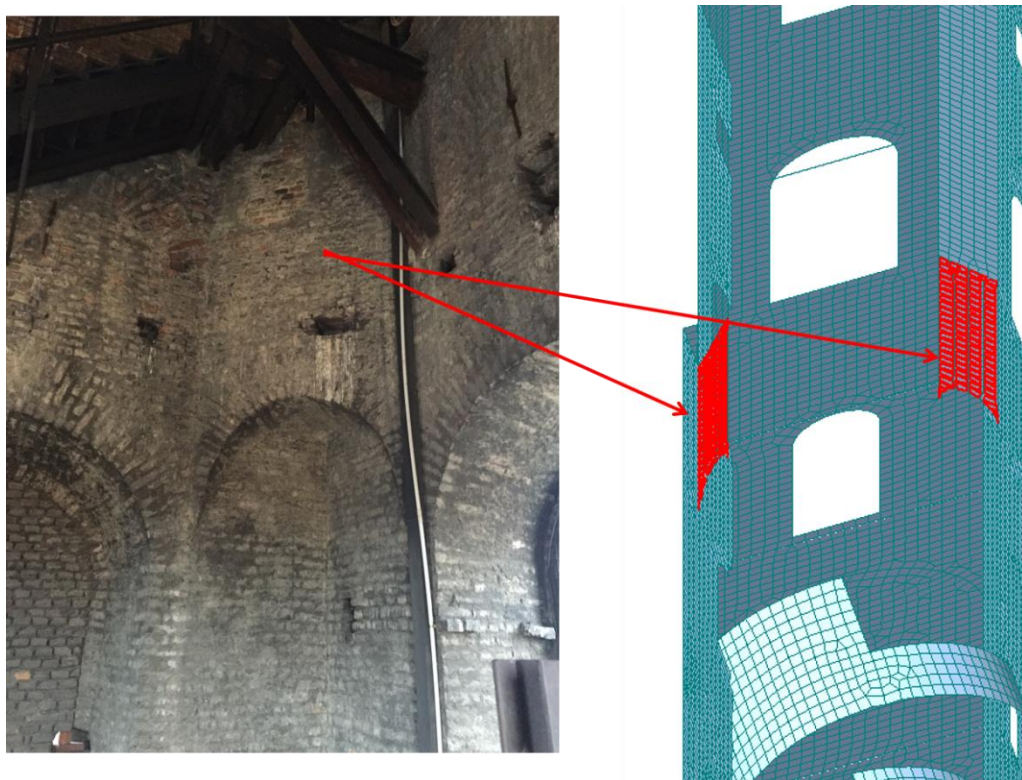


Figura 41. Aspetti di dettaglio della modellazione

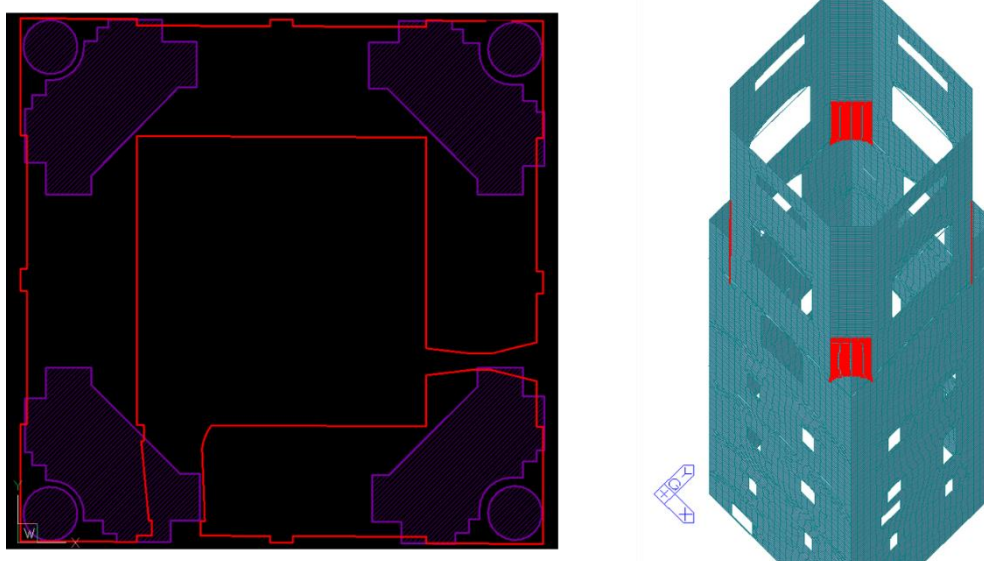


Figura 42. Aspetti di dettaglio della modellazione



Figura 43. Capochiavi esterni e catene inserite nel modello

Una volta ultimato, il modello è stato sottoposto a un'analisi statica globale, nella quale i carichi sono stati combinati secondo la combinazione fondamentale (utilizzata solitamente per le verifiche allo Stato Limite Ultimo, S.L.U.) e secondo quella caratteristica o rara (utilizzata solitamente per le verifiche allo Stato Limite di Esercizio, S.L.E.), e a un'analisi dinamica lineare, ovvero un'analisi modale.

Il primo passo consiste nella valutazione del “Fattore di Confidenza” per la riduzione delle resistenze medie dei materiali; questo è stato calcolato utilizzando la tabella presente nella Circolare n. 26 del 02/12/2010. In Figura 44 sono evidenziati i valori scelti in base alle informazioni note sulla struttura in esame. Si riporta nella seguente equazione il calcolo del “Fattore di Confidenza”.

$$F_c = 1 + \sum_{k=1}^4 F_{ck} = 1 + 0 + 0.06 + 0.12 + 0.06 = 1.24 \quad (2.3)$$

È stato dunque necessario, per lo svolgimento delle analisi, analizzare nel dettaglio tutti i carichi a cui la struttura è sottoposta; si riporta di seguito un elenco delle azioni considerate:

- Carichi verticali: sono stati considerati i pesi propri, i carichi permanenti portati e i carichi accidentali relativi alle quattro volte presenti, al solaio in

legno e al tetto; è stato preso in considerazione anche il peso delle quattro campane presenti nella cella campanaria;

- Azioni orizzontali: sono stati valutati i valori dell'azione sismica e della pressione esercitata dal vento sulla torre.

Rilievo geometrico	identificazione delle specificità storiche e costruttive della fabbrica	Proprietà meccaniche dei materiali	Terreno e fondazioni
rilievo geometrico completo $F_{C1} = 0.05$	restituzione ipotetica delle fasi costruttive basata su un limitato rilievo materico e degli elementi costruttivi associato alla comprensione delle vicende di trasformazione (indagini documentarie e tematiche) $F_{C2} = 0.12$	parametri meccanici desunti da dati già disponibili $F_{C3} = 0.12$	limitate indagini sul terreno e le fondazioni, in assenza di dati geotecnici e disponibilità d'informazioni sulle fondazioni $F_{C4} = 0.06$
rilievo geometrico completo, con restituzione grafica dei quadri fessurativi e deformativi $F_{C1} = 0$	restituzione parziale delle fasi costruttive e interpretazione del comportamento strutturale fondate su: a) limitato rilievo materico e degli elementi costruttivi associato alla comprensione e alla verifica delle vicende di trasformazione (indagini documentarie e tematiche, verifica diagnostica delle ipotesi storiografiche); b) esteso rilievo materico e degli elementi costruttivi associato alla comprensione delle vicende di trasformazione (indagini documentarie e tematiche) $F_{C2} = 0.06$	limitate indagini sui parametri meccanici dei materiali $F_{C3} = 0.06$	disponibilità di dati geotecnici e sulle strutture fondazionali; limitate indagini sul terreno e le fondazioni $F_{C4} = 0.03$
	restituzione completa delle fasi costruttive e interpretazione del comportamento strutturale fondate su un esaustivo rilievo materico e degli elementi costruttivi associato alla comprensione delle vicende di trasformazione (indagini documentarie e tematiche, eventuali indagini diagnostiche) $F_{C2} = 0$	estese indagini sui parametri meccanici dei materiali $F_{C3} = 0$	estese o esaustive indagini sul terreno e le fondazioni $F_{C4} = 0$

Figura 44. Calcolo del "Fattore di Confidenza"

I passi eseguiti per il calcolo delle azioni e i valori ottenuti sono schematizzati nelle seguenti figure e tabelle.

Tabella 1. Diametro e Peso delle Campane

Carichi verticali: Campane	
Diametro [cm]	Peso [kg]
141	2625
110	1449
100	997.5
80	609

In Figura 45 è mostrata una schematizzazione degli elementi considerati nel calcolo dei carichi verticali.

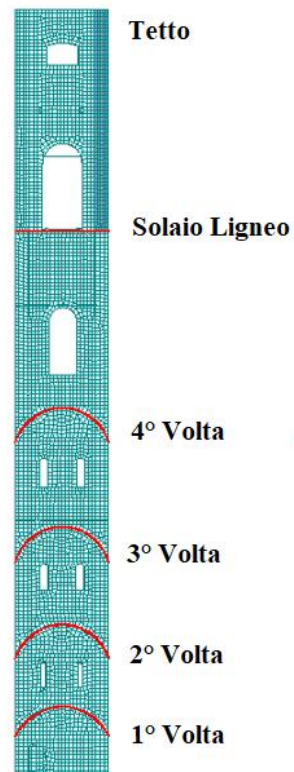


Figura 45. Schematizzazione degli elementi considerati nel calcolo dei carichi verticali

I pesi propri dei diversi elementi sono stati valutati moltiplicandone lo spessore per il peso specifico dei materiali:

- 1° Volta: spessore pari a 30 cm e peso specifico pari a 18 kN/mc;
- 2° Volta: spessore pari a 30 cm e peso specifico pari a 18 kN/mc;
- 3° Volta: spessore pari a 30 cm e peso specifico pari a 18 kN/mc;
- 4° Volta: spessore pari a 30 cm e peso specifico pari a 18 kN/mc;
- Solaio Ligneo: spessore pari a 12 cm e peso specifico pari a 5.75 kN/mc.

Le volte sono state considerate come ambienti suscettibili ad affollamento e dunque presentano un carico accidentale pari a 5 kN/mq. Per quanto riguarda il tetto, il carico accidentale è la neve e il suo valore è stato valutato secondo le indicazioni della Normativa vigente.

Tabella 2. Carichi verticali

Carichi verticali: Volte, Solaio Ligneo e Tetto			
Elemento	Peso Proprio [kN/mq]	Permanente Portato [kN/mq]	Accidentale [kN/mq]
1° Volta	5.4	7.15	5
2° Volta	5.4	6.24	5
3° Volta	5.4	6.09	5
4° Volta	5.4	5.61	5
Solaio Ligneo	0.69	0	5
Tetto	0.981	0.981	1.23

Si prosegue con il calcolo dell'azione sismica secondo le indicazioni della Normativa; i passi seguiti sono schematizzati nella seguente tabella.

Tabella 3. Calcolo Azione Sismica

Azione Sismica	
Vita Nominale (V_n)	50 anni
Classe d'uso	IV
Coefficiente d'uso (C_u)	2.0
Zona sismica	4 - Comune di Torino
Longitudine	7.674091° E
Latitudine	45.070433° N
Categoria di sottosuolo di fondazione	B
Coefficiente topografico	1.0
Coefficiente di struttura (q)	1

Si riporta infine, Figura 46, l'andamento lungo l'altezza della torre dell'azione esercitata dal vento, calcolato dal Software con il quale è stata modellata la Torre.

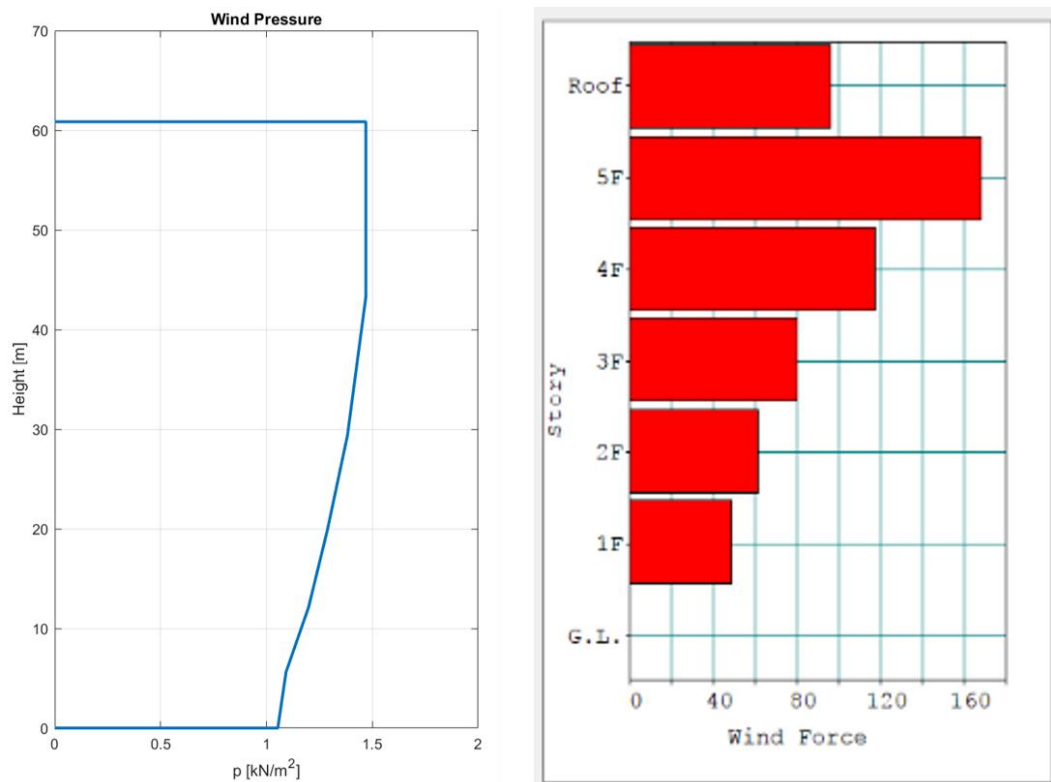


Figura 46. Azione del vento

Si riporta di seguito il risultato dell'analisi statica, Figura 47, dalla quale è possibile notare che i valori più elevati di tensione sono stati ottenuti nella parte inferiore della torre, dove sono stati posizionati i sensori di EA, e in particolare in corrispondenza delle finestre; a causa della presenza delle aperture si ha una concentrazione delle tensioni.

In Figura 48 si riporta un particolare della zona in cui è stato ottenuto il valore di tensione verticale maggiore; il valore di tensione ottenuto è pari a 0,9 MPa.

Inoltre, è stato effettuato manualmente il calcolo della tensione alla base della Torre:

$$\sigma = \frac{N}{A} = \frac{66526}{63.15} = 1.05 \text{ MPa} \quad (2.4)$$

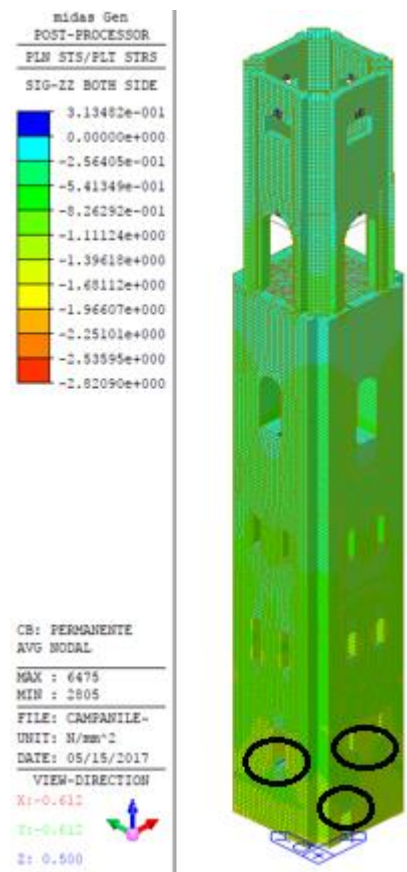


Figura 47. Tensioni valutate nell'analisi FEM

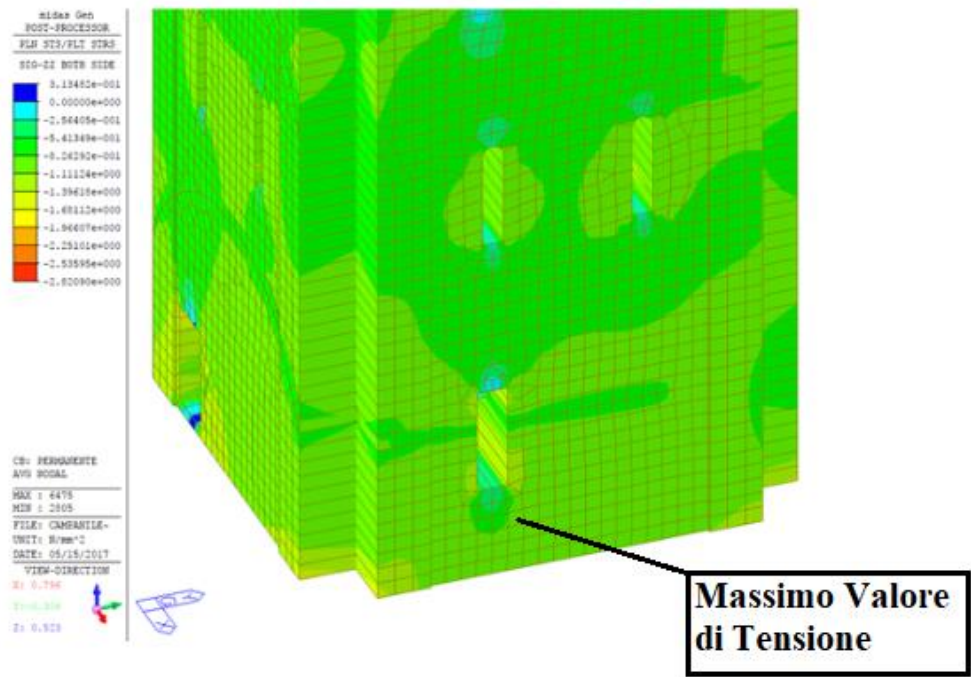


Figura 48. Particolare della zona in cui si ha il massimo valore di tensione

Il valore della tensione alla base della Torre ottenuto dal modello FEM è stato confrontato con i risultati ottenuti dalla Prof.ssa Binda (Binda and Anzani n.d.). Nelle seguenti immagini, Figura 49 e Figura 50, si può osservare come la struttura in esame si collochi sui trend ricavati dalla Prof.ssa Binda in seguito allo studio di diverse torri in muratura. In particolare, in Figura 49 viene rappresentato l'andamento delle tensioni verticali al variare dell'altezza delle torri; successivamente viene invece mostrato l'andamento della tensione verticale al variare del rapporto tra l'altezza della struttura e lo spessore delle pareti murarie.

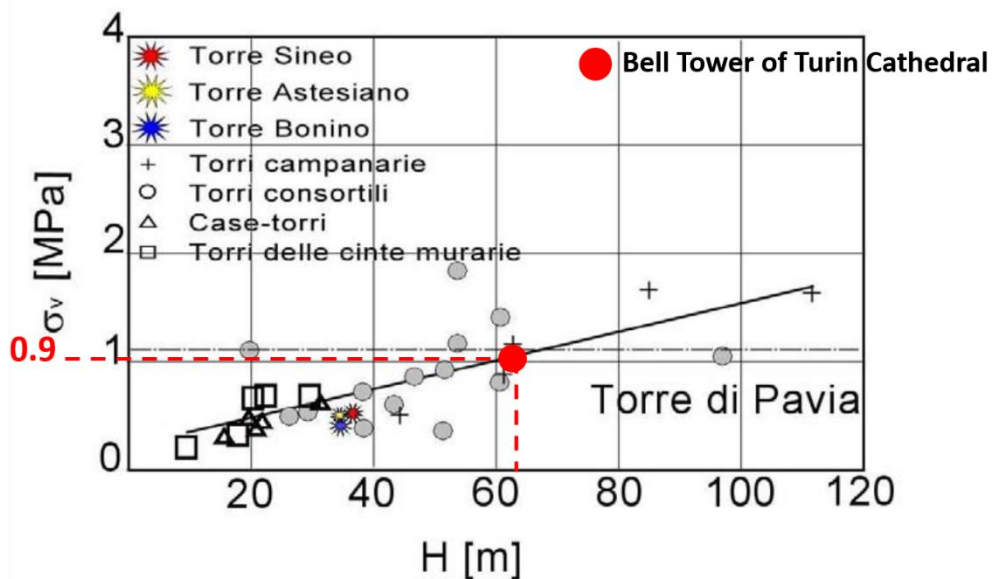


Figura 49. Tensione verticale al variare dell'altezza

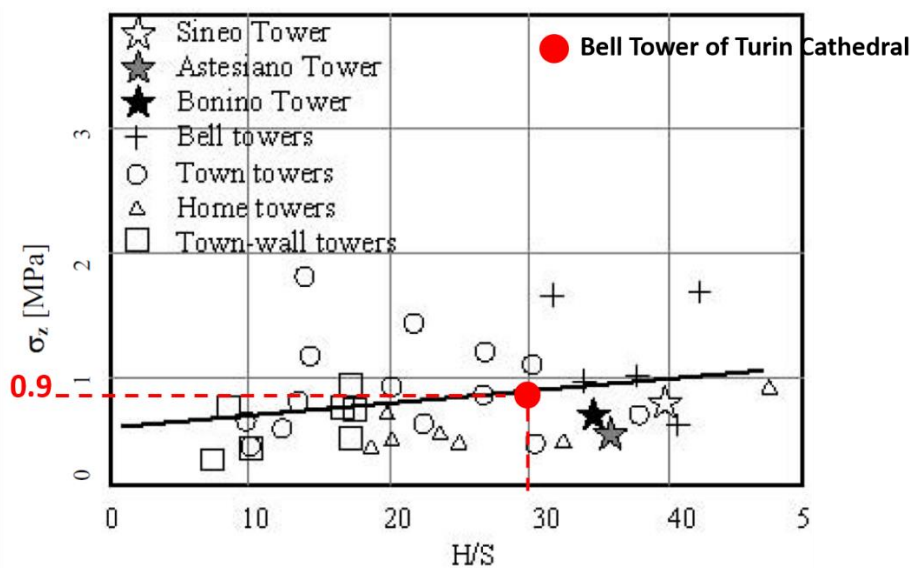


Figura 50. Tensione verticale al variare del rapporto tra l'altezza della torre e lo spessore dei muri esterni

Si riportano di seguito i risultati dell'analisi modale eseguita; in particolare in Figura 51, sono mostrati i primi tre modi di vibrare: si può osservare che il primo e il secondo sono flessionali, caratterizzati principalmente da spostamenti in x e in y, mentre il terzo è torsionale. Mentre in Tabella 4 sono riportati i risultati ottenuti nell'analisi degli autovalori e in Tabella 5 le masse partecipanti ai singoli modi; in quest'ultima tabella sono stati evidenziati i valori delle masse predominanti nei primi tre modi di vibrare, a conferma di quanto mostrato in Figura 51: il primo e il secondo modo hanno una massa partecipante predominante, rispettivamente, in direzione x e in y, mentre il terzo alla rotazione attorno l'asse verticale.

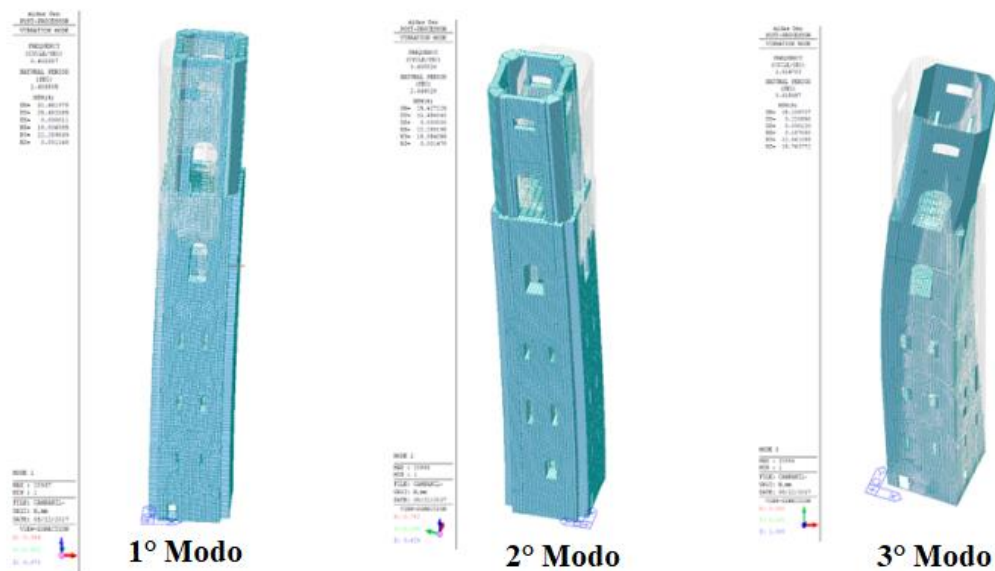


Figura 51. Primi tre modi di vibrare ottenuti dall'analisi modale

Tabella 4. Analisi degli autovalori

Mode n°	Frequency		Period
	[rad/s]	[cycle/s]	[s]
1	2.5300	0.4027	2.4835
2	2.5687	0.4088	2.4460
3	10.208	1.6247	0.6155

Tabella 5. Masse modali partecipanti

Mode n°	Tran-X	Tran-Y	Tran-Z	Rotn-X	Rotn-Y	Rotn-Z
	Mass (%)	Mass (%)	Mass (%)	Mass (%)	Mass (%)	Mass (%)
1	31.452	25.482	0	18.006	22.289	0.001
2	25.427	31.456	0	22.288	18.054	0.001
3	15.108	0.220	0	0.187	12.861	19.762

Il periodo relativo al primo modo di vibrare è stato anche calcolato analiticamente ed è riportato nell'equazione (2.5); quest'ultima è la formulazione del periodo proprio di oscillazione di una mensola con massa uniformemente distribuita lungo l'altezza.

$$T_1 = \frac{2\pi}{1.875^2} \frac{H^2}{\rho} \sqrt{\frac{\gamma}{Eg}} = \frac{2\pi}{1.875^2} \frac{60.85^2}{3.20} \sqrt{\frac{1800}{114700000 \cdot 9.80665}} = 2.60 \text{ s} \quad (2.5)$$

Dove:

- H è l'altezza della Torre, espressa in m;
- ρ è il raggio d'inerzia, espresso in m²;
- γ è il peso specifico della muratura, espresso in kg/m³;
- E è il modulo elastico della muratura, espresso in kg/m²;
- g è l'accelerazione gravitazionale, espressa in m/s².

I risultati ottenuti tramite la tecnica di EA, specialmente quelli mostrati nella Figura 36 e Figura 37, sembrano essere in accordo con il percorso delle fessure e con il modello numerico.

Capitolo 3

3. L'incastellatura delle campane

L'impianto campane, all'interno della cella campanaria juvarriana, è sostenuto da due incastellature in legno situate a Nord-Ovest, lato Via XX Settembre, e a Sud-Est, lato Ingresso Torre Campanaria, e sono state rispettivamente indicate come "Struttura a" e "Struttura b". Queste ultime sono rispettivamente mostrate nella Figura 52 e nella Figura 53.



Figura 52. Foto della "Struttura a"



Figura 53. Foto della "Struttura b"

Gli elementi portanti, ritti e traversi, sono realizzati interamente in legno; sono inoltre presenti diversi elementi metallici, più o meno recenti, con diverse funzioni:

- Irrigidimento strutturale, specie nei ritti e traversi che delimitano gli scomparti all'interno dei quali sono presenti le campane;
- Collegamento tra i diversi elementi portanti;
- Irrigidimento dei collegamenti tra ritti e traversi;
- Ancoraggio degli elementi con la muratura della cella campanaria.

Le due strutture sono connesse tramite dei profili metallici a "C" che si estendono dai ritti, più interni, della "Struttura a" fino al traverso, anch'esso il più interno, della "Struttura b". Si considera come quota di riferimento quella del piano di calpestio, realizzato in tavole di legno, della cella campanaria, ovvero a +43,40 m dalla base della torre; rispetto a quest'ultima, i due castelli poggiano su due piani a quote diverse tra loro.

Si indica con "x" la direzione che va da Nord-Est a Sud-Ovest e con "y" la direzione a essa ortogonale, ovvero quella lungo la quale oscillano le campane.

La cella campanaria ospita un concerto di quattro campane, due sostenute dalla "Struttura a" e due dalla "Struttura b"; le dimensioni e i pesi di queste ultime sono stati precedentemente riportati nella Tabella 1. Le campane sono montate secondo il "Sistema Ambrosiano" di cui si riporta una rappresentazione della meccanica e della tecnica di suono nella Figura 54.

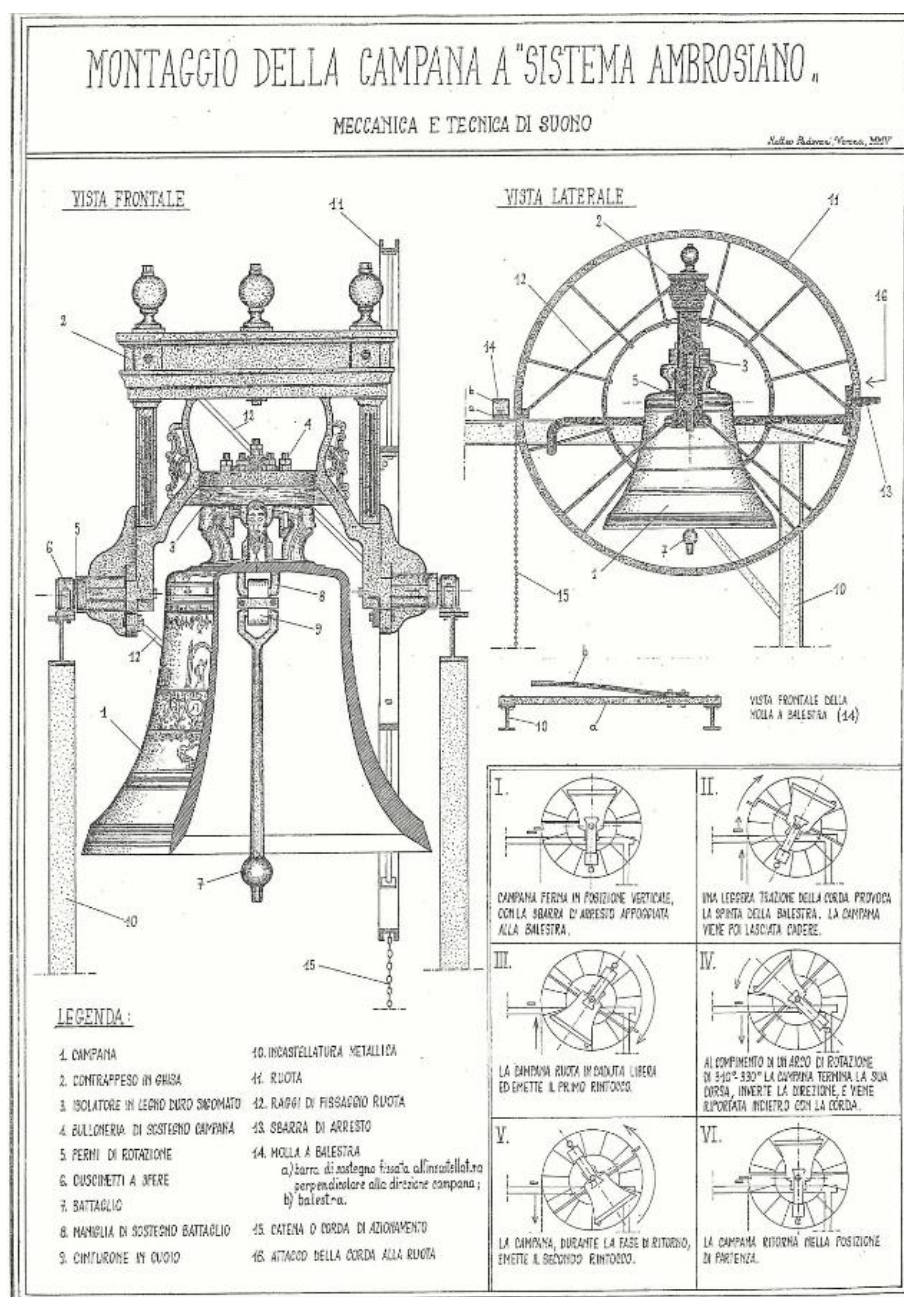


Figura 54. Montaggio della campana a "Sistema Ambrosiano"

3.1. Rilievo geometrico e del degrado

Gli “Obiettivi dell’ispezione” e il “Procedimento per l’esecuzione dell’ispezione” sono definiti dalle Norme UNI; si riporta di seguito la procedura per la diagnosi di elementi lignei:

- Identificazione specie legnosa secondo la Normativa UNI 11118:2004 “Beni culturali. Manufatti lignei. “Criteri per l’identificazione delle specie legnose”;
- Determinazione dell’umidità del legno secondo la Normativa UNI 11204:2007 “Beni Culturali. Manufatti lignei. Determinazione dell’umidità”;
- Descrizione generale e rilievo geometrico:
 - Dimensioni e forma dell’elemento;
 - Particolarità geometriche quali smussi e deformazioni;
 - Particolarità di accrescimento (posizione del midollo, irregolarità di accrescimento quali biforcazioni, sciabolature, ecc.);
 - Tipo, posizione ed estensione dei principali difetti;
 - Forme di degradamento e/o danno eventualmente presenti;
 - Zone critiche come definite in 3.13;
 - Altre caratteristiche ritenute influenti sulla capacità portante dell’elemento (ad esempio la presenza di trattamenti superficiali);
- Classificazione secondo resistenza;

Nei successivi paragrafi si riportano le descrizioni delle incastellature delle campane oggetto dello studio.

3.1.1. Struttura a

L'incastellatura, denominata “Struttura a”, è a tre scomparti e ospita un concerto di due campane. Questa consiste nell'unione di ritti e traversi in legno; alcuni traversi denominati T6, T7, T8 si trovano a una quota tale per cui non è stato possibile ispezionarli e non sono dunque riportate informazioni dettagliate in termine di geometria e degrado. I suddetti elementi sono mostrati nella Figura 55 e nella Figura 56; da queste ultime è possibile osservare che:

- Il traverso T6 si estende, in direzione x, da un'estremità all'altra della cella campanaria e ha quindi una lunghezza pari a 7,17 m;
- I traversi T7 e T8 si estendono, in direzione y, dal traverso T6 alla muratura della cella campanaria e hanno dunque una lunghezza pari a 2 m;
- Sono presenti delle barre metalliche che uniscono il al traverso T6 alla muratura della cella campanaria;
- Il collegamento tra T6 e T7 e quello tra T6 e T8 sembra essere del tipo “lap joint”; questo consiste nel sovrapporre due elementi la cui geometria è modificata nelle parti interessate dal collegamento per migliorarne l'efficacia.



Figura 55. Elementi della "Struttura a" non ispezionabili



Figura 56. Elementi della "Struttura a" non ispezionabili

Da un confronto con gli altri elementi della struttura rilevati, è possibile definire le dimensioni delle sezioni trasversali di questi elementi: 21x21 cm.

I ritti della struttura in esame poggiano su un piano rialzato, rispetto al piano di calpestio della cella campanaria, di 5 cm; mentre il piano di calpestio che si ha tra i ritti stessi è a +23 cm. Le diverse quote sono mostrate nella Figura 57.



Figura 57. Quote di riferimento nella "Struttura a"

Ritto P8

Il ritto ha un'altezza pari a 4,50 m e una sezione trasversale pari a 21x21 cm. Ad un'altezza pari a 2,60 m è collegato con il traverso T9; l'unione è del tipo “testa a testa” con delle barre metalliche irrigidenti. È inoltre presenta alla stessa quota un profilo a C che penetra l'elemento; questo si estende fino al ritto P11 con la funzione di irrigidire la struttura e sopperire alla mancanza di un ulteriore traverso di collegamento tra i due ritti. Nella stessa zona è infine presente un ulteriore profilo a C che funge da connessione con la “Struttura b”; i profili metallici appena descritti sono mostrati nella Figura 58.



Figura 58. Profili metallici nel Ritto P8

Si ha inoltre la presenza di un'ulteriore barra metallica che si estende, in direzione y, fino alla muratura; questa è bullonata anche agli altri due ritti, P9 e P10, allineati, in y, con il ritto in esame.

Prospetto Nord-Ovest

Si osservano diverse fessure di lieve apertura, ordine del millimetro.

Prospetto Nord-Est

Si hanno diverse fessure di lieve apertura, ordine del millimetro. È stata invece rilevata la presenza di due nodi:

- Al centro dell'elemento, a una quota di 200 cm dalla base del ritto, di diametro pari a 4 cm;
- A 5 cm a sinistra dal centro, a una quota di 400 cm dalla base del ritto, di diametro pari a 10 cm.

La zona terminale risulta degradata, per un'estensione di circa 30 cm come si può osservare nella Figura 59, in cui si può anche vedere il nodo di dimensione maggiore.



Figura 59. Degrado e nodo presenti nel Ritto P8

Prospetto Sud-Est

Sono presenti diverse fessure che si sviluppano per tutta l'altezza dell'elemento; alcune delle quali caratterizzate da aperture di 1 cm. Si osservano diversi nodi:

- A 3 cm a sinistra dal centro, a una quota di 100 cm dalla base del ritto, di diametro pari a 4 cm;
- A 2 cm a destra dal centro, a una quota di 135 cm dalla base del ritto, di diametro pari a 3 cm;
- Al centro dell'elemento, a una quota di 180 cm dalla base del ritto, di diametro pari a 8 cm.

La zona in corrispondenza del collegamento con T9 è particolarmente deteriorata come si osserva nella Figura 60, in cui si può anche notare il nodo di dimensioni maggiori.



Figura 60. Degrado e nodo presenti nel Ritto P8

Prospetto Sud-Ovest

La parte destra dell'elemento è particolarmente deteriorata nella zona compresa tra 1 m e l'attacco con il traverso T9. Nella zona superiore, dopo T9, sono presenti

diverse fessure con apertura elevata. È presente un nodo a un'altezza pari a 2 m, a 2 cm a destra dal centro dell'elemento e con diametro pari a 9 cm.

Ritto P9

Il ritto ha un'altezza pari a 2,60 m e una sezione trasversale di dimensioni 28x28 cm; a una quota pari a 88 cm dalla base del ritto subisce una variazione nella sezione e, in direzione x, questa si riduce a 21 cm. Il collegamento con il traverso T9 è a "tenone e mortasa" come si può osservare nella Figura 61. Il ritto presenta inoltre, in direzione y, una bara metallica che si estende fino alla muratura della cella campanaria e che funge da irrigidimento; quest'ultima è anche bullonata al ritto P10.



Figura 61. Collegamento a "tenone e mortasa" tra il Ritto P8 e il Traverso T9

Prospetto Nord-Ovest, Prospetto Nord-Est

Non si hanno segni evidenti di degrado.

Prospetto Sud-Est

Nella zona in prossimità della testa del ritto si ha, per 50 cm, perdita di materiale.

Prospetto Sud-Ovest

L'elemento presenta diverse fessure diffuse su tutta l'altezza la cui massima apertura è di qualche millimetro. Si ha un nodo centrale, come si può osservare nella

Figura 61, di diametro pari a 8 cm e con centro situato a 10 cm più in basso della testa del ritto.

Ritto P10

Per il P10 valgono le stesse considerazioni, fatte per la geometria e per i collegamenti, già fatte per il ritto P9.

Non si hanno, infine, segni evidenti di degrado.

Ritto P11

Il ritto ha un'altezza di 4,50 m e una sezione trasversa di 21x28 cm; nella parte inferiore sono presenti due tavole lignee, di spessore pari a 3,5 cm, e l'ingombro del ritto diventa 28 cm. Il collegamento con il traverso T10 è del tipo “testa a testa” con delle barre metalliche irrigidenti; alcune di queste si estendono fino a oltrepassare l'estremità del ritto stesso come si può osservare nella Figura 62.



Figura 62. Collegamento tra il Ritto P8 e il Traverso T9

Nella stessa figura è possibile osservare sia il profilo a C già presentato nella descrizione del ritto P8 che i profili che fungono da collegamento con la “Struttura b”. Si hanno inoltre altre barre metalliche che interessano, oltre al P11, gli altri due ritti ad esso allineati ovvero il P12 e il P13:

- Una barra si estende in direzione y e si ancora nelle facce, in direzione x, dei ritti P11 e P13;
- Delle barre diagonali, presenti su entrambe le facce in direzione y, dei ritti che si ancorano al solaio della cella campanaria.

Queste strutture metalliche hanno lo scopo di irrigidire gli elementi essendo questi ultimi soggetti alle sollecitazioni trasmesse dalle oscillazioni delle campane.

Prospetto Nord-Ovest

L'elemento presenta a un'altezza non rilevabile un nodo marcio di dimensioni significative come si può notare nella Figura 63.



Figura 63. Nodo marcio nel Ritto P11

Prospetto Nord-Est

Non si hanno segni evidenti di degrado.

Prospetto Sud-Est

La zona nei pressi del collegamento con T6 risulta essere particolarmente degradata; tuttavia, vista l'altezza dell'elemento non è stato possibile rilevare con accuratezza l'estensione della zona degradata. Si assume dunque che questa sia pari a circa 50 cm.

Prospetto Sud-Ovest

Si hanno diverse fessure, alcune delle quali con apertura pari a 1 cm, che si estendono dalla base del ritto fino 2 m di altezza. È stato inoltre rilevato un nodo centrale di diametro pari a 4 cm e a un'altezza pari a 135 cm dalla base del ritto.

Ritto P12

La geometria e il collegamento con il traverso T10 del ritto in esame sono identici a quelli del ritto precedente. La sola differenza è la presenza di un plinto in calcestruzzo, di altezza pari a 25 cm, in cui è ammorsata una parte della base del ritto. Non si hanno, infine, segni evidenti di degrado.

Ritto P13

Il ritto in esame presenta le stesse caratteristiche geometriche del P12; la base del ritto in esame è inserita completamente nel plinto descritto in precedenza.

Prospetto Nord-Ovest

Si osservano diverse fessure su tutto lo sviluppo verticale dell'elemento; la parte inferiore del ritto è inoltre particolarmente degradata come si può osservare in Figura 64.

Prospetto Nord-Est, Prospetto Sud-Est, Prospetto Sud-Ovest

Non si hanno segni evidenti di degrado.



Figura 64. Degrado Ritto P13

Ritto P14

Il ritto ha un'altezza di 4,50 m e una sezione trasversale di 21x21 cm. È presente una barra metallica che collega tra loro i ritti ad esso allineati, ovvero il P15 e il P16, e si ancora alla muratura della cella campanaria. È inoltre presente un ulteriore profilo a C che collega tra loro i tre ritti. Il collegamento con il traverso T11 è del tipo “testa a testa” con la presenza di barre metalliche e di elementi lignei irrigidenti come si può osservare in Figura 65.

Prospetto Sud-Est

Si ha una fessura nella parte inferiore del ritto di apertura pari a 1 cm. Nella stessa figura si può notare la presenza di un nodo il cui centro è a 5 cm a sinistra del centro, a un'altezza di 20 cm dalla base del ritto e di diametro pari a 8 cm. Inoltre la zona compresa tra la prima barra metallica e il collegamento con T11 risulta essere particolarmente degradata, si ha infatti perdita di materiale.



Figura 65. Collegamento tra il Ritto P14 e il Traverso T11

Ritto P15 e Ritto P16

I ritti vengono esaminati insieme a causa della loro uguale geometria e della mancanza di evidenti segni di degrado; viene infatti osservata la presenza di fessure diffuse su tutta l'altezza degli elementi nel prospetto Sud-Ovest.

Gli elementi hanno un'altezza pari a 2,60 m e una sezione trasversale pari a 28x28 cm; questa subisce, a un'altezza di 93 cm dalla base del ritto, una riduzione, in direzione x, in seguito alla quale il lato risulta pari a 21 cm.

Traverso T9

Il traverso ha una lunghezza di 1,70 m e una sezione trasversale di dimensioni 21x30 cm. I collegamenti con i ritti P8, P9 e P10 sono stati descritti precedentemente; il traverso si ancora alla muratura della cella campanaria come

mostrato in Figura 66. È anche presente una barra metallica che si ancora alla muratura per mantenere il traverso in posizione. Sul traverso poggia il telaio di sostegno di una delle campane. Non si hanno, infine, evidenti segni di degrado.



Figura 66. Ancoraggio alla muratura del Traverso T9

Traverso T10

Il traverso ha una lunghezza di 2,50 m e una sezione trasversale di dimensioni 21x30 cm. I collegamenti con i ritti P11, P12 e P13 sono stati descritti precedentemente; la parte terminale del traverso risulta essere libera come mostrato in Figura 67. Sul traverso poggia il telaio di sostegno di una delle campane. Non si hanno, infine, evidenti segni di degrado.

Traverso T11

Il traverso ha una lunghezza di 1,70 m e una sezione trasversale di dimensioni 21x30 cm. I collegamenti con i ritti P14, P15 e P16 sono stati descritti precedentemente; il traverso si poggia alla muratura della cella campanaria come mostrato in Figura 68. Dalla figura si osservano anche le barre metalliche che sostengono il traverso. Sul traverso poggia il telaio di sostegno di una delle campane. Non si hanno, infine, evidenti segni di degrado.



Figura 67. Parte terminale del Traverso T10



Figura 68. Collegamento alla Torre del Traverso T11

3.1.2. Struttura b

L'incastellatura, denominata “Struttura b”, è a tre scoparti, a un unico livello, e ospita, come precisato precedentemente, un concerto di due campane. La struttura poggia su un sistema di cinque travi in legno inglobate nel solaio e, di conseguenza, solo una faccia di esse è osservabile dalla cella campanaria; queste sono in corrispondenza dei traversi in elevazione. Gli elementi sono stati nominati con “TSn”, con “n” variabile da 1 a 5.

La superficie superiore delle travi, piano d'appoggio per i ritti, si trova a una quota pari a +33 cm rispetto alla quota di riferimento, fatta eccezione per TS2, su cui poggia il ritto P2; questa infatti è a +35 cm. Si riportano di seguito le diverse quote considerate:

- Piano di calpestio della cella campanaria: 0 cm;
- Piano di calpestio della struttura b: +36,5 cm;
- Piano d'appoggio dei ritti, che coincide con l'estradosso del sistema di travi TS, escluso P2: +33 cm.

Il rilievo geometrico e di degrado, per ogni elemento portante della struttura, è suddiviso nei seguenti passi:

- Descrizione geometrica;
- Tipologia dei collegamenti;
- Descrizione del degrado osservato nelle superfici a vista.

Si procede con la descrizione dei singoli elementi portanti.

Ritto P1

Il ritto poggia sulla trave TS1 e ha un'altezza pari a 2,40 m; questo valore è stato ottenuto sommando ai 2,36 m, misurati dal piano di calpestio della “Struttura b”, lo spessore delle tavole di legno, pari a 3,5 cm. Il ritto presenta una sezione trasversale di 33x25 cm, rispettivamente in x e in y. Quest'ultima, a 63 cm dal p.d.c. della “Struttura b”, presenta una variazione di sezione in direzione y e il lato si riduce a 21 cm.

Il collegamento tra l'elemento e la trave TS1 sembra essere del tipo testa a testa, in inglese butt joint, con la presenza di piastre metalliche di irrigidimento. Gli elementi sembrano infatti collegati unendo semplicemente le loro estremità. Le dimensioni delle piastre metalliche sono riportate nelle tavole in allegato. Anche il collegamento tra P1 e T1 è un "butt joint" con la presenza di piastre metalliche, bullonate agli elementi e osservabili nel "Prospetto Sud-Est", che girano su T1 per ancorarvisi sulla parte superiore; questa non è stata, tuttavia, ispezionata a causa della presenza di cavi per i diversi impianti presenti nell'incastellatura (suono delle campane, sistema antipiccioni, illuminazione e allarme).

Si prosegue con la descrizione di tutte le superfici osservabili dell'elemento.

Prospetto Nord-Ovest

Si osserva una fibratura regolare e una fessura al centro dell'elemento che si estende per tutta l'altezza e che presenta una massima apertura di 1,5 cm.

È stata inoltre rilevata la presenza di alcuni nodi:

- Centrale, a una quota di 70 cm dalla base del ritto, di diametro pari a 8 cm;
- A 2 cm a destra del centro, a una quota di 100 cm dalla base del ritto, di diametro pari a 4 cm;
- A 3 cm a sinistra del centro, a una quota di 105 cm dalla base del ritto, di diametro pari a 6 cm.

Prospetto Nord-Est

Le fessure presenti in questa faccia del ritto sono caratterizzate da un'apertura inferiore rispetto a quella osservabile nel precedente prospetto e si estendono fino a un'altezza pari a 180 cm dalla base dell'elemento. Si osservano inoltre due nodi di dimensioni significative:

- Allo spigolo sinistro, a una quota di 65 cm dalla base del ritto, di diametro pari a 3 cm;
- A 3 cm a sinistra del centro, a 170 cm dalla base del ritto, di diametro pari a 9 cm.

La fibratura è invece regolare mentre in basso a sinistra si osserva perdita di materiale.

Prospetto Sud-Est

La fibratura è regolare e si osservano lievi fessure diffuse su tutto l'elemento. Sono presenti due nodi:

- A 3 cm a destra del centro, a 10 cm dalla base del ritto;
- Nascosto dalle piastre metalliche di collegamento con T1.

Prospetto Sud-Ovest

La fibratura risulta essere regolare per quasi tutto lo sviluppo in quanto, in prossimità del collegamento con T1, se ne osserva una deviazione.

Ritto P2

Come già accennato in precedenza, il ritto poggia sulla trave rialzata TS2, di 2 cm rispetto alle altre travi su cui poggiano i ritti. La base del ritto è, dunque, a una quota pari a +35 cm e l'altezza dell'elemento risulta essere pari a 2,38 m: quest'ultima è stata ottenuta sottraendo i 2 cm dall'altezza degli altri elementi, dal momento che tutti terminano alla stessa quota. La sezione di base è quadrata con lato pari a 31 cm e, a una quota di 73 cm dalla trave TS2, presenta una riduzione, in direzione x, e diventa 21 cm. L'elemento presenta, dopo il cambio di sezione, degli smussi di 3 cm.

Si hanno inoltre due barre metalliche di altezza e spessore, rispettivamente, pari a 4 cm e 1 cm; la prima a 114 cm e la seconda a 177 cm da TS2. Queste occupano tutta la sezione in direzione x e si ancorano alla parete della torre in direzione y e quindi hanno una lunghezza pari a 49 cm.

Il collegamento tra il ritto e il traverso su cui poggia è del tipo "butt joint" con zeppa di serraggio; mentre quello con il traverso T2 è del tipo "tenone e mortasa" con la presenza di una zeppa di serraggio. Il traverso funge da mortasa e il ritto da tenone caratterizzato da una larghezza di circa 8 cm.

Prospetto Nord-Ovest

È caratterizzato da una fibratura regolare e dalla presenza di diverse fessure che si estendono per tutta l'altezza dell'elemento. Queste presentano un'apertura massima di 1,5 cm. Si osserva un nodo centrale e a un'altezza corrispondente al cambio di sezione. Nella parte alta si ha una zeppa di serraggio per il collegamento con il traverso T2.

Prospetto Nord-Est

Questa superficie non è ispezionabile per intero a causa della presenza di cavi per impianti (illuminazione, allarme e per il suono delle campane).

Prospetto Sud-Est

La superficie osservabile nel prospetto est è caratterizzata da una fibratura regolare.

Prospetto Sud-Ovest

La fibratura è regolare mentre in corrispondenza del collegamento con T2, all'incirca per 35 cm dalla tesa del ritto, si ha deterioramento con conseguente perdita del materiale. Si ha un nodo, di diametro pari a 5 cm, a una quota pari a 60 cm dalla base del ritto; è anche presente un foro che non presenta una forma geometrica definita ma che può essere approssimato con un cerchio di diametro pari a 6 cm e profondo pochi centimetri.

Ritti P3 - P4

Questi, così come i ritti P5 e P6, hanno in comune diverse caratteristiche geometriche e meccaniche:

- Poggiano su TS3;
- Sezione di base rettangolare di dimensioni 30x34 cm (dimensione in x e in y);
- Cambio di sezione, a un'altezza pari a 74 cm da TS3, con riduzione della sezione, in x, a 21 cm;
- Smussi di 3 cm in seguito al cambio di sezione;

- Altezza pari a 2,40 m;
- Presenza, nel collegamento con TS3, di una zeppa di serraggio;
- Collegamento con T3 a tenone e mortasa con zeppa di serraggio; il traverso funge da mortasa e il ritto da tenone caratterizzato da una larghezza di circa 8 cm.

I due ritti sono caratterizzati dalla presenza di carpenteria metallica, più e meno recente, che funge da collegamento con la struttura della campana che occupa lo scomparto compreso tra il ritto “P2” e gli stessi. La carpenteria più recente è quella di supporto al nuovo sistema elettronico per il concerto delle campane. Questo è osservabile nel “Prospetto Nord-Est”.

Ritto P3

Prospetto Nord-Ovest

La fibratura non subisce deviazioni lungo l'elemento, si osservano tuttavia diverse fessure e fori di piccole dimensioni. Alla base si ha una riduzione di sezione dovuta a una perdita di materiale nella parte destra.

Prospetto Nord-Est

Anche in questo prospetto la fibratura risulta essere regolare; si osservano invece delle fessure di dimensioni significative nella parte inferiore, in prossimità del cambio di sezione; la massima apertura di queste è di 1 cm.

Si ha, ad un'altezza pari a 185 cm dal piano di calpestio, un foro rettangolare, di dimensione 4x10 cm, che attraversa tutto l'elemento ed è infatti visibile anche nel “Prospetto Sud-Ovest”.

Nella parte terminale dell'elemento il materiale è deteriorato.

Prospetto Sud-Est

La fibratura è regolare e si osservano, nella parte inferiore, diverse fessure.

In questo lato, l'elemento è stato intagliato per l'inserimento dell'impianto per il suono automatico delle campane; si può infatti osservare una riduzione di sezione di circa 4 cm e che occupa, in larghezza, tutto l'elemento stesso. All'interno di quest'intaglio si ha una piastra da cui parte una barra metallica che si estende fino alla piastra presente nel ritto "P4". La struttura è osservabile nella Figura 69.



Figura 69. Struttura per il suono delle campane

La zona compresa tra il cambio di sezione e l'intaglio è caratterizzata da perdita di materiale.

Prospetto Sud-Ovest

La fibratura è regolare in tutto l'elemento. Si osservano delle lievi fessure, caratterizzate da aperture di ordine del millimetro, diffuse nella zona in cui è stata inserita la strumentazione per il suono delle campane.

Ritto P4*Prospetto Nord-Ovest*

La fibratura è regolare; sono stati rilevati tre diversi nodi:

- Allo spigolo sinistro e a una quota di 55 cm da TS3;
- Allo spigolo destro e in corrispondenza della parte inferiore della piastra;
- Allo spigolo sinistro e 40 cm più in basso della testa del ritto.

Quest'ultimo è mostrato in Figura 70.



Figura 70. Nodo presente nel Ritto P4

Prospetto Nord-Est

Si hanno diverse fessure, con apertura circa pari a 1,5 cm, che si sviluppano in tutta l'altezza dell'elemento. Sono stati rilevati tre nodi significativi:

- A 7 cm a sinistra del centro, a un'altezza pari 55 cm da TS3, di diametro pari a 10 cm;

- A 10 cm a sinistra del centro, a un'altezza pari a 115 cm da TS3, di diametro pari a 4 cm;
- Al centro, un'altezza pari a 182 cm da TS3, di diametro pari a 10 cm.

La fibratura risulta essere abbastanza regolare.

Prospetto Sud-Est

Questa parte dell'elemento non è completamente osservabile a causa della presenza di altri elementi lignei fissati, tramite chiodatura, all'elemento stesso. Si osserva tuttavia a 48 cm dalla fine di questi ultimi un nodo di dimensioni significative; questo è situato al centro dell'elemento strutturale e presenta un diametro di 12 cm. Gli elementi esterni al ritto sono presenti, probabilmente, perché fungevano da connessione con la torre; sono infatti presenti dei fori nella muratura alla stessa altezza del tronco circolare che si osserva in questo prospetto e anche presente nel ritto P6.

Alla testa dell'elemento è possibile osservare che il collegamento con T3 è di tipo "tenone e mortasa" come si può osservare nella Figura 71.



Figura 71. Collegamento a "tenone e mortasa" tra il Ritto P4 e il Traverso T3

Prospetto Sud-Ovest

Questa parte presenta diverse fessure dimensionalmente importanti e due nodi principali situati al centro dell'elemento e, rispettivamente, a un'altezza pari a 20 e a 50 cm da TS3. Circa a metà altezza e nella parte sinistra dell'elemento si ha un deterioramento concentrato.

Ritto P5*Prospetto Nord-Ovest*

La fibratura risulta essere regolare su tutta l'altezza dell'elemento; sono inoltre presenti, nella zona inferiore, diverse fessure ma caratterizzate da un'apertura dell'ordine del millimetro.

Prospetto Nord-Est

Non si hanno segni evidenti di degrado.

Prospetto Sud-Est

Si osserva, nella parte inferiore, una fessura di dimensioni significative. È stata inoltre rilevata la posizione di un nodo:

- A sinistra dal centro di 2 cm, a un'altezza pari a 86 cm da T5, di diametro pari a 10 cm.

Prospetto Sud-Ovest

La zona in corrispondenza del cambio di sezione è degradata, si ha infatti perdita di materiale. Sono inoltre presenti diverse fessure.

Ritto P6*Prospetto Nord-Ovest, Prospetto Sud-Est, Prospetto Sud-Ovest*

Non si hanno segni evidenti di degrado.

Prospetto Nord-Est

Si hanno diverse fessure su tutta l'altezza dell'elemento. Si hanno inoltre due nodi:

- A sinistra dal centro di 4 cm, a un'altezza pari a 150 cm dal piano di calpestio, di diametro pari a 5 cm;
- A sinistra dal centro di 4 cm, a un'altezza pari a 210 cm dal piano di calpestio, di diametro pari a 5 cm.

Ritto P7

Il ritto poggia su TS5 e la sua base è dunque a una quota pari a +33 cm, coincidente con il piano di calpestio originario della Cella Campanaria. L'elemento ha un'altezza di 2,40 m e presenta una sezione di base pari a 27x33 cm, rispettivamente in x e in y. A un'altezza pari a 74 cm da TS5 si ha una variazione di sezione, che si estende per circa 7 cm, in seguito alla quale il lato in direzione x si riduce a 21 cm. L'elemento, in seguito al cambio di sezione, presenta degli smussi di 3 cm.

L'unione con TS5 è caratterizzata dalla presenza di una zeppa di serraggio, così come il collegamento a "tenone e mortasa" con T5, mostrato in Figura 72.



Figura 72. Collegamento a "tenone e mortasa" tra il Ritto P7 e il Traverso T5

Prima di procedere alla descrizione del degrado delle diverse facce dell'elemento, si precisa che in tutti i prospetti la zona inferiore, con un'estensione di circa 30 cm dalla base, risulta essere degradata.

Prospetto Nord-Ovest

Si osservano diverse fessure, poco profonde, su tutto il prospetto dell'elemento.

Prospetto Nord-Est

Si hanno diverse fessure che si estendono per tutta l'altezza dell'elemento e caratterizzate da aperture dell'ordine del centimetro.

Prospetto Sud-Est

La parte in basso del ritto è regolare, sia in termini di fibratura che di degrado; mentre la zona in prossimità della testa è soggetta a degrado.

Prospetto Sud-Ovest

Diverse fessure di dimensioni non trascurabili su tutto lo sviluppo dell'elemento.

Traverso T1

Il traverso, la cui funzione è quella di contrappeso, si estende da un estremo all'altro della Cella Campanaria, con una lunghezza di 6,90 m, ed è ancorato alla muratura come si può osservare nella e nella Figura 73; è inoltre caratterizzato da una sezione trasversale con dimensioni pari a 21x30 cm.



Figura 73. Ancoraggio alla muratura del Traverso T1

Ad esso convergono gli altri traversi della “Struttura b” e i collegamenti sono del tipo “testa a testa” con delle fasce metalliche di irrigidimento. Queste sono presenti nelle facce superiori e inferiori degli altri traversi passando per T1.

Prospetto Nord-Ovest

In questo prospetto si osservano tutte le fasce metalliche utilizzate per rinforzare i collegamenti.

Si hanno diverse fessure di apertura lieve e in più zone, in prossimità degli spigoli e dei collegamenti con gli altri traversi, si ha perdita di materiale. La superficie non è totalmente osservabile a causa della presenza di due diversi componenti degli impianti presenti.

Prospetto Sud-Est

La parte di elemento compreso tra gli attacchi dei traversi T4 e T5 è deteriorata come si può osservare nella Figura 74



Figura 74. Deterioramento presente nel Traverso T1

Traverso T2

Il traverso si estende dal T1 alla muratura della Cella Campanaria, presenta una lunghezza di 146 cm e una sezione trasversale di dimensioni 21x28 cm. Questo è collegato con il traverso T1, con il ritto P2 e con la muratura e le unioni sono rispettivamente:

- “testa a testa” con fasce metalliche irrigidenti;
- “tenone e mortasa” con zeppa di serraggio;
- Si estende all’interno della muratura per una lunghezza pari a 16 cm.

Gli ultimi due possono essere apprezzati nella Figura 75.



Figura 75. Collegamento tra il Traverso T2 e il Ritto P2 e la muratura della Cella Campanaria

Su questo traverso poggia il telaio di una delle due campane presenti; come si può osservare nella Figura 75, si ha una piastra metallica bullonata all’elemento stesso.

Prospetto Nord-Est

Si hanno delle fessure di apertura massima pari a 1 cm che si sviluppano su tutto l’elemento.

Prospetto Sud-Ovest

L'elemento risulta deteriorato in corrispondenza della piastra metallica di collegamento con la campana.

Traverso T3

Il traverso si estende, a partire da T1, per 2,13 m e ha una sezione trasversale di dimensioni 21x28 cm. Questo è collegato con il traverso T1, con il ritto P3 e con il P4 e le unioni sono rispettivamente:

- “testa a testa” con fasce metalliche irrigidenti e con delle tavole in legno il cui scopo è probabilmente quello di colmare la distanza, “gioco” di 2 cm, con T1;
- “tenone e mortasa” con zeppa di serraggio.

Il collegamento con T1 è osservabile nella Figura 76.



Figura 76. Collegamento tra T3 e T1

La parte terminale è libera e si ha una piastra metallica, con lo scopo di stabilizzare l'elemento, che si ancora nella muratura della Cella Campanaria.

Su questo traverso poggia l'estremità opposta del telaio della campana che poggia anche su T2 e anche il telaio dell'altra campana presente nella “Struttura b”; il

collegamento consiste nella presenza di una piastra metallica bullonata. Da quest'ultima è possibile anche osservare:

- La presenza di una struttura metallica aggiunta recentemente e utilizzata per il suono delle campane;
- Il collegamento del telaio della campana compresa tra T3 e T4; si osserva infatti che la piastra metallica è collegata a un elemento ligneo che sembra essere stato aggiunto in un secondo momento, probabilmente durante una fase di manutenzione.

Prospetto Nord-Est

L'elemento risulta deteriorato in corrispondenza degli attacchi delle campane e della struttura metallica a sostegno dell'impianto per il suono delle campane.

Prospetto Sud-Ovest

Si osservano lievi fessure, con apertura dell'ordine del millimetro, in corrispondenza della parte terminale dell'elemento.

Traverso T4

Il traverso si estende, a partire da T1, per 2,15 m e ha una sezione trasversale di dimensioni 21x28 cm. Questo è collegato con il traverso T1, con il ritto P5 e con il P6 e le unioni sono rispettivamente:

- “testa a testa” con fasce metalliche irrigidenti;
- “tenone e mortasa” con zeppa di serraggio.

La parte terminale è libera e si ha una piastra metallica, con lo scopo di stabilizzare l'elemento, che si ancora nella muratura della Cella Campanaria.

Su questo traverso poggia l'estremità opposta del telaio della campana che poggia anche su T3; il collegamento consiste nella presenza di una piastra metallica bullonata che si può osservare nella Figura 77.



Figura 77. Piastra metallica per il collegamento del telaio della campana



Figura 78. Nodi presenti nel Traverso T4

Prospetto Sud-Ovest

È stata rilevata la presenza di diversi nodi:

- A 35 cm da T1, con centro a 5 cm più in di metà altezza, di diametro pari a 3 cm;

- A 45 cm da T1, con centro a 4 cm più in basso di metà altezza, di diametro pari a 3 cm;
- A 65 cm da T1, con centro a 4 cm più in basso di metà altezza, di diametro pari a 2 cm;

Questi sono osservabili nella Figura 78. Si hanno anche delle lievi fessure nella zona terminale dell'elemento.

Traverso T5

Il traverso si estende dal T1 alla muratura della Cella Campanaria, presenta una lunghezza di 146 cm e una sezione trasversale di dimensioni 21x28 cm. Questo è collegato con il traverso T1, con il ritto P7 e con la muratura e le unioni sono rispettivamente:

- “testa a testa” con fasce metalliche irrigidenti;
- “tenone e mortasa” con zeppa di serraggio;
- Si estende all'interno della muratura per una lunghezza pari a 18 cm.

Questi sono mostrati nella Figura 79 e nella Figura 80. Da quest'ultima si può notare la presenza di piastre metalliche che collegano l'elemento alla muratura.



Figura 79. Collegamento tra T5 e T1



Figura 80. Collegamento del Traverso T5 con la muratura

Prospetto Sud-Ovest

Si hanno diverse fessure ma di apertura poco significativa, ordine del millimetro.

3.2. Il monitoraggio della struttura lignea

La struttura lignea che sostiene le campane è stata monitorata con un sistema di acquisizione di dati di emissione acustica a 7 canali per valutare l'evoluzione nel tempo della rete di fessure presenti. I sensori sono stati posizionati nel traverso indicato con il nome "T10", come mostrato nella Figura 81 e nella Figura 82. La struttura è stata monitorata per un periodo di tempo pari a un mese; in particolare il monitoraggio è stato effettuato dall' 8 Agosto all' 8 Settembre 2019.

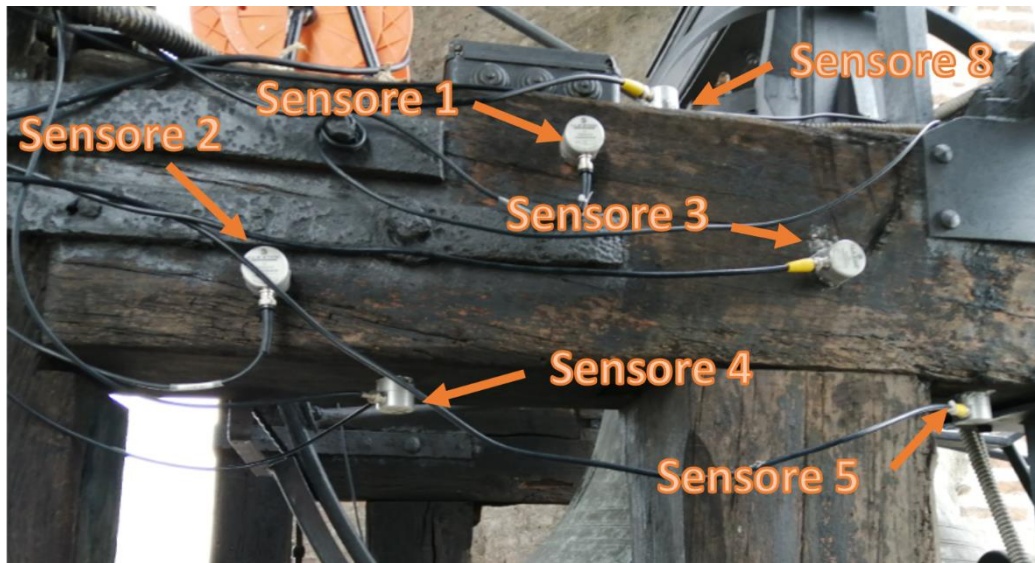


Figura 81. Posizionamento dei sensori nella struttura lignea

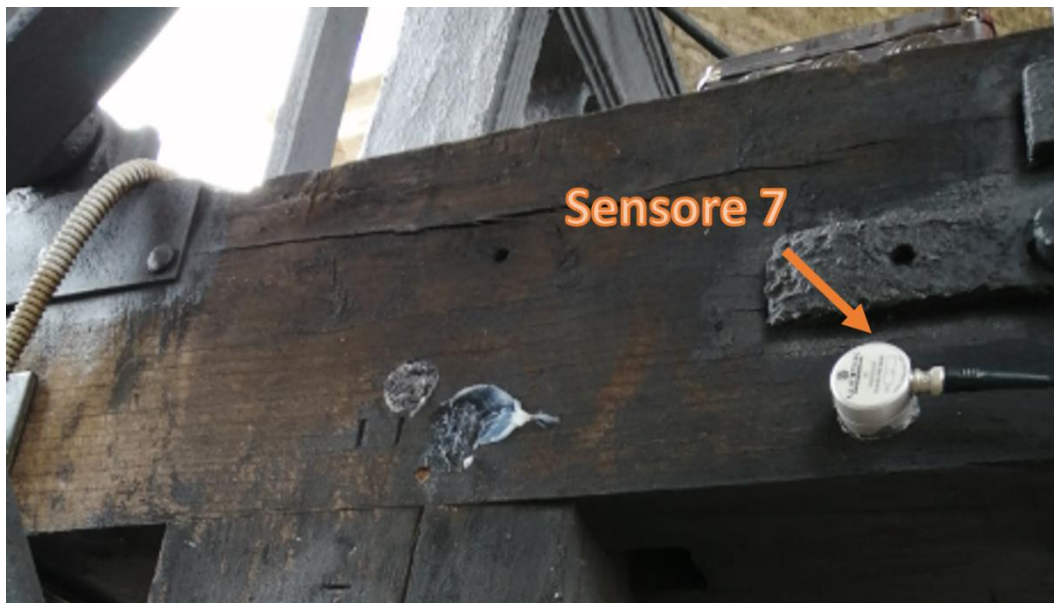


Figura 82. Posizionamento dei sensori nella struttura lignea

Si riporta, in Figura 83, la pianta della cella campanaria e della struttura lignea a sostegno delle campane presente al suo interno; in quest'ultima è stato evidenziato l'elemento monitorato.

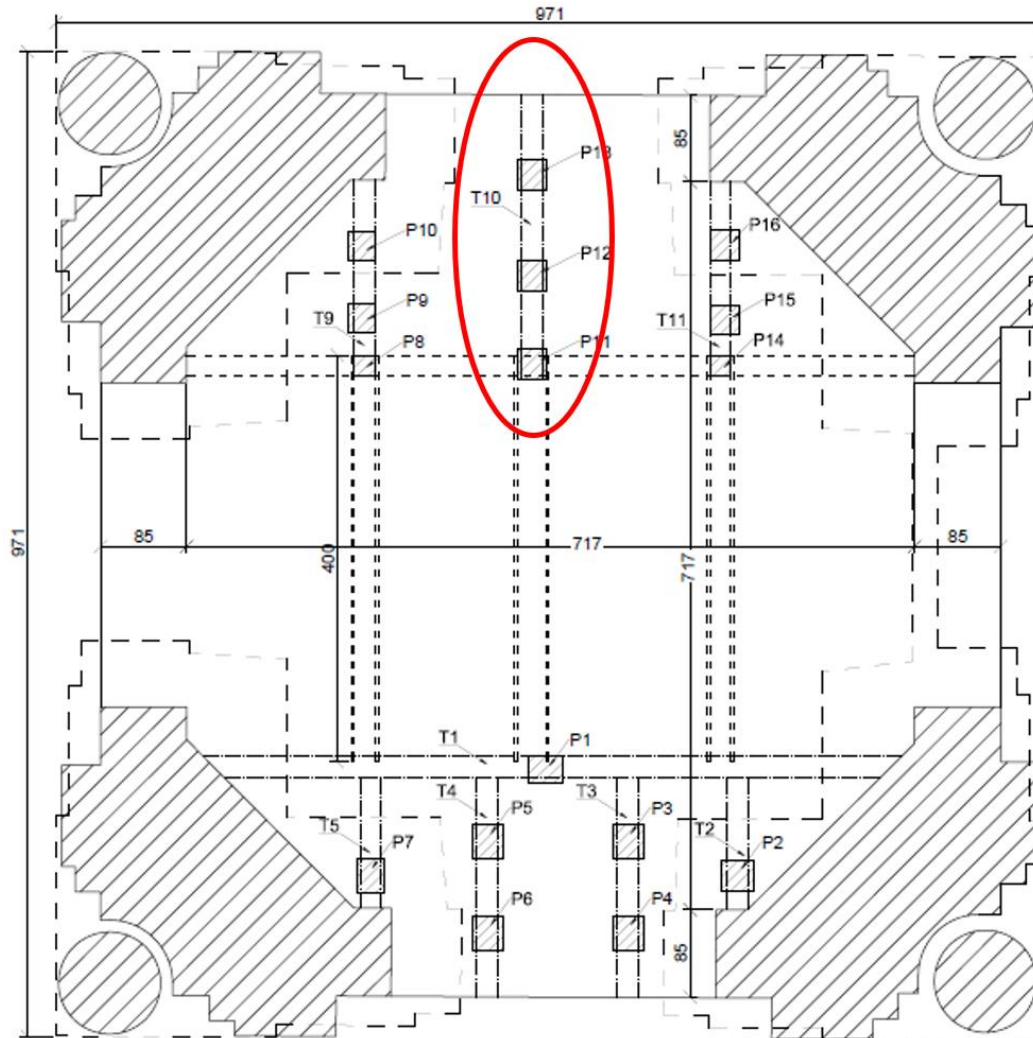


Figura 83. Pianta della Cella Campanaria e posizione dell'elemento monitorato

L'analisi dei dati estratti dalla strumentazione ha seguito la stessa procedura vista precedentemente per il monitoraggio della Torre Campanaria; sono stati infatti valutati i parametri necessari per la descrizione del livello di danneggiamento raggiunto nella struttura.

La strumentazione utilizzata riporta diverse caratteristiche di ogni segnale: il canale che lo ha captato, il tempo di inizio espresso in secondi, il tempo di fine espresso in secondi, l'ampiezza massima espressa in millivolt, il numero di attraversamenti del valore di soglia prestabilito e la durata de segnale espressa in millisecondi. Queste

caratteristiche vengono salvate all'interno di diversi files che racchiudono gli eventi registrati ogni giorno. In Figura 84 viene riportato sia il numero cumulativo di eventi di Emissione Acustica registrati durante il periodo di monitoraggio che il numero di eventi di EA registrato quotidianamente.

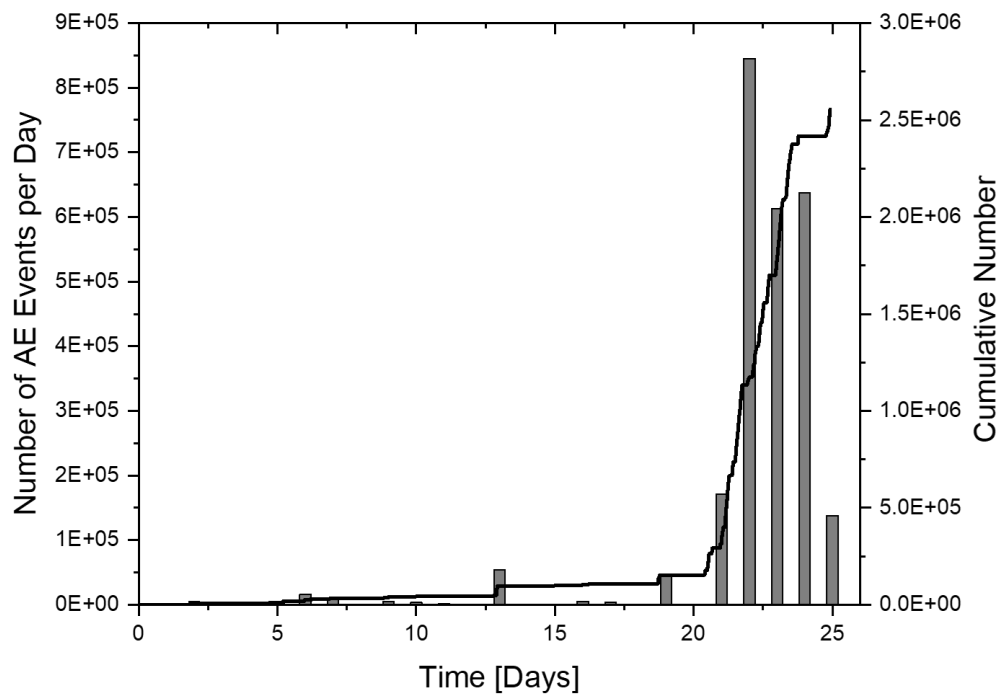


Figura 84. Numero cumulato e per giorno di eventi di EA estratti dalla strumentazione

È possibile osservare che il numero di eventi varia, anche in maniera significativa, giorno per giorno; dunque, la fase di filtraggio del rumore è stata effettuata considerando gli eventi di EA contenuti all'interno di una finestra temporale di 24 ore, ovvero quotidianamente. I parametri scelti per filtrare il rumore sono l'ampiezza di picco e il numero di attraversamenti del valore di soglia; da quest'ultimo è possibile risalire alla frequenza del segnale. Sono stati dunque rimossi i segnali caratterizzati da ampiezze e frequenze inferiori a dei valori limite diversi per ogni giorno, scelti in base alle medie delle ampiezze e delle frequenze registrate giornalmente.

Si riporta in Figura 85 il risultato della fase di filtraggio del rumore appena descritta; si riportano dunque le stesse informazioni fornite nella figura precedente.

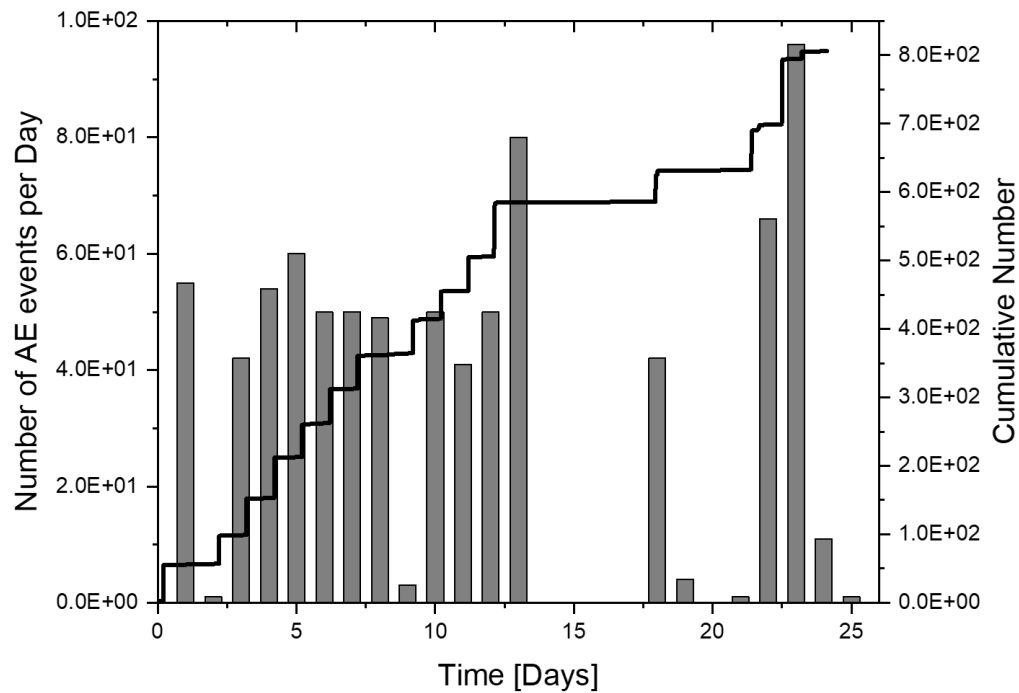


Figura 85. Numero cumulato e per giorno di eventi di EA

È possibile osservare come, nonostante la significativa riduzione del numero di segnali, il picco di eventi nella fase terminale del monitoraggio sia ancora presente.

Sono stati in seguito valutati il b -value e il β_i considerando delle finestre temporali contenenti 200 e 100 eventi di Emissione Acustica. Il loro andamento nel tempo è riportato in Figura 86 e in Figura 87. Il b -value assume inizialmente valori maggiori di 1, e, in seguito a una prima crescita, si osserva che nella parte terminale del monitoraggio decresce verso valori pari a 1. È interessante osservare che il b -value mostra un andamento discendente, tendendo a valori pari a 1, e questo risulta compatibile con la crescita di macro-fessure localizzate. Inoltre, come si vede in Figura 86 e in Figura 87, l'esponente β_i mostra una crescita verso valori maggiori di 1 in corrispondenza della decrescita del b -value; questo evidenzia l'instabilità del processo di crescita delle fessure presenti, come spiegato nei precedenti paragrafi.

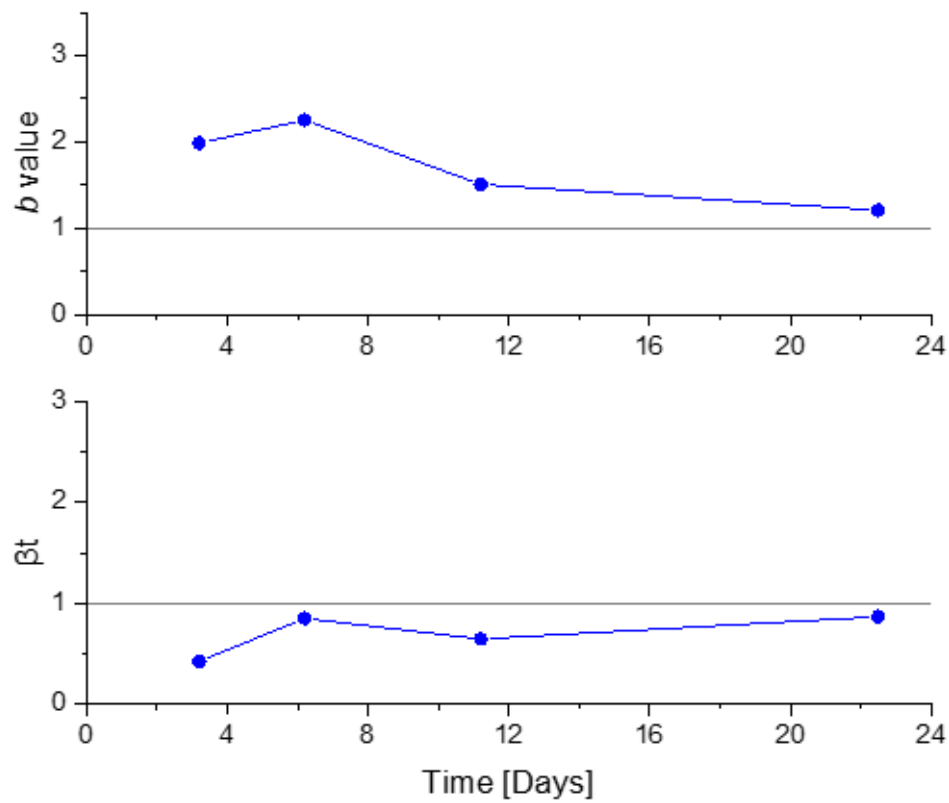


Figura 86. Andamento del b -value e del β_t , valutati in finestre temporali di 200 eventi

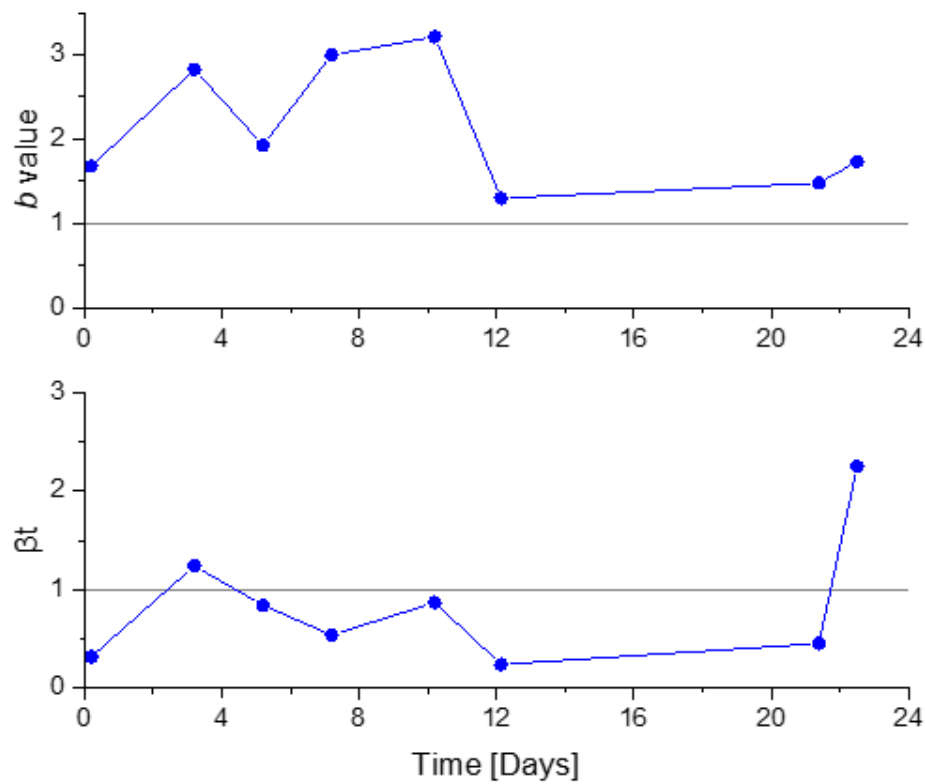


Figura 87. Andamento del b -value e del β_t , valutati in finestre temporali di 100 eventi

È stata infine eseguita, secondo la procedura descritta nel Capitolo 1, la localizzazione delle sorgenti degli eventi di Emissione Acustica. Si riporta dunque, in Figura 88, la posizione dei sensori. In Figura 89, vengono mostrate le sorgenti localizzate; queste sono state indicate con dei punti neri e in numero pari a 24. È possibile osservare che il numero maggiore di sorgenti è stato localizzato in corrispondenza di due zone critiche:

- Del collegamento tra il ritto e il traverso monitorato;
- Della zona in cui si poggia il telaio di supporto delle campane.

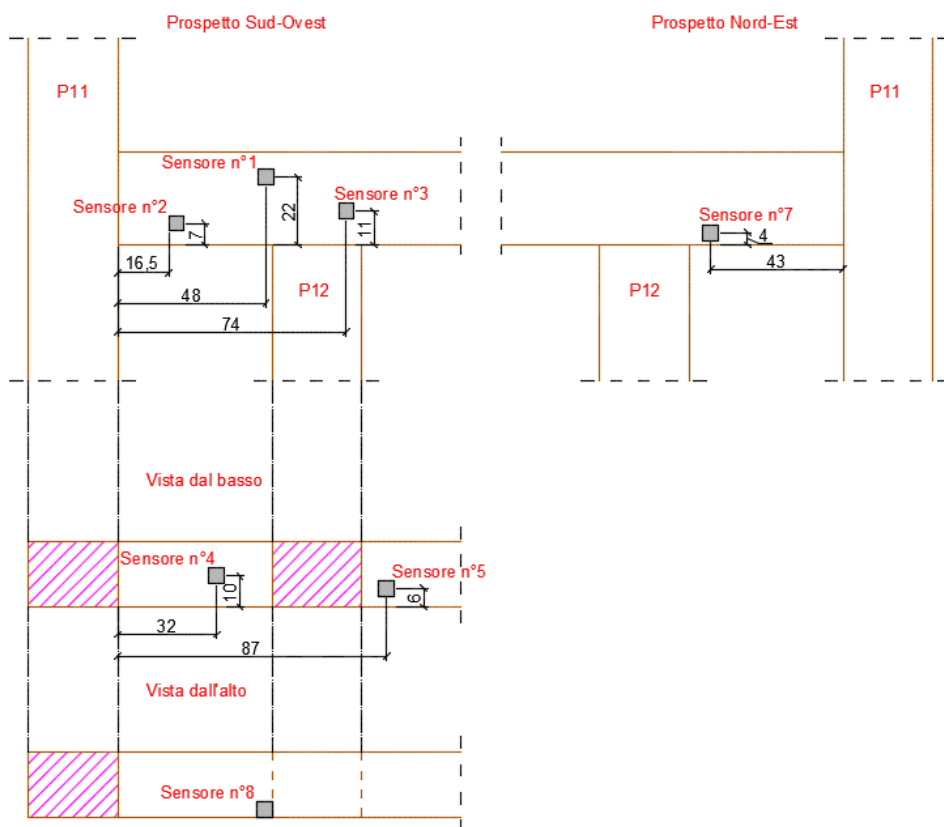


Figura 88. Posizione dei Sensori

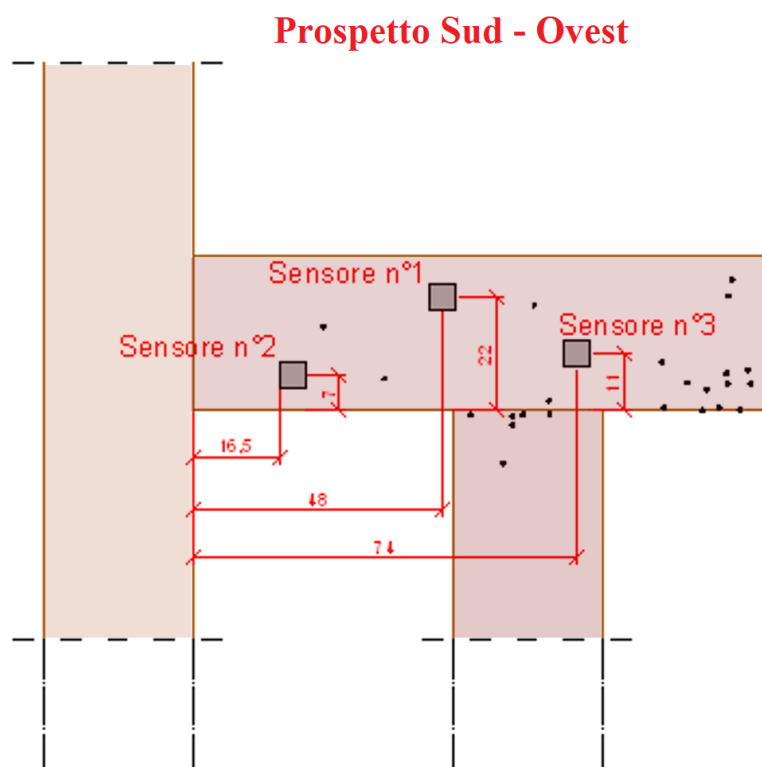


Figura 89. Sorgenti di eventi di Emissione Acustica localizzate

Capitolo 4

4. Correlazione tra il monitoraggio strutturale e gli eventi sismici

Un gruppo di ricerca svizzero, appartenente alla Scuola politecnica di Zurigo, ha recentemente pubblicato un articolo sulla rivista scientifica “Nature” intitolato “Real-time discrimination of earthquake foreshocks and aftershocks” (Gulia and Wiemer 2019). Il gruppo di ricerca dell’ETH ha analizzato diverse sequenze sismiche e ha proposto una metodologia per stabilire se un evento sismico appartiene a sequenze “di assestamento”, in inglese “aftershocks”, o se rappresenta l’evento principale, ovvero quello di intensità maggiore, in inglese “main event”.

Il parametro che consente questa distinzione è il b -value, già introdotto nei capitoli precedenti sia in relazione agli eventi sismici tramite la legge di Gutenberg-Richter che in relazione alle Emissioni Acustiche. Dallo studio delle sequenze sismiche registrate ad Amatrice e a Norcia nel 2016 è possibile osservare come il valore medio del b -value subisca una crescita, circa pari al 20%, in seguito a un “main event”. Al contrario, nella finestra temporale compresa tra un altro evento di intensità simile, che potrebbe essere considerato l’evento principale, e il “main event” si osserva una decrescita del valore medio del b -value.

Il risultato, appena descritto, ottenuto dal gruppo di ricerca svizzero è rappresentato in Figura 90, da cui si può notare come l’evento di magnitudo pari a 6,2 rappresenti un “foreshock”, dal momento che, dopo l’evento, il b -value decresce. Si nota invece una trend crescente del b -value in seguito all’evento di magnitudo pari a 6,6 che rappresenta dunque il “main-event”. Si sottolinea inoltre che lo studio del b -value è stato effettuato sulle sequenze sismiche osservate sia a Norcia che ad Amatrice, come si può notare in Figura 90.

Allo stesso modo è stata studiata la sequenza di eventi sismici di Kumamoto, in Giappone, del 2016; i risultati ottenuti sono analoghi a quelli mostrati in Figura 90. In entrambi i casi sono stati studiati eventi sismici avvenuti in zone caratterizzate da un’importante attività sismica; si hanno infatti magnitudo dell’ordine di 6.

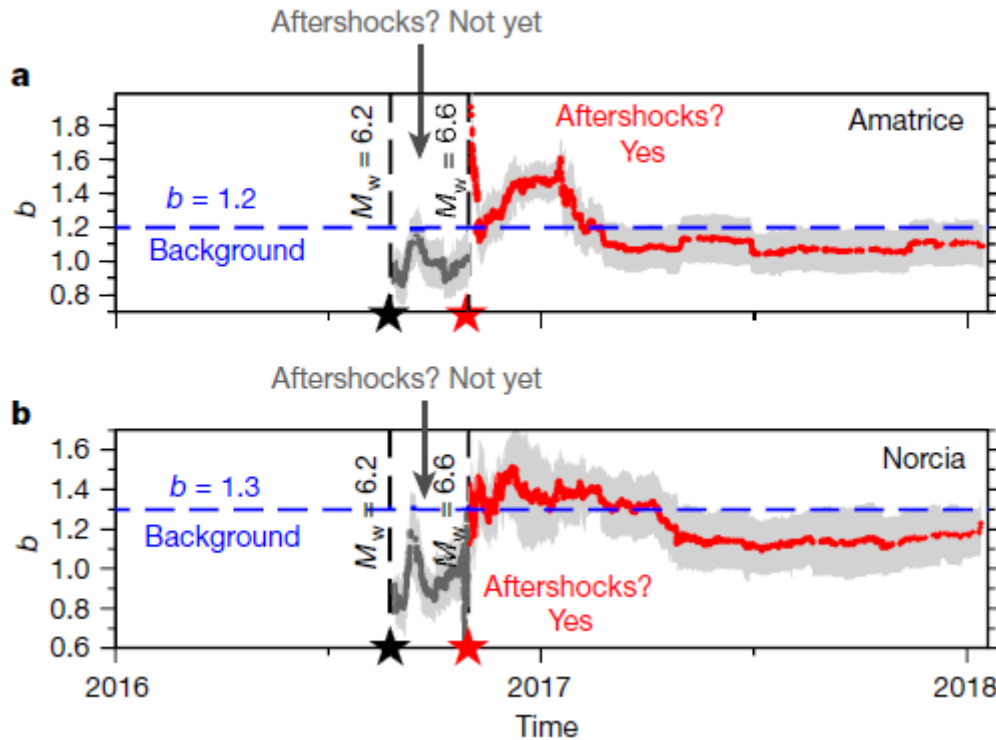


Figura 90. Andamento del b -value della sequenza di eventi sismici di Amatrice-Norcia (Gulia and Wiemer 2019)

Sulla base dell'approccio descritto, è stata ricercata una correlazione tra i b -value monitorati nella struttura in esame con la tecnica delle Emissioni Acustiche e gli eventi sismici registrati in una zona limitrofa al sito di monitoraggio, in particolare compresa in un raggio di 100 km. Tuttavia, dal momento che la struttura monitorata ricade all'interno di una zona caratterizzata da un'attività sismica minore, è stato studiato l'andamento del b -value degli eventi sismici in modo da poter verificare che, anche su sequenze caratterizzate da magnitudo inferiori, questo potesse rappresentare il parametro che consente di distinguere tra “foreshocks” e “aftershocks”. Sono stati dunque considerati i sismi avvenuti, nell'intorno di 100 km della Torre Campanaria del Duomo di Torino, in una finestra temporale di 6 mesi all'interno della quale si colloca il periodo di monitoraggio della struttura lignea. Gli eventi considerati sono quelli verificatisi tra il 15 Marzo e il 15 Settembre 2019; il periodo di monitoraggio si colloca nella parte terminale della finestra considerata. Gli eventi di riferimento hanno le seguenti caratteristiche:

- $m_L = 2,2$ verificatosi il 12/04/2018 con epicentro a Massello (To);

- $m_L = 3,1$ verificatosi il 05/06/2018 con epicentro al confine tra l'Italia e la Francia.

I b -value relativi alla serie storica considerata sono stati valutati su finestre temporali di 5 eventi e il loro andamento ha confermato i risultati ottenuti dal gruppo di ricerca svizzero (Gulia and Wiemer 2019). L'andamento del b -value viene riportato, insieme alle magnitudo locali degli eventi sismici considerati, in Figura 91.

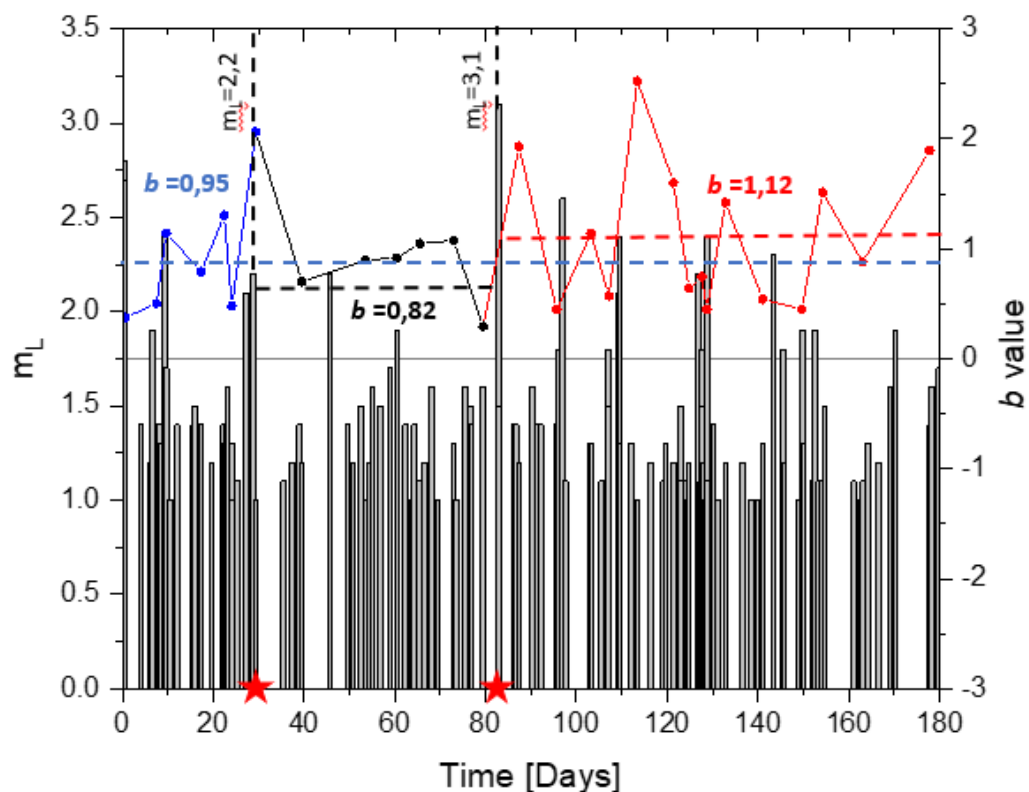


Figura 91. Magnitudo locali e b -value

Si osserva infatti che:

- Il valore medio dei b -value che precedono l'evento considerato come "anticipatore" è pari a 0,95;
- Si ha, in seguito all'evento sismico con $m_L = 2,2$, un'evidente riduzione; il valore medio diminuisce del 15% ed è pari a 0,82;

- In seguito all'evento principale, avvenuto circa 50 giorni dopo la riduzione del b -value, è stato registrato un aumento circa pari al 30% e il valore medio dei b -value risulta pari a 1,12.

È stato dunque confermato il risultato ottenuto dal gruppo di ricerca svizzero. Come si può notare in Figura 91, altri eventi sismici avrebbero potuto essere considerati come “anticipatori”. Sono due i motivi che hanno portato alla scelta del sisma con $m_L = 2,2$:

- La statistica del b -value; si ha infatti una netta decrescita in seguito all'evento stesso;
- Il fatto che questo evento ricadesse all'interno della “Earthquake preparation zone” definita come $R = 10^{0.433M+0.60} \text{ km}$ (Dobrovolsky, Zubkov, and Miachkin 1979) dove con M si intende la magnitudo.

È stato dunque possibile procedere con lo studio dei b -value monitorati con la tecnica delle Emissioni Acustiche; lo studio è stato articolato nei seguenti passi:

- Valutazione dei dati relativi agli eventi sismici di interesse, ricavati dal sito dell'Istituto Nazionale di Geologia e Vulcanologia (I.N.G.V.) che riporta tutti gli eventi sismici registrati dalla Rete Sismica Nazionale;
- Riduzione delle magnitudo locali sulla base della distanza tra il sito monitorato e l'epicentro secondo la (4.1)

$$m_L^* = \left(1 - \frac{d}{100}\right) m_L \quad (4.1)$$

Dove:

- m_L^* è la magnitudo locale ridotta;
- m_L è la magnitudo locale reale;
- d è la distanza, misurata in km, tra l'epicentro e il Campanile del Duomo di Torino.
- Calcolo del b -value relativo alle magnitudo locali e alle magnitudo locali ridotte;

- Definizione degli eventi sismici di riferimento sulla base dei due criteri descritti in precedenza;
- Rimozione, dalla serie storica dei dati di Emissione Acustica, degli eventi che hanno portato alla localizzazione di sorgenti di eventi di EA interne al materiale; questa fase è stata fondamentale per la ricerca della correlazione con gli eventi sismici;
- Valutazione dei b -value di Emissione Acustica.

Nei paragrafi successivi verranno mostrati i risultati ottenuti, dai quali è possibile evincere la forte correlazione presente tra i b -value monitorati con la tecnica delle Emissioni Acustiche e gli eventi sismici.

4.1. Monitoraggio della Struttura Ligne

Sono stati considerati gli eventi sismici registrati tra il 1° Agosto e il 15 Settembre 2019, con epicentro all'interno di una circonferenza di raggio pari a 100 km e centro nel sito di monitoraggio; si riporta in Figura 92 l'area considerata.

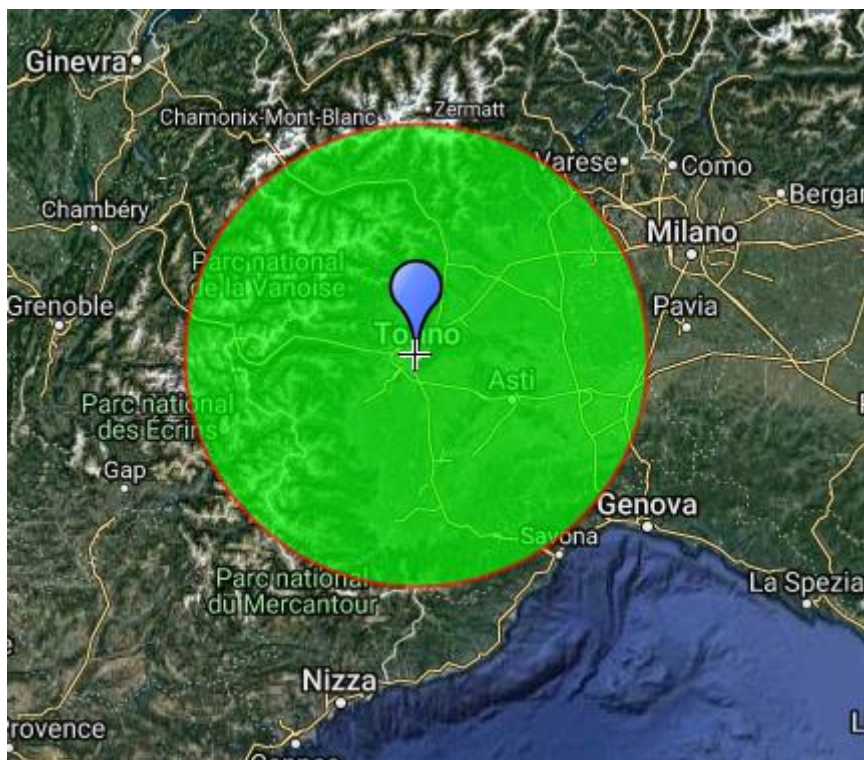


Figura 92. Area in cui sono stati registrati gli eventi sismici considerati

Nella finestra temporale considerata, all'interno della quale si colloca il periodo di monitoraggio della struttura lignea, sono stati registrati 42 eventi sismici. Si riportano di seguito i risultati ottenuti seguendo la procedura descritta nel precedente paragrafo. In Figura 93 sono riportate le magnitudo locali reali e ridotte secondo la (4.1). L'istante di tempo "0" è il tempo in cui è stato registrato il primo evento di EA dai sensori posizionati nella struttura lignea.

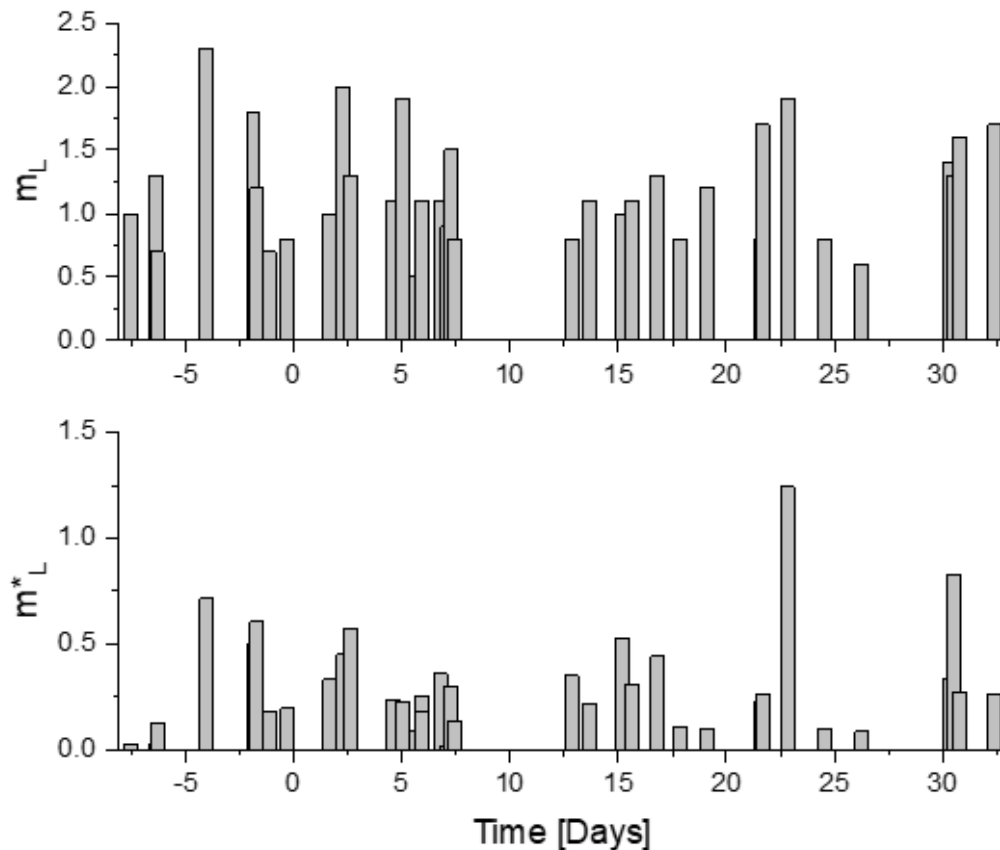


Figura 93. Magnitudo locali originali e ridotte

A partire da questi ultimi è stato ottenuto l'andamento nel tempo del b -value; quest'ultimo, come già anticipato in precedenza, è stato valutato a partire sia dalle magnitudo locali, mostrato in Figura 94, che dalle ridotte, mostrato in Figura 95. Nelle stesse figure sono inoltre indicati gli eventi sismici di riferimento:

- $m_L = 1$ verificatosi il 24/08/2019 con epicentro a Torre Pellice (To);
- $m_L = 1,9$ verificatosi il 01/09/2019 con epicentro a Murello (To).

I risultati ottenuti confermano quanto affermato dal gruppo di ricerca svizzero (Gulia and Wiemer 2019); l'andamento del b -value consente di distinguere se un evento sismico rappresenta un “aftershock” o un “foreshock”.

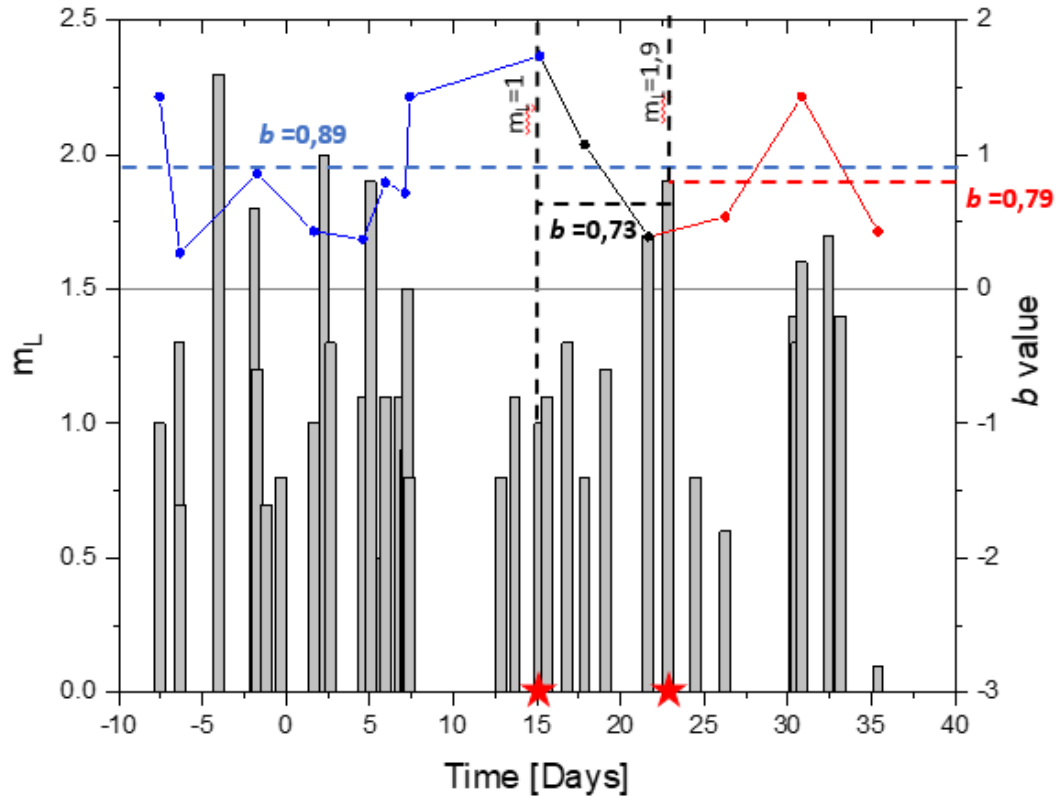


Figura 94. b -value sismico e magnitudo locali

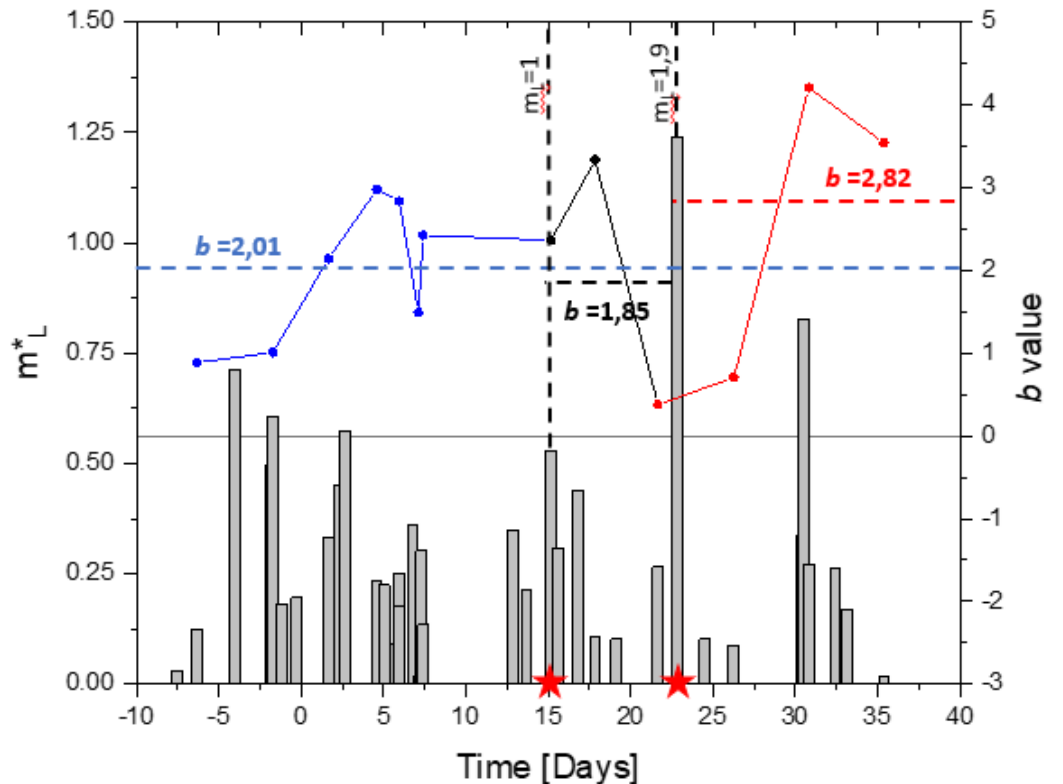


Figura 95. *b-value* sismico e magnitudo locali ridotte

Si osserva, in Figura 94, che:

- Il valore medio dei *b-value* che precedono l'evento considerato come "anticipatore" è pari a 0,89;
- Si ha, in seguito all'evento sismico con $m_L = 1$, un'evidente riduzione; il valore medio diminuisce approssimativamente del 20% ed è pari a 0,73;
- In seguito all'evento principale, avvenuto 7 giorni dopo l'inizio della riduzione del *b-value*, è stato registrato un aumento del 10% e il *b-value* risulta pari a 0,79.

In Figura 95 le variazioni del *b-value* risultano ancora più evidenti; infatti:

- Il valore medio dei *b-value* che precedono l'evento considerato come "anticipatore" è pari a 2,01;
- Si ha, in seguito all'evento sismico con $m_L = 1$, un'evidente riduzione; il valore medio diminuisce approssimativamente del 10% ed è pari a 1,85;

- In seguito all'evento principale, avvenuto 7 giorni dopo l'inizio della riduzione del b -value, è stato registrato un significativo aumento e il b -value risulta pari a 2,82.

Come accennato in precedenza, lo stesso approccio è stato seguito anche in relazione ai b -value monitorati con la tecnica delle EA. Si riporta in Figura 96 l'andamento, nel tempo, del numero cumulativo di eventi di EA considerato per l'analisi e il numero di eventi registrati quotidianamente; si può osservare che il filtraggio del rumore è stato meno selettivo rispetto a quello presentato nel capitolo precedente in modo tale da avere una serie storica più ricca di eventi e quindi una statistica più ricca.

Il b -value di questa serie storica è stato valutato su delle finestre temporali di dimensione pari a 100 eventi; è stato inoltre diagrammato nel tempo e, come si può osservare nella Figura 97 e nella Figura 98, si ha una forte correlazione con gli eventi sismici registrati nel periodo di monitoraggio. Infatti è possibile osservare che la variazione del valore medio dei b -value di EA coincide con quella dei b -value degli eventi sismici consentendo dunque l'individuazione dell'evento sismico predominante, ovvero del "main event".

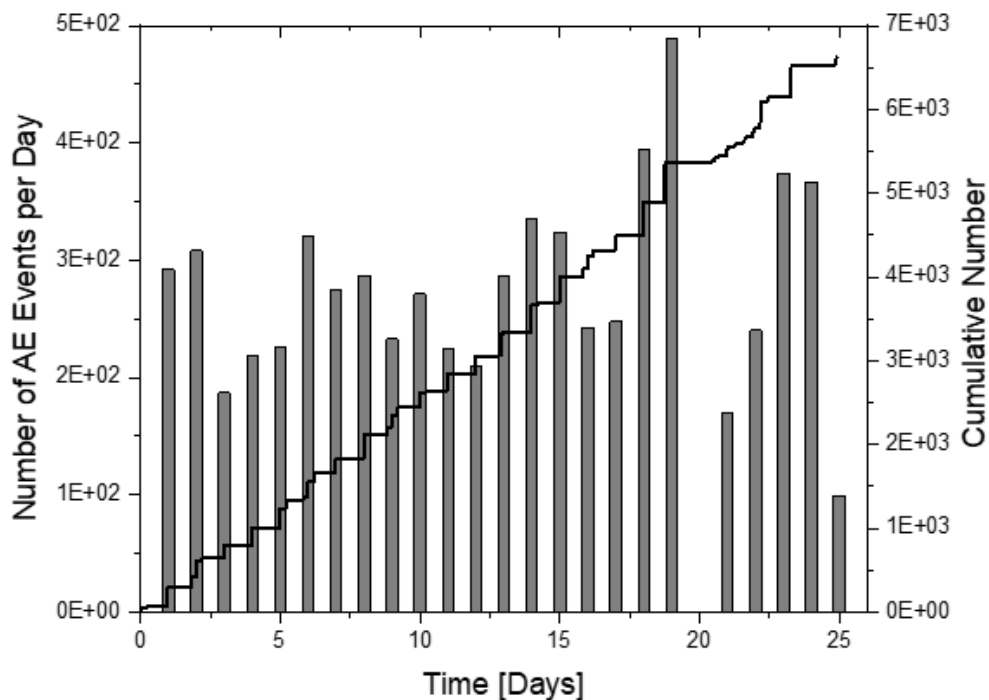


Figura 96. Numero cumulato e per giorno di eventi di EA

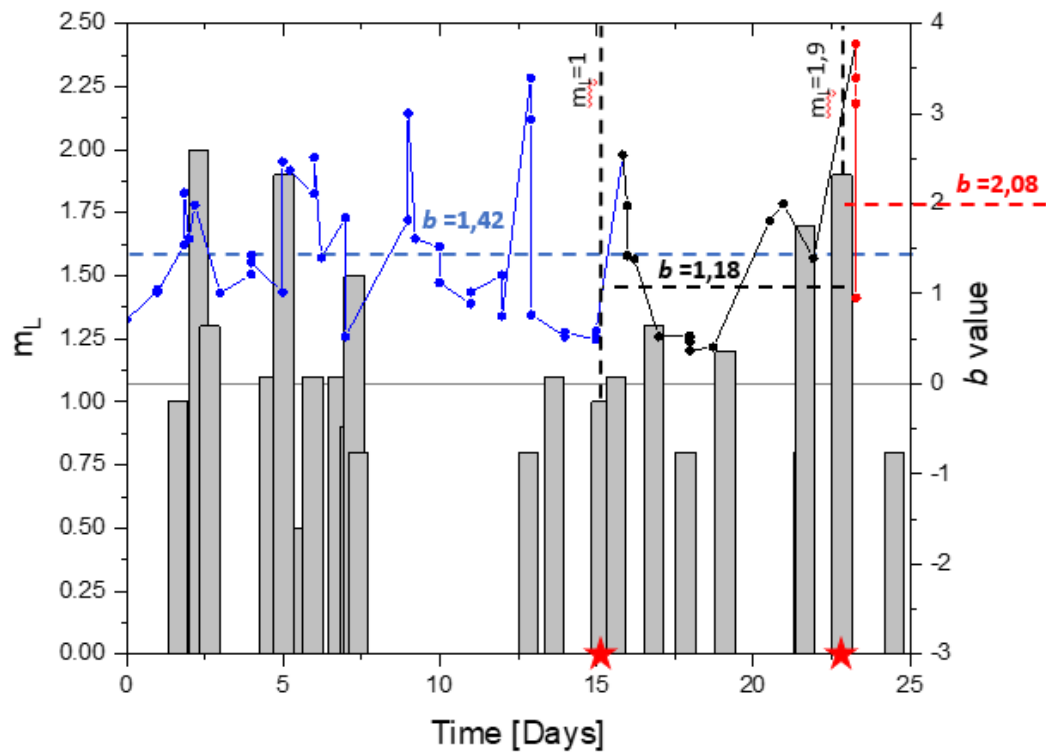


Figura 97. Andamento del b -value di EA e delle magnitudo locali nel tempo

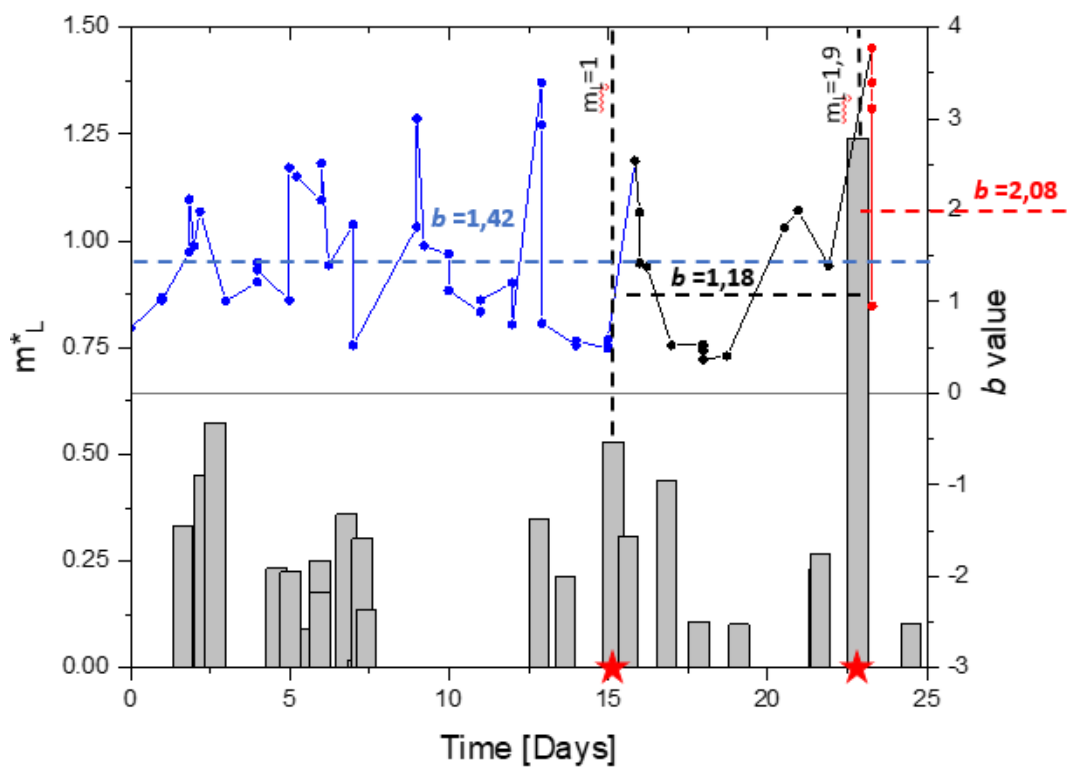


Figura 98. Andamento del b -value di EA e delle magnitudo locali ridotte nel tempo

Nelle figure precedenti è possibile osservare infatti che:

- Il valore medio dei b -value che precedono l'evento considerato come "anticipatore" è pari a 1,42;
- Si ha, in seguito all'evento sismico con $m_L = 1$, un'evidente riduzione; il valore medio diminuisce approssimativamente del 20% ed è pari a 1,18;
- In seguito all'evento principale, avvenuto 7 giorni dopo l'inizio della riduzione del b -value, è stato registrato un significativo aumento e il b -value risulta pari a 2,08.

4.2. Monitoraggio della Torre Campanaria

Per lo studio dei dati ottenuti dal monitoraggio della Torre sono stati considerati gli eventi sismici registrati tra il 10 Maggio e il 30 Giugno 2018 all'interno dell'area mostrata in Figura 92. I dati a disposizione, relativi agli eventi sismici e alle EA, sono stati trattati seguendo le fasi descritte in precedenza; di conseguenza vengono di seguito riportati i risultati ottenuti nello stesso ordine in cui sono stati mostrati nel precedente paragrafo.

Sono naturalmente diversi gli eventi sismici di riferimento considerati:

- $m_L = 1,5$ verificatosi il 1° Giugno 2018 a Inverso Pinasca (To);
- $m_L = 2,3$ verificatosi il 10 Giugno 2018 a Villar Dora (To).

Dalla Figura 97 e dalla Figura 98 è possibile evincere che, anche in questo caso, i b -value sismici, determinati sia dalle magnitudo reali che da quelle ridotte, consentono la distinzione tra un evento "anticipatore" e un "main-event"; infatti:

- Il valore medio dei b -value, mostrato in Figura 97, che precedono l'evento considerato come "anticipatore" è pari a 1,00;
- Si ha, in seguito all'evento sismico con $m_L = 1,5$, un'evidente riduzione; il valore medio diminuisce e assume il valore di 0,55;
- In seguito all'evento principale, avvenuto 7 giorni dopo l'inizio della riduzione del b -value, è stato registrato un significativo aumento e il b -value risulta pari a 0,94.

Inoltre, i risultati mostrati in Figura 98 rappresentano un'ulteriore conferma dal momento che:

- Il valore medio dei b -value che precedono l'evento considerato come "anticipatore" è pari a 1,34;
- Si ha, in seguito all'evento sismico con $m_L = 1,5$, un'evidente riduzione; il valore medio diminuisce significativamente ed è pari a 0,58;
- In seguito all'evento principale, avvenuto 7 giorni dopo l'inizio della riduzione del b -value, è stato registrato un significativo aumento e il b -value risulta pari a 1,22.

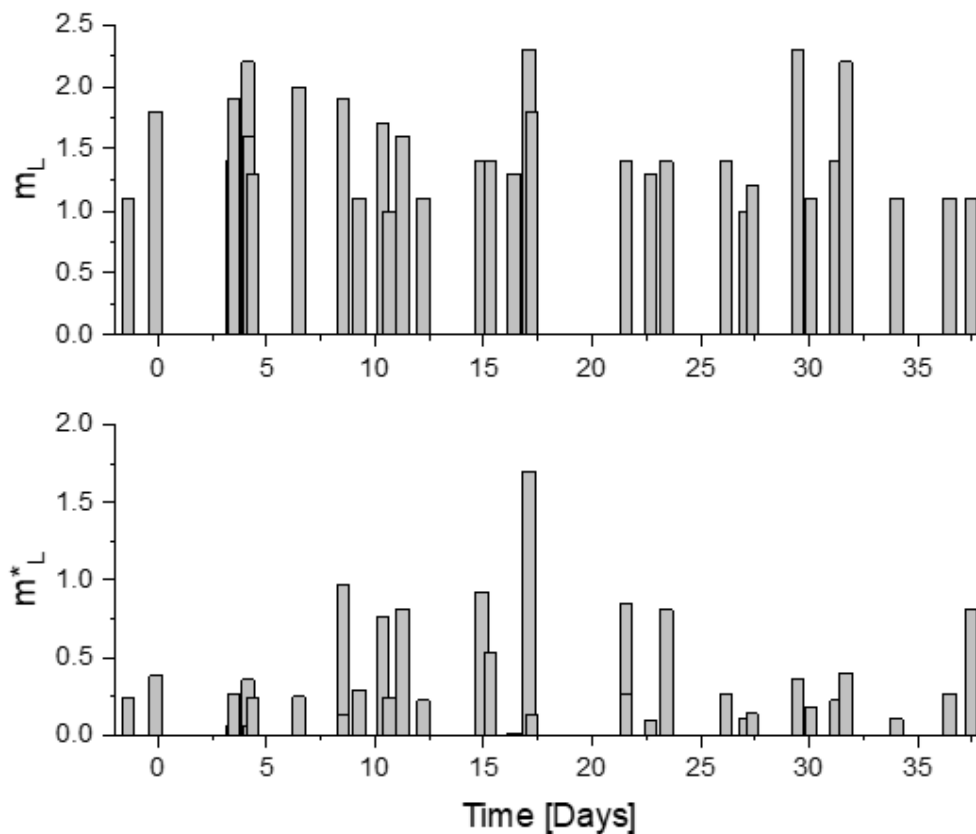


Figura 99. Magnitudo locali originali e ridotte

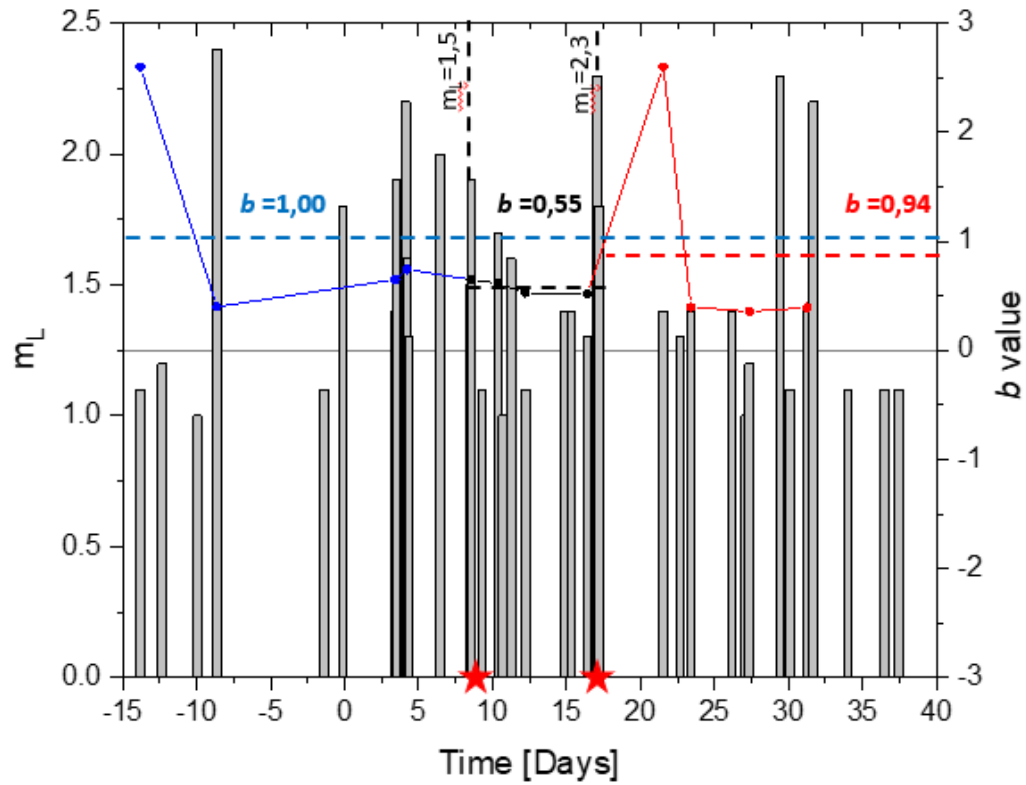


Figura 100. b-value sismico e magnitudo locali

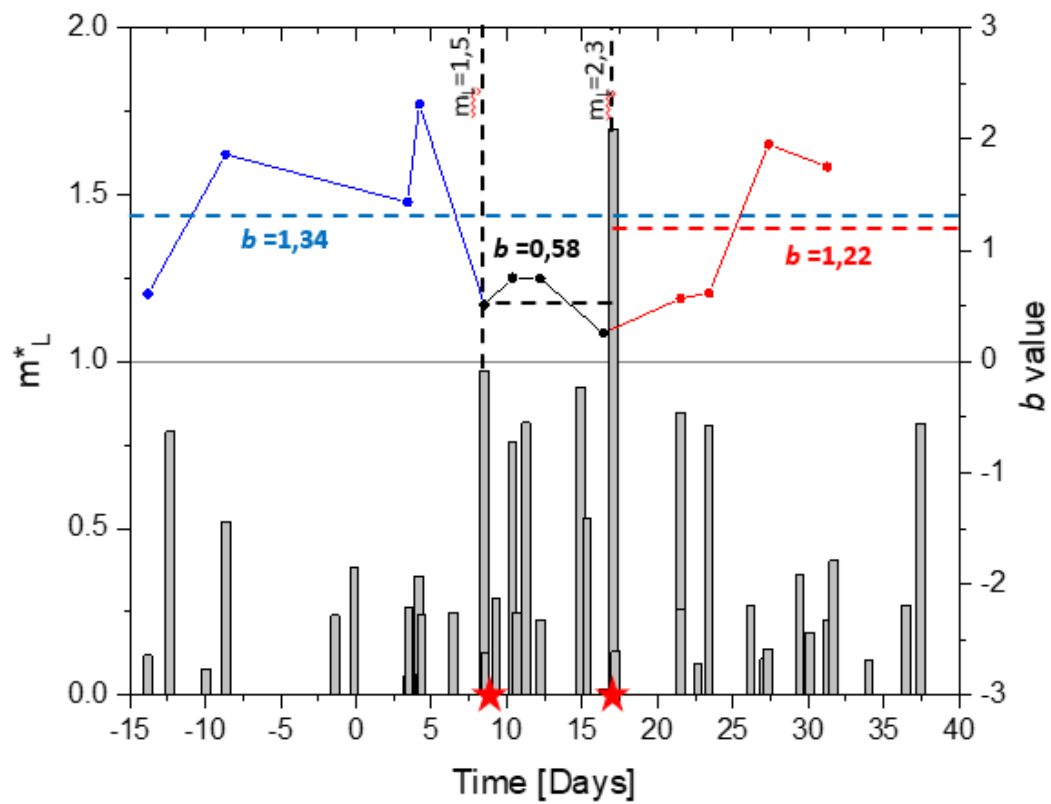


Figura 101. b-value sismico e magnitudo locali

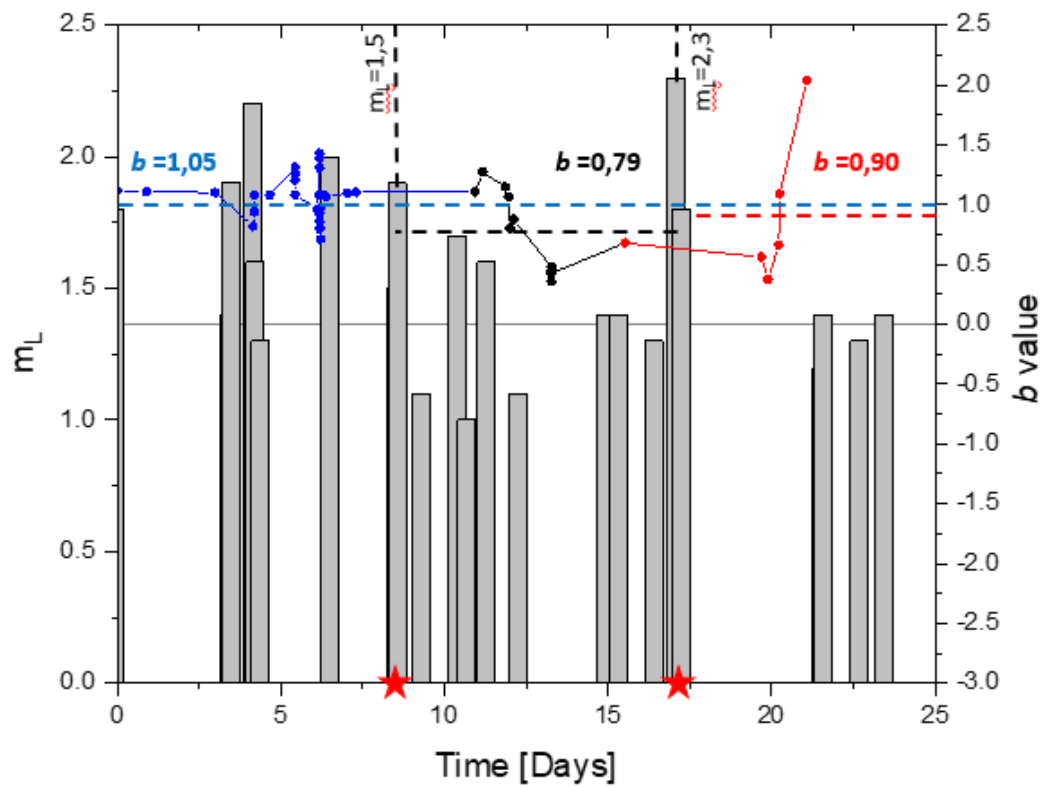


Figura 102. Andamento del b -value di EA e delle magnitudo locali nel tempo

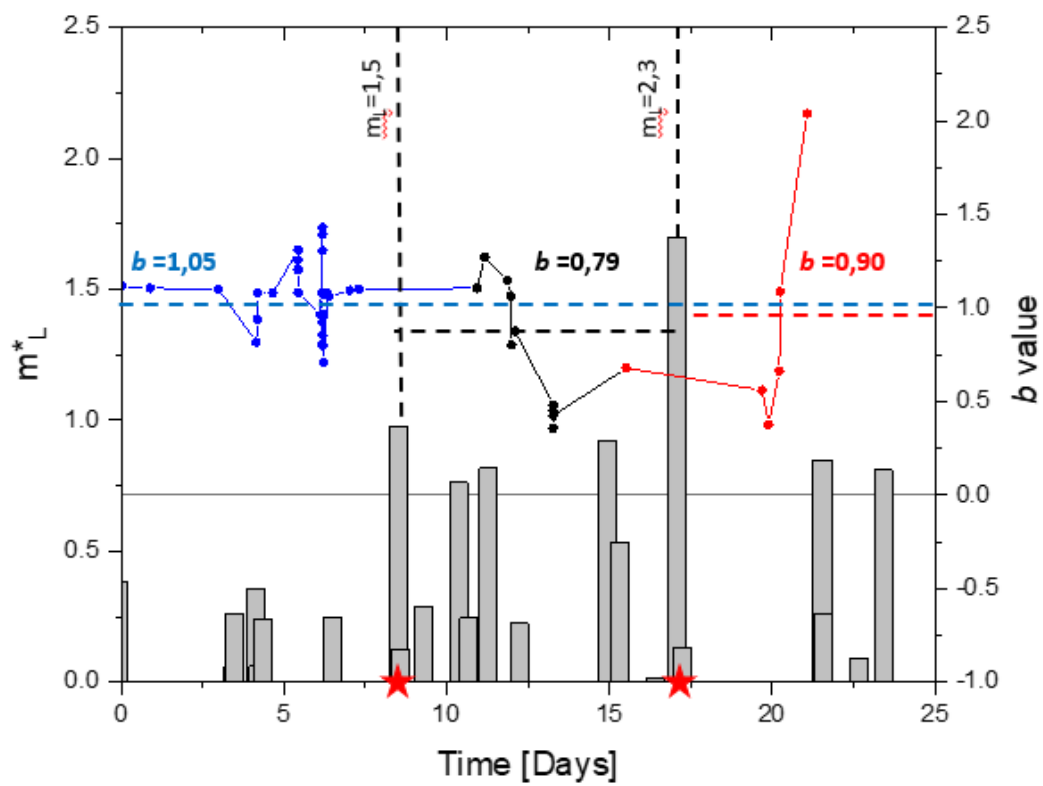


Figura 103. Andamento del b -value di EA e delle magnitudo locali ridotte nel tempo

I risultati ottenuti sui dati relativi alle Emissioni Acustiche sono stati riportati in Figura 102 e in Figura 103 e rappresentano una conferma di quelli ottenuti al paragrafo precedente; infatti:

- Il valore medio dei b -value che precedono l'evento considerato come "anticipatore" è pari a 1,05;
- Si ha, in seguito all'evento sismico con $m_L = 1,5$, un'evidente riduzione; il valore medio diminuisce significativamente ed è pari a 0,79;
- In seguito all'evento principale, avvenuto 7 giorni dopo l'inizio della riduzione del b -value, è stato registrato un significativo aumento e il b -value risulta pari a 0,90.

Conclusioni

Nel seguente studio è stata applicata la tecnica delle Emissioni Acustiche (EA) per il monitoraggio strutturale della Torre Campanaria del Duomo di Torino. La tecnica è stata applicata sia alla torre in muratura, i sensori sono stati applicati tra il secondo e il terzo livello dell'impalcato, che alla struttura lignea, a sostegno delle campane, presente all'interno della cella campanaria juvarriana.

Sono stati valutati il b -value e il β_t della serie storica di dati di EA; questi hanno fornito informazioni sul livello di danneggiamento raggiunto nelle strutture monitorate. I risultati ottenuti sono compatibili con la crescita delle macro fessure localizzate nella torre e nella struttura lignea.

La Torre è stata modellata agli elementi tramite l'utilizzo del Software Midas ed è stata applicata sia l'analisi statica che dinamica. I risultati dell'analisi statica sono compatibili con quelli ottenuti tramite l'utilizzo della tecnica delle EA; le sollecitazioni verticali maggiori interessano infatti la zona monitorata, in particolare le aree nei pressi delle aperture presenti.

È stata inoltre applicata l'analisi recentemente pubblicata in un articolo della rivista scientifica Nature secondo il quale la distribuzione statistica delle ampiezze degli eventi sismici, b -value, consente la distinzione tra sequenze di aftershock e foreshock. In particolare, la decrescita del b -value in seguito a un evento sismico sembra anticipare l'arrivo di un evento di magnitudo maggiore, ovvero del "main event". L'analisi è stata applicata agli eventi sismici registrati dalla Rete Sismica Nazionali, pubblicati sul sito dell'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, nelle zone limitrofe al sito di monitoraggio, in un raggio di 100 km; i risultati ottenuti confermano come la decrescita del b -value degli eventi sismici anticipi un evento caratterizzato da magnitudo maggiore.

È stata infine ricercata una correlazione tra i b -value monitorati con la tecnica delle EA e gli eventi sismici registrati durante il periodo di monitoraggio. A tale scopo è stato necessario rimuovere, dalle serie storiche relative alle due strutture monitorate, gli eventi di EA derivanti dalle sorgenti localizzate all'interno delle strutture stesse. È stata dunque valutata la distribuzione delle ampiezze degli eventi

rimanenti, ovvero gli andamenti nel tempo dei b -value; questi mostrano una forte correlazione con gli eventi sismici registrati. Infatti la decrescita del valor medio dei b -value, in seguito a un evento sismico, anticipa, per entrambe le strutture monitorate, l'arrivo di un sisma di magnitudo maggiore. Si ha dunque una correlazione tra il monitoraggio strutturale e quello sismico.

Si conclude dunque che, affiancando al monitoraggio sismico quello strutturale con la tecnica delle Emissioni Acustiche, è altamente probabile anticipare l'arrivo di un evento sismico di intensità maggiore tramite l'analisi della distribuzione delle ampiezze; ovvero dallo studio sia del b -value degli eventi di EA che di quelli sismici.

Bibliografia

- Anzani, Anna, Luigia Binda, Alberto Carpinteri, Giuseppe Lacidogna, and Amedeo Manuello. 2008. "Evaluation of the Repair on Multiple Leaf Stone Masonry by Acoustic Emission." *Materials and Structures* 41:1169–89.
- Binda, Luigia and Anna Anzani. n.d. "La Sicurezza Delle Antiche Torri in Muratura: Un'indagine Sugli Effetti Del Peso Proprio."
- Brindley, B. J., J. Holt, and I. G. Palmer. 1973. "Acoustic Emission-3: The Use of Ring-Down Counting." *Non-Destructive Testing* 6:299–306.
- Carpinteri, A. 1994. "Scaling Laws and Renormalization Groups for Strength and Toughness of Disordered Materials." *International Journal of Solids and Structures* 31:291–302.
- Carpinteri, A. and G. Lacidogna. 2003. "Damage Diagnostic in Concrete and Masonry Structures by Acoustic Emission Technique." 3(045):755–64.
- Carpinteri, A. and G. Lacidogna. 2007. "Damage Evaluation of Three Masonry Towers by Acoustic Emission." 29:1569–79.
- Carpinteri, A., G. Lacidogna, and N. Pugno. 2005. "Time-Scale Effects during Damage Evolution." 127–35.
- Carpinteri, A., G. Lacidogna, and N. Pugno. 2007. "Structural Damage Diagnosis and Life-Time Assessment by Acoustic Emission Monitoring." 74:273–89.
- Carpinteri, Alberto. 1982. "Notch Sensitivity in Fracture Testing of Aggregative Materials." (4):467–81.
- Carpinteri, Alberto. 1992. "Scienza Delle Costruzioni", Vol.2. Bologna: Pitagora Editrice.
- Carpinteri, Alberto and Giuseppe Lacidogna. 2006. "Structural Monitoring and Integrity Assessment of Medieval Towers." *Journal of Structural Engineering (ASCE)* 132:1681–90.

- Carpinteri, Alberto and Giuseppe Lacidogna. 2008. *Acoustic Emission and Critical Phenomena : From Structural Mechanics to Geophysics*.
- Carpinteri, Alberto, Giuseppe Lacidogna, Amedeo Manuello, and Gianni Niccolini. 2016. "A Study on the Structural Stability of the Asinelli Tower in Bologna." *Structural Control and Health Monitoring* 659–67.
- Carpinteri, Alberto, Giuseppe Lacidogna, Gianni Niccolini, and Stefano Puzzi. 2008. "Critical Defect Size Distributions in Concrete Structures Detected by the Acoustic Emission Technique." *Meccanica* 43:349–63.
- Costa de Beauregard, C. A. 1884. *Familles Historiques de Savoie. Les Seigneurs de Compey*. Chambéry.
- Dobrovolsky, I. P., S. I. Zubkov, and V. I. Miachkin. 1979. "Estimation of the Size of Earthquake Preparation Zones." *Pure and Applied Geophysics* 117(5):1025–44.
- Dori, A. and P. T. Dori. 1881. *Miscellanea Di Storia Subalpina*. edited by F. Casanova. Torino.
- Drouillard, T. F., Associate Editors A. G. Beattie, F. C. Beall, M. Ohtsu, D. A. Dornfeld, R. Hill, I. V Ivanov, and C. Scala. 1996. "Editor : Kanji Ono." 1–34.
- Gholizadeh, S., Z. Leman, and B. T. H. T. Baharudin. 2015. "A Review of the Application of Acoustic Emission Technique in Engineering." 54(6):1075–95.
- Gulia, Laura and Stefan Wiemer. 2019. "Real-Time Discrimination of Earthquake Foreshocks and Aftershocks." *Nature* 574.
- Manuello, Amedeo, Davide Masera, and Alberto Carpinteri. 2019. "AE Damage Assessment in the Bell Tower of the Turin Cathedral." *Key Engineering Materials* 817 KEM:579–85.
- Masera, D., P. Bocca, and A. Grazzini. 2011. "Frequency Analysis of Acoustic Emission Signal to Monitor Damage Evolution in Masonry Structures."

- Journal of Physics: Conference Series* 305 1–10.
- Niccolini, Gianni, Alberto Carpinteri, Amedeo Manuello, and E. Marchis. 2017. “Signal Frequency Distribution and Natural-Time Analyses from Acoustic Emission Monitoring of an Arched Structure in the Castle of Racconigi.” *Natural Hazards and Earth System Sciences* 17:1025–32.
- 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.”” 1187–89.
- Rondolino, F. 1898. *Il Duomo Di Torino Illustrato*. Torino.
- Tosco, C. 2003. *Il Castello, La Casa e La Chiesa, Architettura e Società Nel Medioevo*. edited by G. Einaudi. Torino.

Allegati

Si allegano sei tavole i cui contenuti sono di seguito elencati:

- Tavola 1: Pianta della Cella Campanaria;
- Tavola 2: Pianta della Cella Campanaria;
- Tavola 3: Dettaglio del Ritto P2;
- Tavola 4: Dettaglio dei Ritti P3 e P4;
- Tavola 5: Dettaglio dei Ritti P3 e P4;
- Tavola 6: Degrado nel Ritto P2.