



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE EDILE AMBIENTALE
CORSO DI LAUREA MAGISTRALE IN INGEGNERIA EDILE-ARCHITETTURA

TESI DI LAUREA

**IDENTIFICAZIONE STRUTTURALE DEL
TEATRO ROMANO DI VERONA
MEDIANTE MONITORAGGIO STATICO E DINAMICO**

RELATORE: CH.MO PROF.SSA MARIA ROSA VALLUZZI

CORRELATORI: CH.MO PROF. CLAUDIO MODENA

CH.MO PROF. STEFANO ZAGGIA

ING. FILIPPO LORENZONI

ING. MAURO CALDON

LAUREANDA: DAL RONCO NICOLETTA

ANNO ACCADEMICO 2014-2015

INDICE

Introduzione	pag. I
Organizzazione tesi	pag. IV
Capitolo I – Teatro Romano	pag. 1
1.1 Contestualizzazione	pag. 1
1.2 Datazione	pag. 3
1.3 Committenza	pag. 5
1.4 Materiali	pag. 7
1.5 Tecniche	pag. 9
1.5.1 Opus quadratum	pag. 9
1.5.2 Opus vittatum	pag. 10
1.5.3 Opus reticulatum	pag. 11
1.5.4 Opus cementsium	pag. 11
1.6 Controllo dell'acqua	pag. 13
1.7 Organizzazione e struttura	pag. 13
1.8 Caratteristiche strutturali	pag. 15
1.9 Parti del teatro	pag. 17
1.9.1 Edificio scenico	pag. 17
1.9.2 Orchestra	pag. 20
1.9.3 Cavea	pag. 21
1.9.4 Ambulacro	pag. 23
1.9.5 Galleria a coronamento della cavea	pag. 25
1.9.6 Prospetti laterali del teatro	pag. 26
1.9.7 Terrazze	pag. 28
1.9.8 Tempio	pag. 33
1.9.9 Chiesa di SS. Siro e Libera	pag. 33
1.10 Naumachia	pag. 35

1.11 Fine del teatro	pag. 36
1.12 Riscoperta del teatro e gli scavi	pag. 38
1.13 Cronologia	pag. 48
Capitolo II – Le ricostruzioni storiche del teatro	pag. 53
2.1 Introduzione	pag. 53
2.2 Giovanni Caroto	pag. 53
2.3 Giovanbattista da Sangallo	pag. 57
2.4 Andrea Palladio	pag. 58
2.5 Adriano Cristofali	pag. 62
2.6 Edmondo Falkener	pag. 63
2.7 Ricostruzioni secondo le indicazioni di Andrea Monga	pag. 64
2.8 Jean Baptiste Guillaume	pag. 66
2.9 Vedute pittoriche: Angelo dall’Oca Bianca	pag. 74
2.10 Serafino Ricci	pag. 75
2.11 I rilievi di L. Benvegnù	pag. 78
2.12 Sintesi delle fasi storiche del Teatro Romano	pag. 79
Capitolo III – Architettura del teatro romano: principi costruttivi e confronti	pag. 83
3.1 Le norme vitruviane	pag. 83
3.2 Teatro greco e romano	pag. 88
3.3 Confronti con l’architettura teatrale	pag. 90
3.4 Teatri Romani nell’Impero	pag. 96
3.4.1 Teatri in Italia	pag. 97
3.4.2 Teatri in Francia	pag. 106
3.4.3 Teatri in Spagna	pag. 110
3.4.4 Teatri in Asia Minore	pag. 112
3.4.5 Teatri in Africa	pag. 115
3.5 I teatri dell’Italia settentrionale	pag. 117
Capitolo IV – Analisi dello stato di fatto	pag. 119
4.1 Inquadramento geografico	pag. 119

4.2 Inquadramento sismico	pag. 120
4.2.1 Azione sismica	pag. 121
4.3 Rilievo fotografico	pag. 125
4.3.1 Descrizione delle zone del teatro	pag. 126
4.4 Rilievo geometrico	pag. 129
4.5 Rilievo tipologico strutturale	pag. 138
4.6 Analisi dei carichi	pag. 141
4.6.1 Azione della neve	pag. 141
4.6.2 Azione del vento	pag. 141
4.7 Rilievo critico del danno	pag. 143
4.7.1 Stato di degrado	pag. 143
4.7.2 Vulnerabilità	pag. 149
4.7.3 Analisi del quadro fessurativo	pag. 152
4.8 Conclusioni	pag. 160
Capitolo V – Indagini sperimentali	pag. 161
5.1 Premessa	pag. 161
5.2 Indagini geognostiche	pag. 161
5.2.1 Esecuzione delle indagini	pag. 162
5.2.2 Perforazione a carotaggio e descrizione stratigrafica	pag. 162
5.2.3 Indagini geofisiche	pag. 163
5.3 Analisi del degrado	pag. 164
5.3.1 I materiali lapidei del teatro	pag. 165
5.3.2 Le cause del degrado	pag. 166
5.4 Analisi fisico-volumetriche	pag. 167
5.5 Analisi chimiche (perdita al fuoco, Sali solubili, pH, calcimetrie)	pag. 168
5.6 Analisi petrografiche e spettrofotometriche	pag. 169
5.7 Tecniche debolmente distruttive: prove sulle caratteristiche meccaniche delle murature	pag. 172
5.7.1 Martinetto piatto singolo	pag. 172
5.7.2 Martinetto piatto doppio	pag. 174
5.7.3 Limiti e possibilità delle prove di martinetto piatto	pag. 176
5.7.4 Esecuzione delle prove di martinetto e carotaggio meccanico	pag. 178
5.7.5 Risultati ottenuti	pag. 179

5.7.5.1 Martinetto singolo	pag. 179
5.7.5.2 Martinetto doppio MD	pag. 181
5.7.5.3 Carotaggi	pag. 182
5.8 Tecniche non distruttive: prove dinamiche sulle strutture più significative	pag. 183
5.8.1 Descrizione delle strutture oggetto di indagine	pag. 183
5.8.2 Obiettivo della sperimentazione e finalità della ricerca	pag. 184
5.8.3 Modalità di prova	pag. 185
5.9 Riassunto delle prove	pag. 187
Capitolo VI – Stato dell’Arte del Monitoraggio	pag. 189
6.1 Structural Health Monitoring (SHM)	pag. 189
6.2 Sviluppi di SHM nel ventesimo secolo	pag. 191
6.2.1 Dighe	pag. 192
6.2.2 Impianti offshore	pag. 193
6.2.3 Ponti	pag. 194
6.2.4 Impianti nucleari	pag. 195
6.2.5 Tunnel e scavi	pag. 196
6.2.6 Fabbricati e torri	pag. 197
6.2.7 Beni culturali	pag. 201
6.3 Problemi e limitazioni nello sviluppo del monitoraggio	pag. 204
6.4 Tecnica del monitoraggio	pag. 206
6.5 Processo del monitoraggio strutturale	pag. 207
6.6 Assiomi del monitoraggio strutturale	pag. 212
6.7 Problematiche relative a SMH	pag. 213
Capitolo VII – Teoria dell’identificazione dinamica	pag. 215
7.1 Introduzione	pag. 215
7.2 Monitoraggio strutturale	pag. 216
7.3 Stato dell’arte	pag. 217
7.4 Tecniche di identificazione dinamica	pag. 220
7.5 Analisi del segnale	pag. 222
7.5.1 Aliasing	pag. 223
7.5.2 Leakage	pag. 224
7.5.3 Windowing	pag. 224

7.5.4 Overlap averanging	pag. 225
7.6 Teoria della dinamica delle strutture	pag. 226
7.6.1 Sistemi a un grado di libertà	pag. 226
7.6.2 Sistemi a più gradi di libertà	pag. 228
7.7 Tecniche di identificazione dinamica: input-output	pag. 230
7.7.1 Misura della funzione FRE	pag. 232
7.7.2 Peak peaking method	pag. 233
7.8 Tecniche di identificazione dinamica: output-only	pag. 234
7.8.1 Frequency domain decomposition method (FDD)	pag. 236
7.8.2 P-LSCF	pag. 240
7.8.3 Pianificazione del test output-only	pag. 242
7.9 Model updating	pag. 244
7.10 Conclusioni	pag. 245
Capitolo VIII – Identificazione dinamica	pag. 247
8.1 Introduzione	pag. 247
8.2 Equipaggiamento per le prove dinamiche	pag. 248
8.3 Prove eseguite in sito	pag. 249
8.3.1 Posizionamento dei trasduttori	pag. 251
8.4 Analisi modale	pag. 254
8.5 Risultati delle prove	pag. 256
Capitolo IX – Sistema di monitoraggio	pag. 267
9.1 Caratteristiche del sistema di monitoraggio	pag. 267
9.2 Rilievo del quadro fessurativo	pag. 270
9.3 Obiettivi del sistema di monitoraggio	pag. 271
9.4 Descrizione del sistema di monitoraggio	pag. 271
9.4.1 Monitoraggio statico	pag. 276
9.4.2 Installazione del sistema di monitoraggio statico	pag. 276
9.4.3 Monitoraggio dinamico	pag. 286
9.4.4 Installazione del sistema di monitoraggio dinamico	pag. 287
9.5 Analisi dei dati	pag. 293
9.5.1 Introduzione	pag. 293
9.5.2 Periodo analizzato: note sul funzionamento del sistema	pag. 293

9.5.3 Analisi dei dati statici di tipo slow	pag. 294
9.5.4 Note generali ai risultati ottenuti	pag. 323
9.5.5 Analisi dei dati dinamici di tipo fast	pag. 324
Capitolo X – Analisi delle frequenze	pag. 335
10.1 Introduzione	pag. 335
10.2 Analisi frequenze naturali dei setti	pag. 336
10.3 Analisi frequenze naturali della scena	pag. 340
10.4 Considerazioni	pag. 341
10.5 Analisi non lineare pushover	pag. 344
10.5.1 Arco d’ingresso	pag. 345
10.5.2 Edificio scenico	pag. 350
Conclusioni	pag. 353
Bibliografia	pag. 359

Allegato A: Tavole di analisi**All. 0**

Tav. 01 Ricostruzione Teatro originario

Tav. 02 Ricostruzione Teatro prima delle demolizioni

Tav. 03 Ricostruzione Teatro stato attuale

All. I

Tav. 01 Rilievo fotografico - pianta

Tav. 02 Rilievo fotografico Zona Chiesa - pianta

Tav. 03 Rilievo fotografico Zona Chiesa e Cavea - pianta

Tav. 04 Rilievo fotografico Zona Museo e Zona Scena - pianta

All. II

Tav. 01 Rilievo geometrico - pianta

Tav. 02 Rilievo geometrico Zona Chiesa Arco - pianta

Tav. 03 Rilievo geometrico Zona Museo Scena - pianta

Tav. 04-14 Rilievo geometrico Zona Museo

Tav. 15-17 Rilievo geometrico Zona Scena

Tav. 18-19 Rilievo geometrico Arco

Tav. 20-31 Rilievo geometrico Zona Chiesa

All. III

Tav.01-11 Rilievo critico: degrado Zona Museo - prospetti

Tav.12-14 Rilievo critico: degrado Zona Scena - prospetti

Tav.15-16 Rilievo critico: degrado Arco - prospetti

Tav.17-28 Rilievo critico: degrado Zona Chiesa - prospetti

All. IV

Tav.01-08 Rilievo critico: vulnerabilità Zona Museo - prospetti

Tav.09-11 Rilievo critico: vulnerabilità Zona Scena - prospetti

Tav.12-13 Rilievo critico: vulnerabilità Arco - prospetti

Tav.14-22 Rilievo critico: vulnerabilità Zona Chiesa - prospetti

Allegato B: Schede della qualità muraria**Allegato C: Strumentazione del sistema di monitoraggio**

Introduzione

L'ambito di studio in cui si colloca la presente tesi è l'analisi strutturale degli edifici storici, il cui scopo è la valutazione della sicurezza della struttura a seguito di eventi eccezionali quali il terremoto. Suddetta valutazione riguardante strutture storiche in muratura è un'operazione che presenta notevoli difficoltà dovute in primo luogo alle problematiche legate all'analisi del costruito storico e successivamente all'individuazione di interventi di consolidamento che riescano a preservare le caratteristiche culturali, storiche, artistiche e architettoniche del bene. Oggetto di questo lavoro di tesi è il complesso archeologico del Teatro Romano di Verona, situato sulla riva sinistra dell'Adige e sorto al di fuori dell'impianto urbano romano, fondato attorno alla metà del I sec. a.C., entro la grande ansa formata dal fiume.

Il procedimento proposto in questa tesi tende a fornire un modello, definito per analisi strutturali, finalizzato alla gestione, alla salvaguardia e al controllo dello stato attuale del monumento archeologico, permettendo acquisizioni di conoscenze e informazioni intrinseche finalizzate ad una migliore comprensione dell'organismo strutturale, ad una valutazione delle evoluzioni tempo-spaziali del danneggiamento e alla definizione delle caratteristiche specifiche necessarie per una modellazione strutturale di tipo non lineare.

Il problema del Teatro Romano è un problema d'uso, comune a tutti quei monumenti antichi che ancora conservano una destinazione pubblica, ed è quindi molto importante garantire la sicurezza dei visitatori e utilizzatori del complesso. Inoltre, proprio per la sua tradizione di luogo di spettacolo, è di fondamentale importanza attuare interventi di recupero e conservazione, attenti alla tutela del monumento e, nel contempo, rispettosi dello stato originario del manufatto. Al fine di raggiungere questi obiettivi, il Comune di Verona ha deciso di installare un sistema di monitoraggio permanente, che consenta un controllo costante della struttura e permetta di prevenire situazioni di danno strutturale. Inoltre il monitoraggio permette di individuare quali sono gli interventi realmente necessari per la stabilità della struttura, rispettando il criterio di minima invasività della disciplina del restauro.

L'esigenza, quindi, di una efficace protezione sismica del costruito, con particolare riferimento alle strutture sottoposte a tutela dei beni culturali, ha determinato in questi anni un crescente interesse nei riguardi del monitoraggio strutturale (*Structural Health Monitoring*, SHM) come misura di mitigazione passiva degli effetti dei terremoti.

Tuttavia, lo scopo di un sistema di monitoraggio non è solo la valutazione della resistenza al sisma di un edificio: anche il controllo della funzionalità della struttura nelle condizioni di esercizio rappresenta un aspetto di notevole interesse, sia per la protezione stessa dell'edificio, sia per l'adeguamento sismico o per il rinforzo di strutture critiche o strategiche. Pertanto, il monitoraggio strutturale coinvolge un gran numero di applicazioni nel campo dell'ingegneria civile, quali il progetto, la valutazione del danno, la manutenzione e il rinforzo di strutture esistenti, il controllo strutturale durante i terremoti. L'importanza è data dal fatto che, per gli edifici storici, il controllo strumentale periodico della struttura è uno strumento utile per la conservazione e per la riduzione degli interventi. A vantaggio della conservazione, difatti, il monitoraggio continuo della struttura permette di valutare l'effettiva entità del danno, consentendo di programmare un adeguato piano di manutenzione solo qualora fosse necessario.

Per impostare un programma di monitoraggio, poi, è necessario eseguire preventivamente una accurata analisi del funzionamento strutturale mediante una rigorosa analisi scientifica.

Grazie alla crescente attenzione verso il monitoraggio, infatti, sembra che la prassi operativa nell'ambito dello studio e della conservazione dei beni architettonici vada sempre più affiancandosi al mondo scientifico e della ricerca avanzata, abbandonando quel respiro in molti casi artigianale che pervadeva, fino a non molto tempo fa, qualsiasi intervento di restauro.

Da uno studio, mai secondario, dell'evoluzione storica e geometrica della struttura si deve passare ad un metodico rilievo del quadro fessurativo, volto all'interpretazione dei dissesti in atto in modo da definire i parametri più significativi. Incrociando i dati provenienti da indagini in situ o di laboratorio e da campagne di identificazione dinamica sperimentale con la valutazione del comportamento del modello preliminare ad elementi finiti è possibile, dunque, progettare l'architettura del sistema di monitoraggio permanente da installare sull'edificio tutelato.

Questi sono gli obiettivi enunciati nel paragrafo 4.1.9 delle *Linee Guida per la Valutazione e Riduzione del Rischio Sismico del Patrimonio Culturale* che tratta in modo specifico l'argomento.

Per quanto riguarda le strutture del Teatro Romano, oggetto di studio nella seguente tesi, esse dispongono di un monitoraggio in tempo reale. I dati vengono elaborati per individuare eventuali anomalie o per valutazioni di lungo termine. Per le analisi sul rischio sismico, il sistema di monitoraggio potrà essere usato per creare un database di misure rilevate durante l'intero ciclo di vita della struttura. Risulta perciò fondamentale l'identificazione dei parametri modali delle strutture nelle condizioni di esercizio, il che spiega il ruolo fondamentale dell'analisi modale sperimentale nell'ambito del monitoraggio strutturale. L'interesse nei confronti dell'analisi modale nasce dalla constatazione che il comportamento dinamico della struttura dipende dalle sue caratteristiche intrinseche (masse, rigidità, smorzamenti, grado di vincolo, ecc.), pertanto, se non intervengono modificazioni interne all'edificio (come per esempio il danno strutturale), il comportamento dinamico della struttura rimane inalterato, viceversa, in presenza di fenomeni di danno, si noteranno delle variazioni nei parametri dinamici della struttura.

Solo attraverso un'accurata analisi del funzionamento strutturale e un'interpretazione dei dissesti, sarà possibile certificare il buon comportamento delle strutture, oppure valutare eventuali evoluzioni pericolose per la stabilità di insieme o di singole parti. Se, in alcuni casi, il dissesto sarà ben compreso, si potranno definire soglie di sicurezza e il monitoraggio potrà rappresentare un'alternativa all'intervento, a vantaggio della conservazione. Infine, l'automazione e la conseguente facilità di reperimento dei risultati, permetterà di progettare più facilmente interventi di consolidamento solo dove realmente necessario, di valutarne l'effettivo apporto strutturale, di impostare soglie di preallarme utili per la sicurezza durante importanti interventi di consolidamento o di evoluzione repentina del danno in strutture gravemente danneggiate da sismi e di calibrare i modelli numerici per lo svolgimento di importanti verifiche strutturali anche durante eventi eccezionali come i terremoti.

Il lavoro di tesi è suddiviso in dieci capitoli, il cui contenuto è riassunto di seguito.

Organizzazione della tesi

Capitolo I – Teatro Romano

Il capitolo ripercorre le vicende storiche, dalla nascita alla riscoperta del Teatro Romano di Verona, fino ai giorni nostri. Vengono analizzate le varie parti costituenti il teatro, al fine di avere un'ampia conoscenza del manufatto storico, e le loro relative funzioni.

Capitolo II – Le ricostruzioni del teatro

Riorganizzazione delle principali fonti storiche bibliografiche e iconografiche, rappresentanti le possibili ricostruzioni del complesso del Teatro Romano, al fine di comprendere gli aspetti strutturali e architettonici del manufatto.

Capitolo III – Architettura del teatro romano: principi costruttivi e confronti

Studio dell'architettura dei teatri romani presenti nell'Impero Romano, dai principi costruttivi comuni fino all'analisi delle dimensioni delle parti strutturali e a relativi confronti fra teatri stessi.

Capitolo IV – Analisi dello stato di fatto

Secondo le direttive indicate dalle *Linee Guida per la valutazione e riduzione del rischio sismico del patrimonio culturale* sono stati esposti il rilievo fotografico, il rilievo geometrico, il rilievo del quadro fessurativo e di danno e il rilievo del degrado delle strutture oggetto di analisi. Il capitolo è correlato da tavole grafiche che raccolgono i risultati delle analisi.

Capitolo V – Indagini sperimentali

Riassunto dei principali risultati ottenuti nella campagna prove dell'anno 2000, attraverso prove debolmente distruttive e non distruttive, e valutazione delle caratteristiche chimico-fisico-volumetriche dei materiali costituenti le strutture oggetto di analisi del Teatro Romano.

Capitolo VI – Stato dell'Arte del Monitoraggio.

Considerazioni di carattere generale sullo *Structural Health Monitoring* con evidenza alle applicazioni nell'ingegneria civile attraverso un *excursus* sullo stato dell'arte. In

seguito a tale panoramica sullo stato dell'arte è stato esposto il processo e i limiti del monitoraggio strutturale.

Capitolo VII – Teoria dell'identificazione dinamica

Viene spiegata l'importanza dell'identificazione dinamica delle strutture, attraverso la quale si possono definire i parametri modali degli edifici (forme modali, frequenze proprie di vibrazione e coefficienti di smorzamento). In seguito si è svolta la trattazione dello stato dell'arte indicando le principali applicazioni nel campo dell'ingegneria civile. Sono state esposte le principali tecniche di identificazione dinamica sia di tipo *input – output*, che *output only*, ponendo particolarmente l'accento sulle seconde, le quali sono state adottate per l'identificazione dinamica del Teatro Romano. È stato affrontato il problema dell'analisi del segnale dovuto alla sua conversione da analogico a digitale indicandone le fonti di errore e le soluzioni che serviranno per ridurre gli errori adottate nel programma *ArteMis Extractor 4.0*.

Capitolo VIII – Identificazione dinamica

Vengono descritte le prove di identificazione dinamica eseguite sui setti del Teatro Romano e sull'edificio scenico e vengono esposti i risultati ricavati da tali prove attraverso l'elaborazione dei dati eseguita attraverso il programma *ArteMis Extractor 4.0*. Sono state ricavate le prime forme modali delle strutture e le rispettive caratteristiche.

Capitolo IX – Sistema di monitoraggio

Viene spiegato il funzionamento del sistema di monitoraggio strutturale installato al Teatro Romano, indicando i punti in cui sono stati posizionati i sensori e il processo per l'installazione degli stessi. Di seguito vengono esposte anche le caratteristiche dei sensori installati. Infine sono stati analizzati i dati relativi ai primi quattro mesi di funzionamento del sistema.

Capitolo X – Analisi delle frequenze

Vengono confrontate le frequenze ricavate dall'identificazione dinamica con quelle ricavate dal nuovo monitoraggio, e successivamente con le frequenze ricavate tramite modellazione in *Diana*. Infine viene spiegata l'importanza della modellazione a elementi finiti, per esempio tramite analisi non lineare *pushover*, per determinare alcune possibili vulnerabilità delle strutture del Teatro Romano.

Conclusioni

Commento finale in merito ai risultati ottenuti nel seguente lavoro di tesi, ai possibili sviluppi futuri del sistema di monitoraggio, alla sua importanza e alla sua utilità.

IL TEATRO ROMANO DI VERONA

1.1 Contestualizzazione

Il teatro di Verona è collocato sulla riva sinistra dell'Adige e sorge al di fuori dell'impianto urbano romano fondato attorno alla metà del I sec. a.C. entro la grande ansa formata dal fiume, sulla riva destra.¹ Esso è collocato in una posizione che consente la visione panoramica della città.



Fig. 1.1 – Veduta del Teatro Romano dal Ponte Pietra, foto 2003

La scelta del sito per l'edificio destinato agli spettacoli fu probabilmente effettuata già al momento della realizzazione dell'impianto urbano, anche se la costruzione del monumento iniziò più tardi, dopo aver provveduto a realizzare gli elementi-base della struttura urbana (mura, porte, sistema fognario, argini lungo il fiume e ponti) e il foro con il *Capitolium*, il tempio principale.

¹ Bolla M., *Il Teatro Romano di Verona e le sue sculture*, Grafiche Aurora, Anno 2010

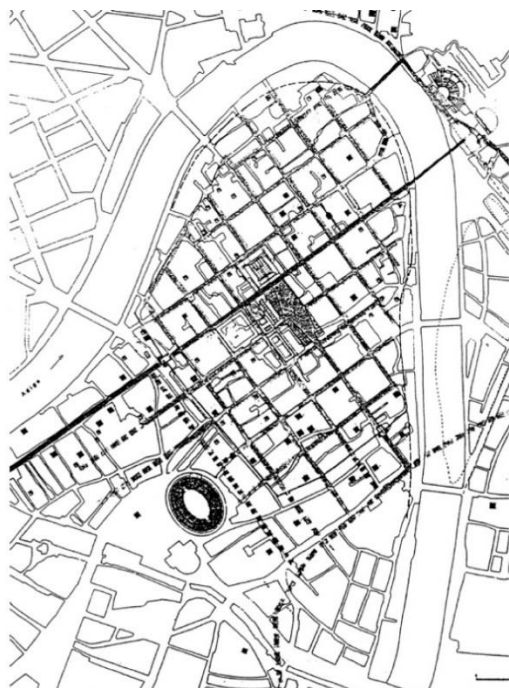


Fig. 1.2 – Pianta di Verona nel I sec. d.C. con i principali monumenti [da Cavalieri Manasse, 2003].



Fig. 1.3 Veduta di Verona dall'alto, foto 2003

L'area del teatro aveva anche in precedenza carattere di luogo di spettacolo, come viene menzionato in una satira di Giovenale che parlava di teatro in forma di pendio erboso collocato a monte del Ponte Lungo in legno.

Vitruvio, nel *De Architectura* (scritto attorno al 15 a.C.), cita il teatro come primo edificio pubblico da realizzare dopo la costruzione del foro; raccomanda inoltre di scegliere un luogo salubre, evitando zone paludose o troppo calde, e di appoggiare quando possibile le gradinate su un pendio, in modo da rendere meno complessa e onerosa la costruzione. A Verona il pendio era offerto dal colle di San Pietro e il teatro fu posto in asse con il reticolo stradale urbano. Gli architetti che pianificarono la struttura della città intuirono l'impatto scenografico che avrebbe avuto la trasformazione edilizia del colle, per la quale s'ispirarono ai grandiosi santuari ellenistici dell'Italia centrale, combinandone diversamente gli elementi costitutivi (terrazze, rampe, cavea) e mutuandone la rigorosa simmetria assiale.²

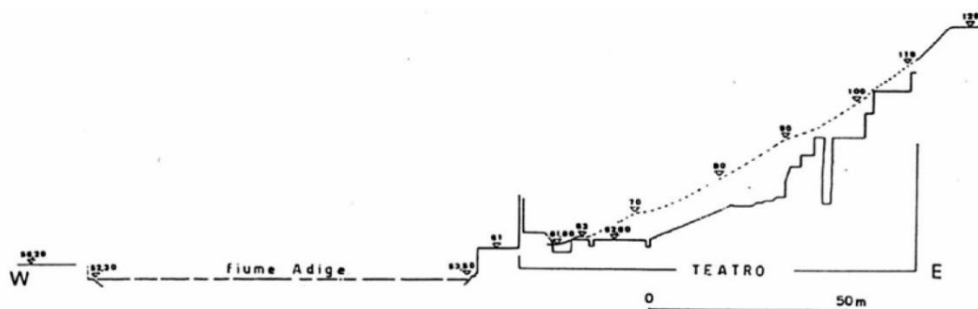


Fig. 1.4 – Sezione del colle di san Pietro [da Cavalieri Manasse 2003]

² Bolla M., *Il Teatro Romano di Verona e le sue sculture*, Grafiche Aurora, Anno 2010

La collina con il suo naturale pendio offriva l'opportunità di fungere da supporto alle gradinate della cavea e di creare una soluzione scenografica a terrazze, concentrando l'attenzione degli spettatori sulla città stessa come fosse uno spettacolo.

Le pendici del colle di san Pietro avevano ospitato in precedenza insediamenti urbani e probabilmente anche la residenza della famiglia del grande poeta Valerio Catullo.

Per costruire il teatro, fu quindi necessario smantellare l'abitato e procedere a enormi sbancamenti, rimodellando la fisionomia della collina.

La scelta della posizione era studiata per risparmiare materiale da costruzione, come l'intercapedine, un profondo taglio praticato nel tufo nel colle, che era usato come cava ne è una testimonianza.

Il teatro fu inserito in un sistema a terrazze, che dalla riva del fiume raggiungeva la sommità del colle, e incastonato fra due ponti, il *Marmoreus* o della Pietra ad occidente e il *Postumius* ad oriente (ora scomparso), e due porte urbane, quella scoperta in via Redentore ed una situata probabilmente poco a nord della testata del ponte Pietra. Lungo l'attuale Regaste Redentore, correva la via Postumia, arteria di grande importanza in Italia settentrionale, che attraversava poi il fiume e la città sulla riva destra. Oltre il teatro, verso nord, proseguiva nella via Claudia Augusta padana, diretta a Trento. Verso sud est si affiancò ben presto un odeon, cioè un piccolo teatro coperto, i cui resti sono visibili in piazza Martiri della Libertà; così venne di fatto a crearsi un quartiere destinato agli edifici per lo spettacolo.

Non è ancora stato dimostrato se tra Teatro e fiume vi fosse una strada di collegamento, ma pare probabile che questa non si estendesse fino al limite del fiume.

La strada passante dietro il proscenio, ipotizzata per la presenza di grande volte sotterranee tuttora visibili in certi tratti della riva del fiume, non obbliga a ritenerla contemporanea al monumento, ma piuttosto databile al tardo periodo romano, quando forse, caduto il Ponte Postumio, si fosse reso necessario aprire una nuova via di comunicazione.³

Infatti il dislivello tra il piano dell'antichissimo Ponte Postumio e quello dell'entrata al teatro avrebbe reso necessaria una rampa, il che fa dubitare dell'esistenza della strada Regaste contemporaneamente al ponte.

1.2 Datazione

La realizzazione del teatro fu portata a termine nel corso dell'età augustea; la cronologia è deducibile dalle caratteristiche architettoniche, in particolare dagli ordini usati, per le

³ Bolla M., *Il Teatro Romano di Verona e le sue sculture*, Grafiche Aurora, Anno 2010

caratteristiche dei capitelli e delle cornici, e non contrasta con quanto emerso dallo studio delle monete ivi ritrovate.

Le pareti del *postscenium* (verso Vicolo Botte), dell'interno dell'atrio e nello sfondo degli archi dei passeggi verso l'ex chiesa del Redentore sono composte da blocchi quadrangolari di tufo locale monolitico, connessi a secco senza legante.

Tale tecnica pare risalire a epoca antica, come attesta Vitruvio e Plinio e come risulta dal confronto con il teatro di Pompei.

Una tecnica antica è utilizzata anche per le pareti in mattonelle di tufo o mattoni connessi da poca pozzolana che costituiscono le pareti delle volte della cavea e dello scalone d'accesso orientale e del lato sinistro delle scale superiori, che conducono al Museo Archeologico.

Dal materiale impiegato sembrerebbe quindi che il teatro fosse di epoca pre-romana, quando era uso risparmiare i materiali più nobili e utilizzare il tufo (civiltà osca e italica antica fino al tempo di Augusto secondo Vitruvio).

Tuttavia, l'uso del tufo si ritrova anche in epoca successiva a quella augustea, come dimostra il Teatro Maggiore di Pompei.

Gli studiosi, pertanto, tendono a distinguere due periodi di costruzione del teatro: un periodo pre-romano od osco e l'altro romano posteriore di ricostruzione ed ampliamento, fatto eseguire per opera di Holconius Rufus e di Holconius Celer.

La costruzione dovette richiedere parecchi anni, trattandosi di una fabbrica di enorme ampiezza, che copriva all'incirca 150 metri di larghezza e più di 100 metri di profondità, con il superamento di un dislivello di 60 metri. Si ritiene che il complesso fosse concluso – compresi i prospetti architettonici delle terrazze superiori - verso la fine del I secolo a.C., anche se qualche elemento di decorazione architettonica testimonia limitati interventi successivi.⁴

A conferma di questa ipotesi è anche la somiglianza di alcuni particolari architettonici del teatro veronese con quello romano di Marcello, la cui edificazione ebbe inizio nel 13 a.C. e compiuta circa il primo secolo d.C., contemporaneamente al *Forum Julium* e al *Templum Martis*.

La datazione del teatro all'età di Augusto era stata proposta già a partire dal Cinquecento da vari studiosi, tra i quali Pinali, però con motivazioni errate e fantasiose. Una delle ragioni di tale datazione era infatti basata sulla lapide ritrovata tra le rovine del Ponte Pietra nel 1513 su cui era inciso il nome Ottavia, sorella di Augusto a cui si ritenne fosse dedicato il teatro. Le ricerche successive hanno dimostrato che l'epigrafe sepolcrale non era pertinente al

⁴ Bolla M., *Il Teatro Romano di Verona e le sue sculture*, Grafiche Aurora, Anno 2010

monumento stesso.

Insussistente è risultata pure la tesi del Pinali secondo la quale i nomi femminili incisi sui lati dei palchetti di pietra del Teatro fossero una conferma della pertinenza degli stessi all'epoca di Augusto, perché fu l'imperatore che ordinò alle donne di assistere agli spettacoli teatrali in posti separati e distinti. Infatti accanto ai nomi femminili compaiono pure nomi maschili, confutando l'ipotesi dello studioso.

Infine non sono prove che il teatro appartenga agli ultimi tempi della repubblica né la presenza di forme architettoniche arcaiche, che è una tendenza che si protrasse anche successivamente nel periodo dell'Impero, né la presenza di una chiave d'arco di forma taurina, che è una figura che si ripete nelle monete d'Augusto e nell'architettura di altri teatri, quali quelli di Arles in Francia e di Marcello a Roma.

Il teatro e in seguito l'odeon precedettero, anche se non di molto, la costruzione dell'anfiteatro, collocata nei decenni centrali del I sec. d.C.

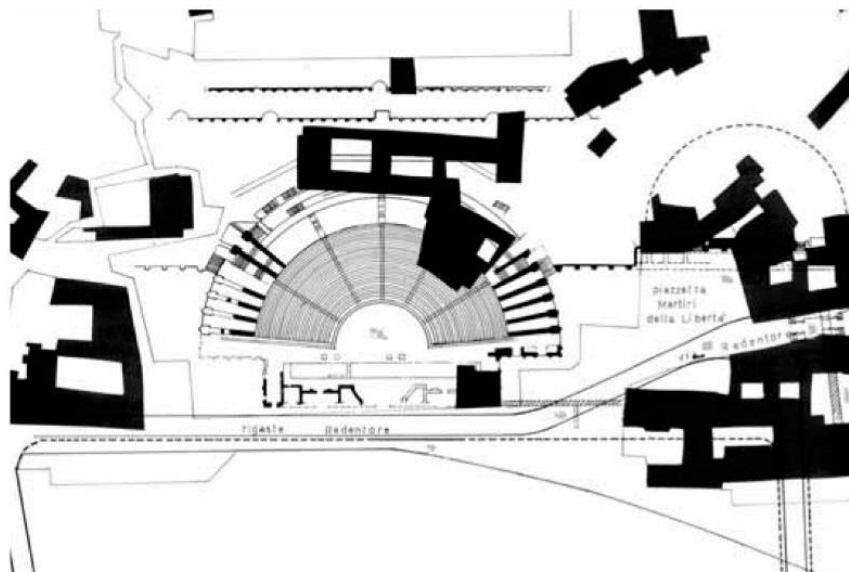


Fig. 1.5 – Teatro e Odeon in rapporto con il percorso della via Postumia, [da Cavaliere Manasse 2003].

L'odeon è un modello architettonico elaborato nella Grecia classica per rispondere alle esigenze di audizioni non aventi carattere scenico. Esso è caratterizzato da un elevato perimetro e da una copertura stabile, per assicurare una migliore acustica, comunemente si affianca al teatro, rispetto al quale ha meno capienza.

1.3 Committenza

Non si conosce il nome dell'autore del monumento o meglio di chi ne promosse la costruzione, trattandosi di un'opera collettiva.

Dell'iscrizione che ricordava il suo gesto, posta in origine in un punto ben visibile dell'edificio della scena (forse a coronamento del primo ordine), restano oggi pochi frammenti, quasi tutti con cifre che si riferiscono alle migliaia di sesterzi spesi per la costruzione del monumento, da cui peraltro non si deduce la somma complessiva.

Il committente del teatro (o di una sua parte) è onorato anche da un'iscrizione databile alla prima età imperiale, esposta nel Museo Maffeiano, molto discussa a causa del pessimo stato di conservazione; si trattava di un *patronus* della città, scelto dal consiglio municipale fra personaggi eminenti e disposto a offrire alla comunità denaro per monumenti o edifici utilitari, in cambio di segni di distinzione e onorificenze, in questo caso per l'ottenimento di una carica pubblica; di lui manca il nome, ma sappiamo che, nell'ambito della sua carriera, aveva ricevuto alte decorazioni militari e aveva celebrato un trionfo o una cerimonia analoga. Riferimenti a eventi bellici si colgono anche nelle sculture del teatro.

Questi dati, uniti alla qualità architettonica, alla maestosità dell'edificio e all'alto livello delle sculture, indicano che il committente della costruzione doveva avere strettissimi legami con Roma. Non è escluso che l'idea della realizzazione del teatro veronese fosse maturata nella cerchia imperiale; Augusto contribuì direttamente a edifici teatrali solo a Roma, ma ne caldeggiò la costruzione in altre città, così che personaggi di grande spicco a lui vicini, come il genero Agrippa, si fecero portavoce della sua politica finanziando queste fabbriche in diverse aree dell'impero. In ogni caso, riguardo a teatri, anfiteatri e circhi, per poter costruire o intervenire con restauri, i privati dovevano avere l'autorizzazione del governo di Roma. In effetti in questo tipo di monumento, percepito come luogo favorevole alla concordia sociale, la popolazione cittadina poteva ritrovarsi in un contesto che esaltava il prestigio della romanità e della casata imperiale, rinsaldando i propri legami e contribuendo intanto a rafforzare il potere centrale. Verona, situata allo sbocco in pianura della valle dell'Adige, era poi una porta d'ingresso nella penisola italica dal Nord, e un edificio di tale splendore poteva costituire un formidabile "biglietto da visita" ⁵ per chi si fosse accostato da straniero alla civiltà romana.

Si ricordano infine le ipotesi circa l'autore dell'opera, diffuse a partire dal Cinquecento, che sono state poi confutate. Tra queste una individuava come artefice del monumento lo stesso del teatro di Marcello a Roma, vista l'affinità di costruzione e di stile architettonico delle due costruzioni. Un'altra vedeva in Vitruvio stesso l'autore dal momento che l'opera ne rispecchiava i precetti.

Più spontanea come idea, sebbene comunque non dimostrata, è che il teatro fosse stato

⁵ Bolla M., *Il Teatro Romano di Verona e le sue sculture*, Grafiche Aurora, Anno 2010

progettato dallo stesso ingegnere architetto dell'Arco dei Gavi, Vitruvio Cerdone oppure Cassio Denticulo, nell'età repubblicana.

Il Benassuti e il Cannella ritennero che il teatro fosse opera di soldati romani in tempo di pace, secondo il primo nel periodo che corse tra la guerra cimbrica e la discordia tra Mario e Silla, secondo il Cannella nel periodo della pace augustea.

1.4 Materiali

Per le strutture portanti del monumento venne largamente impiegato il cosiddetto “tufo”, un'arenaria marnosa di colore grigio-giallastro (“marna di Priabona”), ricavata in gran parte dallo stesso colle di san Pietro: si tratta di una pietra resistente alla compressione, che si taglia con grande facilità, ma si degrada velocemente all'aperto.

L'uso di tale conglomerato tenero (calcare elastico o tufo calcareo) diminuì le spese di erezione del monumento, ma aggravò la spesa di manutenzione e di restauro, causandone la rapida rovina. Una volta abbandonato i romani utilizzarono i blocchi di pietra come rivestimento del tenero tufo, ma tale accorgimento non fu sufficiente.

Le murature in questa pietra (ad esempio quelle dell'edificio scenico, formate da grandi blocchi) erano quindi coperte da intonaco o da rivestimenti lapidei; sembra invece che fossero a vista i paramenti a corsi orizzontali o incrociantisi in diagonale (*opus reticulatum*), costituiti da tufelli ritagliati con cura dalla stessa arenaria marnosa, ricavata però da banchi di maggior compattezza; quest'ultima tecnica è usata in particolare sulle terrazze superiori dove presenta in alcuni punti inserti decorativi in altro colore, e nelle arcate cieche dell'argine sul fiume.

L'*opus reticulatum* richiedeva precisione e abilità nella lavorazione dei tufelli (*cubilia*) e quindi maestranze specializzate; queste dovettero essere chiamate a Verona dal centro Italia, dove la tecnica era ben nota. Dato l'impegno economico necessario, essa fu usata raramente in età romana in Italia settentrionale (il teatro veronese è uno dei pochi casi attestati).⁶

Per alcuni rivestimenti parietali (ad esempio nei corridoi di accesso), per le gradinate, le coperture dei canali e dell'euripo, le cornici architettoniche, le chiavi d'arco figurate e altri elementi, venne ampiamente utilizzato il calcare ammonitico delle cave della Valpolicella, nelle varianti bianca e rosata, anche creando effetti coloristici: i gradoni erano in calcare prevalentemente bianco, mentre le scalette divisorie della cavea di colore rosa intenso. Dovette poi essere abbondante l'uso di antefisse in terracotta; la loro provenienza dal teatro è solo ipotetica, ma è possibile che per una fabbrica di così grande mole fosse stato necessario importare laterizi anche da altre città.

⁶ Bolla M., *Il Teatro Romano di Verona e le sue sculture*, Grafiche Aurora, Anno 2010

Caratteristica precipua dell'edificio è poi la ricchezza della decorazione marmorea. Nelle cornici e nelle sculture predomina il marmo bianco, proveniente, secondo le analisi effettuate, almeno da otto diverse aree di estrazione, soprattutto da quella lunense (l'attuale marmo di Carrara), ma anche da altre in Grecia e in Asia Minore (odierna Turchia).

Erano anche abbondantemente presenti i marmi colorati, nella tecnica dell'*opus sectile*, come indica il pavimento ora visibile sull'orchestra, ricostruito o creato ex novo (con lastre comunque ritrovate nel teatro). La quantità delle lastrine in marmo rinvenute negli scavi dell'Ottocento fu tale che Andrea Monga, lo studioso del teatro, le utilizzò nei pavimenti della propria villa a San Pietro Incariano.

Dagli studi si deduce che il risparmio di materiale più nobile, pietra e marmo, appartiene al periodo preromano, mentre l'uso di tufo era diffuso nella civiltà osca e italica antichissima. A quel tempo si usava il tufo sia in blocchi che tagliato in formelle di mattoni o in cunei e dadetti per il reticolato.

Il tufo in blocchi è usato in Roma all'epoca dei Re; l'uso del tufo con rivestimento di stucco e dei mattoni crudi insieme coi cotti prosegue anche nel periodo più avanzato di Roma, che ancora subisce l'influenza dell'Italia meridionale e greca orientale.

Secondo Vitruvio l'uso delle mattonelle incotte si usò sino al tempo di Augusto in Roma, periodo in cui scomparve davanti all'utilizzo regolare della costruzione laterizia cotta. Nelle province questo sistema di costruzione ha continuato ad essere usato anche in un periodo posteriore rispetto a quello della capitale, come è provato dal Teatro Maggiore di Pompei.

Si osserva inoltre che nel Veneto era usato un tufo bianco e tenero, che si segava come il legno, identico a quello usato nel teatro.

L'uso dei materiali ha portato gli studiosi a distinguere due periodi di costruzione del teatro: un periodo pre-romano od osco e l'altro romano posteriore di ricostruzione ed ampliamento, fatto eseguire per opera di Holconius Rufus e di Holconius Celer.

L'uso di blocchi di tufo senza cemento nella capitale romana di solito appartiene ad un periodo preaugusteo, ma in certi casi, come nel teatro di Ostia, è contemporaneo all'opera laterizia degli edifici urbani augustei.

Il reticolato ben conservato e l'uso primitivo del tufo consentono hanno contribuito alla datazione del teatro. L'abbondanza e la ricchezza di marmi africani e orientali, usati principalmente per la decorazione della scena, sono per Ricci testimonianza di un rimaneggiamento del teatro al tempo di Adriano.



Fig. 1.6 – Scalinata del teatro, esempio di *opus vittatum*



Fig. 1.7 – Pavimento in *opus sectile* dell'orchestra, ricostruito o integralmente creato agli inizi del 900



Fig. 1.8 – Passeggiata superiore, *opus reticulatum*

1.5 Tecniche

Il teatro si caratterizza per l'impiego di alcune tecniche murarie in uso all'epoca romana: *opus quadratum*, *opus vittatum* e *opus reticulatum*, in associazione con l'*opus cementicium*.

1.5.1 *Opus quadratum*

L'opera quadrata è caratterizzata dall'impiego di blocchi squadrati disposti in genere nel senso della lunghezza (ortostati), ricavati dall'estrazione di due tipi di pietre: un travertino di colore biancastro, tendente al giallo dopo una lunga esposizione agli agenti atmosferici, ricco di inclusi vegetali mineralizzati e un tufo di colore grigiastro estratto da cave situate nel territorio (come nel Teatro di Verona). Le pietre che occupano tutto lo spessore del muro, e che quindi hanno due facce visibili, si dicono diatoni. Nel Teatro Romano di Verona il tipico esempio di *opus quadratum* è la parte ancora visibile della scena. I diatoni sono sovrapposti tra loro e realizzati a partire da blocchi di tufo. Spesso l'altezza dei filari diminuisce man mano che il muro si alza, ovviamente per facilitare le operazioni di sollevamento e di posa.



Fig. 1.9 – *Opus quadratum*

1.5.2 Opus vittatum

Questa tecnica consiste nella semplice disposizione di blocchetti quadrangolari in pietra della stessa altezza su filari orizzontali. Nonostante questa apparente semplicità, l'*opus vittatum* non è molto diffuso prima dell'età augustea. Nel corso del I secolo a.C., con l'uso sistematico del tufo, questi blocchetti parallelepipedi, detti tufelli, vengono usati soprattutto nelle catene angolari.

Nel Teatro Romano di Verona tale tecnica è impiegata per la costruzione dei setti delle arcate sostenenti la cavea dell'edificio. Il nucleo cementizio delle costruzioni è in questo caso rivestito da un paramento di blocchetti di tufo di forma parallelepipeda, disposti in assise piane.

Come regola generale l'*opus vittatum*, per le ridotte dimensioni dei blocchetti, poteva adattarsi a qualsiasi tipo di programma (i filari hanno un'altezza variabile dai 10 ai 12 cm, mentre la lunghezza delle pietre oscilla tra i 10 e i 20 cm), e i muratori disponevano sempre le pietre su assise orizzontali, mentre le estremità dei muri venivano ammorsate con blocchi disposti di testa o di taglio, di dimensioni maggiori di quelle del resto del paramento.



Fig. 1.10 – *Opus vittatum*

1.5.3 *Opus reticulatum*

Una sempre maggiore divisione e specializzazione dei processi produttivi è alla base dell'affermarsi di questo tipo di tecnica. I blocchetti quadrati, quasi sempre di tufo grigio o giallo, sono disposti secondo un asse inclinato di circa 45°, secondo un modulo ricorrente di due blocchetti pari a un piede. Tutto ciò permette di velocizzare il lavoro e anche di prodursi in virtuosismi tecnici che permettono talvolta di pubblicizzare la bottega con l'inserimento di motivi geometrici anche di elaborata fattura.

La scelta di disporre le pietre inclinate sul piano può giustamente sembrare insolita; in effetti essa si inserisce nella linea dell'evoluzione economica e sociale che ha interessato il mondo romano, condizionando la genesi e lo sviluppo di nuove tecniche. A partire dalla fine del III secolo a.C. l'uso di un'abbondante manodopera servile aveva spinto gli artigiani a far produrre velocemente materiali edilizi facili da tagliare per un personale poco qualificato. Questa razionalizzazione del lavoro di taglio sfocerà in una standardizzazione dei materiali ancora più rigorosa, che semplificherà ulteriormente il lavoro del muratore.

L'opera reticolata verrà generalmente impiegata nell'Italia centrale e centromeridionale alla fine dell'età repubblicana. Nessun muro in opera reticolata è stato rinvenuto nell'Italia settentrionale, verso l'Emilia, le Venezie e la Liguria. L'opera reticolata non si trova impiegata neppure in Gallia, se non sottoforma di qualche pannello decorativo, come nel caso del Teatro Romano di Verona, nella passeggiata superiore.⁷



Fig. 1.11– *Opus reticulatum*

1.5.4 *Opus cementicium*

Indipendentemente da tipo di paramento, la costruzione in muratura può avvenire in modi diversi che si possono analizzare guardando in sezione un muro in rovina. Qualunque sia l'aspetto della parete (opera quadrata, mattoni ecc.), si nota che la parte interna della costruzione è formata da elementi di qualsiasi forma, da scarti o da frammenti di tegole e di

⁷ Lugli G., *La tecnica edilizia romana*. 2 Voll., Giovanni Bardi ed, Roma, 1957

mattoni, legati con malta e contenuti tra i due paramenti accuratamente realizzati. Appare evidente, dunque, che questi paramenti costituiscono una cassaforma permanente per una massicciata che occupa la maggior parte del muro e che funge da elemento portante. Ciò spiega anche come mai gli elementi impiegati nelle facciaviste siano stati molto spesso riutilizzati senza peraltro nuocere alla stabilità dell’edificio. E’ quello che Vitruvio chiama *emplecton*, usando evidentemente il termine greco «Un terzo modo, in uso nelle campagne, consiste nell’alzare dei paramenti riempiendo l’interno con malta e materiali alla rinfusa («ita uti sunt nata, così come si trovano in natura»), inserendo qua e là blocchi di assestamento disposti di punta. I nostri muratori, per accelerare i lavori, curano l’innalzamento dei paramenti, riempiendo l’interno co scaglie di pietre mischiate con malta; in questo modo creano una muratura a tre strati: due sono i paramenti e uno il riempimento. »



Fig. 1.12 – 1.13 Vista della sezione rispettivamente del setto A3 della zona museo e del setto B2 della zona chiesa

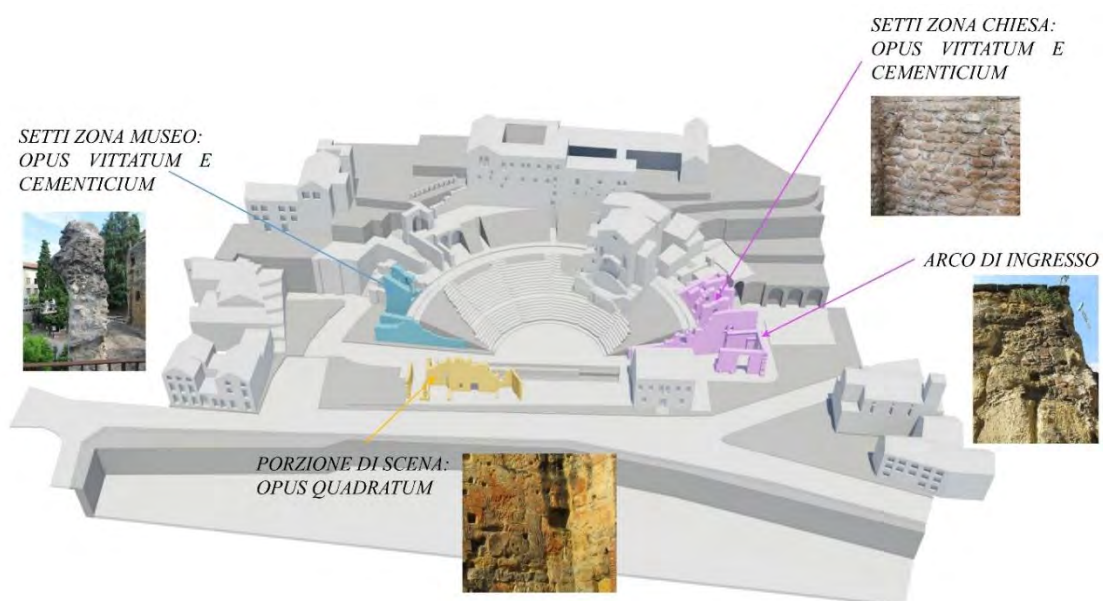


Fig. 1.14 – Restituzione tridimensionale che sintetizza le tipologie murarie presenti nell’area di studio

1.6 Controllo dell'acqua

I costruttori del teatro posero estrema cura nell'attuare un rigoroso controllo delle acque, visto che l'edificio occupava il pendio di una collina costituita da una pietra di scarsa durezza, entro la quale l'acqua si apre con molta facilità nuove strade.

Per evitare questa potenziale minaccia per le murature addossate al colle, costruirono un complesso sistema di canalizzazione, di cui solo alcune parti sono oggi ricostruibili. L'accorgimento più grandioso fu il taglio (profondo 18 metri, largo circa due) praticato nella collina per separare da essa le gradinate e costituito da tre segmenti, che "abbracciavano" tutta la cavea dal retro; l'acqua che giungeva dal colle finiva nel canale lastricato posto sul fondo del taglio e da lì, attraverso altre tubazioni, era condotta al fiume. Per impedire eventuali smottamenti delle pareti del taglio, fra di esse furono collocate, ad intervalli regolari, pesanti travi in pietra bianca, fissate a incastro per impedire un reclinamento all'indietro del settore tufaceo rimasto isolato come una quinta. L'intercapedine dovette essere realizzata nelle fasi iniziali dei lavori e fornì ai costruttori una cava in loco, visto che il "tufo" da essa ricavato fu poi tagliato e messo in opera nel teatro. Alla base del teatro correvano, attorno all'orchestra e lungo i corridoi laterali di ingresso, ad esempio, ulteriori canali, costruiti con cura, abbastanza profondi e coperti da lastre in calcare locale, a volte decorate a traforo per ottenere dei tombini. Si provvide infine alle esigenze fisiche degli spettatori, con il posizionamento di *latrinae*: una venne individuata nell'Ottocento al piano terra del teatro, in uno degli ambienti a volta, che sostenevano le gradinate sul lato orientale.

1.7 Organizzazione e struttura

Il teatro veronese fu costruito con orientamento a mezzogiorno, contrariamente a quanto prescritto dal Vitruvio, in quanto la naturale vocazione del sito era tale da soverchiare ogni prescrizione. Esso aveva una capienza di circa tremila spettatori.

I primi teatri in Italia sorsero in Sicilia e nella Magna Grecia, cioè in ambiente di cultura ellenica già nel VI sec. a.C., mentre i più antichi teatri in muratura di costruzione romana, dopo i fugaci esempi dei teatri lignei, sono databili fra l'80 ed il 70 a.C.

Il teatro non è una creazione originale dell'architettura romana ma deriva, con alcune modifiche, dallo schema del teatro greco il quale sorse come ambiente destinato a particolari forme del culto di Dioniso che si evolsero poi in un genere di spettacolo: la tragedia. Nel suo aspetto sostanzialmente definitivo il teatro greco è un prodotto del V sec. a.C. fiorito nella civilissima Atene.

Parti essenziali del teatro romano sono:

- *Orchestra*: uno spazio piano, per lo più semicircolare, destinato alle evoluzioni ritmiche del coro. Nella trasformazione romana anche l'orchestra verrà destinata, almeno in parte, ad accogliere il pubblico. L'orchestra è compresa tra il proscenio sul quale agiscono gli attori, e la cavea). I Romani, pur riprendendo l'essenza dei teatri greci, apportarono delle modifiche consistenti nella riduzione della dimensione dell'orchestra e nell'ampliamento della scena per renderle meglio corrispondenti alle esigenze dei loro spettacoli e nell'aggiunta di un *post scaenium* a diversi ordini sovrapposti.
- *Proscenio*: ha come fondale la fronte dell'edificio scenico, il quale, in un teatro dell'età romana, presenta alle estremità due avancorpi denominati parasceni, che delimitano sui fianchi il proscenio. Sul proscenio agiscono gli attori.
- *Cavea*: costituita da gradoni semicircolari di raggio sempre maggiore a mano a mano che si sale, sui quali siedono gli spettatori.
- *Edificio scenico*: funge da fondale del proscenio.
- *Cripte*: passaggi di accesso all'orchestra, che nel teatro romano sono coperti da volte e realizzano l'unione tra edificio scenico e cavea.
- *Velario*: elemento utilizzato per coprire la cavea, tipico del teatro romano che ha carattere più raccolto e chiuso rispetto a quello greco.
- *Auleum*: sipario che, mediante un congegno di travi a cannocchiale, si abbassava all'inizio dello spettacolo e si alzava alla fine con movimento inverso a quello attuale.
- *Meniana*: partiture orizzontali della cavea.
- *Vomitoria*: ciascuna delle aperture attraverso le quali il pubblico accedeva dai corridoi alle gradinate.

Il teatro di Verona in quanto utilizza almeno parzialmente il pendio della collina come supporto per la gradinata si avvale di un'esperienza costruttiva che appartiene alla cultura greca, ma la tipologia del monumento, in cui cavea ed edificio scenico si legano in stretta unità, è romana.⁸

Tale unità non è più percepibile perché sono crollate le volte che coprivano i due corridoi di accesso laterale alla cavea (denominati *cripte* in quanto coperti).

⁸ Franzoni L., Lampronti G., *Il Teatro Romano: la storia e gli spettacoli*, Verona, Editore Comune di Verona, Anno 1988

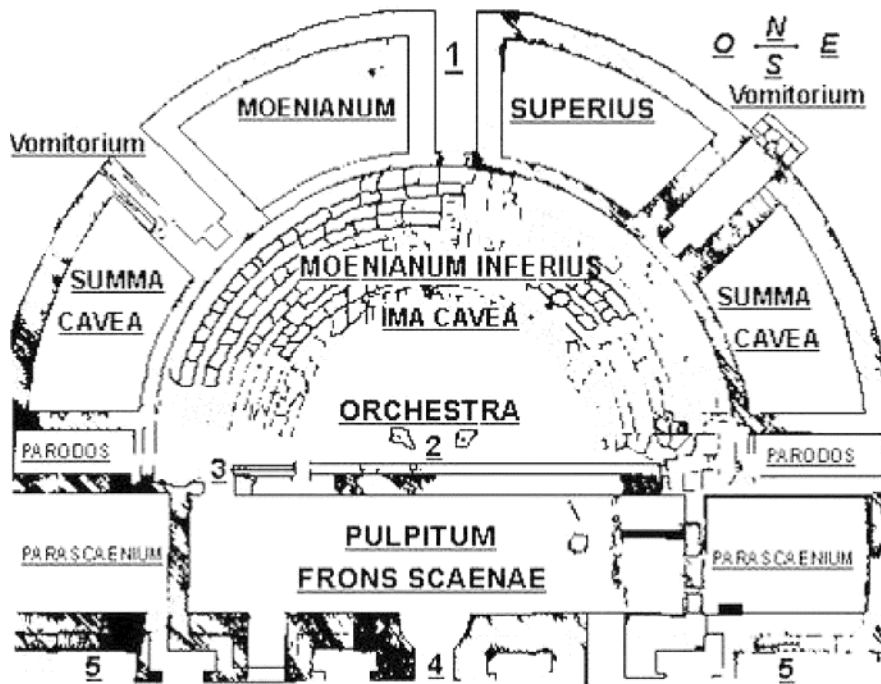


Fig. 1.15 – Struttura del teatro romano [da “Il teatro e gli spettacoli”]

1.8 Caratteristiche strutturali

Il teatro ha un diametro di circa 110 metri, compresi i quattro archi ciechi, che da una parte e dall'altra delimitavano a monte le piazzette laterali, l'estensione frontale esterna risultava di complessivi 150 metri. Nel senso della profondità la misura massima delle sole strutture del monumento attualmente conservate è di 71 m, che però diventano 107 se si calcola dall'arginatura dell'Adige fino al muro dorsale della seconda terrazza, ossia tutte le opere connesse alla costruzione del teatro e legate a questo in un solo piano unitario. Semplificando, si può dire che l'intero complesso monumentale è compreso in un rettangolo che misura 150 m sulla fronte e 107 m verso l'interno. Oggi questa misura è ridotta a 97 m, in quanto la strada risulta del tutto scorporata dal teatro, cosa che non era in antico. In questo rettangolo le opere murarie si collocano a quote diverse, in quanto dalla riva dell'Adige, dove si alza l'arginatura in *opus reticulatum*, fino al piano della seconda terrazza, che ha il muro dorsale egualmente in *opus reticulatum*, si registra un dislivello di 50 m, che diventano più di 60 fino alla spianata superiore, dove sorgeva il tempio, posto a coronamento dell'imponente complesso.

Dal punto di vista strutturale la cavea è posata sul terreno nella parte centrale ed è attiva sulle ali, dove si sostituiscono al colle dei settori di muri radiali, collegati da volte a botte e collegati in basso da elementi in ordine tuscanico, di cui si è conservato solo un capitello di

semicolonna in pietra veronese.⁹

Il primo meniano era sorretto da muri e volte rampanti e dalla collina nella parte centrale, il secondo tutto solo da muri e volte rampanti formanti una serie di arcovoli, di cui solo gli estremi accessibili. Attualmente è rimasta solo una piccola parte della struttura muraria portante. Infatti i muri superstiti raggiungono un'altezza di poco superiore alla terza parte di quella che doveva essere l'altezza originale.

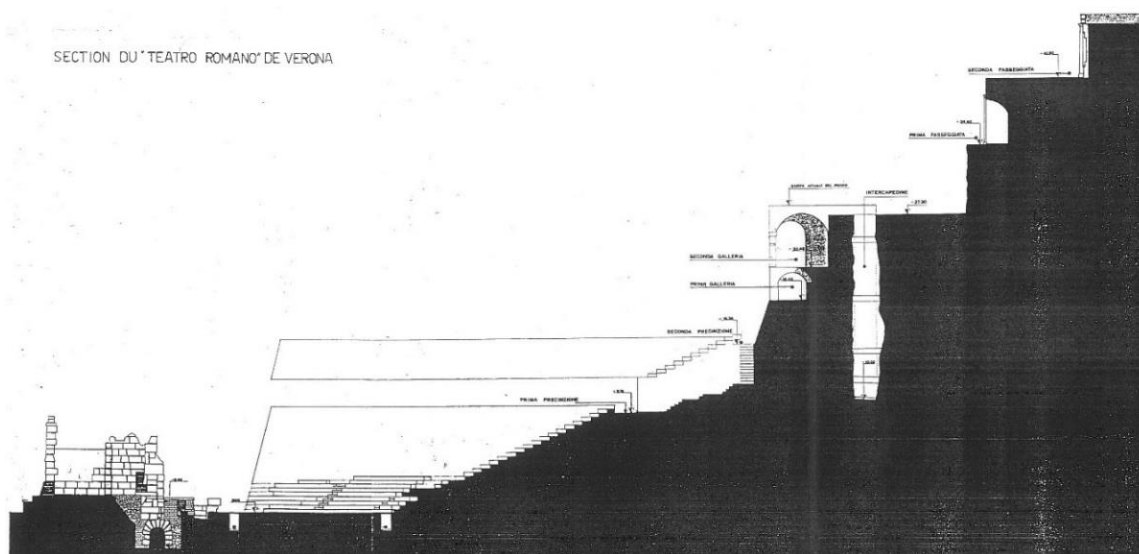


Fig. 1.16 – Sezione del teatro dalla scena alla seconda passeggiata, di L. Benvegù, 1980 [da “Il teatro e gli spettacoli”]

Gli ingressi erano due, ai lati della scena. Se ve ne fossero stati degli altri, questi avrebbero dovuto servire unicamente per gli attori, dato che immettevano nel *post-scaenium* o retroscena. Nel teatro si accede dall’ingresso orientale attraverso la casa del custode; si ha sulla sinistra un muro in blocchi di tufo con il primo rocchio di due semicolonne in pietra: è il muro esterno del parascenio orientale. Tre settori di muro isolati determinano due grandi passaggi che immettono nella cripta orientale da cui si accede all’orchestra.

L’ingresso occidentale mostra ancora lo scalone e una parte del monumentale secondo ordine architettonico a sostegno del secondo ripiano della cavea. La metà occidentale della frontescena con relativo parascenio, per un terzo circa dell’altezza primitiva, è quanto rimane dell’edificio scenico.

⁹ Franzoni L., Lampronti G., *Il Teatro Romano: la storia e gli spettacoli*, Verona, Editore Comune di Verona, Anno 1988

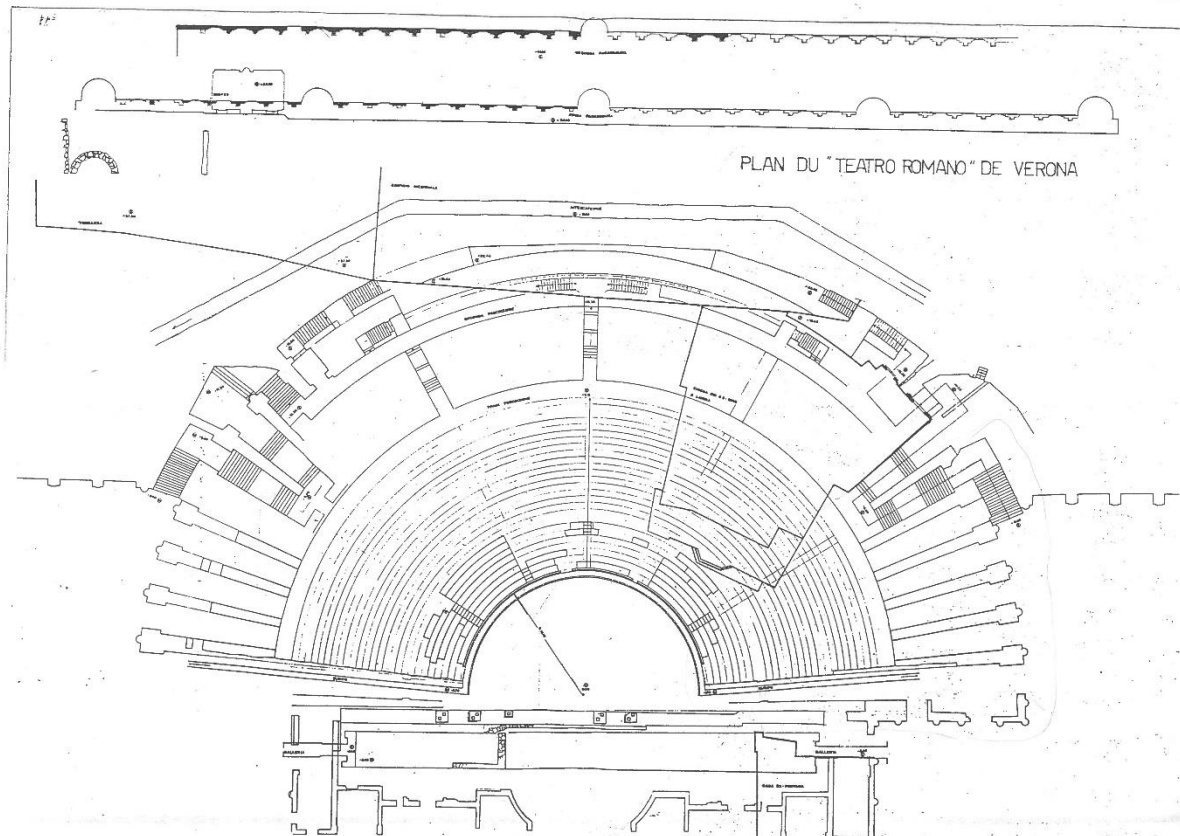


Fig. 1.17 – Ricomposizione della pianta del Teatro fino alla seconda passeggiata, dopo gli ultimi scavi nella fossa scenica (1971). In alto a sinistra il Ninfeo di L. Benvegù, 1980 [da “Il teatro e gli spettacoli”].

1.9 Parti del teatro

Si descrivono di seguito le parti di cui si compone il Teatro Romano.

1.9.1 Edificio scenico

Nel teatro romano, per la ricordata tendenza a creare un ambiente raccolto, l’edificio scenico eguagliava in altezza la cavea con i suoi eventuali coronamenti di logge. Secondo questa norma, nel Teatro di Verona l’edificio scenico si pensa avesse un’altezza di 27 metri.

La lunghezza della scena, compresi gli ambienti creati dai parasceni, era di 72 metri, mentre lo spessore era di appena 6 metri. Tolti i due parasceni laterali, resta un fronte utile per il palcoscenico di 59,50 metri. Già il Pinali riconosceva che i muri di tufo dovevano essere rivestiti in *crustae marmoree* e, dove questo non avveniva, un grosso intonaco, con superficie marmorizzata, ne simulava bene l’aspetto.

Dei due parasceni uno è attualmente inglobato nella casa Fontana, che assolve alla funzione di ingresso al Teatro, mentre è libero e discretamente conservato quello ad occidente.

Il parascenio ad occidente era originariamente diviso in due stanze, alla più esterna si accedeva attraverso una scaletta di quattro gradini, mentre la più interna presentava una porta

che comunicava direttamente con la scena.

Al parascenio occidentale si salda una stanza quasi quadrata (5,50 x 5 metri), dopo la quale si sviluppa un secondo ambiente lungo e stretto (11,30 x 2,50 metri), che nella parete verso il palcoscenico aveva la porta *hospitalis* occidentale, risultante al centro di una grande nicchia rettangolare non molto profonda. Dopo questo ambiente se ne trova un terzo, di forma irregolare per la presenza di una parete curva, che concorreva a determinare il grande nicchione centrale del fronte scena.

La fronte dell'edificio scenico, che guarda verso la cavea, presentava tre nicchie, una centrale, più profonda, in parte a profilo curvilineo e due laterali a pianta rettangolare. In ognuna di queste nicchie si apriva una porta, altre due si aprivano nei parasceni e da queste cinque porte gli attori accedevano al proscenio. Questo è abbastanza profondo, misurando 15 metri al centro, in corrispondenza del nicchione, e 9 metri nel punto più stretto. L'altezza del proscenio sull'orchestra era di metri 1.40 e la fronte, rettilinea, doveva essere scandita da un partito ornamentale molto semplice di lastre in pietra rosa di Sant'Ambrogio (Valpolicella) con un archetto su due paraste lisce. La scena, secondo il canone vitruviano, è uguale in lunghezza a due volte il diametro dell'orchestra (30,40 x 2 metri).

Accedendo all'orchestra e guardando verso la scena si ha davanti la fossa scenica, divisa in quattro fossati distinti, uno più largo e più profondo, comunicante con le cripte, ed un altro anteposto a quello, più stretto e meno profondo, dove si osservano quattro grossi plinti di pietra bianca, ciascuno con due fori quadrati in diagonale. Si ritengono apprestamenti per l'*aulaeum*, il sipario che, mediante un congegno di travi a cannocchiale, si abbassava all'inizio dello spettacolo e si alzava a spettacolo finito, con movimento inverso a quello per noi abituale. La fossa del sipario è separata da uno stretto muricciolo dalla grande fossa che si apriva sotto il piano di calpestio, in origine ricoperto da assi in legno, del proscenio. La grande fossa scenica ha due sbocchi laterali attraverso due cunicoli che passano sotto i parasceni. Ben visibile è l'ingresso di quello occidentale. E' completamente perduto il muro posteriore alla scena che guardava verso la città e si elevava scandito dalla trama decorativa degli ordini architettonici, quello tuscanico, dorico e quello con capitelli a sofà su semicolonne.¹⁰

Il palcoscenico era coperto da un tetto ad una sola falda ornato da antefisse fittili a palmetta, di cui sono stati trovati resti nel corso degli scavi nell'area.

¹⁰ Franzoni L., Lampronti G., *Il Teatro Romano: la storia e gli spettacoli*, Verona, Editore Comune di Verona, Anno 1988

L'edificio scenico era saldato alla cavea mediante volte che trasformavano le *parodoi* in *cripte*. Queste volte però si arrestavano sulla linea dell'ottavo gradino della cavea, come lascia presumere una lastra di rivestimento nella cripta orientale che sporge a formare la spalla di una soglia.

Verso oriente un arco, largo 3,45 metri e alto 6,70 metri, immette nella *pàrados* o corridoio laterale di accesso all'orchestra, altri due archi (di cui solo uno interamente conservato) con percorso normale al primo e aventi apertura di 2,80 x 6,57 metri, adducevano alla stessa *pàrados* dell'area marginale del parascenio. La *pàrados* o cripta orientale ha una larghezza di 38,50 metri. L'apertura verso l'orchestra misura una larghezza di 2,50 metri.

Al di sopra delle *cripte* verso l'orchestra c'erano, da una parte e dall'altra, i *tribunalia*, che oggi chiameremmo palchi d'onore.

Un altro posto di particolare riguardo era la tribuna imperiale, al centro della cavea in corrispondenza dei primi gradini. La sua fronte doveva essere di 4,05 metri e la profondità di 2,55 metri.¹¹



Fig. 1.18 – Foto della fossa scenica e dei resti della scena, 2014

¹¹ Franzoni L., Lampronti G., *Il Teatro Romano: la storia e gli spettacoli*, Verona, Editore Comune di Verona, Anno 1988



Fig. 1.19 – Foto del grande arco di ingresso alla pàrados orientale, 2014

1.9.2 Orchestra

Esso è lo spazio semicircolare compreso tra il palcoscenico e la gradinata, che aveva un diametro di 30,40 m (non di 15,30 m come affermava erroneamente il Marconi) ed era pavimentata da marmi di colori diversi, secondo la tecnica dell'*opus sectile*.

A filo del primo gradino corre l'euripo, cioè il fossato per lo scolo delle acque raccolte dalla cavea, profondo 1,70 m e largo 70 cm.

L'euripo continua, da una parte e dall'altra, sotto il pavimento delle cripte e convoglia l'acqua fuori dal teatro, verso l'Adige. Una balaustra (*balteo*), la cui esistenza è provata da una fondazione semicircolare di 2,40 m sulla quale posavano tre gradini, separava l'orchestra da una tribuna (*proedria*) con una serie di posti l'onore riservati alle personalità eminenti (i «patres» o «decuriones» della città).

Questa era collocata in asse con la cavea, aveva la fronte di circa metri 4, ed era profonda metri 2,40. Nel teatro greco lo spazio dell'orchestra era riservato al coro e ai movimenti di danza accompagnati dalla musica che sottolineavano le rappresentazioni tragiche, mentre la presenza di un altare richiamava la funzione religiosa del teatro. Nel teatro romano alla funzione religiosa si affiancò l'esaltazione del potere politico, per cui non è escluso fosse presente una statua imperiale.¹²

¹² Franzoni L., Lampronti G., *Il Teatro Romano: la storia e gli spettacoli*, Verona, Editore Comune di Verona, Anno 1988



Fig. 1.20 – Foto dell'orchestra e della cavea, 2014

1.9.3 Cavea

La cavea, che ha un diametro di 108 m, come ora si presenta è il risultato di un lungo lavoro di ricomposizione, non certo condotto con scrupolo scientifico: nelle parti mancanti della scala sono stati utilizzati dei mattoni che recano talvolta impressa la scritta “1907”.

La cavea è mancante alle estremità dove i gradoni non posavano sul pendio stesso del colle ma sopra costruzioni artificiali, costituite da muri radiali su cui vi erano delle volte a botte. Sul lato orientale tre volte sono cadute ma due ancora si conservano sotto la chiesa dei SS. Siro e Libera; sul lato occidentale ne sono crollate due e due altre rimangono. Gli scavi hanno fatto ritrovare sul posto quasi tutto il semicerchio formato dal primo gradone ma i successivi si rinvennero per lo più disseminati qua e là, fuori dal loro posto originario. I primi sette gradoni del secondo settore occidentale furono trovati, nella loro primitiva sistemazione, già da Andrea Monga.

La cavea era divisa da passaggi orizzontali o precinzioni in due settori che prendevano il nome di meniani: *ima e summa cavea*.

L'ima cavea conta 23 gradini ed è divisa in sei cunei da cinque scalette in pietra rosa di Sant'Ambrogio. Il numero originario dei gradini potrebbe essere superiore, forse 25, come segna la pianta del Gismondi, o 26 come ipotizzava il Ricci e ha disegnato il Benvegnù.

La distribuzione delle cinque scalette segue la norma vitruviana dei quattro triangoli equilateri inseriti nel cerchio, avente il suo centro nel centro dell'orchestra.¹³

¹³ Franzoni L., Lampronti G., *Il Teatro Romano: la storia e gli spettacoli*, Verona, Editore Comune di Verona, Anno 1988

Tuttavia la scaletta centrale non ha l'invito intagliato nel gradino più basso della cavea, in quanto essa non aveva inizio dal primo gradino ma alle spalle della tribuna imperiale come si riscontra nel teatro di Siracusa, nella *Neue Proedrie* del teatro di Dioniso a Atene, nella *Obere Proedrie* del teatro di Priene e nei teatri di Trieste, Aosta, Catania.

Alla prima precinzione, che scandiva la conclusione del primo meniano, situata a metri 9,15 dal livello dell'orchestra, si accedeva per mezzo di scale laterali e, tramite cinque porte rettangolari che si aprivano sulla parete dorsale, si scendeva sulla gradinata. Analogamente, dalla prima precinzione non si poteva passare al II meniano perché il primo gradino di questo era a metri 2.40 sul piano della precinzione stessa.

Il dislivello tra la prima precinzione e l'inizio della gradinata del secondo meniano superava la larghezza della precinzione, contro la norma vitruviana, tesa al rispetto della buona acustica, secondo la quale la pendenza di tutta la cavea dovrebbe seguire, senza interruzioni, il tracciato di una retta tangente gli spigoli delle gradinate. Infatti la presenza di salti di livello avrebbe provocato un intoppo nella normale propagazione dell'onda sonora. In questo caso nel passaggio dal primo al secondo meniano la linea di pendenza veniva spezzata e nel settore più alto la gradinata doveva essere più ripida rispetto al primo meniano.

Difficile risulta la ricomposizione del secondo meniano, pur dopo l'avvenuto riconoscimento della seconda precinzione, che appare per la prima volta segnata nella pianta del Gismondi, edita nel 1959.

Al secondo meniano vi si accedeva invece scendendo dalla seconda precinzione, individuata alla quota di metri 15.60, raggiungibile dalla prima precinzione, a sinistra, passando sotto due muri radiali voltati che sostenevano la seconda gradinata (che contava 12 gradoni, mai stati ricollocati), tramite due rampe di scale fino al terrazzo protetto da ringhiera.

I gradini della cavea, o posti a sedere, hanno un'alzata di 35/38 cm e una pedata di 77/85 cm. Le scalette in pietra rossa, che dividono la cavea in cunei, presentano gradini di misure dimezzate rispetto a quelle dei gradini a sedere.

Non visitabile al pubblico è la "grotta di San Siro", un ambiente di 7,40 m e largo 1,59 m situato alle spalle della chiesa di Santa Libera, diviso in due parti da una porta architravata le cui spalle larghe 1,20 m sono formate da blocchi di pietra lavorati a vista, come le pareti corte e le volte a sesto ribassato che coprono i due vani.

La pareti di fondo sono in tufelli ed originariamente rivestite di uno strato di intonaco bianco, con superficie marmorizzata, dello spessore di 3 cm.

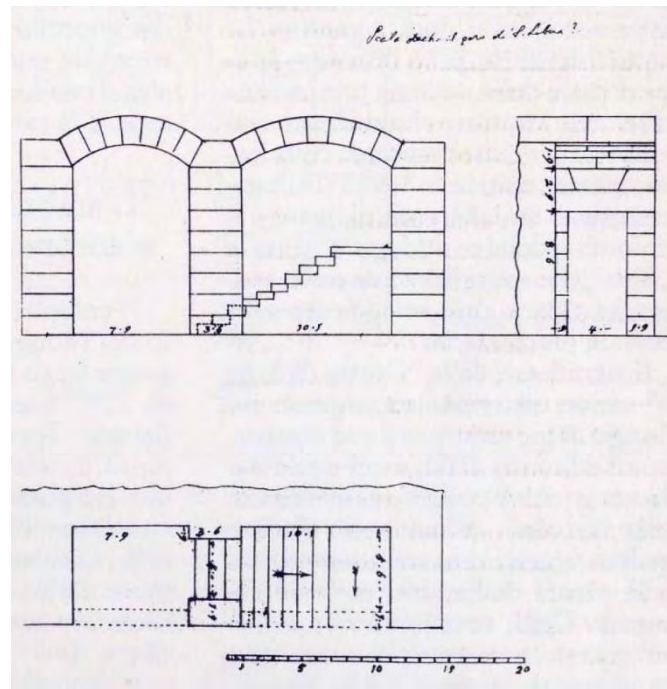


Fig. 1.21 – Grotta di San Siro in un disegno di Andrea Monga [da “Il teatro e gli spettacoli”]

Nel secondo vano restano le tracce di una scala di 12 gradini che permettevano di raggiungere la seconda precinzione.

I due vani erano alti metri 5.50 al colmo della volta, la metà della quale risultava dentro la massicciata del secondo meniano, mentre la metà superiore emergeva dalla quota della seconda precinzione. In sostanza si raggiunge la quota di metri 19.34, su cui s’imposta il residuo dell’ambulacro, portico che coronava la cavea.



Fig. 1.22 – Sostruzioni della cavea, parte orientale



Fig. 1.23 – Foto della cavea, 2014

1.9.4 Ambulacro

L’ambulacro è una galleria a volta ribassata, larga metri 2.95 ed alta metri 2.30 che chiudeva in alto la cavea, avendo il piano di calpestio a circa 4 metri sopra la seconda precinzione. Aveva probabilmente funzione di raccordo con un altro ambiente, collocato più in alto e si

pensa che si aprisse sulla cavea con una serie di finestre rettangolari. Dell'ambulacro si conserva tutta la parte del muro interno che cade dentro la fronte del convento, con una porzione della volta sufficiente per misurarne la curvatura e lo spessore, che è di 45 cm.

Il Pinali nella sua relazione scrive, ricalcando le convinzioni del Monga, che l'ambulacro “può forse aver servito a dar ingresso alle logge ad uso delle donne”, come egli erroneamente denominava la galleria superiore, avente sulla fronte degli archetti.

Tale ipotesi nasce dal riconoscimento che l'ambulacro, sottostante alla galleria, risultasse ambiente di passaggio per il raggiungimento della galleria stessa.

Non si ha cognizione dell'aspetto che assumeva la fronte dell'ambulacro affacciata sulla cavea. La modesta altezza, solo 1,43 m all'imposta della volta e 2,30 m al centro, rivela il carattere secondario di questo ambiente, a cui si attribuiva principalmente il significato di passaggio o raccordo con un altro ambiente collocato più in alto e non certo quello di spazio conclusivo nell'itinerario interno del Teatro.¹⁴

Salito il primo tratto della scala si incontra un pianerottolo che è poco più basso del piano di calpestio dell'ambulacro, per cui si può immaginare che, mediante un paio di gradini, si potesse da qui accedere all'ambulacro stesso. Della galleria sovrapposta all'ambulacro e alta metri 5.10 resta un ambiente intagliato nel tufo della collina, alto metri 5.05; essa si allargava nel settore centrale, mentre lateralmente aveva la stessa larghezza dell'ambulacro.

Si ritiene che gli archetti, coi quali nel 1912 fu ricomposta la loggetta sul bordo del terrazzo verso la cavea, fossero collocati sulla fronte della galleria con la quali si raggiungeva la quota di 27.30 metri sul piano dell'orchestra. All'interno di tali archetti sono incisi i nomi delle famiglie abbienti, come i Gavi, che contribuirono con la loro munificenza alla costruzione del teatro.

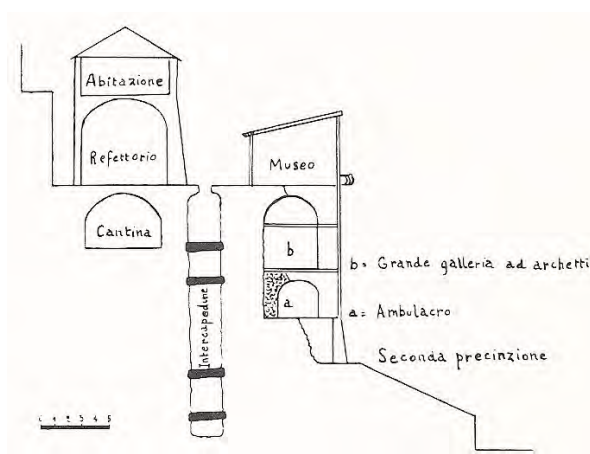


Fig. 1.24 – Sezione delle strutture a monte della cavea [da “Il teatro e gli spettacoli”].

¹⁴ Franzoni L., Lampronti G., *Il Teatro Romano: la storia e gli spettacoli*, Verona, Editore Comune di Verona, Anno 1988

L'intercapedine è un profondo taglio praticato nel tufo nel colle per separare il teatro dalla collina sovrastante, in modo da ridurre l'azione di scorrimento delle acque.

Essa scende di 17,90 m dalla quota del terrazzo (cioè fino alla quota della prima precinzione), è larga circa 2 m ed è lunga complessiva circa 134 m.

L'intercapedine si sviluppa in tre segmenti: uno parallelo alla scena di 46 m e due che dalle estremità di questo inclinano verso l'Adige. Di questi settori si conosce solo l'occidentale di 44m che termina alla *Botte* con sistemazione datagli dai Gesuiti nel 1582, mentre quello orientale è inesplorato.

1.9.5 Galleria a coronamento della cavea

Gli studi condotti nel 1961 posero particolare attenzione ad un ambiente, lungo 11 m, largo 4,80 m ed alto 5,05 m, sovrastante l'ambulacro e del tutto difforme nelle sue proporzioni dagli altri ambienti che si sviluppano nei quattro piani dell'ex convento di S. Girolamo. Questo spazio non solo è coperto a volta ma risulta parzialmente intagliato nel tufo della collina. Venne riscontrato che la volta, a pieno centro, da cui è coperto, si imposta ad un'altezza di 3,20 m, che è l'altezza degli archetti coi quali fu ricomposta nel 1912 la loggetta.

Affiancando alle intuizioni del Monga e del Pinali il riscontro obiettivo dei dati offerti dalle misure degli archetti e del vano di vaste proporzioni all'interno dell'ex convento, unitamente alla constatazione che l'ambulacro, con la sua collocazione, non giunge ad eguagliare l'altezza della parete di tufo isolata col taglio dell'intercapedine, si è ricavata, fin dal 1961, la convinzione che gli archetti, aventi incisi sui pilastri nomi di persona, avevano collocazione sulla fronte di una galleria sovrapposta all'ambulacro. Questa galleria, alta 5,10 m, aveva la caratteristica di allargarsi nel settore centrale, lungo 27 m, fino alla misura di 4 m, proseguendo quindi sui lati evidentemente con la stessa larghezza dell'ambulacro (2,95 m), sul quale insisteva. Il complesso delle strutture teatrali addossate alla collina raggiungeva così l'altezza di 27,30 m sul piano dell'orchestra, dove si trova intagliata nel tufo del colle la prima grande terrazza sovrastante il Teatro. La galleria ad archetti non si estendeva in semicerchio a coronamento di tutta la cavea, ma era limitata soltanto alla parte centrale, in aderenza alla sua funzione che era quella di nascondere la parete verticale di tufo, alzantesi più di 6 metri al di sopra dell'ambulacro. Le due scale che salgono oltre il livello della seconda precinzione, seguendo con andamento curvilineo il limite della cavea, immettevano nella grande galleria ad archetti. Al centro di questa, in corrispondenza dell'asse del teatro, una scala supera l'intercapedine e conduce alla prima terrazza. Per completare l'immagine che offriva la cavea del Teatro di Verona, resta da fare riferimento alla presenza del *velario*, che il Pinali affidava

a degli incavi quadrati scavati in blocchi appartenenti alla trabeazione dell'ordine ionico, e che sarebbero serviti per inserirvi i pali del velario. «*Tunc neque marmoreo pendebant vela theatro*»¹⁵.



Fig. 1.25 – La galleria ad archetti, foto 2006

1.9.6 Prospetti laterali del teatro

La cavea del Teatro di Verona non è interamente appoggiata alla materia inerte della collina ma da questa sporge sui fianchi ed aveva sostegno in un sistema consueto nell'architettura teatrale romana di muri radiali, fra loro collegati da volte a botte. La struttura di questi muri è in conglomerato cementizio con rivestimento di tufelli rettangolari. Lo spazio compreso fra due di questi muri, avente forma di alto corridoio rastremato verso il fondo, prende a Verona il nome di *arcovolo*. Gli alti muri di sostegno della gradinata, che erano originariamente coperti da volta a botte avente la pendenza della cavea, raggiungevano un'altezza massima di circa 17 metri, onde lo spazio da essi delimitato poteva essere variamente diviso con solettature orizzontali. Non si ha idea però di quale quota raggiungesse allora l'interramento.¹⁶ Per una migliore conoscenza degli elementi originali, almeno fino ad una certa altezza, è opportuno prendere anzitutto in considerazione il settore che fuoriesce dalla collina ad oriente. Ivi i grossi muri radiali sono conservati in tutta la loro lunghezza, mentre ad occidente sono dimezzati. In testa questi muri si ingrossano, configurando un pilastro.

¹⁵ Ovidio, *Ars amatoria*, I, 103

¹⁶ Franzoni L., Lampronti G., *Il Teatro Romano: la storia e gli spettacoli*, Verona, Editore Comune di Verona, Anno 1988

In effetti, i pilastri che fronteggiano i muri radiali di sostegno della cavea hanno una larghezza (2,40 m) che è di poco inferiore a quella del vano di passaggio tra pilastro e pilastro (2,60 m). Questi hanno paramento in *opus quadratum* mentre il corpo del muro retrostante è in conglomerato cementizio, rivestito da paramento di tufelli rettangolari. Il primo elemento del pilastro è in pietra, mentre tutto l'elevato è in tufo e così appare anche la semicolonna liscia, di ordine tuscanico, senza base, che si alza sulla linea mediana del pilastro.

In pietra bianca erano anche i capitelli e le trabeazioni. Si conserva un solo capitello tuscanico, oltretutto in cattive condizioni, appartenente al primo ordine del Teatro ed è scolpito in un solo blocco col sommoscapo della semicolonna, con echino a gola dritta e listello. La semicolonna ha, alla base, un diametro di tre piedi (88,8 cm). Il modulo era pertanto di un piede e mezzo, ossia un cubito (44,4 cm).

La semicolonna che orna la testata del primo muro radiale ad oriente si conserva per un'altezza di 6 m, ma è mancante di due rocchi. Il blocco lapideo comprendente capitello tuscanico con sommoscapo è alto 50 cm. L'ordine tuscanico del Teatro si alzava dunque almeno per un'altezza di 8,55 m, ma più verosimilmente arrivava a pareggiare la quota della prima recinzione, che si alza a 9,15 m sul piano dell'orchestra. Da evidenziare in modo particolare è anche la rampa della grande scala che aggira alla schiena la cavea, portando gli spettatori alla prima e alla seconda recinzione [Fig.1.26]. Nel settore orientale si conserva ancora l'alta volta di copertura che raggiunge, con la terrazza sovrastante, la quota di 11 metri sul piano dell'orchestra. La scala inizia con una rampa di venti gradini e quindi gira a sinistra ad angolo retto, presentando due rampe successive di dodici e nove gradini, superati i quali si giunge quasi alla quota della prima recinzione (9,15 m), che si incontra dopo un ulteriore gradino isolato.

Da qui gli spettatori scendevano ad occupare i gradini del primo meniano, oppure salivano ancora fino alla seconda recinzione, per poi scendere ad occupare i gradini del secondo meniano.



Fig. 1.26 – I muri radiali a sostegno della cavea nel settore orientale, foto

1.9.7 Terrazze

Sul fianco orientale del teatro si coglie con chiarezza l'inizio del motivo dei terrazzamenti, che caratterizza l'intero piano di inserimento del monumento nel fronte della collina. Il primo terrazzamento è quello che si estende in fianco alla grande scala orientale, coperta da volta a botte. Il muro di contenimento della terrazza è opera moderna, realizzata da A. Avena dopo la frana del maggio 1936, ma segue le tracce di precise preesistenze. Il contenimento del dislivello, con un muro a profondi archi ciechi, si differenzia nettamente dalle analoghe opere che demarcano le terrazze superiori. La terrazza a giardino pensile, che si salda al Teatro verso oriente, ha il piano a 8 m di altezza sul livello dell'orchestra.



Fig. 1.27– La scala che aggira la cavea ad oriente, coperta da volta a botte, foto 2014

I terrazzamenti, scaglionati al di sopra del Teatro, realizzavano il suo collegamento con la sommità dell'*arce*, trasformata in area sacra.

Immediatamente al di sopra della quota raggiunta dalla copertura della grande galleria ad archetti (28 m c.a.), si sviluppa la prima terrazza, la più spaziosa, larga 20 m e lunga originariamente almeno 124 m. Dal livello di questa terrazza sprofonda per 18 m nel tufo della collina il taglio dell'intercapedine. La parete dorsale della terrazza, alta 6,50 m, è ottenuta con un taglio perpendicolare nel tufo del colle, che oggi presenta superficie nuda e grezza. Il piano orizzontale, egualmente di tufo, doveva essere, almeno parzialmente, ricoperto da uno strato di terra, che permettesse la coltura di piante da giardino. Non è pensabile infatti che una terrazza di tali proporzioni fosse interamente pavimentata. La soluzione scenografica delle terrazze era sicuramente vitalizzata mediante inserti complementari allo schematismo architettonico e tali potevano essere appunto delle aree verdi, con piante di basso fusto.

Nel settore occidentale, nella parete di tufo, si apre un ninfeo che trova meglio la sua ambientazione in uno spazio ove la presenza del verde simuli una condizione naturale.

Interamente intagliato nel tufo, questo ambiente ha il piano di calpestio in diretta continuazione di quello della terrazza.

Profondo 4,80 metri (piedi 16), ha una larghezza di 8,80 metri (piedi 30) ed un'altezza di 3,25 metri (piedi 11). In pianta dunque si presenta come un rettangolo più largo che profondo. Il suo prospetto attuale mostra una porta fra due finestre, certamente modificate rispetto alle misure originali.

Al centro della parete di fondo, contrapposta all'ingresso, c'è una nicchia alta 2,36 metri, larga 1 m e profonda 0,65 metri, la quale termina in alto con un catino.

Sulle due pareti laterali e sulla parete di fondo, salvo l'interruzione centrale della nicchia, correano due mensole sovrapposte, ricavate nel tufo in modo che non sporgessero dall'appiombamento delle pareti stesse. La larghezza del piano utile di queste mensole, in larga parte demolite, è di un piede romano (0,296 metri), lo sviluppo lineare complessivo era di 27 metri. All'interno, nella parete corta di sinistra, si apre vicino alla fronte di questo ambiente una porta ad arco, che immette in un'altra cavità artificiale, scavata ad un livello più basso.¹⁷

¹⁷ Franzoni L., Lampronti G., *Il Teatro Romano: la storia e gli spettacoli*, Verona, Editore Comune di Verona, Anno 1988

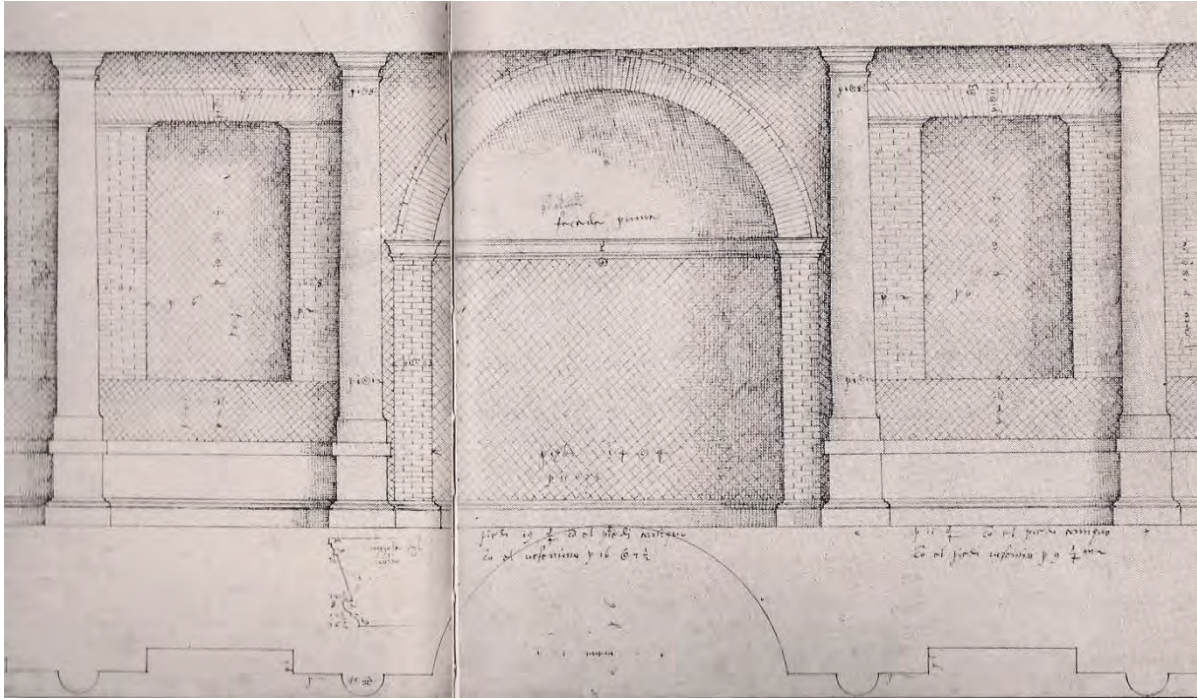


Fig. 1.28– Andrea Palladio, Teatro Romano a Verona. Passeggiata prima, 293 x 441, Londra [da “Il teatro e gli spettacoli”].

Nel Teatro di Verona la presenza del taglio dell’intercapedine impediva ai costruttori di creare un luogo sacro, sufficientemente profondo, al centro del semicerchio della grande galleria, cioè in una collocazione analoga a quella del tempietto nel teatro di Vienne o del tempio di Venere Vincitrice nel teatro di Pompeo a Roma. Si è supposto quindi che il Ninfeo del Teatro di Verona, scavato nella parete di fondo della prima terrazza, intendeva sostituire il tempio, ricavato in altri teatri al centro del portico sopra la cavea, in quanto il tempio sull’*arce*, di cui diremo, seppure in asse al Teatro, era troppo disgiunto da questo perché si potesse riconoscere tra i due una diretta connessione.

A 6,50 m sopra il piano della terrazza, corre, intagliato nella parete di tufo, un camminamento avente larghezza media di 1,50 m. La parete che lo delimita a monte non mostra la superficie grezza del tufo, come avviene nella parete sottostante, ma appare rivestita con blocchetti tufacei per mezzo dei quali sono state create delle campiture architettoniche, quelle stesse che hanno attratto l’attenzione del Palladio, che le rilevò e disegnò dettagliatamente nei suoi soggiorni veronesi nel quinto decennio del Cinquecento. [figure 1.28 e 1.29]

Dopo un nicchione semicircolare, avente l’apertura di 4 m, si incontra una successione di sei specchiature, larghe alternatamente 1,20 m e 1,80 m, scandite da semicolonne distanziate di 3,50 m. L’uso dell’opus reticulatum, specie all’interno delle specchiature, caratterizza questo rivestimento. Dopo le prime sei specchiature si incontra ancora un nicchione a fondo curvilineo e dopo di questo otto specchiature, con le quali si arriva al nicchione centrale di

pianta rettangolare. Simmetricamente capovolta la stessa successione occupava l'altra metà, per uno sviluppo lineare di 126 m.

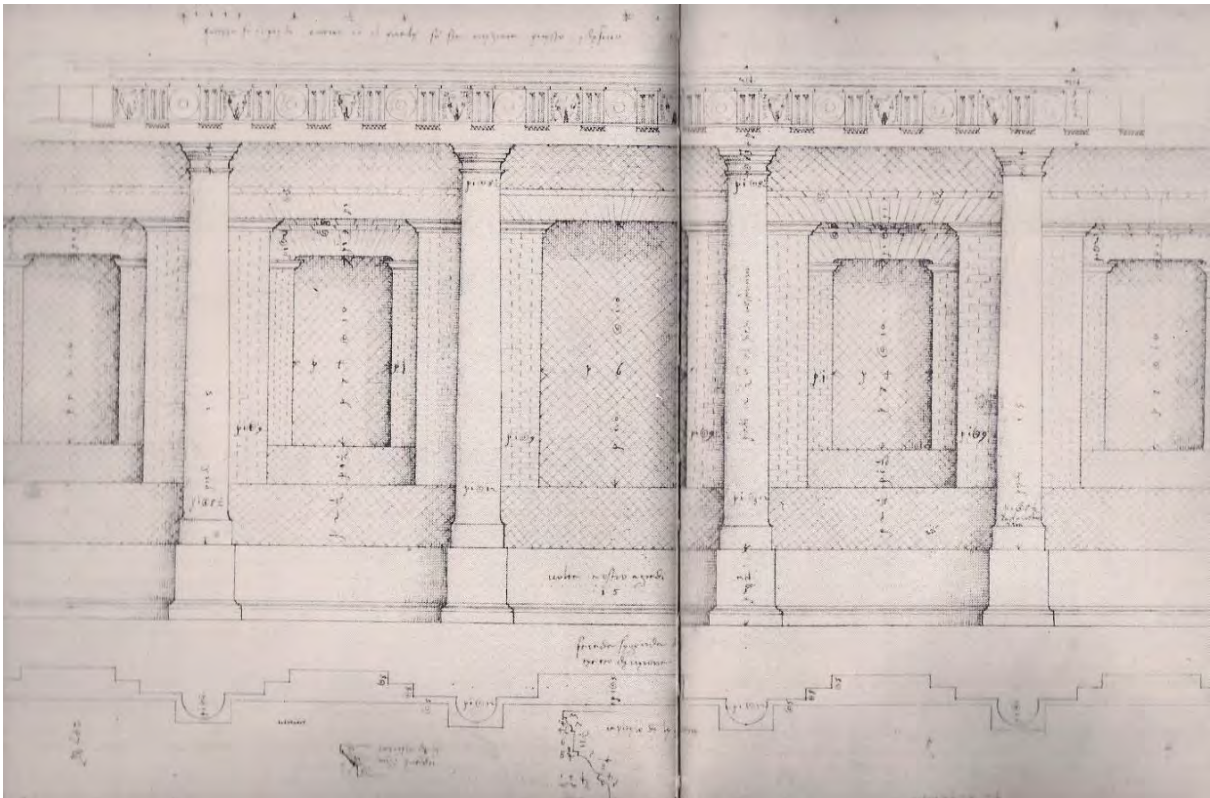


Fig. 1.29– Andrea Palladio, disegno della muratura della seconda passeggiata [da “Il teatro e gli spettacoli”].

Palladio nel suo disegno [Fig. 1.29] raffigura sul muro della seconda passeggiata una trabeazione con fregio dorico, dove nelle metope i bucrani, con serti di fiori pendenti dalle corna, si alternano a patere o dischi ombelicali.

La terrazza più alta ha una larghezza di sette metri e mezzo ed è conclusa sul fondo da una parete alta cinque metri. Qui semicolonne, costruite in tufelli come tutto il paramento murario, distanziate 3,20 m, creano delle campiture occupate da finte finestra, intervallate ogni tanto da una finta porta.

Da segnalare l'opinione del Ricci, che riteneva che i passeggi del teatro fossero originariamente coperti, quindi contestando Monga che li aveva rappresentati come semplici antemurali di contenimento, «loro scopo essendo non solo lo svago e l'amenità del luogo fatto a giardini, ma anche il riparo dalle intemperie».¹⁸

Tale soluzione contrasta con l'esigenza di salvaguardare l'immagine del terrazzamento.

¹⁸Ricci S., *Il Teatro Romano di Verona studiato sotto il rispetto storico e archeologico con la bibliografia di Manga, suo scopritore*, Venezia, Editore Tipografia F.lli Visentin, anno 1895

Da segnalare la circostanza che le semicolonne ospitavano nel loro corpo una tubatura in cotto, destinata al deflusso delle acque. Una soluzione coperta non poteva coinvolgere la prima passeggiata, perché qui mancava lo spazio per realizzare un porticato coperto, in quanto il camminamento è strettissimo.

Questo aspetto impedisce di considerare le due passeggiate come qualcosa di unico e omogeneo, se non sotto l'aspetto dell'immagine formale, ma non certo sotto quello della funzionalità pratica.

Il teatro seguiva la norma della sovrapposizione degli ordini.

Quello inferiore, di altezza 8,88 m, era il tuscanico con semicolonne senza base, con primo rocchio e capitello in pietra bianca e il resto in tufo, quindi poi rivestiti in stucco. Tale ordine copriva un'altezza corrispondente al dislivello tra orchestra e la prima precinzione.

L'ordine ionico, di altezza 8,88 metri, si impostava a 1,80 metri circa sopra il tuscanico, creando un attico sopra la trabeazione del tuscanico.



Fig. 1.30– L'arcata di ordine ionico ricomposta nel 1914, foto 2006

Non si è conservato nessun resto del terzo ordine corinzio, ma la sua presenza è postulata dalla norma architettonica e da fatto che la sua altezza teorica di 7,69 metri porterebbe l'altezza delle strutture esterne a quella della galleria ad archetti a coronamento della cavea.

Nella parete di fondo della Grande Terrazza era scavato il cosiddetto ninfeo, un ambiente legato al culto, ornato da una fontana, e collegato ad altri spazi ipogei, in una zona che mantenne nel tempo una forte valenza religiosa e attrasse in seguito edifici di culto cristiani, fra cui la chiesetta visibile attualmente, dedicata alla Vergine madre di Dio (*Virgini deiparae*) e a San Gerolamo, patrono della congregazione religiosa dei Gesuati.

La presenza di acqua, elemento base per il compimento dei riti, dimostra come i teatri, molto più degli anfiteatri, fossero percepiti come luoghi in cui esercitare culti ad una o più divinità.

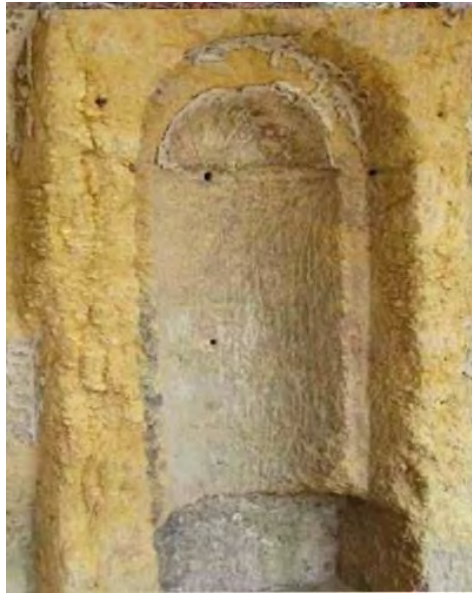


Fig. 1.31– Fontana priva della vasca inferiore sulla parete di fondo del ninfeo della Grande Terrazza

1.9.8 Tempio

Coronamento di tutto il complesso monumentale che, iniziando dalla riva dell’Adige, giungeva fino alla spianata sul colmo del colle, era un tempio ivi collocato in asse con le costruzioni sottostanti. Le tracce sicure della sua reale presenza furono accertate da Mons. Paolo Vignola nel 1851, in occasione degli scavi austriaci per la costruzione della caserma.

La conclusione principale sembra essere il riconoscimento che la chiesa di S. Pietro, ivi sorta almeno nel VI secolo, quando vi furono sepolti i vescovi Verecondo e Valente, fu eretta sull’impianto del precedente tempio pagano. La ricostruzione grafica del Teatro, dovuta a Giovanni Caroto, pone al vertice del complesso monumentale un tempio con maestoso pronao a dodici colonne, recante nel fregio la dedica a Giano.

1.9.9 Chiesa di SS. Siro e Libera

Sulle rovine del Teatro furono nel corso dei secoli costruiti edifici religiosi e abitazioni che ne celarono completamente le strutture. Di questi edifici è rimasta, sull’ala orientale della cavea, la chiesa dei SS. Siro e Libera fondata in onore di S. Siro all’inizio del X secolo da Giovanni, cancelliere di Berengario e Vescovo di Cremona su alcuni arcovoli che l’imperatore gli aveva donato. Nel 1337 venne costruita dietro la chiesa già esistente dedicata a S. Siro un’altra detta S. Maria della Cava. Inizialmente tra le due chiesette passava una piccola strada, che con il tempo fu soppressa e i due edifici furono uniti in un’unica Chiesa dedicata ai SS. Siro e

Libera. Essa segue la direzione dei muri del teatro.

La chiesetta fu concessa nel 1517 a una confraternita del Sacramento, che la trasformò aggiungendo le cappelle laterali e ingrandendo il coro nel 1913 fino ad occupare la chiesa di “S. Maria della Cava”, separata da una piccola strada.

L'interno ha quattro altari, due in cappelle profonde, aperte una nel 1672 e l'altra nel 1697-1703. Il coro fu cominciato da Andrea Kraft e finito da G. Petendorf e R. Siut.

Sopra la porta maggiore vi è un busto di Clemente XIII e nel mezzo della chiesa è sepolto il pittore Cignaroli. Fuori dal limite del teatro sorse un'altra chiesa, annessa al convento di S. Girolamo, fondata nel XV secolo dai Gesuati, di cui resta la cappellina con bifora sull'esterno. Del convento rimangono alcune cellette, elevate in parte sulla parte del teatro, e la grande muraglia, che fa da sfondo alla cavea.

Alla chiesetta si accede attraverso una gradinata a rampe contrapposte costruita tra il 1697 e il 1703. Nella facciata, intonacata, si scorgono i segni dell'innalzamento che ebbe la chiesa tra il 1697 e il 1703, che portarono alla sostituzione di due finestre.

Il fronte della chiesa è ornato da un protiro ad arco acuto, del XIV sec. con portale a smussi, dipinto nel sottoarco con le figure del “Battista” e di “S. Dorotea” e nella lunetta del “S. Siro”, affreschi risalenti al XIV sec. Sopra la porta una statua di legno di S. Libera del XIV sec.

L'esterno della chiesa è stato modificato dalle cappelle aggiunte sui lati nel XVII sec, cosicché non è ancora possibile dire se l'opera è del X secolo o una ricostruzione del XII secolo.¹⁹



Fig. 1.32– Veduta della Chiesa di S. Siro e Libera, foto 2001

¹⁹ Franzoni L., Lampronti G., *Il Teatro Romano: la storia e gli spettacoli*, Verona, Editore Comune di Verona, Anno 1988

1.10 Naumachia

La presenza di due ponti e l'esistenza sulla riva opposta dell'Adige di resti identificati come una sorta di contro teatro stimolarono l'ipotesi rinascimentale che il tratto di fiume tra i due ponti costituisse una naumachia, un luogo utilizzato per lo spettacolo di finte battaglie navali.

Il Ricci si oppose a tale ipotesi, confutando la tesi del Pinali che credette di dimostrare l'esistenza della naumachia semplicemente affermando che vi era posto sufficiente per tale attività sulla riva sinistra del fiume e che i ruderi dei portici che rimanevano erano testimonianza di un edificio che sporgesse sul fiume.

Secondo Ricci tali argomentazioni non risultavano bastanti in quanto il bacino non era adatto per i giochi navali per l'eccessiva sporgenza del teatro sulla riva sinistra del fiume.

Tutto ciò che a suo parere era possibile dire era che i portici affacciatesi sull'Adige forse servivano anche come entrata al teatro dalla parte del fiume per gli spettatori che venivano dalla riva opposta o dal mare oppure come trasporto di marmi e attrezzi necessari agli spettacoli, visto l'uso frequente dei portici a tal fine in altri edifici romani e vista la comunicazione diretta dei portici con il pianterreno del retroscena e della scena.

Inoltre Ricci riteneva probabile che sulla riva destra prospiciente al teatro vi fossero uno o più edifici che mantenevano la simmetria. Egli pensava che questi forse fossero contemporanei al teatro e quindi di stile non diverso da esso, ma questo non implicava necessariamente che costituissero un contro-teatro.



Fig. 1.33– Anonimo, *Veduta della antica Naumachia*, fine XVIII secolo, olio su tela, Verona, Musei Civici

1.11 Fine del teatro

La rovina del Teatro romano di Verona, uno tra i più antichi monumenti cittadini, è dovuto a diversi fattori. In primis la scadente qualità del materiale da costruzione e l'abbattersi di diverse calamità e alluvioni. Nel 589 una terribile piena dell'Adige, travolse il ponte Postumio e recò notevoli danni al *postscaenium* e alla scena del teatro. Alla fine del 793 e nel 1116 vi furono dei forti terremoti, che inflissero un altro colpo al teatro, conosciuto allora come *Medius Circus*, facendone crollare una gran parte delle murature perimetrali, della scena e degli archivolti che sostenevano la parte della cavea non appoggiata al colle.

Nel 1195 un'altra piena dell'Adige intaccò le fondamenta del teatro e il podestà di Verona Guglielmo dell'Ossa non ebbe cura di restaurarlo.

Le sorti del teatro furono anche fortemente legate alle scelte politiche.

Pare che, a causa della morte di quaranta persone rimaste schiacciate per il crollo di murature pericolanti del teatro, il vescovo Adelardo abbia sollecitato il re Berengario ad emettere un editto che ordinasse l'abbattimento delle stesse. Tale editto comportò che marmi del teatro fossero trasportati e dispersi in più punti della città, tra i quali S. Anastasia, S. Maria in Organo e nel Vescovado. L'originalità dell'editto però è dubbia; potrebbe essere stato mistificato in epoca umanistica.

Effetti devastanti ebbero pure le donazioni di parti del monumento a privati. Nel 913 Berengario donò ad Azzo di Castello tredici tra covoli e arcovoli e nel 920 donò arcovoli al suo cancelliere della parte della Chiesa di S. Siro e del Redentore.

Dopo la morte di Berengario seguirono sistematiche spogliazioni e il teatro divenne cava per nuove costruzioni, finché gli ultimi resti, che a causa di franamenti avevano riempito l'orchestra, vennero coperti da altro terreno e su di esso sorsero case, conventi, chiese, orti e piazze.

Il disuso del monumento come edificio per gli spettacoli avvenne anche in seguito ad un incendio che raggiunse gli spazi sotto il palcoscenico, provocando la fusione delle condutture in piombo. L'evento potrebbe essersi verificato nella seconda metà del III secolo, periodo di grande instabilità, in particolare per le calate degli Alamanni, in cui si è riscontrata a Verona una programmata restrizione delle zone residenziali entro la cinta muraria, per una miglior difesa. Attorno alla metà del IV secolo l'area del teatro, che restò comunque di proprietà pubblica, risulta occupata da un cimitero. Le tombe, scavate nel pavimento dell'edificio scenico e collocate negli spazi del sottoscena, poste sugli scaloni laterali e dentro il canale che correva attorno all'orchestra, testimoniano che a quella data gli spettacoli erano terminati da

tempo, il sistema di controllo delle acque non era più funzionante ed era già avanzato il processo di progressiva distruzione degli arredi marmorei dell'edificio.

Nella prima metà del VI secolo il tempio sulla collina era ormai trasformato in una chiesa cristiana, dedicata a san Pietro, che accolse le sepolture dei vescovi Valente e Verecondo, morti nel 531 e 533. Le potenzialità difensive della sommità del colle erano ben evidenti in quest'epoca: i Goti, assaliti dai Bizantini nel 542, lo usarono infatti come rifugio (secondo Procopio di Cesarea); in seguito ebbe a più riprese funzione militare, fino al dominio degli Austriaci, che vi costruirono la grande caserma tuttora esistente (metà del XIX secolo). Sulla cavea e nelle adiacenze sorsero nel tempo molti edifici religiosi, privati o utilitari; restano oggi il palazzetto d'ingresso alla zona archeologica, la chiesa dei santi Siro e Libera (orientata secondo le strutture radiali di sostegno alla cavea) e il convento costruito dai Gesuati nel tardo Quattrocento, in cui è situato il Museo Archeologico.

Un altro fattore che ha determinato la decadenza del teatro è il trionfo del Cristianesimo incarnato dalla figura di S. Zeno Vescovo.

Il concilio di Elvira (Granata), nel 305, aveva infatti stabilito che gli attori che volevano diventare cristiani dovessero prima abbandonare il loro mestiere.²⁰

A questa restrizione si aggiunse poi la proibizione dei giochi gladiatori, nel 405.

Il Teatro fu quindi travolto dalla rovina in un'epoca di rinnovate concezioni etiche, per le quali non si riconoscevano più le ragioni che giustificavano la conservazione del monumento.

I materiali che costituivano il teatro vennero riutilizzati in nuovi edifici e sulla sua area si alzarono chiese e abitazioni private.

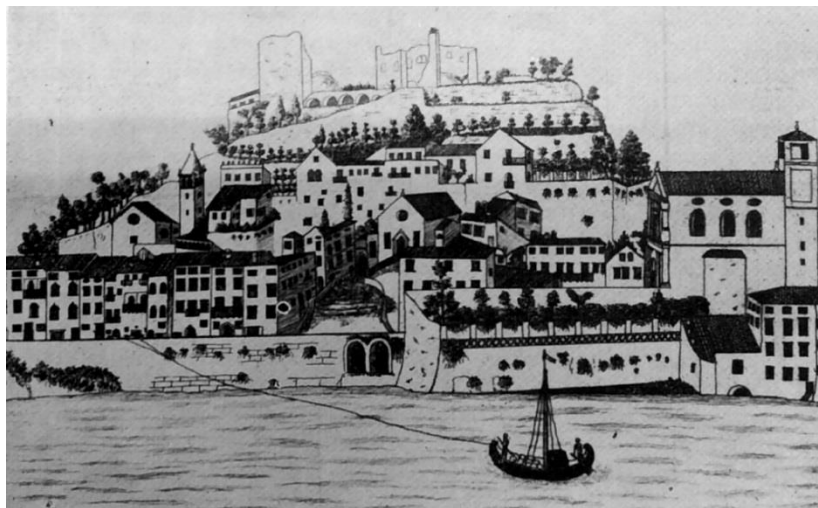


Fig. 1.34– Anonimo, dal volume di G. Venturi “Compendio della storia sacra e profana di Verona, Verona, 1825

²⁰ Dal Forno F., *Il teatro romano di Verona*, Vita veronese, 1961



Fig. 1.35– Anonimo, *Veduta generale del teatro romano prima delle demolizioni, 1893*[da “Il teatro e gli spettacoli”]

1.12 Riscoperta del teatro e gli scavi

Nel 1757, nella corte di proprietà del sig. Giammaria Fontana, sita tra piazza S. Libera e del Redentore, si rinvennero alcuni frammenti di marmo finemente lavorato. Tale scoperta fu così gradita che l'anno successivo, il Fontana intraprese agli scavi nella corte grazie ai quali portò alla luce colonne, frammenti di statue, capitelli, foglie e resti di fregio. Gli scavi Fontana si conclusero nel 1759-60. Il materiale fu sempre custodito dal Fontana e, alla sua morte, dal figlio, che ne fece dono al Municipio di Verona.

I ritrovamenti del Fontana destarono l'attenzione di Andrea Monga, facoltoso cittadino veronese dilettante di archeologia.

Superato lo scetticismo di Scipione Maffei (1732), che riteneva «vanissima immaginazione il pretendere di poter ricavare la sua pianta e la precisa conformazione»²¹, e non spaventato dalle parole del Serlio che scriveva «il teatro era nel monte fatto con molto artificio [...], ma le ruine son tante, e così abbattute dal tempo, che saria grande spesa e consumazione di tempo il

²¹ Maffei S., *Verona illustrata*, Milano, 1825

volerle ritrovare»²², Andrea Monga, dopo aver acquisito l'area del teatro e le case adiacenti (venticinque fabbricati con orti e annessi ad eccezione della sola Chiesa di SS. Siro e Libera), incominciò nel 1834 una serie di scavi, divisi in quattro settori e terminati nel 1861.

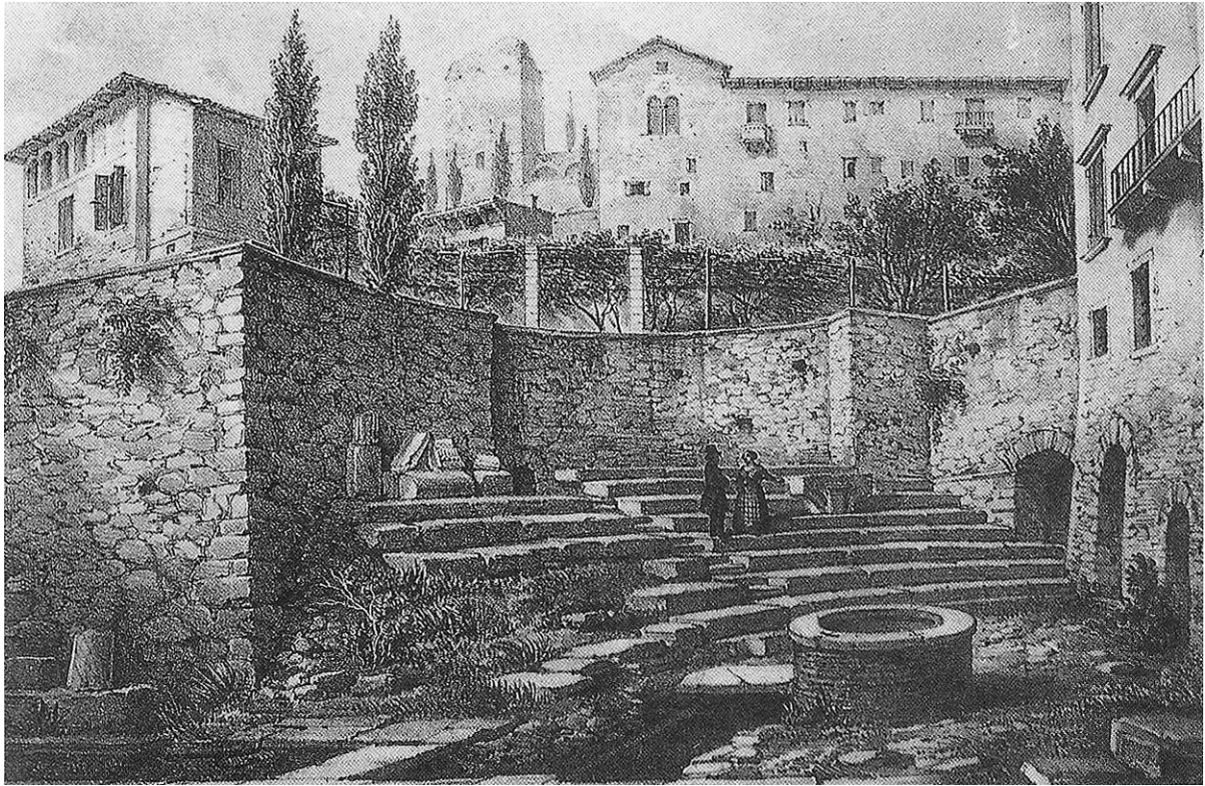


Fig. 1.36– Resti del teatro (scavi Monga) in un disegno di Marco Moro stampato da Giovanni Brizeghel nel 1850 c.a. [da *Il teatro e gli spettacoli*]

Grazie alla demolizione delle vecchie case verso il Redentore si mise in luce l'arco esterno del teatro e l'accesso allo scalone orientale. Le scoperte dello studioso furono molte sebbene si fosse imposto la limitazione di non modificare la topografia stradale esistente.

La Relazione di Gaetano Pinali (1759-1846), giudice ed estimatore del Monga, ci informa abbastanza dettagliatamente sull'enorme lavoro di scavo compiuto a sue spese, che iniziò a partire dall'alto, ossia dalle terrazze, che, denominate "passeggi".

Il Monga espurgò l'intercapedine, già nota dal 1780, della quale riconobbe la precisa funzione di isolamento della cavea rispetto alle acque filtranti nei banchi tufacei del colle. All'interno dell'ex convento dei Gesuati accertò la presenza dei resti dell'ambulacro semicircolare, che ritenne, con buona verosimiglianza, «aver servito a dar ingresso alle Logge...». Riconobbe che la cavea era conclusa in alto da queste logge ad archi, giudicate «ad uso delle donne». A tal riguardo il Pinali scriveva: «E questa scoperta concorre essa pure a stabilir l'epoca del nostro Teatro, perché fu Augusto che ordinò che le donne assister dovessero ai teatrali

²² Serlio S., *I sette libri dell'architettura*, libro III, 1537

spettacoli in luogo separato e distinto».²³

Scopri e rimise parzialmente in luce le due grandi rampe di scale che, verso oriente e verso occidente, si inoltrano dietro la cavea, conducendo all'altezza delle due precinzioni. Ad oriente scoprì i resti di una fabbrica accessoria al Teatro, in cui altri vollero poi riconoscere un Odeo. Nel vano esistente oltre la parete di fondo del coro di S. Libera, noto come grotta di S. Siro, riconobbe un ambiente già occupato da una scala del Teatro, di collegamento fra le due precinzioni.

Al centro della prima precinzione di cui scoprì il solo tratto conservatosi della pavimentazione originale, mise in luce la scala mediana che, biforcandosi in due rampe contrapposte, portava all'altezza della seconda precinzione.

Della cavea liberò quella parte già nota per essere visibile negli scantinati della casa De Togni e che, dopo l'intervento del Monga, rappresentò per tanto tempo l'immagine più leggibile del Teatro Romano, divulgata da una litografia di Marco Moro. Questo recupero permise di riconoscere che la gradinata aveva sviluppo semicircolare e non semiellittico, come era stata illustrata da Giovanni Caroto nel XVI secolo.

Ai piedi della cavea accertò la presenza dell'euripo, e in un settore di questo rinvenne due preziose sculture marmoree, la cariatide arcaistica ed il modiglione a testa d'ariete, sormontato da satirello inginocchiato, che permise di assegnare al Teatro l'altro esemplare analogo, più guasto, conservato al Museo Maffeiano.

Il lavoro del Monga interessò illustri studiosi dell'epoca, tra i quali Braun, Lisandro Kofangioglu, Edoardo Falkener, Guillaume. Attraverso i resti reperiti Monga tracciò la pianta del teatro, segnando l'intercapedine.

Dopo la morte del figlio di Monga, fedele continuatore della sua opera, i lavori al teatro si interruppero per un periodo.

Nel 1888 il conte Sormani-Moretti intavolò delle trattative con gli eredi Monga per l'acquisizione dell'area, ma il tentativo fu vano.

²³ Pinali G., *Relazione degli scavi dell'antico romano teatro che ha esistito sulle falde del colle or detto castello di S. Pietro in Verona*, anno 1845



Fig. 1.37– Scavi del teatro. Ruderi del proscenio, foto 1893

Nel 1895 Serafino Ricci scrisse un libro sulle vicende del teatro, invocando la ripresa dei lavori per rimettere allo scoperto quanto restava dell'antico monumento.

Solo qualche anno l'Amministrazione comunale con l'ausilio della Cassa di Risparmio comprò le case e i terreni di proprietà Monga per continuare il disegno di esplorazione già iniziato mediante rigorosi metodi archeologici e sotto la guida di Gherardo Ghirardini, professore dell'Università di Padova

Il lavori di recupero del Teatro Romano sotto la direzione di G. Ghirardini ebbero inizio nel 1904 e proseguirono intensi per due anni, alla fine dei quali l'area del teatro era quasi interamente scoperta grazie all'abbattimento di diciotto case e all'asportazione di dodicimila metri cubi di materiale: era stata portata alla luce la cavea, l'orchestra, l'euripo, la *frons scenae*, le pietre quadrangolari a sostegno delle antenne del *velarium* e l'intercapedine.

Rimanevano alcune case a ridosso del parascenio occidentale, cioè all'inizio di Vicolo Botte e sul fianco orientale della chiesa di S. Siro e S. Libera.

I lavori del Ghirardini si estesero anche al consolidamento dell'edificio conventuale: l'ambiente al secondo piano lungo 11 metri, largo 4,80 metri e alto 5,04 metri viene dotato di un grosso pilastro centrale, che regge la volta con due archi longitudinali.

I risultati dello studio sono riportati in "Notizie degli Scavi d'antichità" (1905) e nel testo del discorso che Ghirardini pronunciò nel 1906 in occasione della visita di Vittorio Emanuele III a

Verona.

L'opuscolo presenta una pianta del teatro e una foto della cavea, che documentano lo stato dei lavori a quella data e mostrano la cavea interamente scoperta con gradini ancora in sito e altri ricollocati in contiguità con i primi nel meniano inferiore.



Fig. 1.38– Veduta del Colle di San Pietro nel 1906, dopo l'avviato recupero del teatro [da *Il teatro e gli spettacoli*]

Nel 1934 l'area del teatro era finalmente libera e restava nella cavea solo la chiesa di S. Siro e S. Libera, della cui conservazione si era espressa favorevolmente la commissione governativa inviata a prendere visione dei lavori del Ghirardini.²⁴

²⁴ Dal Forno F., *Il teatro romano di Verona*, in *Vita Veronese*, anno 1961



Fig. 1.39–Lavori nel settore occidentale della cavea, foto 1914 [da Il teatro e gli spettacoli]. In alto si nota la già avvenuta ricostruzione dell'arcata di ordine ionico.

Prima della liberazione del teatro si erano già attuati dei restauri: uno riguarda la costruzione di una scaletta sull'asse della cavea nel primo meniano, l'altro si riferisce alla ricomposizione della loggetta ad archetti. L'ima cavea doveva presentare quattro scalette e non le cinque ora esistenti o, almeno, la scaletta centrale non doveva avere origine, come le altre, dal primo gradone ma tre o quattro gradoni più addietro.

La loggetta ad archetti è stata ricomposta nel 1912 per il numero di nove archetti, sul limite della piccola terrazza che è in fianco all'ingresso dell'ex convento di S. Girolamo, che si alza a monte della cavea, con il prospetto parallelo all'edificio scenico.

Pare che la ricomposizione sia stata attuata così da un geometra dell'Ufficio Tecnico Comunale, che aveva collaborato con Ghirardini, e che dipenda dal disegno di ricostruzione del teatro che venne eseguito su elementi forniti da Andrea Monga e che è pubblicato

nell'opera Ricci. In questo disegno la loggetta ad archetti figura sovrapposta ad altre due, di cui la prima si sviluppa sul piano della seconda precinzione e l'altra corrisponde all'ambulacro, ancora in buona parte conservato. Il Monga dunque immaginava la loggetta ad archetti posta sulla fronte di una galleria semicircolare sviluppatesi al di sopra dell'ambulacro.



Fig. 1.40– Lavori nella cavea con le impalcature servite per la ricostruzione della loggetta, foto 1912 [da “Il teatro e gli spettacoli”]. Da notare le passerelle disposte a zig zag per facilitare il trasporto delle pietre e l’assenza del secondo meniano.

La situazione poi rimase immutata fino ad alcuni anni dopo la seconda guerra mondiale, quando nel 1923 il Convento divenne sede del Museo Archeologico e qui vi fu trasportato il materiale riscoperto grazie agli scavi, prima raccolto nel Palazzo Pompei.

In seguito furono liberate e in parte ricostruite le rampe della scala orientale.

Nel 1934 furono abbattute le ultime case che ancora sorgevano in fianco a Vicolo Botte e nel 1936 crollarono alcune case al Redentore, liberando completamente l'area del teatro.

Nel 1936 una frana coprì la sistemazione del taglio del colle verso oriente.

Tra il 1938-39 si condussero scavi e lavori di recupero della fossa scenica.²⁵

²⁵ Dal Forno F., *Il teatro romano di Verona*, in *Vita Veronese*, anno 1961

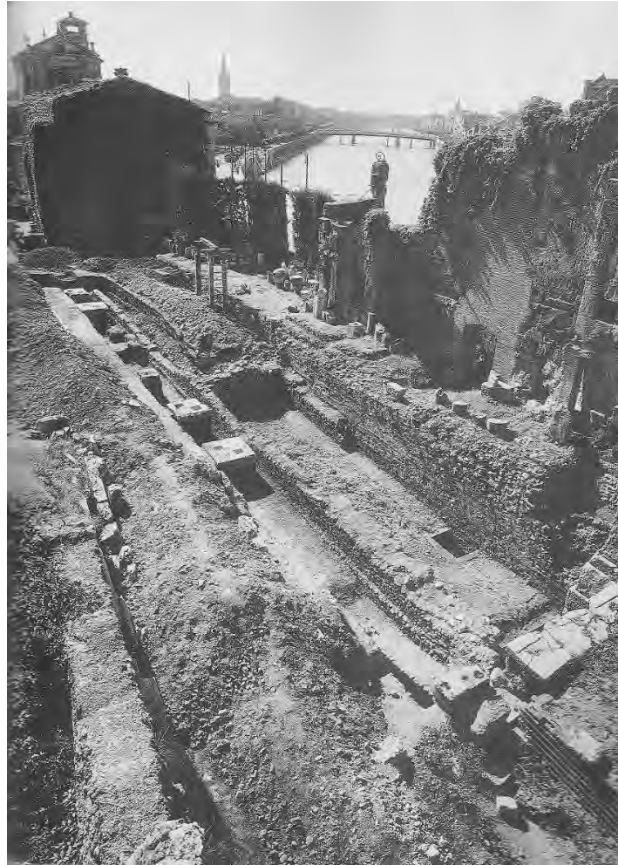


Fig. 1.41– Lavori di scavo nella fossa scenica, foto 1938-39 [da “Il teatro e gli spettacoli”]

Tutta l'attività tra le due guerre, che portò alla comprensione della magnificenza di questo monumento, fu condotta sotto la guida del professore Antonio Avena.



Fig. 1.42– Veduta dall'alto del teatro, foto 1943

Nel 1970-71 è compiuto uno scavo dietro e dentro casa Fontana, attuale ingresso al Teatro, che ha permesso di recuperare il percorso della cripta attraverso il quale si accedeva da oriente al piano di calpestio della fossa.

Dopo sporadici interventi di pulizia e restauro eseguiti nell'ambito del programma di manutenzione ordinaria degli edifici di interesse storico artistico di proprietà del Comune di Verona, nel 1986 con la direzione dell'ufficio tecnico comunale e la sorveglianza della soprintendenza archeologica del Veneto, furono eseguiti lavori di riordino delle lapidi e il consolidamento dei resti murari dell'antico teatro.

Le opere esterne furono precedute dal consolidamento dei contrafforti esistenti nella ciclopica intercapedine esistente a monte della cavea, scavata in origine per preservare il complesso del monumento dall'infiltrazione delle acque di falda filtranti dalla collina.

Con l'installazione di una adeguata rete di tubazioni, le acque filtranti dalla roccia e quelle meteoriche, vennero opportunatamente convogliate sul fondo dell'intercapedine e condotte nell'apposita vasca di scolo verso lo smaltimento nel fiume Adige.

I contrafforti, parte in pietra e parte in archi di mattoni vennero consolidati agli appoggi o rifatti con gli stessi materiali di recupero.

All'esterno, i ruderi più isolati furono oggetto di pulizia delle piante infestanti e radici e protetti nelle superfici orizzontali più esposte con impasti speciali, di granulato, calce e eminentemente idraulica e prodotti impermeabilizzanti. In alcuni casi il consolidamento statico richiese il ricorso alla perforazione con apposita sonda e l'immissione di barre in acciaio con saturazione dei fori a mezzo di apposite malte cementizie.

I numerosi cippi, le lapidi, le are e altri reperti archeologici vennero raggruppati su piedistalli di cotto secondo una accurata disposizione museale diretta dal professor Franzoni.



Fig. 1.43– Teatro Romano protezione orizzontale dei ruderi, Ufficio Tecnico del Comune di Verona, foto 1986



Fig. 1.44– Teatro Romano Consolidamento dei ruderi e ancoraggi, Ufficio Tecnico del Comune di Verona, foto 1986

1.13 CRONOLOGIA DEGLI EVENTI

V sec a.C.

Nascita in Grecia del teatro pensato come ambiente destinato a forme particolari del culto di Dioniso, che si evolsero in seguito nel genere di spettacolo definito tragedia.

I secolo a. C

Fondazione dell'impianto urbano romano entro la grande ansa formata dal fiume Adige.

I sec. d. C.

Probabile costruzione del Teatro Romano di Verona.

Nella prima metà del I sec. d. C.

Verso sudest si affianca al teatro un odeon, un piccolo teatro coperto, i cui resti sono visibili in piazza Martiri della Libertà, venendo quindi a crearsi un quartiere dedicato allo spettacolo.

Nella seconda metà del III secolo d.C.

Un incendio che raggiunge gli spazi sotto il palcoscenico, provocando la fusione delle condutture in piombo. La datazione dell'evento è incerta e fatta coincidere con il periodo di instabilità per la calata degli Alamanni.

Attorno alla metà del IV secolo d.C.

L'area del teatro risulta essere occupata da un cimitero, come testimoniano le tombe scavate nel pavimento dell'edificio scenico e collocate negli spazi del sottoscena.

Nella prima metà del VI secolo d.C.

Il tempio sulla collina era diventato una chiesa cristiana, dedicata a San Pietro, che accolse le sepolture dei vescovi Valente e Verecondo, morti nel 531 e 533. In quest'epoca il teatro fu inoltre usato come rifugio

dai Goti, assaliti dai Bizantini nel 542.

305 d.C.

Il concilio di Elvira, a Granata, stabilisce che gli attori che volevano diventare cristiani dovessero prima abbandonare il loro mestiere. (una possibile causa della decadenza del teatro).

405 d.C.

Vi è la proibizione dei giochi gladiatori, nel 405.

589 d.C.

La terribile piena, che avrebbe cambiato il corso dell'Adige, travolge parte del Ponte Postumio ed è probabile che abbia recato notevoli danni al postscenium e alla stessa scena del teatro.

VII secolo d.C.

Vi è un forte terremoto.

793 d.C.

Un terremoto fortissimo distrugge gran parte delle mura del teatro.

880 circa d.C.

E' fatta erigere dal vescovo di Pavia la chiesa di S. Siro sugli arcovoli del teatro, più piccola della presente.

895 d.C.

E' pubblicato il primo editto di Berengario I, re d'Italia, con il quale ordina in seguito a fatti luttuosi e per sollecitazione del vescovo Adelardo l'atterramento delle parti pericolanti del teatro antico (editto di dubbia veridicità).

Si sa che all'epoca era caduta gran parte del monumento per la troppa vetustà come afferma il decreto stesso «*prae nimia vetustate corruerit*».

Anni 895-913 d.C.

Berengario I dona ad Azzo di Castello tredici tra covoli e arcovoli appartenenti al teatro antico e che si estendevano dal Ponte Pietra alla chiesa di S. Siro.

913 d.C.

Berengario cede a Giovanni Chierico covoli e arcovoli dalla parte della chiesa di S.Siro e da quella del Redentore. Nel decreto sono descritti i confini, lo spazio, le mura e la forma del teatro.

922 d.C.

Giovanni Chierico nel suo testamento cede covoli e arcovoli e l'edificio ad essi sovrapposto perché fosse convertito in chiesa consacrata a S. Siro, anche se pare che già dall'880 ne fosse iniziata la costruzione.

1087 d.C.

A causa di una piena crolla definitivamente il Ponte Postumio ed è probabile, anche se non provato, che anche il teatro subì danneggiamenti.

1097 d.C.

Altri danni furono arrecati a tutto il recinto del teatro in occasione di una piena.

1116 d.C.

Un forte terremoto danneggia oltre che l'Arena anche il teatro, conosciuto allora come *Medius Circus*.

1153 d.C.

Vi è un'ulteriore crollo del Ponte Pietra, con conseguenti danni alla parte inferiore del teatro.

1195 d.C.

Una terribile piena, rovinata la Regasta che è sotto il castello di S. Pietro, trascina con sé anche la parte del teatro che ancora stava in piedi e rovina la scena.

1198 d.C.

Il podestà di Verona Guglielmo dell'Ossa fa eseguire i restauri alla Regaste per proteggere quel punto della città dalle acque dell'Adige, ma del teatro nessuno ebbe cura.

1337 d.C.

Suor Aleusia erige una piccola chiesa, detta S. Maria della Cava, dietro la chiesa di S. Siro.

XIV sec d.C.

Il fronte della chiesa di S. Siro è ornato da un protiro ad arco acuto.

XV sec d.C.

Fuori dal limite del teatro sorge un'altra chiesa, annessa al convento di S. Girolamo dai Gesuati.

1513 o 14 d.C.

Caduto il ponte Pietra, si scopre tra le rovine una iscrizione intitolata a Ottavia, sorella di Augusto, poi riconosciuta come epigrafe sepolcrale e non riferibile al teatro.

1517 d.C.

La chiesetta di S. Siro è concessa a una confraternita del Sacramento, che la trasforma aggiungendo le cappelle laterali e ingrandendo il coro nel 1913 fino ad occupare la chiesa di "S. Maria della Cava", separata da una piccola strada.

1519 d.C.

Ricostruzione del teatro da parte di Giovanbattista Da Sangallo.

Anni 1540-60 d.C.

Caroto pubblica dei disegni relativi al teatro, che però mostravano aggiunte non conformi alla realtà e una pianta della cavea ellittica anziché semicircolare.

Anni 1550-1570 d.C.

Andrea Palladio studia il teatro e ne compone tre disegni.

Anni 1583-87 d.C.

Il Canobio dà notizie interessanti di scoperte architettoniche relative al teatro.

XVII sec. d.C.

L'esterno della chiesa di S. Siro è modificato dall'aggiunta di cappelle sui lati.

1672 d.C.

Apertura di una cappella della chiesa di S. Siro.

Anni 1697 e il 1703 d.C.

Viene costruita la gradinata a due rami da cui si accede alla chiesa di S. Siro, la quale viene innalzata e modificata nella facciata dalla sostituzione di finestre allungate in rettangolari.

1732 d.C.

Il Maffei scrive un breve riassunto sugli studi compiuti sul monumento, confutando la teoria della naumachia.

1740 d.C.

Viene pubblicato dal Ramanzini il disegno di Adriano Cristofali della pianta del teatro nella quale egli considera i ruderi e le scoperte a lui

contemporanee e traccia la cavea come elemento semicircolare.

1757 d.C.

Cominciano gli scavi Fontana nella corte situata tra piazza di S. Libera e l'altra del Redentore: furono rinvenuti molti oggetti rari pertinenti al teatro.

1759-60 d.C.

Gli scavi Fontana terminano dopo aver portato in luce sepolcri, un muro reticolare sotto la strada delle Regaste, parallelo al reticolato della riva sinistra dell'Adige.

1761 d.C.

Grazie ad uno scavo nella zona della casa sull'angolo sinistro del teatro, furono portate alla luce medaglie, statue, frammenti architettonici, che furono poi cedute da Silvio Fontana al Comune nel dicembre del 1818.

1780 d.C.

Viene scoperta l'intercapedine per circa 2,50 metri di lunghezza facendo dei lavori dietro la chiesa di SS. Siro e Libera e vicino quella di S. Girolamo.

1794 d.C.

Nasce Andrea Monga, lo studioso che riscopre il teatro romano.

1801 d.C.

Si demolisce un castello sul colle di S. Pietro, la cui demolizione forse iniziò già nel 1797.

1815 d.C.

Nella cantina del civico 4127, di proprietà di Sebastiano Togni, sono scoperti un corridoio e alcuni gradini antichi contigui ad una delle scale.

1820 d.C.

Il figlio di Fontana dona gli oggetti alla biblioteca della città.

1825-27 d.C.

Secondo testimonianza del Benassuti sono scoperti i covoli al di sotto della chiesa di S. Libera.

1827 d.C.

Il Benassuti fa uno studio relativo al teatro, aggiungendo alcune correzioni ai disegni del Caroto, di cui condivise i principi architettonici.

1832 d.C.

Francesco Ronzani, nella introduzione pubblicata delle *Antichità di Verona*, opera a cui collabora anche il Pinali, rileva la necessità di nuovi scavi.

1833 d.C.

Risulta che Pinali stesse occupandosi dei disegni di Andrea Palladio, che credeva perduti.

Anni 1834-44 d.C.

Andrea Monga produce disegni, rilievi e appunti sul teatro.

1834 d.C.

Iniziano gli scavi al teatro secondo testimonianza dello stesso Monga.

1835 d.C.

L'ingegner Bevilacqua, dopo aver esaminato l'area del Camiglione del Redentore, evidenzia l'imminente necessità della demolizione di alcune case: è in questo luogo che Monga scopre l'entrata al teatro dal lato del Ponte Postumio.

1836 d.C.

La Congregazione municipale di Verona obbliga Monga a demolire delle muraglie (probabilmente quelle presenti nell'atrio di ingresso al teatro) o di munirle di puntelli perché pericolanti.

1836 d.C.

Una abitazione crolla (il civico 4149) e vi sono case completamente puntellate.

1837 d.C.

Il Braun dà una relazione degli scavi Monga nel Teatro Romano.

1842 d.C.

Pinali incita Monga a continuare gli scavi, interrotti a causa del restauro di una villa.

1845 d.C.

Pinali pubblica la sua *Relazione*, la quale non ha valore scientifico per l'erronea distribuzione delle parti e il carattere adulatorio della dissertazione.

1851 d.C.

In seguito all'erezione della casa di Via Redentore n.4160, sono messi in luce frammenti e una lapide, con una dedica all'imperatore Claudio. Tale iscrizione pare appartenere ad una costruzione annessa ed inserviente al teatro.

Anni 1850-52 d.C.

Edoardo Falkener, un famoso architetto e archeologo dell'epoca, compila una breve storia del teatro dopo averlo visitato in un viaggio in Italia.

1851 d.C.

Marco Monga disegna la situazione della cavea in quell'anno, dimostrando che era uguale a quella al tempo di Ricci. Nello stesso anno, in occasione degli scavi per la caserma austriaca, vengono accertate le tracce di un tempio che si collocava sulla sommità del teatro.

1855 d.C.

Anno in cui il Monga probabilmente completa piante e disegni.

Anni 1859-60 d.C.

Il giovane architetto Guillaume rileva le piante del teatro, scrivendo una voluminosa relazione.

1861 d.C.

Terminano gli scavi del Monga a causa della morte dello studioso. Viene prodotta una documentazione da Edmond Guillaume sul teatro di Verona, citata da Ricci nella sua opera.

1884 d.C.

Muore improvvisamente il figlio di Andrea Monga, Francesco, che era l'unico che si occupasse del teatro e di custodire i frammenti antichi riscoperti.

Anni 1884 e il 1885 d.C.

La Commissione delle Strade romane conduce degli scavi sulla piazzetta del Redentore e scopre un muro romano formato con blocchi di tufo e un muro reticolato uguale di probabile appartenenza al teatro.

1888 d.C.

Il conte Sormani-Moretti intavola delle trattative con gli eredi Monga per l'acquisizione dell' area, ma il tentativo è vano. Non va a buon fine neppure il progetto di cessione del teatro da parte dei fratelli Monga al Comune.

Anni 1893-94 d.C.

Serafino Ricci si occupa di documentare gli scavi del Monga con una serie di fotografie, una descrizione dei resti e un riassunto storico delle vicende che hanno coinvolto il monumento.

21 settembre del 1904

Il Comune di Verona acquista l'area del teatro e consegna la direzione dei lavori di scavo e ricerca al professore Gherardo Ghirardini (1854-1921), docente di archeologia a Padova e poi Bologna. I lavori conducono alla

demolizione di diciotto case e all'asportazione di dodicimila metri cubi di materiale.

1906 d.C.

Ghirardini pronuncia un discorso in occasione della visita di Vittorio Emanuele III a Verona, che venne poco dopo pubblicato, con l'aggiunta di una *Planimetria dello stato dei lavori al 17 marzo* dello stesso anno.

Anni 1904-1914 d.C.

I lavori di recupero del teatro proseguono sotto la direzione dell'ufficio tecnico municipale e sono documentati da una serie di foto di G. Bissoli.

1909 d.C.

Ghirardini muore senza aver pubblicato nulla sui suoi lavori di scavo. Dopo di lui assunse il controllo dei lavori il sig. Romagnoli dell'Ufficio Tecnico Comunale, che aveva già lavorato con Ghirardini. Infatti sistemò sui piani di posa i gradoni trovati sparsi per la cavea, seguendo in questo il consiglio di chi l'aveva preceduto. Tuttavia il Romagnoli non segue un criterio archeologico e scientifico, tanto che si spinge a ricollocare diversamente i gradoni trovati in situ, come accade ai gradoni al sesto e settimo piano di posa sull'asse della cavea. Egli sposta questi gradoni e allinea gli altri del settore centrale, con l'evidente intenzione di creare il posto per accogliere una quinta scaletta.

1910 d.C.

Viene realizzata una planimetria del teatro, precisamente il 22 settembre.

1912 d.C.

Vengono ricomposte le gradinate e un settore della loggetta per un totale di dieci arcate.

1914 d.C.

Viene ricostruito un arco dell'ordine ionico con l'inserimento di una delle chiavi d'arco ad avancorpo taurino.

1921-23 d.C.

Il convento diviene sede del Museo Archeologico e viene trasportato qui il materiale riscoperto grazie agli scavi, prima raccolto nel Palazzo Pompei.

Anni 30 del 1900

Si svolgono i lavori voluti e diretti da Antonio Avena, ma mancano di una documentazione a stampa. Avena fa costruire la scaletta centrale in mattoni per aumentare la funzionalità moderna del teatro.

1931 d.C.

Avviene la demolizione delle case ancora esistenti verso piazzetta Botte da parte di Avena.

1936 d.C.

Avviene la totale liberazione dell'area del teatro grazie al crollo di alcune case al Redentore.

Maggio 1936 d.C.

Vi è una frana che copre la sistemazione del taglio del colle verso oriente.

1938-39 d.C.

Vi è lo scavo della fossa scenica da parte di Avena.

1959 d.C.

Viene edito il rilievo dell'architetto Gismondi, eseguito per il prof. C. Anti.

Il museo archeologico è riaperto al pubblico in seguito all'installazione di un ascensore, che porta dalla precinzione del teatro al piano del museo con un balzo di diciassette metri.

Maggio-giugno 1959 d.C.

La Soprintendenza delle antichità compie uno scavo nel primo e secondo vano, delimitati dai muri radiali di sostegno della cavea verso la Botte.

1960 d.C.

Il muro radiale tra primo e secondo arcovolo viene reso più sicuro mediante l'inserimento di barre di acciaio infilate in fori preventivamente praticati con una trivellatrice.

Febbraio 1960 d.C.

Vengono rinnovati gli ambienti del piano superiore attorno al chiostro dell'ex convento di S. Girolamo, in previsione di estendere a questo piano lo spazio museale aperto al pubblico. Viene quindi costruita una scala in pietra, che inizia dal punto di arrivo dell'ascensore.

1960-61 d.C.

Viene realizzato lo sbancamento del terreno che ricopriva il livello originario di calpestio del chiostro ad occidente della chiesa di S. Girolamo e vengono in luce le cisterne e il sistema di alimentazione del pozzo.

1961 d.C.

Si provvede al puntellamento del refettorio per rafforzare i tiranti.

1962 d.C.

L'intervento di restauro conservativo si estende alle murature delle passeggiate e al restauro di alcune specchiature al piano superiore.

1961-62 d.C.

Viene recuperata ad uso di magazzino la cantina sottoposta a Refettorio, dando sfogo all'acqua che ristagnava in una cisterna, scavata nel tufo, mediante

trivellazioni. Negli stessi anni viene rafforzata la zona dell'intercapedine antistante e sottoposta a cantina e Refettorio, che era stata precedentemente assicurata da archi e contrafforti in mattoni.

1961 d.C.

Vengono realizzati dei pilastri in cemento armato dal piano di fondo dell'intercapedine per sostenere gli archi in mattoni.

1963 d.C.

Si procede ad assicurare la muratura che si eleva al di sopra del ninfeo attraverso due pilastri in cemento armato, rivestiti in mattoni, all'ingresso del ninfeo e attraverso trivellazioni con inserimento di barre d'acciaio. Nello stesso anno viene costruita una scala a sbalzo dal piano del secondo chiostro di S. Girolamo alla prima passeggiata.

1967 d.C.

La Soprintendenza alle Antichità smonta e ricomponi l'arco in pietra e tufo verso il Redentore che segna l'accesso alla cripta orientale del teatro.

1968 d.C.

Viene rifatto il tetto della chiesa di Santa Libera e l'anno dopo gli intonaci.

1970-1 d.C.

L'Ufficio Tecnico del Comune procede ad una serie di interventi all'interno della casa ex-Fontana, oggi ingresso al teatro. Al piano mediano si ricava un appartamento e al piano terra si recupera il voltatesta della fossa scenica e il percorso della cripta, attraverso la quale si accedeva da oriente al piano di calpestio della stessa fossa.

1972 d.C.

Il teatro è chiuso da cancellate e reti per una migliore protezione e il

comune chiude al pubblico il Museo Archeologico. Lo stesso anno la grotta sotto la chiesa di S. Girolamo viene rinforzata con l'inserimento di una serie incrociata di pilastri in cemento armato con robuste piattabande tese sotto la volta, pronte a sostenerne un eventuale cedimento.

1973 d.C.

La Soprintendenza alle Antichità provvede ad una ripulitura della fossa scenica.

1973-74 d.C.

Giungono a compimento i lavori nella grotta con la costruzione di un arco all'ingresso e con la chiusura mediante una porta a vetri.

Giugno 1974 d.C.

Riapertura del Museo Archeologico e chiusura e sottomurazione del passaggio che dalla parte più interna della grotta sbocca fuori attraverso il muro di facciata dell'ex convento di S. Girolamo (punto di pericoloso indebolimento della struttura della facciata).

1975 d.C.

Rafforzamento dei due pilastri datati 1907, che reggono la volta del grande ambiente al primo piano dell'ex convento e quindi della scala che collega il chiostro con la sala delle iscrizioni. La scala e il muro che la fiancheggia posavano su terriccio incoerente, che è stato asportato dopo aver collocato una grossa putrella in ferro. Nell'autunno dello stesso anno il Comune finanzia l'intonacatura della facciata del convento S. Girolamo.

1976 d.C.

Il piano superiore della casa ex Fontana d'ingresso al teatro viene preparato un laboratorio per il restauro del vasellame dei secoli XIV-XVIII.

Novembre-dicembre 1976 d.C.

Viene risanata dalla Soprintendenza delle Antichità la grande volta che copre la scala orientale di accesso alla cavea del teatro e si provvede alla collocazione di una ringhiera metallica attorno alla terrazza che copre la volta stessa.

1977 d.C.

Viene riordinato un piano di cellette e relativo corridoio al II piano mediante il rifacimento degli intonaci e il nuovo impianto di illuminazione.

1978 d.C.

Inizio dei lavori di riordino anche al piano I.

1970-71 d.C.

E' compiuto uno scavo dietro e dentro casa Fontana, attuale ingresso al Teatro, che ha permesso di recuperare il percorso della cripta attraverso il quale si accedeva da oriente al piano di calpestio della fossa.

1980 d.C.

Viene edito il rilievo dell'architetto Benvegnù.

1986 d.C.

Con la direzione dell'ufficio tecnico comunale e la sorveglianza della soprintendenza archeologica del Veneto, furono eseguiti lavori di riordino delle lapidi e il consolidamento dei resti murari dell'antico teatro.

Le opere esterne furono precedute dal consolidamento dei contrafforti esistenti nell'intercapedine esistente a monte della cavea.

I contrafforti, parte in pietra e parte in archi di mattoni vennero consolidati agli appoggi o rifatti con gli stessi materiali di recupero.

LE RICOSTRUZIONI STORICHE DEL TEATRO

2.1 Introduzione

Si illustrano le più importanti raffigurazioni che hanno come oggetto il Teatro Romano di Verona. L'analisi dei disegni consente di ricostruire le principali fasi storiche di questo suggestivo monumento.

2.2 Giovanni Caroto

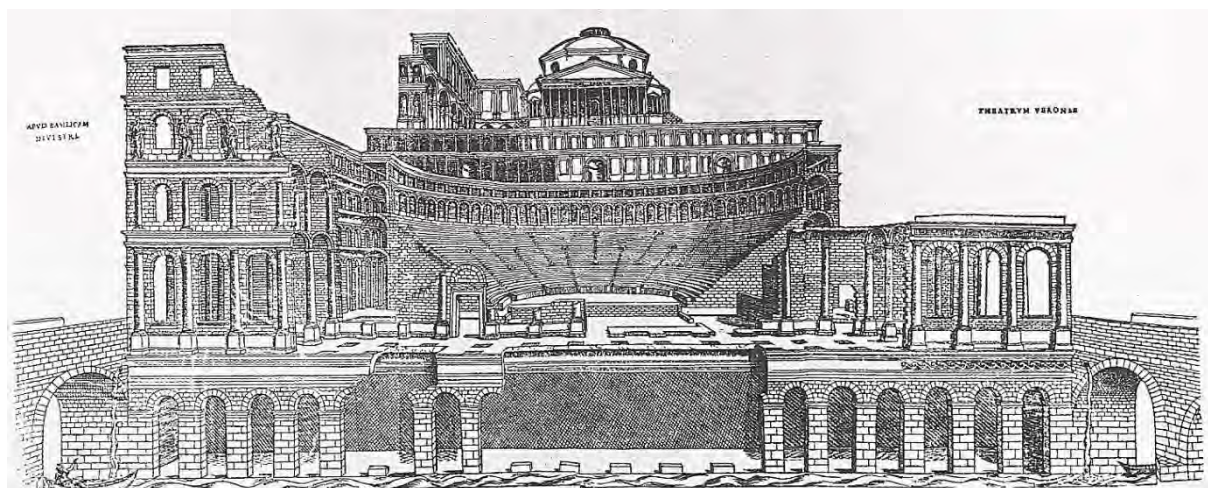


Fig. 2.1– Giovanni Caroto, Teatro romano di Verona, Verona, Bibl. Civica,

Il primo tentativo di rilevare la pianta e l'alzato del teatro fu di Giovanni Caroto, i cui disegni furono pubblicati nel 1540 da Torello Sarayna e ristampati nel 1560 dal Caroto stesso.¹

Caroto adottò più criteri artistici che archeologici, completando i ruderi soggettivamente e sbagliando molti particolari. Considerando le difficoltà che vi erano ai suoi tempi per gli studi archeologici, senza scavi sistematici né preparazione scientifica, è giusta la lode che il

¹ Caroto G., *De l'antiquità de Verona*, tav.XVI, 1560

Falkener gli tributa, mentre critica lo storico Sarayna che si limita alla descrizione dei disegni del Caroto senza evidenziarne gli errori.

La rappresentazione dà una visione complessiva dell'impianto del teatro romano dalla riva del fiume alla sommità del colle. Per Caroto l'Adige non passava davanti al teatro come nella situazione attuale, ma l'acqua era raccolta e portata qui da un bacino artificiale alimentato dagli acquedotti di Parona e di Montorio.

In basso è riprodotta l'arginatura in *opus reticulatum*, davanti alla quale si allinea una successione di diciotto archi in blocchi di pietra a formare un porticato.

Al di sopra del portico e a filo con esso si innalza l'edificio scenico articolato in quattro ordini. Al primo piano gli archi sono inquadrati da semi-colonne doriche, al secondo vi sono semicolonne dello stesso ordine ma senza piedistallo. Nel terzo gli archi sono intervallati da statue o cariatidi e il quarto presenta una serie continua di finestre rettangolari.

L'edificio scenico a destra è rappresentato in sezione, mentre a sinistra Caroto si limita a mostrare lo spaccato del primo ordine.

Al centro è raffigurato l'interno del teatro: la cavea presenta una gradinata non divisa da meniani e con una successione di quattro ordini di vomitori, il primo dei quali è all'altezza del piano dell'orchestra. Al termine della gradinata si imposta un porticato ad archi, sopra il quale si erge un secondo livello con aperture trabeate rettangolari.

Lo schema della cavea sembra non avere riscontro con la realtà architettonica del teatro, ma pare piuttosto essere desunto dalla contemporanea ricostruzione dell'anfiteatro Arena.

Nella parte mediana della scena compare la *Porta Theatri* con il fregio di palme e festoni vegetali, in una posizione più bassa rispetto a quella reale.

Alla sommità del colle Caroto raffigura il tempio di Giano, a pianta centrale ottagonale, circondato su tre lati da porticato su due livelli. Tale elemento archeologico posto in *summa cavea* è ripreso poi anche da Palladio, che riduce la mole del tempio dandogli un pronao di sei colonne rispetto alle otto del disegno di Caroto.

Alcuni studiosi hanno evidenziato la presenza di errori nell'illustrazione del Caroto.

Nella sua *Relazione* il Pinali ne critica l'arbitrarietà, la rappresentazione inesatta delle sottomurazioni architettoniche e delle logge che inferiormente ai viali circondavano la cavea e l'elevazione esagerata dell'edificio per lo spettacolo dei giochi navali sul retroscena del teatro ai bordi del fiume.²

Il Monga nel suo manoscritto avanza altre critiche al Caroto, in particolare alla pianta

² Pinali G., *Relazione degli scavi dell'antico romano teatro che ha esistito sulle falde del colle or detto castello di S. Pietro in Verona*, anno 1845

rappresentata come ellittica, anziché semisferica, ispirandosi alla pianta dell'Anfiteatro (arena minor).³ Secondo Monga il Caroto sbaglia inoltre nel condurre le sostruzioni a volta concentriche e continuate, tanto le inferiori quanto le superiori, su una stessa linea, mentre hanno posizione diversa rispetto l'asse del teatro e nel supporre sostruzioni a volta per tutto il circuito della cavea, mentre non ve ne erano che per le volte superiori, non avendo bisogno delle sostruzioni inferiori che nei corni del teatro, per sostenere e ampliare il pendio naturale del colle.

Il Ricci ritiene un errore dell'illustratore l'imitare l'Arena anche nel piano terreno del teatro che tocca l'Adige, appoggiando il concetto falso della naumachia, che lo indusse ad unire la facciata del teatro con i due ponti (cosa non provata), come pure ad alterare l'architettura stessa dei ponti e il non considerare il rientramento laterale della facciata, che Caroto costruì troppo ricca e alta per influenza dell'altezza delle logge superiori della cavea e del tempio di sfondo, a cui tale facciata doveva essere quasi uguale in altezza. In sostanza Ricci ritiene che il Caroto ha «troppo aggiunto di ciò che non c'era».⁴

Franzoni in *Nuovi elementi per la conoscenza del Teatro Romano di Verona* pone l'attenzione sulla galleria ad archetti che Caroto rappresenta a coronamento della cavea sul piano della seconda precinzione.⁵ Questi archetti nel disegno del pittore sono costituiti da pilastri formati dalla sovrapposizione di cinque blocchi, mentre in realtà sono monolitici. Perpendicolarmente e al di sopra della galleria ad archetti il Caroto ne pone una seconda, la quale dovrebbe corrispondere all'ambulacro, molto più bassa, con finitura architravata e porte quadrate sul prospetto. Tale ricostruzione non sembra per Franzoni molto attendibile in quanto la galleria ad archetti non poteva trovarsi al di sotto dell'ambulacro in quanto questo posa sul pieno, cioè su un largo gradino di tufo. Per questo motivo la galleria poteva essere, casomai, avanzata rispetto all'ambulacro e non a filo con la facciata di quello.

Inoltre la galleria ad archetti, nella posizione assegnatale dal Caroto, non poteva essere coperta da una volta a pieno centro, mancando lo spazio necessario per lo sviluppo di questa al di sopra dei 3,20 metri degli archetti. Infatti tra il limite superiore di questi e il piano dell'ambulacro vi sono soltanto 70/75 cm, mentre sarebbe necessario un metro e mezzo per lo sviluppo della volta a pieno centro, senza tener conto dello spessore della volta stessa.

Il Caroto sbaglia pure nel porre una copertura architravata sull'ambulacro, poiché gli studi archeologici hanno evidenziato la presenza di volte ribassate.

³ Monga, manoscritto 1800

⁴ Ricci S., *Il Teatro Romano di Verona studiato sotto il rispetto storico e archeologico con la bibliografia di Manga, suo scopritore*, Venezia, Editore Tipografia F.lli Visentin, anno 1895

⁵ Franzoni L., *Nuovi elementi per la conoscenza del Teatro Romano di Verona*, in *Nova Historia*, anno 13, n.1, Verona, Editore Linotipia Veronese Ghidini e Fiorini, anno 1961, gennaio-aprile, pp. 55-62

Caroto non poteva avere informazioni sulla cavea, perché non era ancora accaduto che il signor De Togni scoprisse nella cantina della sua casa una parte della gradinata, successivamente ricomposta. Dal momento che tutto era sepolto, Caroto immaginò 35 gradini e un podio sul davanti rialzato come nel teatro di Asperdos. Nonostante la conoscenza della norma che regolava la disposizione degli ordini (dorico, corinzio, ionico), sbagliò a porre a livello dei ponti l'ordine ionico, che è invece al piano primo delle scale laterali e quindi girava verosimilmente per il primo livello della facciata.

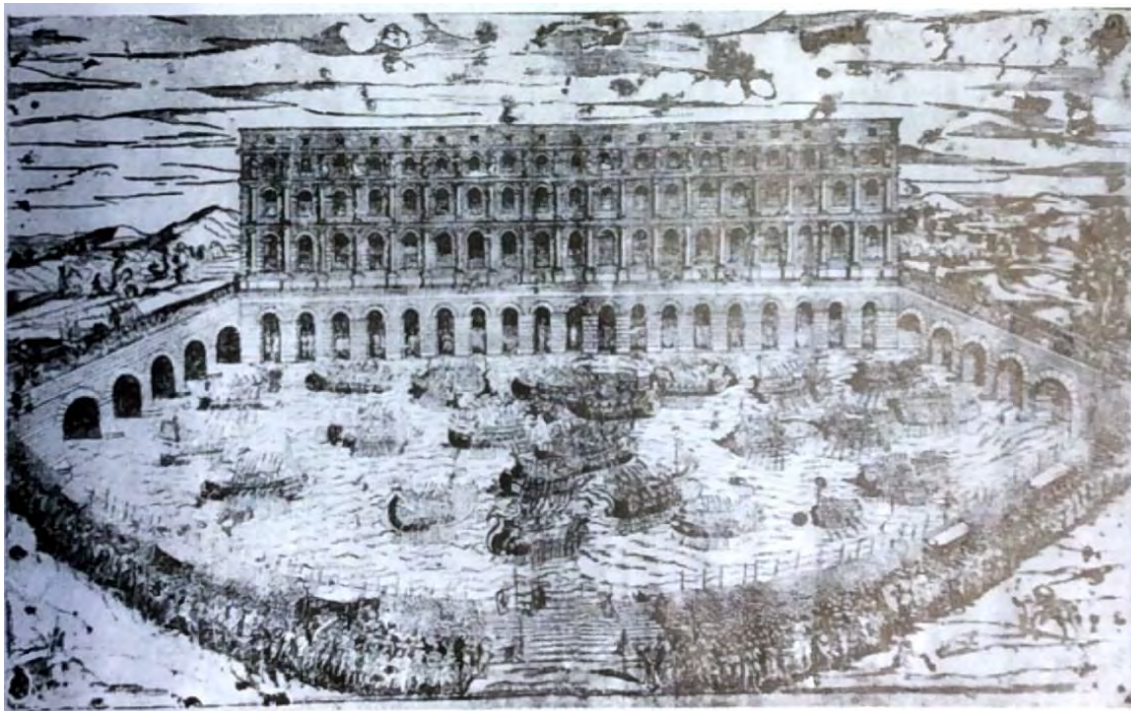


Fig. 2.2– Giovanni Caroto, Facciata con il Ponte Pietra e Postumio [da F.Dal Forno, *Il teatro romano di Verona*, 1961]

Giovanni Caroto fornisce peraltro i rilievi precisi dei singoli elementi del teatro. La sua opera ebbe subito grande successo; in particolare la ricostruzione del Teatro veronese venne ripresa nella *Cosmografia* di Munster, con una prima edizione nel 1544, poi diffusa con traduzioni in diverse lingue in tutta Europa.

Dopo il 1540 Caroto continuò a lavorare su questi temi pubblicando di nuovo i suoi disegni nel 1566 nell'opera *De le Antiquità de Verona*: l'autore ripropone alcuni brani della prima edizione, con le notizie sulla misura usata (la pertica veronese) e le descrizioni del teatro e dell'anfiteatro, ritenuti i monumenti antichi di maggiore importanza a Verona.

2.3 Giovanbattista da Sangallo

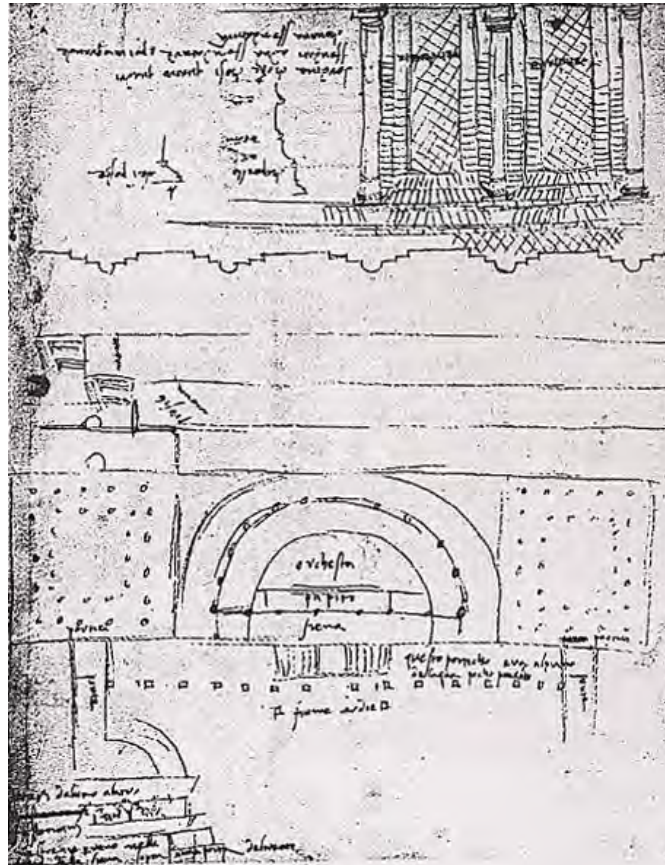


Fig. 2.3– Giovanbattista da Sangallo, Teatro romano di Verona [Firenze, Uffizi A 1394]

Il disegno è datato poco dopo il 1519 e mostra al centro la pianta del teatro, la cui cavea pare incentrata tra due grandi spazi porticati ciascuno collegato da un ponte all'altra parte del fiume.

I ponti definiscono lo sviluppo di un porticato ad un livello poco superiore a quello dell'Adige, i cui pilastri figurano collocati oltre la linea dell'argine, che lateralmente prosegue più arretrato.

Sopra la pianta, ma con orientamento inverso da questa, è mostrata una sezione che riproduce i tre gradoni delle terrazze a monte del teatro.

Il foglio contiene anche, in alto e rovesciata rispetto la pianta del teatro, la rappresentazione della muratura in *opus reticulatum* della seconda passeggiata con didascalie sormontate dai profili di due capitelli.

Nella parte inferiore del foglio è riprodotto un particolare di trabeazione caratterizzato da palme collegate da festoni vegetali, che si riferisce alla parte di un fregio dell'edificio scenico verso l'Adige.⁶

⁶ Borsi G.F., *Leon Battista Alberti e le antichità romane*, Firenze, 2004

2.4 Andrea Palladio

I disegni di Palladio, pubblicati per la prima volta da Beschi, vanno considerati come atti progettuali e non come documenti archeologici provati. Il Falkener afferma la dipendenza delle rappresentazioni del Palladio dal Caroto, ma ritiene che Palladio ebbe maggior conoscenza delle proporzioni e delle leggi della composizione.

Palladio collaborò con Daniele Barbaro, patriarca di Aquileia, che stava traducendo dal latino e commentando il *De Architectura* di Vitruvio, disegnando le illustrazioni per il trattato.

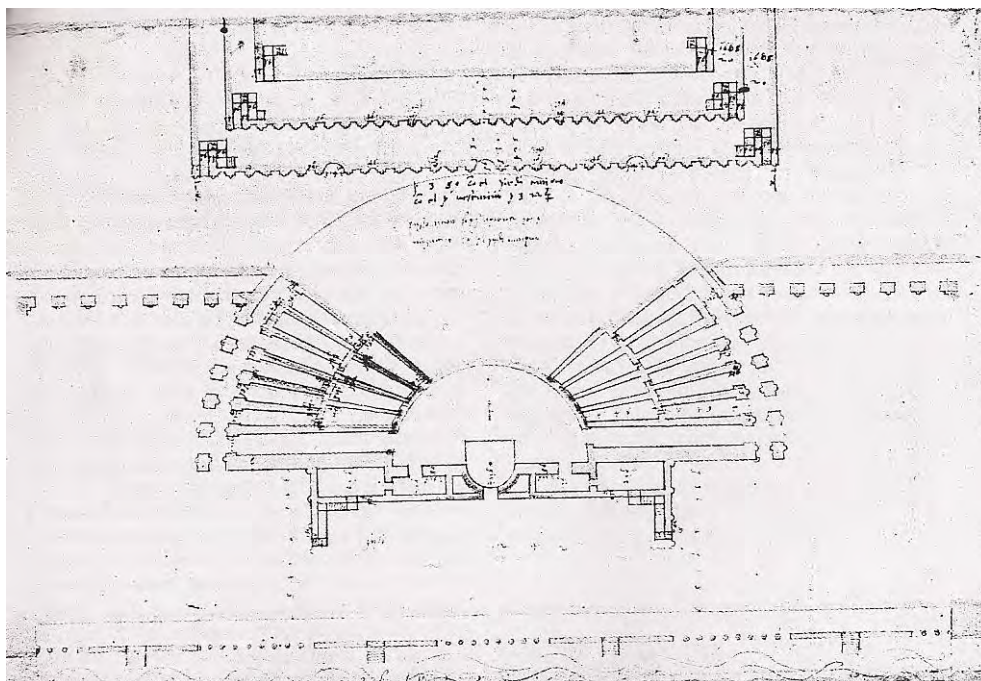


Fig. 2.4–Andrea Palladio, Pianta del teatro romano di Verona, Londra, R.I.B.A

La pianta si estende dalla riva del fiume fino alle terrazze del porticato a monte del teatro, senza saldarsi alla riva dell'Adige come nel Caroto.

Il porticato sull'Adige non è strutturato in una serie continua di archi come nella ricostruzione del Caroto, ma si articola in tre settori di nove archi e due di tre archi intervallati da tratti di muro. Palladio riconosce che non tutta la cavea posa su sostruzioni radiali in muratura ma solo i settori laterali, mentre la zona mediana poggia sul supporto naturale del colle.

Al centro della scena, la cui lunghezza è uguale al doppio del diametro dell'orchestra, è presente un nicchione.

La pianta del Palladio si rifà a quella dell'Arena, in particolare nelle basi dei pilastri che fronteggiano i muri radiali della cavea, che richiamano le basi dei pilastri dell'anello esterno dell'arena.

A oriente e occidente della cavea si allineano dei pilastri con semicolonne paralleli al taglio del colle, che formano delle archeggiature cieche e non un porticato come nella situazione

reale.

La parte superiore della pianta propone le terrazze a monte del teatro, la prima delle quali è disegnata erroneamente come tangente al semicerchio del massimo sviluppo della cavea.

In sostanza Palladio non tiene conto dell'esistenza della prima terrazza, quella su cui si distesero i chiostri del convento dei Gesuati e sulla cui parete di fondo si apre l'antico Ninfeo.



Fig. 2.5–Andrea Palladio, Sezione del teatro romano di Verona, Londra, R.I.B.A

Il secondo disegno, che studia il teatro in direzione trasversale, comprende, oltre al teatro, un ponte a cinque arcate e, sull'altra sponda del fiume, la sezione di una gradinata di circa venti gradini costituente il “Contro-teatro”.

Evidentemente anche Palladio è stato influenzato dalla credenza locale della «naumachia», di cui fu autorevole sostenitore il Panvinio.

La sezione evidenzia come il Palladio strutturi in modo nettamente distinto i due prospetti interno ed esterno. Quello esterno è costituito da due logge ad uso degli spettatori della naumachia e quello interno dalla successione verticale di tre ordini, che uguagliano in altezza le strutture della cavea e dei suoi coronamenti.

E' singolare come Palladio, che rifiuta le suggestioni locali della dipendenza dell'arena per il prospetto sull'Adige dell'edificio scenico, si richiami interamente all'anfiteatro per la successione dei tre ambulacri e del muro superiore, che si svolgono con andamento semicircolare a chiudere la cavea, senza tener conto del fatto che la cavea non sorge tutta isolata sul piano, come l'Arena, ma si addossa in larga misura al colle.

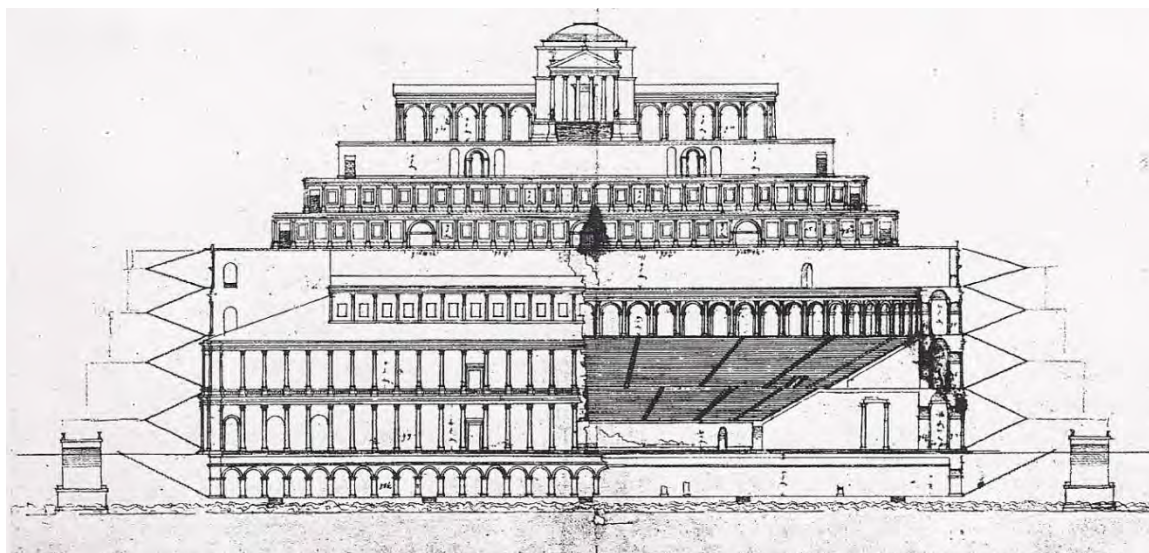


Fig. 2.6–Andrea Palladio, Teatro Romano di Verona, Londra, R.I.B.A

Palladio offre una ricostruzione dell'intero impianto del teatro dalla riva del fiume alla sommità del colle, il tutto incentrato tra due ponti sull'Adige.

La muratura ad argine del fiume non presenta il caratteristico reticolo (come in Caroto) e gli archi del portico a livello dell'acqua sono trentacinque, che il Palladio interrompe al centro per far spazio ad uno squarcio che consente la visione all'interno del teatro. La loro altezza è inoltre notevolmente inferiore a quella dei primi due ordini del teatro.

L'edificio scenico è diverso da quello riprodotto dal Caroto in quanto si ha una successione verticale di tre ordini e non più quattro: il terzo ordine con cariatidi risulta soppresso mentre rimane l'ultimo ordine ad aperture rettangolari, scandite nel Palladio da semicolonne, mentre nel Caroto erano in successione continua. Il Palladio sembra rifiutare la ricostruzione di un prospetto del teatro rigidamente ricalcata su quella dell'anfiteatro.

La cavea parte con un alto podio nel quale si aprono dei vomitori a livello dell'orchestra. Una seconda serie di vomitori si apre a circa un terzo dell'altezza della cavea, corrispondente al livello raggiunto dalla trabeazione del primo ordine, dove si sviluppa una precinzione.

La parte superiore della cavea è servita e conclusa da un porticato ad archi.

In Palladio manca un secondo porticato a coronamento della cavea e al suo posto è presente una parete liscia e continua che delimita a monte lo sviluppo di una terrazza.

Al di sopra di questa si impostano le due passeggiate in *opus reticulatum*, tipologia non evidenziata nel disegno ma raffigurata a parte in particolari.

Sopra le passeggiate è posta la parete dorsale di un'altra terrazza e infine il coronamento del tempio a pianta centrale, fiancheggiato da un portico. Quest'ultimo non presenta le due ali piegate in avanti con cui Caroto isolava il tempio sui fianchi.

Per quanto riguarda il problema della collocazione della loggia ad archetti, Palladio disegna una loggia che richiama quella ricomposta nel 1912 e la pone nel piano della seconda precinzione, non discostandosi dall'ipotesi del Caroto.

Al di sopra di questa prima galleria egli colloca un camminamento, dietro al quale si alza una parete piana curvilinea, con due sole porte, corrispondente al prospetto dell'ambulacro.

Sebbene la ricostruzione del Palladio sia preferibile a quella del Caroto in quanto non pone la galleria ad archetti perpendicolarmente sotto l'ambulacro, anche la ricostruzione del Palladio non presenta misure sufficienti per una galleria a volta a pieno centro, la quale sorpasserebbe di oltre un metro il piano di calpestio dell'ambulacro.

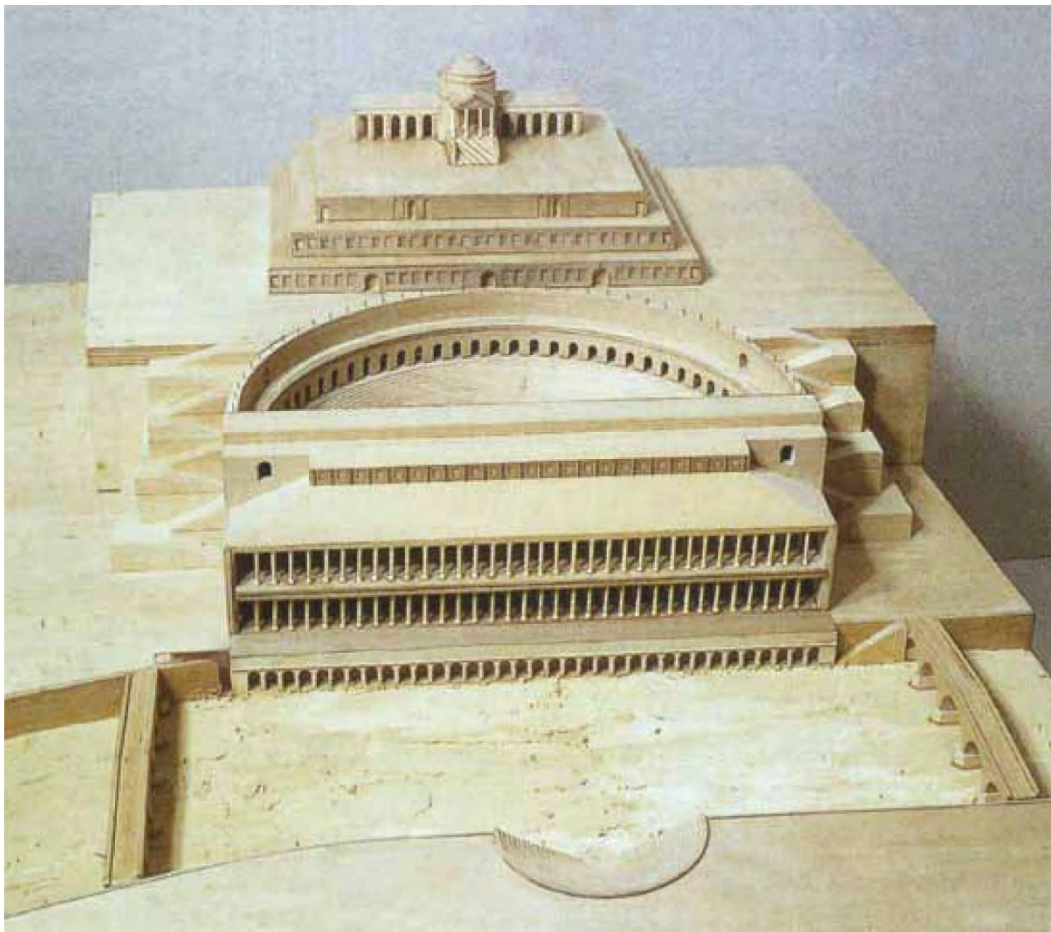


Fig. 2.7– Plastico del teatro, tratto nel 1997 dai disegni di Andrea Palladio, esecutori S. Gottoli, L Savio, foto U. Tomba

2.5 Adriano Cristofali

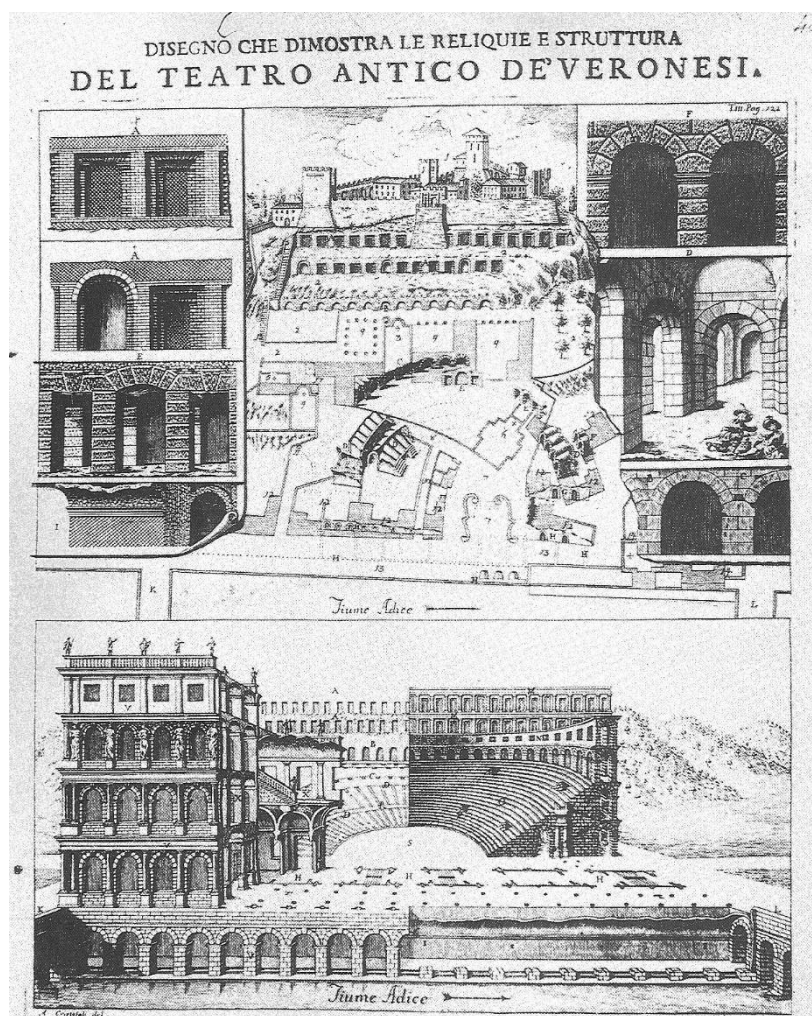


Fig. 2.8– Adriano Cristofali, *il Teatro Romano*, da G. Biancolini, *Dei Vescovi e governatori di Verona, Dissertazioni due*, Verona 1757, p.86

Adriano Cristofali fu il primo a studiare il teatro a partire dai suoi ruderi, adottando la pianta semicircolare e a proporre una nuova ricostruzione che, rispetto alle precedenti, ha il merito di inserire nella topografia della zona i resti antichi accertati ed esistenti.

Egli produce una pianta a volo d'uccello, uscita nel 1740 per cura di Ramanzini. Essa raffigura i particolari del disegno in maniera goffa e abbozzata. Anche questa ricostruzione sembra attingere a quella del Caroto, riprendendo da questa l'alzato erroneo del retroscena, raffigurando chiavi d'arco e disposizioni di colonne immaginarie. Si distingue dal Caroto per la muratura delle pareti di facciata del terzo piano a finestre quadre con colonne, che il Caroto non raffigura. Lo spaccato della scena fa parere l'edificio come un'opera risalente al 1600 o 1700, presentando delle soluzioni assimilabili al barocco. La pianta del proscenio fino alla riva dell'Adige è raffigurata con tre archi laterali anziché con due come nella pianta del Caroto, tanto per il pian terreno quanto per i piani superiori. Cristofali non si discosta molto dal disegno di Caroto per quanto riguarda i passeggi e non sono rilevate secondo la realtà le

grandi nicchie che ornavano le logge o gli archi che sostenevano le logge. Cristofali crede che la grotta di S. Siro costituisca l'ingresso al teatro e che le estremità del teatro siano gli ingressi ai corridoi scoperti, che si vedono verso il Redentore.

2.6 Edmondo Falkener

Nel 1852 l'architetto ed archeologo Edmondo Falkener, cui spetta il merito di aver ritrovato i disegni palladiani del teatro, esegue una ricostruzione che si attiene sostanzialmente alle linee di quella del Palladio.⁷

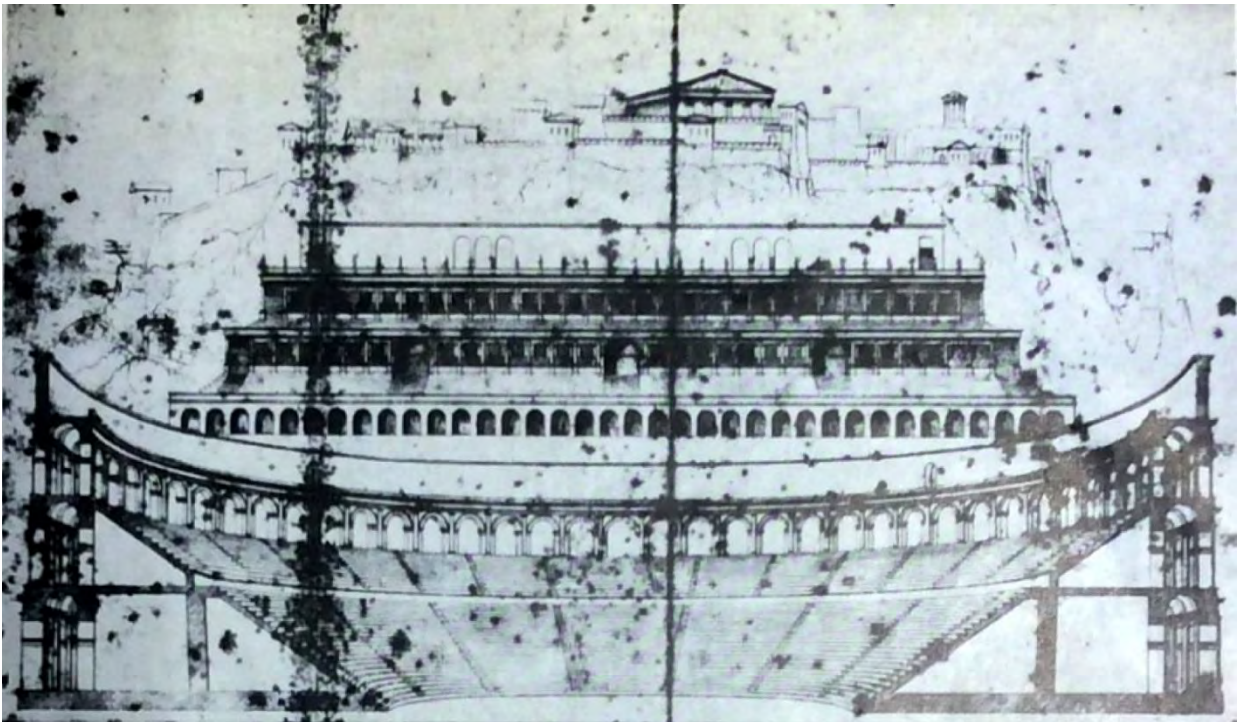


Fig. 2.9– E. Falkener, Ricostruzione dai disegni di Palladio, Caroto e Cristofali, [da “Il teatro romano di Verona” di Federico dal Forno, pag.8]

⁷ Dal Forno F., *Il teatro romano di Verona*, in *Vita Veronese*, anno 1961, Verona,

2.7 Ricostruzioni secondo le indicazioni di Andrea Monga

Nel secolo successivo Andrea Monga si distacca dalla tradizione e ipotizza una ricostruzione che fa stampare dalla “Premiata Litografia Penuti” di Verona.

Nel 1895 Ricci pubblica nella sua opera *Il teatro romano di Verona studiato sotto il rispetto storico e archeologico* in cui allega dei rilievi eseguiti seguendo le indicazioni di Andrea Monga.⁸

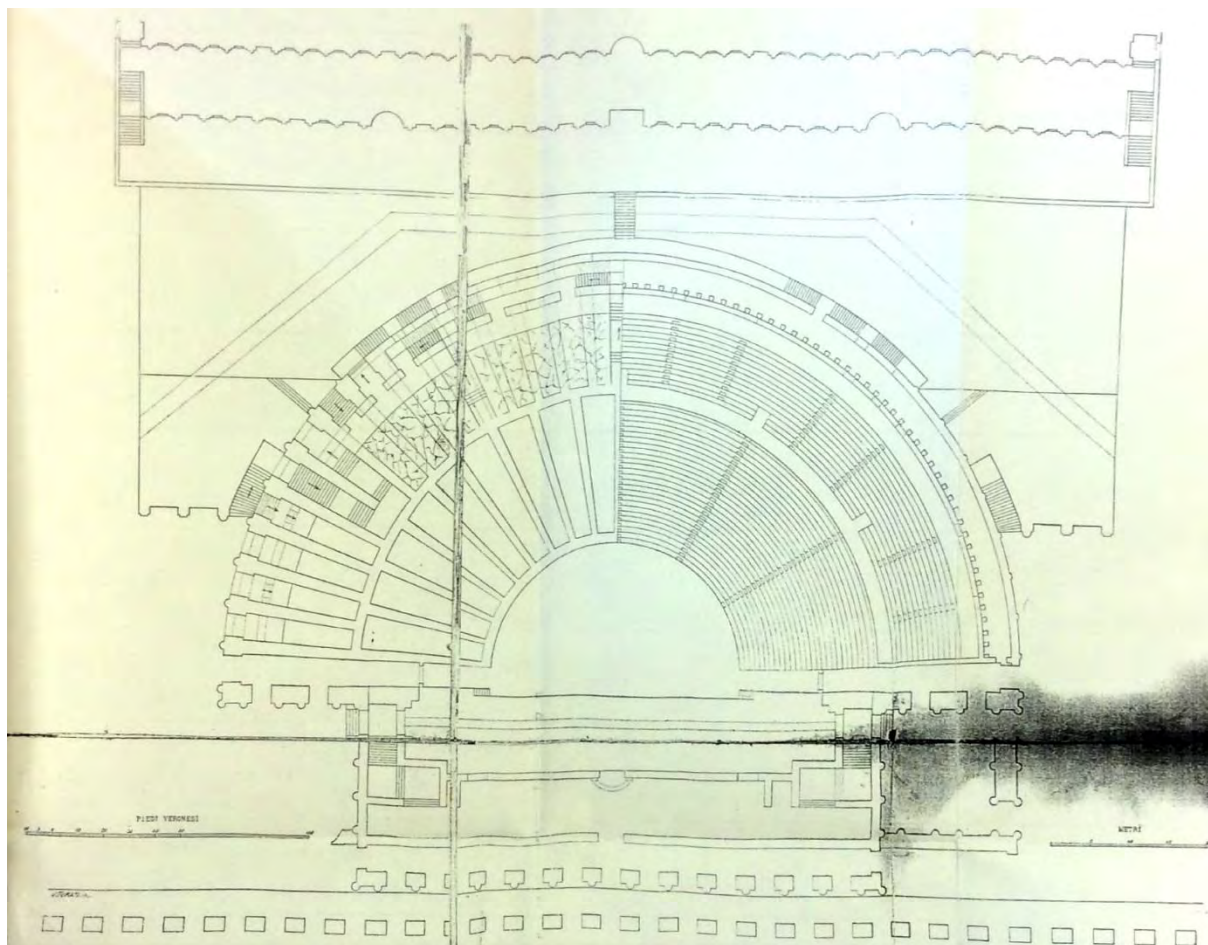


Fig. 2.10–Pianta di restauro del Teatro eseguita sotto la direzione di Andrea Monga, Serafino Ricci

La pianta si caratterizza per la divisione della cavea mediante una precinzione (corridoio circolare che separava ciascun ordine di gradini permettendo il libero passaggio del pubblico) in due meniani (ballatoi/ ripiani anulari) di altezza diseguale.

Monga colloca a livello della prima precinzione i vomitoria (ingressi laterali) e a livello della seconda grandi porte. Lo studioso rileva inoltre la presenza di un'intercapedine, per la prima volta riscontrata nelle documentazioni del teatro.

⁸ A.Monga, manoscritto 1800

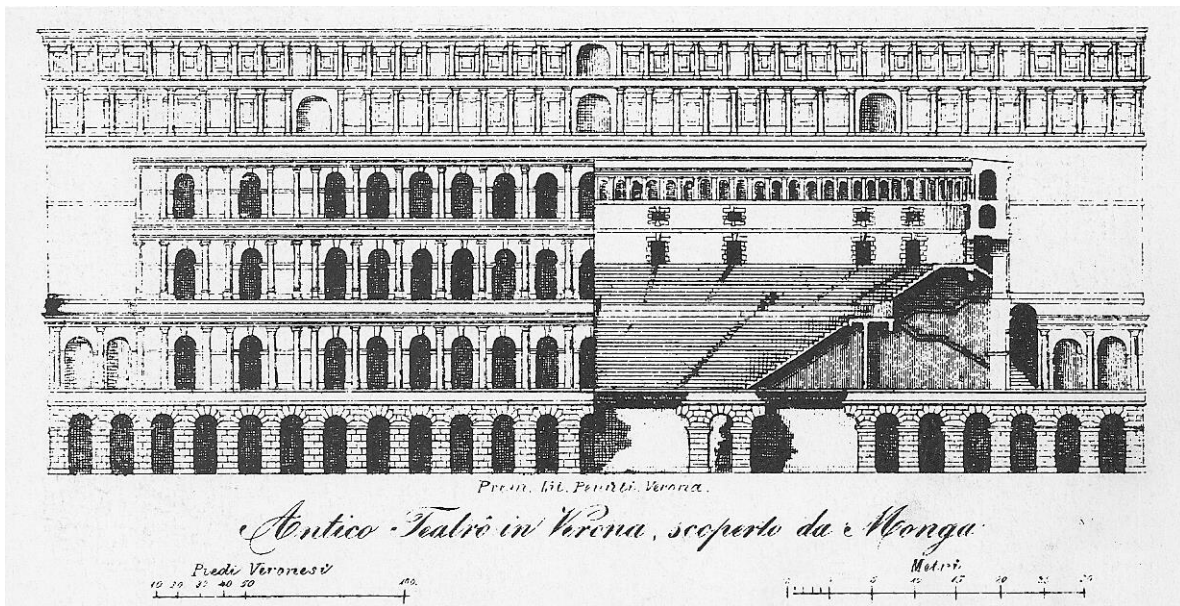


Fig. 2.11– Alzato di restauro del Teatro, con lo spaccato della cavea eseguita sotto la direzione di Andrea Monga, da “Il teatro romano di Verona studiato sotto il rispetto storico e archeologico”, 1895

L'alzato si caratterizza per la presenza di tre soli ordini di struttura omogenea e non, come da tradizione, un terzo ordine con cariatidi e un quarto a finestre rettangolari.

Il Monga, a differenza di tutti gli altri, immagina l'esistenza di tre gallerie sovrapposte.

Anch'egli, come il Caroto, sbaglia nel porre una galleria perpendicolarmente al di sotto dell'ambulacro, ma si discosta dagli altri nel mettere sul fronte di questa galleria soltanto alcune aperture in corrispondenza delle scalette. Monga ipotizza poi una seconda galleria o ambulacro, per la quale immagina poche aperture piane ad arco verso la cavea, quasi in funzione di grandi finestre. Al di sopra di queste gallerie Monga colloca una terza con prospetto ad archetti, che secondo lui è la galleria maggiore con la sua altezza di 4 metri.

Il Monga ha immaginato la sovrapposizione di tre gallerie, invece di due, per coprire la parete di tufo alzantesi 12 metri sopra il piano della seconda precinzione, la cui visione avrebbe alterato l'armonia compositiva dell'architettura del teatro. Il Caroto e il Palladio non ebbero coscienza di questa necessità. Forse in parte tale intuizione la ebbe pure il Falkener che, al di sopra delle due gallerie e prima della serie di terrazze, immagina una parete neutra a sviluppo rettilineo.

2.8 Jean Baptiste Guillaume

Jean Baptiste Guillaume fu uno scultore francese, che si formò alla scuola di Belle Arti. Fu pure uno scrittore, che si occupò principalmente di scultura e architettura. Egli realizza dei disegni in stretta collaborazione con Monga durante i cinque mesi di lavoro di scavo condotti fianco a fianco. Tali illustrazioni rivestono oggi una fondamentale importanza, dato che l'archivio di Monga, costituito da appunti, schizzi, rilievi, è andato in gran parte perduto. Guillaume ebbe completo accesso a questa documentazione e nel suo *Memoire* fornisce interessanti notizie su alcune scoperte archeologiche fatte nel teatro, acquisite direttamente da Andrea Monga e mancanti nella bibliografia posteriore.⁹

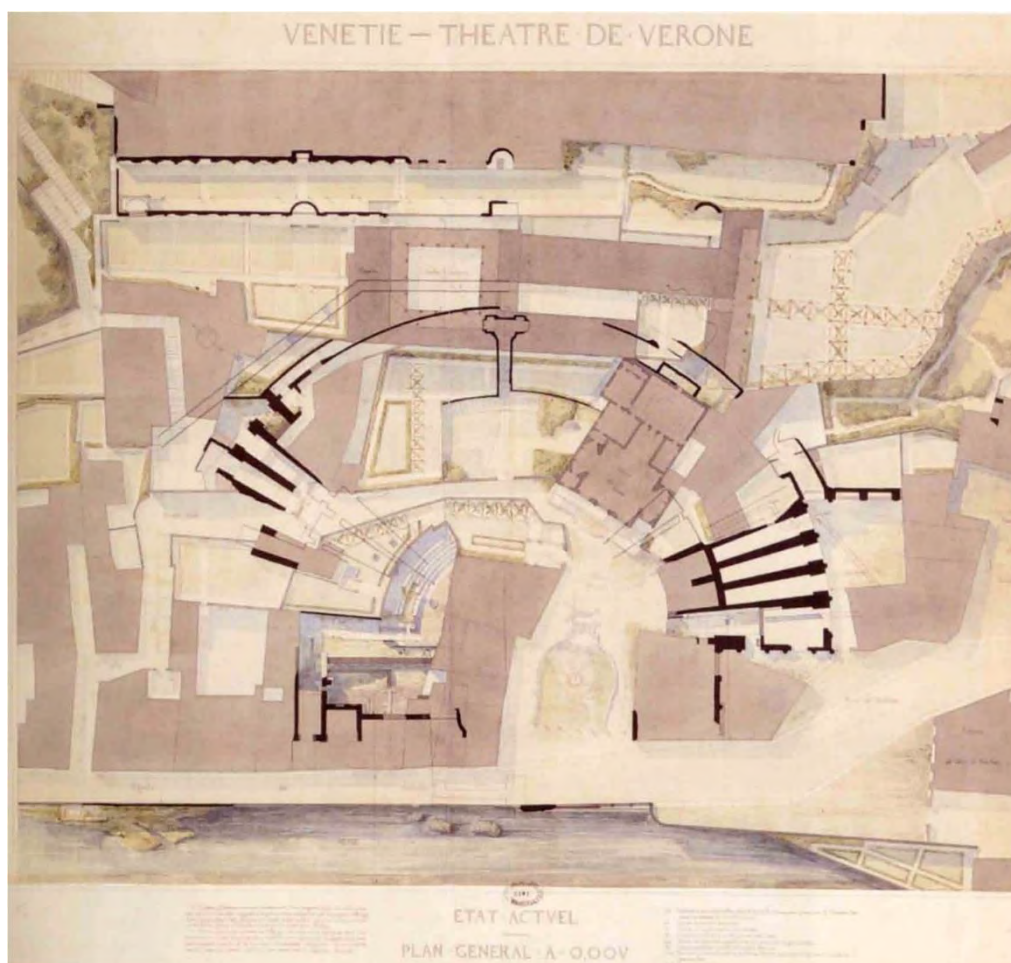


Fig. 2.12– Jean Baptiste, Disegno esposto n° 6, Teatro di Verona, stato attuale, pianta generale a 0,00V, Inchiostro nero, inchiostro rosso e acquerello su carta incollata su tela, Italia antiqua, pag.33

Il rilievo potrebbe essere la versione definitiva della *Mappa dei caseggiati a S. Libera*, realizzata da Guillaume il 15 settembre 1860, probabilmente senza l'ausilio di precedenti piante. Guillaume procedette con accuratezza al rilievo delle parti romane, particolarmente

⁹ Bolla M., *Il teatro romano di Verona*, in *Italia antiqua. Envois degli architetti francesi (1811-1950). Italia e area mediterranea*, catalogo della mostra (Parigi-Roma, 2002), Parigi 2002, pp. 26-40

difficile a causa della presenza delle costruzioni di età medievale e moderna e per il fatto che il Monga non volle eliminare i percorsi e le strade esistenti: nel 1860 erano agevolmente visitabili solo un breve tratto della cavea occidentale e parte degli scaloni laterali, oltre ai terrazzamenti superiori, sterrati dal Monga e adibiti a orti. La planimetria rappresenta quindi il primo tentativo di rilievo analitico dei resti del teatro dopo quello di Adriano Cristofali, edito nel 1749 che, per quanto prezioso, si rivela al confronto ben poco preciso. Il raffronto con il rilievo realizzato in seguito dall'Ufficio Tecnico Municipale documenta la precisione di Guillaume e il profitto che seppe trarre dalla collaborazione con Andrea Monga.

Nell'annotazione in basso Guillaume mostra di suffragare l'ipotesi che il tratto di fiume davanti al teatro fra i due ponti fosse adibito a naumachia. Il disegno mostra inoltre il *Capitolium* e l'acropoli sulla sommità del colle di S. Pietro. Guillaume mostra il sistema di scolo delle acque, la disposizione delle lastre pavimentali dell'*aditus* e la struttura della parte occidentale della scena, dove si nota traccia di una scaletta di accesso al palco (segnata anche dalla pianta del Monga). Nel disegno è anche evidenziata la presenza della grotta di S. Siro, della nicchia semicircolare nelle terrazze superiori, del muro di chiusura della seconda passeggiata e i muri di chiusura di entrambe le passeggiate a occidente.



Fig. 2.13– Jean Baptiste, *Disegno esposto n° 7, stato attuale, prospetto geometricale a 0,01, Inchiostro nero e acquerello su carta incollata su tela, Italia antiqua, pag.34-35*

Questo prospetto, di notevole suggestione paesaggistica, documenta lo stato della riva dell'Adige prima della sistemazione definitiva, realizzata negli anni 1891-93 con la

costruzione dei muraglioni per arginare le disastrose piene del fiume; in essi venne lasciato solo parzialmente in vista il muro romano di contenimento delle acque e di supporto della strada. Come ricorda nel *Memoire*, per evidenziare i resti romani, Guillaume non rappresentò nel prospetto gli edifici moderni affacciati sul fiume e inesistenti sulla cavea, a parte il convento di S. Gerolamo, sullo sfondo, e la chiesetta di S. Libera, prefigurando così, in modo curioso, la situazione della zona dopo l'acquisizione da parte del Comune di Verona nel 1904 e le successive estese demolizioni. Guillaume "cancellò" anche l'imponente mole di Castel S. Pietro, la caserma costruita dagli Austriaci sulla sommità del colle nel 1854.

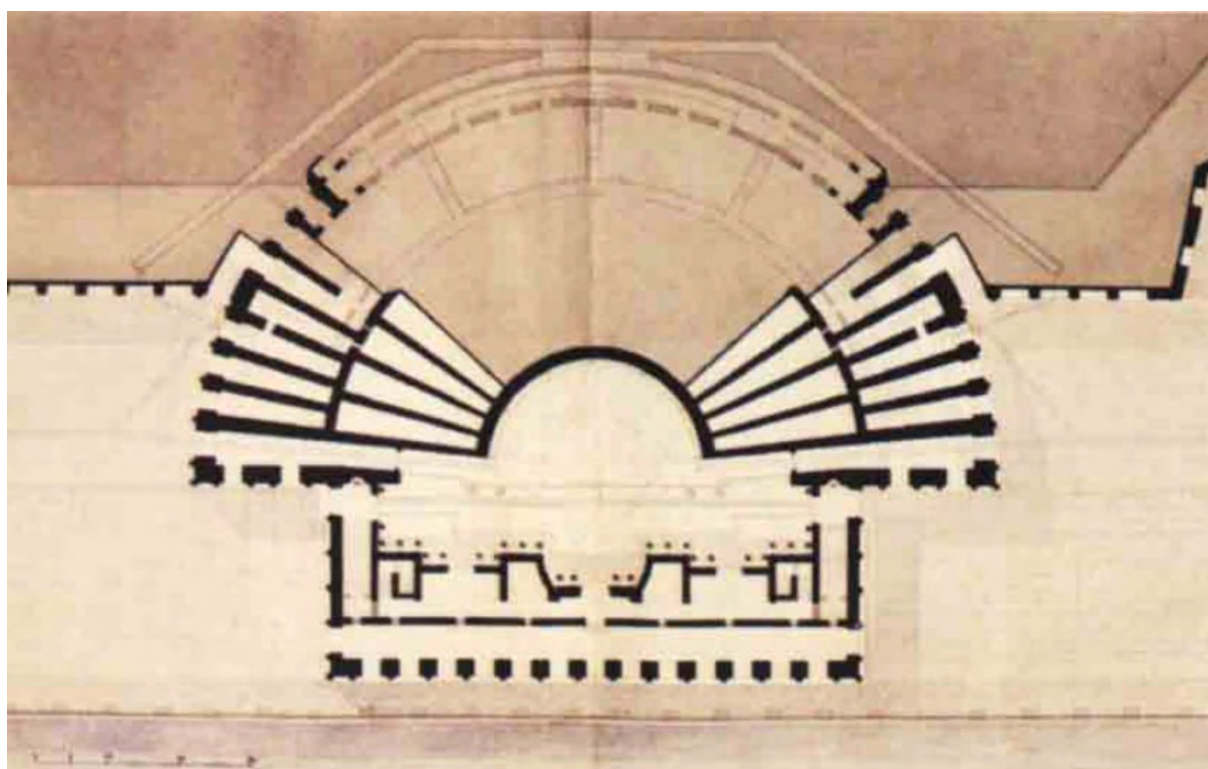


Fig. 2.14– Jean Baptiste, stato restituito, pianta del livello inferiore a 0,00 V, Inchiostro di China e acquerello su carta incollata su tela, *Italia antiqua*, pag.36

Nel capito terzo del *Memoire*, Guillaume chiarisce le motivazioni e la metodologia usate per la stesura della pianta di restituzione, affermando di essersi limitato alla trasposizione simmetrica rispetto a un asse mediano delle diverse parti dell'edificio venute in luce negli scavi di Monga. In realtà la planimetria proposta si discosta notevolmente da quella fatta eseguire dallo scavatore, in particolare nell'area dell'edificio scenico. La pianta di Guillaume è più aderente ai dati di scavo nella distribuzione delle tre porte della *scenae frons*, ispirata anche alle conoscenze allora disponibili su altri teatri; è invece solo ipotizzato l'andamento delle scalette per la salita al piano superiore della scena, diverso da quello proposto da

Monga. E' d'obbligo per l'architetto francese il raffronto fra la planimetria e le prescrizioni vitruviane, con l'iscrizione di quattro triangoli equilateri nell'orchestra.¹⁰

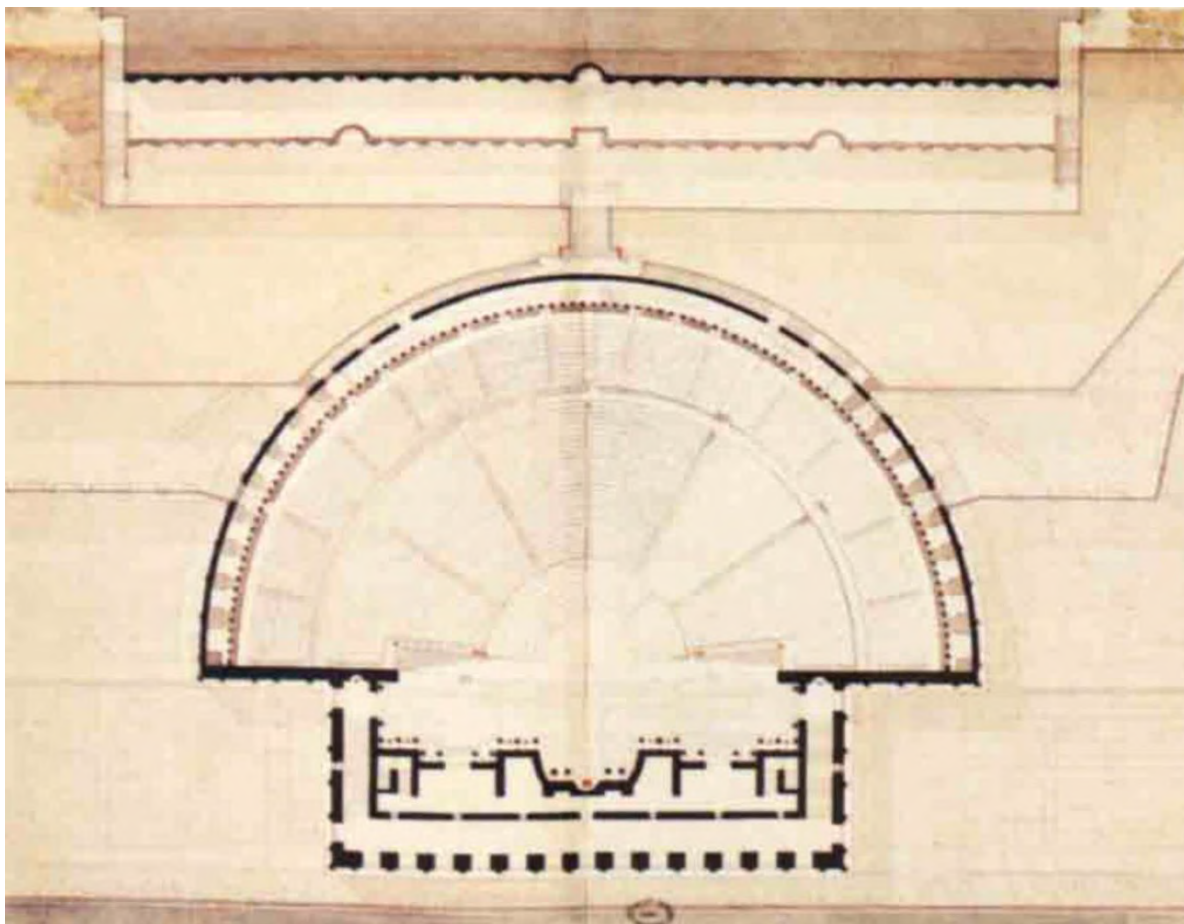


Fig. 2.15– Jean Baptiste, *stato restituito*, pianta del livello superiore a 0,00 V, Inchiostro di China e acquerello su carta incollata su tela, *Italia antiqua*, pag.36

La suddivisione del primo meniano della cavea in sei cunei mediante cinque *scalaria* è determinata dall'applicazione delle norme vitruviane proposta nella pianta precedente; l'esistenza e la lunghezza della scaletta mediana, situata in un'area non scavata da Monga e arbitrariamente ricostruita agli inizi del Novecento, non sono però certe.

Riguardo alla restituzione della parte superiore del complesso, costituita dalla cosiddetta grande terrazza e dalle due passeggiate rese famose dai disegni di Palladio, si riscontrano alcune imprecisioni: è troppo regolare l'andamento dei limiti della grande terrazza (sulla quale si impostò nel tardo Quattrocento il convento dei Gesuati) e troppo profondo l'inserimento in essa della cavea.

¹⁰ Bolla M., *Il teatro romano di Verona*, in *Italia antiqua. Envois degli architetti francesi (1811-1950). Italia e area mediterranea*, catalogo della mostra (Parigi-Roma, 2002), Parigi 2002, pp. 26-40

La ricostruzione della prima passeggiata, con un piano pavimentale della stessa larghezza della seconda (seppure su due livelli), sembra errata: in età romana la larghezza del piano doveva corrispondere grossomodo a quella attuale. La soluzione proposta da Guillaume deriva probabilmente dall'interpretazione di entrambe le terrazze superiori come veri luoghi di passeggio, mentre la prima era solo un prospetto architettonico di raccordo fra la grande terrazza e la passeggiata superiore. L'ipotesi di un raccordo tra le passeggiate mediante scalette laterali potrebbe in parte cogliere nel segno: nel rilievo di Cristofali (1749) è ben visibile, però oltre il limite occidentale delle passeggiate, una lunga scala che potrebbe riprodurre l'andamento di un percorso romano e costituire un segmento del gradua raffigurato dell'iconografia rateriana a ovest del teatro.

Il collegamento fra la sommità dell'edificio teatrale e le passeggiate superiori mediante un'ampia scala centrale è un'acuta intuizione di Guillaume; egli notò infatti all'interno del convento dei Gesuiti (sulla grande terrazza), proprio in corrispondenza dell'asse mediano del teatro, la presenza di un'ampia scala e ritenne che questa testimoniassse l'esistenza di un'analogia scalinata antica; tale soluzione architettonica rafforzerebbe fra l'altro le analogie fra il complesso veronese e il santuario della Fortuna di Palestrina.

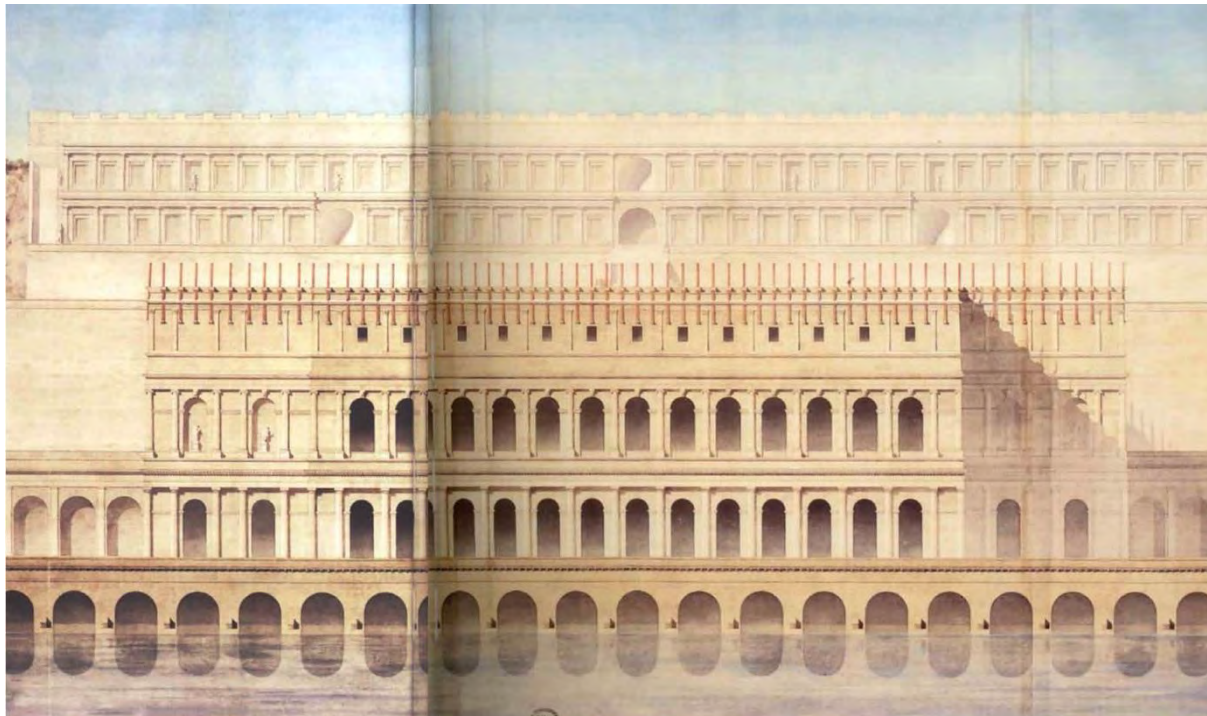


Fig. 2.16– Jean Baptiste, *Teatro di Verona, stato restituito, prospetto a 0,0*, inchiostro di china e acquerello su carta incollata su tela, *Italia antiqua*, pag. 36-37

Anche nella restituzione dell'alzato del teatro, Guillaume si svincola dalla proposta edita da Monga, in particolare nell'interpretazione del terzo ordine, in cui le lesene sovrastate da

capitelli a sofà affiancano non arcate, ma pareti con finestre quadrangolari; tale soluzione è già presente nelle ricostruzioni cinquecentesche del teatro veronese (come quarto ordine in Caroto e terzo in Palladio), dove è ritenuta forse derivata dal prospetto dell'anfiteatro di questa stessa città. Guillaume, sulla base del rinvenimento dei blocchi del tipo illustrato alla tavola 9, dota il terzo ordine di una serie di mensole per il posizionamento dei pali di sostegno del *velarium*.

Le merlature di coronamento del muro terminale, presso la sommità della collina, sono inserite per suggerire la presenza dell'«acropoli» cittadina e quindi di una cinta difensiva, secondo le opinioni diffuse all'epoca.

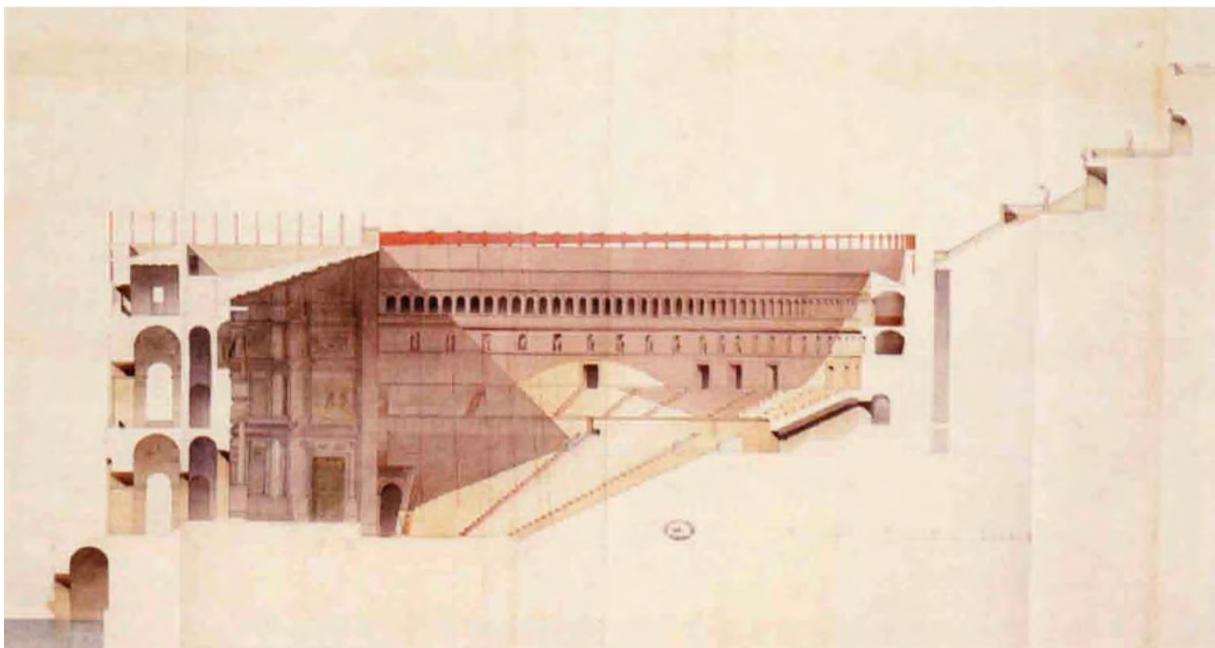


Fig. 2.17– Jean Baptiste, Teatro di Verona, stato restituito, sezione a 0,01, inchiostro di china e acquerello su carta incollata su tela, Italia antiqua, pag. 38

Per la ricostruzione dello spaccato del teatro, Guillaume si serve ampiamente delle indicazioni vitruviane, integrandole con i dati emersi dallo scavo. Per la copertura della scena si rifà a ipotesi già proposte per i teatri di Orange e Aspendos. La cura posta nella realizzazione del disegno è evidenziata dalla riproduzione degli effetti di policromia determinati dall'uso di marmi pregiati e di bronzo nel frontescena e dagli *scalaria* in calcare rosso veronese nella cavea. L'approfondito studio dei resti romani ancora presenti all'interno del convento dei Gesuiti conduce l'architetto all'esatto rilievo dell'ambulacro posto a coronamento della cavea e della grande galleria sovrastante, inoltre alla corretta collocazione, in corrispondenza appunto della galleria, della loggia ad arcate, corrispondente alla *porticus* in *summa cavea*.

Ricci, che ignorava il rilievo in esame, non comprese la situazione architettonica di questa zona del teatro, ipotizzando che la loggia fosse situata a livello della seconda precinzione. Nel 1912 le arcate restaurate vennero posizionate ad una quota errata a ovest del convento; il problema della loro esatta collocazione fu considerato insolubile, finché nel 1961 Franzoni giunse a intuire quanto, un secolo prima, era stato proposto e poi dimenticato.



Fig. 2.18– Jean Baptiste, Teatro di Verona, stato attuale, sezione generale a 0,00 V, inchiostro nero e acquerello su carta incollata su tela, *Italia antiqua*, pag. 38

E' qui raffigurato lo stato di fatto dei resti presenti sul colle di San Pietro, dal fiume, con il ponte Pietra in secondo piano, fino alla sommità, secondo una sezione composta passante a ovest dell'asse mediano del teatro. Il rilievo ha valore documentario; costituisce ad esempio la più antica "fotografia" dell'interno del chiostro del convento dei Gesuiti, ampiamente rimaneggiato nel corso dei restauri eseguiti negli anni Venti per l'apertura del Museo Archeologico.

Si notano, da sinistra a destra, i muri in blocchi di tufo dell'edificio scenico inglobati nelle case moderne sulla strada lungo l'Adige, i tagli della fossa scenica e dell'euripo, la porzione di cavea messa in luce negli scavi di Monga, la successione di case ed orti con sparsi resti di muri antichi fino all'alto edificio conventuale e alle due passeggiate superiori.¹¹

¹¹ Bolla M., *Il teatro romano di Verona*, in *Italia antiqua. Envois degli architetti francesi (1811-1950). Italia e area mediterranea*, catalogo della mostra (Parigi-Roma, 2002), Parigi 2002, pp. 26-40

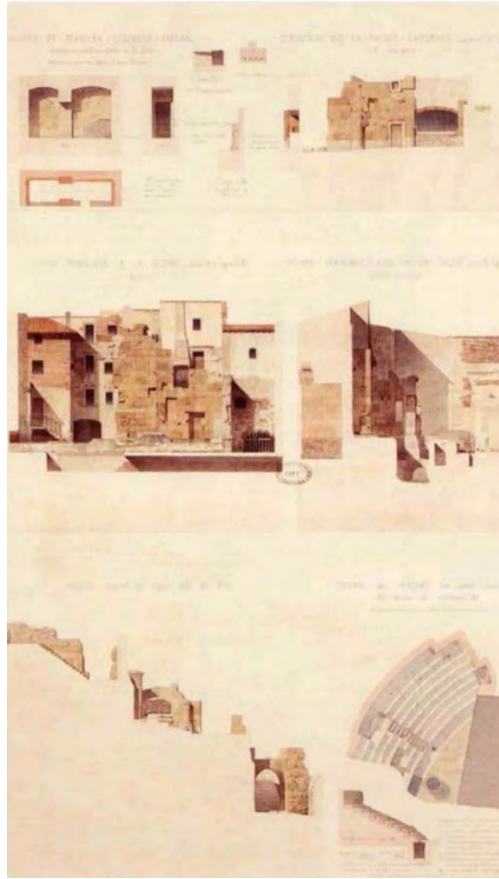


Fig. 2.19– Jean Baptiste, Teatro di Verona, stato attuale, sezioni parziali a 0,01, inchiostro nero e acquerello su carta incollata su tela, *Italia antiqua*, pag. 39

Guillaume offre qui una serie molto interessante di sezioni parziali dello stato di fatto rilevate nella cavea e nelle zone circostanti. Il alto a sinistra è la cosiddetta “grotta di S. Siro” cui si accede dal coro della chiesa dei SS. Siro e Libera, costruita sopra la cavea del teatro; la vera funzione della “grotta”, una scala di collegamento alla seconda precinzione, venne correttamente interpretata da Monga e Guillaume e poi dimenticata fino allo studio di Franzoni del 1961. In alto al centro è la struttura interpretata da Guillaume come latrina, rinvenuta nel quarto ambiente di sostruzione orientale a sud, e assente in tutti i successivi rilievi dell’edificio teatrale; più sotto, in sezione, è raffigurato il sistema di rivestimento in lastre della parete nord dell’*aditus* orientale, presso lo sbocco nell’orchestra. In alto a destra è la facciata esterna del parascenio orientale (fino all’*aditus* con il sottostante canale), visibile ancor oggi sul fianco del palazzetto d’ingresso al teatro. Al centro è una veduta dei resti della scenae frons e la sezione dell’edificio scenico con la fossa relativa.

In basso a sinistra c’è la sezione dello scalone occidentale di accesso alla summa cavea (l’arcata mediana è stata ricostruita nel 1914). Infine in basso a destra Guillaume pone pianta e sezione della porzione occidentale della cavea scavata da Monga; vi si notano una delle

scalette in calcare rosso veronese, in contrasto cromatico con la pietra bianca usata per le gradinate, e le lastre di copertura dell'euripo con un foro per la raccolta delle acque ai piedi della scaletta stessa; il bordo delle lastre dell'euripo verso l'orchestra è ribassato e presenta fori per il fissaggio delle lastre del *balteus*. Il pozzo rappresentato nella pianta è posteriore all'età romana.¹²

2.9 Vedute pittoriche: Angelo dall'Oca Bianca

Nel 1884 Angelo dall'Oca Bianca dipinge *Ora pro ea*, una tela di grandi dimensioni approdata alla Galleria di Arte Moderna di Milano nel 1917, nella quale delle figure in prevalenza di donne vengono colte di profilo o di spalle mentre avanzano verso la Chiesa di Santa Libera. Il dipinto alterna elementi di realtà ed altri di invenzione: la chiesa conserva il suo protiro e l'oculo in alto, ma, priva dei due finestroni della facciata, viene snellita, con la scalinata abbreviata e l'aggiunta di un campanile inesistente; gli spazi circostanti vengono poi decisamente modificati. Tuttavia l'opera documenta almeno in parte lo stato della piazzetta prima degli scavi di inizio secolo, che riportando in luce i resti del teatro romano avrebbero abbattuto la gradinata d'accesso.



Fig. 2.25– Angelo dall'Oca Bianca, *Ora pro ea*, 1884, olio su tela, Milano, Civica galleria d'arte moderna

Dopo il 1914 la risistemazione dell'area archeologica nei pressi del teatro romano, e in seguito alcuni episodi di ristrutturazione e recupero di aree attigue, catalizzano l'interesse dei pittori, testimoni attraverso le loro pitture delle continue trasformazioni nel corso del secolo a Verona. Nel 1923 Guido Trentini dedica un dipinto al Teatro Romano. Lo scorcio del teatro era già stato utilizzato dall'artista nel 1916 nell'opera *Il Teatro Romano di Verona* sotto le

¹² Bolla M., *Il teatro romano di Verona*, in *Italia antiqua. Envois degli architetti francesi (1811-1950). Italia e area mediterranea*, catalogo della mostra (Parigi-Roma, 2002), Parigi 2002, pp. 26-40

nevi. La raffigurazione mette in secondo piano la cavea, ponendo l'attenzione sull'antica chiesetta dei SS. Siro e Libera, risparmiata durante le demolizioni atte a recuperare il teatro, a testimonianza della storia del monumento, del suo decadimento e della sua trasformazione.



Fig. 2.26– Guido Trentini, *Teatro Romano*, 1923, olio su cartone, Verona, collezione privata

2.10 Serafino Ricci

Nella sua opera *Il teatro romano di Verona studiato sotto il rispetto storico e archeologico* del 1895 Ricci allega una planimetria di grande interesse per lo studio del teatro.

Si tratta di un rilievo planimetrico che mostra la cavea con le abitazioni e gli edifici religiosi su di essa costruiti.

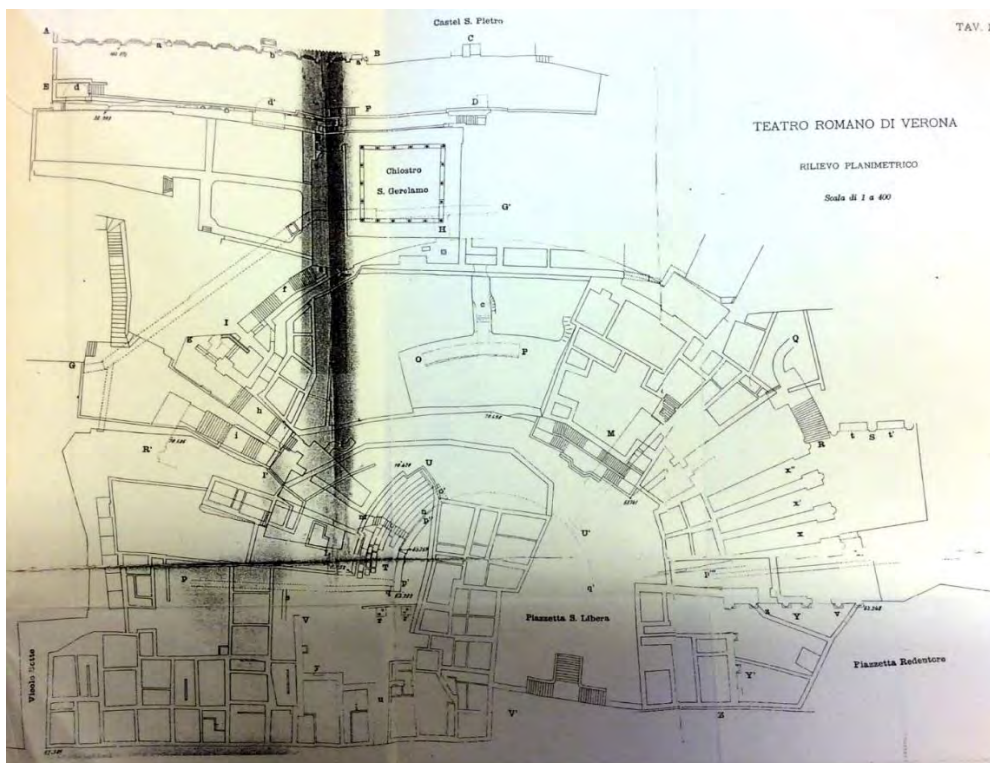


Fig. 2.20– Serafino Ricci, *planimetria del teatro romano*, tratta da “*Il teatro romano studiato sotto il rispetto storico e archeologico*”, 1895



Fig. 2.21– Rielaborazione della pianta del teatro romano secondo le indicazioni del Ricci con le fasi costruttive degli edifici presenti. In giallo si sono indicati gli edifici e le terrazze che verranno in seguito demolite, in azzurro la chiesa costruita nel 1517 d.C. e in verde la porzione di teatro che emergeva in mezzo alle costruzioni.

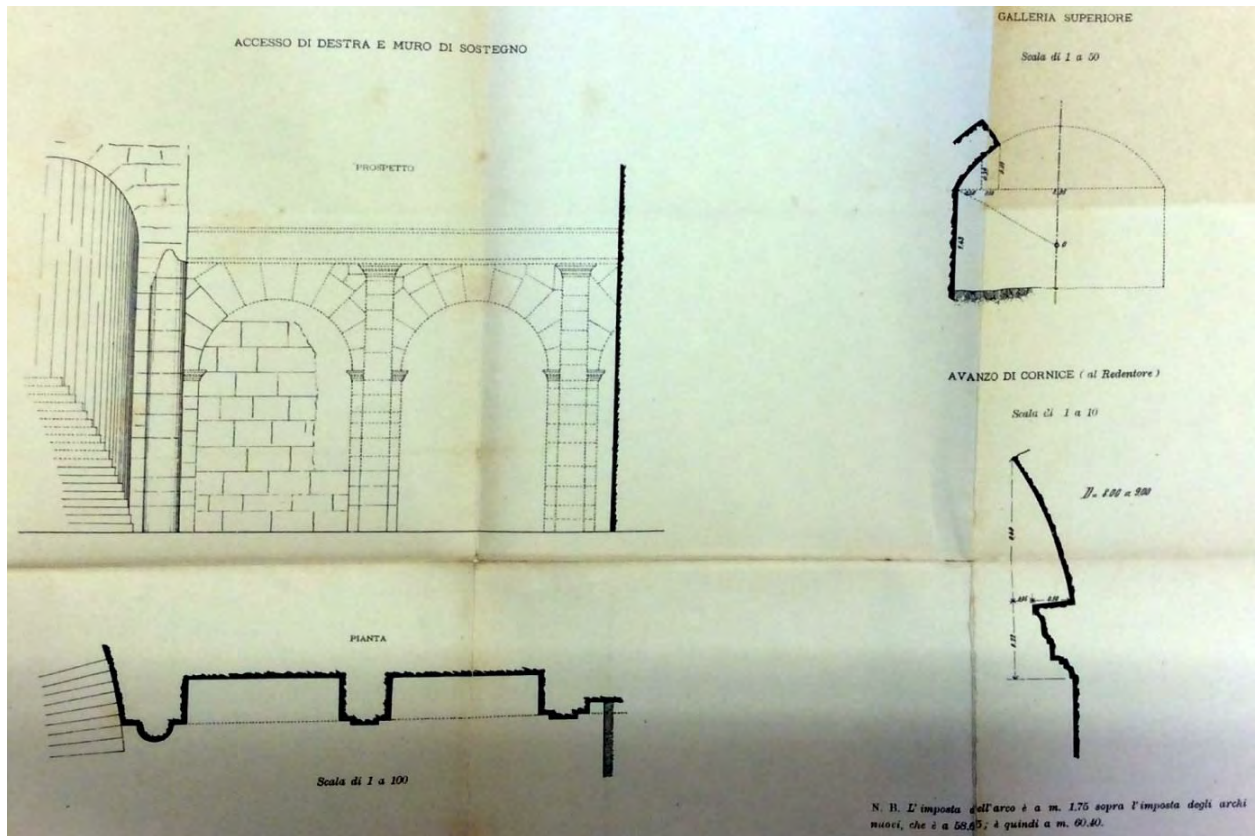


Fig. 2.22– Dettagli dell'ingresso, da "Il teatro romano di Verona studiato sotto il rispetto storico e archeologico", 1895

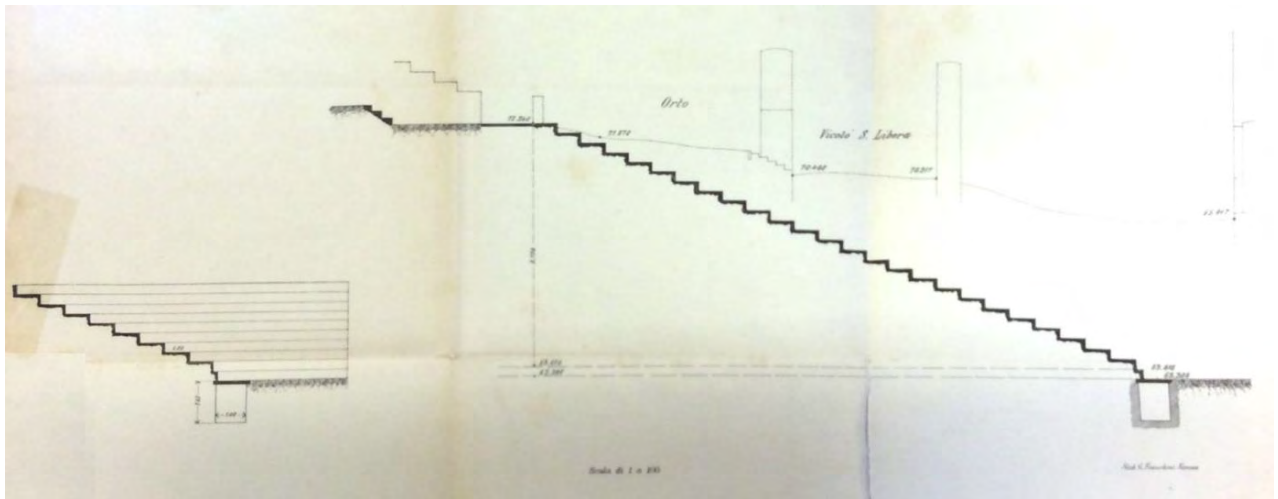


Fig. 2.23– Sezione della cavea, da "Il teatro romano di Verona studiato sotto il rispetto storico e archeologico", 1895

2.11 I rilievi di L. Benvegnù

La pianta elaborata dall'architetto L. Benvegnù, edita nel 1980, presenta rispetto alle altre la fossa scenica e la cripta che sottopassa il parascenio, rese note dagli scavi del 1970-71.

In alto a sinistra è raffigurato il Ninfeo.

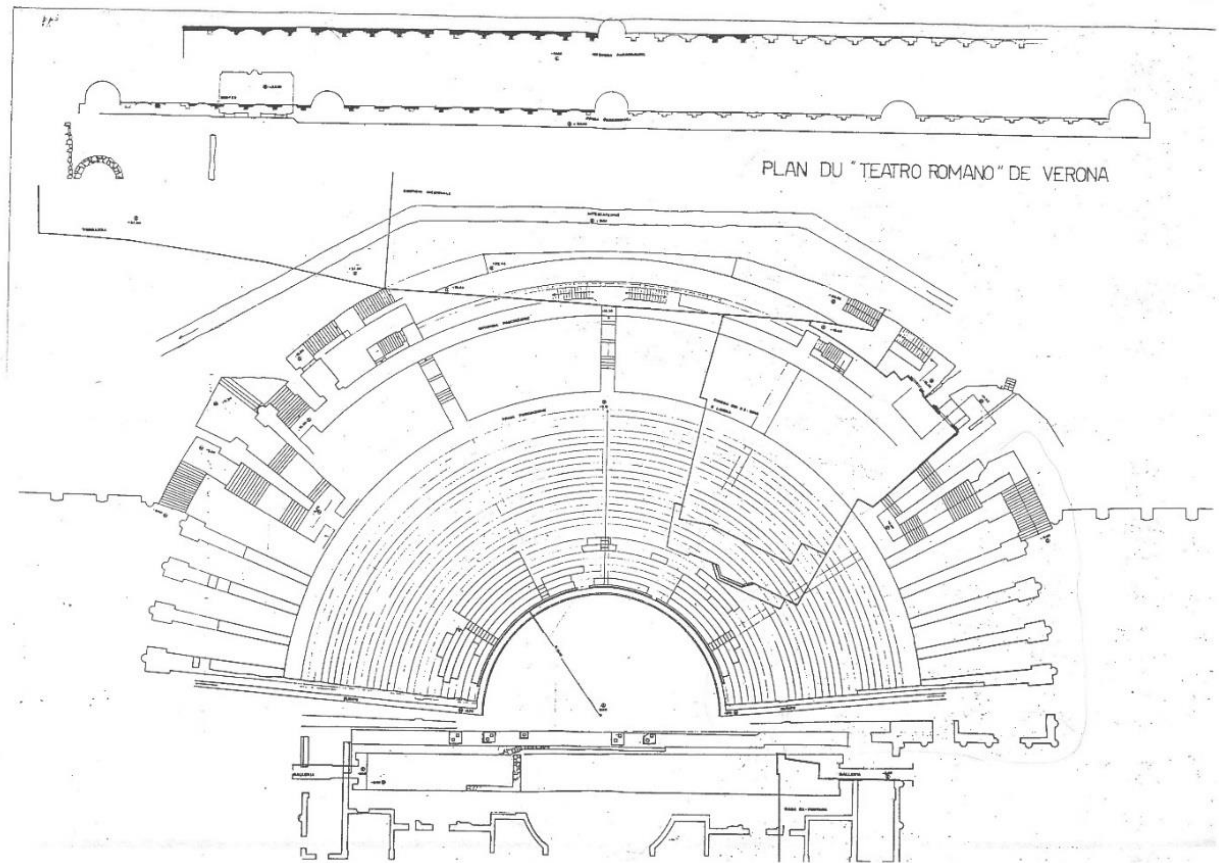


Fig.2.24—L. Benvegnù, Ricomposizione della pianta del teatro fino alla seconda passeggiata, dopo gli ultimi scavi nella fossa scenica, 1980

2.12 Sintesi delle fasi storiche del Teatro Romano

Sulla base della documentazione disponibile si propongono alcune ricostruzioni tridimensionali delle principali fasi storiche del Teatro Romano a Verona.

1) Teatro al termine della costruzione (età augustea)

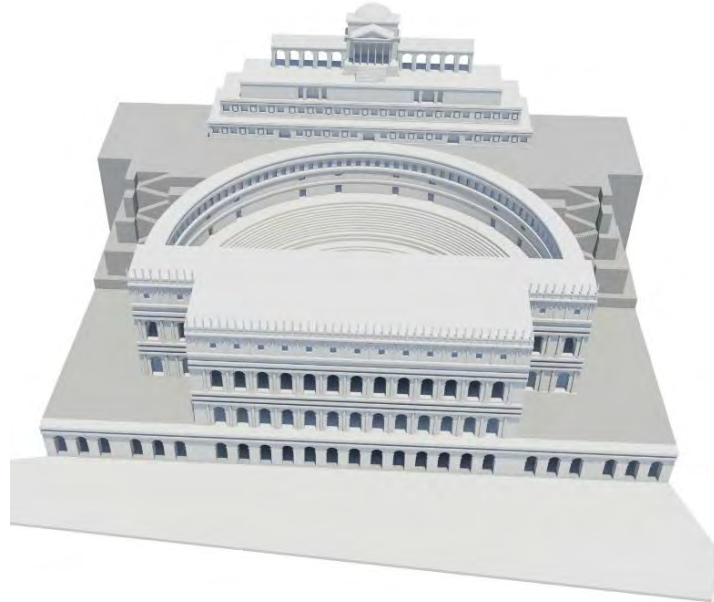


Fig. 2.27– Ricostruzione del teatro originario mediante piante, sezioni e prospetti storici. Il teatro si estendeva dalla cima del colle (dove era collocato un tempio) fino alla riva dell'Adige.

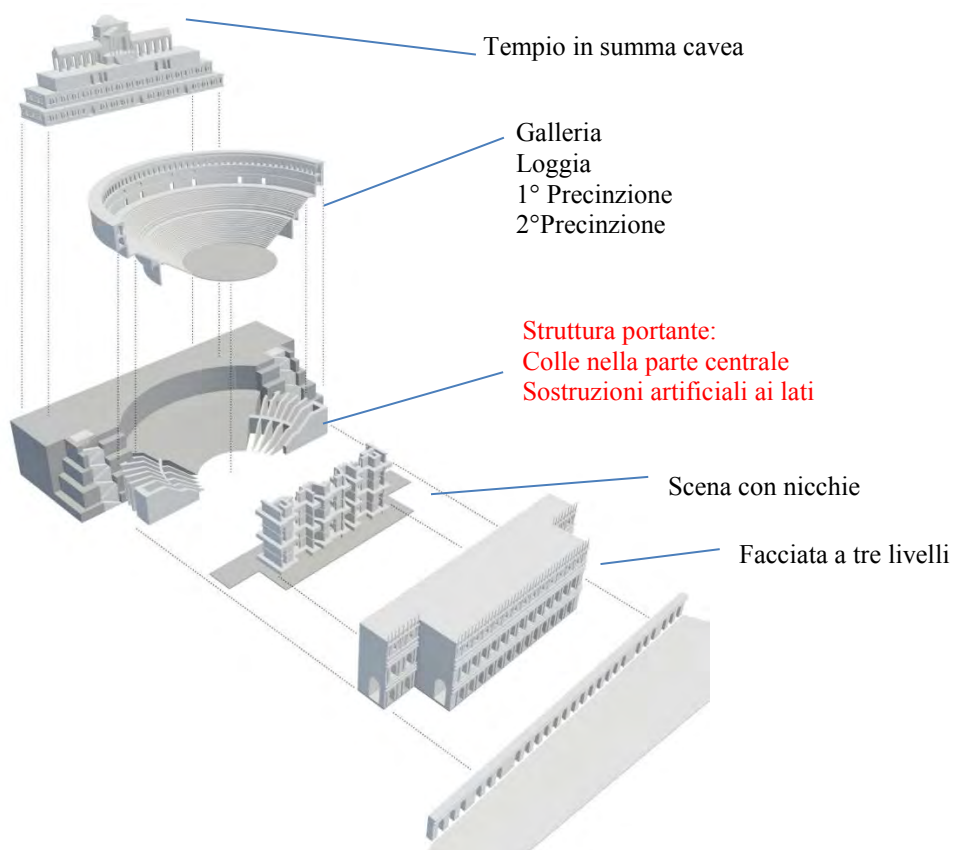


Fig. 2.28– Esploso del teatro originario: è evidente la struttura portante della cavea costituita dalle sostruzioni artificiali e dal colle nella parte centrale.

La ricostruzione del Teatro originario in figura 2.27 è stata realizzata seguendo le indicazioni presenti nei disegni di alcuni storici, in particolare di Monga, Guillaume e Palladio. La facciata è stata modellata in conformità alla restituzione grafica di Jean Baptiste Guillaume, che lavorò a fianco di Monga nel periodo degli scavi e che, quindi, aveva avuto l'opportunità di studiarne i frammenti riscoperti. Guillaume si discosta dalla proposta di Monga nell'interpretazione del terzo ordine, in cui pone una serie di finestre quadrangolari. Questa soluzione, già presente in ricostruzioni cinquecentesche, è derivata dal prospetto dell'Arena di Verona.

Si è, quindi, optato per questa ipotesi perché il suo autore aveva direttamente partecipato alla riscoperta del teatro e perché tale raffigurazione è legata ad un altro monumento fondamentale e quasi contemporaneo al teatro della città di Verona.

L'interno del teatro è stato creato sulla base dell'alzato di Monga, il quale immagina l'esistenza di tre gallerie sovrapposte. Il Monga ha immaginato la sovrapposizione di tre gallerie, invece di due, per coprire la parete di tufo alzantesi 12 metri sopra il piano della seconda precinzione, la cui visione avrebbe alterato l'armonia compositiva dell'architettura del teatro. Si è quindi seguita la raffigurazione di Monga poiché egli, diversamente da altri studiosi come Caroto e Palladio, ha avuto coscienza di questa necessità.

Infine il teatro è stato coronato da un tempio in sommità, presente nei disegni di Palladio e testimoniato dal ritrovamento di tracce del tempietto durante lo scavo per la caserma austriaca

2) *Crolli-alluvioni-incendi-terremoti*

3) *Costruzione al di sopra del teatro di case (data non pervenuta), della Chiesa SS.Siro e Libera (X secolo) e del Convento dei Gesuati.*

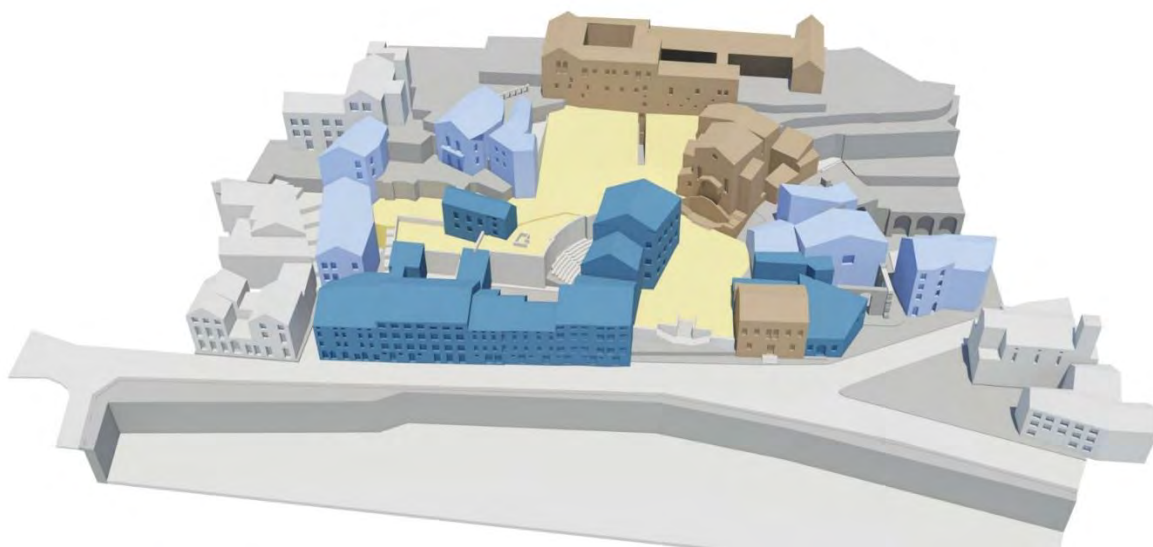


Fig. 2.29– Ricostruzione di come si presentava il teatro dopo la costruzione di case al di sopra di esso: in blu le case modellate seguendo la pianta del Ricci e le foto storiche, in celeste le case ipotizzate ma non ben visibili dalle foto e in marrone gli edifici che insistono tuttora sul Teatro di Verona, in giallo le terrazze demolite.

4) Nel 1936 tutte le case e le terrazze sono demolite (ad eccezione della Chiesa, di casa Fontana e dell'ambulacro)

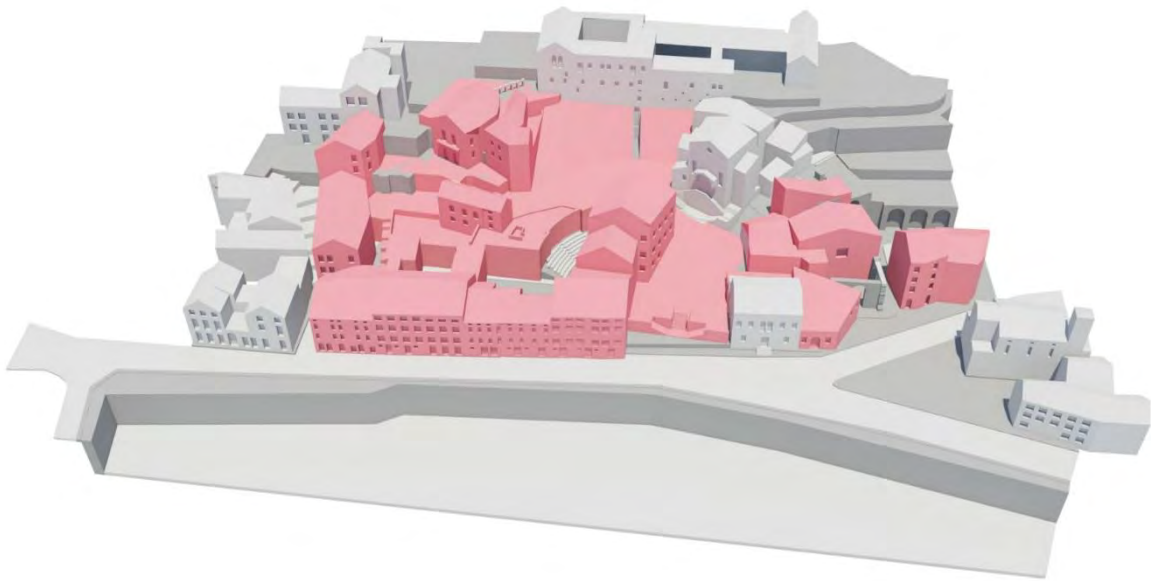


Fig. 2.30– In rosso sono indicate le case e le terrazze che sono state demolite, restituendo il teatro originario

Successivamente, come mostrano le figure 2.29-2.30 è stata modellata la situazione del Teatro Romano di Verona quando cadde in rovina e su di esso furono costruite case ed edifici religiosi (Figura 2.29). La ricostruzione non è stata immediata poiché si è reso necessario un confronto tra varie fonti, in particolare la pianta edita dal Ricci e le foto storiche. Infatti alcune case presenti nelle foto scattate durante la demolizione delle stesse non erano evidenziate nella pianta del Ricci del 1895 come ad esempio le abitazioni costruite tra i setti ad est e ovest. Si è pure tentato di ricostruire temporalmente la costruzione e demolizione delle case, ma purtroppo non è stato possibile perché i documenti di archivio risultavano incompleti. Infatti in essi era indicata la demolizione di certe case insistenti sul teatro con relativo numero civico, ma non vi era alcuna planimetria allegata che ne consentisse l'identificazione. Si sa solo con certezza che nel 1936 tutte le case risultavano crollate o demolite, fatta eccezione della Chiesa di SS.Siro, Casa Fontana e il Museo Archeologico.

5) *Stato attuale*

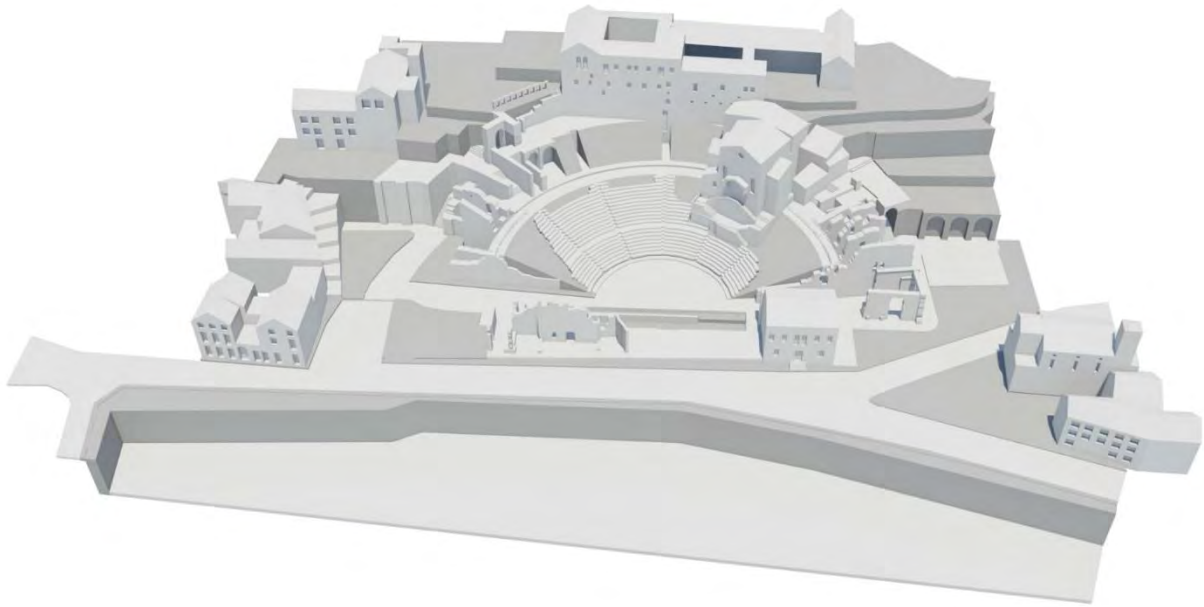


Fig. 2.31– Stato attuale del teatro: della struttura originaria rimane una piccola porzione di scena e parte delle sostruzioni che costituiscono la struttura portante della cavea.

Infine è stato modellato lo stato attuale del teatro (Figura 2.31) ottenuto mediante accurato rilievo geometrico. Esso mostra che del teatro originario è presente solo una porzione limitata di scena e dei setti che fungevano da struttura portante.

ARCHITETTURA DEL TEATRO ROMANO: PRINCIPI COSTRUTTIVI E CONFRONTI

3.1 Le norme vitruviane

Per quanto riguarda la costruzione dell'edificio teatrale antico di fondamentale importanza è il trattato di Vitruvio.

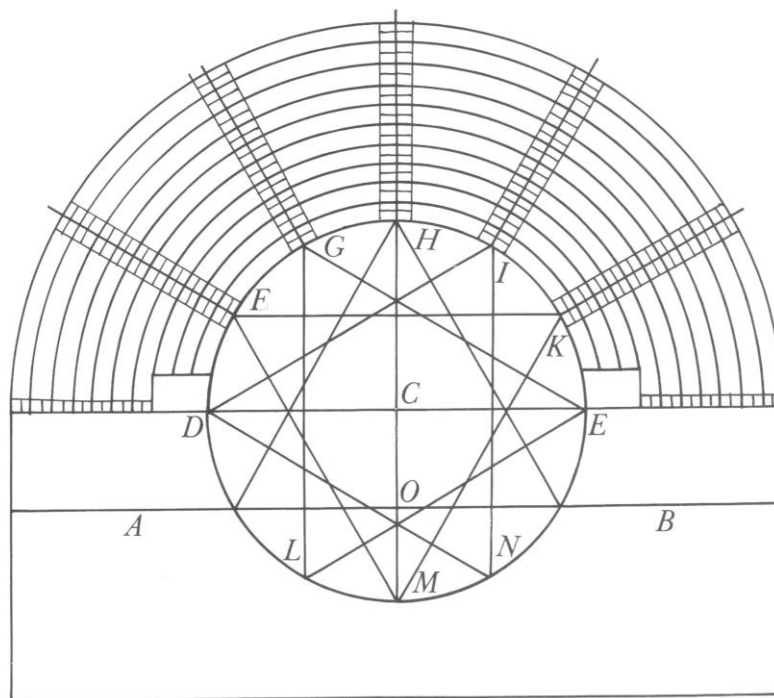


Fig. 3.1 – Teatro latino secondo Vitruvio, V, 6, da Frezouls

L'architetto romano nel *De Architectura*, approfondendo le caratteristiche proprie del teatro che interessa questa tesi, cioè il teatro romano, Vitruvio greco e del teatro romano, indica per ciascuno di essi uno schema geometrico preciso, che sta alla base dei due tipi architettonici.

In particolare all'interno del quinto libro dedica i paragrafi dal III al X proprio alla descrizione delle caratteristiche fondamentali di un teatro. Per l'argomento ne determina in questo modo la pianta, fornendo indicazioni in merito al tracciamento geometrico della forma.

In primo luogo si traccia la circonferenza dell'orchestra e si inscrivono in essa quattro triangoli equilateri, con i vertici egualmente distanti tra loro e determinanti pertanto con i vertici stessi un dodecagono regolare. La base AB di uno dei triangoli stabilisce la posizione della frontescena. Una linea parallela a questa, passante per il centro della circonferenza, determina la separazione dell'orchestra dal pulpito del proscenio. I vertici dei triangoli, posti dalla parte della cavea rispetto al diametro, coincidono con le scalette che delimitano i cunei della cavea. Gli altri vertici indicano invece la posizione delle porte che danno sulla scena. Infatti M segna la porta del *postscaenium* corrispondente alla *regia*, mentre i lati GL e IN passano attraverso le porte laterali. Secondo questo schema gli *aditus maximi* si trovano dalla parte della cavea rispetto al diametro dell'orchestra. Vitruvio aggiunge poi indicazioni relative ai principali elementi del tracciato e alle loro reciproche proporzioni.

Secondo Vitruvio quindi la scena deve essere lunga il doppio del diametro dell'orchestra e il *pulpitum* non può essere più alto di cinque piedi “affinchè quelli che siedono nell'orchestra possano vedere tutti i movimenti degli attori”¹. La cavea dev'essere disposta in modo che “una corda tirata dall'infimo al sommo gradino tocchi gli spigoli di tutti i gradini”² e la sua altezza deve coincidere con quella della scena. In questo modo si possono assicurare non solo soddisfacenti condizioni di visibilità ma anche una buona acustica, senza fenomeni di dispersione o riflessione del suono che impediscano alla voce di giungere chiara e distinta fino ai sedili più alti. Consiglia inoltre di disporre “dietro la scena portici e colonne affinché, se lo spettacolo è interrotto da un acquazzone il popolo possa ricoverarsi e anche perché i coreghi abbiano spazio per ordinare i cori”³.

La descrizione data da Vitruvio, geometricamente rigorosa e completa riguardo ai vari aspetti funzionali del teatro, ha fatto sì che per lungo tempo gli studiosi ne siano rimasti, per così

¹ De Arch. V, 6.2 “*Et eius pulpiti altitudo sit ne plus pedum quinque, uti, qui in orchestra sederint, spectare possint omnium agentium gestus*”. (Ed. S. Ferri, Roma 1960)

² De Arch. V, 3.4 “*Ita est gubernandum uti, linea cum ad imum gradum et ad summum extenta fuerit, omnia cacumina graduum angulosque tangat: ita vox non impediatur*”.

³ De Arch. V, 9.1 “*Post scaenam porticus sunt constituendae, uti, cum imbres repentini ludos interpellaverint, habeat populus quo se recipiat ex theatro, choragiaeque laxamentum habeant ad comparandum*”.

dire, abbagliati, ricercando, talora anche a forza, precise corrispondenze vitruviane con gli edifici di volta in volta considerati.

Così facendo, si è ammesso che nel teatro di Vitruvio si trovi riflessa la pratica architettonica a lui contemporanea o immediatamente precedente e d'altra parte che le sue indicazioni siano divenute un modello per gli edifici teatrali costruiti in seguito⁴. Tale errata valutazione ha potuto facilmente affermarsi perché fino all'inizio del XX secolo molti edifici teatrali erano ancora poco conosciuti ed anche perché Vitruvio fu l'ispiratore del Rinascimento e del classicismo europeo, per quanto riguarda l'architettura teatrale. In realtà Vitruvio stesso (*De Arch.* V, 7) afferma esplicitamente che “queste regole simmetriche non valgono per tutti i teatri, ma occorre che l'architetto giudichi con quali proporzioni applicare le misurazioni e adattarvi la natura del luogo o la grandezza dell'edificio”. Inoltre, se le ragioni legate all'uso lo richiedono, “non sarà proibito aumentare o diminuire un poco le misure, purché ciò non sia fatto avventatamente ma con avvedutezza”⁵. Effettivamente, ad un esame attento dei dati forniti dai resti archeologici, non può oggi sfuggire che buona parte degli edifici teatrali a noi noti si discosta, più o meno ampiamente, dalle norme vitruviane. Ed è proprio a queste differenze che si è rivolta l'attenzione di alcuni studi recenti, che giungono a mettere in discussione la stessa validità del “canone” vitruviano. La distinzione fatta da Vitruvio tra teatro greco e teatro romano, basata sull'inserzione nella circonferenza dell'orchestra di tre quadrati nel primo caso e di quattro triangoli equilateri nel secondo, può essere considerata discutibile anche da un punto di vista esclusivamente geometrico e razionale: infatti in entrambi i casi si tratta di inserire un dodecagono regolare all'interno di una circonferenza. Ma ancor più rilevante è il riconoscimento che la realtà storica e archeologica è spesso in contrasto con le norme vitruviane: in molti teatri greci, per esempio quello di Epidauro, Corinto e Argo (costruiti nel corso del IV sec. a.C.) si trova infatti una scala al centro della cavea oppure in ambiente romano di età imperiale di tende a variare il numero dei cunei che, anziché sei, sono quattro a Minturno, Vaison, Lione, Orange, due a Dugga e addirittura dieci a Bosra.

⁴ Frezouls E., *Aspects de l'histoire architecturale du theatre romain*, in *Aufstieg du Niedergang*, II, 12, 1 Berlin 1982, pp. 343-441

⁵ *De Arch.* V, 6.7 “*Nec tamen in omnibus theatris symmetriae ad omnes rationes et effectus possunt respondere, sed oportet architectum animadvertere, quibus proportionibus necesse sit sequi symmetriam et quibus ad loci naturam aut magnitudinem operis temperari. ...Paulum demere aut adicere, dum id ne nimium improbe fiat sed cum sensu, non erit alienum*”.

Approfondendo questa analisi si giunge ad osservare che “un teatro costruito, nell’insieme dei suoi elementi significativi, seguendo i rapporti vitruviani è un’astrazione che non si incontra in nessun caso in Italia”. Vitruvio si sarebbe infatti ispirato ai trattati ellenistici, riprendendo da questi l’esigenza di porre alla base di ogni edificio una struttura geometrica razionale, senza accorgersi però del profondo mutamento che la concezione stessa dell’edificio teatrale aveva ormai subito.

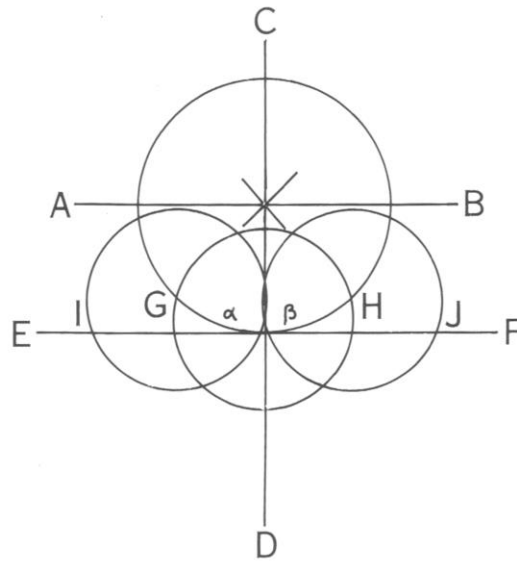


Fig. 3.2 – Ipotesi di schema proporzionale per la ricostruzione del fronte scena, da Small

Esaminando altri teatri si possono mettere in evidenza gli aspetti che coincidono con le norme vitruviane e quelli che invece se ne discostano. Tra questi ultimi due, appaiono particolarmente significativi: gli *aditus maximi* si trovano dalla parte della scena rispetto al diametro dell’orchestra e questo comporta uno spostamento del fronte scena che viene addirittura a trovarsi esterno alla circonferenza dell’orchestra. A questo va aggiunto che anche le porte *hospitales* tendono a distanziarsi maggiormente dalla regia, rispetto alle indicazioni vitruviane. Sulla base di queste considerazioni lo Small⁶ ha proposto che, accanto allo schema vitruviano, dovesse esistere un altro che cerca di ricostruire con lo schema seguente [Fig.3.2]. Traccia anche lui innanzi tutto la circonferenza dell’orchestra. In corrispondenza dei punti alfa e beta di essa, pone le basi delle colonne che fiancheggiano la *regia*. Traccia poi una seconda circonferenza, il cui centro è posto lungo la linea perpendicolare al diametro dell’orchestra e passante per il centro di questa: essa individua la *regia*⁷. Viene infine determinata la posizione delle porte *hospitales*: si disegnano due circonferenze, con il centro

⁶ Small D.B, *Studies in roman theater*, in American journal of archeology, 87, 1983, pp.55-68

⁷ Ed è ancora incerto quale sia il criterio che regola la lunghezza del raggio di questa circonferenza e quindi l’ampiezza della nicchia.

posto nel punto di intersezione tra la circonferenza della nicchia centrale e quella dell'orchestra. Esse possono avere il raggio uguale all'orchestra oppure alla regia: sembra probabile che quando la regia è vicina alla metà del diametro dell'orchestra, gli architetti usassero il modulo dell'orchestra per evitare che le porte *hospitales* fossero troppo vicine. Esse infatti risultano dalle intersezioni di queste circonferenze con la linea che corre tangente alla circonferenza dell'orchestra, parallelamente al suo diametro e al fronte scena con cui può coincidere. Questo schema, valido soprattutto per i teatri che presentano nel fronte scena la nicchia centrale absidata e le due laterali rettangolari oppure tre nicchie tutte semicirculari, viene però applicato dallo Small anche a teatri con fronte scena rettilineo, sia pure sottoponendolo a qualche adattamento.

Tuttavia alcuni teatri, per esempio Bosra, Trieste e Vienne, sembra facciano ricorso a modelli diversi: ciò non può stupire una volta accettato il principio dell'esistenza di più schemi architettonici in uso contemporaneamente e talora anche nello stesso teatro. Per esempio a Merida le scalette della cavea sono in posizione vitruviana ma tale schema non può essere applicato al resto dell'edificio.

Quanto ai teatri di Fiesole e Trieste essi non sembrano seguire lo schema proposto dallo Small⁸ e anzi in quello di Trieste si riscontrano interessanti corrispondenze con le norme vitruviane: in particolare il diametro dell'orchestra coincide con il limite del proscenio e la fronte scena non si discosta molto dalla posizione vitruviana.

Sembra dunque che anche il confronto tra le proporzioni esistenti in diversi teatri, basato sullo schema geometrico proposto da Small, confermi la forte somiglianza tra i vari teatri costruiti in Italia e nelle provincie durante l'età augustea. Ciascuno di questi edifici inoltre, pur facendo riferimento ad una stessa concezione del teatro (come attestano la cavea sostruita almeno in parte, il sistema accurato di accesso alla cavea, la scena articolata in nicchie e la presenza di ambienti di servizio), mostra una certa originalità nel rispondere alle esigenze che sono per lo più comuni a tutti. Anche l'analisi dello schema proposto da Small rivela tale libertà nel rielaborare dati preesistenti, quali quelli forniti dallo schema stesso. Del resto, in ambiente romano ogni teatro viene concepito a partire dalla coppia cavea-edificio scenico, ed è sulla base di questo disegno d'insieme che di volta in volta si ricerca l'unità e l'armonia dell'intero edificio⁹.

⁸ Small D.B, *Studies in roman theater*, in American journal of archeology, 87, 1983, pp.55-68. In effetti a Fiesole lo schema potrebbe anche venire applicato per quanto riguarda gli hospitalia, ma il diametro della regia risulta troppo piccolo rispetto a quello dell'orchestra. Si riscontra infatti un rapporto di circa 0,38 mentre i limiti indicati dallo Small sono 0,46-0,81.

⁹ Frezouls E., *Aspects de l'histoire architecturale du theatre romain*, in Aufstieg du Niedergang, II, 12, 1 Berlin 1982, pp. 343-441

3.2 Teatro greco e romano

Vitruvio individua alcune specifiche differenze del teatro romano da quello greco, quali la diversa disposizione delle scalette della cavea, o la riduzione delle dimensioni dell'orchestra, che diviene semicircolare. Non sembra però avvertire pienamente il significato di tale mutamento di dimensioni e soprattutto di funzione (l'orchestra infatti viene in parte occupata dai sedili riservati ai personaggi influenti della città), né d'altra parte nota alcune altre importanti differenze.

Infatti, nel teatro romano si tende a liberare la cavea dall'appoggio al pendio naturale di un colle, giungendo ad impostarla completamente su sostruzioni artificiali; le *parodoi* non sono più scoperte ed inclinate verso l'orchestra ma coperte da volte su cui appoggiano i *tribunalia*, che a loro volta saldano la cavea ai *parascenia*; infine il fronte scena acquista grande importanza e ricchezza di decorazione, articolandosi con una certa varietà di soluzioni¹⁰.

Nel teatro romano, come in quello greco, le gradinate erano interrotte dai *diazomi* (corridoi, chiamati *praecinctiones*) e divise in più sezioni (*maeniana*). Le scalette verticali dividevano le gradinate in «cunei» e i *diazomi* orizzontalmente in «settori». Il palcoscenico (*pulpitum*, che si trovava tra l'orchestra, dove erano i seggi dei senatori, e la parete interna o di fondo (*frons scenae*), doveva essere più grandi rispetto al teatro greco in quanto nel teatro romano tutti gli attori agivano sulla scena.

Tutti questi elementi mostrano come alla base del teatro romano non vi sia più la concezione “aperta”, “centrifuga” del teatro greco, in cui attorno all'orchestra vengono disposti da un lato la cavea, dall'altro la scena, ma non si ritiene necessario legare tra loro i due elementi.

Al contrario il teatro romano si sviluppa sempre più come spazio autonomo, “chiuso” e articolato secondo una visione unitaria.

Il teatro romano, costruito nel centro delle città, si configurava come un vero e proprio edificio; questo era possibile grazie alla conoscenza da parte dei romani dell'arco e della volta in funzione preminente strutturale, soluzione tecnica estranea ai greci.

Una differenza tra le due tipologie di teatri è legata anche all'uso. Infatti il teatro romano nasce per ospitare spettacoli per l'intrattenimento collettivo, mentre quello greco ha una funzione di tipo religioso (quest'ultimo sorgeva fuori città, in aree sacre vicino templi).

Le figure 3.3 e 3.4 mostrano le parti dei teatri greco e romano a confronto. Si nota la maggior chiusura e articolazione più complessa del teatro romano rispetto a quello greco.

¹⁰ Alcuni teatri presentano un fronte scena rettilineo, altri hanno in corrispondenza delle porte tre nicchie absidate, un ultimo gruppo mostra la nicchia centrale absidata e le laterali a pianta rettangolare.

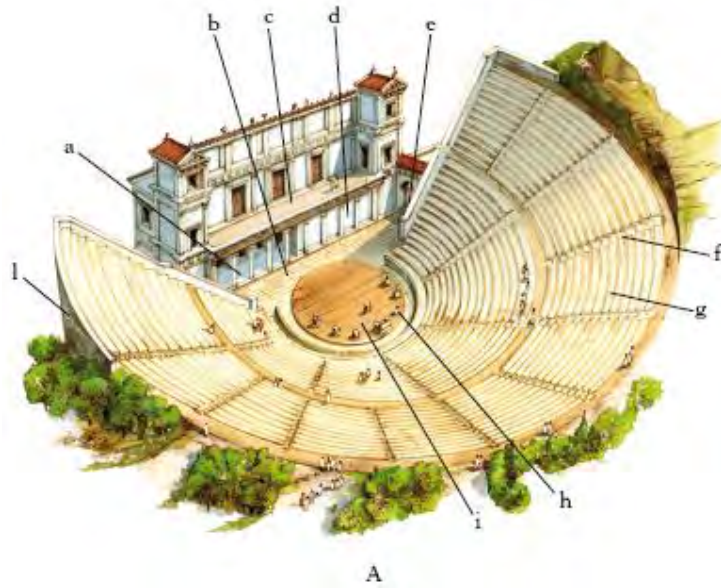


Fig. 3.3 – Teatro greco con indicazione delle parti che lo costituiscono: a) portico, b) proscenio, c) scena, d) parascenio, e) paradoi, f) scale, g) koilon, h) sipario, i) orchestra

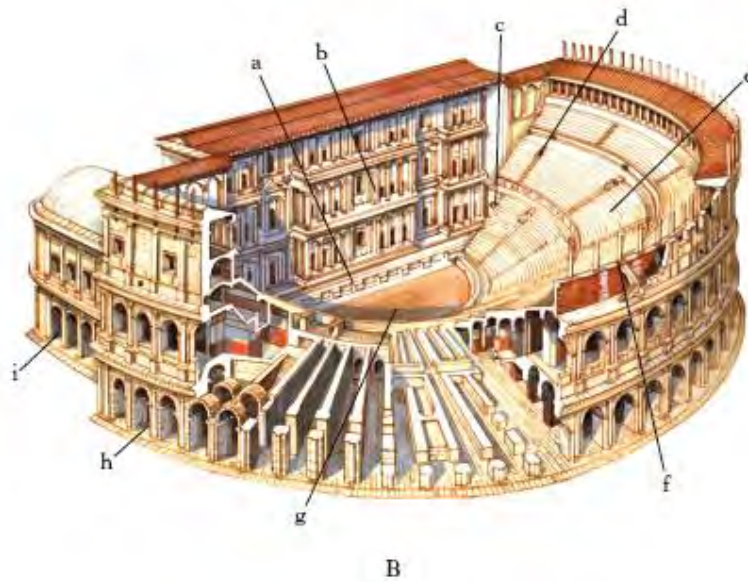


Fig. 3.4 – Teatro romano con indicazione delle parti che lo costituiscono: a) proscenio, b) scena, c) accesso all'orchestra, d) scalette, e) cavea, f) summa cavea, g) orchestra, h) portico, i) accesso

3.3 Confronti tra esempi di architettura teatrale

Vengono di seguito comparate le principali parti del teatro romano, come la struttura portante, la cavea, gli accessi e la scena. Alcuni teatri sono messi a confronto per trovare analogie e differenze al fine di una miglior comprensione delle peculiarità del teatro di Verona e per una visione d'insieme che racchiude l'analisi fin qui svolta.

A seguire si è voluto inserire delle descrizioni dei principali teatri della *Regio X*, essendo in essa presente il teatro romano di Verona, e alcuni tra i principali teatri delle provincie romane citati di seguito.

Analizzando da subito la parte strutturale che sorregge le strutture teatrali si può prendere ad esempio il teatro romano di Trieste. La parte inferiore della cavea è appoggiata al colle S. Giusto. Si sono però resi necessari tagli nella parete rocciosa (l'ambulacro ne veniva ricavato soltanto in parte, nella parte centrale rimaneva ostruito dalla roccia), come nei casi di Brescia e Pola, menzionando solo altri due esempi della *X Regio*, e secondo una prassi diffusa in una fase antica dei teatri romani¹¹.

Anche il teatro di Ferento si presenta in parte addossato al pendio naturale del terreno, in parte sostruito per mezzo di due corridoi semicircolari e una serie di ambienti radiali: di questi alcuni erano utilizzati anche per le scalette che conducevano alla *praecinctio* della cavea. L'ambulacro esterno e i vani radiali sono pienamente praticabili e posti in comunicazione tra loro; solo i vani con le scalette sono chiusi verso l'ambulacro da un muro in reticolato, ma si aprono sui vani contigui grazie a passaggi nei muri laterali. Strutture di tale genere nascono evidentemente da due esigenze concomitanti: di non dover più dipendere solo dalle caratteristiche naturali del terreno per la costruzione della cavea e di assicurare un movimento scorrevole degli spettatori.

Queste stesse esigenze si riscontrano anche in altri edifici teatrali, con soluzioni mai identiche tra di loro. Similmente nel teatro di Volterra, datato con certezza all'età augusta grazie ad un'iscrizione, un ambulacro correva alle spalle della cavea, sostenendo la parte più alta dei gradini. Una cura particolare fu rivolta qui al problema della circolazione degli spettatori, utilizzando pienamente a questo scopo gli ambienti di sostruzione e integrandoli con un sistema assai elaborato di scalinate di accesso dall'alto della collina. Anche a Verona, dove il teatro è però leggermente più tardo, probabilmente degli inizi del I sec. d.C., la parte superiore della gradinata è sostenuta da un ambulacro che circonda tutto il perimetro della cavea, ma qui appare anche un secondo elemento: le pareti laterali del teatro appoggiano

¹¹ Frezouls E., *Aspects de l'histoire architecturale du theatre romain*, in *Aufstieg und Niedergang*, II, 12, 1 Berlin 1982, pp. 343-441

interamente su sostruzioni artificiali, costituite da una serie di muri radiali ciechi e quindi con funzione puramente statica.

Una soluzione analoga è adottata anche nel teatro di Gubbio, datato con qualche incertezza all'età cesariana o augustea, dove però l'intera cavea è sostruita artificialmente: essa appoggia su due file di ambienti radiali, i più interni dei quali non sono accessibili, mentre gli altri si aprono direttamente all'esterno attraverso una serie di arcate.

Tra i teatri provinciali, il teatro di Arles presenta un sistema di sostruzioni della cavea con molte somiglianze rispetto a quello di altri teatri. Infatti la parte inferiore della cavea è direttamente appoggiata alla collina, mentre la media e la summa cavea sono sostruite: troviamo qui una prima fila di vani radiali, cinque dei quali occupati dalle scalette dei *vomitoria*; alle spalle di questi un primo ambulacro comunicante con i vani radiali e direttamente con le *parodoi* attraverso brevi scalette; dieci passaggi lo mettono in comunicazione anche con la seconda fila di ambienti radiali, ognuno dei quali si apre sul secondo ambulacro.

Questo sistema di sostruzioni sembra più sviluppato ma tenendo conto delle maggiori dimensioni del teatro di Arles rispetto a quello di altri teatri come Ferento, ciò appare del tutto comprensibile e risalta invece la somiglianza dei principi architettonici che stanno alla base delle due strutture.

Analizzando le dimensioni dei teatri si ha che il teatro di Arles ha un diametro di 102 metri mentre quello di Ferento di 60 metri.

Se si prende come riferimento il teatro romano di Trieste, esso oscilla tra 63 e 64 metri; l'altezza conservata è di 15 metri, certamente inferiore all'altezza del monumento originario. Ne consegue che la *cavea* di Trieste fa parte di un tipo medio-piccolo con misure praticamente identiche ai teatri di Dugga, Djemila e Timgad in Tunisia, il cui migliore stato di conservazione ha permesso di calcolare con buona approssimazione la capienza, valutata in 3.500 spettatori¹². Le dimensioni del teatro triestino sono di poco inferiori (di circa 10-15 m) di quelle dei teatri di città più grandi della *X Regio* come Vicenza e Pola. Per ciò che riguarda le dimensioni della cavea del teatro romano di Verona, essa presenta un diametro di 105 metri, risulta quindi essere un teatro medio-grande nelle dimensioni. A titolo di confronto, si ricorda che i teatri della Gallia Narbonense, ad esempio Arles, Orange e Lione, hanno mediamente diametri di circa 100 metri e più¹³.

¹² Frezouls E., *Aspects de l'histoire architecturale du theatre romain*, in *Aufstieg du Niedergang*, II, 12, 1 Berlin 1982, pp. 343-441

¹³ Cavalieri Manasse G., *Il contesto urbanistico del santuario: l'area forense; La tipologia architettonica*, in

Senza addentrarsi troppo a fondo nei confronti fra varie tipologie di teatro, sembra opportuno comunque aggiungere qualche osservazione sulla disposizione degli accessi alla *cavea* e delle scalette che la dividevano in cunei.

Per le osservazioni seguenti va tenuto conto che, in generale, il numero di settori, di *maeniana* e di accessi dipende dalle dimensioni dell'edificio e solo in misura minore può essere considerato elemento fissato da modelli architettonici ufficiali. Per quanto riguarda gli accessi, si deve aggiungere che il loro numero è dettato dal tipo di soluzione tecnica adottato per la costruzione della *cavea* e pertanto varia a seconda che la *cavea* sia parzialmente appoggiata al terreno oppure costruita interamente in elevazione. I teatri appoggiati al terreno hanno di solito minor numero di accessi, in quanto condizioni materiali non consentono la costruzione di ambulacri - o *cryptae* con sviluppo lungo tutto l'arco della *cavea*, all'interno di essa. Di conseguenza la circolazione degli spettatori attraverso i *vomitoria*, cioè attraverso passaggi tra settori della *cavea* e ambulacri, è limitata. In proposito vale la pena di precisare che non è il numero dei *vomitoria* a caratterizzare, di per sé, un tipo e una cronologia dell'edificio teatrale, ma che tale numero, a sua volta, è condizionato soprattutto dal modo di costruzione della *cavea*; tutt'al più si può dire che è, semmai, quest'ultimo l'elemento rivelatore della tipologia e forse della cronologia, in quanto risulta che il teatro parzialmente appoggiato al terreno corrisponde, appunto, a una tipologia antica della tradizione architettonica romana (Vitr. *De arch.* 5 3,3).

Prendendo il teatro di Trieste, in esso esistono due *vomitoria* che collegano altrettanti accessi esterni con la *praecinctio* attraverso un ambulacro, mentre si contano cinque *scalaria* che dall'orchestra raggiungono la *praecinctio*; situazione analoga, per quanto riguarda gli *scalaria*, si riscontra nel teatro di Verona.

Nel teatro romano di Ferento non si è trovata traccia delle scalette che dividevano in cunei la *cavea*, ma si conservano però le scale di accesso dei *vomitoria*, comunicanti con la *praecinctio*; nessuno di essi coincide con l'asse centrale della *cavea*. Questa disposizione può trovare qualche elemento di somiglianza con la distribuzione delle scale di Volterra. Ancor più interessante è il confronto con il teatro di Merida, dove la *cavea* è suddivisa in sei cunei da sette scalette, una delle quali è posta esattamente al centro di essa. Subito al di sotto della *praecinctio* che separa *media* e *summa cavea*, si apre al centro di ogni cuneo un *vomitrium* e altrettanti, sempre sullo stesso asse, conducono alla parte superiore della *cavea*. Del resto non è questo l'unico caso, poiché è proprio questa la posizione suggerita da Vitruvio nel suo

L'area del Capitolium di Verona. Ricerche storiche e archeologiche, Verona 2008, pp. 19

trattato (*De Arch.* V, 6.2) “i cunei della *cavea* vengono divisi in modo che a ciascun vertice dei triangoli inscritti nella circonferenza massima corrispondano le salite e le scale fino alla prima cinta o *praecinctio*; sopra invece, a passaggi alterni, i cunei superiori occupino l’asse centrale”¹⁴.

Là dove la *cavea* è interamente appoggiata alla collina o a un terrapieno, l’accesso diretto attraverso l’ambulacro non è possibile. Alcune volte troviamo, in situazioni del genere, scale esterne per superare il dislivello ed accedere dall’alto alla *cavea*, soluzione forse, come sembra, rilevabile anche a Trieste. Perciò, la presenza di due accessi all’ambulacro dall’esterno e di due soli *vomitoria* nel teatro triestino, e la loro dislocazione in posizioni molto laterali sono facilmente spiegabili.

Per la posizione degli accessi esterni a mezz’altezza della collina, Verona¹⁵ è un valido confronto con il teatro di Trieste, anche se presenta, a quanto pare, un sistema più complesso e vario. Diverso è il caso di Ferento dove venivano aggiunte due rampe di scale esterne a numerosi *vomitoria*.

Elemento architettonico certamente non molto frequente è quello dei primi gradini raddoppiati degli *scalaria* centrali, quale è conservato nei teatri di Verona e Trieste: tramite tale raddoppiamento, che lascia libero al centro una piccola piattaforma della larghezza di una scaletta, viene creato lo spazio o per un piccolo altare o per il basamento di una statua o *sella curulis*, con l’evidente scopo di sottolineare l’asse centrale che porta al sacello in *summa cavea*. Soluzioni vagamente paragonabili si possono riscontrare, in Italia, ad Aosta e a Faleria. Proprio a Faleria si ha la certezza dell’esistenza di un sacello in *summa cavea*. Nel teatro di Ostia, troviamo invece una costruzione analoga, cioè un raddoppiamento delle scale, alle uscite dei *vomitoria*. Di un intento simile si può forse parlare per i teatri di Afrodizia in Caria e di Caesarea Maritima.

Per quanto riguarda i teatri nordafricani, il confronto con quelli che presentano un tempietto in *summa cavea* sarebbe particolarmente interessante, ma le frequenti trasformazioni delle orchestre e dei primi gradini della *cavea*, per adattare gli edifici scenici ad un uso per *munera gladiatoria* (trasformazioni documentate varie volte per i teatri africani), non permettono conclusioni in merito. Analogamente si può dire che non si presentano, come confronti, neppure altri teatri che hanno subito simili trasformazioni in epoca medio-tardo imperiale come quelli di Augst nella *Germania Inferior* o di *Philippi* e *Stobi* in Macedonia. Tuttavia

¹⁴ De Arch. V, 6.2 “*Cunei spectatorum in theatro ita dividantur, uti anguli trigonorum, qui currunt circum curvaturam circinationis, dirigant ascensus scalasque inter cuneos ad primam praecinctionem; supra autem alternis itineribus superiores cunei medii dirigantur*”.

¹⁵ Beschi L., Verona Romana-i Monumenti, in “Verona e il suo territorio”, vol.I, 1960, pp.409-432

alcuni teatri nordafricani come quelli di *Leptis Magna* e *Timgad*, forniti di *sacella in summa cavea*, oppure il teatro palestinese di *Philadelphia*, anch'esso con quel tipo di tempietto, permettono da un lato un confronto con doppi *scalaria* di Trieste e Verona, dall'altro lato potrebbero confermare l'ipotesi che una tale soluzione sia da mettere in rapporto con la presenza del sacello in *summa cavea*. Al contrario, invece, esempi come il teatro di Vienne e quello di Volterra insegnano che non esisteva una regola fissa: alla struttura in alto non corrisponde, in questi casi, una costruzione particolare in basso per mettere in evidenza l'asse centrale e la direttrice verso l'edicola in *summa cavea*. Riguardo l'esecuzione tecnica, va osservato che il primo gradino degli *scalaria*, ritagliato nel teatro di Trieste da un unico blocco di calcare, trova un puntuale confronto ad esempio nel teatro di Belo in Spagna.

A proposito dei cinque *scalaria*, presenti nel teatro di Verona e Trieste, si può affermare che si tratta di un numero assolutamente canonico: ne troviamo esempi in Italia e in altre zone con teatri 'classici', e per lo più di epoca giulio-claudia, come in *Gallia Narbonensis* e nelle regioni della penisola iberica. Tuttavia, nei teatri medio-piccoli, con le dimensioni di quello di Trieste, il numero di *scalaria* può essere anche minore. In questo caso il numero più alto sembra controbilanciare il più ridotto numero di accessi tramite *vomitoria*.

Trattando di problemi di *summa cavea* è opportuno ricordare che le parti alte di un edificio di spettacolo antico, in particolare gli ultimi gradini della *summa cavea*, sono spesso totalmente distrutte oppure molto mal conservate, rendendo perciò difficili i confronti tra le varie situazioni.

Quanto all'edificio scenico, da un lato vi è il frontescena che serve a sfondo alla rappresentazione ed ha soprattutto un valore decorativo e monumentale, dall'altro attorno ad essa possono essere variamente distribuiti ambienti con valore puramente funzionale, utili in parte agli attori, in parte al pubblico. A Ferento, per esempio, il fronte scena presenta in corrispondenza delle porte, una nicchia arrotondata al centro e due rettangoli ai lati. Questa articolazione si afferma a partire dall'età augusta e si diffonde durante tutto l'impero soprattutto nelle provincie occidentali. In Italia hanno questo tipo di scena i teatri di Gubbio (datazione incerta ma probabile periodo augusteo), Volterra (inizio I sec d.C.), Ercolano (inizio I sec. d.C.) e Trieste (inizio II sec. d.C.). Sempre in periodo augusteo vengono costruite scene simili a Merida, Orange, Arles, Vienne, Vaison, Dougga e Djemila. Va tuttavia osservato che mentre la maggior parte di questi teatri, tra cui anche Ferento, mostra nicchie vere e proprie, in alcuni, come per esempio quelli di Ercolano, Ostia, Volterra ed Arles, il muro della scena appare diritto e la profondità degli *hospitalia* è determinata dalla facciata architettonica. Al contrario già Merida e Orange, ma soprattutto nei teatri africani, si

tende ad approfondire molto le nicchie per poter aumentare lo spessore della parete decorata e creare così più evidenti effetti chiaroscurali. Non va dimenticato del resto che ai teatri africani si è ad esempio accostato il Settizonio di Roma, noto da numerose stampe, in cui appunto si esprimeva in modo compiuto tale gusto scenografico.

Per quanto riguarda poi le parti funzionali dell'edificio scenico, si riscontra una certa varietà di soluzioni e questa risulta essere la parte più malleabile del teatro. Collegato al proscenio, che non può mai mancare, si trova l'*hyposcaenium*, un fossato più o meno ampio che permetteva di organizzare particolari effetti scenici e accoglieva gli appressamenti per i macchinari destinati a muovere il sipario. Questa fossa, presente tra l'altro a Gubbio, Volterra, Verona e Merida, è nel caso di Ferento particolarmente sviluppata e occupa tutto lo spazio corrispondente al palcoscenico.

Alcuni edifici teatrali, in analogia al teatro di Marcello, presentano la serie completa degli annessi. Si tratta dei *parascaenia*, ambienti per lo più di modeste dimensioni che servono per le esigenze della rappresentazione, o dei *postscaenia*, vani posti alle spalle del fronte scena, comunicanti con il palcoscenico e utilizzati anch'essi dagli attori. Al contrario sono rivolti ad assicurare maggiori comodità agli spettatori la *porticus post scaenam* e le *basilicae*, ambienti abbastanza ampi, posti ai lati dei *parascaenia* e comunicanti con le *parodoi*. Una tale completezza non è però molto frequente e infatti, tra i teatri già citati, la si riscontra solo a Ercolano, Volterra, Trieste e in ambito provinciale a Merida e Orange. La maggior parte dei teatri tendono a semplificare questo sistema diminuendo il numero degli ambienti, ma curando sempre che siano rispettate sia le esigenze del pubblico sia quelle degli attori. Un esempio di questo tipo è il teatro di Gubbio che presenta solo i *postscaenia* e le *basilicae* ai lati del palcoscenico: si raggiunge qui un massimo di semplificazione, pur mantenendo un buon livello funzionale.

A conclusione di questa breve analisi delle parti principali che caratterizzano i teatri romani, riscontriamo che a differenza della *scaena frons* il cui alzato è, benché raramente integro, spesso facilmente ricostruibile attraverso i materiali rimasti sul posto, in generale, il livello di distruzione delle *summae caveae* e l'asportazione di materiali per altro uso non permettono neppure di avanzare delle ipotesi relative allo stato originario.

D'altro canto si può constatare che è piuttosto frequente la conservazione del muro perimetrale, grazie al suo sfruttamento nel corso del tempo per il tipo di attività edilizia nelle città in epoche postantiche.

3.4 Teatri Romani nell’Impero

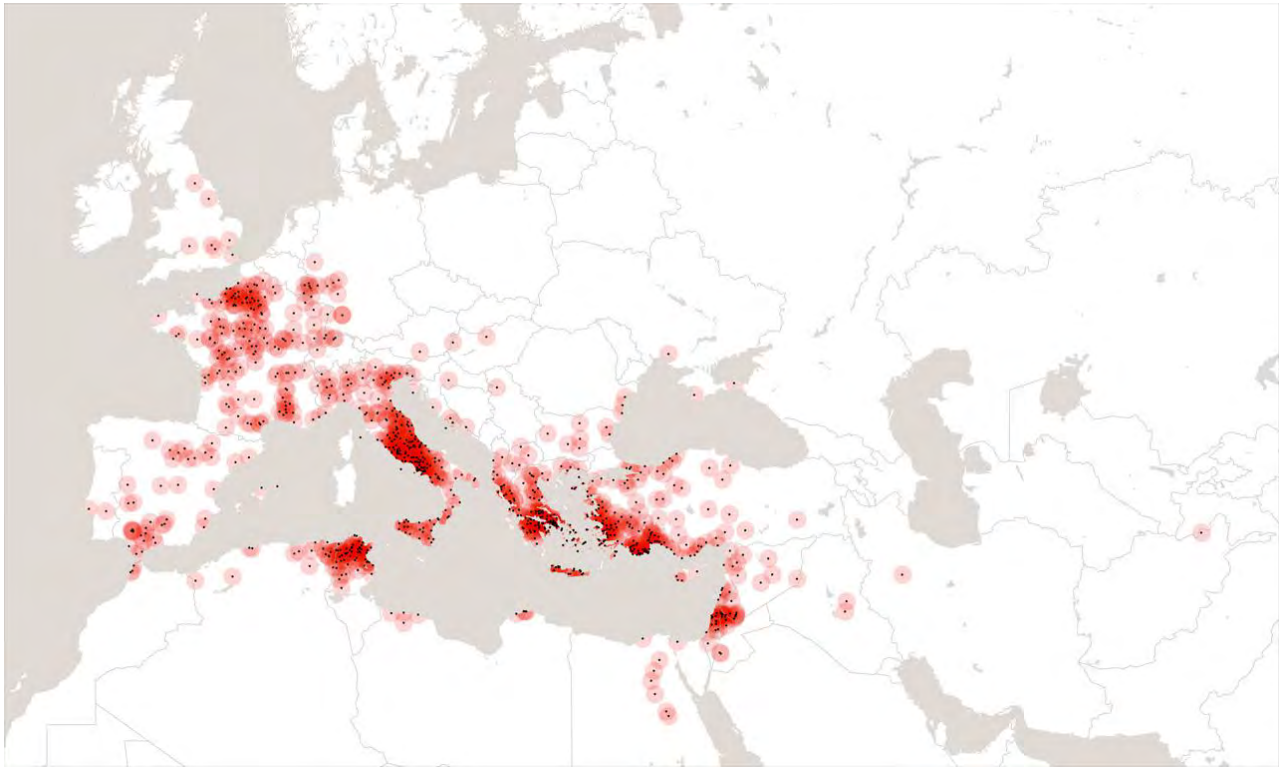


Fig. 3.5–La carta mostra la densità di teatri presenti nell’Impero. Si nota una grande concentrazione nel centro Italia e in Turchia.

Di seguito verranno illustrati i principali teatri romani dell’Impero Romano studiati appartenenti a:

- Italia
- Francia
- Spagna
- Asia Minore
- Africa

3.4.1 Teatri in Italia

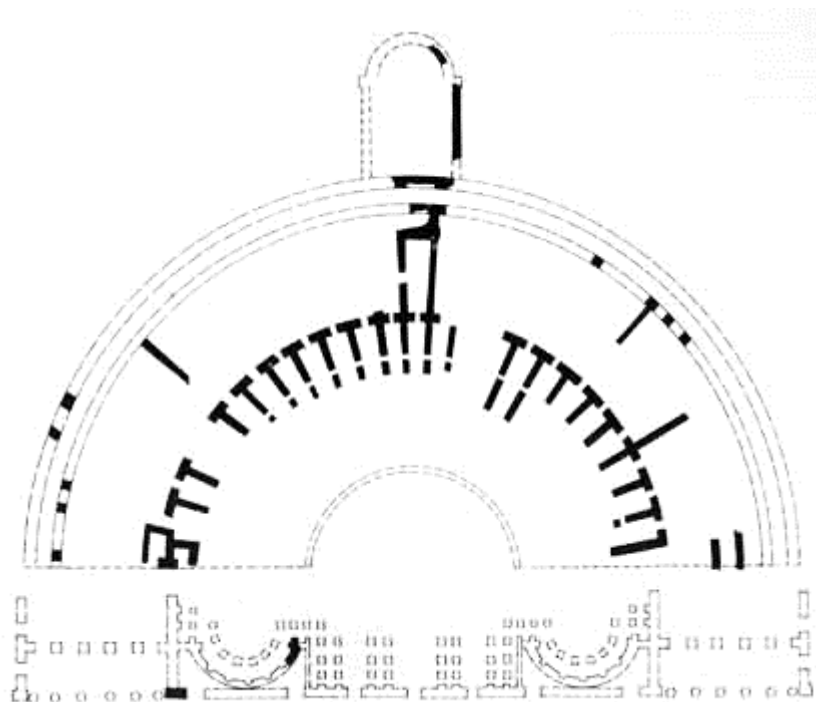


Fig. 3.6–La carta evidenzia la diffusione dei teatri in Italia

1. Teatro di Pompeo
2. Teatro di Marcello
3. Teatro grande di Pompei
4. Teatro di Volterra
5. Teatro di Ferento - Ferentium
6. Teatro di Berga – Vicenza
7. Teatro di Verona
8. Teatro di Trieste

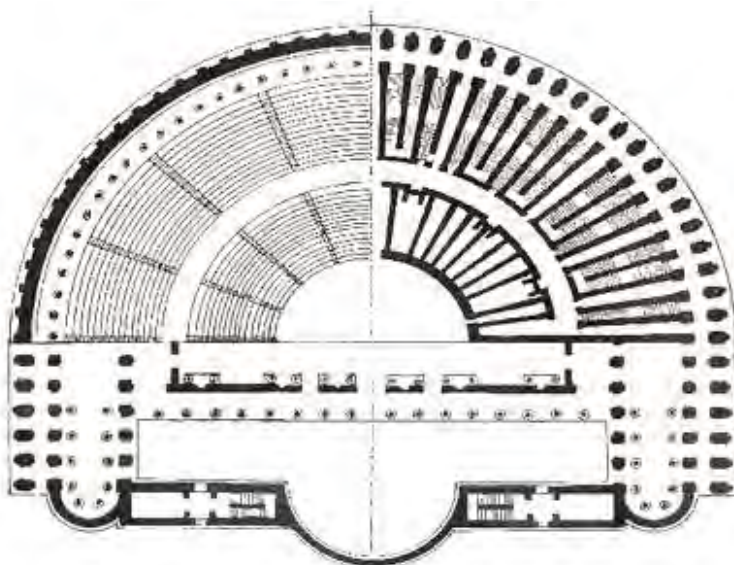
1. Teatro di Pompeo

<u>localizzazione</u>	<i>Regio I (Latium e Campania)</i> - Roma, area monumentale del Campo Marzio
<u>datazione</u>	epoca augustea (inaugurato nel 55 a.C.), trasformazioni successive, non più esistente
<u>diametro cavea</u>	m 150
<u>diametro orchestra</u>	m 30
<u>cavea</u>	su sostruzioni, divisa in 3 <i>maeniana</i> , <i>porticus in summa cavea</i> , tempio in <i>summa cavea</i>
<u>capacità</u>	17.580 spettatori
<u>scaena</u>	a 3 nicchie, la centrale rettilinea e le due laterali curvilinee, <i>columnatio</i> imprecisata, <i>porticus post scaenam</i>
<u>conservazione</u>	resti di fondazioni visibili nelle cantine delle case che oggi occupano l'area, curva interna ed esterna della cavea ricalcata dalle vie attuali.



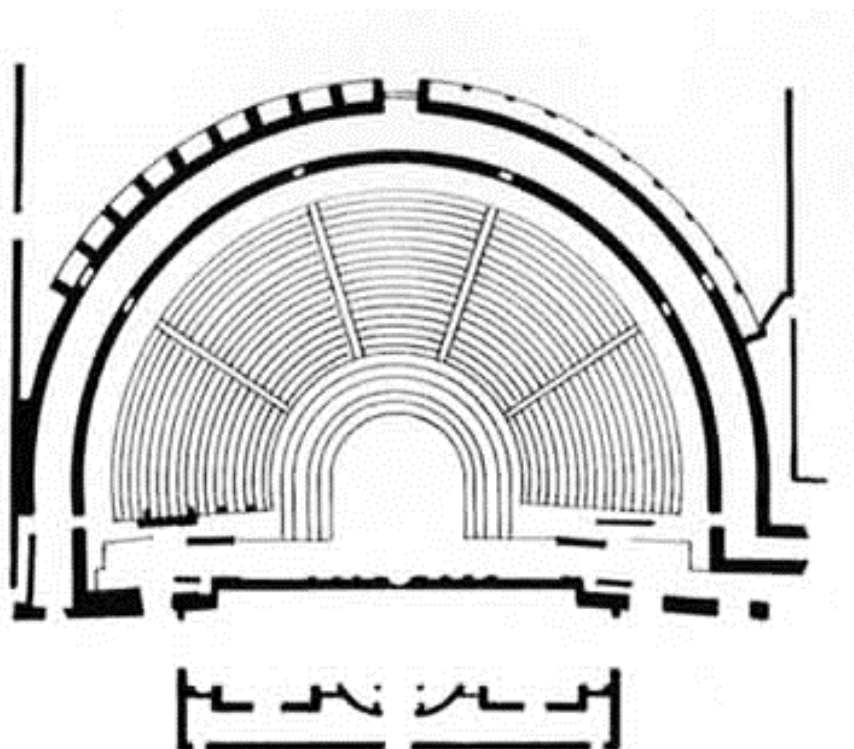
2. Teatro di Marcello

<u>localizzazione</u>	<i>Regio I (Latium e Campania)</i> - Roma, area monumentale del Campo Marzio
<u>datazione</u>	epoca augustea (seconda metà I secolo a.C.), restauri successivi (età giulio-claudia e degli Antonini)
<u>diametro cavea</u>	m 129,80
<u>diametro orchestra</u>	m 37
<u>cavea</u>	su sostruzioni, divisa in 3 <i>maeniana</i> , tempio in <i>summa cavea</i>
<u>tecnica</u>	I muri radiali dei cunei sono in blocchi di tufo per i primi dieci metri di lunghezza, poi in opera cementizia con paramento in reticolato, con inserti in travertino per le imposte e le chiavi d'arco; le pareti degli ambulacri sono in muratura, le volte in calcestruzzo.
<u>capacità</u>	15.500 spettatori
<u>scaena</u>	rettilinea, priva di <i>postscaenium</i> , <i>columnatio</i> imprecisata, <i>porticus post scaenam</i>
<u>conservazione</u>	tre quarti delle sostruzioni della <i>cavea</i> e 18 arcate dei primi due ordini della facciata ricurva della <i>cavea</i> , inglobate nel palazzo Orsini Savelli



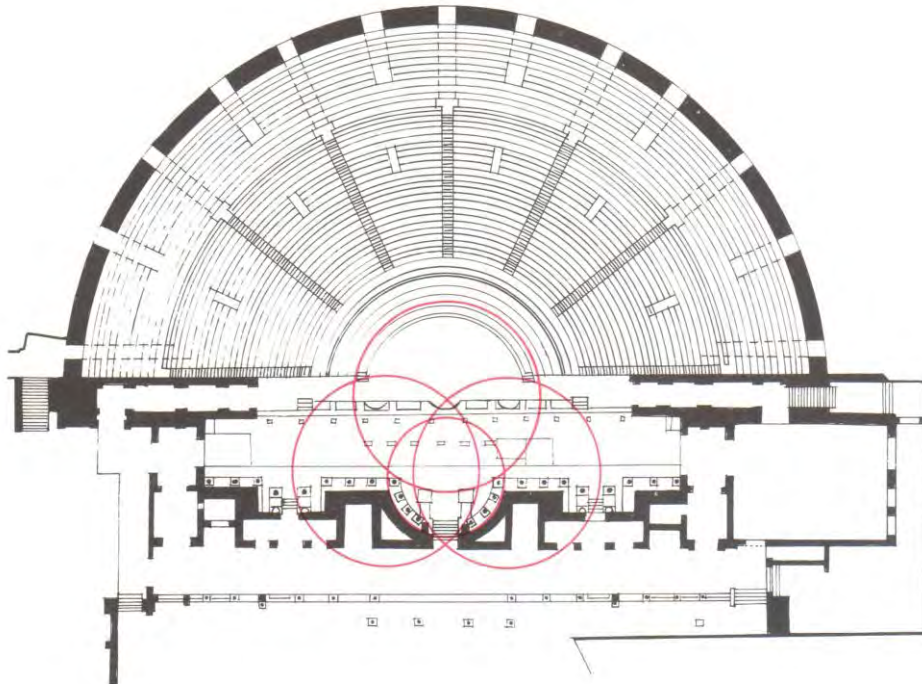
3. Teatro grande di Pompei

<u>localizzazione</u>	<i>Regio I (Latium e Campania) - area monumentale centrale</i>
<u>datazione</u>	II secolo a.C., rimaneggiato verso la metà del I secolo a.C., rifatto in epoca augustea
<u>diametro <i>cavea</i></u>	m 58
<u>diametro <i>orchestra</i></u>	m 10
<u><i>cavea</i></u>	su sostruzioni, non suddivisa, portico in <i>summa cavea</i>
<u>capacità</u>	5.000 spettatori
<u>tecnica</u>	Il palcoscenico è in opera laterizia
<u><i>scaena</i></u>	a 3 nicchie, la centrale curvilinea e le laterali rettilinee (fase augustea), <i>columnatio</i> imprecisata
<u>conservazione</u>	resti della parte bassa della <i>cavea</i> e delle sostruzioni della galleria superiore; fronte del <i>pulpitum</i> e frammenti del primo ordine della <i>scaena</i>



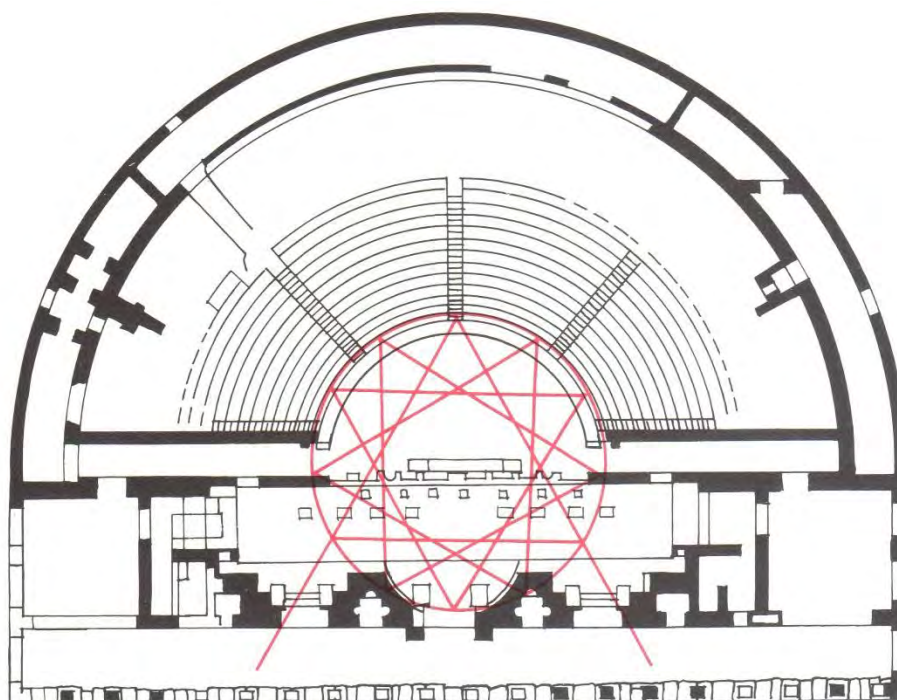
4. Teatro di Volterra

<u>localizzazione</u>	<i>Regio VII (Etruria) - area monumentale centrale</i>
<u>datazione</u>	epoca augustea, completamento in età claudia
<u>diametro <i>cavea</i></u>	m 60
<u>diametro <i>orchestra</i></u>	m 17,6
<u><i>cavea</i></u>	su pendio naturale, divisa in 3 <i>maeniana</i>
<u>capacità</u>	2.000 spettatori
<u><i>scaena</i></u>	a 3 nicchie, la centrale curvilinea e le due laterali rettilinee, <i>columnatio</i> su 2 ordini, <i>porticus post scaena</i> . La frontescena era lunga 35,98 metri (122 piedi romani) e alta più di 16 metri
<u>conservazione</u>	resti di buona parte della <i>cavea</i> e delle fondazioni della <i>scaena</i> e del <i>postscaenium</i> , parziale ricostruzione della <i>scaena</i>



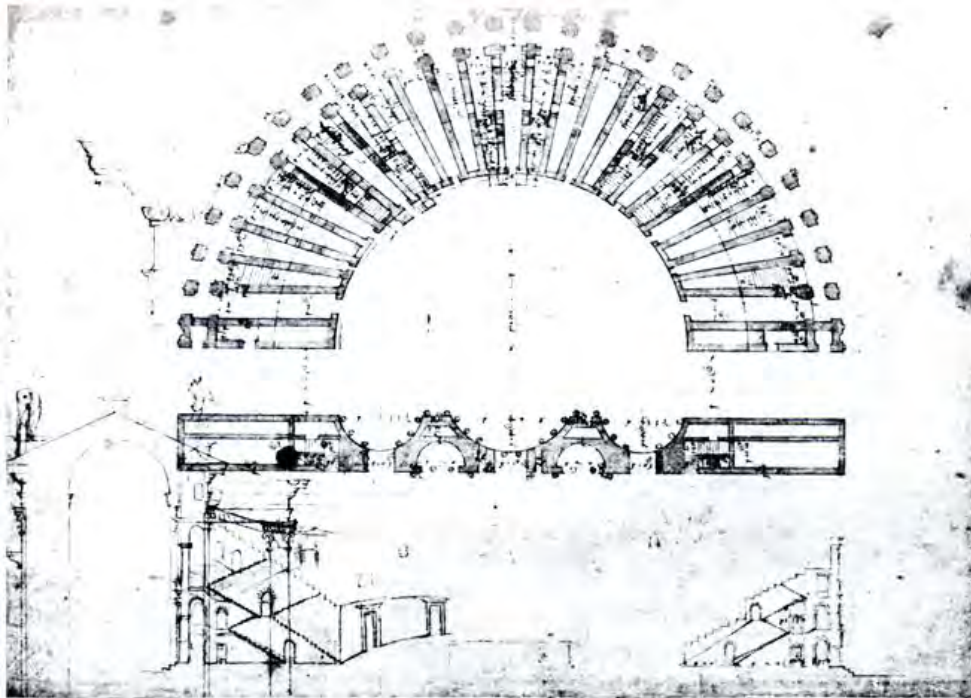
5. Teatro di Ferento - Ferentium

<u>localizzazione</u>	<i>Regio VII (Etruria) - area monumentale centrale</i>
<u>datazione</u>	epoca augustea, rifacimenti in periodo severiano
<u>diametro cavea</u>	m 60,33
<u>diametro orchestra</u>	m 16,2
<u>cavea</u>	in parte su sostruzioni, in parte su pendio naturale, divisa in 2 <i>maeniana</i> , <i>porticus in summa cavea</i>
<u>tecnica</u>	La scena è in parte in opera quadrata, in parte in laterizio. La parte meridionale della fossa scenica è in opera vittata. Le scale sono fiancheggiate da opera reticolata.
<u>capacità</u>	1.000 spettatori (capacità attuale)
<u>scaena</u>	a 3 nicchie, la centrale curvilinea a raccordo rettilineo e le due laterali rettilinee, <i>columnatio</i> su due ordini (Pensabene)
<u>spessore sostruzioni</u>	Circa 1 m
<u>conservazione</u>	resti visibili della <i>cavea</i> (restaurata) e primo ordine della <i>scaena</i> (consolidato)



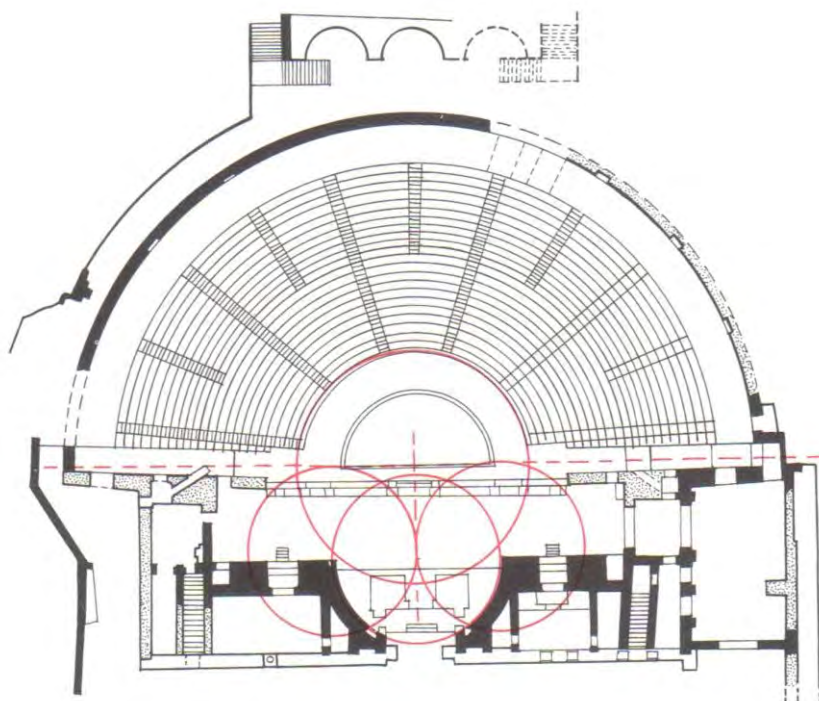
6. Teatro di Berga - Vicenza

<u>localizzazione</u>	<i>Regio X (Venetia) - area monumentale centrale</i>
<u>datazione</u>	prima metà I secolo d.C., epoca augusta
<u>diametro cavea</u>	m 81,88
<u>diametro orchestra</u>	non disponibile
<u>cavea</u>	su sostruzioni, divisa in 3 <i>maeniana</i> , <i>porticus in summa cavea</i>
<u>capacità</u>	non disponibile
<u>scaena</u>	a 3 nicchie curvilinee, <i>columnatio</i> su 3 ordini, <i>porticus post scaenam</i>
<u>materiali</u>	Il teatro era realizzato principalmente con la pietra estratta nelle cave di Costozza.
<u>conservazione</u>	resti di fondazione della cavea, visibili dalle cantine delle case sorte sull'area, strutture curvilinee riconoscibili nella morfologia dell'isolato attuale



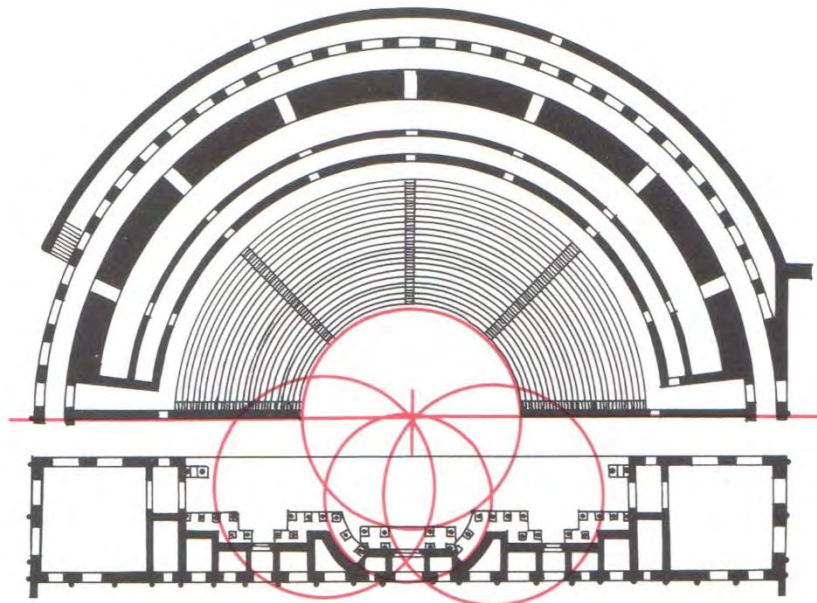
7. Teatro di Verona

<u>localizzazione</u>	<i>Regio X (Venetia)</i> - esterno al centro monumentale, oltre l'Adige
<u>datazione</u>	epoca augustea
<u>diametro cavea</u>	m 105
<u>diametro orchestra</u>	m 29,60 (15,35 Beschi)
<u>cavea</u>	in parte su sostruzioni in parte su pendio naturale, divisa in 2 <i>maeniana</i> , <i>porticus in summa cavea</i> , tempio in <i>summa cavea</i>
<u>capacità</u>	non disponibile
<u>scaena</u>	a 3 nicchie, la centrale curvilinea e le due laterali rettilinee, <i>columnatio</i> su 3 ordini
<u>tecnica</u>	Opus quadratum nella scena, opus vittatum nei setti, opus reticulatum nelle passeggiate
<u>conservazione</u>	buona parte delle strutture della <i>cavea</i> (restaurata) e delle gallerie superiori, fondazioni della <i>scaena</i>



8. Teatro di Trieste

<u>localizzazione</u>	<i>Regio X (Venetia)</i> - esterno al centro monumentale, appoggiato al colle San Giusto
<u>datazione</u>	epoca augustea o giulio-claudia
<u>diametro cavea</u>	m 64,40
<u>diametro orchestra</u>	m 17,82
<u>cavea</u>	in parte su sostruzioni in parte su pendio naturale, non suddivisa, <i>porticus in summa cavea</i>
<u>capacità</u>	3.500 spettatori
<u>scaena</u>	a 3 nicchie, la centrale curvilinea e le laterali rettilinee, <i>columnatio</i> su 2 ordini
<u>Spessore sostruzioni</u>	Circa 1 m
<u>conservazione</u>	resti del muro esterno della <i>cavea</i> e della parte inferiore della gradinata (restaurata), fondazioni della <i>scaena</i> e importanti frammenti scultorei



3.4.2 Teatri in Francia

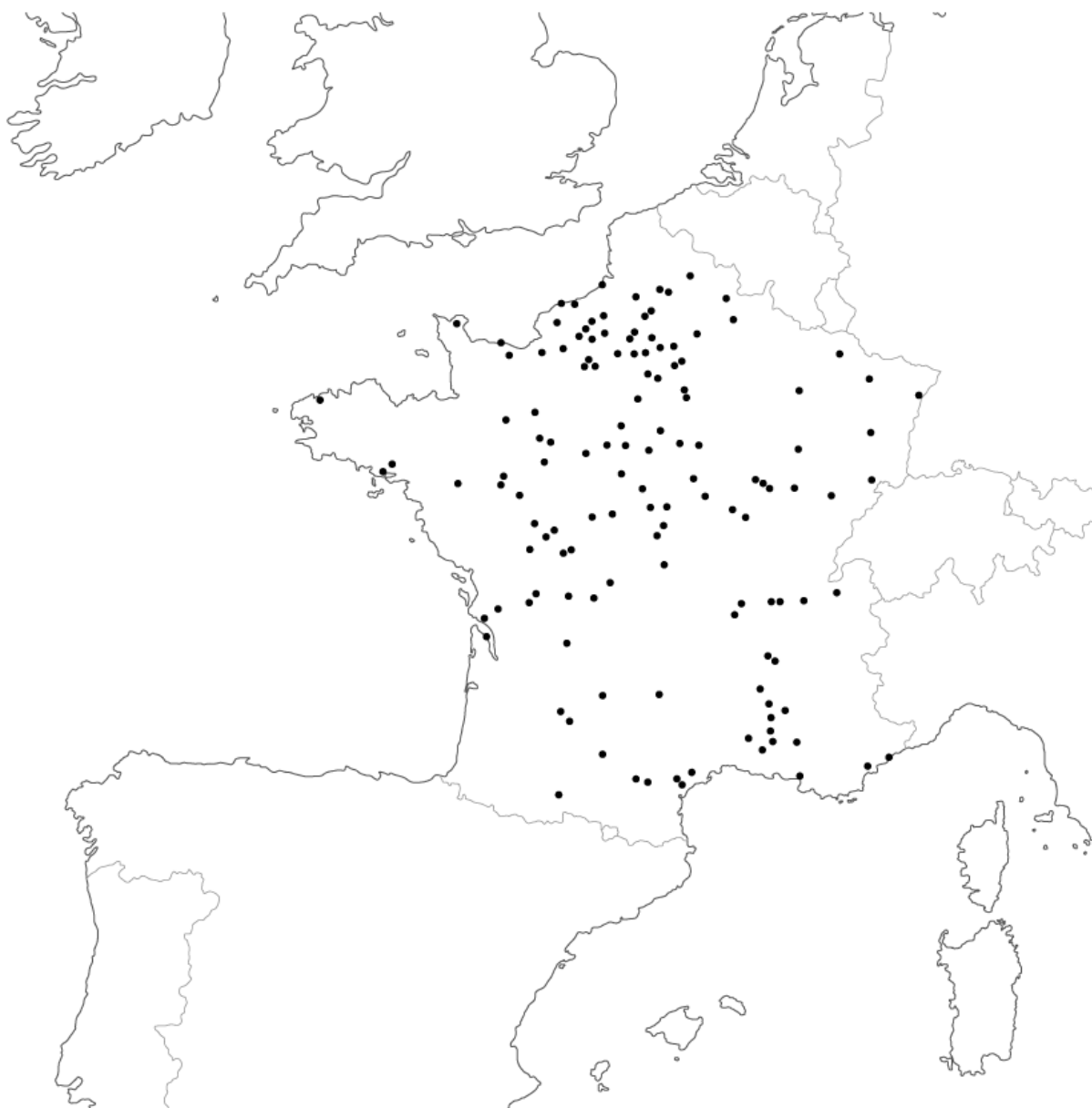
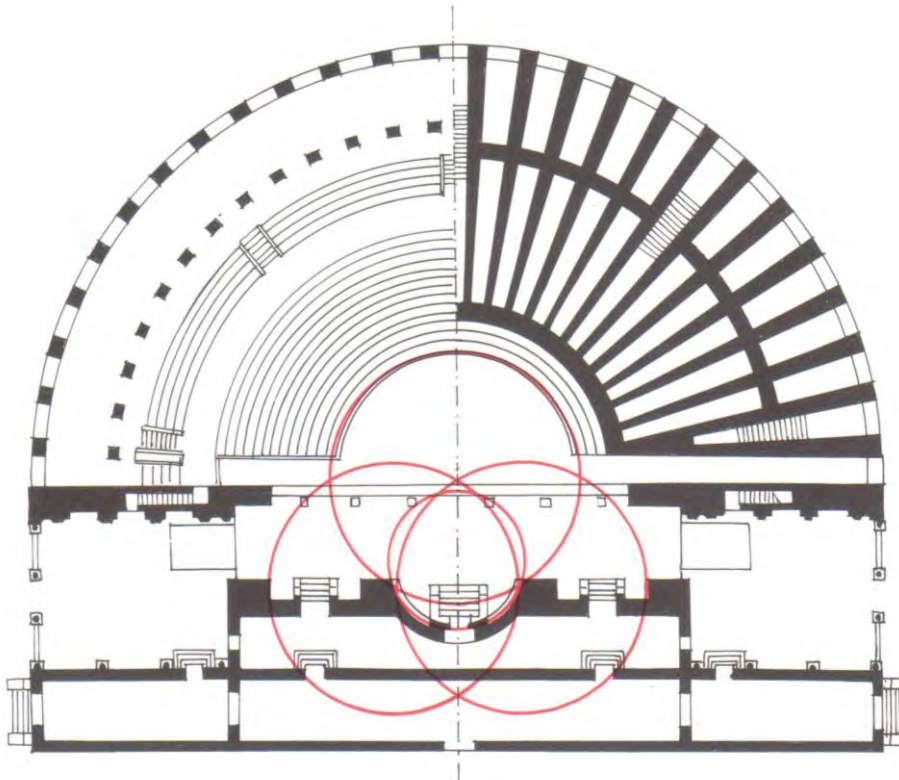


Fig. 3.6–La carta evidenzia la presenza dei teatri in Francia

- 9. Teatro di Orange
- 10. Teatro di Arles - Arelate
- 11. Teatro di Vienne

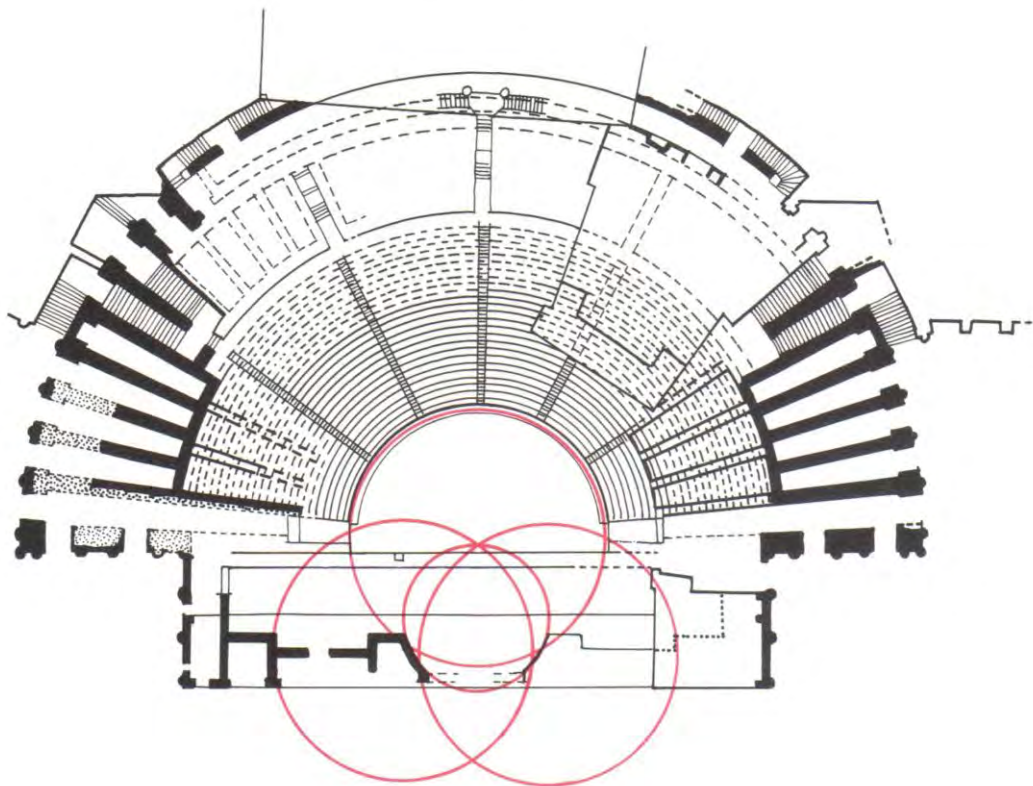
9. Teatro di Orange - Arausius

<u>localizzazione</u>	Valle del Rodano (<i>Gallia Narbonensis</i>) - area monumentale centrale
<u>datazione</u>	epoca augustea
<u>diametro cavea</u>	m 103
<u>diametro orchestra</u>	m 19
<u>cavea</u>	in parte su sostruzioni in parte su pendio naturale, divisa in 3 <i>maeniana</i> , <i>porticus in summa cavea</i>
<u>capacità</u>	7.000 spettatori
<u>scaena</u>	a 3 nicchie, la centrale curvilinea a raccordo rettilineo e le laterali rettilinee, <i>columnatio</i> su 3 ordini, <i>protiro</i> a 4 colonne, <i>porticus post scaenam</i>
<u>conservazione</u>	il teatro meglio conservato in Europa, muro di fondo della <i>scaena</i> visibile in tutta la sua altezza e resti di buona parte della <i>cavea</i>



10. Teatro di Arles - Arelate

<u>localizzazione</u>	Valle del Rodano (<i>Gallia Narbonensis</i>) - area monumentale centrale
<u>datazione</u>	epoca augustea
<u>diametro cavea</u>	m 102
<u>diametro orchestra</u>	m 14
<u>cavea</u>	su sostruzioni, tranne le prime file di gradini, divisa in 3 <i>maeniana</i>
<u>capacità</u>	10.000 spettatori
<u>scaena</u>	a 3 nicchie, la centrale curvilinea a raccordo rettilineo e le due laterali rettilinee, <i>columnatio</i> su 3 ordini, <i>porticus post scaenam</i>
<u>conservazione</u>	resti di buona parte della <i>cavea</i> e delle fondazioni della <i>scaena</i>



11. Teatro di Vienne

<u>localizzazione</u>	Valle del Rodano (<i>Gallia Narbonensis</i>) - area monumentale centrale
<u>datazione</u>	epoca augustea
<u>diametro cavea</u>	m 130
<u>diametro orchestra</u>	m 24
<u>cavea</u>	su pendio naturale, divisa in 2 <i>maeniana</i> , <i>porticus in summa cavea</i> , tempio in <i>summa cavea</i>
<u>capacità</u>	13.000 spettatori
<u>scaena</u>	a 3 nicchie, la centrale curvilinea a raccordo rettilineo e le due laterali rettilinee, <i>columnatio</i> imprecisata, <i>porticus post scaenam</i>
<u>conservazione</u>	resti di buona parte della <i>cavea</i> e dell' <i>orchestra</i> , fondazioni della <i>scaena</i> , frammenti scultorei



3.4.3 Teatri in Spagna



Fig. 3.7–La carta evidenzia la presenza dei teatri in Francia

12. Teatro di Sagunto

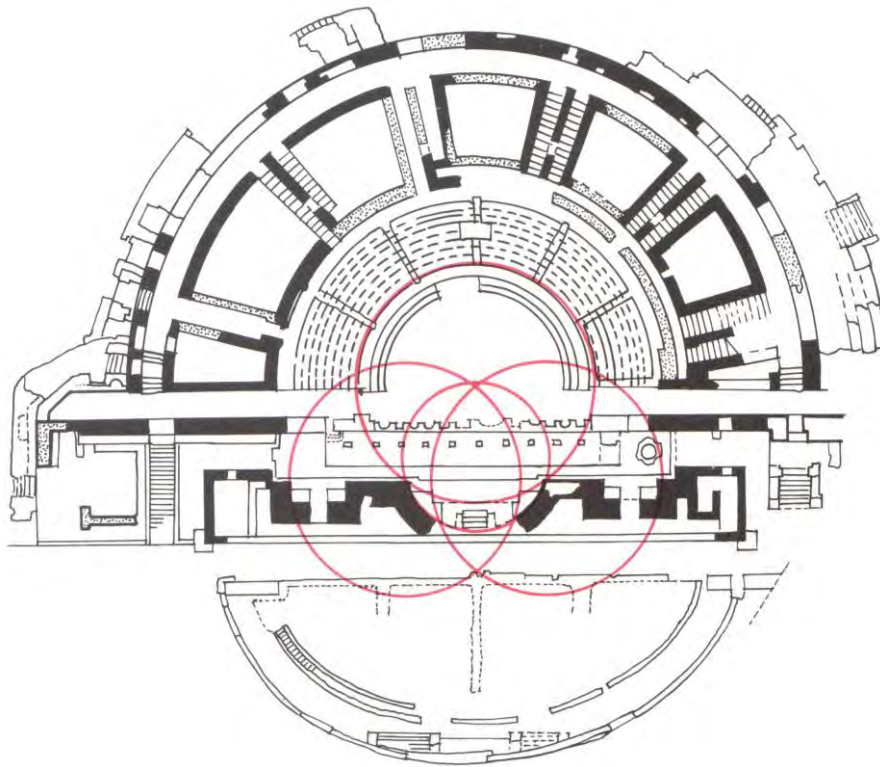
13. Teatro di Merida

12. Teatro di Sagunto

<u>localizzazione</u>	Comunidad Valenciana (<i>Hispania Tarraconensis</i>) - area monumentale centrale
<u>datazione</u>	inaugurato nel 55 a.C., restauri successivi
<u>diametro cavea</u>	m 77
<u>diametro orchestra</u>	m 22
<u>cavea</u>	su pendio naturale, divisa in 3 <i>maeniana</i> , <i>porticus in summa cavea</i>
<u>capacità</u>	4.000 spettatori
<u>scaena</u>	a 3 nicchie curvilinee, <i>columnatio</i> su 3 ordini
<u>conservazione</u>	resti della <i>cavea</i> e delle fondazioni della <i>scaena</i> , ricostruito

13. Teatro di Merida

<u>localizzazione</u>	Extremadura (<i>Hispania Lusitana</i>) - area monumentale centrale
<u>datazione</u>	15 a.C.,ricostruzione della <i>scaena frons</i> alla fine I secolo d.C.
<u>diametro cavea</u>	m 86,63
<u>diametro orchestra</u>	m 17
<u>cavea</u>	su sostruzioni, divisa in 3 <i>maeniana</i> , <i>porticus in summa cavea</i>
<u>capacità</u>	5.500 spettatori
<u>scaena</u>	a 3 nicchie, la centrale curvilinea e le due laterali rettilinee, <i>columnatio</i> su 2 ordini, <i>porticus post scaenam</i>
<u>conservazione</u>	abbondanti resti della <i>cavea</i> e della <i>scaena</i> , entrambe ricostruite



3.4.4 Teatri in Asia Minore

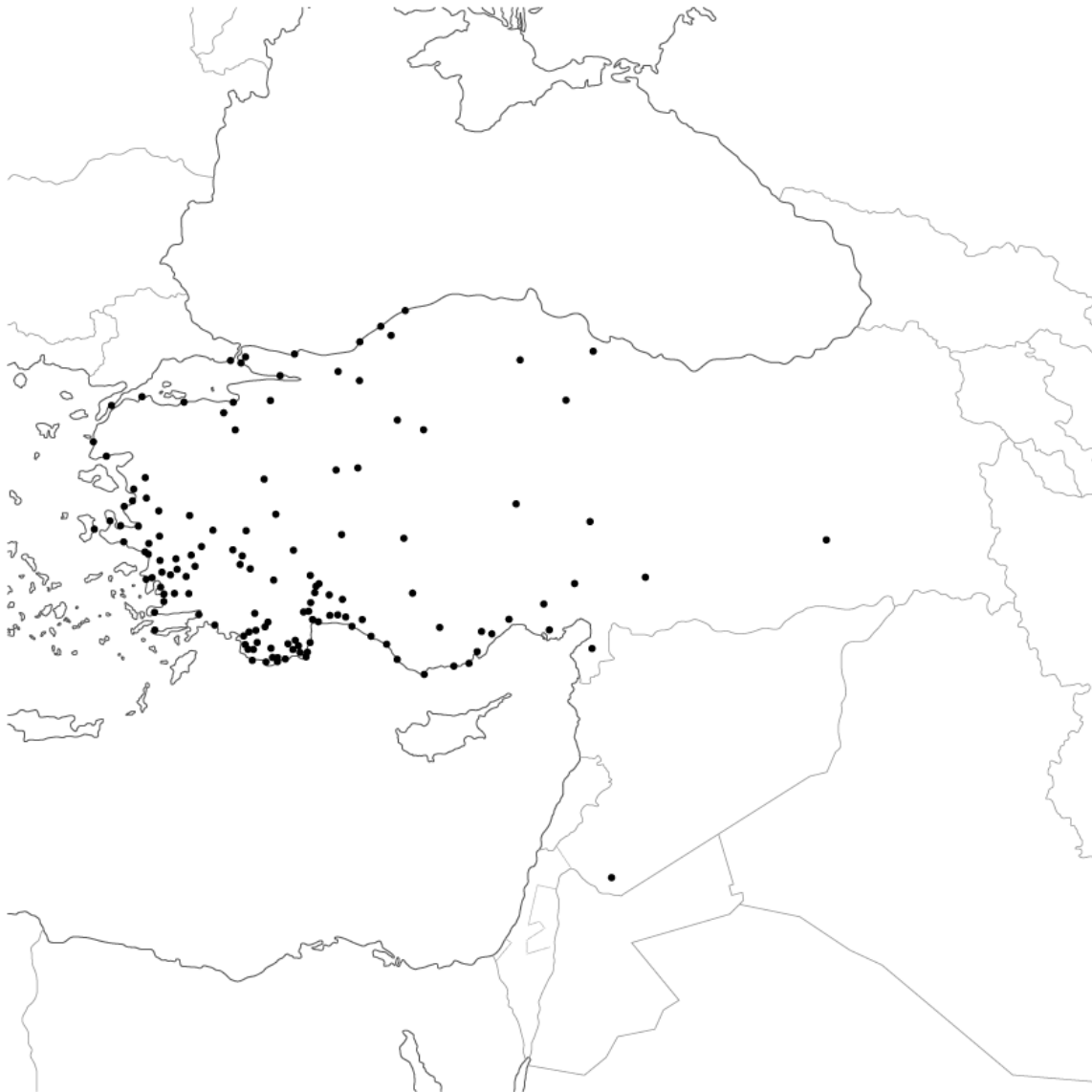


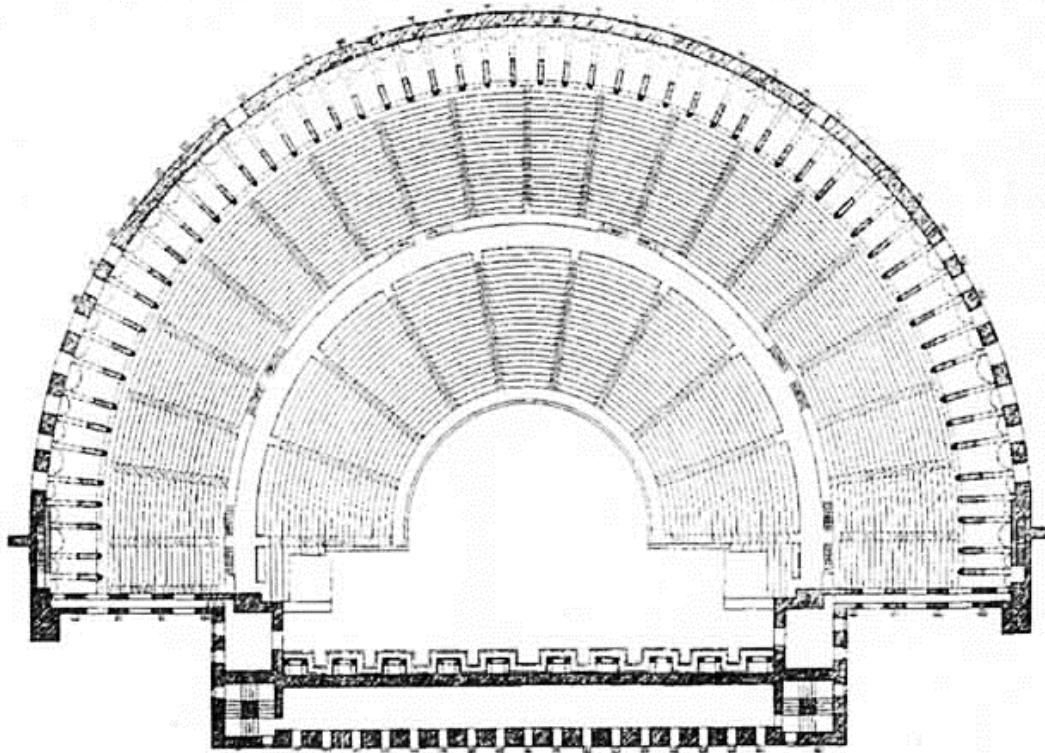
Fig. 3.8–La carta mostra da concentrazione dei teatri in Turchia

14. Teatro di Aspendos

15. . Teatro di Bosra

14. Teatro di Aspendos

<u>localizzazione</u>	Turchia (<i>Pamphylia</i>) - suburbana, lungo la parete a ovest dell'acropoli
<u>datazione</u>	epoca aureliana (161 - 168 d.C)
<u>diametro cavea</u>	m 95,5
<u>diametro orchestra</u>	m 26,68
<u>cavea</u>	in parte su sostruzioni in parte su pendio naturale, divisa in 2 <i>maeniana</i> , <i>porticus in summa cavea</i>
<u>capacità</u>	non disponibili
<u>scaena</u>	rettilinea, <i>columnatio</i> su 2 ordini
<u>conservazione</u>	il teatro romano meglio conservato, mancano solo le colonne della <i>scaenae frons</i> e il <i>pulpitum</i> ligneo



15. Teatro di Bosra

<u>localizzazione</u>	Siria - decentrata, addossata alla cinta muraria
<u>datazione</u>	epoca traiana (110 d.C.)
<u>diametro <i>cavea</i></u>	m 102
<u>diametro <i>orchestra</i></u>	m 27,5
<u><i>cavea</i></u>	su sostruzioni, divisa in 3 <i>maeniana</i> , <i>porticus in summa cavea</i>
<u>capacità</u>	8.000 - 9.000 spettatori
<u><i>scaena</i></u>	a 3 nicchie curvilinee, <i>columnatio</i> su 3 ordini
<u>conservazione</u>	tra i teatri romani meglio conservati, ottimo stato di conservazione della <i>cavea</i> e del muro esterno, del muro di fondo della <i>scaena</i> e del primo ordine della <i>columnatio</i> (restaurato)

3.4.5 Teatri in Africa



Fig. 3.8–La carta evidenzia la presenza dei teatri in Africa

16. Teatro di Leptis Magna - Wadi LebDAH

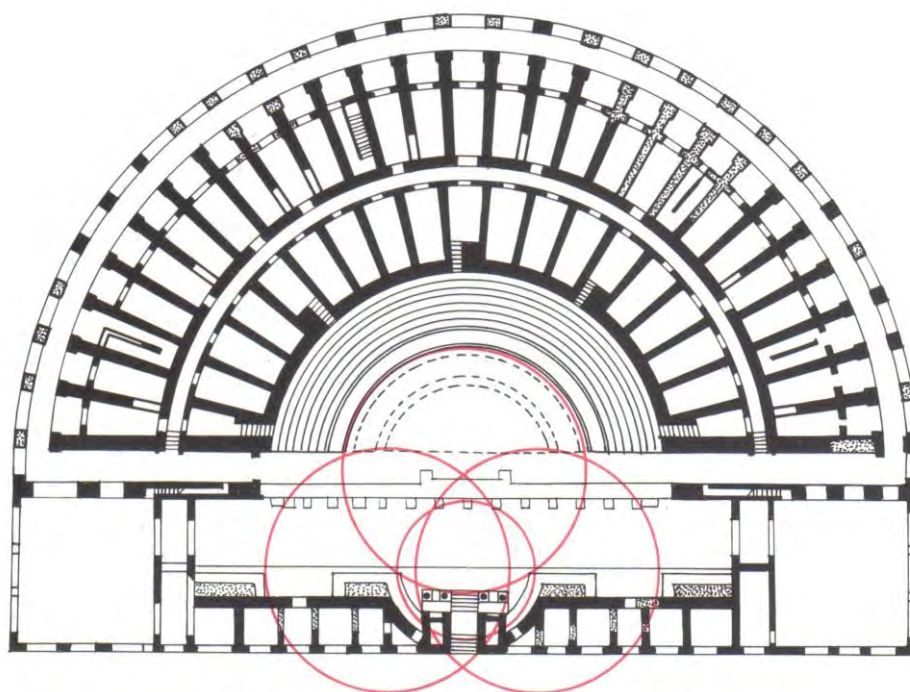
17. Teatro di Dougga

16. Teatro di Leptis Magna - Wadi LebDAH

<u>localizzazione</u>	Libia - (<i>Africa Tripolitana</i>) - area monumentale centrale
<u>datazione</u>	1-2 d.C., rifacimento in marmo della <i>scaena</i> 157-158 d.C.
<u>diametro <i>cavea</i></u>	m 87,6
<u>diametro <i>orchestra</i></u>	m 22,9
<u><i>cavea</i></u>	in parte su sostruzioni in parte su pendio naturale, divisa in 3 <i>maeniana</i> , <i>porticus in summa cavea</i> , tempio in <i>summa cavea</i>
<u>capacità</u>	non disponibile
<u><i>scaena</i></u>	a 3 nicchie curvilinee, <i>columnatio</i> su 3 ordini, <i>porticus post scaenam</i>
<u>conservazione</u>	resti di buona parte della <i>cavea</i> e del primo ordine della <i>scaena</i> (restaurati)

17. Teatro di Dougga

<u>localizzazione</u>	Tunisia - (<i>Africa Proconsularis</i>) - area monumentale centrale
<u>datazione</u>	166 - 169 d.C.
<u>diametro cavea</u>	m 63,5
<u>diametro orchestra</u>	m 12
<u>cavea</u>	in parte su sostruzioni in parte su pendio naturale, divisa in 3 <i>maeniana</i> , <i>porticus in summa cavea</i>
<u>capacità</u>	3.000 spettatori (G. Caputo)
<u>scaena</u>	a 3 nicchie, la centrale curvilinea e le due laterali rettilinee, <i>columnatio</i> su 2 ordini, <i>porticus post scaenam</i> e due <i>basilicae</i> , accessibili dai <i>parascenia</i>
<u>conservazione</u>	resti di buona parte della cavea e del primo ordine della <i>scaena</i> (ricostruito)



3.5 I teatri dell'Italia settentrionale

Veniamo ora al problema delle prime fasi costruttive dei teatri della X Regio. E' opinione comune pensare che la maggior parte delle città dell'Italia abbia avuto preesistenze di impostazione urbanistica augustea. Le prime opere eseguite dovevano naturalmente essere quelle di prima necessità: mura, fognature, strade, *insulae*, foro e templi principali. Edifici di spettacolo sarebbero stati costruiti per lo più, generalmente già in pietra, in momenti successivi.

Nella storiografia a disposizione si trovano proposte cronologiche per i teatri del tipo 'età tiberiana', 'età claudia', ecc. Sappiamo però che il periodo tiberiano è stato uno dei più critici per lo spettacolo ed in particolare per quello scenico. Conviene quindi pensare che la maggior parte dei teatri siano stati costruiti, o almeno cominciati, in epoca augustea, mentre in età tiberiana ci si limitava a completare le costruzioni già iniziate sotto Augusto¹⁶. Da tempo viene sostenuta una datazione intorno alla metà del I secolo a.C. per il teatro di Milano e ultimamente si è aggiunto qualche elemento per una simile proposta cronologica riguardo il teatro di Aquileia. Ma uno sviluppo piuttosto precoce si può supporre anche per il teatro di Verona¹⁷. La maggior parte dei monumenti è poco conosciuta e mancano quasi del tutto studi particolari e saggi di scavo. Tuttavia i termini cronologici risultano simili per i teatri della X Regio.

¹⁶ In questo modo viene spiegata la frequente presenza di Livia nei teatri, cfr. Fuchs 1987, p. 167.

¹⁷ LEVI 1931, p. 32 ss., la data è stata recentemente riproposta da MIRABELLA ROBERTI 1985, p. 52 ss. Tuttavia l'appartenenza del capitello italo-corinzio al teatro viene messa in dubbio dopo recenti indagini

ANALISI DELLO STATO DI FATTO

4.1 Inquadramento geografico

Le coordinate geografiche, utili per la georeferenziazione e il calcolo della sollecitazione sismica sono: latitudine 45.447491, longitudine 11.001727. Si riporta in figura la posizione attuale del Teatro Romano e in figura 2 la relativa vista aerea.



Fig. 4.1 – Inquadramento generale della città di Verona e localizzazione del Teatro Romano



Fig. 4.2 – Vista aerea della zona del Teatro Romano, in rosso l'area di interesse

4.2 Inquadramento sismico

Il rischio sismico è un concetto che comprende sia la probabilità dell'evento, sia le conseguenze che l'evento stesso potrebbe produrre. Riguarda la misura dei danni che, in base al tipo di sismicità¹, di resistenza delle costruzioni e di antropizzazione (natura, qualità e quantità dei beni esposti), ci si può attendere in un dato intervallo di tempo².

Il rischio sismico è determinato dalla combinazione della pericolosità, della vulnerabilità e dell'esposizione. La pericolosità sismica misura la probabilità che in una data area e in un certo intervallo di tempo si verifichi un terremoto che superi una certa soglia di intensità, magnitudo o accelerazione di picco (PGA). Dipende dal tipo di terremoto, dalla distanza dell'epicentro nonché dalle condizioni geomorfologiche. E' indipendente da ciò che l'uomo ha costruito. La vulnerabilità esprime la probabilità che la struttura di un certo tipo possa subire un certo livello di danneggiamento a seguito di un terremoto di una determinata intensità. La misura è legata alla definizione e valutazione del danno, che a sua volta è legato alla perdita o riduzione di funzionalità dell'opera. L'esposizione indica la misura della presenza di beni a rischio e, dunque, la conseguente possibilità di subire un danno (economico, in vite umane, ai beni culturali, ecc.).

A partire dal 2003, in Italia si è avviato un cambiamento dei concetti legati all'analisi e alla classificazione degli eventi sismici, che ha condotto a definire la mappa di pericolosità sismica, presente nell'Ordinanza del Presidente del consiglio dei ministri 3274/20037, e i criteri generali per la classificazione sismica del territorio.

¹ La sismicità indica la frequenza e la forza con cui si manifestano i terremoti, ed è una caratteristica fisica del territorio

² www.protezionecivile.gov.it

Questa mappa è diventata ufficialmente di riferimento con l’Ordinanza n. 3519/20068 che ha suddiviso l’intero territorio nazionale in quattro zone sismiche sulla base del valore dell’accelerazione orizzontale massima su suolo rigido o pianeggiante, con una probabilità del 10% di essere superata in 50 anni. In particolare, in base a tale definizione, la città di Verona è stata inserita nelle zona sismica 3.

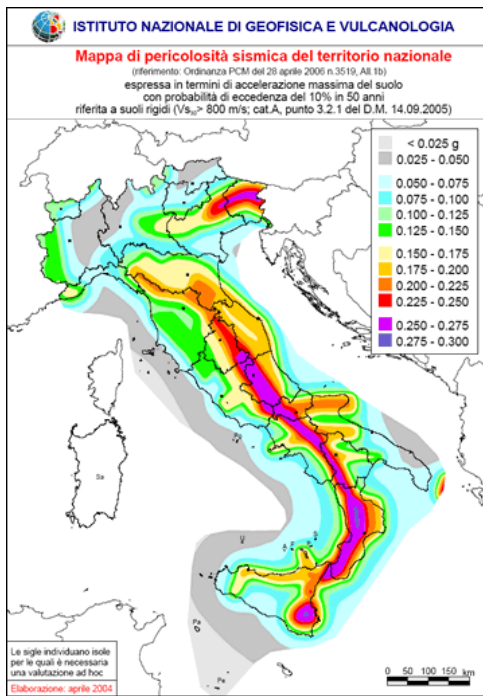


Figura 4.3: Mappa di pericolosità sismica del territorio nazionale -16mo percentile

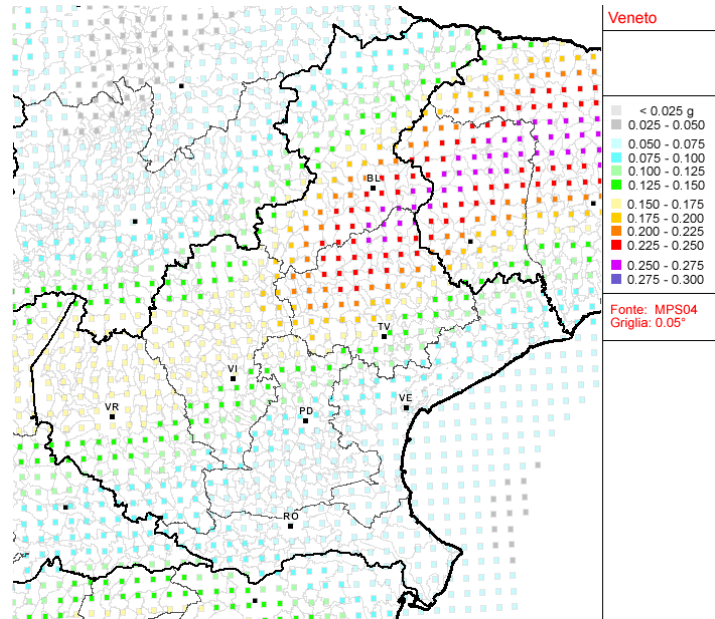


Figura 4.4: Mappa di pericolosità sismica della regione Veneto (tratte da www.emidius.mi.ingv.it)

4.2.1 Azione sismica

Verona è stata interessata da una serie di eventi sismici per la cui incidenza sono state prese a riferimento le informazioni reperite nel sito dell'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia e nel Database Macrosismico Italiano del 2011 (DBMI11), ivi contenuto.

In totale, la città, dal 1065 al 1996, è stata coinvolta in 98 eventi sismici, di differenti intensità e i cui epicentri sono stati registrati in molte località del nord e del centro Italia.

Di seguito vengono riportati gli eventi sismici che hanno coinvolto la città di Verona negli anni sopracitati: in ascissa sono indicati gli anni mentre in ordinata l’intensità sismica MCS.

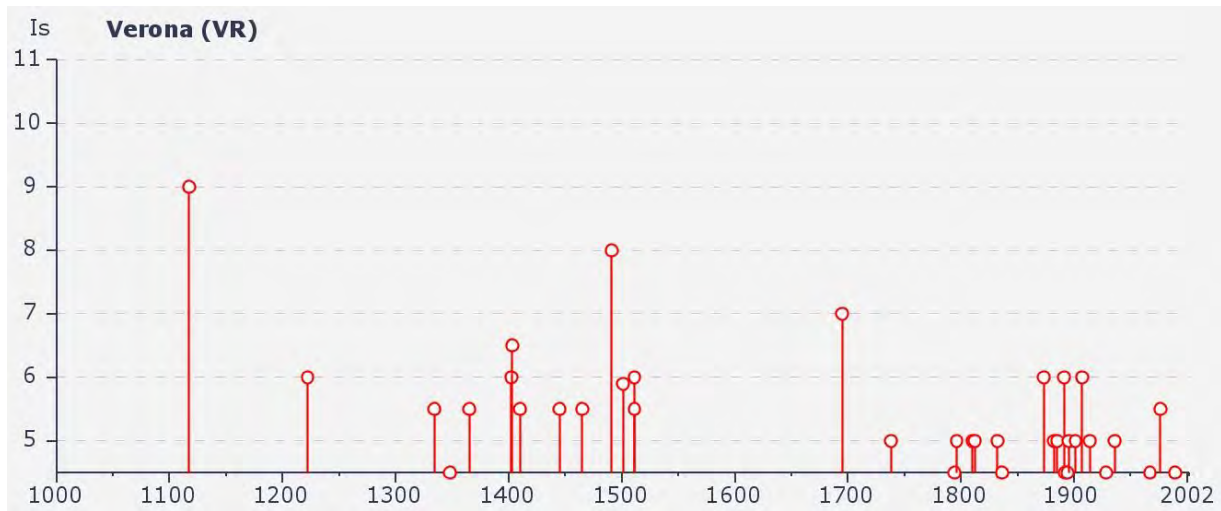
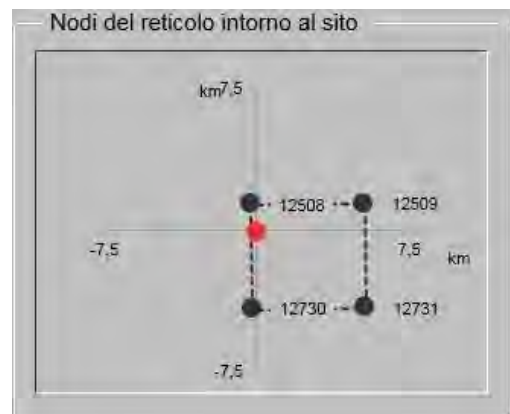


Fig. 4.5 – Diagramma della storia sismica di Verona (Tratto da www.emidius.mi.ingv.it)

Per quanto riguarda la definizione dello stato limite si è fatto riferimento al documento Excel SPETTRI – NTC, che fornisce gli spettri di risposta relativi alle componenti (orizzontale e verticale) delle azioni sismiche di progetto per il generico sito del territorio nazionale.

Tramite tale strumento si individua la pericolosità sismica e, attraverso la scelta della strategia di progettazione, l'azione di progetto. L'analisi si compone di tre fasi:



FASE 1: Individuazione della pericolosità del sito.

Tramite la ricerca per comune o l'inserimento di coordinate si possono ottenere:

- gli spettri di risposta elastici
- i valori dei parametri a_g , F_0 , T_c^* .

Il teatro romano si caratterizza per le seguenti coordinate: latitudine 45,4161; longitudine 11,8828.

FASE 2: Scelta della strategia di progettazione.

Considerando che l'edificio in esame costituisce un bene culturale e di interesse storico artistico la vita nominale è stata fissata pari a 50 anni mentre la classe d'uso a 1,5.

Il periodo di riferimento V_R risulta dal prodotto dei due precedenti dati e risulta pari a 75 anni con un rispettivo periodo di ritorno di 475 anni.

I seguenti grafici rappresentano i valori di progetto dei parametri a_g , F_0 , T_C^* in funzione del periodo di ritorno T_R associati a ciascun stato limite.

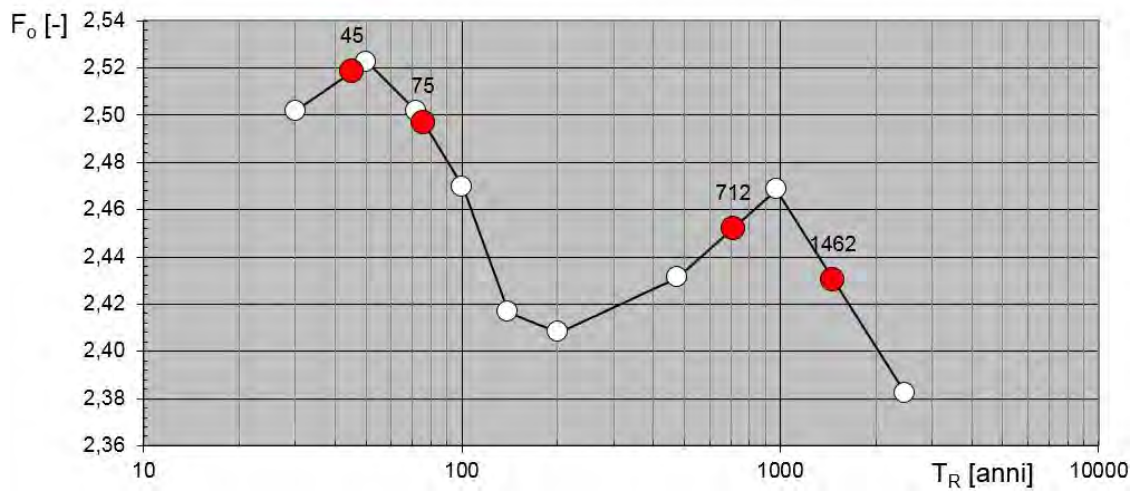
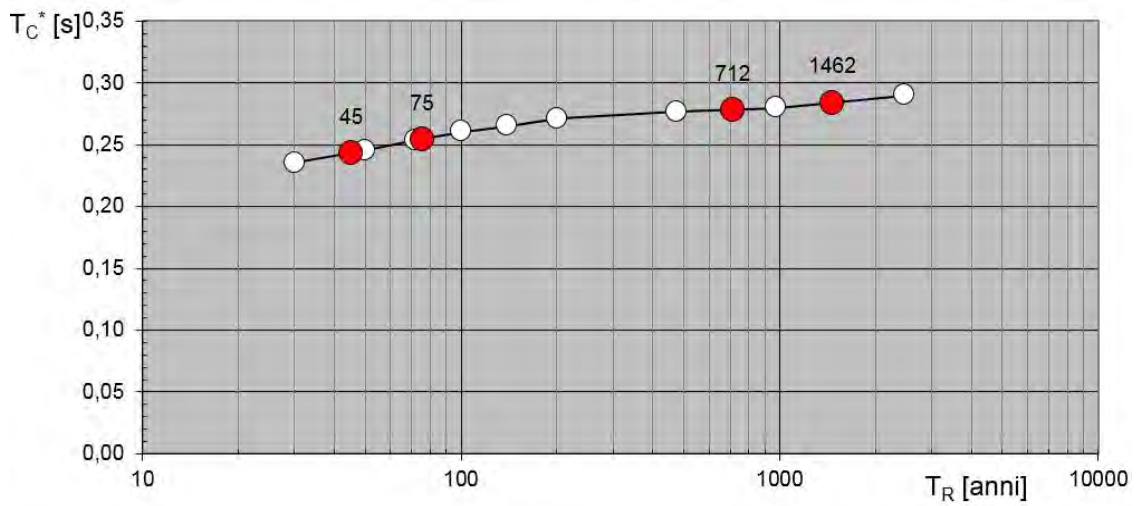
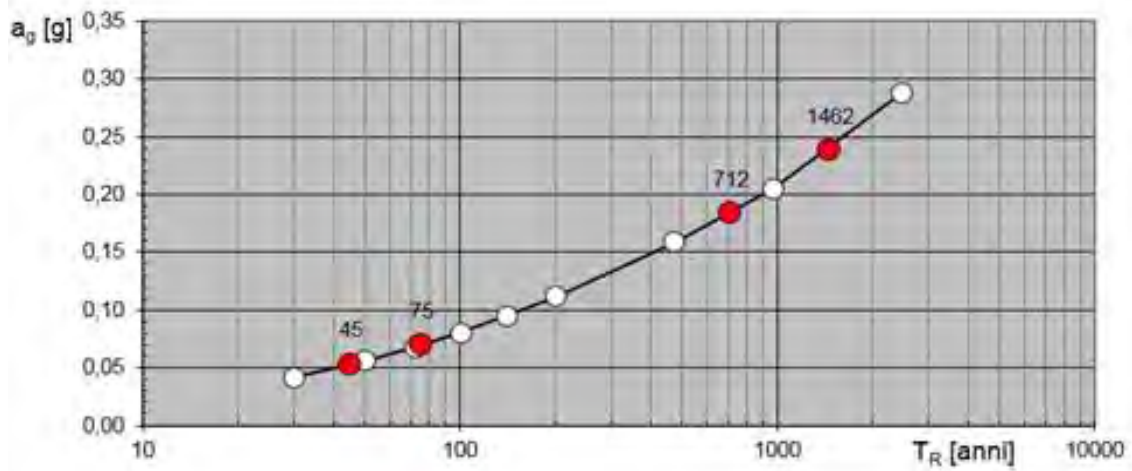


Figura 4.6 - Valori di progetto dei parametri a_g , F_0 , T_C^*

Spettri di risposta elastici per i diversi stati limite

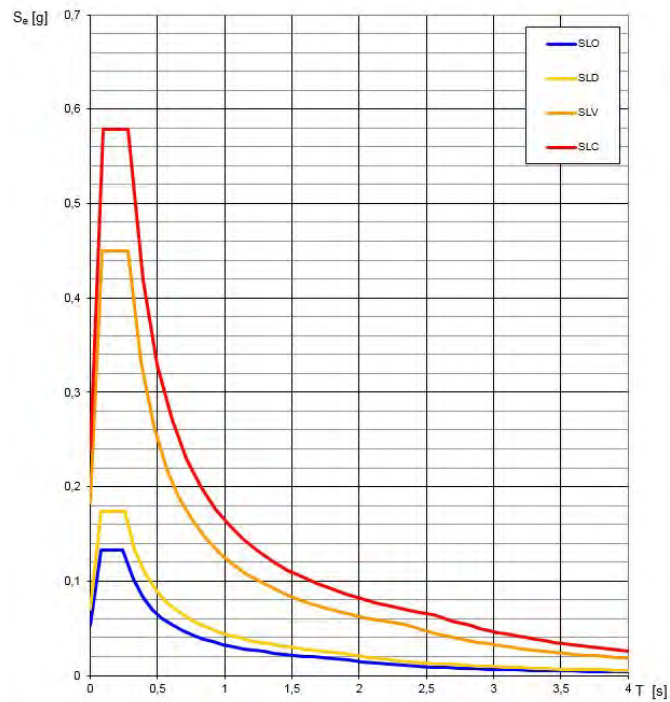


Figura 4.7 - Spettri di risposta elastici

FASE 3: Determinazione dell'azione di progetto.

Considerando il SLV si possono individuare lo Spettro di progetto elastico (SLE), lo spettro di risposta inelastico (SLU) e lo spettro di risposta per lo stato limite di salvaguardia.

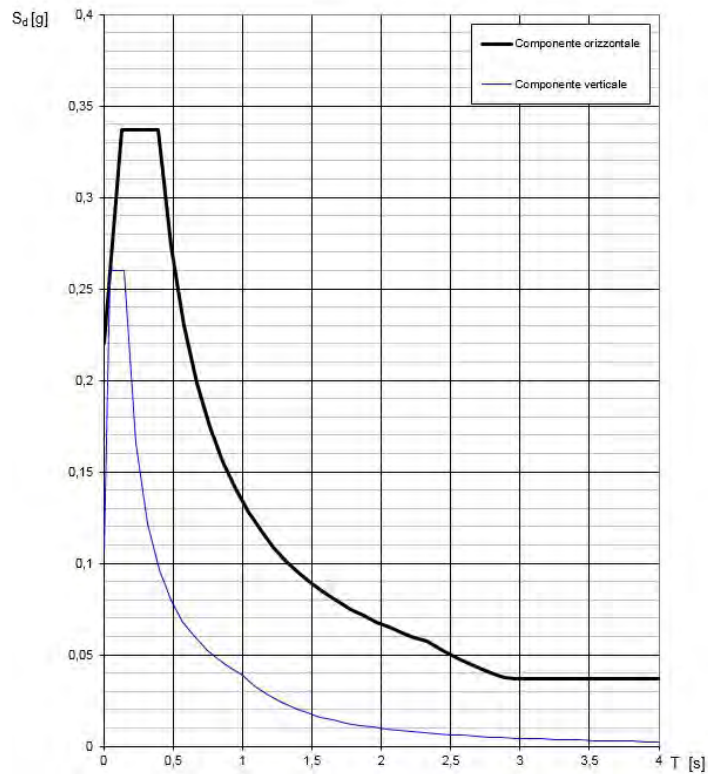


Figura 4.8 - Spettri di risposta (componenti orizz. e vert.) per lo stato limite SLV

In sintesi queste sono le caratteristiche dello stato limite considerate nelle verifiche.

STATO LIMITE DI RIFERIMENTO	SLV	
<i>Latitudine Teatro Romano Verona</i>		45.447491
<i>Longitudine Teatro Romano Verona</i>		11.001727
<i>Accelerazione orizzontale massima al suolo</i>	a_g	0,183 g
<i>Valore massimo fattore di amplificazione dello spettro in accelerazione orizzontale</i>	F₀	2,452
<i>Periodo di inizio tratto a velocità costante dello spettro in accelerazione orizzontale</i>	T_C[*]	0,278 s
<i>Vita nominale</i>	V_N	50
<i>Classe d'uso (valore del coefficiente d'uso)</i>	c_u	1,5
<i>Periodo di riferimento dell'azione sismica</i>	V_R	75
<i>Probabilità di superamento</i>	P_{VR}	0,10
<i>Tempo di ritorno dell'azione sismica</i>	T_R	475
<i>Categoria di sottosuolo</i>	B	
<i>Coefficienti di amplificazione stratigrafica</i>	S_S	1,2
	C_C	1,421
<i>Coefficiente di amplificazione topografica</i>	S_T	1,2
<i>Coefficiente per categoria di sottosuolo e delle condizioni topografiche</i>	S	1,44
<i>Periodo corrispondente all'inizio del tratto ad accelerazione costante dello spettro</i>	T_B	0,132 s
<i>Periodo corrispondente all'inizio del tratto a velocità costante dello spettro</i>	T_C	0,396 s
<i>Periodo corrispondente all'inizio del tratto a spostamento costante dello spettro</i>	T_D	2,331 s
<i>Fattore di struttura</i>	q	2

Tabella 4.1 - Spettri di risposta (componenti orizz. e vert.) per lo stato limite SLV

4.3 Rilievo fotografico

Il rilievo fotografico è risultato utile per la conoscenza approfondita delle strutture presenti al Teatro Romano, al fine di valutare lo stato di fatto dell'intero complesso e delle sue parti ed effettuare una analisi primaria sulle vulnerabilità e sullo stato di degrado presente o in atto. Nelle tavole in allegato viene riportato il rilievo fotografico eseguito mediante l'uso di coni ottici per permettere di restituire in pianta la posizione delle relative fotografie.

La documentazione fotografica, che mostra le parti principali del Teatro Romano, è stata acquisita nei giorni 27/03, 31/03, 1/04, 10/06 e 12/06 dell'anno 2014.

Si è scelto di suddividere l'area in tre principali macro zone, in base ai punti in cui sono stati applicati i sensori del sistema di monitoraggio, di cui se ne parlerà successivamente in modo approfondito.

Le tre aree di interesse per lo studio delle strutture del Teatro sono visibili nella figura 4.9 e sono:

- *Zona Chiesa*, comprende i cinque setti liberi ad est e l'arco della *parados* orientale
- *Zona Museo*, comprende i quattro setti liberi ad ovest
- *Zona Scena*, comprende i resti della scena posti di fronte alla *cavea*

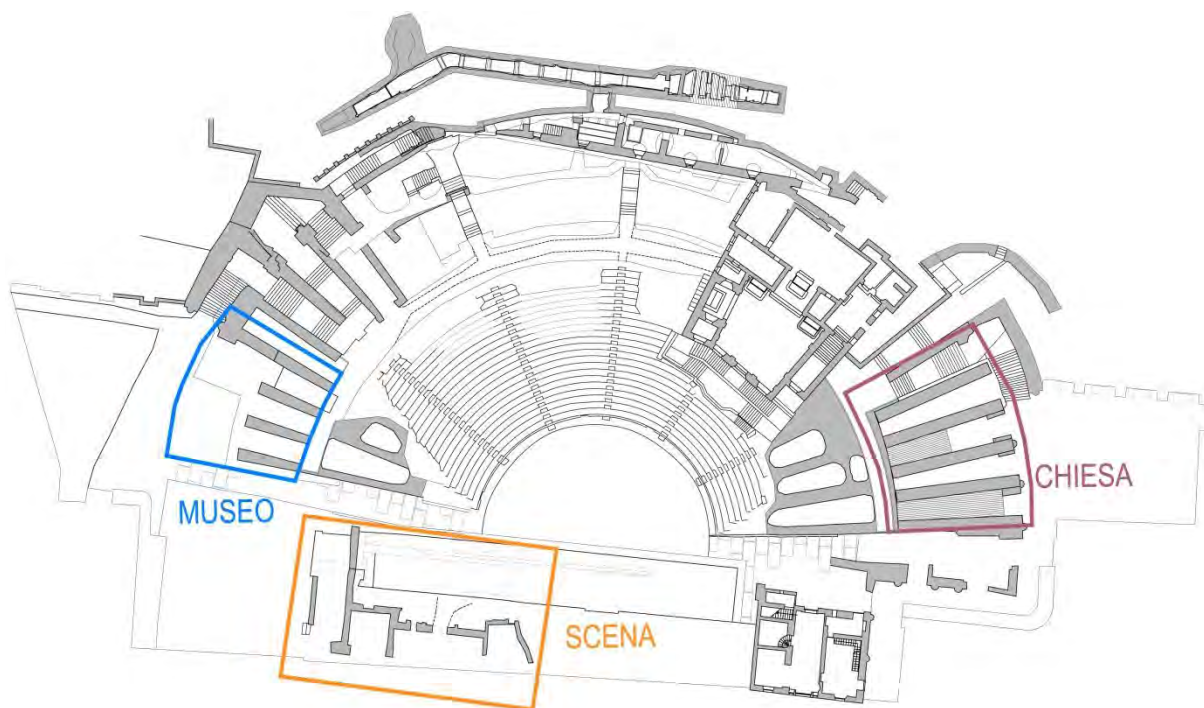


Fig. 4.9 – Indicazione delle tre zone in analisi

4.3.1 Descrizione delle zone del Teatro

Per una maggior comprensione e unificazione del lessico, le sostruzioni rimaste in piedi sono state soprannominate.

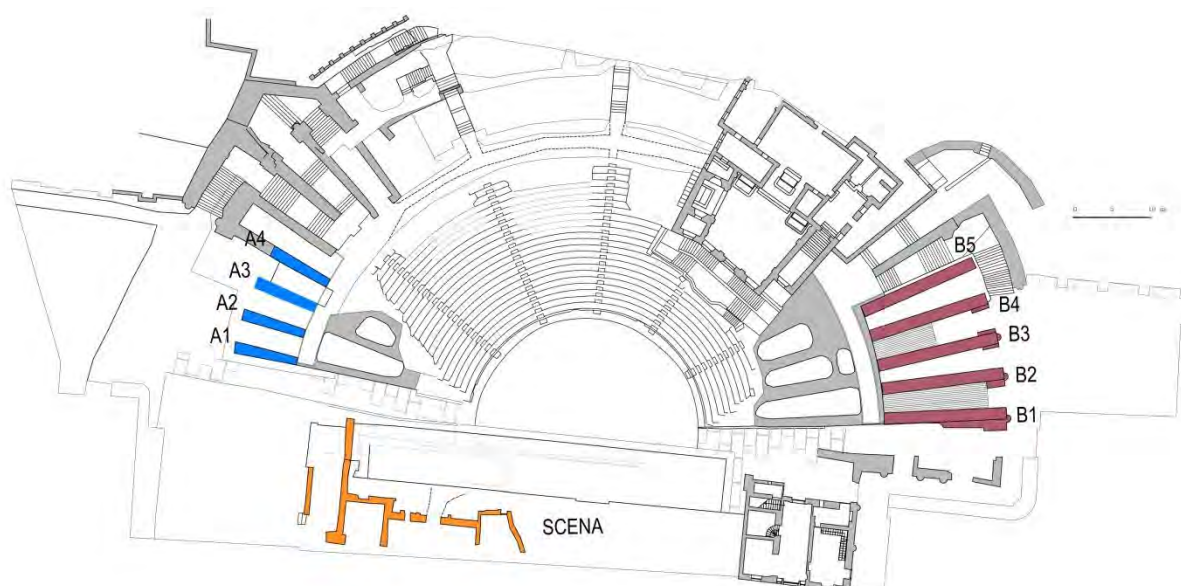


Fig. 4.10 – Nomi delle sostruzioni e della scena

I setti della Zona Museo assumono la denominazione di tipo A (1-2-3-4)

I setti della Zona Chiesa assumono la denominazione di tipo B (1-2-3-4-5)

La struttura della Zona Scena assume la denominazione di tipo C

Esaminando la zona ovest del *Museo* è presente una coppia di setti murari liberi, denominati A3 e A4, che si elevano per un'altezza rispettivamente di circa 13 e 15 m. Essi si presentano accoppiati in corrispondenza del livello della prima precinzione (9.15 m dal livello dell'orchestra), per mezzo di una voltina in laterizio, inserita in uno degli interventi di ripristino, apparentemente per ridurre la luce di inflessione libera del setto più snello, quello a valle. Questo setto, A3, presenta in sommità i resti dell'imposta di un arco, che costituiscono una massa concentrata sulla sommità di una struttura verticale libera. Relativamente a questa sostruzione, si è giunti a conoscenza che nella fase di interventi di ripristino, avvenuta negli anni Cinquanta, il setto è stato armato con barre verticali lungo tutta l'altezza, e cucito, sempre con barre metalliche, in numerosi punti.

Accanto a questi due setti di altezza considerevole vi sono due setti più bassi, A1 e A2, che si innalzano a una quota di circa 5.10 metri, quindi sono molto più bassi dei muri limitrofi. Tutti i setti si innestano in una struttura caratterizzata da una serie di arcate, su cui si imposta una passerella a quota di circa 9 metri dal livello del terreno.



Fig. 4.11 – Vista dei setti liberi A3 e A4



Fig. 4.12 – Vista dei setti della zona Museo



Fig. 4.13 – Vista dei setti liberi A2 e A1



Fig. 4.14 – Vista del setto A2

Nella zona *Chiesa* posta ad est, vicino alla Chiesa dei SS. Siro e Libera, sopravvivono buona parte dei restanti muri radiali di sostruzione della cavea, con un'altezza di circa 13-14 m.

Il setto denominato B1 si innesta nell'arco centinato della *parados* orientale, e in successione troviamo i setti B2, B3, B4 e B5. Ad eccezione del primo setto, B1, tutti i rimanenti setti sono contraddistinti dall'assenza di vincoli laterali e dalla particolare snellezza (soprattutto i setti B2 e B3), rapportata ad un'elevata altezza. Così come i setti della zona *Museo* descritti in precedenza, anche quelli della zona *Chiesa* poggiano su una parete caratterizzata dalla presenza di archi, su cui si imposta una passerella a quota di circa 9 m. Questa doveva essere l'altezza della prima precinzione della cavea del teatro. Tra i setti del gruppo B si evidenzia la presenza di baracche, usate come deposito di attrezzature di scena durante la stagione teatrale estiva, dotate di coperture in lamiera. Queste hanno reso difficoltoso il rilievo e l'ispezione attraverso i setti.



Fig. 4.15 – Vista dei setti liberi del gruppo B

Della zona *Scena* infine rimane solo una parte molto limitata del proscenio a ovest, che rappresenta un terzo in elevazione e meno della metà in larghezza di ciò che doveva essere l'originaria struttura. Un'ala è sostenuta da puntelli mentre alcune porzioni sono tenute insieme da tiranti.



Fig. 4.16 – Vista della zona scena

4.4 Rilievo geometrico

Il rilievo geometrico di base per la realizzazione della pianta del Teatro Romano, eseguito per il lavoro di tesi ‘Analisi di Vulnerabilità sismica del Teatro Romano di Verona’ nell’anno accademico 2009/2010, è stato ripreso e integrato dal rilievo geometrico eseguito sul sito. Il nostro lavoro è consistito nell’unificare tutte le informazioni disponibili ed allargare il quadro conoscitivo delle strutture del teatro. Abbiamo perciò fornito negli allegati le tavole con la planimetria aggiornata in scala 1:400, mentre i prospetti sono stati riportati in scala 1:100.

La pianta del teatro è stata realizzata prendendo a riferimento il rilievo del Benvegnù del 1980 e integrando le informazioni con la pianta della Chiesa dei SS. Siro e Libera, per avere un rilievo corrispondente allo stato attuale.

Si sono poi realizzati i prospetti di ogni singolo setto in dettaglio e sono stati misurati in altezza, lunghezza e spessore mediante distanziometri laser e metri. Questo lavoro è stato utile e indispensabile al fine di avere il giusto dimensionamento delle strutture, in quanto la forma di ciascuno setto preso in esame è stata ricavata mediante la realizzazione di fotopiani.

La difficoltà di raggiungere certi punti per la presenza di baracche e l’irregolarità delle strutture murarie ha consentito però una restituzione non del tutto esatta dei setti e in alcuni punti sono state fatte delle approssimazioni grafiche, ma fedeli comunque al rilievo visivo.

Si rimanda alle tavole presenti nell’allegato (*All.A, all.II*) per le informazioni relative al rilievo geometrico delle strutture del teatro.

Di seguito si riportano la pianta e i principali prospetti dei setti a valle in scala grafica.

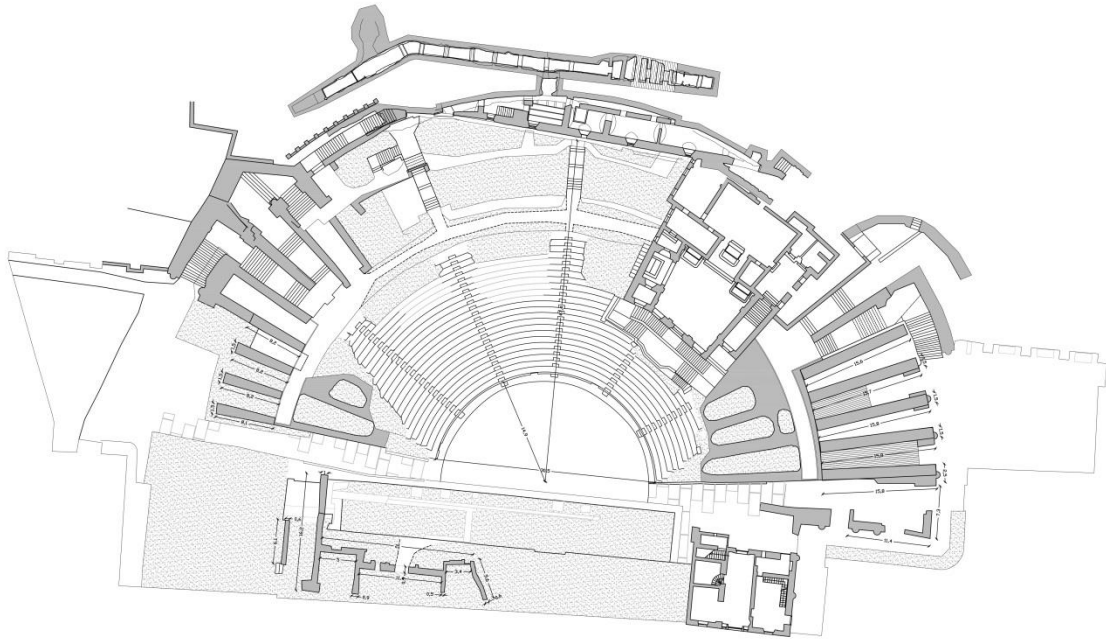


Fig. 4.17 – Pianta Teatro Romano

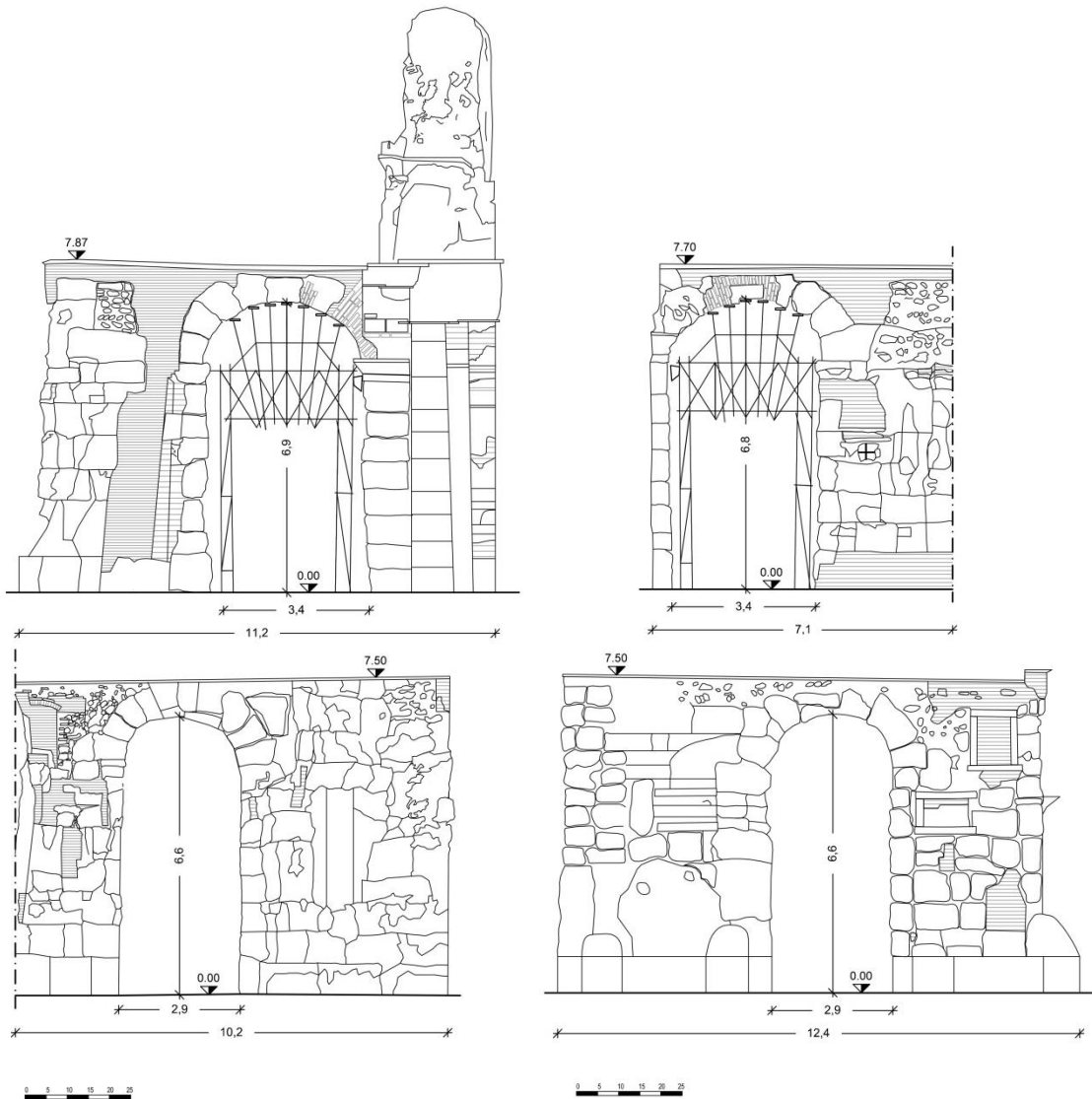


Fig. 4.18 – Arco, prospetto esterno e interno

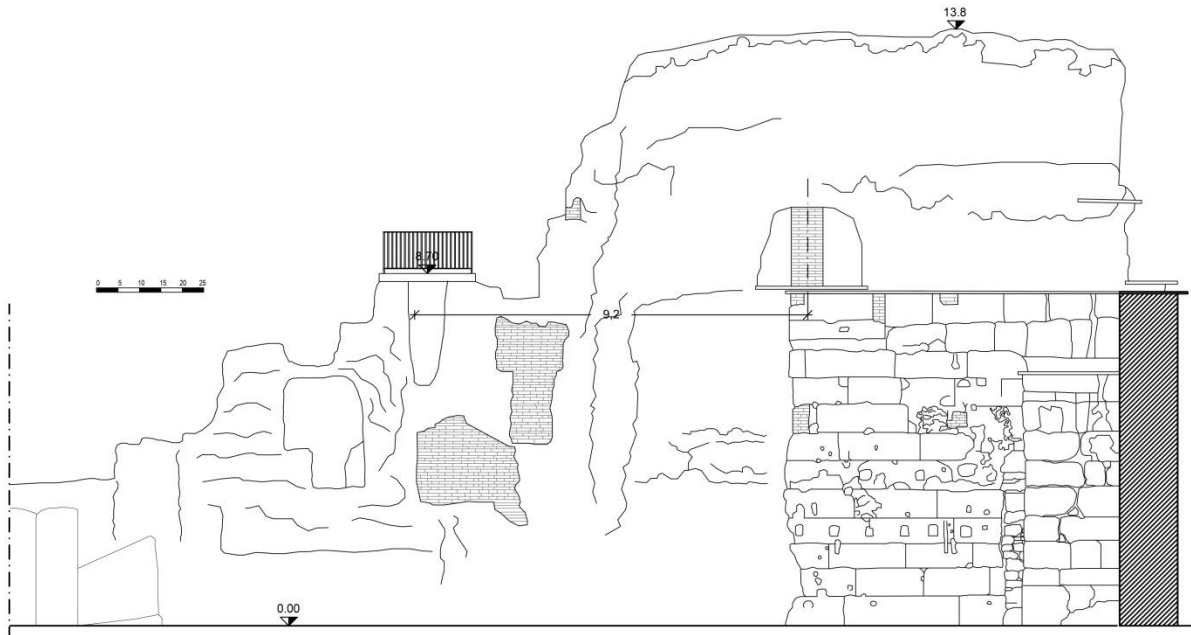


Fig. 4.19 – Prospetto a valle del setto B1

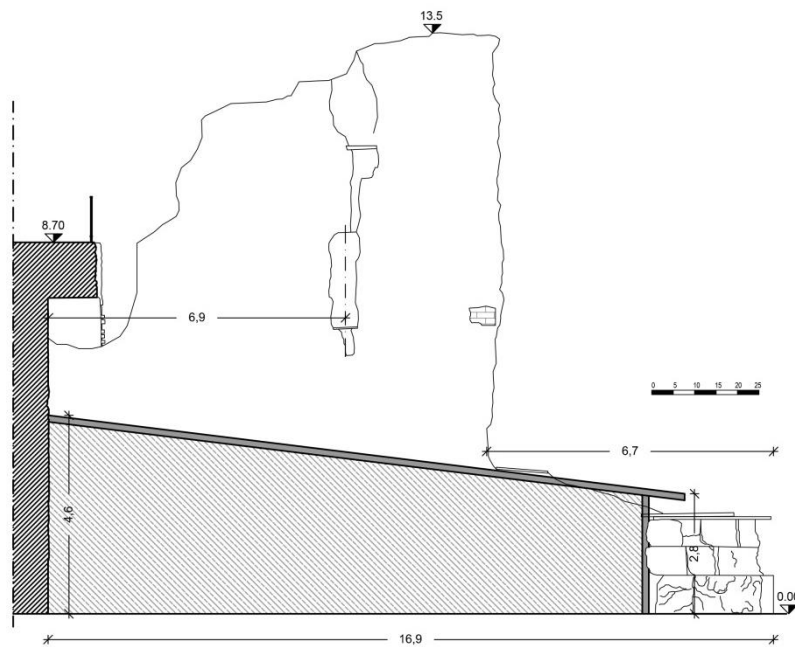


Fig. 4.20 – Prospetto a valle del setto B2

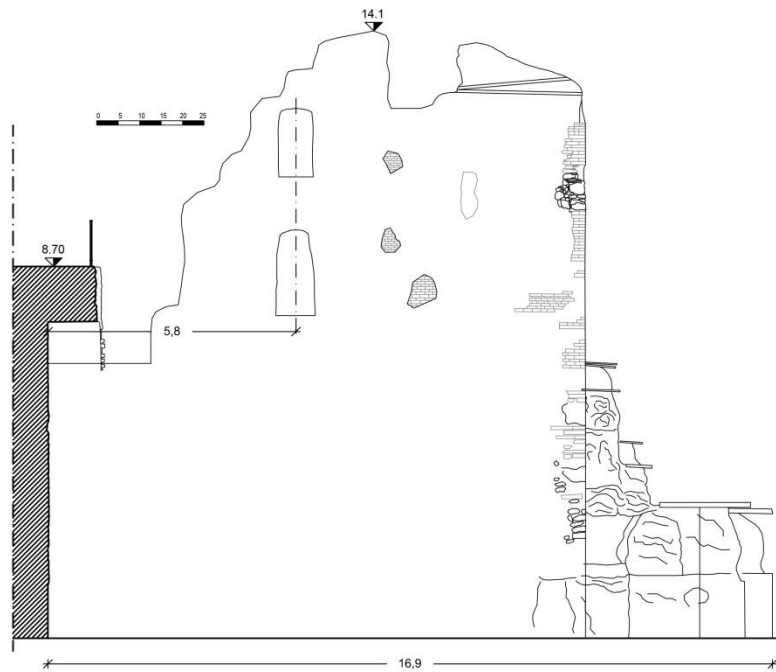


Fig. 4.21 – Prospetto a valle del setto B3

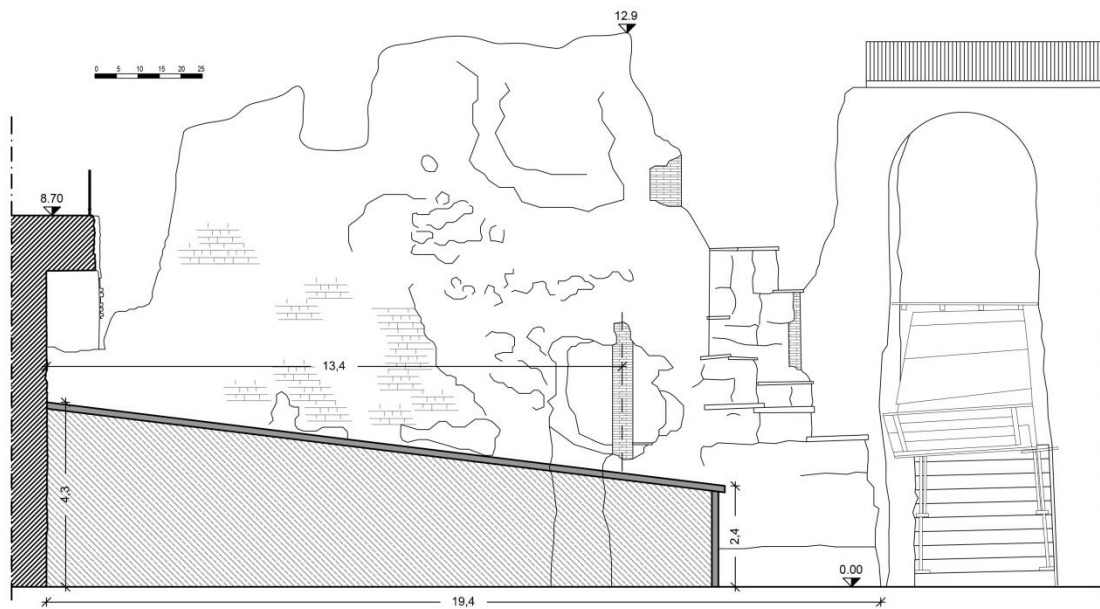


Fig. 4.22 – Prospetto a valle del setto B4

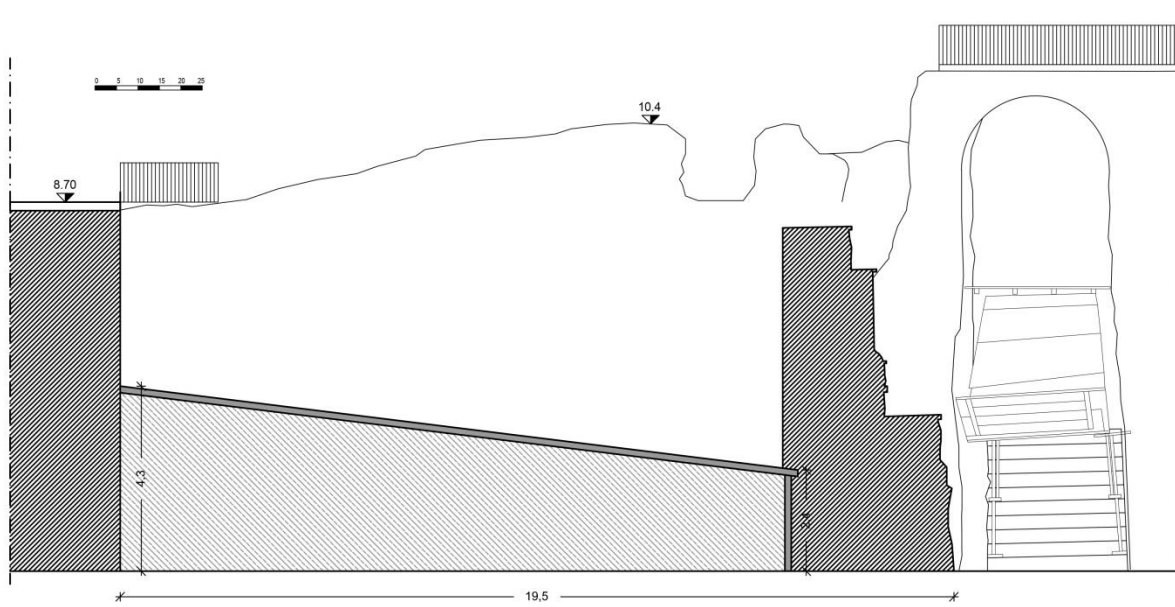


Fig. 4.23 – Prospetto a valle del setto B5

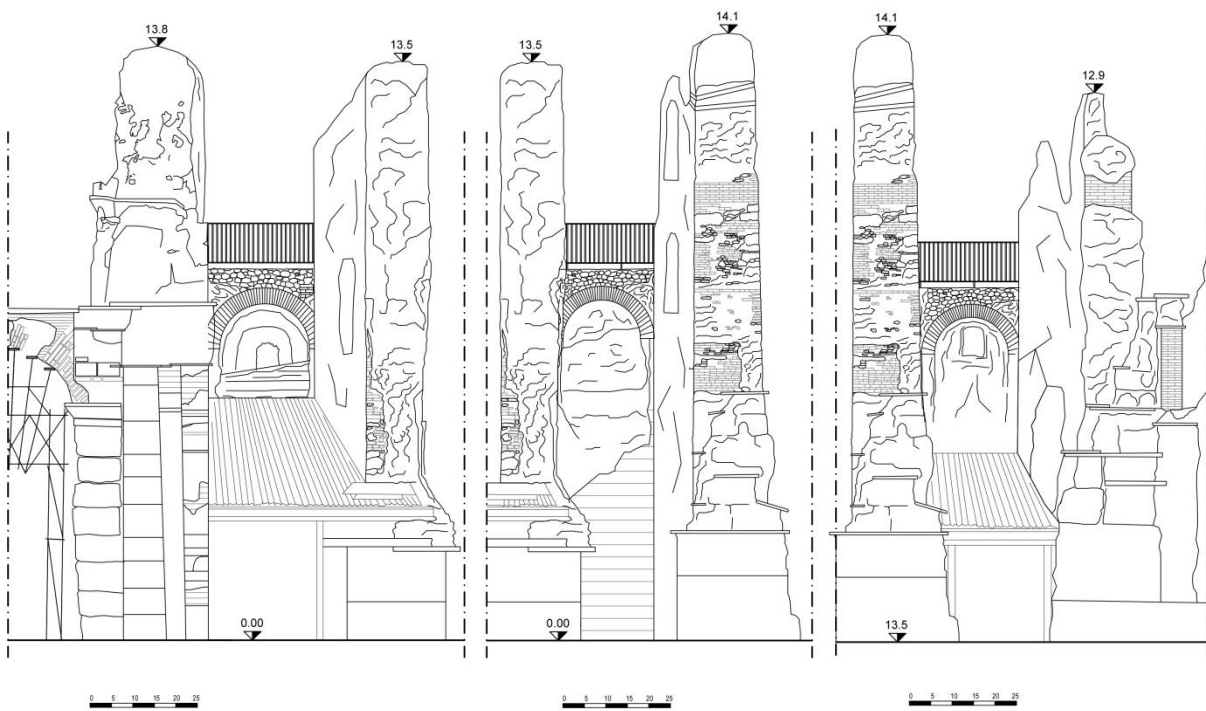


Fig. 4.24 – Prospetto laterale B1-B2, B2-B3, B3-B4

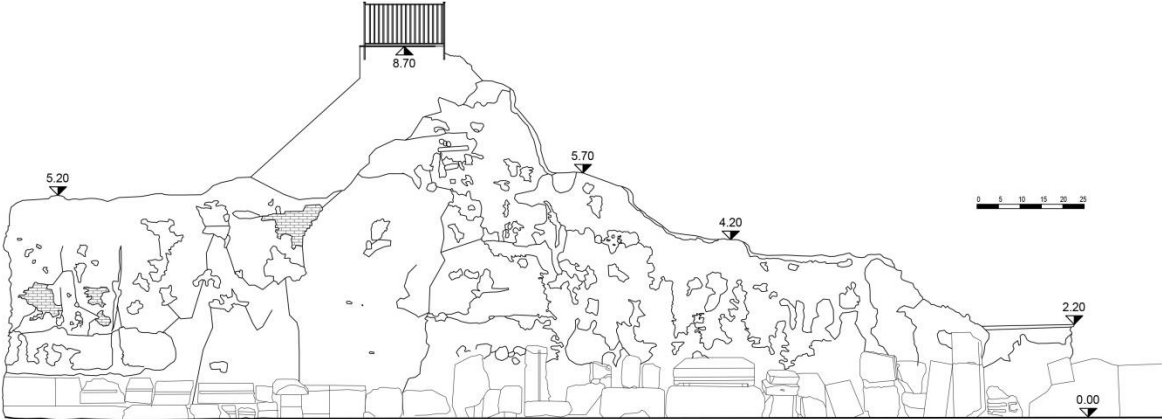


Fig. 4.25 – Prospetto a valle del setto A1

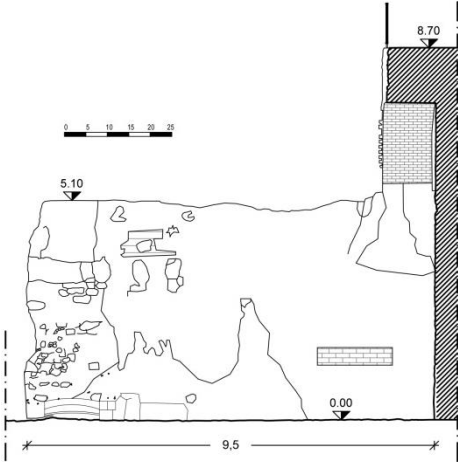


Fig. 4.26 – Prospetto a valle del setto A2

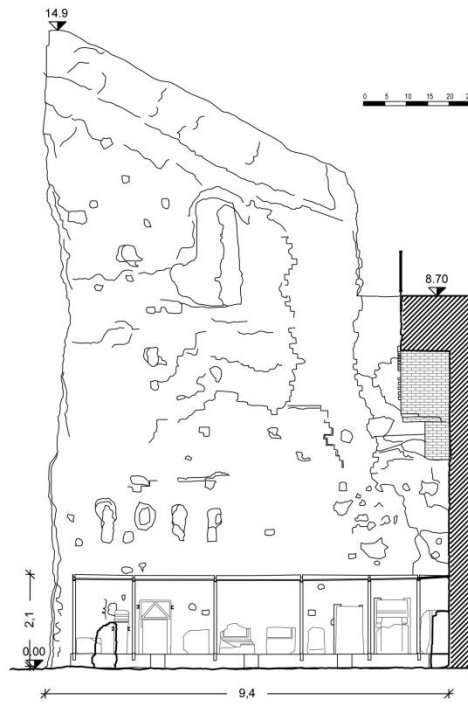


Fig. 4.27 – Prospetto a valle del setto A3

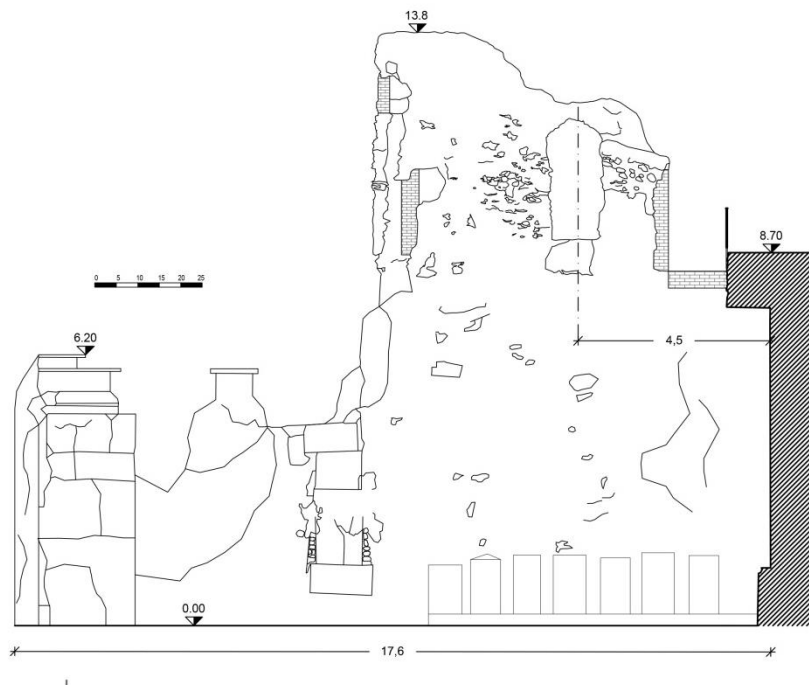


Fig. 4.28 – Prospetto a valle del setto A4

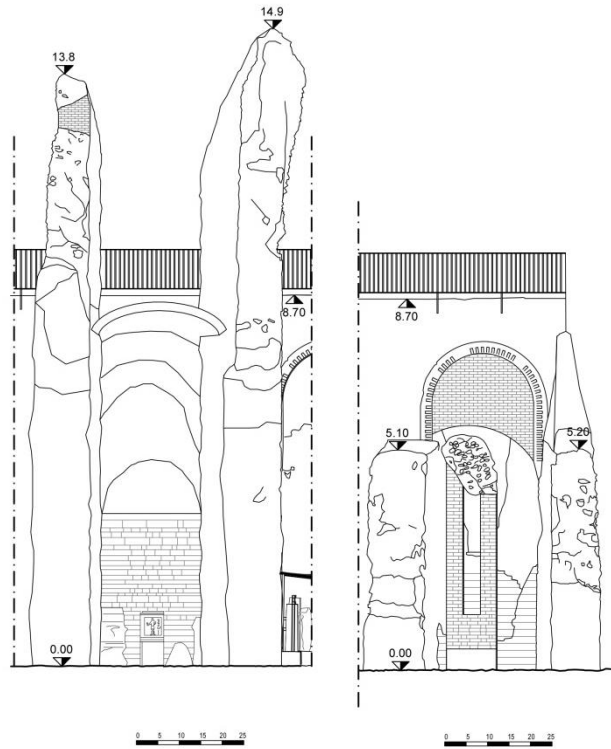


Fig. 4.29 – Prospetto a valle del setto A1-A2, A3-A4

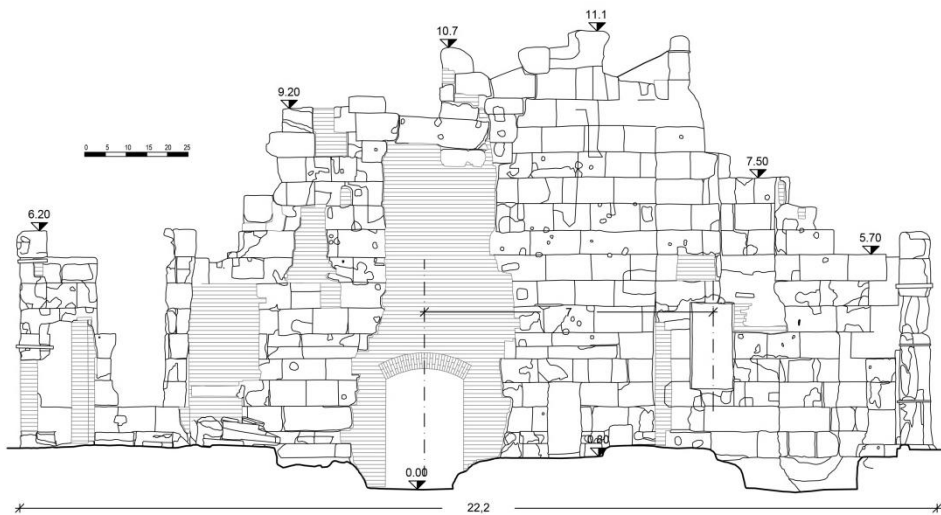


Fig. 4.30 – Prospetto frontale della scena

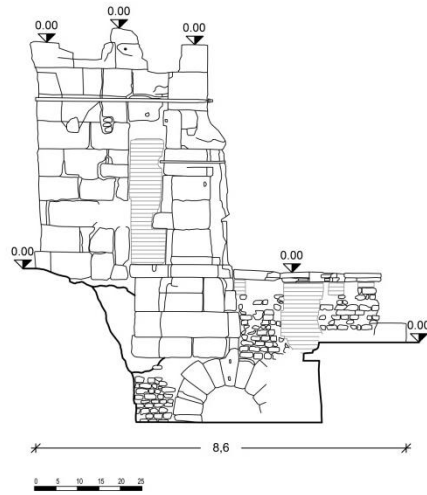


Fig. 4.31 – Prospetto porzione della scena laterale

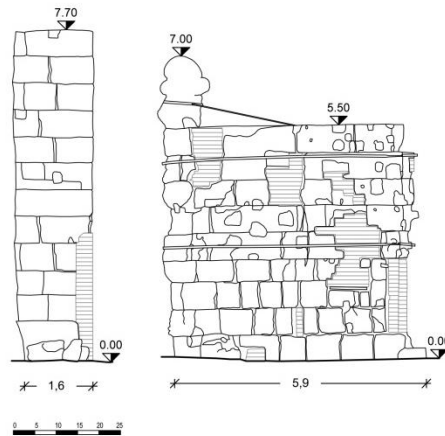


Fig. 4.32 – Prospetto porzione della scena laterale

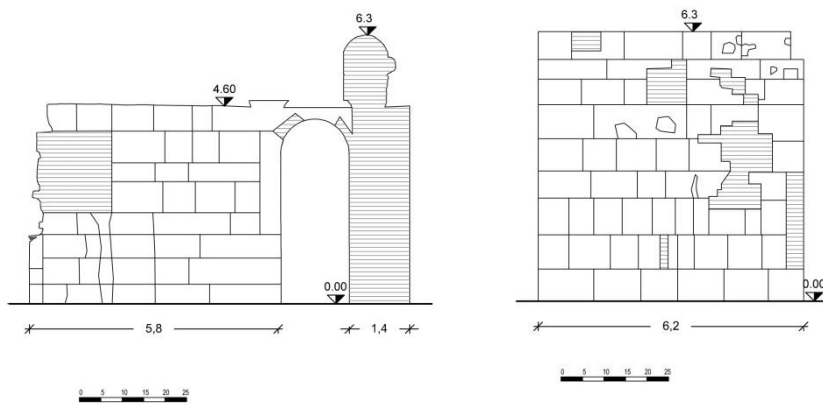


Fig. 4.33 – Prospetto porzione della scena laterale

4.5 Rilievo tipologico strutturale

Per analizzare la qualità muraria presente nelle strutture di interesse per il monitoraggio, si è ritenuto utile fare una valutazione di sei paramenti. Uno alla base e in sommità rispettivamente dei setti della zona Chiesa e della zona Museo, uno sulla Scena e uno sull'arco di ingresso.

Sono state eseguite le schede della qualità muraria, presenti come allegato alla seguente tesi (*All.B*), e dalla loro compilazione sono emerse due principali tipologie di muratura.

Per quanto riguarda i setti sia della Zona Chiesa che della Zona Museo e l'arco si ipotizza una *muratura a conci sbazzati, con paramento di limitato spessore e nucleo interno*.

Infatti il prospetto del campione localizzato in sommità del setto B1 della Zona Chiesa si presenta a corsi orizzontali e con sfalsamento parziale dei giunti verticali; la malta risulta di scarsa qualità e gli elementi resistenti sono blocchi di tufo di medie dimensioni i cui spigoli non sono finiti. Dall'osservazione della sezione la muratura risulta costituita da tre paramenti, di cui quello interno, di dimensioni maggiori agli altri due, costituito da ciottoli e pietre legati da malta friabile. I paramenti esterni in diverse porzioni del setto non sono più presenti.

Il calcolo dell'indice di qualità ha evidenziato che la muratura appartiene alla categoria B per le azioni verticali e di categoria C per le azioni fuori e nel piano.

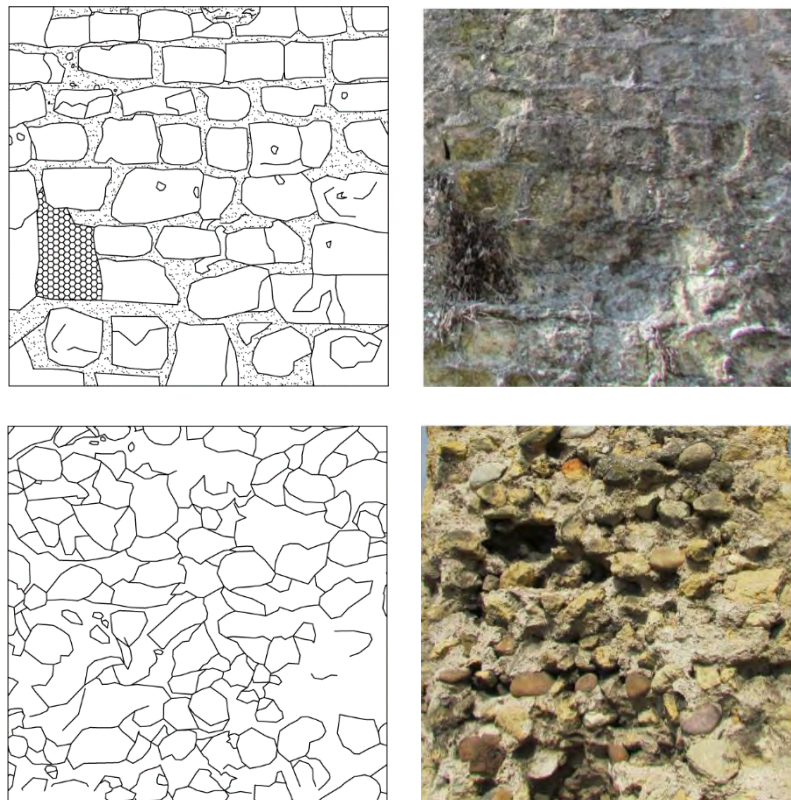


Fig. 4.34 – Prospetto e sezione del paramento del setto B1

Le *Linee Guida per la valutazione e riduzione del rischio sismico* indicano i seguenti valori dei parametri meccanici per tale tipologia di muratura:

<i>Resistenza media a compressione</i>	f_m	200 ÷ 300	N/cm ²
<i>Resistenza media a taglio</i>	τ_0	3,5 ÷ 5,1	N/cm ²
<i>Valore medio del modulo di elasticità normale</i>	E	1020 ÷ 1440	N/mm ²
<i>Valore medio del modulo di elasticità tangenziale</i>	G	340 ÷ 480	N/mm ²
<i>Peso specifico medio</i>	W	20	KN/m ³

I valori di riferimento dei parametri meccanici (minimi e massimi) sono riferiti a malta di caratteristiche scarse, assenza di ricorsi (listature), paramenti semplicemente accostati o mal collegati, muratura non consolidata, tessitura (nel caso di elementi regolari) a regola d'arte.

Sulla base delle informazioni acquisite sul fabbricato, si assume un livello di conoscenza adeguata LC2 (C8A.1.A., Circ. n. 617 del 02/02/09) in quanto la geometria e dettagli sono noti da rilievo e le proprietà dei materiali sono desunte da prove effettuate sul manufatto (martinetto piatto e prove di caratterizzazione delle malte ed elementi resistenti).

Per un livello di conoscenza LC2 i parametri meccanici sono definiti dalla media dei valori di resistenza e dei moduli elastici riportati nella Tabella della Circolare alle Norme Tecniche.

Il corrispondente fattore di confidenza è **FC=1,2** (Tabella C8A.1.1, Circ. n.617 del 02/09/09) e viene utilizzato per definire le resistenze dei materiali da utilizzare nelle formule di capacità degli elementi.

I valori di calcolo delle resistenze, utilizzando un fattore di sicurezza γ_s pari a 2, risultano quindi:

$$\text{Resistenza a compressione di calcolo} \quad \sigma_r = \frac{f_m}{f_c \gamma_s} = 104,17 \text{ N/cm}^2$$

$$\text{Resistenza a taglio di calcolo} \quad f_{v0} = \frac{\tau_0}{f_c \gamma_s} = 1,71 \text{ N/cm}^2$$

La Scena invece risulta in *muratura in pietre a spacco con buona tessitura*. Infatti essa si presenta a corsi regolari e con giunti verticali parzialmente sfalsati e gli elementi resistenti sono blocchi di tufo grandi dimensioni. Dall'osservazione della sezione la muratura risulta costituita da un solo paramento, costituito da un blocco monolitico.

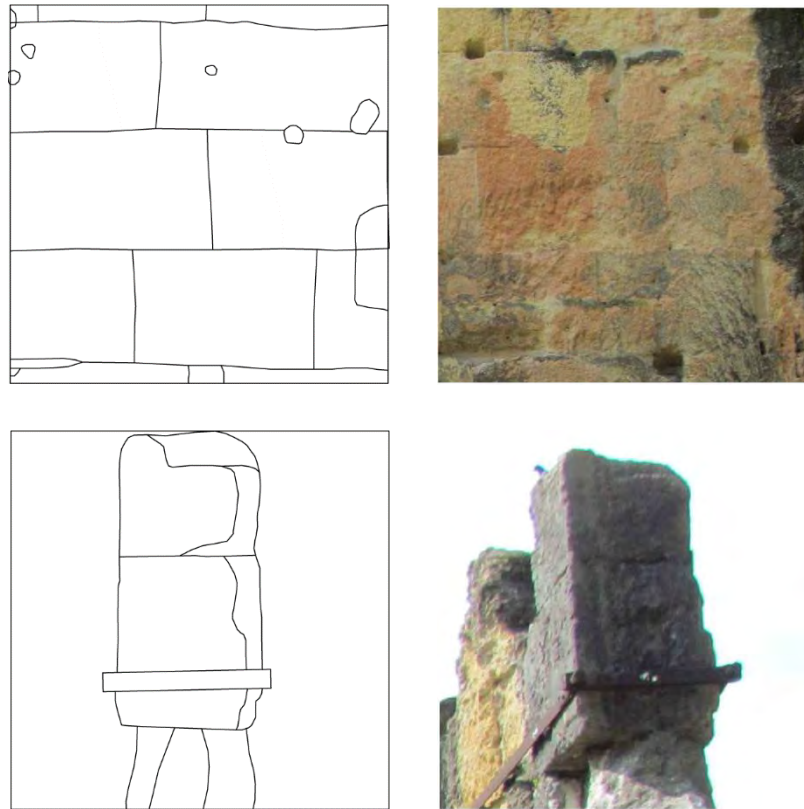


Fig. 4.35 – Prospetto e sezione del paramento della scena

Il calcolo dell'indice di qualità ha evidenziato che la muratura appartiene alla categoria A per le azioni verticali nel piano e fuori piano.

Dalle *Linee Guida* si ricavano i seguenti valori dei parametri per la tipologia considerata:

<i>Resistenza media a compressione</i>	f_m	260 ÷ 380	N/cm ²
<i>Resistenza media a taglio</i>	τ_0	5,6 ÷ 7,4	N/cm ²
<i>Valore medio del modulo di elasticità normale</i>	E	1500 ÷ 1980	N/mm ²
<i>Valore medio del modulo di elasticità tangenziale</i>	G	500 ÷ 660	N/mm ²
<i>Peso specifico medio</i>	W	21	KN/m ³

Utilizzando un fattore di sicurezza γ_s pari a 2, risultano i seguenti valori di calcolo delle resistenze:

$$\text{Resistenza a compressione di calcolo} \quad \sigma_r = \frac{f_m}{f_c \cdot \gamma_s} = 133,33 \text{ N/cm}^2$$

$$\text{Resistenza a taglio di calcolo} \quad f_{vo} = \frac{\tau_0}{f_c \cdot \gamma_s} = 2,71 \text{ N/cm}^2$$

Per quanto riguarda la muratura in laterizio utilizzata per gli interventi di rafforzamento del teatro si considera la tipologia muratura in *mattoni pieni e malta di calce*, indicata dalle Linee Guida. I parametri che la definiscono sono:

Resistenza media a compressione	f_m	240 ÷ 400	N/cm ²
Resistenza media a taglio	τ_0	6 ÷ 9,2	N/cm ²
Valore medio del modulo di elasticità normale	E	1200 ÷ 1800	N/mm ²
Valore medio del modulo di elasticità tangenziale	G	400 ÷ 600	N/mm ²
Peso specifico medio	W	18	kN/m ³

Utilizzando un fattore di sicurezza γ_s pari a 2, risultano i seguenti valori di calcolo delle resistenze:

$$\text{Resistenza a compressione di calcolo } \sigma_r = \frac{f_m}{f_c \cdot \gamma_s} = 133,33 \text{ N/cm}^2$$

$$\text{Resistenza a taglio di calcolo } f_{vo} = \frac{\tau_0}{f_c \cdot \gamma_s} = 3,17 \text{ N/cm}^2$$

4.6 Analisi dei carichi

Nell'analisi dei carichi sono state considerate le azioni derivanti dai pesi propri degli elementi strutturali e quelle derivanti dai carichi dovuti alle azioni naturali quali neve, vento e sisma.

4.6.1 Azione della neve

L'edificio è situato nel comune di Verona (VR) con altitudine di riferimento sul livello del mare $a_s = 71 \text{ m} < 200 \text{ m}$ e zona II di carico neve. Il carico provocato dalla caduta della neve sulle coperture sarà quindi valutato mediante la seguente espressione (§3.4.1 NTC2008):

$$q_s = \mu_i \cdot q_{sk} \cdot C_E \cdot C_T$$

dove:

coefficiente di forma della copertura ($\alpha = 0^\circ$)	$\mu_i = 0,8$
carico di neve al suolo (Verona, zona II, $a_s < 200 \text{ m}$)	$q_{sk} = 1 \text{ kN/m}^2$
coefficiente di esposizione (classe topografia normale)	$C_E = 1$
coefficiente termico	$C_T = 1$
carico neve sulla copertura	$q_s = 1 \text{ KN/m}^2$

4.6.2 Azione del vento

La pressione del vento è data dalla seguente espressione (§3.3.2 NTC2008):

$$p = q_b \cdot C_e \cdot C_p \cdot C_d$$

dove:

pressione cinetica di riferimento $\frac{1}{2} \rho v_b^2$	$q_b = 390,6 \text{ N/m}^2$
per $a_s = 71 \text{ m} < a_0 = 1000 \text{ m}$ $v_{b,0} = 25 \text{ m/s}$	$\rho = 1,25 \text{ kg/m}^3$

coefficiente di esposizione della struttura

$$c_e = 1,96 *$$

*Poiché infatti l'edificio è ad una distanza dal mare > 30 km e si caratterizza per una classe di rugosità B (aree urbane), esso è classificato nella categoria di esposizione IV. Questa è definita dai seguenti parametri:

$$k_r = 0,22;$$

$$z_0 = 0,3m;$$

$$z_{min} = 8m.$$

Essendo che:

$$z = 13m > z_{min}$$

$$c_t = 1$$

si ha la relazione

$$c_e(z) = k_r^2 \cdot c_t \cdot \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \cdot [7 + c_t \cdot \ln\left(\frac{z}{z_0}\right)] = 1,96$$

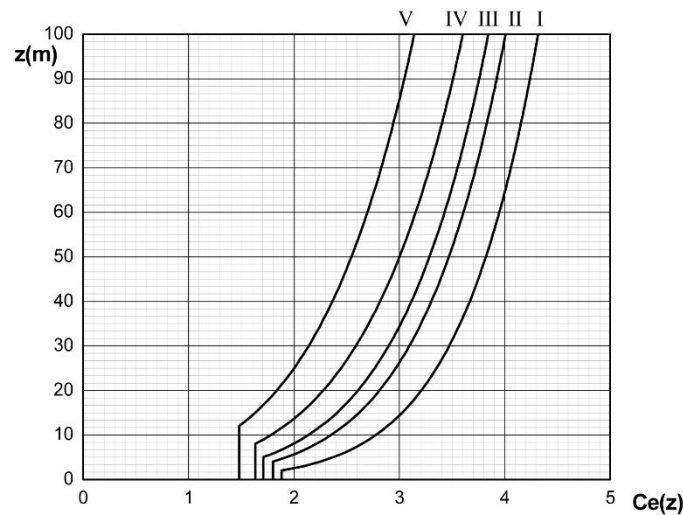


Fig. 4.36 – Categoria di esposizione

coefficiente di forma funzione della scabrezza della superficie $c_p = -0,4$ (sottovento)

coefficiente di forma funzione della scabrezza della superficie $c_p = 0,8$ (sopravento)

coefficiente dinamico

$$c_p = 1$$

Pressione nella parete sopravvento

$$p = 612,5 \text{ N/m}^2 \text{ (con } c_p = 0,8)$$

Pressione nella parete sottovento

$$p = -306,2 \text{ N/m}^2 \text{ (con } c_p = -0,4).$$

4.7 Rilievo critico del danno

In questo capitolo vengono analizzate le singole strutture sulla base di un attento rilievo critico, per evidenziare le principali vulnerabilità presenti e per avere un quadro generale sullo stato di conservazione delle strutture murarie e sul degrado che le interessa.

4.7.1 Stato di degrado

Le strutture oggetto di studio presentano molteplici tipologie di degrado. In base alla diversa esposizione e alle differenti altezze dei setti, queste risultano più o meno visibili. Durante i sopralluoghi in sito, le forme di degrado presenti sui prospetti sono state catalogate procedendo zona per zona e seguendo le classificazioni riportate all'interno della 'UNI 11182 – Materiali lapidei naturali ed artificiali: descrizione della forma di alterazione' che sostituisce la 'Normal 1/88 – Alterazioni macroscopiche dei materiali lapidei: lessico' (ICR – Istituto Centrale per il Restauro). Tale rilievo è seguente alle prove chimico-fisiche già eseguite nell'anno 2000 e integra graficamente parte del lavoro già svolto sulla qualità dei materiali del teatro, così da ottenere una valutazione esaustiva riguardo le reali condizioni delle costruzioni in oggetto.

Di seguito sono riportate le principali forme di degrado riscontrate, con degli esempi fotografici specifici. Il rilievo globale è rimandato infine alle tavole allegate (*All.A all.III*).

- **Alterazione cromatica:** alterazione che si manifesta attraverso la variazione di uno o più parametri che definiscono il colore: tinta (hue), chiarezza (value), saturazione (chroma). Può manifestarsi con morfologie diverse a seconda delle condizioni e può riferirsi a zone ampie o localizzate.

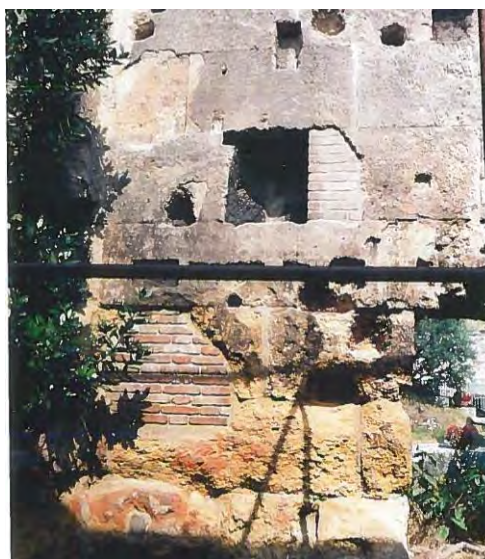


Fig. 4.37 – Parte della scena, caratterizzata per la presenza di croste nere e alterazioni cromatiche rossastre

- **Crosta:** strato superficiale di alterazione del materiale lapideo o dei prodotti utilizzati per eventuali trattamenti. Di spessore variabile, è dura, fragile e distinguibile dalle parti sottostanti per le caratteristiche morfologiche e, spesso, per il colore. Può distaccarsi anche spontaneamente dal substrato che, in genere, si presenta disgregato e/o pulverulento.



Fig. 4.38 – Muro del teatro con ampie zone di distacco, estese lacune nel lapideo, oltre ad ampie croste nere

- **Disgregazione:** decoesione caratterizzata da distacco di granuli o cristalli sotto minime sollecitazioni meccaniche.



Fig. 4.39 – Parte dell'arco di ingresso puntellato con evidente disgregazione

- **Distacco:** soluzione di continuità tra strati superficiali del materiale, sia tra loro che rispetto al substrato. Prelude in genere alla caduta degli strati stessi. Il termine si usa in particolare per gli intonaci e i mosaici. Nel caso di materiali lapidei naturali le parti

distaccate assumono spesso forme specifiche in funzione delle caratteristiche strutturali e tessiturali, e si preferiscono allora voci quali *crosta*, *scagliatura*, *esfoliazione*.



Fig. 4.40 – Setto della zona Chiesa con zone di distacco del paramento esterno rimanente

- **Efflorescenza:** formazione di sostanze, generalmente di colore biancastro e di aspetto cristallino o pulverulento o filamentoso, sulla superficie del manufatto. Nel caso di efflorescenze saline, la cristallizzazione può talvolta avvenire all'interno del materiale provocando spesso il distacco delle parti più superficiali: il fenomeno prende allora il nome di *criptoefflorescenza* e *subefflorescenza*.



Fig. 4.41 – Porzione della scena con presenza di alterazioni cromatiche ed efflorescenze

- **Lacuna/mancanza:** caduta e perdita di parti. Il termine, generico, si usa quando tale forma di degradazione non è descrivibile con altre voci del lessico.



Fig. 4.42 – Mancanza diffusa sul setto della zona Museo

- **Macchia:** alterazione che si manifesta con pigmentazione accidentale e localizzata della superficie; è correlata alla presenza di materiale estraneo al substrato (per esempio: ruggine, sali di rame, sostanze organiche, vernici).



Fig. 4.43 – Macchia sul setto della zona Museo dovuta principalmente a sostanze organiche

- **Presenza di vegetazione:** locuzione usata quando vi sono licheni, muschi e piante.



Fig. 4.44 – Patina biologica diffusa sul setto della zona Museo

I materiali lapidei degradati del Teatro Romano sono affetti da una serie di problematiche di aggressione dovute a varie cause: prima di ogni altra cosa, questi materiali sono, data la loro natura essenzialmente calcarea, molto vulnerabili agli sbalzi termici: la calcite, difatti, per l'anisotropia dei suoi cristalli, tende a dilatarsi ed a restringersi secondo direzioni preferenziali, con decoesione degli stessi e successivo distacco. In più, è noto che materiali a grana grossa sono più vulnerabili di quelli a grana fine, ed il lapideo del teatro contiene una gran quantità di fossili per cui tali rocce sono classificabili proprio come "biosparruditi", cioè una sorta di "ghiaie" calcaree a fossili al posto dei ciottoli. In un calcare di questo tipo, quindi, i problemi di degrado termico sono ai massimi livelli. Si può immaginare la grande quantità di discontinuità presenti, che diventano microfratture a causa della dilatazione termica, che originano una porosità secondaria nella roccia, che ben accoglie le acque piovane di dilavamento. A questo punto, queste ultime aumentano esponenzialmente la velocità di degradazione perché 1) aprono sempre più le fessure, 2) attaccano chimicamente la calcite solubilizzandola data la loro acidità, e 3) in inverno, gelando e sciogliendosi ciclicamente, demoliscono sistematicamente la struttura della roccia. Inoltre si osserva la presenza di croste nere: queste, dapprima si formano sul materiale in modo uniforme, ma essendo nere tendono a scaldarsi ed a subire dilatazioni e contrazioni sotto i raggi solari in modo differenziale rispetto al lapideo, comunque aumentando, il degrado termico di cui sopra. A causa delle dilatazioni e contrazioni termiche la crosta nera si frattura estesamente e cade, trascinando parte del materiale lapideo e lasciando sotto di sé una superficie friabile, facilmente attaccabile da tutto

ciò fino ad ora visto. Altre chiazze scure sono dovute alla presenza di licheni, o semplice pulviscolo atmosferico dovuto anche alla contiguità del teatro con una strada a traffico sostenuto, che aumenta la presenza di inquinanti e l'aggressività dell'atmosfera. In più si aggiungono problemi di solfatazione dei calcari, nonché di idrolisi dei silicati, dato che in matrice è presente sostanza argillosa.

Come si è notato dalle analisi eseguite, prevalgono problemi di natura fisica rispetto a quelli puramente chimici: la maggior parte del degrado, difatti, data la natura dei materiali, è causata dai problemi termici, con innesco di microfratture sede di forte e veloce degrado principalmente per dilavamento e gelività.



Fig. 4.45 e 4.46 – La prima foto illustra un guscio nella roccia del teatro: la roccia risulta molto eterogenea a causa di tali discontinuità e ha un comportamento anisotropo nei confronti delle dilatazioni termiche. La seconda foto mostra un ingrandimento della superficie di un muro della scena. Essa evidenzia come la superficie della roccia sia costellata di numerosi fossili, formariniferi in larga maggioranza. La roccia risulta molto porosa e adatta a fermare le particelle inquinanti presenti in atmosfera, che contribuiscono al suo annerimento, oltreché soggetta ad azioni termiche e chimiche di disfacimento.

Le tavole dell'allegato *All.A-III* evidenziano un ampio stato di disgregazione e la presenza di patina biologica su gran parte della superficie dei setti della zona ovest, favorita dallo scarso soleggiamento e dall'umidità. A est sono invece riscontrabili croste che interessano la superficie dei setti murari, oltre che una disgregazione diffusa.

Si nota inoltre che il degrado interessa soprattutto la parte sommitale dei setti, dove vi sono ampie zone disgregate ed estese macchie nere. Particolarmente critica risulta essere la situazione del setto A4 che presenta in sommità una riduzione consistente della propria sezione, oltre che fori e lacune profonde: in vari punti del setto non vi è più il paramento esterno e il nucleo interno è ridotto.



Fig. 4.47 e 4.48 – Le foto indicano come i setti sia in zona Chiesa (prima foto) che in zona Museo (seconda) siano fortemente degradati superiormente. Gran parte del paramento esterno è crollato e il nucleo interno è scoperto e sottoposto all'azione degli agenti esterni.

4.7.2 Vulnerabilità

Per la determinazione del possibile comportamento sismico delle porzioni di muri, presenti nel teatro oggetto di studio, risulta fondamentale rilevare e studiare eventuali vulnerabilità delle zone. Queste sono dovute alla stessa morfologia del teatro e alle tecniche costruttive utilizzate. Andando a definire queste criticità si potranno ottenere delle valutazioni sulle strutture corrispondenti il più possibile alla situazione reale.

Lo studio svolto non ha rilevato particolari vulnerabilità in pianta delle strutture del teatro, quindi si sono analizzate direttamente le vulnerabilità in prospetto e si sono redatte le relative tavole grafiche, presenti nell'*All.A-IV*.

Di seguito sono riportate le vulnerabilità riscontrate nei prospetti delle strutture del teatro:

- **Aggetti e vulnerabilità:** parti strutturali che hanno periodi di vibrazione diversi dal resto della struttura. Si creano delle concentrazioni di tensioni che possono portare al crollo dell'elemento svettante. In questo caso vanno prese in considerazione le porzioni sommitali dei setti, frastagliate con geometrie non ben definite.
- **Interventi di restauro:** con gli interventi di restauro che si sono succeduti nel teatro, bisogna andare ad indagare il grado di continuità che si è realizzato tra le varie parti della costruzione. Si possono creare dei punti di discontinuità tra gli elementi strutturali che potrebbero portare alla creazione di meccanismi di primo modo come

ribaltamenti semplici. Risulta utile controllare l'effettiva unione tra la pietra del teatro e i mattoni, usati a più riprese e in più punti come principale elemento del restauro.

- ***Interventi provvisionali:*** presenza di puntelli, tiranti ed elementi strutturali provvisori.
- ***Tamponamento aperture:*** chiusure di finestre o porte preesistenti con tamponamenti in mattoni. Rappresentano una vulnerabilità in quanto se non adeguatamente ammorsate possono innescare fenomeni di primo modo che possono causare la caduta del tamponamento stesso.
- ***Variazione sezione resistente:*** si tratta di una riduzione della sezione nello spessore murario che impedisce un corretto trasferimento dei carichi gravitazionali. Sono state individuate molte porzioni discontinue nei setti della zona *Chiesa e Museo*.

Valutando nello specifico la condizione attuale delle strutture del Teatro Romano, si nota immediatamente che estese porzioni del congiunto murario presentano delle peculiarità costruttive-geometriche riconducibili a situazioni di medio-alta vulnerabilità, con particolare riferimento alle azioni orizzontali.

Da un punto di vista di conformazione strutturale, si denunciano situazioni potenzialmente pericolose legate alla forte presenza di murature isolate, anche di notevoli dimensioni. Questi muri radiali, collegati un tempo da volte a botte, dette arcovoli, rappresentavano la struttura portante laterale del teatro, la cui cavea poggiava al terreno solo nella parte centrale. La maggior parte degli arcovoli non si sono conservati e i muri radiali superstiti si presentano attualmente come setti liberi e solo alcuni vincolati lateralmente fino all'altezza della prima precinzione. Tali porzioni murarie isolate sono particolarmente vulnerabili ad azioni orizzontali fuori piano. Nell'eventualità, esse si comportano essenzialmente come corpi rigidi, a meno che non intervengano prima fenomeni di disgregazione muraria, presenti già in maniera copiosa.

Riguardo alla tipologia muraria, si riscontra una composizione prevalente di murature “a sacco”, con paramenti esterni composti da blocchetti squadri di tufo e nucleo essenzialmente incoerente. In più punti il paramento esterno in tufo è fortemente degradato ove non mancante, rimanendo così esposta alle intemperie la muratura incoerente del sacco. Tale situazione si può notare osservando i setti A1 e A2 della zona Museo, dove si vede che dell'originaria struttura muraria a tre paramenti rimane solamente il nucleo composto da pietrame disordinato (ciottoli, pietre erratiche e irregolari). Le numerose lacune nella struttura sono state in parte integrate con muratura in laterizio nel corso delle varie fasi del ripristino. Tali porzioni potrebbero non essere ben ammorsate alla struttura preesistente.



Fig. 4.49 – Foto del Setto A3, particolare del nucleo a sacco della muratura.



Fig. 4.50 – Foto di uno dei prospetti di A2: in alcune zone è ancora presente il paramento esterno, mentre in altre vi sono lacune profonde.

Le condizioni di conservazione osservate in più punti relativamente alla tipologia muraria a sacco implicano una situazione potenzialmente degenerativa per le murature conseguente all'esposizione ambientale del nucleo stesso (percolazione di acque meteoriche all'interno delle murature, cicli di gelo/disgelo).

Inoltre la tipologia muraria a sacco generalmente presenta una vulnerabilità di natura congenita, principalmente relativa ad eventi dinamici, quale il ridotto grado di connessione tra i paramenti esterni e tra questi ed il sacco interno, con forti disomogeneità in termini tensionali tra i paramenti esterni ed il nucleo, a causa della differente rigidezza. Come risultato si osserva che murature di tale tipologia, a prescindere della configurazione strutturale dell'edificio considerato, possono manifestare in seguito ad evento sismico dei comportamenti disgregativi (*crumbling*), quindi crolli, che si originano anche per ridotti valori di accelerazione del suolo.



Fig. 4.51 e 4.52 – Porzione di scena puntellata e porzione di scena con tiranti

Situazioni meritevoli di particolare attenzione riguardano, poi, la presenza di elementi ad arco, già oggetto di precedenti interventi di messa in sicurezza, come ad esempio la centinatura presente nell'arco di accesso orientale al teatro, e di parecchi elementi voltati, così come di elementi con funzioni non strutturali e generalmente posti in posizione elevata (cornici, conci isolati), anch'essi generalmente già oggetto di precedenti interventi di messa in sicurezza.

Altre situazioni a rischio di degrado strutturale sono, infine, relative alla diffusa presenza di vegetazione che trova numerosi spazi di crescita nelle strutture murarie.

A conclusione delle indagini visive, si può riassumere così il quadro della situazione:

- Zona Chiesa: i setti B2 e B3 sono i più vulnerabili perché sono elementi snelli e privi di vincoli laterali. Il setto B1 si caratterizza per una vulnerabilità media in quanto, nonostante la sua altezza, si incastra nella passerella e nell'arco della *parados* orientale. Il setto B5 ha vulnerabilità medio-bassa perché ha altezza minore rispetto agli altri setti e presenta vincoli laterali con la passerella e il muro della scalinata laterale.
- Zona Museo: il setto A3 risulta il più vulnerabile perché è il più alto, ha una massa concentrata in sommità e presenta in ampie zone solo il nucleo della struttura muraria originaria a tre paramenti. Il setto A4 si caratterizza anch'esso per una vulnerabilità alta in quanto ha un'altezza considerevole e presenta distacchi profondi nella parte superiore. I setti A1 e A2 hanno una vulnerabilità medio-bassa perché si elevano poco in altezza. Essi sono comunque in condizioni di forte degrado per la presenza di lacune assai profonde, disgregazione diffusa e molta patina biologica.
- Zona Scena: essa è una struttura complessa costituita da elementi in diverse direzioni. Sebbene le varie parti risultino sufficientemente ammorsate, a causa della snellezza della struttura potrebbero verificarsi ribaltamenti sia di intere pareti che di porzioni in sommità.

4.7.3 Analisi del quadro fessurativo

Con l'acquisizione del quadro fessurativo, si sono infine identificate le lesioni significative, in corrispondenza delle quali sono stati installati trasduttori di spostamento volti a registrare i movimenti in apertura e chiusura delle lesioni, con il variare del tempo. Una **frattura o fessurazione** è una degradazione che si manifesta con la formazione di soluzioni di continuità nel materiale e che può implicare lo spostamento reciproco delle parti.

Nelle tavole dell'allegato *All.A-IV*, relativo alla vulnerabilità degli elementi strutturali del Teatro, si sono riportate ed evidenziate le lesioni, presenti soprattutto nell'arco di ingresso puntellato e in alcuni setti della zona *Chiesa e Museo*.

Relativamente alla zona *Chiesa*, l'arco d'ingresso puntellato presenta fessurazioni da tenere debitamente sotto controllo. Infatti tali lesioni potrebbero comportare l'espulsione di materiale in corrispondenza dello spigolo tra i due archi o dei piedritti dell'arco puntellato. Queste lesioni verticali sono concentrate soprattutto nella parte di pietra di tufo che risulta essere più degradata e in pessimo stato di conservazione. Inoltre nella facciata d'ingresso sono presenti inserti in laterizio con funzione di sostegno strutturale, aggiunti nei restauri del teatro. Questa discontinuità di materiale è anch'essa causa della formazione delle fessurazioni.

L'arco ortogonale a quello puntellato presenta, oltre a lesioni nel piedritto e in corrispondenza di discontinuità materiche, una profonda fessurazione allo spigolo libero superiore, che in caso di sisma potrebbe innescare la caduta di una consistente porzione di materiale. Il fenomeno di disgregazione locale non è affatto da trascurare perché potrebbe portare a situazioni molto pericolose. Bisogna pertanto porre attenzione a queste zone e tenerle sotto controllo al fine di evitare distacchi e cadute di materiale.

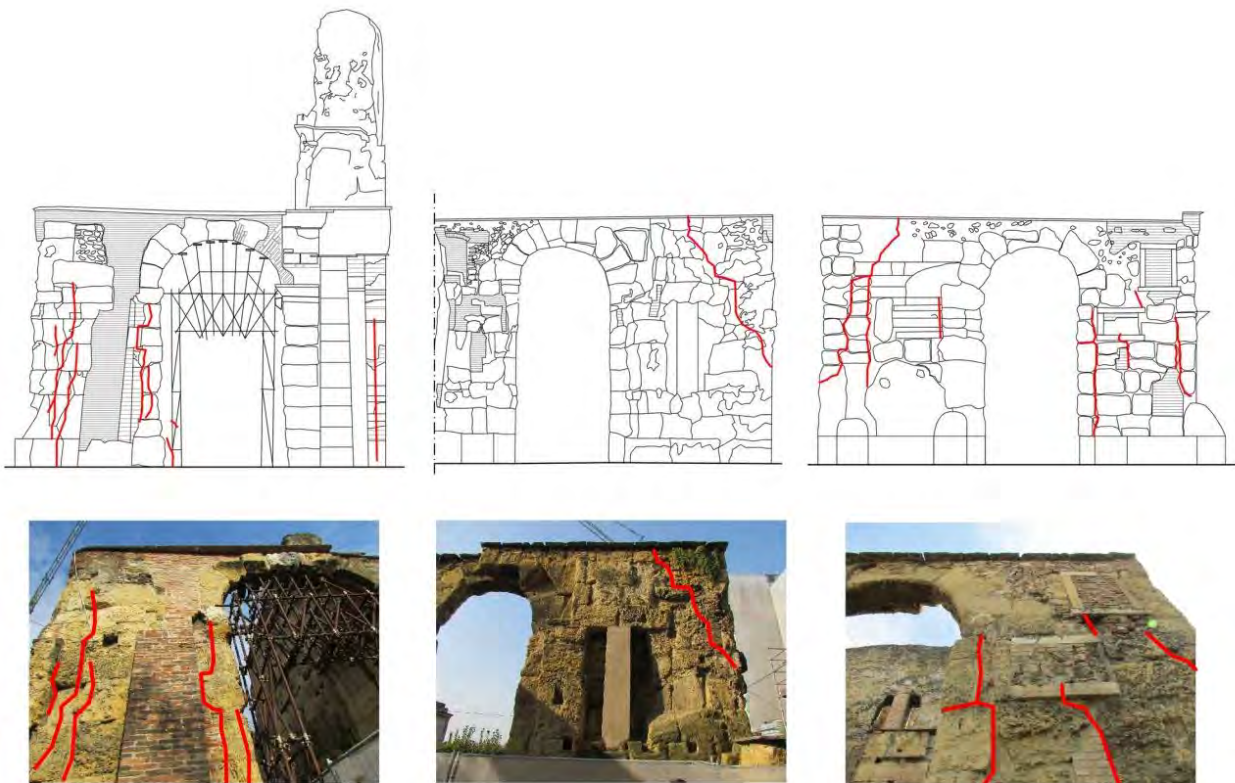


Fig. 4.53 – L'immagine riassume il quadro fessurativo dell'arco di ingresso del teatro. La prima mostra le lesioni presenti nell'arco puntellato, le altre due dell'arco ortogonale a quello puntellato.

Nei setti della zona *Chiesa* il fenomeno di decoesione e caduta del materiale sembra precedere quello di formazione di lesioni. Risultano più problematiche in tal senso le porzioni superiori dei setti liberi, data la loro geometria frastagliata, e si nota una fessura macroscopica solo nel setto B3.

La lesione che interessa il setto B3 della zona *Chiesa* è collocata in corrispondenza della discontinuità materica tra pietra e mattone, nella zona esterna dello spessore del muro. Questo innesto di laterizio è stato inserito nel setto in interventi di consolidamento dell'elemento strutturale e pare non ben ammorsato con la porzione in pietra.

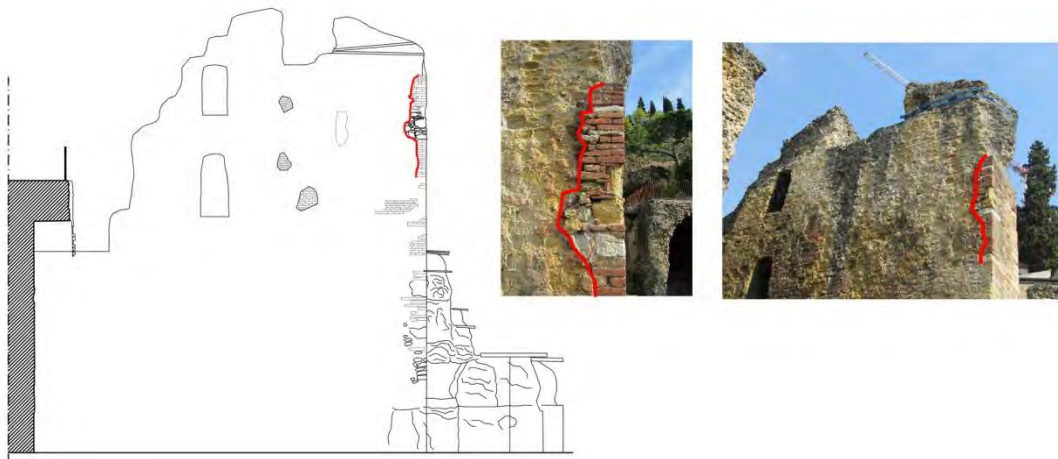
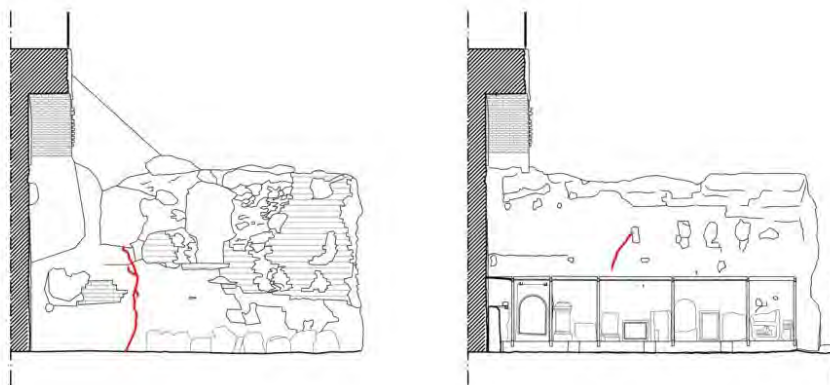


Fig. 4.54 – Lesione sul setto B3 in corrispondenza della discontinuità materica.

Spostando l'attenzione alla zona *Museo*, ci si accorge che i setti presentano molte più lesioni verticali diffuse. In particolare, i setti più bassi in altezza, A1 e A2, sono quelli con maggiori fessurazioni. Queste sono localizzate principalmente nella parte centrale dei muri e scendono in verticale fino a terra. Nell'immagine vengono riportati i prospetti con indicate le lesioni, che saranno poi oggetto di studio nel sistema di monitoraggio. Una fessura è presente anche nel setto A3 della zona Museo, ma risulta essere meno gravosa delle precedenti.



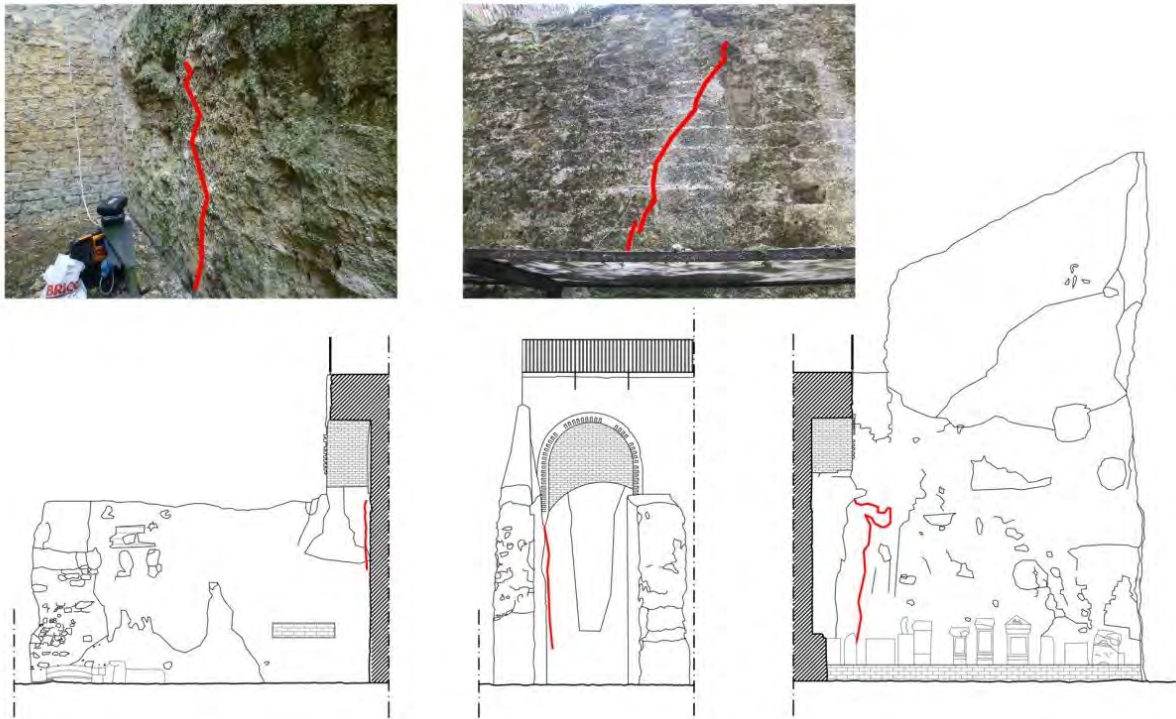


Fig. 4.55 – Lesioni sui setti A1, A2 e A3 della Zona Museo.

Anche l'*edificio scenico* presenta una lesione sulla parete curva a est. Tale fessurazione si colloca nell'interfaccia tra i mattoni e la pietra a grandi blocchi di cui è costituita la scena. Per questa zona le problematiche riscontrate da un'analisi visiva risultano essere minori. Tutta la struttura però è interessata da tiranti, puntelli provvisori e innesti in laterizio. Si dovrà pertanto studiare il comportamento strutturale nel suo insieme al fine di evidenziare ulteriori vulnerabilità.

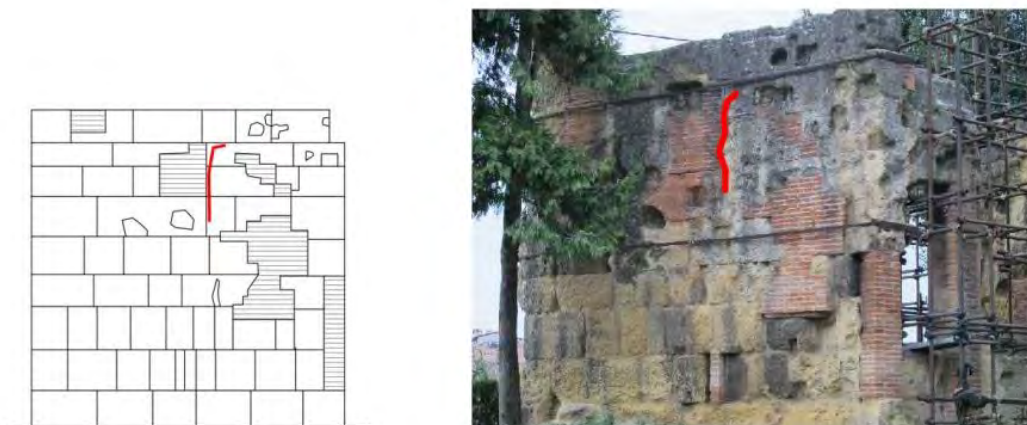
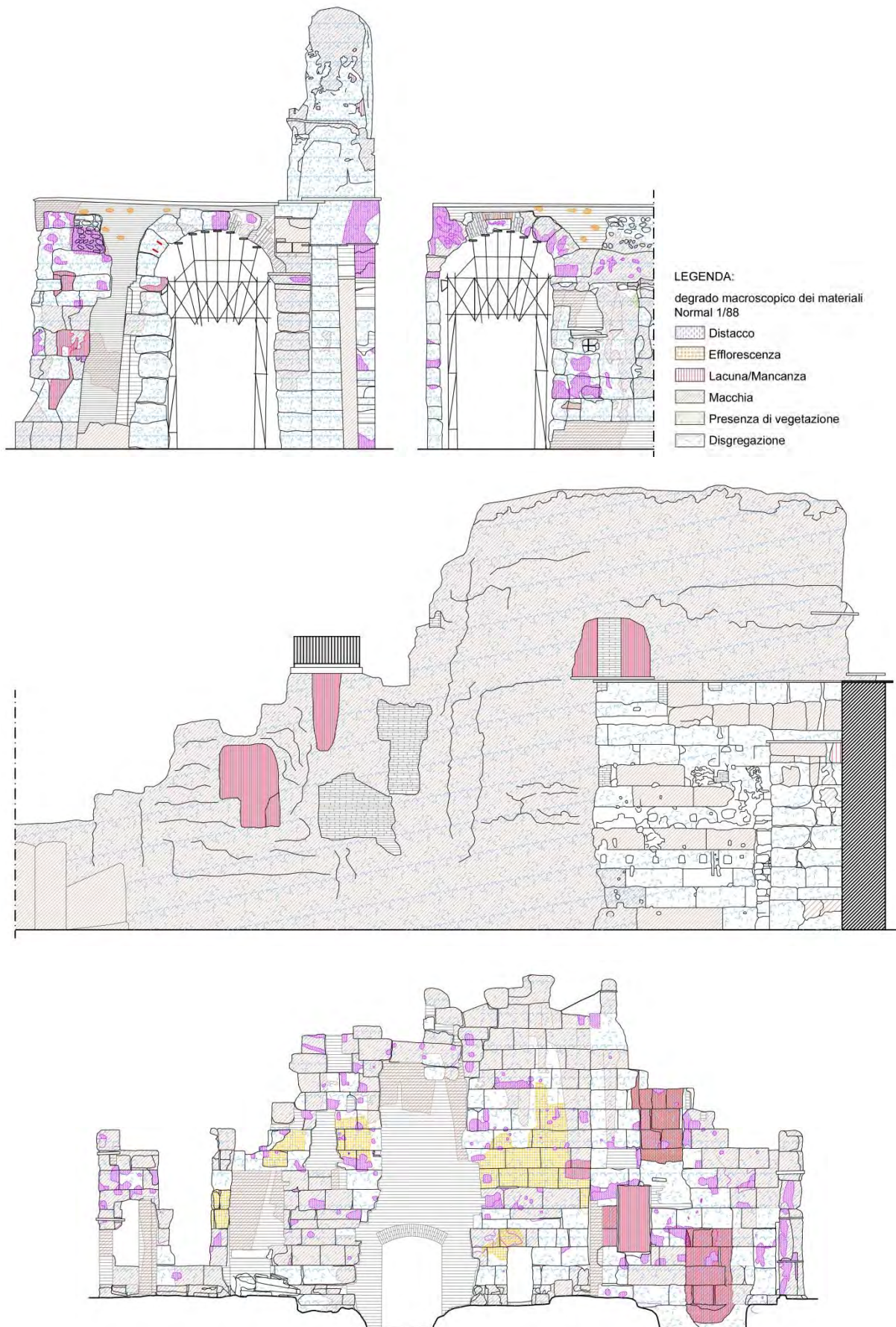
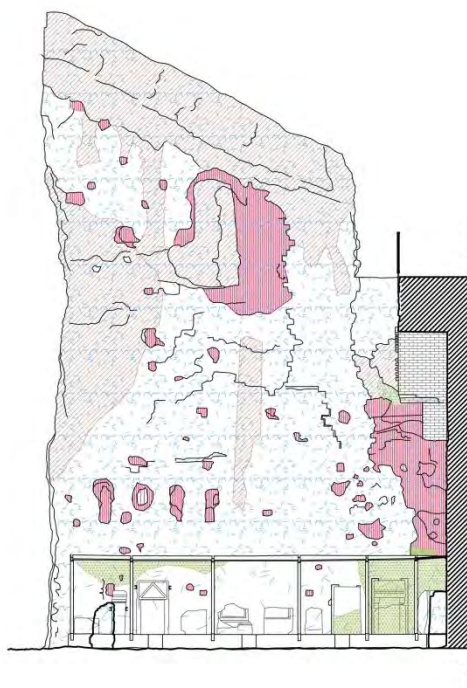
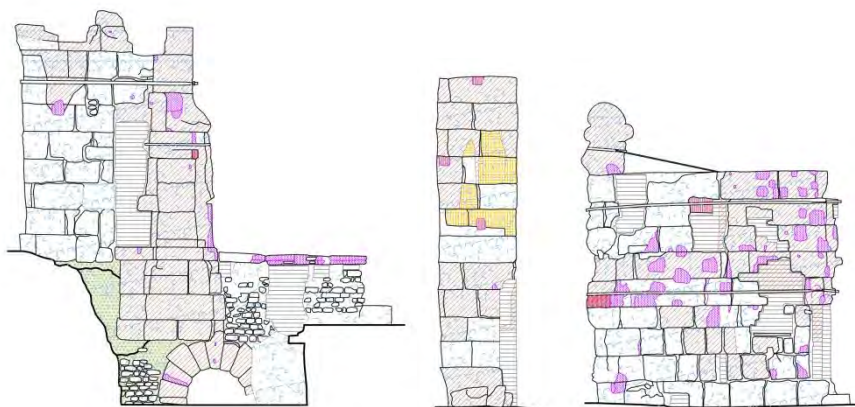


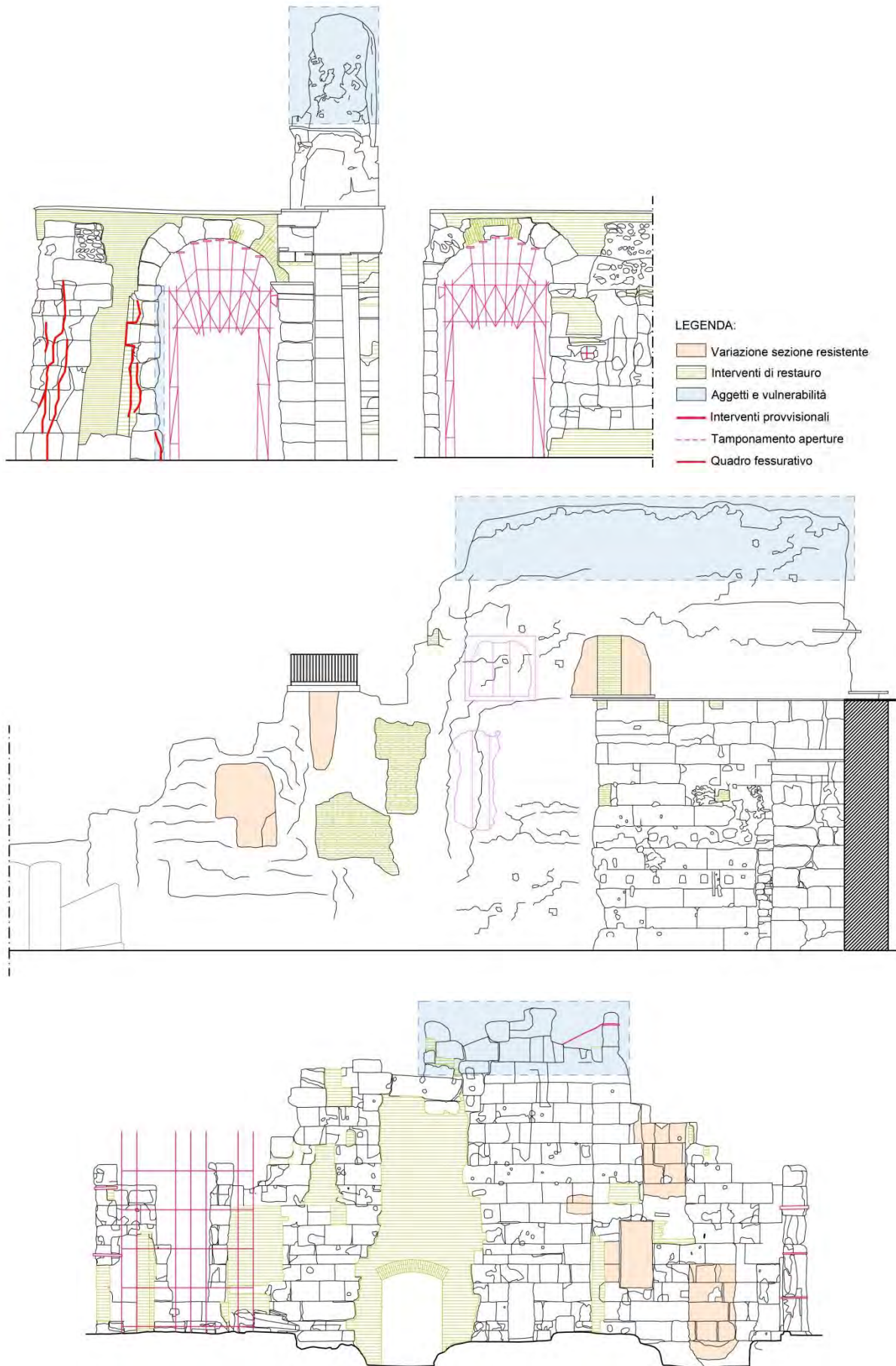
Fig. 4.56 – Lesioni sulla parete curva dell'edificio scenico.

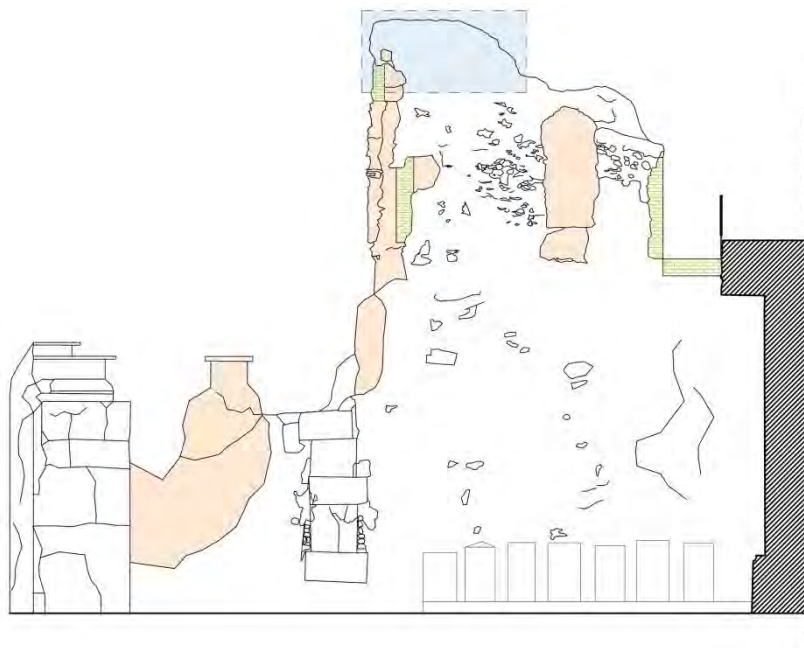
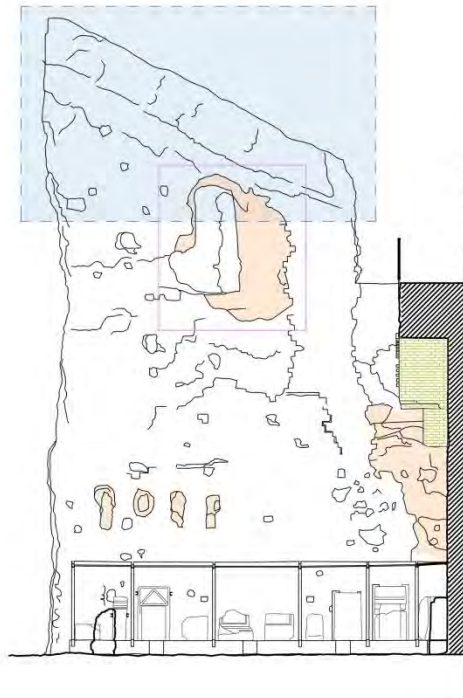
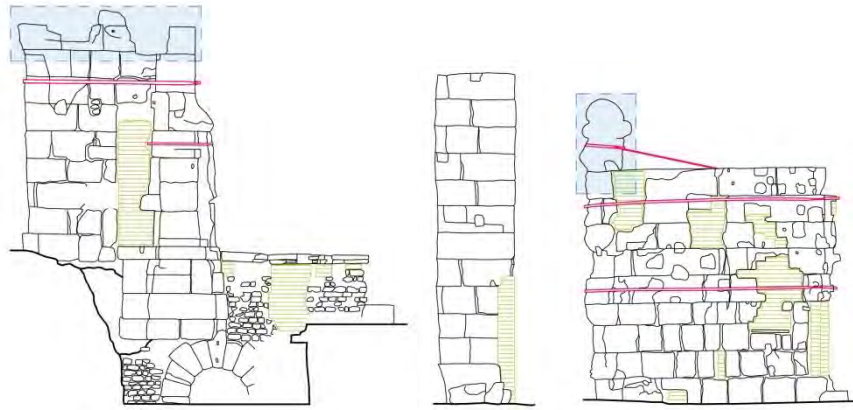
Principali degradi su arco, setti e scena





Principali vulnerabilità e fessurazioni su arco, setti e scena





4.8 Conclusioni

L'analisi dello stato di fatto costituisce un passo importante sulla conoscenza della costruzione storica in muratura, fondamentale sia ai fini di una valutazione della sicurezza attendibile, sia per la scelta di un efficace intervento di miglioramento. In questo capitolo è stata affrontata questa fase facendo riferimento ai principi delle 'Linee Guida per la valutazione e riduzione del rischio sismico del patrimonio culturale'.

Si è dapprima proceduto con un inquadramento geografico e sismico dell'area della città di Verona, dove si trova il Teatro Romano, il quale ha permesso la definizione dei parametri sismici di riferimento da adottare per le successive verifiche di sicurezza.

Nel passo successivo è stato presentato un rilievo geometrico delle strutture, seguito da un rilievo fotografico. Per meglio comprendere il comportamento strutturale si è proceduto con l'identificazione delle diverse tipologie murarie presenti nelle strutture del teatro. In questa fase sono state redatte le schede sulla muratura presenti nell'allegato *All.B*.

Il passo successivo ha riguardato l'individuazione dello stato di degrado presente nei materiali e nelle strutture. Infine sono state individuate le vulnerabilità, focalizzando l'attenzione sul quadro fessurativo, il quale è stato utilizzato per ipotizzare l'analisi cinematica; inoltre le principali lesioni sono state monitorate attraverso una rete di potenziometri, del capire la loro tendenza ad aprirsi o a chiudersi.

INDAGINI SPERIMENTALI

5.1 Premessa

Le indagini condotte presso il Teatro comprendono, oltre al rilievo topografico delle strutture, indagini geognostiche ai fini della determinazione della natura e morfologia del sottosuolo, indagini relative allo stato di degrado e a possibili tecniche di consolidamento del materiale lapideo, indagini debolmente distruttive sulle strutture murarie volte alla caratterizzazione tipologica e meccanica delle murature, indagini non distruttive relative alla risposta dinamica di alcune porzioni del congiunto. Tali indagini hanno il fine di fornire un livello di conoscenza basilare sulla struttura e sul terreno di fondazione.

5.2 Indagini geognostiche

Le indagini geognostiche hanno lo scopo di fornire i dati e le informazioni necessarie per la caratterizzazione geotecnica dei terreni e delle rocce, così da avere un'adeguata valutazione dei parametri geotecnici da impiegare nei calcoli di progetto. Fanno parte delle attività di indagine geognostica:

- *Prove geotecniche in situ*
 1. Prove penetrometriche per determinare il grado di addensamento e ricavare la caratterizzazione geotecnica dei terreni fino alla massima profondità raggiunta.
 2. Prove di permeabilità e altre prove in situ (pressiometro, dilatometro, ecc.).
 3. Perforazione a distruzione di nucleo con registrazione automatica continua dei parametri di perforazione ed elaborazione dell'energia specifica.
- *Prelievi di terreno con sonde e campionatori*, in cui la ricostruzione della situazione geologica avviene attraverso l'esame del carotaggio continuo. I campioni raccolti

possono essere sottoposti ad apposite prove di laboratorio per determinare i parametri geotecnici (limiti di Atterberg, resistenza a compressione, ecc.).

5.2.1 Esecuzione delle indagini

Nell'aprile del 2000 si sono eseguite delle indagini geognostiche-geofisiche presso il Teatro.

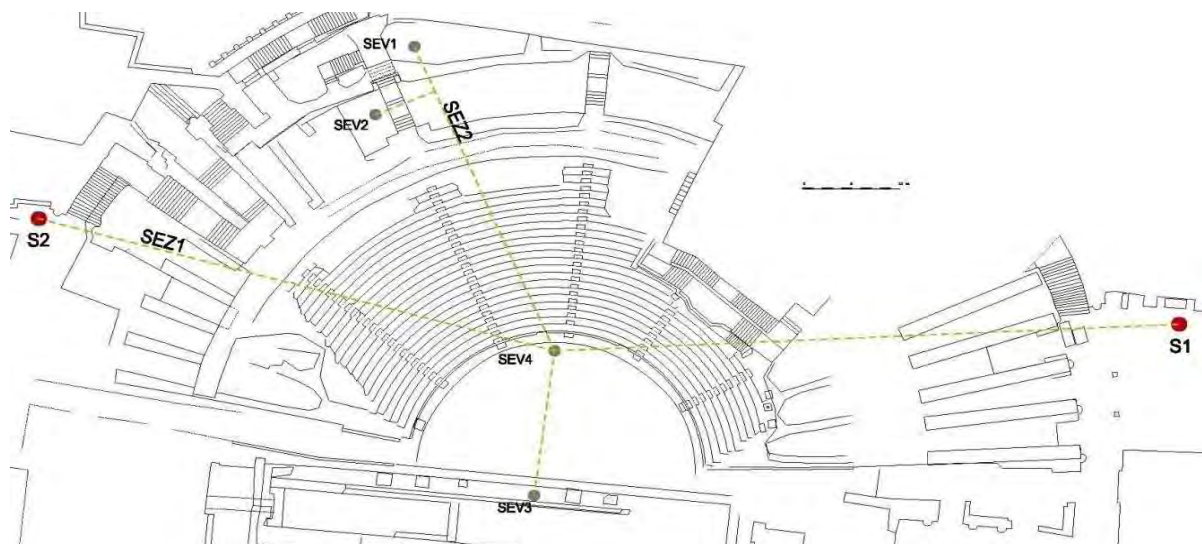


Fig. 5.1 – Ubicazione delle indagini geognostiche e geofisiche

Le indagini sono consistite in due sondaggi meccanici a carotaggio continuo eseguiti fino ad una profondità di 20 metri e in quattro sondaggi elettrici verticali. Si riporta di seguito l'ubicazione planimetrica delle indagini, dove le perforazioni verticali sono indicate con S1 ed S2, mentre le prove geofisiche con SVE1- SVE4.

5.2.2 Perforazione a carotaggio e descrizione stratigrafica

Per l'esecuzione dei sondaggi è stata impiegata una sonda a rotazione autocarrata modello *Mobile Drill B50*. Nel tratto superficiale, caratterizzato da terreni sciolti quali detrito e ghiaia la perforazione a carotaggio è stata eseguita a secco, ovvero senza impiego di acqua di circolazione, utilizzando un carotiere semplice di diametro 101 mm. Tale metodologia, evitando di dilavare il materiale, ha consentito di ottenere la percentuale di carotaggio ottimale e di recuperare le varie frazioni costituenti il terreno. Il sostegno delle pareti del foro è stato assicurato mediante infissione di rivestimenti metallici provvisori di diametro 152 mm. Nel tratto caratterizzato dalla presenza del substrato roccioso la perforazione a carotaggio è stata eseguita con circolazione di acqua utilizzando il doppio carotiere modello *T2* di diametro 101 mm e munito di corona diamantata.

L'esame dei materiali del sondaggio ha comportato l'identificazione di intervalli (strati) della successione stratigrafica macroscopicamente omogenei, cioè costituiti da un tipo di terreno

predominante, e disomogenei, cioè costituiti da alternanze più o meno regolari di terreni differenti. Nel sondaggio S2 il substrato roccioso, costituito da calcarenite organogena, si rinviene alla profondità di 1,10 m dal piano campagna, mentre nel sondaggio S1 il substrato è il più profondo trovandosi a circa 9,00 m dal piano campagna.

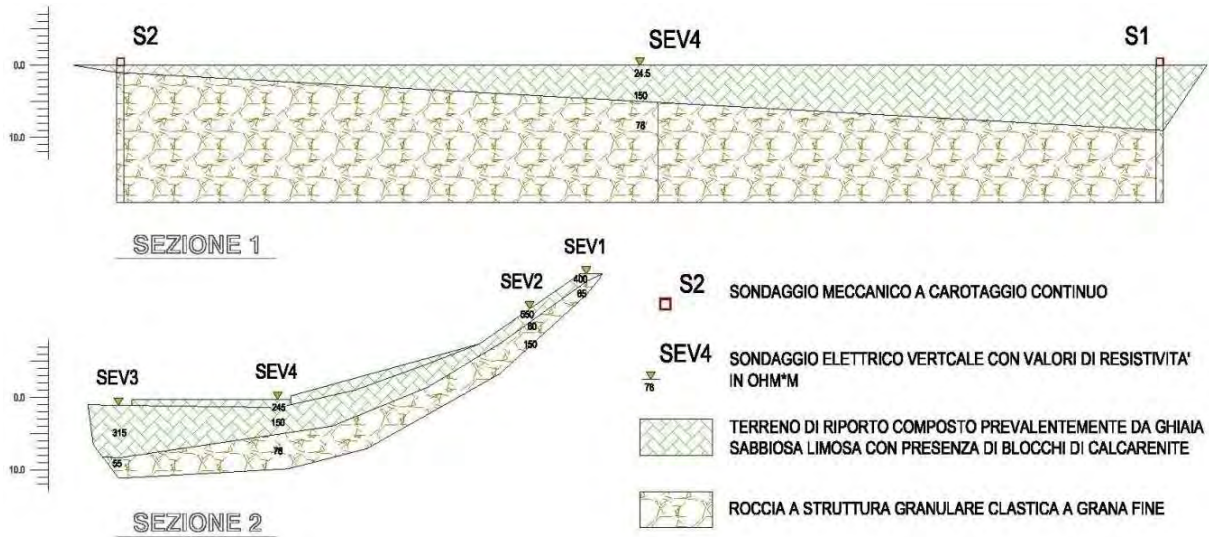


Fig. 5.2 – Sezioni elettrostratigrafiche in riferimento alla planimetria di Fig. 4.1

In quest'ultimo sondaggio da -6,20 a -6,80 m è stata rilevata la presenza di un livello costituito da ghiaia arrotondata con sabbia e limo mentre, al di sopra e al di sotto di tale deposito alluvionale dell'Adige, il materiale recuperato è costituito da blocchi di calcarenite in matrice sabbiosa limosa nocciola.

5.2.3 Indagini geofisiche

In geofisica il metodo elettrico è quello maggiormente usato per la risoluzione di problematiche legate a risoluzioni stratigrafiche a piccole profondità d'indagine; difatti il metodo si avvale di una strumentazione con dimensioni ridotte e facilmente trasportabile, ed è applicabile in aree la cui topografia, a causa delle strutture presenti, non permette l'investigazione diretta con sonda perforatrice. Nel caso specifico, lo scopo dell'indagine geofisica è stato quello di integrare l'indagine geognostica in modo da ricostruire l'andamento del substrato roccioso anche sotto le strutture del Teatro Romano, senza recarne danno.

L'indagine geoelettrica è stata eseguita utilizzando la seguente strumentazione:

- georesistivimetro dotato di filtri analogici e con voltmetri capaci di misurare il campo elettrico per variazioni di segno e di misurare tensioni fino a 0,1 mV;
- georesistivimetro con filtri digitali e con la possibilità di inviare corrente pulsante a frequenza stabilita e mediante i valori di lettura, per misure superiori ad 1 mV.

L'indagine geoelettrica è costituita nell'esecuzione di quattro sondaggi elettrici verticali (SEV), che per la presenza di manufatti sono stati eseguiti utilizzando geometrie quadri polari asimmetriche. Nel sondaggio *SEV4*, inoltre, per i precedenti motivi, è stata impiegata la geometria che prevede un elettrodo energizzante posto all'infinito.

Dall'analisi delle curve di resistività si può identificare il substrato roccioso nell'elettrostrato con resistività superiore ai 50 ohm m. I termini superiori allo strato roccioso presentano valori di resistività elevata da ascrivere a terreni ghiaiosi sabbiosi con rilevante presenza di clasti calcarenitici e resti di opere murarie. I risultati sono sintetizzati nelle sezioni elettrostratigrafiche, dove sono riportate sinteticamente anche i risultati delle perforazioni meccaniche (Fig. 2.2). In tali sezioni viene illustrato l'andamento del substrato roccioso, che da affiorante nella parte superiore della gradonatura del Teatro si approfondisce fino ad una profondità di circa otto metri in corrispondenza del *SEV3*, che pure si trova in un'area inferiore al piano di calpestio del Teatro.

5.3 Analisi del degrado

Su incarico della Soprintendenza Archeologica per il Veneto sono state eseguite nel 1995 delle analisi relative alla caratterizzazione dello stato del degrado (analisi chimico-fisico-petrografiche) del materiale lapideo del Teatro Romano. Scopo delle indagini era quello di ottenere il maggior numero possibile di informazioni relative allo stato ed alle cause del degrado del materiale lapideo del teatro. A tal proposito sono stati raccolti, in tale situazione, oltre 30 campioni prelevati nelle zone più degradate del Teatro, in 13 zone di campionamento: in ogni area, indicativamente di 2-3 metri quadrati, sono stati raccolti da uno a tre campioni, prelevandoli ovviamente ove era già in atto un distacco evidente, da sottoporre a varie analisi. Oltre a ciò sono state eseguite altre analisi fisico-volumetriche, quali misure di porosità, massa volumica reale con il picnometro, masse volumiche apparenti allo stato secco, naturale e saturo, indice dei vuoti, umidità a saturazione. Su alcuni campioni sono, altresì, state eseguite sezioni sottili per esame petrografico, analisi chimiche sui Sali solubili, perdita al fuoco, pH, spettrofotometrie FT/IR. Sono state, inoltre, prelevate in cantiere, nella zona della probabile cava di origine, 31 carote di lapideo naturale geologicamente in posto, per testare, una volta terminata la fase di diagnosi, prodotti idonei a proteggere il lapideo in questione.

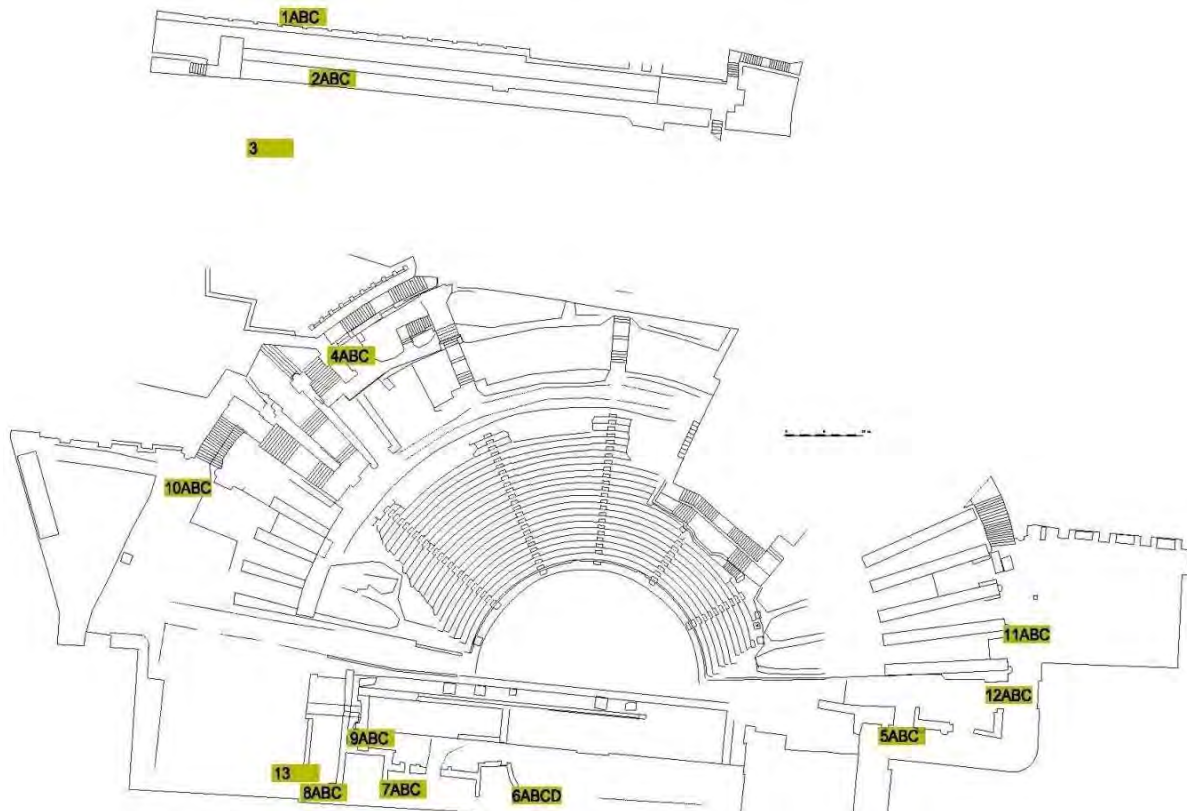


Fig. 5.3 – Ubicazione dei prelievi per l'analisi del materiale lapideo

5.3.1 I materiali lapidei del teatro

La collina sul quale è impostato il Teatro è costituita in gran parte da rocce friabili, di natura calcarea ed in parte argillosa, sotto forma di biocalcareniti e biocalcsiltiti fini, fino a biocalciruditi e biosparruditi molto fossilifere. Tali materiali ricadono nella formazione geologica delle *Marne di Priabona*, di età eocenica, costituita non solo da marne ma anche da calcari più o meno marnosi zeppi di foraminiferi, in particolare discocicline, come nel caso dell'area del Teatro. Oltre a queste faune sono presenti anche numerosi altri fossili (lamellibranchi, briozoi, gasteropodi, echinidi, melobesie, macro e micro foraminiferi vari). Oltre la cima del Teatro affiorano, invece, altri calcari fossiliferi, di età miocenica, con faune a pettinidi, alghe, brachiopodi, foraminiferi.

I blocchi che costituiscono l'ossatura del Teatro sono di natura calcarea: in gran parte costituiti dal primo dei due materiali, in piccola parte dal secondo. Vi sono, altresì, blocchi di calcari compatti, tipo Biancone o Rosso Ammonitico più o meno decolorato, spesso con vistose Ammoniti ben conservate. Questi ultimi materiali, data la loro natura micritica compatta, sono meglio conservati di quelli sopracitati, ed in genere non presentano problemi particolari se non la necessità di una pulitura superficiale. I materiali fortemente degradati, in certi casi oltre i limiti della sicurezza con serio rischio di crolli, sono i primi di cui abbiamo parlato.

5.3.2 *Le cause del degrado*

I materiali lapidei degradati del Teatro Romano sono affetti da una serie di problematiche di aggressione dovute a varie cause. *In primis* questi materiali sono, a causa della loro natura essenzialmente calcarea, molto vulnerabili agli sbalzi termici. La calcite, difatti, per l'anisotropia dei suoi cristalli, tende a dilatarsi ed a restringersi secondo direzioni preferenziali, con decoesione degli stessi e successivo distacco. In più, è noto che materiali a grana grossa sono più vulnerabili di quelli a grana fine, ed il lapideo del Teatro contiene una gran quantità di fossili per cui tali rocce sono classificabili proprio come biosparruditi, cioè una sorta di “ghiaie” calcaree a fossili al posto dei ciottoli. In un calcare di questo tipo, quindi, i problemi di degrado termico sono ai massimi livelli. Si può immaginare la grande quantità di discontinuità presenti, che diventano microfratture a causa della dilatazione termica, originano una porosità secondaria nella roccia, che ben accoglie le acque piovane di dilavamento.

A questo punto queste ultime aumentano esponenzialmente la velocità di degradazione perché:

- aprono sempre più le fessure;
- attaccano chimicamente la calcite solubilizzandola data la loro acidità;
- in inverno, gelando e sciogliendosi ciclicamente, demoliscono sistematicamente la
- struttura della roccia.

Si osserva, inoltre, la presenza di croste nere: queste dapprima si formano sul materiale in modo uniforme, ma essendo nere, tendono a scaldarsi ed a subire dilatazioni e contrazioni sotto i raggi solari in modo differenziale rispetto al lapideo, comunque aumentando il degrado termico di cui sopra. A questo punto, a causa delle dilatazioni e contrazioni termiche, la crosta nera si frattura estesamente e cade, trascinando parte del materiale lapideo e lasciando sotto di sé una superficie friabile, facilmente attaccabile da tutto ciò fino ad ora visto. Altre chiazze scure sono dovute alla presenza di licheni, o semplice pulviscolo atmosferico e particolato dovuto anche alla contiguità del Teatro con una strada a traffico sostenuto, che aumenta la presenza di inquinanti e l'aggressività dell'atmosfera. A tutto ciò aggiungiamo problemi di solfatazione dei calcari, nonché di idrolisi dei silicati, dato che in matrice è presente sostanza argillosa.

Come si è notato dalle analisi eseguite, prevalgono problemi di natura fisica rispetto a quelli puramente chimici. La maggior parte del degrado, difatti, data la natura dei materiali, è

causata dai problemi termici, con innesco di microfratture sede di forte e veloce degrado principalmente per dilavamento e gelività.

5.4 Analisi fisico-volumetriche

Sono state condotte analisi su 12 dei 30 campioni prelevati per determinare:

- umidità naturale;
- umidità di saturazione;
- massa volumica reale;
- massa volumica apparente satura;
- massa volumica apparente all'umidità naturale;
- massa volumica apparente secca;
- porosità efficace;
- indice dei vuoti efficaci;
- grado di saturazione.

Tutti i campioni prelevati risultano poco umidi con valori di grado di saturazione mediamente bassi. Ciò è un bene se visto nell'ottica "istantanea", ma è un male in quanto significa che vi è spazio disponibile ed essere invaso dall'acqua. In Tab. 2.2 si osservano i risultati puntuali dei campioni lapidei analizzati. Si noterà come i campioni 1,2,7, relativi ai "cubetti" delle due passeggiate ed alla base del Teatro siano quelli che forniscono i risultati migliori, con porosità tra il 13% ed il 17%, allineati, come unica eccezione, con il campione 6B.

Campione	Natura del materiale
1A	Biocalcarenite giallastra compatta, cubetto della seconda passeggiata
2A	Biocalcarenite giallastra compatta, cubetto della prima passeggiata
3	Biocalcsiltite arenacea giallastra (cava)
4C	Biocalcarenite marnosa giallastra
5C	Biocalcarenite marnosa
6B	Biocalcarenite giallastra
6D	Biocalcarenite fine siltosa rossastra
7C	Cubetto di biocalcarenite giallastra (base Teatro)
8A	Biocalcsiltite arenacea friabile giallastra
8C	Biocalcsiltite arenacea friabile giallastra
11A	Biocalcarenite marnosa giallastra
13	Biocalcarenite marnosa

Tabella 5.1 – Definizione della natura dei campioni

n.	Umidità naturale (%)	Umidità saturaz.	Massa vol. reale (kN/m ³)	Massa vol. app. satura (kN/m ³)	Massa vol. app. all' umid. nat. (kN/m ³)	Massa vol. app. secca (kN/m ³)	Porosità (%)	Indice dei vuoti	Grado saturaz. (%)
1A	1.404	7.519	27.112	24.200	22.823	22.507	16.98	0.20	18.67
2A	0.681	8.013	27.132	24.057	22.424	22.272	17.91	0.22	8.49
3	0.992	12.714	26.833	22.530	20.187	19.989	25.51	0.34	7.80
4C	1.497	12.078	26.943	22.763	20.614	20.310	24.62	0.33	12.39
5C	1.497	10.669	27.062	23.221	21.296	20.982	22.47	0.29	14.03
6B	2.501	8.108	27.132	24.027	22.781	22.225	18.09	0.22	30.85
6D	2.003	11.853	26.983	22.847	20.835	20.426	24.30	0.32	16.90
7C	3.472	5.748	27.192	24.856	24.321	23.505	13.56	0.16	60.41
8A	1.603	11.392	26.893	22.912	20.898	20.568	23.52	0.31	14.07

Tabella 5.2 – Analisi fisico-volumetriche su campioni di lapideo naturale

Tutti gli altri campioni sono più porosi (fino al 25%) e con masse volumiche di conseguenza minori, ovviamente a parità di massa volumica reale (“il peso specifico”), che per tutti i campioni, essendo essi della stessa natura, è molto simile (2,7-2,72 g/cm³). Il dato da evidenziare, comunque, è quello dell’elevata porosità di questo lapideo: si pensi che in materiali compatti di analoga natura calcareo-marnosa la porosità può essere anche sotto il punto percentuale.

5.5 Analisi chimiche (perdita al fuoco, sali solubili, pH, calcimetrie)

Sono state condotte analisi chimiche su 13 campioni, volte a verificare la presenza, unitamente alle spettrofotometrie eseguite successivamente, di solfati, cloruri, nitriti, nitrati, veicolo di degrado, oltre al pH ed alla perdita al fuoco, ed a qualche calcimetria, per verificare il tenore in calcite, l’acqua di costituzione dei materiali, le sostanze organiche.

Sono riportati di seguito i risultati delle analisi chimiche, salvo quelli delle calcimetrie, condotte non su tutti i campioni, che hanno fornito dati indicativi di un contenuto in carbonato di calcio variabile dal 62% all’85%.

Campione	SO ₄ -	Cl -	NO ₃ -	No ₂ -	Perdita fuoco (%)	pH
1	++	+	-	+	40.99	7.90
2A	++	+	-	±	36.49	7.88

Campione	SO4 - -	Cl -	NO3 -	No2 -	Perdita fuoco (%)	pH
4B	±	±	-	++	38.94	7.92
5B	±	-	-	±	38.41	7.87
6A	++	++	-	±	39.79	7.44
7B	++	++	+	+	41.13	7.46
8B	-	-	-	+	38.92	7.88
9B	++	++	+	+	37.64	7.29
10B	+	-	-	+	40.17	7.93
12B	-	-	-	±	40.14	7.85

Tabella 5.3 – Determinazione qualitativa dei Sali Solubili

- Legenda**
- assenza dello ione
 - ± concentrazione dello ione ai limiti di sostenibilità del saggio
 - + presenza dello ione
 - ++ presenza dello ione in quantità notevoli
 - +++ presenza dello ione come componente principale

(Perdita al fuoco a 950°C, pH secondo NORMAL 26/87)

La parte che rimane è costituita da varie sostanze che non sviluppano CO₂ reagendo con HCl, quali i silicati della matrice argillosa-quarzosa, le varie sostanze legate al degrado, le sostanze organiche. Si nota, comunque, la presenza di solfati e cloruri, nitriti e nitrati, che testimoniano decisamente come nei materiali del Teatro il degrado sia aggravato ulteriormente da questi ben noti agenti patogeni.

5.6 Analisi petrografiche e spettrofotometriche

Per il confezionamento delle sezioni sottili sono stati scelti i campioni meglio conservati, data l'impossibilità di segare quelli più degradati, che si sarebbero letteralmente sciolti. Le analisi spettrofotometriche, pur essendo analisi chimiche, quindi affini a quelle del precedente paragrafo, sono state allegate alla parte petrografica ed insieme richiamate in quanto di supporto e completamento all'analisi dei costituenti la roccia, non identificabili pur se visibili al microscopio (cemento intergranulare, croste nere). Il risultato di queste analisi conferma ulteriormente quanto già visto in precedenza, o supposto: le rocce in questione appartengono alla categoria dei calcari bioclastici marnosi, in gran parte derivati dall'escavazione delle *Marne di Priabona*, porosi e mal conservati, con talora patine carbonioso-gessose chiaramente riconducibili alle ben note "croste nere". Il degrado di questi materiali è

profondo, complesso, coinvolgente tutti i componenti, calcarei e silico-argillosi. Sono riportati di seguito i risultati della spettrofotometria I.R.

Campione

1° Frammento di pietra, estratto dal Teatro Romano, VR.

Descrizione macroscopica: Tipologia: roccia carbonatica; colore: giallognolo scuro; grana: arenaceo-grossolana; struttura: particellare.

Biocalcarenite impura a grana arenaceo-grossolana. Il colore d'insieme è giallognolo scuro, dovuto a dispersioni di limonite e ocre gialla. Tessitura bioclastica moderatamente classata, granosostenuta, con micrite interstiziale. E' presente una limitata frazione detritica costituita da sabbia quarzosa e argilla, responsabile del carattere impuro della roccia. I fossili presenti sono costituiti essenzialmente da foraminiferi, tra cui si riconosce solo qualche nummulite, frammenti di echinodermi e resti algali. Non sono presenti fossili guida tali da poter dare una datazione precisa alla roccia, ma per analogia con le rocce analizzate successivamente, si può ipotizzare la medesima appartenenza alla Formazione delle Marne di Priabona dell'Eocene superiore.

Stato di conservazione: pessimo (3)*, in quanto presenta diffusi e marcati fenomeni di decoesione intergranulare, generati prevalentemente da processi termoclastici e da gelività, associati anche a fenomeni di dissoluzione dei carbonati e di idrolisi dei silicati. E' presente poi una sottile (200-250 µ) crosta nera superficiale, scarsamente adesa al supporto lapideo, costituita da gesso secondario, particelle carboniose e depositi argilloso-ocracei.

3 Frammento di pietra, estratto dal Teatro Romano, VR, (cava).

Descrizione macroscopica: Tipologia: roccia carbonatica; colore: giallo scuro; grana: arenaceo-grossolana; struttura: particellare.

Biocalcarenite impura a grana arenaceo-grossolana, a discocicline. Il colore d'insieme è giallo scuro per la presenza di limonite ed ematite. Tessitura bioclastica scarsamente classata, grano sostenuta, con micrite interstiziale. E' presente una piccola frazione detritica costituita da sabbia quarzosa e da minerali argillosi, responsabile del carattere impuro della roccia. I fossili presenti sono costituiti perlopiù da discocicline, frammenti di echinodermi, qualche nummulite e resti algali. Appartiene pertanto alla Formazione delle Marne di Priabona.

Stato di conservazione: mediocre (6)*, dovuto a qualche fenomeno di decoesione intergranulare da sbalzi termici ed a limitati fenomeni di dissoluzione dei carbonati e di idrolisi dei silicati.

6C Frammento di pietra, estratto dal Teatro Romano, VR.

Descrizione macroscopica: Tipologia: roccia carbonatica; colore: giallo bruno rossastro; grana: arenaceo-grossolana; struttura: particellare.

Biocalcarenite impura a grana arenaceo-grossolana a discocicline. Il colore d'insieme è giallo-bruno rossastro, dovuto a dispersioni di ematite, con limonite ed ocre gialla. Tessitura bioclastica moderatamente classata, granosostenuta, con poca micrite interstiziale. E' presente una limitata frazione detritica costituita da sabbia quarzosa e argilla, responsabile del carattere impuro della roccia. I fossili presenti sono costituiti da discocicline in prevalenza, qualche nummulite, frammenti di echinodermi e resti algali. Le discocicline sono fossili guida dell'eocene medio-superiore, pertanto si può dedurre un'appartenenza alla Formazione delle Marne di Priabona.

Stato di conservazione: pessimo (3)*, in quanto presenta diffusi e marcati fenomeni di decoesione intergranulare, generati prevalentemente da processi termoclastici e da gelività, associati anche a fenomeni di dissoluzione dei carbonati e di idrolisi dei silicati. Non si rilevano presenze significative di patine o croste superficiali.

5° Frammento di pietra, estratto dal Teatro Romano, VR.

Descrizione macroscopica: Tipologia: roccia carbonatica; colore: giallognolo; grana: arenaceo-

grossolana; struttura: particellare.

Biocalcarenite impura a grana arenaceo-grossolana, a discocicline. Il colore d'insieme è giallognolo, dovuto a dispersioni di limonite ed ocre gialla. Tessitura bioclastica poco classata, granosostenuta, con micrite interstiziale. E' presente una frazione detritica costituita da sabbia quarzosa e argilla, responsabile del carattere impuro della roccia. I fossili presenti sono costituiti da discocicline in prevalenza, qualche nummulite, frammenti di echinodermi e resti algali. Le discocicline sono fossili guida dell'eocene medio-superiore, pertanto si può dedurre un'appartenenza alla Formazione delle Marne di Priabona.

Stato di conservazione: pessimo (3)*, in quanto presenta diffusi e marcati fenomeni di decoesione intergranulare, generati prevalentemente da sbalzi termici e da gelività, ma anche da fenomeni di dissoluzione dei carbonati e di idrolisi dei silicati. Non si rilevano patine o croste superficiali degne di nota.

7° Frammento di pietra, estratto dal Teatro Romano, VR.

Descrizione macroscopica: Tipologia: roccia carbonatica; colore: giallognolo; grana: arenaceo-grossolana; struttura: particellare.

Biocalcarenite impura a grana arenaceo-grossolana, a discocicline. Il colore d'insieme è giallognolo, derivato da disseminazione di minerali limonitici. Tessitura bioclastica scarsamente classata, grano sostenuta, con micrite interstiziale. E' presente una frazione detritica costituita da sabbia quarzosa e da minerali argillosi, responsabile del carattere impuro della roccia. I fossili presenti sono costituiti soprattutto da discocicline, qualche nummulite, frammenti di echinodermi e resti algali. Come le precedenti appartiene pertanto alla Formazione delle Marne di Priabona.

Stato di conservazione: scadente (5)*, per la presenza di fenomeni di decoesione intergranulare dovuti a processi termoclastici e da una limitata dissoluzione dei carbonati e dei silicati. Sulla parte spianata non si rilevano patine o croste superficiali degne di nota, mentre nella zona irregolare è presente una sottile crosta nera a carattere solfatico di spessore 100-150 µ.

*Scala di valutazione: ottimo (10), buono (9-8), discreto (7), mediocre (6), scadente (5-3), pessimo (3-0).

Tabella 5.4 – Analisi petrografiche di campioni lapidei

Campione	Tipo	Carbonato di Calcio	Silicati	Gesso	Nitrati	Ossalato di Calcio
1	crosta	+++	++	-	-	tr
4A	crosta	+++	++	-	-	-
5A	crosta	+++	++	-	-	-
6C	crosta	+++	++	-	tr	-
8A	crosta	+++	++	-	-	-
9A	crosta	++	tr	+++	-	-
10A	crosta	+++	++	-	-	-
12A	crosta	++	+	+++	+	+

Tabella 5.5 – Risultati delle analisi FT/IR, spettrofotometria I.R.

Legenda

- non rilevato
- tr componente presente in tracce
- + componente presente in piccola quantità
- ++ componente presente in quantità media
- +++ componente principale

In conclusione le analisi eseguite hanno evidenziato che il materiale lapideo del Teatro Romano risulta fortemente degradato per numerosi motivi, riconducibili a varie cause, così sintetizzabili:

- la natura dei materiali è calcareo-marnosa e risente quindi degli attacchi acidi dovuti alle piogge (dissoluzione dei carbonati), degli sbalzi di temperatura (dilatazioni-contrazioni anisotrope della calcite) e dei fenomeni di idrolisi dei silicati;
- la natura delle rocce è grossolana, ed il reticolo di micro e macrodiscontinuità geneticamente presenti, allargate e indebolite inizialmente principalmente dai fenomeni termici di cui sopra, aumenta le vie di infiltrazione delle acque piovane, che dissolvono in quanto acide i carbonati e, d'inverno, a causa del gelo-disgelo letteralmente disintegrano la superficie delle rocce aumentando esponenzialmente il degrado;
- l'inquinamento atmosferico, notevole data anche la contiguità con un'arteria stradale, rende ancor più aggressivo l'ambiente;
- l'esposizione a sud-ovest del Teatro risulta infelice in quanto soggetto ad insolazione estiva, sicuramente molto forte e deleteria per i materiali calcitici;
- si aggiungano, infine, gli altri fenomeni presenti quali croste nere, che esasperano il degrado termico, licheni e formicai.

5.7 Tecniche debolmente distruttive: prove sulle caratteristiche meccaniche delle murature

Ai fini della determinazione delle caratteristiche meccaniche di alcuni parametri murari del Teatro Romano, ovvero dei muri di sostegno della cavea e sui muri della scena, sono state eseguite delle prove debolmente distruttive nel maggio del 2000. Tali prove sono consistite nell'esecuzione di un martinetto piatto singolo per la determinazione dello stato tensionale locale, di un martinetto piatto doppio per la determinazione delle caratteristiche di resistenza e deformabilità della muratura e di un carotaggio meccanico orizzontale per la valutazione della composizione interna della muratura.

5.7.1 Martinetto piatto singolo

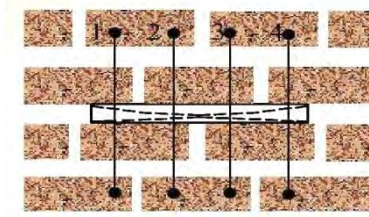


Fig. 5.4 – Schema di applicazione di un martinetto piatto

La prova con martinetto piatto singolo permette di rilevare lo stato di tensione locale presente nelle strutture murarie. La tecnica di prova si basa sulla variazione dello stato tensionale in un punto della struttura, provocato da un taglio piano eseguito in direzione normale alla superficie della muratura. Tale taglio viene realizzato mediante una sega diamantata circolare idraulica. Il rilascio delle tensioni che si manifesta provoca una parziale chiusura del taglio che viene rilevata tramite misure di convergenza fra coppie di punti posti in posizione simmetrica rispetto al taglio stesso.

Viene quindi inserito all'interno del taglio un martinetto piatto, realizzato mediante sottili lamiere di acciaio saldate, che viene collegato al circuito idraulico della pompa. La pressione interna viene quindi gradualmente aumentata fino ad annullare la deformazione misurata in fase di esecuzione del taglio. In queste condizioni la pressione all'interno del martinetto è uguale in prima approssimazione alla sollecitazione preesistente nella muratura (f_m) in direzione normale al piano del martinetto, a meno di una costante sperimentale che tiene conto del rapporto tra l'area del martinetto e l'area del taglio (K_a), ed a meno di una costante che tiene conto della rigidità intrinseca di ogni martinetto (K_m).

$$f_m = P \cdot k_a \cdot k_m$$

dove:

- P pressione del martinetto che permette di ristabilire la distanza iniziale tra le basi;
- k_a costante adimensionale che rappresenta il rapporto tra l'area del martinetto e l'area del taglio eseguito nella muratura;
- k_m costante adimensionale dipendente dalla geometria e dalla rigidità del martinetto.

Al termine della prova il martinetto viene recuperato e la muratura viene riportata alle condizioni originarie richiudendo il taglio con malta.

I risultati della prova di martinetto piatto singolo vengono generalmente rappresentati mediante un diagramma in cui in ascissa si legge la tensione, ovvero la pressione dell'olio all'interno del martinetto moltiplicata per le costanti d'area e di martinetto (k_A e k_M), ed in ordinata si leggono le distanze relative tra le basi di misura posizionate al di sopra ed al di

sotto del taglio. La prova si considera ultimata quando – in seguito ad incremento di pressione nel martinetto - si ottiene il ripristino delle misurazioni iniziali (le misure relative si portano sullo zero), e la corrispondente pressione letta al martinetto è la tensione locale nella muratura, a meno delle costanti moltiplicative k_A e k_M .

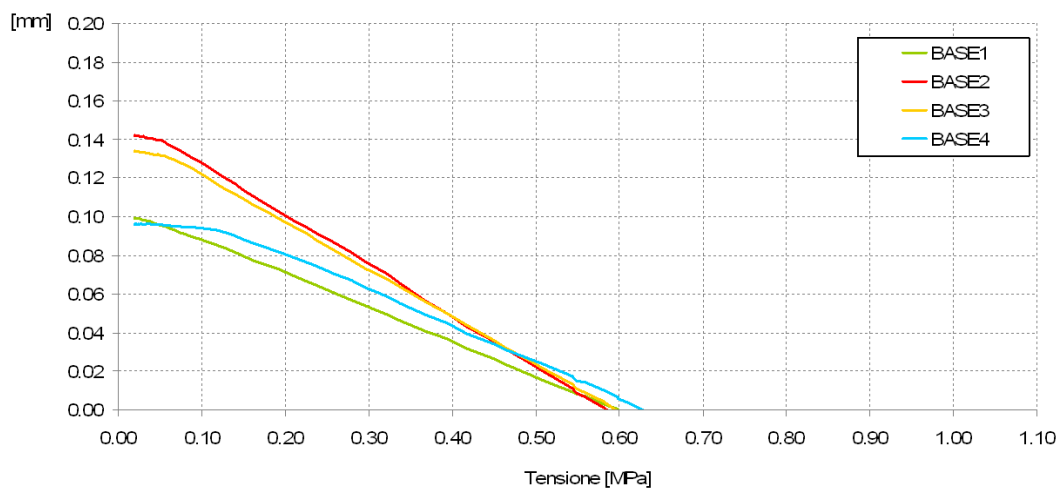


Fig. 5.5 – Rappresentazione tipica dei risultati di una prova di martinetto piatto singolo: in ordinata le distanze relative tra le basi di misura posizionate al di sopra e al di sotto del taglio, in ascissa la tensione applicata alla muratura.

5.7.2 Martinetto piatto doppio

La prova con martinetto piatto doppio si effettua, generalmente, in corrispondenza di un punto di esecuzione della prova con martinetto singolo e consente di determinare le caratteristiche di deformabilità ed eventuale resistenza della muratura, nonché fornire una stima della resistenza muraria al limite elastico. La prova consiste nell’effettuare un secondo taglio, parallelo al primo ad una distanza variabile (circa 500/600 mm, ma che generalmente dipende dagli elementi resistenti della muratura investigata e dalla larghezza del martinetto utilizzato, potendo variare tra 1 e 1,5 volte quest’ultima dimensione), entro cui viene inserito un altro martinetto.

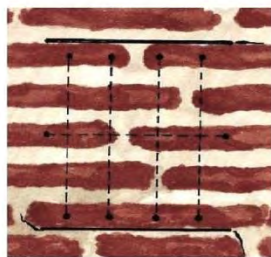


Fig. 5.6 – Schema di applicazione di un martinetto piatto doppio

Ciò consente di delimitare un campione di muratura rappresentativo per dimensioni del comportamento meccanico della stessa. I due martinetti paralleli – opportunamente messi in pressione – applicano al campione interposto uno stato di sollecitazione monoassiale, e le deformazioni risultanti nella porzione muraria vengono misurate da un numero adeguato di

sensori di spostamento in direzione ortogonale ed eventualmente parallela ai piani di inserimento dei martinetti, al fine di determinare il diagramma tensione deformazione della muratura indagata. Generalmente il carico viene applicato in maniera ciclica, ovvero con cicli di carico con incrementi crescenti di pressione nei martinetti intervallati dallo scarico completo di questi.

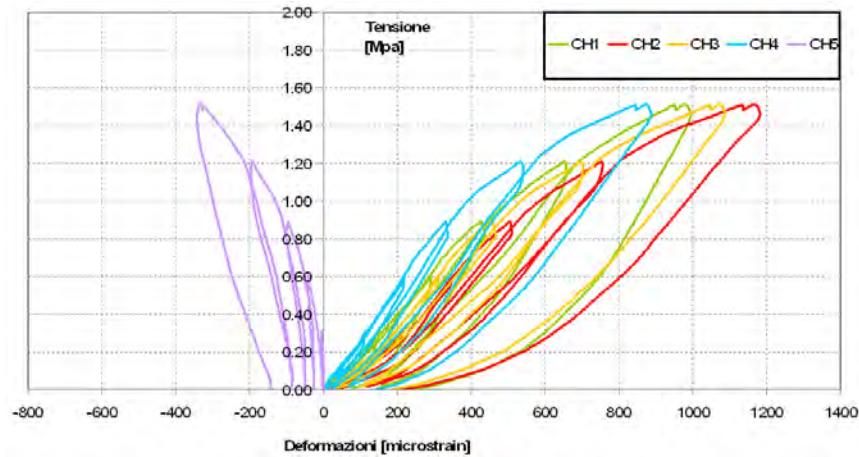


Fig. 5.7 – Rappresentazione tipica dei risultati di una prova di martinetto piatto doppio: in ascissa le deformazioni registrate nelle basi di misura (positive-accorciamento-basi verticali; negative-allungamento-basi orizzontali), in ordinata la tensione applicata alla muratura

La prova viene spinta fino ad una pressione superiore allo stato di compressione locale precedentemente determinato con prova di martinetto piatto singolo, limitando la tensione massima raggiunta nei cicli di carico ad un valore sufficientemente inferiore alla tensione di rottura del materiale. I risultati della prova di martinetto piatto doppio vengono generalmente rappresentati mediante un diagramma in cui in ascissa si leggono le deformazioni registrate nelle basi di misura (positive – accorciamento – basi verticali; negative – allungamento – basi orizzontali), in ordinata la tensione applicata alla muratura compresa tra i martinetti, ovvero la pressione dell’olio all’interno dei martinetti moltiplicata per le costanti d’aera e di martinetto (k_A e k_M). La pendenza della curva di carico corrisponde per le basi verticali al modulo di rigidezza della muratura indagata (E , modulo di Young).

Il modulo di elasticità tangente E_t si calcola con la relazione (Norma RILEM):

$$E_t = \delta f_m / \delta \varepsilon_m$$

dove:

δf_m incremento di tensione

$\delta \varepsilon_m$ corrispondente incremento di deformazione

Il modulo di elasticità tangente E_s si calcola con la relazione (Norma RILEM):

$$E_s = f_{mi}/\varepsilon_{mi}$$

dove:

f_{mi} tensione del punto i-esimo

ε_{mi} deformazione del punto i-esimo

5.7.3 Limiti e possibilità delle prove di martinetto piatto

Se tuttavia si considera la muratura (ed in particolare la muratura storica) come un materiale fortemente eterogeneo, anisotropo e con notevoli variazioni (tipologiche, di materiali, di periodo di costruzione) all'interno dello stesso edificio indagato, emerge che i risultati di tali prove, generalmente condotte in numero ridotto all'interno di un singolo edificio, assumono complessivamente delle caratteristiche 'qualitative', ovvero riescono a proporre delle informazioni 'generali' sulle murature indagate, in particolar modo nell'estrapolazione dei risultati acquisiti (tensione locale, parametri meccanici) ai fini del calcolo o della verifica strutturale (statica, sismica). E' ad esempio indicativo il fatto che i risultati di tensione locale rilevati dalla prova di martinetto piatto singolo in molti casi forniscono dei risultati discordanti rispetto a quanto emerge dalla valutazione della tensione locale per via analitica o modellazione numerica, essendo ciò dovuto ad un insieme di fattori, alcuni dei quali di difficile determinazione (ad es. presenza di muratura di differenti caratteristiche meccaniche nello spessore). Se poi si considera la prova di martinetto piatto doppio, anche in questo caso forti variazioni possono emergere da situazioni locali dei paramenti murari all'interno dello stesso edificio analizzato. Il giudizio sui risultati, come già menzionato in molti casi contrastanti tra loro, deve pertanto tener conto di situazioni particolari quali la concentrazione di tensione nelle strutture indagate, la presenza di deformazioni anelastiche nella muratura, la presenza di basse tensioni di compressione. Inoltre, la distribuzione delle tensioni non è uniforme lungo il taglio eseguito a causa degli effetti di bordo del taglio stesso e della maggiore rigidità del martinetto in prossimità delle saldature, per cui spostamenti/deformazioni maggiori si riscontrano nella parte centrale del taglio sia nella prova di martinetto singolo (i lembi del taglio si avvicinano maggiormente nella parte centrale dello stesso, ove quindi si misurano spostamenti maggiori) che in quella di martinetto doppio (il pannello murario compreso tra i due martinetti non è soggetto ad uno stato uniforme di compressione, sia per il comportamento meccanico del martinetto, che presenta maggiore rigidità ai bordi e quindi carica 'meno' lateralmente, che per gli effetti della muratura laterale che influisce sulla distribuzione delle tensioni). Tale effetto fa in particolare emergere un'apparente maggiore rigidità muraria (nella prova di martinetto piatto doppio) nelle basi

di misura laterali e quindi vicine ai bordi del taglio, ed al contrario minore nelle basi poste centralmente rispetto ai tagli, essendo ciò dovuto non a comportamenti disomogenei della muratura ma a tensioni non uniformi di compressione all'interno del pannello stesso.

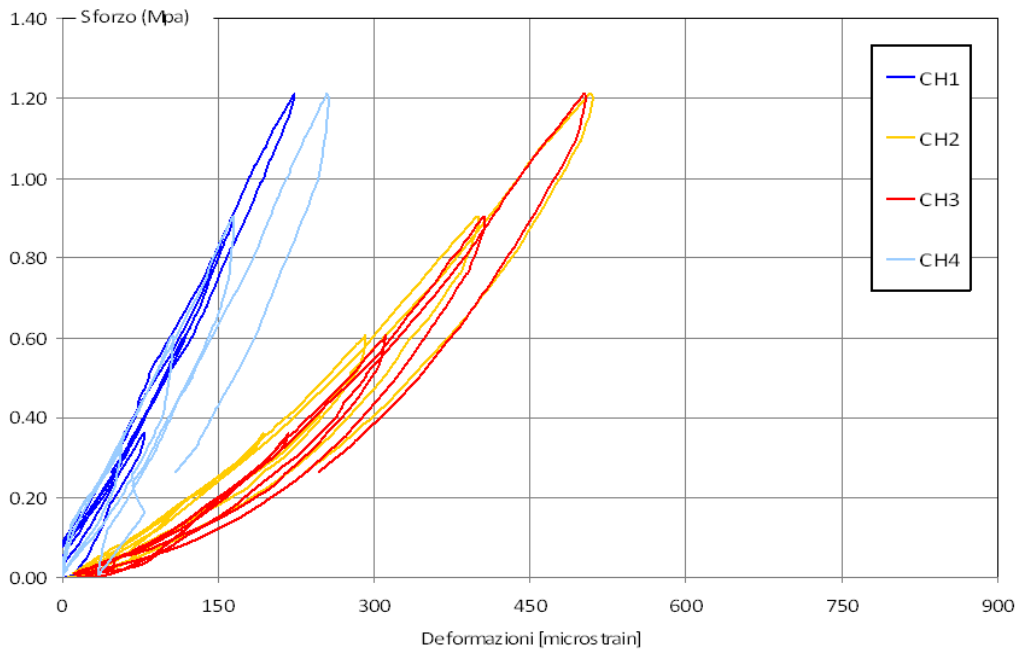


Fig. 5.8 – Prova di un martinetto piatto doppio, diagramma tensioni deformazioni

Nel grafico si nota il differente comportamento delle basi centrali (CH 2-3, colori rosso-giallo – E apparente = 2500 MPa) rispetto alle laterali (CH 1-4, colori blu-azzurro – E apparente = 5000 MPa).

Anche nella prova di martinetto piatto singolo si nota come i dati emersi dai singoli sensori possano presentare dei comportamenti differenti, come la diversa compensazione degli spostamenti durante la prova (Grafico 4-8). Infine, i risultati dei test devono essere considerati non attendibili ove si verificano importanti irregolarità nella risposta, ovvero quando non si riesca ad ottenere una compensazione degli spostamenti in tutte le basi di lettura (nel caso di martinetto piatto singolo), nel caso in cui la muratura sovrastante non fornisca un adeguato contrasto per l'esecuzione della prova di martinetto piatto doppio, quando la risposta indichi una muratura eccessivamente “debole” o disomogenea.

Nel grafico sottostante si nota il differente comportamento delle basi centrali (CH 2-3, colori rosso-giallo – maggiori spostamenti iniziali) rispetto alle laterali (CH 1-4, colori blu-azzurro).

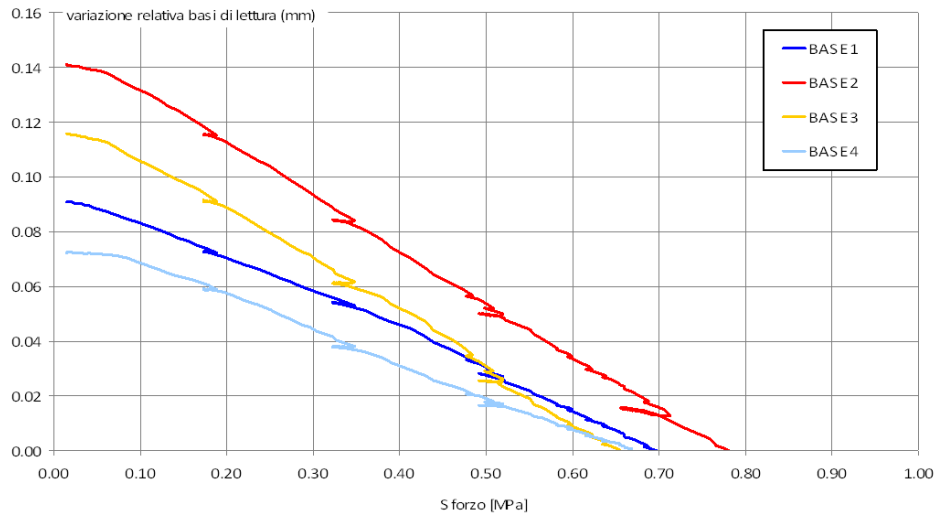


Fig. 5.9 – Prova di martinetto piatto singolo, diagramma spostamenti relativi - tensioni

5.7.4 Esecuzione delle prove di martinetto e carotaggio meccanico

Il carotaggio meccanico consente la determinazione dei materiali costituenti la muratura, mediante il prelievo di campioni (carote) di materiale, consentendo la determinazione della tipologia e dimensione degli elementi attraversati. Viene eseguito tramite l'utilizzo di una carotatrice idraulica ad avanzamento manuale, fissata alla muratura con tasselli meccanici o chimici, munita sulla testa di perforazione di corona diamantata di opportuno diametro.

Le indagini compiute sono state eseguite su una limitata porzione di muratura del terzo muro radiale del settore occidentale (lato Vicolo Botte), a circa 80 cm dal muro di chiusura posto sul fondo. Il carotaggio è stato eseguito tra i due tagli realizzati per la prova con il martinetto doppio. Di seguito viene presentata la tipologia delle prove, ed in Fig. 5.10 ne è indicata l'ubicazione.

N. PROVA	CODICE IDENTIFIC.	PROVA	TIPO MARTINETTO	ELEMENTO ANALIZZATO
1	M1	martinetto singolo	semicircolare 350x(85+175)x3.5	muratura a sacco (+0.70 m dal p.c.)
2	MD1	martinetto doppio	semicircolare 350x(85+175)x3.5	muratura a sacco (+0.70 m e +1.30 mdal p.c.)
N. PROVA	CODICE IDENTIFIC.	PROVA	DIAMETRO ESTERNO (mm)	ELEMENTO ANALIZZATO
1	C1	carotaggio	63	muratura a sacco

Tabella 5.6 – Tabella riassuntiva delle indagini eseguite, martinetto e carotaggio

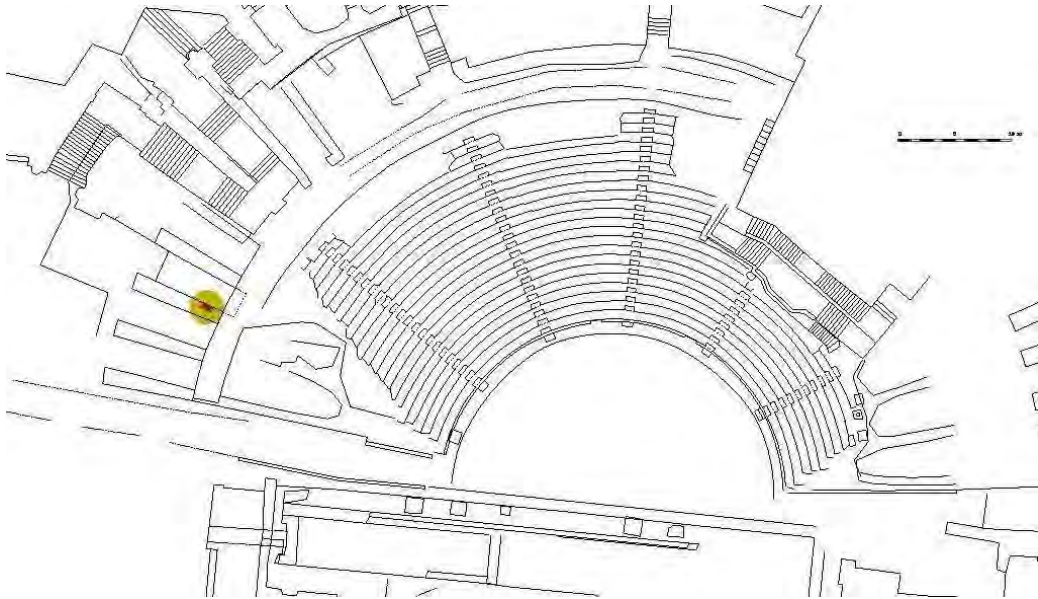


Fig. 5.10 – Ubicazione delle indagini con martinetto e carotaggio

I martinetti utilizzati presentavano forma semicircolare 350 x (85+175) x 3.5 (largh. x prof. X spess.). Le misure di convergenza (prova di martinetto singolo) sono state effettuate mediante l'utilizzo di un estensimetro meccanico rimovibile con base di misura pari a 200 mm, previo incollaggio con resina bicomponente, di una coppia di piastrine in acciaio *invar* (diametro 5 mm) sulla superficie della muratura. Per le misure di deformabilità assiale (prova di martinetto doppio) è stata utilizzata una sola base di misura centrale posta internamente tra i due martinetti. Le misure di convergenza sono state eseguite con un estensimetro meccanico rimovibile, avente base di misura pari a 400 mm. Il carotaggio è stato eseguito orizzontalmente con raffreddamento a ricircolazione d'acqua.

5.7.5 Risultati ottenuti

Vengono elencati i principali dati ottenuti dalle prove di martinetto e di carotaggio al fine di un'identificazione completa della tipologia di muraria presente nel Teatro Romano.

5.7.5.1 Martinetto singolo

La tensione d'esercizio della muratura (determinata a partire dalla prova di martinetto piatto singolo) viene calcolata con la seguente formula:

$$\sigma = 0,1 \cdot p \cdot K_a \cdot K_m$$

$$0,1 \cdot 5,84 \cdot 0,95 \cdot 0,94 = \mathbf{0,51 \text{ MPa}}$$

dove: σ tensione d'esercizio della muratura (espressa in MPa);

- p pressione letta al manometro (espressa in bar) quando viene annullata la deformazione della base di misura;
- K_a costante di superficie (rapporto fra l'area del martinetto e l'area del taglio nella muratura = valore < 1);
- K_m costante del martinetto (valore caratteristico di ogni martinetto, funzione della pressione, che tiene conto della rigidità dello stesso = valore < 1).

Di seguito si riporta la tabella e il grafico del risultato della prova. La simbologia utilizzata è la seguente:

- colonna *BASE*: lettura di deformazione letta alla base centrale, espressa in μm ($1 \mu\text{m} = 1/1000 \text{ mm}$)
- colonna *SOLL.*: lettura di pressione letta al manometro della pompa, espressa in MPa ($1 \text{ MPa} = 10 \text{ Kg/cm}^2 \text{ c.a.}$)
- *PT*: lettura di deformazione letta prima dell'esecuzione del taglio
- *DT*: lettura di deformazione letta dopo l'esecuzione del taglio
- *SC*: lettura di deformazione letta allo scarico del circuito idraulico

MARTINETTO M1			
N.		BASE	SOLL.
		<i>mmx1000</i>	<i>Mpa</i>
1	PT	0	0
2	DT	-41,6	0
3		-32	0,17
4		-14,4	0,35
5		1,6	0,52
6		17,6	0,7
7	SC	-33,6	0

Tabella 5.7 – Tabella prova martinetto singolo

Si riporta, quindi, il valore di sollecitazione rilevato nella muratura in corrispondenza del punto di prova:

N. PROVA	TIPO MARTINETTO (mm)	COST. DI MARTINETTO K_m	COSTANTE DI AREA K_a	SOLLECITAZIONE (MPa)
M1	semicircolare 350x(85+175)x3.5	0.92	0.95	base centrale = 0.51

Tabella 5.8 – Tabella risultati ottenuti, martinetto piatto singolo

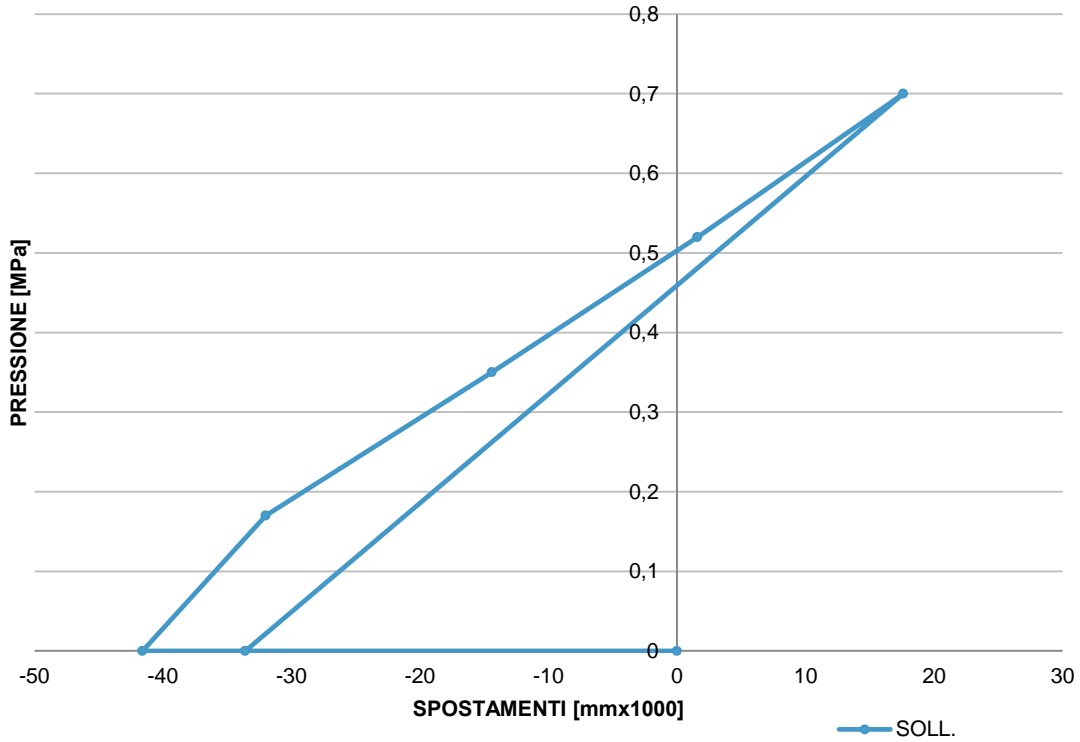


Fig. 5.11 – Grafico prova martinetto singolo

5.7.5.2 Martinetto doppio MD

Il campione di muratura compreso tra i due martinetti piatti è stato sottoposto ad un unico ciclo di carico, nella prova di martinetto piatto doppio, gradualmente crescente fino al raggiungimento di una tensione di 0,92 MPa.

Si è deciso di non incrementare ulteriormente il carico per evitare la possibilità che comparissero fessurazioni dovute alla rottura del concio di muratura posto tra i due martinetti. Il modulo di deformabilità, calcolato in corrispondenza della base di misura centrale nell’intervallo 0 – 0,92 MPa, è risultato pari a **3178 MPa**.

MARTINETTO DOPPIO MD			
N.		BASE	SOLL.
		mmx1000	Mpa
1	inizio 1° ciclo	0	0
2		24,1	0,18
3		53,1	0,37
4		75,6	0,55
5		99,7	0,74
6	fine 1° ciclo	115,8	0,92
7		82	0,55
8	scarico	9,6	0

Tabella 5.9 – Tabella prova martinetto doppio MD

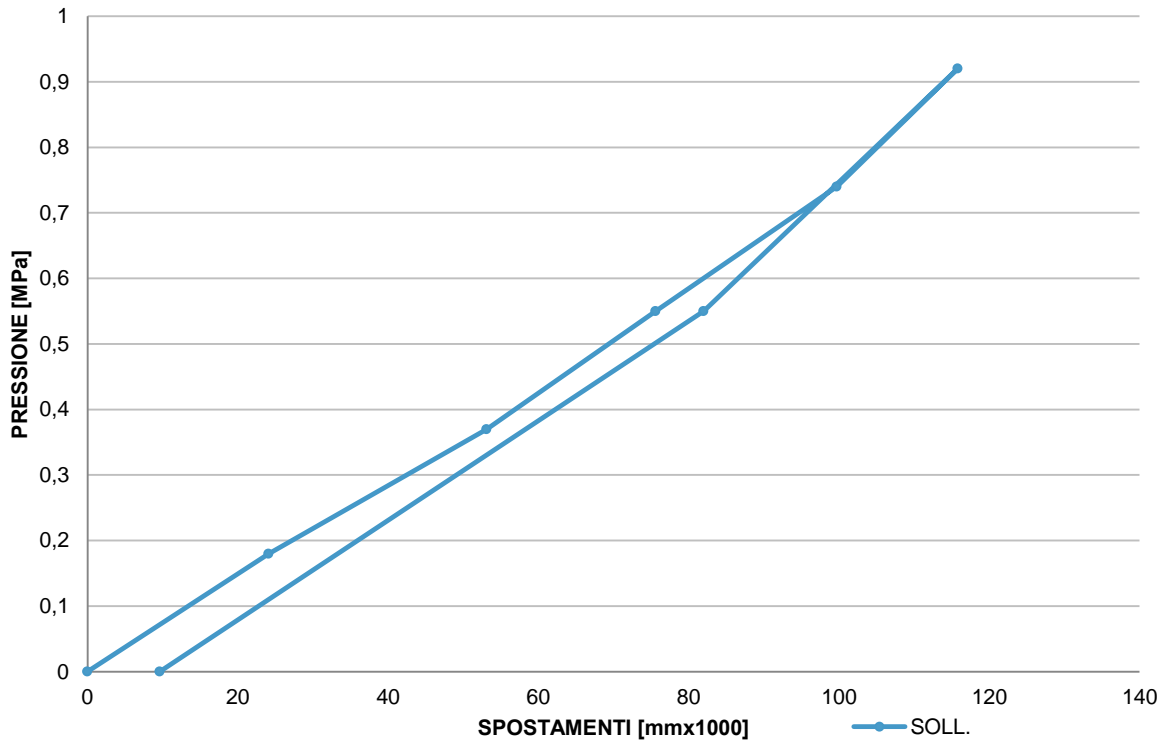


Fig. 5.12 – Grafico prova martinetto doppio MD

5.7.5.3 Carotaggi

Il carotaggio orizzontale è stato spinto fino ad una larghezza pari a 1,20 m. Viene presentata nel seguito una ricostruzione grafica del materiale estratto con indicazioni tipologiche e dimensionali degli strati attraversati.

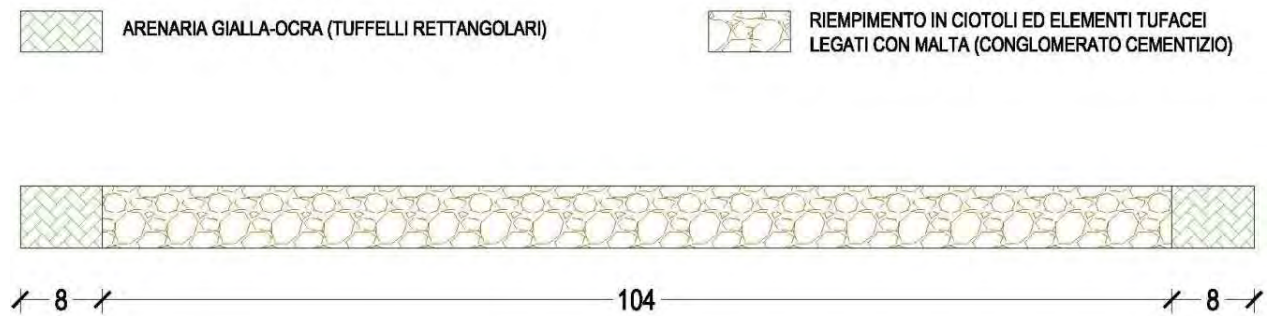


Fig. 5.13 – Profilo schematico indicativo del carotaggio (misure espresse in cm)

5.8 Tecniche non distruttive: prove dinamiche sulle strutture più significative

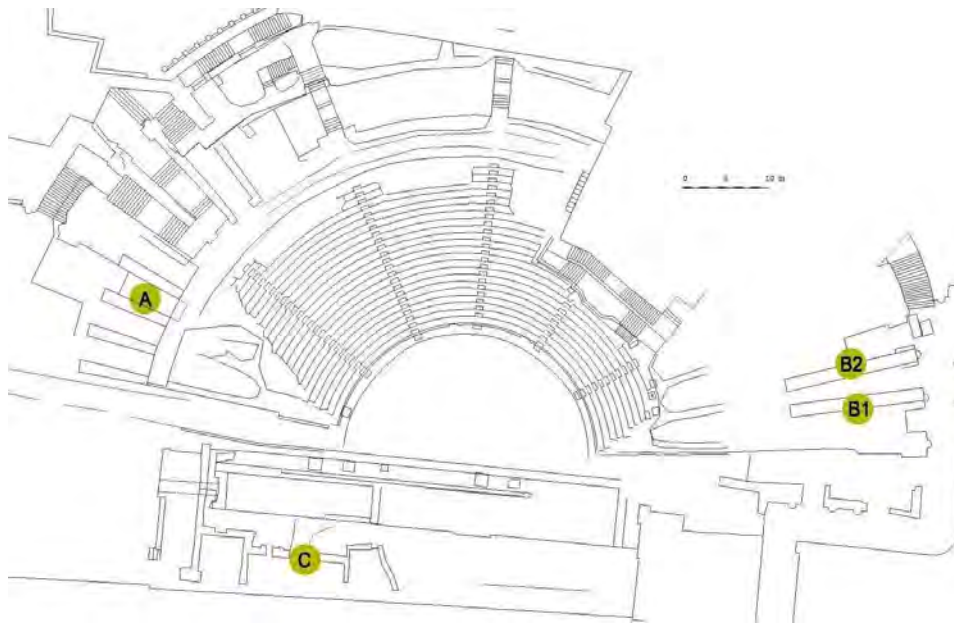


Fig. 5.14 – Ubicazione delle aree di esecuzione dei test dinamici

Nell'aprile del 2000 si sono svolte prove di identificazione dinamica di alcune porzioni murarie significative del complesso del Teatro Romano. Le strutture oggetto delle prove considerate maggiormente significative dal punto di vista del comportamento dinamico e in relazione al loro apparente stato di stabilità, sono le seguenti:

- a. la coppia di setti murari liberi della zona est;
- b. due dei setti murari liberi della zona ovest;
- c. le strutture dell'edificio scenico (zona sud-ovest).

5.8.1 Descrizione delle strutture oggetto di indagine

In questo paragrafo vengono descritte le strutture oggetto di indagine. Verranno poi spiegate nel dettaglio le prove di analisi e identificazione dinamica in un capitolo dedicato.

Nella zona ovest del *Museo* la situazione più significativa è costituita dalla coppia di setti murari liberi, A3 e A4. Essi si presentano accoppiati in corrispondenza del livello della prima precinzione (9,15 m dal livello dell'orchestra), per mezzo di una voltina in laterizio, inserita in uno degli interventi di ripristino, apparentemente per ridurre la luce di inflessione libera del setto più snello, quello a valle. Questo setto presenta in sommità i resti dell'imposta di un arcovolo, che costituiscono una massa concentrata. Secondo quanto riferisce chi ha eseguito

l'ultima fase dell'intervento di ripristino, negli anni Cinquanta, il setto è armato con barre verticali lungo tutta l'altezza, e cucito, sempre con barre metalliche, in numerosi punti.

In corrispondenza della zona est della *Chiesa* sopravvivono buona parte dei muri radiali. Fra questi, due risultano particolarmente interessanti dal punto di vista del comportamento dinamico, per la snellezza e l'assenza di vincoli laterali, il setto B1 e B3.

Dell'edificio scenico rimane solo la parte molto limitata del proscenio (sud-ovest), che rappresenta un terzo in elevazione e meno della metà in larghezza della struttura originaria.



Fig. 5.15 – Setti murari nella zona Ovest (A) ed Est (B) del Teatro Romano, oggetto di test dinamici

5.8.2 Obiettivo della sperimentazione e finalità della ricerca

L'obiettivo della campagna di indagini era quello di caratterizzare il comportamento dinamico dei setti murari liberi più significativi (4 in totale) nonché dell'edificio scenico in seguito alle vibrazioni indotte dall'ambiente (con particolare riferimento per quest'ultimo al traffico automobilistico). La ricerca si proponeva di individuare un affidabile modello numerico del comportamento meccanico delle strutture murarie, evidenziando eventuali anomalie nella risposta dinamica che potessero essere messe in relazione con problemi di stabilità delle strutture in oggetto. Tali studi preliminari fornivano informazioni per la scelta e posizionamento della sensoristica ai fini dell'installazione di un sistema di monitoraggio permanente. Nella presente trattazione viene unicamente riportata la relazione relativa all'esecuzione delle prove e non la successiva fase di interpretazione dei dati acquisiti, poiché verrà trattata nello specifico nei capitoli successivi.

5.8.3 Modalità di prova

Le prove di caratterizzazione dinamica sono state eseguite secondo le seguenti modalità:

- prove con vibrazione ambientale (*Ambient Vibration Test*, AVT)
- prove impulsive (*Short Test*, SHT)

Nel caso dell'edificio scenico C, sono state inoltre eseguite misure di vibrazione ambientale per la valutazione dell'ammissibilità dei livelli di vibrazione indotta, in conformità alle norme UNI 1661 (AVT UNI).

Nel caso delle prove di vibrazione ambientale (AVT, sollecitazioni essenzialmente generate dal traffico veicolare e dal vento) lo scopo era quello di individuare i parametri modali di massima (frequenze ed ampiezze modali) su cui calibrare le prove successive, nonché di misurare il livello e lo spettro di frequenze delle vibrazioni indotte dall'ambiente. Le prove consistevano nell'acquisizione di una sequenza di segnali durante alcuni secondi, procedendo poi all'elaborazione dei dati acquisiti. Tale trattamento dei dati consisteva in:

- selezione dei segnali dove vengono scartate le acquisizioni evidentemente spurie o dove sono evidenti sollecitazioni da forzanti non propriamente ambientali;
- frazionamento di ciascuna acquisizione in segnali della durata di circa 1 sec;
- filtraggio digitale passa-alto 0,1 con profilo *Butterworth* di ordine 5;
- autocorrelazione dei segnali;
- calcolo della Densità Spettrale di Potenza (DSP) per ciascun segnale come spettro di *Fourier* dell'autocorrelazione;
- calcolo della media delle DSP.

Nel caso delle prove impulsive (*shock test*, SHT, con forzante corrispondente all'impulso generato da una mazza strumentata), la finalità dei test eseguiti era quella di caratterizzare dinamicamente la struttura in un ampio campo di frequenze (0 - 50 Hz), con l'obiettivo di determinare le Funzioni di Risposta in Frequenza (FRF) per forzanti applicate in più punti significativi. Per ciascuno dei punti di sollecitazione, vengono acquisite 10 *time history*, relativamente al martello e a ciascuno degli accelerometri; l'acquisizione parte su *trigger* impostato sul canale della mazza strumentata.

L'analisi del segnale consisteva in:

- selezione delle acquisizioni per cui sono scartate quelle acquisizioni dove il livello di sollecitazione esce dal *range* elettrico (5V), dove sono evidenti forzanti supplementari (per es. per il rimbalzo del martello) che si presentano altrimenti spurie;
- finestre del canale della forzante con finestra rettangolare attorno all'impulso teorico;

- azzeramento dell'*offset* dei canali della risposta;
- calcolo dello spettro di *Fourier* di tutti i canali;
- calcolo della FRF per ciascuno dei canali di risposta come rapporto fra gli spettri della risposta e della forzante;
- calcolo della FRF come media di quelle calcolate per ciascuna acquisizione.

I sensori sono stati accoppiati alle strutture con la seguente procedura:

- applicazione di una piastrina cilindrica in alluminio alla struttura per mezzo di tasselli espansivi;
- accoppiamento di un cubo in alluminio alla piastrina;
- accoppiamento dei sensori al cubo;
- applicazione dei cavi e fissaggio dei cavi alla struttura vibrante con nastro adesivo.

L'ancoraggio può considerarsi rigido nel campo di frequenze di interesse ($f > 100$ Hz). Il sistema è in accordo con le prescrizioni della UNI ISO 5348.

Nella zona *Museo* (test A) sono stati posizionati in totale 7 accelerometri, con la seguente modalità: canali 1 e 2 sulla sommità del setto a monte in direzione ortogonale al piano del setto, canale 3 in corrispondenza della voltina in direzione ortogonale al piano del setto a monte, canali 4 e 5 sulla sommità del setto a valle in direzione ortogonale al piano del setto, canale 6 in corrispondenza della voltina in direzione ortogonale al piano del setto a valle e infine canale 7 sulla sommità del setto a valle in direzione orizzontale al piano del setto. I setti sono stati sollecitati in prossimità di tutti i punti di misura, eccetto il punto 1.

Nei setti murari della zona *Chiesa* (test B1) sono stati posizionati in totale 3 accelerometri, con la seguente modalità: canali 1 e 2 sulla sommità del setto in direzione ortogonale al piano del setto, canale 3 sulla sommità del setto in direzione orizzontale al piano del setto, con sollecitazione in prossimità di tutti i punti di misura. Nei setti murari della zona est (test B2) sono stati posizionati in totale 3 accelerometri, con la seguente modalità: canali 1 e 2 sulla sommità del setto in direzione ortogonale al piano del setto, canale 3 sulla sommità del setto in direzione orizzontale al piano del setto, con sollecitazione in prossimità di tutti i punti di misura, ad eccezione del punto 3.

Nei setti murari del *proscenio* ad ovest (test C) sono state adottate 2 configurazioni accelerometriche: nella prima sono stati posizionati in totale 7 accelerometri, sulla sommità dell'edificio scenico; nella seconda sono state posizionate due terne di accelerometri, una alla base e l'altra in sommità, nella posizione apparentemente più sensibile alle vibrazioni ambientali, in accordo con le indicazioni delle norme UNI 9916 e DIN 4150. Per la sola configurazione 1 sono state eseguite prove forzate nei punti di misura 2, 5,6.

5.9 Riassunto delle prove

A conclusione viene riportata una tabella che riassume le prove eseguite e i principali risultati ottenuti, al fine di una più chiara e rapida comprensione.

TABELLA RIASSUNTIVA DEI RISULTATI DELLE PROVE		
Prova	Elemento analizzato	Risultato
Indagini geognostiche e geofisiche	<i>Terreno</i>	<i>Primo strato: terreno ghiaioso sabbioso con presenza di blocchi di calcarenite Secondo strato: roccia granulare clastica a grana fine</i>
Indagine petrografica	<i>Blocchi costituenti il teatro</i>	<i>Blocchi di natura calcarea, bioclastici e marnosi</i>
Analisi fisico-volumiche	<i>Blocchi costituenti il teatro</i>	<i>Blocchi poco umidi con grado di saturazione basso</i>
Analisi chimiche (del degrado)	<i>Blocchi costituenti il teatro</i>	<i>Alto contenuto in carbonato di calcio e solfati, che sono veicolo di degrado</i>
Martinetto piatto	<i>Terzo muro radiale ad occidente</i>	$\sigma = 0,51 \text{ MPa}$
Carotaggio orizzontale	<i>Terzo muro radiale ad occidente</i>	<i>Paramento esterno di tufelli di arenaria ocre gialla e riempimento interno in elementi tufacei legati con malta</i>
Analisi degrado	<i>Cause del degrado</i>	<ol style="list-style-type: none"> <i>1. la natura calcareo-marnosa dei materiali;</i> <i>2. inquinamento atmosferico e veicolare;</i> <i>3. esposizione del teatro a sud-ovest (insolazione estiva);</i> <i>4. presenza di licheni e formicai;</i> <i>5. la natura grossolana delle rocce e la presenza di discontinuità che aumentano le vie di infiltrazione dell'acqua piovana.</i>

Tabella 5.10 – Tabella riassuntiva delle prove eseguite

STATO DELL'ARTE DEL MONITORAGGIO

6.1 Structural Health Monitoring (SHM)

Nella sua forma più elementare, il monitoraggio strutturale (SHM) è una specializzazione antica. Oggi, gli attuali sistemi SHM sono composti da una rete di sensori collegati ad una unità di acquisizione dei dati. Sistemi più moderni incorporano trasmettitori e ricevitori wireless per superare alcune delle limitazioni dovute dall'uso dei fili.

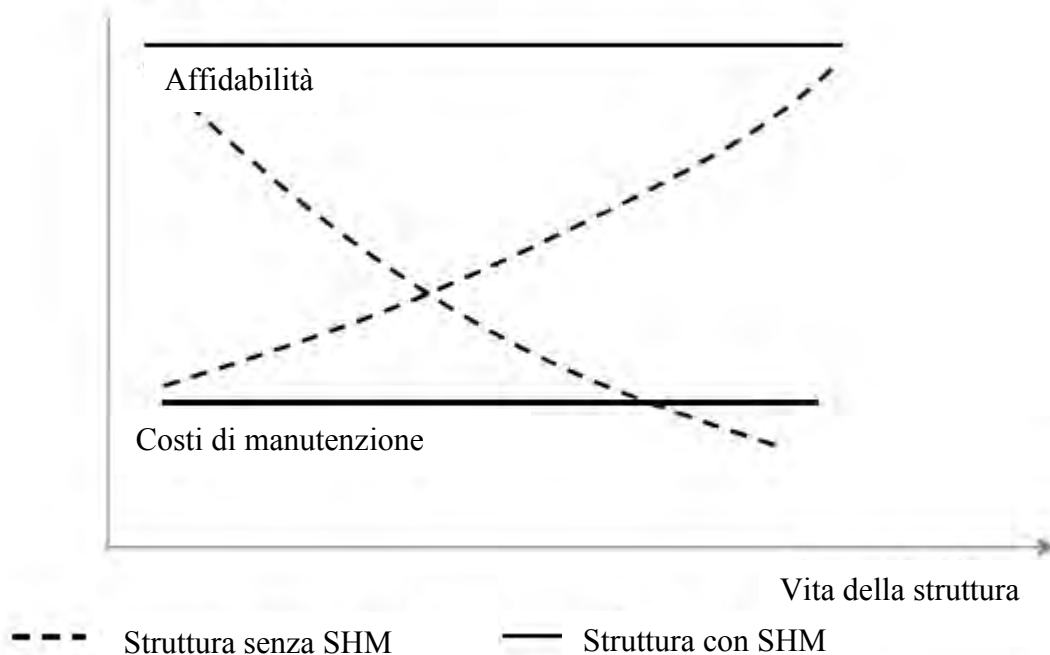
Questi sistemi sono in grado di valutare continuamente la struttura, fornendo informazioni in tempo reale sullo stato della struttura, compresa l'individuazione, localizzazione e quantificazione del danno.

Ogni struttura è sottoposta a sollecitazioni esterne nel corso della sua vita. Queste sollecitazioni possono essere naturali, a causa dell'ambiente, o di origine antropica, come risultato di interazione umana. Indipendentemente dalle cause, queste sollecitazioni possono causare danni e cambiamenti nel comportamento strutturale che possono compromettere le prestazioni e la durata della vita della struttura. Poiché non c'è modo di prevedere e calcolare l'esatto effetto che queste sollecitazioni avranno, le strutture devono essere monitorate continuamente in modo che i danni possano essere valutati e possano essere fatte stime per quanto riguarda la vita residua della struttura per garantire la sicurezza del pubblico e il continuo funzionamento della struttura. Questo processo è noto come monitoraggio strutturale. L'obiettivo è quello di identificare, localizzare, classificare tipo e gravità e stimare gli effetti sull'integrità strutturale del danno. Una volta che i danni sono stati identificati e valutati, si possono adottare dei provvedimenti atti a ridurre il pericolo di collasso e, se necessario, a rafforzare la struttura.

Tradizionalmente, le strutture venivano monitorate visivamente e con l'ausilio di semplici test, come l'uso del martello strumentato o di catene a trascinamento. Questi metodi tradizionali hanno molti inconvenienti ad essi associati. In primo luogo, sono limitati alle aree che sono accessibili per l'osservazione visuale. In secondo luogo, possono essere fatti solo periodicamente, in quanto richiedono l'impiego di un ingegnere o di un tecnico sul posto. Infine, tali ispezioni sono altamente soggettive e fanno molto affidamento sull'esperienza e il giudizio dell'ispettore. Anche se questi metodi sono ancora ampiamente utilizzati, c'è stato un graduale spostamento verso l'uso di sensori automatici nel campo del monitoraggio strutturale. In particolare, per strutture soggette a carichi eccessivi, come ponti e grandi edifici in zona sismica, sta diventando sempre più comune che siano equipaggiate con diverse tipologie di sensori sia strutture nuove che esistenti.

Sebbene ci sia un costo iniziale più elevato associato all'installazione di un sistema di monitoraggio, i benefici a lungo termine e i risparmi sui costi complessivi sono ampi. In genere, quando una struttura subisce un carico eccessivo, in caso di sovraccarico accidentale, evento sismico o altri fenomeni, questa deve essere chiusa finché non sia completamente controllata da un ingegnere. Specialmente nel caso di catastrofi naturali, dove molte strutture in una piccola area possono essere colpite, questo processo può richiedere molto tempo. I tempi di fermo, quindi, possono essere lunghi e questo può portare elevati costi associati. Il monitoraggio strutturale può ridurre al minimo i tempi di inattività e aumentare la produttività, fornendo informazioni in tempo reale sulle prestazioni della struttura. Nel peggiore dei casi una struttura potrebbe essere sovraccaricata inconsapevolmente, arrivando a un catastrofico collasso. Un sistema di monitoraggio è in grado di rilevare i sovraccarichi e i danni associati e di dare l'allarme di un tale evento. Il monitoraggio strutturale può anche essere d'aiuto nel settore dei servizi di manutenzione. Tradizionalmente, la manutenzione viene eseguita su un calendario base, che può essere inefficiente. Se viene utilizzato un sistema di monitoraggio strutturale, la manutenzione può essere effettuata solo quando necessario e concentrata solo su aree che richiedono attenzione. In Figura 1.1 è illustrato un grafico che compara i costi di manutenzione e l'affidabilità delle strutture che sono continuamente monitorate con sistemi SHM, rispetto a quelle in cui non vengono usati i sistemi SHM. Infine, i dati acquisiti da questi sistemi impiegati in strutture reali, possono fornire informazioni sulle prestazioni dell'edificio che possono essere utilizzate in un ambiente di ricerca per sviluppare standard e procedure di progettazione più efficienti.

Qualità della struttura

Figura 6.1 – benefici di SHM¹

6.2 Sviluppi di SHM nel ventesimo secolo

Storicamente, il monitoraggio delle strutture ha coinvolto molte discipline, per poi approdare al campo delle infrastrutture civili, che comprendono edifici nuovi e storici, ponti pedonali e veicolari, gallerie, fabbriche, centrali elettriche convenzionali e nucleari, impianti petroliferi off-shore, strutture portuali e strutture geotecniche come fondazioni e scavi.

A seconda dell'importanza, delle proprietà, dell'uso, del rischio, tali strutture hanno programmi di ispezione, monitoraggio e manutenzione che possono anche essere obbligatori per legge e la cui efficacia è valida se esiste una buona capacità di rivelare tempestivamente le prestazioni; è necessario allora integrare procedure di ispezione limitata e intermittente a sistemi in continuo, on-line, in tempo reale e automatizzati.

Settori determinanti in questo campo sono stati l'industria del petrolio, gli operatori di dighe di rilevanti dimensioni e le agenzie di autostrade, i cui impianti hanno ricevuto la massima attenzione e sforzo di ricerca. Successivamente, approfondimenti sono stati eseguiti sui ponti, tanto da oscurare l'applicazione formale della tecnologia SHM ad altre infrastrutture come le dighe².

¹ Chang F. K., *A summary report of the 2nd workshop on structural health monitoring, atti del convegno, Stanford University, 8–10 September 2000.*

Le strutture residenziali e commerciali hanno ricevuto relativamente poca attenzione a causa di obbligazioni potenziali e della scarsa conoscenza dei proprietari sul tema del monitoraggio strutturale. In questi casi, bisogna compiere notevoli sforzi per educare i proprietari o per costringerli attraverso legislazione o premi assicurativi³.

Una sfida importante nello sviluppo di una strategia di SHM per le infrastrutture civili è che, fatta eccezione per alcuni tipo di alloggi pubblici e privati, ogni struttura è unica. Ciò significa che non c'è una base comune ripetibile in ogni situazione. Quindi, una caratteristica di SHM per le infrastrutture civili è che una parte importante del sistema deve essere orientato verso una valutazione a lungo termine di ciò che si definisce prestazione in normali condizioni strutturali o *health*⁴.

6.2.1 Dighe

Una legislazione obbligatoria, richiedente l'ispezione periodica delle dighe, nacque per la prima volta in Gran Bretagna, a causa del crollo dell'argine di una diga di 30 m che ha causato la morte di 254 persone vicino a Sheffield, nel 1864.

Il quadro normativo nel settore si è poi evoluto e attualmente rimane in vigore il *Reservoir Act* del 1975, che istituisce la figura di ingegnere supervisore (DETR, 2001) per la sorveglianza continua dei serbatoi, compresa l'interpretazione dei dati operativi. Così, le dighe sono storicamente fra le prime strutture in cui si è applicato il monitoraggio e c'è molto da imparare da questa esperienza che si è estesa poi agli altri stati e che può essere applicata ad altri campi.

In questo settore, SHM equivale a sorveglianza. Nei suoi intenti si riconoscono molti degli ideali del monitoraggio attuale:

- una gamma di strumenti per fornire dati di risposta, integrati da ispezioni visive;
- la necessità di una raccolta di dati automatica;
- l'interpretazione intelligente dei dati contro i modelli di comportamento stabiliti, identificando le anomalie.

Tutte le grandi dighe nell'inventario ENEL (oltre 260) sono dotate di trasduttori attivati dal processore centrale ad intervalli regolari per misurare il comportamento strutturale statico,

² Ross R. M., Matthews S. L., *Discussion: in-service structural monitoring - a state of the art review, 1995, pp .214–217.*

³ Chang F. K., *A summary report of the 2nd workshop on structural health monitoring, atti del convegno, Stanford University, 8–10 September 2000.*

⁴ Aktan A. E., Chase S., Inman D., Pines D., *Monitoring and managing the health of infrastructure systems, In Proc. SPIE 4337, xi–xxi, 2001.*

comprendente spostamenti relativi o assoluti, tensioni, infiltrazioni e pressioni di sollevamento dei carichi che, ad esempio, hanno contribuito al crollo della diga Malpasset nel 1959. Alcuni trasduttori sono anche attivati per registrare parametri esterni che potrebbero però comportare modificazioni strutturali delle dighe stesse come, per esempio, il livello d’acqua, la temperatura e le condizioni meteorologiche.

Le variazioni strutturali sono valutate alla luce di quelle ambientali e questo richiede una profonda conoscenza della diga. Tradizionalmente, tale incarico spetta all’ingegnere supervisore, ma più recentemente, con lo sviluppo delle conoscenze, si sono fatti notevoli progressi.

Il controllo della risposta dinamica tramite SHM gioca un ruolo importante nelle dighe per due motivi. In primo luogo, i terremoti sono una seria minaccia per la sicurezza delle dighe e ogni occasione è utile per migliorare la comprensione della performance sismica in modo specifico e generico (Severn et al., 1981) attraverso la calibrazione di modelli e simulazioni. In secondo luogo, le stime delle caratteristiche dinamiche ottenute dal monitoraggio ambientale (Darbre et al., 2002) o intenzionali vibrazioni forzate (Bettinali et al., 1990) forniscono un mezzo per monitorare le caratteristiche strutturali, come indicatori di ‘salute’ strutturale.

6.2.2 Impianti offshore

Nel 1970, la crisi energetica e la scoperta di grandi riserve di petrolio nel Mare del Nord ha portato a rapidi sviluppi nel settore delle infrastrutture offshore, in particolare di impianti di produzione in cemento e acciaio che operano in profondità nel mare pari o maggiori a 150 metri e sottoposti a carichi ambientali estremi.

Con i requisiti obbligatori per l’ispezione nonché la spesa e il pericolo per le ispezioni subacquee, iniziò un crescente interesse nei sistemi diagnostici basati sulle vibrazioni.

Per esempio, i dati riguardanti le prestazioni ambientali della piattaforma (Spidsoe et al., 1980) sono stati raccolti, sotto la responsabilità del gestore, secondo le esigenze del *Norwegian Petroleum Directorate*, al fine di valutare la sicurezza del carico delle piattaforme e le loro fondamenta. Gli studi hanno portato all’identificazione di caratteristiche dinamiche e meccanismi di risposta al carico per un certo numero di impianti sulla piattaforma continentale norvegese.

Circa nello stesso periodo, sono state sviluppate una serie di tecniche di identificazione per la risposta ambientale; da qui si è partiti per la nascita della moderna disciplina sull’analisi

modale operativa. La maggior parte di questi studi hanno concluso che, quando il rilevamento era possibile, il controllo permetteva la verifica delle condizioni e dei danni strutturali. Si evidenzia, però che un problema particolare per gli impianti offshore è che la struttura è un sistema non stazionario con continui cambiamenti nelle proprietà della massa, dovuti a modifiche strutturali, carico e scarico di materiale, movimenti fluidi in impianti di trasformazione e operazioni di perforazione e quindi tale complessità si ripercuote anche per il monitoraggio.

6.2.3 Ponti

Programmi di monitoraggio per i ponti sono stati storicamente implementati al fine di comprendere ed eventualmente calibrare i modelli di carico, struttura e risposta delle catene⁵. Uno dei primi esempi di monitoraggio sistematico documentato su ponti è stato condotto sul Golden Gate e su Bay Bridge di San Francisco in un elaborato programma di misurazione dei periodi dei vari componenti durante la loro costruzione per conoscere il comportamento dinamico e le possibili conseguenze di un terremoto.

L'Università di Washington (1954) descrive il monitoraggio del Tacoma Narrows Bridge durante il suo ciclo di vita poco prima del collasso a causa del vento, sempre concentrandosi su misure di vibrazioni, ma con preoccupazione, ovviamente, per la sicurezza della struttura. L'esperienza del Tacoma Narrows ha un'importanza molto considerevole in quanto quasi tutti i sistemi di monitoraggio di lunga durata su ponte sospeso fino ad oggi sono stati messi in relazione alle preoccupazioni dovute al vento e all'instabilità indotta dalla risposta, per esempio a Humber (Brownjohn et al., 1994) e Deer Isle (Kumarasena et al., 1990). L'importanza strategica giustifica investimenti di capitale tali da avere sistemi SHM fra i più elaborati applicati alle infrastrutture civili.

Negli ultimi dieci anni, programmi di monitoraggio permanente di ponti si sono evoluti in sistemi SHM, e sono stati attuati progetti in Giappone, Hong Kong e, successivamente, nel Nord America.

Essendo queste strutture di notevole importanza, i ponti sospesi moderni vengono tipicamente ispezionati e vengono effettuati elaborati programmi di manutenzione, in modo che in genere gravi danni o deterioramenti della sovrastruttura vengono colti in seguito a controllo visivo, considerando che un sistema SHM richiederebbe un'alta densità di sensori per rilevare il

⁵ Bampton et al., 1986; Barr et al., 1987; Leitch et al., 1987; Brownjohn et al., 1994; Cheung et al., 1997; Macdonald et al., 1997; Catbas et al., 2000; Miyata et al., 2002; Chung, 2003; Wong, 2003; Koh et al., 2003; Wang et al., 2003; Andersen, 2006; Cuhna 2008

problema. Solo i cambiamenti globali quali spostamenti in fondazione, guasti o difetti importanti, come la perdita di tensione del cavo principale, sono rilevabili da procedure globali SHN con un numero di sensori limitato, da collocare naturalmente in modo ottimale. Sviluppi di minor clamore, ma forse in ultima analisi più vantaggiosi per SHM, sono stati ottenuti nel monitoraggio di ponti di piccole dimensioni.

La scelta di un sistema di monitoraggio si attua anche nell’ambito di programmi di gestione dei ponti e progetti di riqualificazione dei ponti, dove è richiesta una qualche forma di convalida atta a garantire l’efficacia dei successivi interventi. In un certo senso, il ruolo del monitoraggio nel costruire, mantenere gestire la struttura può dare agli investitori fiducia nella loro valutazione e prove ai proprietari delle reali condizioni al termine della concessione.

6.2.4 Impianti nucleari

Con l’affermarsi dell’energia nucleare, e poi soprattutto in seguito ai grandi incidenti quali quello di Three Mile Island (USA) nel 1979 e il disastro di Chernobyl del 1986, il problema della sicurezza in tale settore è divenuto determinante, imponendo controlli e monitoraggi continui. Anche se le centrali sono progettate per resistere ai sismi, il progetto non può tener conto di terremoti di entità estrema, per fortuna rari, ma imprevedibili, per impossibilità tecnica od economica a far fronte a sismi di magnitudo elevatissima. Ad esempio gli impianti giapponesi (paese geologicamente molto instabile) sono progettati per resistere ad un sisma di magnitudo 8,5. Il terremoto verificatosi l’11 marzo 2011 ha invece superato i limiti di progetto (magnitudo 9).

Nei componenti strutturali critici per la sicurezza dei reattori nucleari, la strumentazione per la misurazione della risposta viene utilizzata per convalidare e calibrare i disegni durante i test delle prestazioni e contribuisce anche al monitoraggio delle condizioni durante il normale funzionamento. Per la maggior parte dei reattori attualmente in funzione, la componente strutturale critica è il recipiente della pressione in calcestruzzo precompresso (PCPV), che contiene il nocciolo del reattore e il refrigerante primario. Il PCPV è tipicamente un vaso cilindrico di grosso spessore, con rinforzi in acciaio massiccio.

Ogni nazione ha la sua normativa: nel Regno Unito, ad esempio, come descritto dagli operatori per l’installazione (Smith, 1996; Smith et al., 1997), le licenze per gestire reattori nucleari sono concesse dal *Nuclear Installations Inspectorate* (NII) in base alle disposizioni del *Nuclear Installations Act* (1965). Una delle condizioni di concessione o rinnovo di tale licenza è che la concessionaria abbia dimostrato le prestazioni del PCPV durante i test, così

come durante qualsiasi operazione precedente. Spetta al concessionario dimostrare che il reattore è adatto allo scopo e in grado di soddisfare il suo ruolo di sicurezza nucleare.

I reattori hanno poi interruzioni per legge o spegnimenti programmati a intervalli di tre anni per le ispezioni approfondite. Come condizione per il riavvio del reattore, deve essere presentata una relazione alla NII da un esaminatore nominato responsabile (AE), che ha un ruolo simile all'ingegnere supervisore per dighe ed è nominalmente indipendente dal licenziatario e da NII. Ovviamente, un parametro critico costantemente monitorato è la temperatura, mentre i dati relativi alle prestazioni strutturali, ottenuti mediante strain gages vibranti a filo (SGs), giocano un ruolo importante.

Recentemente è da sottolineare l'importanza che si sta dando all'*early warning*, ossia a tutte le azioni che possono essere intraprese tra il momento in cui si ha ragionevole certezza del verificarsi di un evento catastrofico in una data località ed il momento in cui l'evento avviene. Prima del verificarsi di un evento in prossimità dell'impianto, tale sistema provvede alla disattivazione del reattore e all'attivazione di misure di sicurezza che possano interrompere le reazioni di infusione nucleare, in modo da diminuire il danno (un esempio è installato a Ignalina, in Lituania).

6.2.5 Tunnel e scavi

Il monitoraggio dei tunnel (Okundi et al., 2003) è finalizzato a garantire sia la loro deformazione entro i limiti in termini di stabilità, sia gli effetti su o da strutture adiacenti. Quindi, mentre le tensioni possono essere misurate, il problema si presenta sulle deformazioni. Il monitoraggio del patrimonio e di altre strutture nelle vicinanze di tunnel o miniere è una delle maggiori preoccupazioni; gli esempi includono il monitoraggio di Mansion House a Londra durante la costruzione del prolungamento della metropolitana (Price et al., 1994) e il monitoraggio delle miniere australiane a cielo aperto in cui era necessaria l'esplosione di mine (Roberts et al., 2003). A Singapore, sistemi di monitoraggio per i tunnel (Tan & Chua, 2003) sono stati richiesti anche durante le attività di costruzione che si svolgono in superficie e che possono influenzare il loro allineamento e l'integrità. Per la trasmissione dei dati è stata utilizzata la tecnologia wireless, con accesso a internet o messaggi di testo per gli operatori per indicare i parametri di deformazione.

Le costruzioni geotecniche stanno traendo significativi benefici dal SHM. Il recente crollo di un tunnel durante gli scavi a Singapore nell'aprile del 2004 mette in evidenza questo punto (Loh, 2004). L'esame post-incidente delle registrazioni ottenute dalla strumentazione ha rivelato che alcuni movimenti nel muro di scavo erano stati individuati due mesi prima

dell’incidente e avevano superato i livelli di attivazione. Tali movimenti relativamente lenti e monofonici e qualsiasi accelerazione potevano essere identificati in modo semplice e affidabile con una limitata elaborazione on-line e con conseguente allarme automatizzato. Questo incidente ha accelerato le applicazioni dei sistemi wireless di monitoraggio a Singapore.

La tecnologia SHM è stata applicata anche al monitoraggio delle frane, per esempio Reid e LaHusen (1998) hanno usato la telemetria per monitorare la frana Cleveland Corral per 5 anni e Civera et al. (2003) hanno sviluppato inclinometri MEMS, comunicando via wireless per la segnalazione di movimenti del terreno intorno agli scavi della cava.

6.2.6 Fabbricati e torri

Storicamente, gli sviluppi nel monitoraggio degli edifici sono stati motivati dalla necessità di comprendere le performance degli stessi durante i terremoti e i nubifragi. In origine, la conoscenza della risposta dinamica a bassa ampiezza è stata ottenuta da test di vibrazione (Hudson, 1977; Jeary et al., 1981), ma è sempre stato preferibile conoscere la risposta dell’edificio durante un grande evento caratteristico di ampiezza di carico, e questo ha richiesto il monitoraggio a lungo termine. In California, il monitoraggio strutturale, obbligatorio, è gestito da *California Strong Motion Instrumentation Programme (CSMIP)* (*California Geological Survey 2003*), che utilizza i finanziamenti dei proprietari degli immobili per avviare l’installazione e il funzionamento di accelerometri su edifici e altre strutture a scelta. Mentre i dati raccolti potranno fornire un feedback sulla ‘salute’ strutturale, l’obiettivo è di ottenere informazioni per il miglioramento nella progettazione delle strutture soggette a terremoti. La necessità di identificare in scala reale le prestazioni strutturali è sempre stata centrale per la ricerca sismica in ingegneria.

Quindi, la maggior parte delle attività di monitoraggio su edifici e torri è stata volta a migliorare la comprensione del carico e dei meccanismi di risposta, non solo per i terremoti, ma anche per i carichi del vento, per esempio negli studi sulla Bank of Commercial Building a Toronto (Dalglish et al., 1978) e Hume Point, Londra (Littler et al., 1990). A Singapore, gli studi sui condomini sono serviti a valutare i carichi del vento su complessi ancora più alti di nuova costruzione (Balendra et al., 2003).

Ancora più recentemente i grattacieli che si innalzano a Dubai (ma anche in altre aree del mondo) sono tutti dotati di sistemi di monitoraggio con lo sviluppo di tecnologie moderne (Lawton et al., 2008) quali l’utilizzo del TMB (*tuned mass damper* o assorbitore armonico) che consiste nel posizionamento nell’edificio di enormi blocchi di calcestruzzo sospesi per

mezzo di molle, liquidi o pendoli che, in presenza di terremoto, si muovono in direzione opposta stabilizzando il comportamento. Questo metodo rientra nell'idea di creare strutture intelligenti (*smart structures*) (Dye, Chou, Gupta, Hartmann, 2006) che sono in grado di equilibrarsi da sé e ridurre l'intervento dell'uomo al minimo (*self healing system*) (Ghosh, Sharman et al., 2007).

Lo sviluppo di sistemi di SHM negli edifici si è verificato soprattutto in seguito ai terremoti, come a Kobe (Giappone, 1995) e Northridge (California, 1994), dove le informazioni tempestive sullo stato delle strutture sarebbe stato prezioso per valutare la sicurezza e la necessità di interventi (Mita, 1999). Questi eventi hanno fornito l'occasione sia per la nascita di alcune organizzazioni che forniscono dati accurati in seguito ad eventi sismici e sostengono i cittadini nelle operazioni di primo intervento (come ANSS, Advanced National Seismic System, FEMA, Federal Emergency Management Agency o RAN, Rete Accelerometrica Nazionale) sia per un approccio integrato di SHM che ha coinvolto sensori autonomi, sistemi incorporati, comunicazioni, gestione dei dati, ecc. (Kiremidjian & Straser, 1998; Lynch, 2005).

In Italia inoltre è attivo l'Oss, Osservatorio Sismico delle Strutture, una rete nazionale di monitoraggio permanente della risposta sismica di costruzioni, di proprietà pubblica, ideato, realizzato e gestito dal Dipartimento della Protezione Civile, con finalità sia conoscitive che di controllo. L'Oss permette di valutare il danno causato da un terremoto alle strutture monitorate e a quelle ad esse simili che ricadono nell'area colpita, fornendo informazioni utili alla pianificazione delle attività della Protezione Civile immediatamente dopo un terremoto. I dati affluiscono ad un calcolatore nella sede del Dipartimento della Protezione Civile e vengono elaborati e diffusi via internet. La rete dell'Oss è composta dalla sotto-rete del Campione fondamentale (105 scuole, ospedali e municipi più 10 ponti ed alcune dighe, sottoposti ad indagine conoscitiva approfondita e dotati di un sistema di monitoraggio dinamico completo, basato su 16-32 misure di accelerazione) e dalla sotto-rete del Campione integrativo (300 edifici pubblici strategici per la gestione dell'emergenza sismica, dotati di un sistema di monitoraggio semplificato, basato su 7 misure di accelerazione).

Continuando ad evolversi con ormai due decenni di esperienza su prove strutturali e di monitoraggio a scala reale, l'approccio a SHM sostenuto da Jeary e co-autori (Jeary et al., 2001) è semplice e utile. Il successo del metodo è dovuto al fatto che è stato commercializzato, ma i dettagli non sono di dominio pubblico. In sostanza, il sistema utilizza accelerometri, apparecchiature di acquisizione dati e gli sviluppi delle tecniche di decremento random per rintracciare il modo fondamentale di smorzamento in seguito a oscillazione

dell’edificio. Questi parametri forniscono un’indicazione di eventuali carenze strutturali e sono stati utilizzati per diagnosticare i problemi in edifici alti a Hong Kong.

Comunque, recentemente, soprattutto per l’abbassamento dei costi, tale tecnica è in forte sviluppo anche in Italia, con studi effettuati dalle principali università. Si cita qui ad esempio lo studio sull’utilizzo di sensori in fibra ottica per il monitoraggio di strutture in calcestruzzo (un caso davvero interessante è riferito al Porto di Genova (Del Grosso e Lanata, 2001) o di viadotti (Porco et al., 2009).

Per quanto riguarda l’aspetto normativo, nonostante il crescente interesse, in Europa si ha solamente un accenno nell’Eurocodice 8 (Indicazioni progettuali per la resistenza sismica delle strutture) nell’Appendice B, a carattere informativo: “Per la valutazione delle strutture, oltre a raccogliere informazioni generali storiche e i dati durante l’ispezione, possono essere condotte prove sperimentali e misure in situ studiando l’evoluzione nel tempo delle dimensioni, degli allineamenti, delle eccentricità, dell’apertura delle fessure o dei distacchi e delle deformazioni, specialmente per effetto di scosse di assestamento (con l’eventuale installazione di apparecchiature di monitoraggio)”. Si ricorda inoltre la norma ISO 16587 *Mechanical vibration and shock - Performance parameters for condition monitoring of structures* del 2004 che però affronta solo di striscio il tema.

Sulla base dell’esperienza acquisita, stanno però cominciando ad essere approntati linee guida e codici di condotta (pratica ISIS; Maguire, 1999; Mufti, 2001; BSI, 2004; Rucker et al., 2006).

Inoltre, si stanno interessando di SHM un certo numero di gruppi nazionali ed internazionali e si sono create delle vere e proprie reti. Alcune, come SAMCO (*Structural Assessment, Monitoring and Control*, www.samco.org) e ISIS (*Intelligent Sensing for Innovative Structures*, www.isiscanada.com), si sono evoluti da iniziative finanziate, altri come ISHMII (*International Society for Structural Health Monitoring of Intelligent Infrastructure*, www.ishmii.org) si sono sviluppate in seguito ad incontri dei principali esperti internazionali. ISHMII ha gli obiettivi primari di migliorare la connettività e lo scambio di informazioni tra le istruzioni partecipanti e i membri individuali e di aumentare la consapevolezza nell’uso degli strumenti di monitoraggio strutturale tra gli utenti finali.

In altri casi si sono realizzate delle collaborazioni tra industria e organizzazioni governative, come per Simonet, (*Structural Integrity Monitoring Network*, www.simonet.org.uk) gestita dalla University College di Londra e Cranfield University. Questo per facilitare la comunicazione tra le ditte esecutrici, i ricercatori e tutti coloro che sono interessati nel campo del monitoraggio dell’integrità strutturale e dei test non distruttivi.

GOLDEN GATE, San Francisco



Primo esempio di monitoraggio sistematico documentato su ponti, per conoscere il comportamento dinamico e le possibili conseguenze di un terremoto.

BAY BRIDGE, San Francisco



Primo esempio di monitoraggio sistematico documentato su ponti, per conoscere il comportamento dinamico e le possibili conseguenze di un terremoto.

TACOMA NARROWS BRIDGE



Monitoraggio durante il suo ciclo di vita poco prima del collasso a causa del vento.

HUMBER BRIDGE



I sistemi di monitoraggio di lunga durata su ponte sospeso sono stati messi in relazione alle preoccupazioni dovute al vento e all'instabilità indotta dalla risposta.

DEER ISLE BRIDGE



I sistemi di monitoraggio di lunga durata su ponte sospeso sono stati messi in relazione alle preoccupazioni dovute al vento e all'instabilità indotta dalla risposta.

6.2.7 Beni culturali

Negli ultimi anni, un interesse crescente è nato nella definizione e applicazione di procedure per la valutazione strutturale e il monitoraggio dei monumenti ed edifici storici. Diversi progetti di ricerca finanziati dall’UE, nazionali ed internazionali (come Improving The Seismic Resistance Of Cultural Heritage Buildings, programma culturale ed economico Europa-India) stanno indagando le possibilità e i limiti delle procedure di monitoraggio e delle prove non distruttive per la valutazione delle strutture murarie.

Anche se non esiste ancora una normativa di riferimento, l’interesse è crescente e, ad esempio, in Italia, le Linee Guida per la Valutazione e Riduzione del Rischio Sismico del Patrimonio Culturale (Ministero per i Beni e le Attività Culturali, Direzione Generale per i Beni Architettonici e Paesaggistici, 2007) dedicano il paragrafo 4.1.9 al problema del monitoraggio dei beni monumentali. In esso si afferma che ‘il controllo periodico della costruzione è una pratica fortemente auspicabile poiché rappresenta il principale strumento per una consapevole conservazione, in quanto consente di programmare la manutenzione ed attuare in tempo, quando realmente necessari, gli interventi di riparazione, in caso di danno strutturale, e di consolidamento, finalizzato alla prevenzione.

Per impostare un programma di monitoraggio è necessario eseguire preventivamente un’accurata analisi del funzionamento strutturale, e quindi un’interpretazione dei dissesti in atto, in modo da definire i parametri più significativi che, misurati in continuo o con scadenze temporali adeguate, consentono di certificarne il buon comportamento, ovvero di valutare eventuali evoluzioni pericolose per la stabilità di insieme o di singole parti dell’edificio. Il monitoraggio visivo, inteso come controllo periodico dell’insorgenza di stati fessurativi, fenomeni di degrado, trasformazioni nella struttura e nell’ambiente circostante, rappresenta il punto di partenza di tale attività.

Informazioni aggiuntive possono essere acquisite attraverso il monitoraggio strumentale di alcuni parametri ritenuti significativi (movimento delle lesioni, a spostamenti assoluti o relativi di punti delle costruzioni, rotazione di pareti o altri elementi). Il movimento delle lesioni può essere controllato pressoché in continuo a distanza; occorre tuttavia considerare che, in relazione alla tipologia di dissesto, le soglie di pericolosità di tali spostamenti relativi possono essere anche molto diverse. Il controllo geometrico della costruzione può essere eseguito mediante procedure di rilievo topografico, fotogrammetrico, o utilizzando tecniche innovative, come la nuvola di punti generata dal laser scanner (ovviamente tale metodologia non risulta esclusiva e deve essere attentamente valutata la precisione fornita in relazione alle soglie di movimento ritenute significative). Il progetto di monitoraggio richiede una

preliminare interpretazione del meccanismo di dissesto, che può spesso essere eseguita grazie alla meccanica dell’equilibrio delle murature considerate come corpo rigido; ciò permette di individuare una serie di punti notevoli da controllare. In alcuni casi, quando l’eventuale dissesto è ben compreso e possono essere definite soglie di sicurezza, il monitoraggio può rappresentare un’alternativa all’intervento, a vantaggio della conservazione.

Le proprietà dinamiche della struttura (frequenza e forme proprie di vibrazione) sono anch’esse parametri significativi del comportamento di una costruzione. In presenza di dissesti o trasformazioni della costruzione e del suo uso, queste grandezze subiscono delle alterazioni. Allo stato attuale delle conoscenze, l’identificazione del danno sulla base di una variazione delle proprietà dinamiche è molto difficile; inoltre, è noto che le costruzioni in muratura sono caratterizzate da un comportamento fortemente non lineare e ciò rende problematico il ricorso a parametri rappresentativi di un comportamento lineare equivalente.

Tuttavia, il controllo di alcuni parametri della risposta dinamica, o eccitata artificialmente o mediante vibrazioni ambientali, può, in alcuni casi, rappresentare uno dei possibili elementi per l’identificazione di un cambiamento manifestatosi nella costruzione. La scelta dei parametri e l’interpretazione delle misure dinamiche vanno giustificate in relazione alla tipologia di dissesto ed agli scopi delle indagini.

Se si considera più in particolare la sicurezza sismica, essendo il terremoto un evento raro ed imprevedibile, è evidente che il monitoraggio non rappresenta uno strumento di allarme o di individuazione del comportamento sismico. Un suo uso può risultare significativo nell’emergenza post-terremoto, su strutture fortemente danneggiate di cui si volesse verificare l’evoluzione del meccanismo attivato dal sisma e la risposta ad eventuali scosse di replica’.

Anche nella carta ICOMOS (International Scientific Committee for analysis and restoration of structures of architectural heritage - principi per l’analisi, la conservazione e il restauro strutturale del patrimonio architettonico, 2003) si illustrano concetti analoghi: ‘la diagnostica è basata su approcci di carattere storico, qualitativo e quantitativo: gli aspetti qualitativi sono basati essenzialmente sulla osservazione diretta dei dissesti strutturali e del degrado dei materiali, nonché sulle ricerche storiche ed archeologiche; mentre gli aspetti quantitativi sono basati essenzialmente sulle misure dirette, sulle indagini sui materiali e le strutture, sul monitoraggio nonché sulle analisi strutturali esperite mediante procedimenti più o meno sofisticati di calcolo’.

Da ricordare tra le università più attive in questo campo di Minho in Portogallo (L. F. Ramos, L. Marques, P. B. Lourenco), di Leuven in Belgio (G. De Roeck et al.), di Helsinki (Bocca et al.), ma anche al di fuori dell’Europa sono stati fatti notevoli passi avanti (anche se a volte

con un approccio più empirico per le nazioni ancora emergenti), in Turchia (A. Turer et al.) e in India (Bandyopadhyay).

Per il grande patrimonio culturale, l'Italia ha visto crescere sempre più l'attenzione su questo tema e sono ormai numerosi gli impianti in uso o in fase di progettazione.

Fra i primi esempi, sicuramente degno di segnalazione, si ricorda il sistema di monitoraggio della cupola di Santa Maria del Fiore a Firenze (Bartoli et al., 1993), già attivo nel 1988 e comprendente più di 160 strumenti, a causa della complessità del quadro fessurativo.

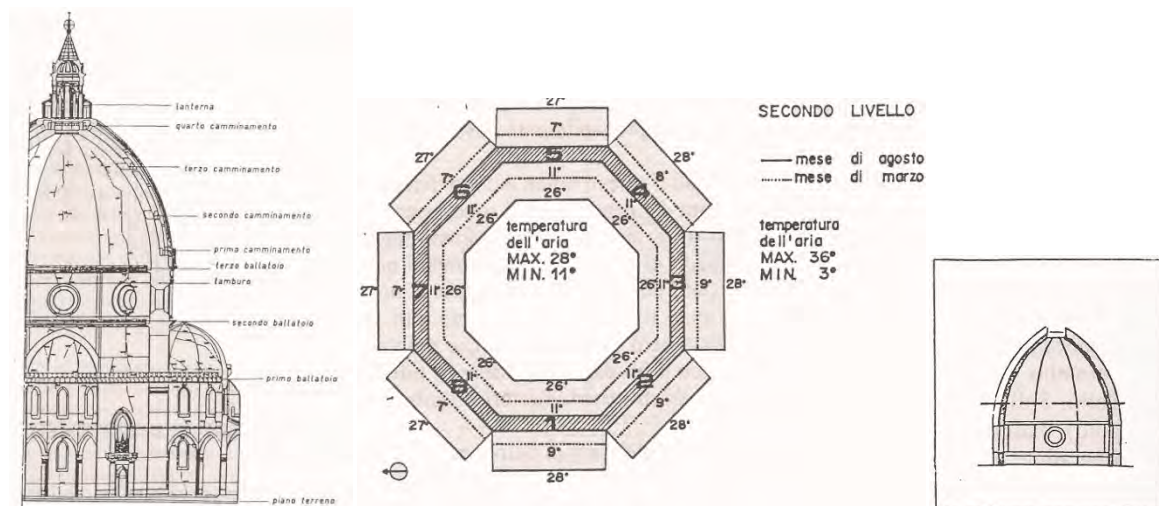


Figura 6.2 – schema delle lesioni e situazioni termiche della cupola di Santa Maria del Fiore

L'università di Padova (Modena et al., 2008) ha promosso sistemi di monitoraggio installati sia su beni culturali in normali condizioni, sia danneggiati in seguito ad evento sismico (dopo il sisma in Abruzzo dell'aprile 2009).

Le università di Trento (Zonta, Pozzi e Zanon, 2009) e Pisa (Beconcini, Croce e Mengozzi, 2006) si sono occupate del monitoraggio di torri e porte storiche.

L'università di Torino (Ceravolo et al., 2007) ha proposto l'utilizzo di formulazioni di sicurezza strutturale per tener conto della presenza di sistemi di monitoraggio periodico. L'affidabilità può essere definita in funzione di una quantità misurabile ed indicativa del danno detta sintomo, o anche in funzione di più sintomi contemporaneamente. La conoscenza del valore corrente del sintomo consente la determinazione dell'ulteriore capacità di danno, nonché del tempo di vita utile rimanente per la struttura in esame. La ridefinizione della sicurezza strutturale in termini di vita utile fornisce il quadro teorico per l'introduzione delle attività di monitoraggio nelle formulazioni probabilistiche.

L'università di Roma si è approcciata allo studio soffermandosi soprattutto sui sensori wireless (D. Abruzzese, M. Angelaccio et al., 2009), mentre a Napoli numerosi sono i casi esaminati (Serino et al, 2009).

Ormai l'idea di applicare il monitoraggio ai beni culturali si sta sviluppando sempre di più e il lavoro futuro è quello di pensare alla possibilità di esportare le metodologie adottate negli altri settori anche all'edilizia storica, come si è già cominciato a fare.

6.3 Problemi e limitazioni nello sviluppo del monitoraggio

Per completezza è corretto evidenziare anche quali sono i fattori che ostacolano una più ampia diffusione di tale metodologia e che si dovrà cercare di risolvere, per quanto possibile.

A) Sistema di affidabilità

Poiché i sistemi SHM hanno lo scopo di assistere gli operatori di infrastrutture/proprietari nella gestione dei loro impianti, una esaustiva analisi costi-benefici serve a dimostrare che i benefici superano i costi. A parte la spesa iniziale per la progettazione, l'acquisto e l'installazione, le spese per il funzionamento e manutenzione del sistema sono limitate.

B) Strumentazione inappropriata

Nel numero crescente di casi in cui una specifica gara d'appalto per opere strutturali prevede l'obbligo di inserire la strumentazione per il monitoraggio, può non esserci alcun incentivo per la scelta accurata dei sensori e della loro collocazione. C'è una tendenza a proporre una quantità maggiore di strumenti, con conseguenti maggiori problemi nell'installazione. Per un dato budget, questo influenzerà la qualità degli strumenti e la loro durata, per cui la comprensione delle prestazioni e dei punti critici della struttura deve contribuire a prevedere sensori minori ma più affidabili. Un consulente specializzato dovrebbe per questo sovrintendere alla progettazione, realizzazione e gestione del sistema.

C) Memorizzazione dei dati

Quando è previsto un numero in eccesso di sensori si ha di conseguenza un sovraccarico di dati, più di quanti possono essere assimilati senza un elaborato sistema di gestione. Una ricerca sul posizionamento ottimale dei sensori, unita ad un'attenta programmazione utilizzando scenari di degrado rilevabili e ad un esame di simili sistemi operativi SHM, porterà alla distribuzione più efficiente dei sensori.

D) Comunicazioni

I collegamenti wireless o di terra sono una necessità per le installazioni non presidiate a distanza; possono essere utilizzati modem dial-up o permanentemente connessi. Anche se non sono affidabili al 100%, il loro basso costo ne ha permesso un ruolo sempre più importante di comunicazione, ma a causa della limitata capacità di presentare i dati, è necessaria la

compressione o pre-elaborazione degli stessi. Zigbee è usato in alcune soluzioni commerciali wireless SHM (Edwards et al., 2005).

E) Fattori ambientali e rumore

Nel monitoraggio si può lavorare in condizioni controllate, ma, come molti esempi su scala reale hanno dimostrato, i cambiamenti nelle proprietà modali a causa di condizioni ambientali riducono di molto la probabilità di rilevamento dei danni. Parziale mitigazione di tali effetti può essere raggiunta attraverso modelli basati sulla fisica o statistica, ma un limitato livello di rumore ci sarà sempre. Metodologie corrette SHM incorporeranno sistemi per compensare o filtrare gli effetti ambientali e acustici (Peeters et al., 2001), o almeno per rilevare le anomalie dovute al rumore.

F) Presentazione delle informazioni

Una delle questioni più significative con SHM è la conversione dei dati a informazioni; spesso, fra l’altro, non ci si procede con l’utilizzazione degli stessi. Da non trascurare è la creazione di grafici o la presentazione di informazioni agli operatori che non hanno familiarità con le sofisticate procedure di base numerica.

G) Finanziamento e interessi di parte

I gruppi di ricerca informati e le loro agenzie di finanziamento hanno iniziato a rendersi conto che l’importanza si sta spostando sulla manutenzione (Wenzel, 2003), vi è allora una crescente necessità di sostenere programmi di ricerca in SHM. Le richieste di finanziamento però devono competere con le aree di ricerca in cui il risultato è immediato. Approcci di sviluppo nel ventunesimo secolo coinvolgono collaborazioni tra discipline e istituzioni, così come tra nazioni. Nell’Unione Europea, il progetto SIMCES (De Roeck, 2003) è stato finanziato nell’ambito del quarto programma di ricerca dell’UE CORDIS, mentre la *US National Science Foundation* continua a finanziare la ricerca in ‘strutture intelligenti’ (Flatau & Chong, 2002). Nel Nord America, la ricerca su un approccio *Vibration-based damage detection* (VBDD) di SHM è coordinato dalla *American Society of Civil Engineers* (Dyke et al., 2003).

La maggior parte della ricerca SHM dal mondo accademico si riferisce a ponti, edifici e impianti geotecnici, dove i proprietari delle infrastrutture, per la mancanza di capacità di ricerca interna, trarranno beneficio dalla collaborazione con le università. Senza la pressione finanziaria o giuridica, gli studi su edifici alti sono limitati ai casi in cui vi è pubblicità positiva o un problema specifico. I proprietari semplicemente preferirebbero che i difetti non diventassero di dominio pubblico, perché ciò comporta delle responsabilità.

H) Mancanza di collaborazione

Differenti livelli di crescita sono stati fatti per le diverse tipologie di strutture, e c'è molto da imparare dallo studio delle procedure non solo in altre discipline (come ad esempio il monitoraggio delle condizioni delle macchine rotanti), ma anche all'interno dei vari rami dell'ingegneria civile. Le esperienze di monitoraggio delle dighe sono trasferibili ad altre strutture, in particolare ai ponti. Tuttavia, una volta che una soluzione è stata trovata per un problema in un settore, solo coloro che provengono dal mondo accademico vorrebbero rendere la tecnologia disponibile altrove.

6.4 Tecnica del monitoraggio

Il monitoraggio è una procedura, di carattere non invasivo, di rilievo di grandezze o di risposte strutturali ad azioni note o incognite, prefissate o casuali le cui grandezze sono rilevate per un lasso di tempo più o meno esteso. Tali parametri sono controllati continuamente o a breve/medio termine al fine di valutare la persistenza dello stato strutturale definito in precedenza, permettendo di individuare la presenza o l'inizio di danni strutturali.

Sistemi e metodi di monitoraggio presuppongono sistemi e metodi di programmazione con i quali si predispongono i valori assoluti, i valori di soglia, gli indicatori o i valori desiderati che, in continuo o ad intervalli regolari, vengono usati per confrontare l'andamento (valori effettivi) del contesto che viene monitorato.

Il monitoraggio strutturale (SHM, *Structural Health Monitoring*) è l'osservazione continua e regolare delle condizioni di una struttura o un sistema autonomo dotato di strumenti sensoriali, al fine di preservare l'integrità strutturale⁶.

Appartiene a un vasto campo multidisciplinare, sia in termini di diversi ambiti scientifici, sia di differenti tecnologie impiegate, come pure diverse sono le sue applicazioni. Lo sviluppo tecnologico ad esso inerente si è avuto grazie a molti scienziati e ingegneri che appartengono ai più disparati campi, tra cui fisica, chimica, scienza dei materiali, biologia e ingegneria meccanica, aerea, civile ed elettrica.

SHM viene applicato su diversi sistemi e strutture come aerei, veicoli spaziali, navi, elicotteri, automobili, ponti, edifici, infrastrutture civili, impianti di generazione dell'energia, gasdotti, impianti di sistemi elettronici, sistemi biologici e per la protezione e la difesa dell'ambiente⁷.

In particolare negli ultimi anni ha trovato una crescente applicazione nelle infrastrutture civili e, più recentemente, nell'edilizia storica, soprattutto in aree a rischio sismico.

L'utilizzo dei sistemi di monitoraggio in normali condizioni permette di:

⁶ Chang Fu-Kuo, Prosser W. H., Schulz M. J., *Structural Health Monitoring*, 2002, pp.3-4.

⁷ Chang Fu-Kuo, Prosser W. H., Schulz M. J., *Structural Health Monitoring*, 2002, pp.3-4.

1. validare il comportamento del modello strutturale adottato;
2. identificare i processi di danno;
3. verificare l’efficacia degli interventi di rafforzamento

In caso di terremoto, SHM può dimostrare la sua utilità al fine di:

1. valutare quantitativamente la progressione dei danni;
2. effettuare interventi urgenti ed efficaci se viene registrato uno spostamento pericoloso;
3. definire una procedura di allarme preventiva per la sicurezza dei lavoratori impiegati negli interventi di rafforzamento.

Il monitoraggio può anche essere efficace, se implementato in edifici seriamente danneggiati, quando la pianificazione del tempo per procedere negli interventi è difficile da prevedere a priori. Infatti, con costi limitati, un monitoraggio corretto può fornire la prova della necessità di procedere urgentemente se si verifica un peggioramento delle condizioni strutturali o rinviare gli interventi in una fase successiva se il modello di danno valutato mantiene una stabilità accettata.

6.5 Processo del monitoraggio strutturale

Il monitoraggio strutturale include varie fasi che si possono schematizzare come segue⁸

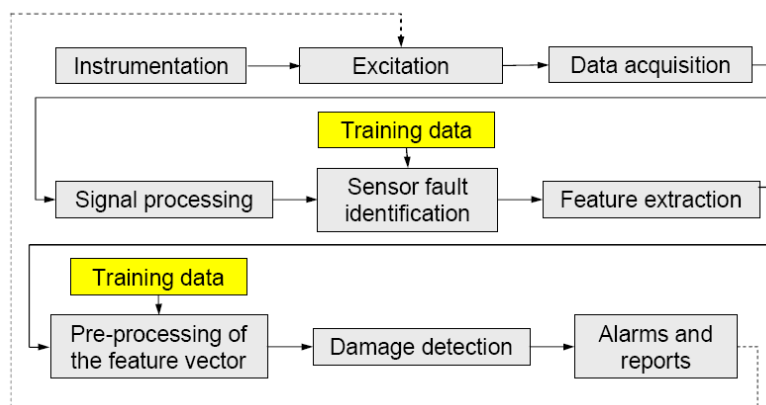
1. Valutazione operativa
2. Acquisizione dei dati
3. Estrazione delle caratteristiche
4. Sviluppo di modelli statistici

In primo luogo si definisce il livello del danno per rispondere alle domande riguardanti questioni di attuazione del sistema di monitoraggio. In seguito si definisce la tipologia di hardware e i dati da utilizzare nel processo di estrazione delle caratteristiche del sistema. Dopo l’analisi dei dati acquisiti, si determina il livello di danno degli elementi.

SHM non è solo una tecnica singola, ma comprende diverse funzioni, ciascuna delle quali deve essere progettata con cura. Queste funzioni includono: (1) strumentazione, (2) eccitazione, (3) acquisizione dei dati, (4) elaborazione del segnale, (5) identificazione delle anomalie del sensore, (6) estrazione dei dati, (7) elaborazione, (8) rilevamento del danno, (9) allarmi e reports. Nella Fig... viene spiegata ogni funzione⁹.

⁸ Farrar C. R., Ph.D., P.E., *New Trends in Vibration-Based Structural Health Monitoring: A Statistical Pattern Recognition Paradigm for SHM*, 2006.

⁹ Kullaa J., *Functions of a Structural Health Monitoring System*, 2008.


 Figura 6.3 – processo del monitoraggio strutturale¹⁰

Instrumentation (strumentazione)

Nel scegliere la strumentazione bisogna decidere quali grandezze misurare e selezionare i trasduttori e le loro posizioni. Nel sistema SHM, caratterizzato da ripetute misurazioni, è solitamente attuata la strumentazione permanente, anche se sono possibili soluzioni ulteriori. Tradizionalmente, sono usati i sensori cablati, ma i sensori wireless e le reti di sensori sono in una fase di ampio sviluppo.

I principali svantaggi dei sensori wireless sono il consumo di energia, il trasferimento dati relativamente lento e la sincronizzazione. Pertanto, per tali sistemi sono studiati speciali caratteristiche e algoritmi. Poiché le misurazioni delle vibrazioni possono essere utilizzate per rilevare i danni anche a distanza dallo strumento, il numero di sensori può variare da una a diverse centinaia e il tipo dipende dalla metodologia di applicazione. Il numero e la posizione dei sensori può essere determinato utilizzando un modello agli elementi finiti della struttura e gli scenari di danno atteso possono essere individuati utilizzando metodi di programmazione o euristici.

Excitation (eccitazione)

L'eccitazione può essere ambientale o artificiale. La prima può essere causata da eventi naturali o indirettamente indotti dall'uomo, classificati quali rumore ambientale, come, ad esempio, vento, traffico, onde, ghiaccio, micro-scosse sismiche, ecc.. Tuttavia se l'eccitazione ambientale non è significativa deve essere utilizzata quella artificiale, il cui vantaggio è la possibilità di controllare e misurare l'eccitazione. Questo è particolarmente utile, perché è essenziale che l'intera gamma di frequenze di interesse sia provocata da un'eccitazione a banda larga. A tale scopo si può utilizzare uno *shaker* (vibrochina) un dispositivo di impatto o

¹⁰ Kullaa J., Functions of a Structural Health Monitoring System, 2008.

un attuatore già presente all’interno della macchina. L’eccitazione artificiale può essere utilizzata con strutture piccole e in laboratorio. Tuttavia, con le grandi opere di ingegneria civile caratterizzate da basse frequenze naturali, l’eccitazione artificiale è difficile e costosa perché è necessario l’uso di grandi attuatori idraulici e di molta potenza. Inoltre ci sono sempre alcuni disturbi dovuti al vento, al movimento terrestre o ad altre fonti che rendono difficile la misurazione. I vantaggi nell’utilizzare l’eccitazione ambientale sono la presenza costante del carico, l’economia e la facile attivazione alle basse frequenze. I principali svantaggi sono che la forza non può essere misurata e che il contenuto in frequenza può essere un problema.

Data Acquisition (acquisizione dei dati)

Il sensore converte una quantità misurata in un segnale analogico elettrico. L’obiettivo del sistema di acquisizione è quello di conservare la serie storica in un computer per ulteriori analisi. Ci sono diverse questioni da considerare. Se le caratteristiche estratte dipendono da più di un singolo sensore, i sensori sono da campionare simultaneamente e la frequenza di campionamento, insieme alla lunghezza delle registrazioni, deve essere adattata per l’estrazione delle caratteristiche selezionate. Inoltre, l’acquisizione automatica dei dati può essere definita da un orologio o un trigger.

Anche la digitalizzazione del segnale ha bisogno di alcune accortezze. Se la frequenza di campionamento è f_s , la frequenza massima, f_{max} , che può essere osservata in un segnale è:

$$f_{max} = \frac{f_s}{2}$$

Se la frequenza di campionamento è inferiore, le frequenze al di sopra di $f_s/2$ sono erroneamente interpretate come frequenze più basse. Questo fenomeno si chiama aliasing. Dopo il convertitore A/D, l’aliasing non può essere più corretto. Quindi un filtro anti-aliasing è sempre necessario prima del convertitore A/D.

Il segnale analogico viene convertito (quantized) al più vicino valore discreto del convertitore A/D. Tipicamente i convertitori A/D hanno 10-24 bit di risoluzione. Il range di misura è divisa in 2^n intervalli. Per una migliore risoluzione, dovrebbe essere usato tutto il range dinamico. Tuttavia, il segnale non deve superare i limiti,

perché ciò provocherebbe un sovraccarico, quindi viene tagliato. Il sistema di acquisizione dovrebbe quindi essere in grado di rilevare un caso di sovraccarico e respingere la misura. Il range dinamico può essere determinato con misurazioni preliminari al monitoraggio della struttura.

Sensor Fault Identification (identificazione delle anomalie del sensore)

Per il monitoraggio strutturale basato sulle vibrazioni sono molto importanti i dati registrati durante la vita delle strutture. È necessario quindi rilevare i possibili guasti presenti nel sensore per mantenere l'affidabilità del sistema. I sistemi di monitoraggio includono comunemente diversi sensori che misurano il movimento globale o i modi più bassi della struttura. Il sistema dei sensori è quindi ridondante. La correlazione tra i vari sensori può essere utilizzata per rilevare un malfunzionamento o un guasto e per correggere il segnale.

Feature Extraction (estrazione delle caratteristiche)

Le serie temporali (*time histories*) includono molti dati, che devono essere compressi al fine di conoscere alcune proprietà caratteristiche della struttura. Queste caratteristiche sono considerate impronte digitali del sistema e sono estratte dalle misurazioni delle serie temporali. L'obiettivo è quello di trovare le caratteristiche che sono sensibili al danno, ma insensibili alle variabilità normali dell'ambiente (carico, temperatura, ecc.). Infatti un cambiamento nelle caratteristiche è un'indicazione di danno. Poiché il sistema di monitoraggio esegue misurazioni ripetute durante la vita della struttura, l'estrazione dei dati deve essere automatica. Alcuni valori possono essere facilmente estratti automaticamente, mentre altri hanno bisogno di essere supervisionati e regolati per l'automatizzazione. L'estrazione dei dati (in alcuni casi equivalente al sistema di identificazione) si può classificare in metodi parametrici o non parametrici o in metodi di *input/output* o *output-only* a seconda della misurabilità dell'eccitazione. In molte applicazioni di ingegneria civile, è possibile solo l'identificazione *output-only*. Inoltre le caratteristiche dovrebbero essere indipendenti dall'ampiezza dell'eccitazione, il che rende alcune caratteristiche meno allettanti per SHM.

Le proprietà globali principali di una struttura sono le frequenze naturali, le forme modali e lo smorzamento. Altre caratteristiche includono funzioni spettrali, FRF, coefficienti AR, trasmissibilità, *wavelet*, e filtri modali.

Feature Processing (elaborazione dei dati)

La dimensione del vettore caratteristico rispetto alle serie temporali è notevolmente inferiore. Ogni singola funzione potrebbe essere utilizzata per il rilevamento dei danni o potrebbe esserne usata una statistica a più variabili. Il primo passo è quello di selezionare i dati acquisiti dalla struttura non danneggiata, che rappresenta la condizione strutturale di riferimento. I dati iniziali devono comprendere anche una gamma completa di condizioni

ambientali e operative, in quanto esse possono influenzare le funzioni e possono portare a indicazioni di danni non veritiere se non adeguatamente analizzati.

Ci possono essere diversi tipi di funzioni, i loro intervalli dipendono dalle unità selezionate e possono variare notevolmente. Per esempio le frequenze naturali possono variare da 0,2 a 200 Hz, mentre i rapporti di smorzamento sono in genere tra 0.001 e 0.1. Quando si considera il rilevamento dei danni, le funzioni con grandi valori assoluti o variazioni tendono a dominare. Quindi ogni funzione è di solito standardizzata per avere una media tendente a zero e una varianza unitaria all'interno dei dati di formazione.

Il loro numero può essere troppo elevato per un’analisi statistica affidabile. Anche dieci funzioni potrebbero essere troppe, in pratica, con una quantità finita di dati.

Possono allora essere selezionate solo quelle che sono più sensibili al danno. Tuttavia, le informazioni richieste di solito non sono disponibili. Un'altra possibilità è quella di lasciare decidere ai dati le funzioni più sensibili, selezionandole tutte e utilizzando tutte le informazioni disponibili.

Le funzioni con frequenti anomalie devono essere rimosse, come anche quelle costanti che non contengono informazioni. Il problema della dimensione può essere risolto applicando tecniche di riduzione.

Damage Detection (identificazione del danno)

L'obiettivo del rilevamento dei danni è quello di determinare se il danneggiamento è presente nella struttura. La decisione deve essere presa, se il cambiamento è significativo, utilizzando metodi statistici, perché tutte le funzioni variano in base alle misurazioni.

Un grafico è una delle principali tecniche di controllo statistico del processo e può essere utilizzato anche per il monitoraggio strutturale. Si tracciano le caratteristiche qualitative in funzione del numero dei campioni ponendo i limiti inferiori e superiori, che sono calcolati dai campioni solo quando il processo è controllato. Quando sono presenti fonti di variabilità insolite, le statistiche dei campioni andranno fuori dai limiti di controllo e verrà prodotto un segnale di allarme. Sono disponibili diversi grafici di controllo che possono essere univoci o multivariati.

Alarms and Reports (segnali di allarme)

Il sistema di monitoraggio deve essere collegato alla rete per trasferire le informazioni dello stato della struttura. Sono importanti almeno tre funzioni. In primo luogo, il sistema di monitoraggio deve essere in grado di inviare segnali di allarme, se ha rilevato un possibile

danno. In secondo luogo, l'ingegnere dovrebbe avere un accesso al computer remoto per trasferire i dati in ufficio per un'analisi *off-line* o per modificare i parametri del sistema di monitoraggio. E' inoltre essenziale che il sistema di monitoraggio informi periodicamente il tecnico sullo stato del sistema. Un segnale automatico e un sistema di allarme possono essere progettati a seconda dell'applicazione. Una buona norma è che almeno due eventi consecutivi di rilevamento dei danni siano necessari per un segnale di allarme.

6.6 Assiomi del monitoraggio strutturale

Il lavoro svolto fino ad oggi sullo sviluppo del monitoraggio strutturale ha portato all'elaborazione di alcuni assiomi per lo SHM. Il termine assioma, in questo contesto, è utilizzato in modo differente rispetto alla matematica e alla filosofia. Infatti rappresenta una verità fondamentale che sta alla base di qualsiasi metodologia di SHM, che non è stata però rigorosamente provata.

Si sottolinea che gli assiomi qui presentati non sono sufficienti a generare una metodologia e non sono necessariamente completi, ne possono esistere degli altri¹¹.

Si elencano di seguito gli assiomi del monitoraggio strutturale¹².

1. Tutti i materiali hanno difetti intrinseci o carenze a qualche livello.
2. La valutazione del danno richiede un confronto tra due diversi stati di sistema.
3. L'identificazione dell'esistenza e della posizione del danno può essere fatta in una modalità di apprendimento non supervisionato, ma l'identificazione del tipo di danno attuale e la gravità del danno si può ottenere solo in una modalità di apprendimento supervisionato.
4. I sensori non possono misurare il danno. L'estrazione delle caratteristiche attraverso l'analisi del segnale e la classificazione statistica sono necessari per convertire i dati in informazioni relative al danno.
5. È necessaria un'analisi intelligente delle caratteristiche, in modo tale da analizzare i dati considerando la variazione delle condizioni operative e ambientali.
6. Le scale di grandezza e di tempo, associate con l'inizio e l'evoluzione del danno, determinano le caratteristiche necessarie del sistema di monitoraggio.
7. Esiste un rapporto tra la sensibilità al danno di un algoritmo e la sua capacità di eliminare i disturbi.

¹¹ Farrar C. R., Ph.D., P.E., *New Trends in Vibration-Based Structural Health Monitoring: A Statistical Pattern Recognition Paradigm for SHM*, 2006.

¹² Worden S. K., Farrar C. R., Manson G. and Park G.; *The Fundamental Axioms of Structural Health Monitoring*, Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences Issue, June, 2007.

8. La grandezza dei danni che può essere rilevata dai cambiamenti nella dinamica del sistema è inversamente proporzionale al *range* di frequenze dell’eccitazione.

6.7 Problematiche relative a SHM

Il sistema deve essere in grado di catturare la risposta strutturale nell'ambito di numerose scale di lunghezza variabile. Infatti solitamente viene monitorata la risposta in frequenza più bassa del sistema globale, ma il danno nella sua fase iniziale è un fenomeno locale.

Inoltre i parametri modali globali (e.g. frequenze di risonanza e forme modali) hanno dimostrato di essere insensibili a danni locali.

Un altro problema riguarda il tempo di vita del sistema di monitoraggio. Si devono infatti considerare le scale di tempo in cui il danno si verifica e nel caso delle infrastrutture di ingegneria civile queste possono superare la durata del ciclo di manutenzione. Quindi è importante stabilire i principi base dell’attività del sistema in funzione delle variabili operative e ambientali.

In merito a un sistema di monitoraggio è necessario:

- normalizzare i dati al variare delle condizioni operative e ambientali;
- quantificare il numero e la posizione dei sensori;
- considerare che molte funzioni di uso comune utilizzano una notevole compressione dei dati e la conseguente perdita di informazioni;
- sapere che le applicazioni sono limitate per strutture molto grandi;
- effettuare analisi statistiche e *false-positive studies*;
- mettere a confronto diverse caratteristiche e metodi statistici;
- dimostrare l’affidabilità e la sensibilità del sistema SHM.

TEORIA DELL'IDENTIFICAZIONE

DINAMICA

7.1 Introduzione

Lo scopo dell'analisi della risposta dinamica, nel campo dell'Ingegneria civile e quindi riferito ad una struttura, è quello di determinare e valutare i dati che caratterizzano il suo comportamento a partire dalla fase di progetto fino a quella di esercizio.

Durante la fase di progetto, il progettista necessita di convalidare le ipotesi fatte sulla base dei risultati derivanti da prove sperimentali. In questo modo egli verifica ed eventualmente corregge l'accuratezza (taratura) dei modelli matematici o di calcolo utilizzati in tale fase.

Durante la fase di esercizio, soprattutto per opere di importanza strategica (dighe, ponti, grandi impianti industriali, centrali nucleari ecc.) o rilevanza storica l'analisi viene attuata mediante una serie di misurazioni periodiche. Attraverso questo monitoraggio si è in grado di diagnosticare, ad esempio, fenomeni di degrado in atto. Inoltre, la conoscenza delle caratteristiche modali di una struttura in opera consente di prevedere la risposta che questa avrà se sottoposta a sollecitazioni ambientali come sismi; permettendo quindi di andare ad intervenire in modo preventivo su eventuali punti deboli riscontrati.

Di seguito verrà introdotto il concetto di monitoraggio di una struttura, seguito dalla elencazione dei principali modelli utilizzati per identificare i parametri caratteristici delle strutture ed infine tecniche di calcolo adottate andando a descrivere le problematiche riscontrate e le soluzioni adottate durante il procedimento di acquisizione ed elaborazione dei dati.

7.2 Monitoraggio strutturale

Il monitoraggio strutturale di strutture civili non consiste soltanto nell'identificazione dei danni improvvisi o progressivi ma anche nel monitorare le prestazioni dell'edificio nelle condizioni di esercizio o durante particolari eventi ambientali, per esempio nel caso di terremoti¹. Un sistema di monitoraggio si compone di sensori che possono misurare sia le grandezze ambientali sia la risposta strutturale alle sollecitazioni ambientali. Lo scopo non è soltanto quello di valutare la resistenza ad un sisma di un edificio, ma è anche il controllo delle funzionalità della struttura nelle condizioni di esercizio, per poter eventualmente progettare efficaci interventi di adeguamento sismico o di rinforzo di strutture critiche o strategiche. Quindi il monitoraggio strutturale coinvolge un gran numero di applicazioni nel campo dell'ingegneria civile quali il progetto, la valutazione del danno, la manutenzione e il rinforzo di strutture esistenti, il controllo strutturale terremoti²³.

I progressi nel campo dei sistemi di comunicazione permettono un monitoraggio in tempo reale della struttura. I dati vengono elaborati per individuare eventuali anomalie o per valutazioni di lungo termine. Per le analisi sul rischio sismico, i sistemi di monitoraggio possono essere usati per creare un database di misure rilevate durante l'intero ciclo di vita della struttura. È perciò fondamentale l'identificazione dei parametri modali delle strutture nelle condizioni di esercizio e della tecnica per l'individuazione del danno, il che spiega il ruolo fondamentale dell'analisi modale sperimentale nell'ambito del monitoraggio strutturale. Al fine di determinare il comportamento dinamico di una struttura sono possibili due differenti approcci:

- L'approccio analitico: partendo dalla conoscenza della geometria della struttura, delle condizioni al contorno e delle caratteristiche dei materiali, della distribuzione delle masse, delle rigidezze e dello smorzamento; è possibile, risolvendo un problema agli autovalori, pervenire alla determinazione dei parametri modali del sistema (frequenze naturali, fattori di smorzamento e forme modali);
- L'approccio sperimentale: partendo dalla misura dell'*input* dinamico sulla struttura e della risposta strutturale, si calcolano le funzioni di risposta in frequenza e si stimano, a partire da esse, i parametri dinamici della struttura.

¹ Mufti, *Guidelines for Structural Health Monitoring*, University of Manitoba, ISIS Canada, 2001.

² Aktan, A.E., Ciloglu, S.K. Grimmeisman, Pan, Q. and Catbas, F.N., *Opportunities and challenges in health monitoring of constructed systems by modal analysis*, Proc. of International Conference on Experimental Vibration Analysis for Civil Engineering Structures, Bordeaux, France, 2005.

³ Lynch, J.P. and Law, K.H., *Energy of Civil Engineering Structures*, Bordeaux, France, 2005.

Generalizzando, quindi, per identificazione dinamica si intendono tutte quelle tecniche, analitiche e sperimentali, che consentono di individuare la risposta dinamica della struttura (frequenze proprie, modi di vibrare e coefficienti di smorzamento).

L'interesse nei confronti dell'analisi modale nasce dalla constatazione che il comportamento dinamico della struttura è una sorta di “impronta digitale”, il quale dipende dalle caratteristiche intrinseche (masse, rigidità, smorzamenti, grado di vincolo, ecc.) e non dall'entità e/o dal tipo di carico applicato; pertanto, se non intervengono modificazioni interne all'edificio (come per esempio il danno strutturale), il comportamento dinamico della struttura rimane inalterato, viceversa, in presenza di fenomeni di danno, si noteranno delle variazioni nei parametri dinamici della struttura.

7.3 Stato dell'arte

L'identificazione dinamica delle strutture rappresenta una delle più importanti tecniche non distruttive per conoscere il comportamento sismico delle strutture dell'ingegneria civile. Inoltre, l'applicazione di diverse tecniche di identificazione modale in modelli oggetto di test di laboratorio consente di determinare il danno strutturale eventualmente presente, così come informazioni circa l'influenza delle tecniche di rinforzo nell'ambito del comportamento dinamico.

L'identificazione dinamica venne sviluppata per la prima volta nel campo aeronautico e aerospaziale [Kennedy e Pancu, 1947]. Numerosi studi vennero condotti nei decenni successivi [Allemang, 1984], e negli anni '70, con l'avvento dei trasduttori, dei sensori e dei sistemi di acquisizione, furono introdotti i primi test modali [Ewins, 1984]. Solo negli anni '80 questa metodologia fu adottata anche per la caratterizzazione di strutture civili [Cawley e Adams, 1979].

In particolare, vennero sperimentate diverse metodologie, basate principalmente sull'analisi della risposta di una struttura soggetta all'applicazione di una forzante esterna (metodologia *input-output*), o sullo studio delle sue vibrazioni naturali (metodologia *output-only*).

Queste analisi conducono all'identificazione delle frequenze fondamentali, forme modali, rapporti di smorzamento e di altri parametri modali. In base alla loro variazione, possono essere individuati e localizzati i danni strutturali.

In passato come ai giorni nostri, numerose applicazioni nel campo dell'Ingegneria Civile riguardano strutture in acciaio o in calcestruzzo armato. Un'ampia panoramica di questi argomenti e metodologie di applicazione è fornita da Doebling et al. [1996], mentre ulteriori e più recenti ricerche, come l'applicazione dell'identificazione e localizzazione del danno

strutturale nelle strutture in C.A. [Zonta, 2000], la variazione delle caratteristiche dinamiche nei diversi elementi strutturali al crescere del danno [Garaygordobil, 2003] e la determinazione del danno negli elementi in C.A.P. [Franchetti, 2004], approfondiscono anche gli effetti delle procedure di prepensionamento nelle strutture.

Gli studi e le ricerche appena menzionati dimostrano come i test dinamici rappresentano una metodologia di investigazione potenzialmente molto efficace, in grado di ottenere molteplici informazioni riguardanti sia l'intera struttura, sia il danno locale.

L'applicazione di tali metodologie al patrimonio edilizio e, più in generale, agli edifici storici, è un tema che è stato iniziato ad essere sviluppato solo negli ultimi decenni, e che è ancora in piena fase evolutiva.

Casarin [2006] ha condotto uno studio sperimentale sulla valutazione della vulnerabilità strutturale della Cattedrale di Reggio Emilia, con lo scopo di identificare le sue caratteristiche dinamiche. Inoltre, i risultati ottenuti sono stati impiegati per sviluppare e calibrare un complesso modello ad elementi finiti (FEM). Questo studio sottolinea la possibilità, mediante l'impiego di sistemi di monitoraggio dinamico, di determinare sia i comportamenti globale, sia quelli locali. Tale conoscenza conduce ad una scelta dell'intervento più appropriato, se necessario, e consente l'analisi dell'efficacia delle tecniche di rinforzo sulle strutture considerate.

Un ulteriore ed importante studio [Ramos, 2007] approfondisce e sviluppa una metodologia di identificazione del danno da applicare specificatamente alle strutture in muratura. Sono stati condotti test sperimentali di laboratorio su archi e pannelli in muratura, attraverso l'applicazione di vibrazioni indotte, al fine di valutare la propagazione del danno. Questo metodo è stato poi applicato ad alcuni casi studio reali, tra i quali si citano la Torre Orologio di Mogadouro e la Chiesa-Monastero di Jerònimo, a Lisbona.

Garaygordobil [2003] ha compiuto una serie di esperimenti in laboratorio su pannelli in muratura, pilastri in pietra e lastre e travi in C.A. Inoltre, la semplicità degli esperimenti eseguiti ha permesso di dimostrare la validità della valutazione dinamica degli elementi strutturali. È stata anche condotta un'estesa simulazione numerica per riprodurre le condizioni reali. La combinazione di queste analisi risulta adatta per studiare la correlazione tra il verificarsi del danno e la variazione delle proprietà dinamiche di alcuni elementi strutturali considerati. Infine, la metodologia è stata validata attraverso la sua applicazione sulle componenti di edifici storici in muratura in Spagna ed in Belgio.

Oltre a queste ricerche, completamente rivolte allo sviluppo di una nuova metodologia di identificazione e di correlazione con le caratteristiche meccaniche delle strutture, numerosi

altri studi sono stati sviluppati riguardo l'applicazione dell'identificazione dinamica sulle costruzioni in muratura. Molte di queste applicazioni sono casi studio nei quali è stato eseguito un monitoraggio dinamico e sono stati identificati i parametri modali.

Il comportamento dinamico di un edificio esistente in muratura è stato esaminato da De Sortis et al. [2005]. In particolare sono stati studiati bassi livelli di vibrazione, come nel caso di Ramos [2007+]. L'impiego di diversi tipi di vibrazioni hanno consentito di determinare i danni strutturali.

Sono state trovate interessanti e ottime connessioni tra le funzioni di risposta in frequenza numeriche e sperimentali, consentendo così di concludere che una buona tecnica di identificazione può fornire utili informazioni sulle proprietà dinamiche di strutture esistenti in muratura.

Un'interessante applicazione di analisi modale operativa per la valutazione del danno venne svolta da Ramos et al. [2005]. Il metodo di identificazione è stato applicato ad un modello di un edificio in muratura di un piano, soggetto a test di scuotimento [Juhàsovà et al., 2008]. Oltre all'identificazione e localizzazione del danno strutturale, uno degli obiettivi principali di questo studio è stata la comparazione di analisi modali classiche con l'analisi modale "ambientale". Ciò ha permesso la validazione dell'utilizzo di quest'ultima tecnica in particolare per il rilevamento del danno nelle sue fasi iniziali di sviluppo.

Sono stati realizzati alcuni test di vibrazioni ambientali per definire le proprietà dinamiche del minareto di Qutb, in India [Ramos et al., 2006]. L'analisi condotta permise di individuare 7 differenti forme modali (figura 1). Inoltre, sono stati creati alcuni tipi di modelli ad elementi finiti per simulare la risposta strutturale, ed i risultati ottenuti manifestarono una buona relazione con i valori derivanti dall'identificazione modale. Questi modelli sono stati poi impiegati per valutare la *performance* globale della struttura, e per definire la massima sollecitazione sismica ammissibile.

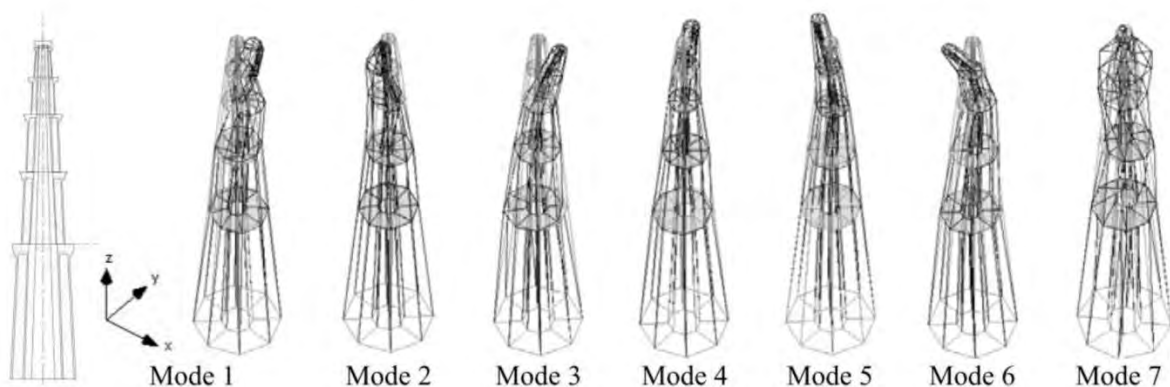


Fig. 7.1 – Forme modali del minareto Qutb [Ramos et al., 2006]

Ulteriori applicazioni su un ampio impiego del monitoraggio dinamico sono quelle presentate da De Stefano e Clemente [2006]. Oggetto degli studi è stato l'impiego di sistemi *wireless* e sensori a fibra ottica per il monitoraggio strutturale delle costruzioni storiche. In particolare, gli autori sottolineano i grandi vantaggi, il basso costo e la possibilità di acquisire informazioni di alta qualità ed in tempo reale sul comportamento dinamico delle strutture considerate, permettendo una valutazione della sicurezza ed un controllo strutturale estremamente efficaci.

Ancora, altre importanti sperimentazioni su casi studio reali sono state presentate da svariati autori [Modena et al., 2001; Jaishi et al., 2003; Gentile e Saisi, 2004 e 2007]. In tutti i casi il fine principale è stato lo studio delle caratteristiche dinamiche di strutture danneggiate, principalmente frequenze e forme modali. Partendo dai risultati ottenuti da tali analisi, gli autori hanno potuto tracciare osservazioni sulle condizioni strutturali degli elementi esaminati, e ciò ha consentito la progettazione degli interventi di rinforzo più adeguati alle rispettive esigenze. Il monitoraggio continuativo, infine, ha dato modo di valutare l'efficacia e l'utilità di tali interventi. Come si evince dalle ricerche precedentemente menzionate, l'applicazione dell'identificazione modale agli edifici storici rappresenta un tema difficile, a causa della grande variabilità delle proprietà meccaniche della muratura, a differenza di altri materiali più omogenei, quali C.A. o acciaio. Comunque, risulta evidente come questa tecnica possa risultare molto utile, e come possa essere efficacemente applicata nel rilievo di costruzioni storiche. Attualmente, tale metodologia permette di ottenere informazioni globali circa la struttura esaminata, in un modo assolutamente non distruttivo, fornendo oltretutto informazioni non ricavabili da altre tecniche NDT.

7.4 Tecniche di identificazione dinamica

In campo ingegneristico sono sempre più usate le tecniche di analisi modale, infatti, anche se lo sviluppo nel mondo dell'informatica ha portato ad avere computer con prestazioni sempre più elevate, permettendo di realizzare modelli agli elementi finiti sempre più complessi per poter studiare le proprietà statiche e dinamiche delle strutture, accade sovente che le proprietà dinamiche differiscano da quelle effettive della struttura.

Questa differenza è da imputarsi a varie cause⁴:

⁴ G.Fabbricino, C.Ranieri, G.M. Verderame, *L'analisi dinamica sperimentale e il monitoraggio delle strutture esistenti*.

- L'analisi agli elementi finiti è basata su una discretizzazione della realtà, con ciò si intende che i campi di spostamento vengono approssimati attraverso funzioni di forma predefinite all'interno di ciascun elemento;
- Mentre le proprietà di massa e di rigidità sono facilmente valutabili sulla base delle proprietà dei materiali e della geometria degli elementi, risulta molto più difficile tenere correttamente conto delle proprietà di smorzamento della struttura all'interno del modello, infatti, lo smorzamento non legato solamente alle proprietà dei materiali ma anche ad una serie di altri meccanismi difficili da modellare analiticamente (apertura e chiusura delle micro fessure, interazione con altri elementi non strutturali, ecc.);
- La geometria effettiva può essere diversa da quella considerata nel modello.

Per colmare le differenze tra struttura reale e modello agli elementi finiti è necessario ricorrere a tecniche sperimentali al fine di controllare i risultati del modello con quelli ottenuti dalle misure, le misure ottenute consentono di aggiornare il modello in modo da renderlo aderente alla realtà. I test di identificazione dinamica si suddividono in due categorie in relazione alla conoscenza o meno della sollecitazione alla quale è soggetta la struttura:

- Tecniche *input-output* dove vengono misurate sia le forze eccitanti sia la risposta strutturale. La struttura viene sollecitata in uno o più punti, in seguito alla sollecitazione si misura la risposta strutturale. In questo caso l'analisi dinamica svolta prende il nome di Analisi dinamica Sperimentale (*Experimental Modal Analysis*, EMA): queste procedure consentono la determinazione delle proprietà dinamiche della struttura in termini di frequenze naturali, rapporti di smorzamento e forme modali, questi parametri serviranno per calibrare il modello della struttura. È, inoltre, possibile determinare i parametri modali della funzione risposta in frequenza del segnale di risposta al segnale di *input*.
- Tecniche *output-only* dove viene misurata la sola risposta del sistema. L'analisi modale può essere effettuata anche nel caso di eccitazione ambientale, la quale viene considerata rumore bianco, perciò l'*input* sulla struttura non è noto, in questo caso le tecniche di analisi modale prendono il nome di Analisi Modale Operazionale (*Operational Modal Analysis*, OMA). Le tecniche OMA portano ad ottenere gli stessi risultati delle tecniche EMA, con la differenza che risulta impossibile determinare i fattori di partecipazione modale non conoscendo l'*input* al quale la struttura è soggetta.

L'analisi modale sperimentale, basata sull'applicazione di un *input* noto alla struttura, risulta non facilmente applicabile alla maggior parte degli edifici, perciò si preferisce operare attraverso l'analisi modale operativa, sfruttando il rumore ambientale per l'identificazione strutturale, evitando così il ricorso ad attrezzature particolari (quali vibrodine, martelle strumentali, eccitatori oleodinamici o elettrodinamici) che eccitino direttamente la struttura. Questo si tramuta in una serie di vantaggi:

- La prova è rapida ed economica, dato che non sono necessarie attrezzature per sollecitare la struttura;
- Le misure vengono effettuate nelle effettive condizioni operative della struttura, per cui i parametri dinamici ottenuti sono rappresentativi del comportamento dinamico della struttura nelle reali condizioni di utilizzo;
- La prova non interferisce con l'operatività della struttura

La correttezza dei risultati forniti dall'OMA può, tuttavia, essere inficiata se al rumore bianco si sovrappone un'eccitazione non casuale.

7.5 Analisi del segnale

Il processamento dei segnali acquisiti è una fase fondamentale per l'elaborazione dei risultati nella quale è importante evitare errori nell'analisi dei dati per non alterare i risultati. A tal proposito si osserva che, normalmente, i segnali acquisiti, come accelerazione, spostamento o forze, sono contenute nel dominio del tempo, mentre i più comuni metodi di analisi elaborano i dati nel dominio delle frequenze.

Il primo passo nell'analisi del segnale è la conversione del segnale stesso, raccolto in forma analogica, in forma digitale, in questa maniera i dati raccolti vengono processati sotto forma di valori discreti e non di funzioni continue. Si osserva che un segnale può essere definito analogico o digitale nella seguente maniera:

- Segnale analogico: un segnale rappresentato da una funzione continua nel tempo, è un segnale analogo al segnale fisico che rappresenta;
- Segnale digitale: un segnale rappresentato da una sequenza di numeri, ognuno dei quali rappresenta il valore del segnale in un determinato istante di tempo (il segnale viene discretizzato).

In questa prima fase di conversione si individuano diversi tipi di problematiche insite nella modalità di acquisizione dei dati e nella modalità di trasformazione del segnale: tali problemi sono legati all'insorgenza degli errori di *aliasing* e di *leakage*, e ai quali si cerca di porre rimedio mediante le procedure di *windowing* e di *overlap averaging*.

7.5.1 Aliasing

Per digitalizzare un segnale continuo, solitamente, il campionamento del segnale viene effettuato ad intervalli di tempo uguale; il problema è, perciò, definire l'intervallo di campionamento Δt . Si deve coniugare le esigenze di ridurre l'onere computazionale e di ottenere una effettiva rappresentazione del segnale. Quindi un campionamento effettuato in punti molto vicini tra loro porterà ad avere una sovrabbondanza di dati, aumentando l'onere computazionale; viceversa, un campionamento rado con punti lontani tra loro porta a confondere le basse e alte frequenze nei dati originari. Questo problema definito come *aliasing* costituisce una potenziale sorgente di errore che interessa qualsiasi processo che sia proceduto da una conversione del segnale da analogico a digitale.

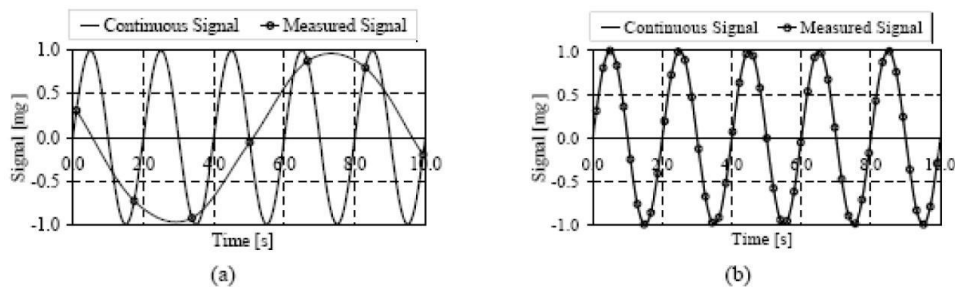


Figura 7.2 - Esempio di errore di aliasing: a) campionamento insufficiente, b) campionamento corretto

Stabilito l'intervallo di campionamento Δt ad esso corrisponderà una certa frequenza di campionamento pari a $1/\Delta t$, che definisce a sua volta il numero di campionamenti effettuati nell'arco di un secondo. È importante osservare che per individuare un ciclo sono necessari almeno due campionamenti della frequenza del segnale originario.

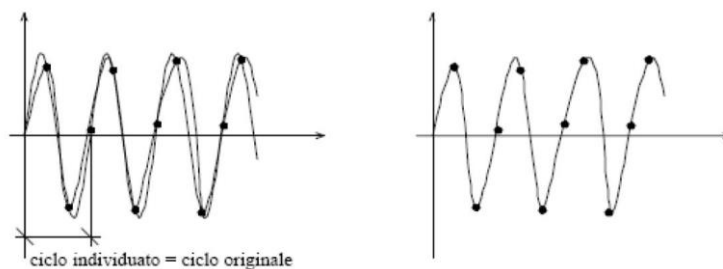


Figura 7.3 - Campionamento sufficiente

Quindi la frequenza più alta che può essere definita mediante un rapporto di campionamento di $1/\Delta t$ campioni al secondo è $1/2\Delta t$. Le frequenze nel segnale originale al di sopra del valore $1/2\Delta t$ saranno ripiegate indietro nell'intervallo di frequenze 0 e $1/2\Delta t$ e confuse con i dati già presenti in questo intervallo.

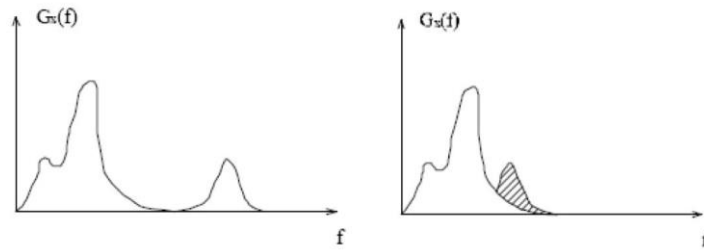


Figura 7.4 - Fenomeno dell'aliasing

La frequenza di taglio $f_c = 1/2\Delta t$ è chiamata frequenza di Nyquist.

Per evitare il taglio delle frequenze più alte, il problema può essere risolto in due modi. Il primo è quello di avere un campionamento più fitto (aumentando però l'onere computazionale). Il secondo è quello di filtrare il segnale prima di campionarlo rispetto ad una frequenza massima di interesse. Se si sceglie la frequenza di Nyquist f_c pari alla massima frequenza di interesse, si otterranno risultati privi di *aliasing* per frequenze inferiori a f_c .

7.5.2 Leakage

Leakage è un problema legato alla lunghezza della *time-history* che è di dimensione finita, associato all'assunzione di periodicità del segnale. Se si considera un tratto di segnale di lunghezza T pari ad un multiplo intero del segnale stesso, non c'è alcun problema, in caso contrario l'assunzione di periodicità non è strettamente valida in particolare in prossimità delle estremità dell'intervallo, ciò comporta una dispersione dell'energia spettrale.

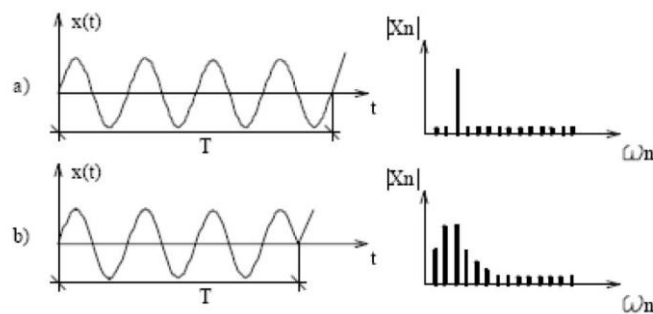


Figura 7.5 - Spettro reale a) e effetto leakage b)

7.5.3 Windowing

È un metodo impiegato per risolvere il problema del *leakage* che consiste nel filtrare il segnale iniziale $x(t)$ attraverso una funzione filtro $W(t)$. L'operazione di finestramento, nel dominio del tempo, restituisce un segnale $x'(t) = x(t) \cdot W(t)$ in cui la dispersione di energia spettrale è contenuta. Il segnale viene suddiviso in più tratti, ciò è necessario, innanzitutto per le ipotesi di applicabilità della trasformata di Fourier, che prevedono che la funzione in ingresso sia definita in un intervallo di tempo limitato (mentre un segnale aleatorio, come può

essere quello di un rumore bianco utilizzato, è temporalmente infinito); inoltre, questo accorgimento scongiura il rischio inevitabile che, qualora il periodo del segnale e l'intervallo della finestrazione non coincidano, si verifichi un errore nella ricostruzione del segnale durante l'applicazione della trasformata di Fourier, la quale prevede la ripetizione della finestra selezionata; la trasformata di Fourier ricomponesse così un segnale diverso da quello originario, con la conseguente ripartizione dell'informazione su una banda di frequenze, anziché su una sola riga.

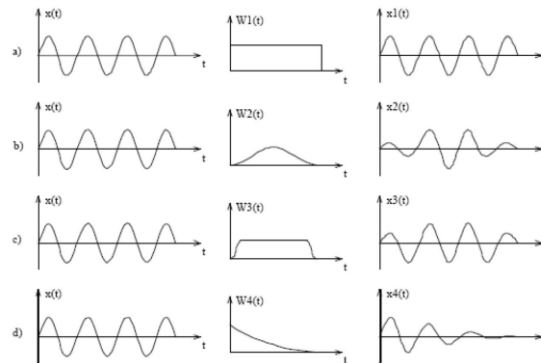


Figura 7.6 - Differenti tipi di finestre

I tipi di finestre utilizzate nell'analisi del segnale sono:

- a) Box Window
- b) Hanning Window
- c) Cosine Taper Window
- d) Exponential Window

Ciascuna finestra è generalmente riferita ad un tipo di segnale, i filtri b) e c) sono utilizzati per segnali periodici o per vibrazioni *random*, il filtro d) viene utilizzato per vibrazioni in transitorio in cui le informazioni più importanti sono concentrate in un tratto dell'intero segnale.

7.5.4 *Overlap averaging*

Nell'analisi dei segnali casuali non è sufficiente calcolare la trasformata di Fourier, in senso stretto questa non esiste per un segnale casuale, bisogna invece ottenere una stima della densità spettrale e della funzione d'autocorrelazione impiegati per caratterizzare questo tipo di segnale. Tuttavia essendo queste quantità ottenute tramite la trasformata di Fourier è necessario effettuare una operazione media che riguardi un buon numero di campioni. Per un segnale casuale l'operazione di media può essere effettuata su dei campioni sequenziali o sovrapposti:

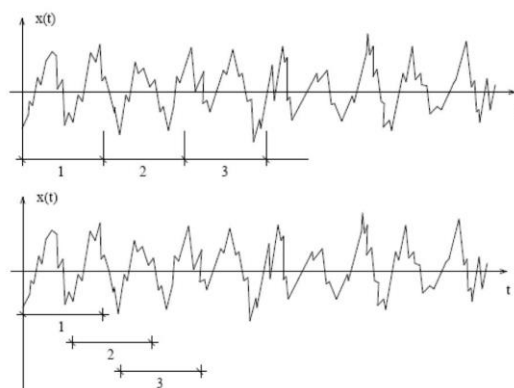


Figura 7.7 - Campioni sovrapposti

7.6 Teoria della dinamica delle strutture

Di seguito verranno spiegati i fondamenti della dinamica delle strutture dei sistemi a uno e più gradi di libertà.

7.6.1 Sistemi ad un grado di libertà

La principale differenza tra l'analisi statica e l'analisi dinamica è la dipendenza dal tempo dell'approccio dinamico. Infatti, la risposta della struttura (spostamenti, velocità, accelerazione o forze interne) è associata all'accelerazione che agisce a causa della presenza di forze inerziali. In questa relazione, la massa, la rigidità e lo smorzamento giocano un ruolo fondamentale. Il moto può essere descritto da un'equazione matematica, usando la seconda legge di Newton sul moto oppure l'equilibrio dinamico. Se $q(t)$ è lo spostamento in dipendenza dal tempo di un sistema ad un unico grado di libertà, l'equazione del moto risulta:

$$m\ddot{q}(t) + c\dot{q}(t) + kq(t) = p(t) \quad (7.1)$$

dove:

- m è la massa del sistema;
- c è lo smorzamento che tiene conto in maniera approssimata dei meccanismi non isterici di perdita di energia che caratterizzano la risposta dei sistemi elastici;
- k è la rigidità del sistema;
- $p(t)$ rappresenta il vettore del carico applicato, anch'esso dipendente dal tempo.

In questa equazione $\dot{q}(t)$ e $\ddot{q}(t)$ rappresentano rispettivamente la velocità e l'accelerazione del sistema. Qualora la forzante esterna $p(t)$ non fosse di tipo armonico, ma di tipo arbitrario, la soluzione di questa equazione differenziale del secondo ordine può essere ottenuta applicando l'integrale di Duhamel, valido per sistemi lineari, rappresentata dalla seguente equazione:

$$q(t) = \frac{1}{m\omega_D} \int_0^t p(t)e^{-\xi\omega_n(t-\tau)} \sin[\omega_D(t-\tau)] d\tau \quad , t > \tau$$

dove τ è l'istante di riferimento, ω_D è la frequenza smorzata che si relaziona con la frequenza naturale ω_n o col periodo proprio del sistema tramite la relazione

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}} = \frac{2\pi}{T_n}$$

$$\omega_D = \omega_n \sqrt{1 - \xi^2}$$

e ξ è il coefficiente di smorzamento, il quale per le strutture dell'ingegneria civile è minore del 20%. Il valore del coefficiente ξ è dato dalla seguente relazione:

$$\xi = \frac{c}{2m\omega_n}$$

Un'altra possibilità è quella di ottenere la soluzione dell'equazione differenziale nel dominio delle frequenze, applicando la trasformata di Fourier ad entrambi i membri dell'equazione (7.1). La trasformata di Fourier $X(\omega)$ di una funzione $x(t)$ è data da:

$$X(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t)e^{-j\omega t} dt$$

Dove j è il numero immaginario ($j^2 = -1$). Nel processo, $P(\omega)$ e $Q(\omega)$ rappresentano, rispettivamente, la trasformata di Fourier della forza esterna $p(t)$ e della risposta $q(t)$. Poiché la derivata rispetto al tempo delle funzioni di trasformate in frequenza è data dal prodotto $j\omega$ nel dominio delle frequenze, l'equazione (7.1) può essere riscritta come:

$$-m\omega^2 Q(\omega) + cj\omega Q(\omega) + kQ(\omega) = P(\omega) \quad (7.2)$$

Risolvendo l'ultima equazione rispetto a $Q(\omega)$, come indicato dalla equazione (7.3), si può concludere che la risposta della trasformata di Fourier dipende direttamente dall'eccitazione del sistema, secondo la funzione $H(\omega)$. Questa è la cosiddetta *Frequency Response Function* (FRF), definita come rapporto della trasformata di Fourier della risposta e della forza eccitante (la FRF corrisponde al fattore di amplificazione della risposta di un sistema quando è soggetto ad una forzante esterna):

$$Q(\omega) = \frac{P(\omega)}{-m\omega^2 + cj\omega + k} = H(\omega)P(\omega) \quad (7.3)$$

Il vantaggio di questo approccio consiste nel fatto che può essere stabilita una relazione deterministica tra la forza eccitante e la risposta, come indicato dalla equazione (7.4):

$$H(\omega) = \frac{Q(\omega)}{P(\omega)} = \frac{1}{k} \frac{1}{1 - (\frac{\omega}{\omega_n})^2 + j[2\xi(\frac{\omega}{\omega_n})]} \quad (7.4)$$

Si nota come $H(\omega)$ sia una funzione complessa e per calcolare la sua ampiezza è necessario estrarre la radice quadrata della somma dei quadrati della parte reale e della parte immaginaria, dalla quale risulta:

$$H(\omega) = \frac{1/k}{\sqrt{[1 - (\frac{\omega}{\omega_n})^2]^2 + [2\xi(\frac{\omega}{\omega_n})]^2}}$$

La figura 7.8 a) rappresenta la FRP per sistema ad un singolo grado di libertà, con frequenza naturale ω_n e con il coefficiente di smorzamento ξ variabile fino al 20%. Si può osservare che il massimo valore dell'ampiezza si trova in corrispondenza del valore della frequenza di risonanza ($\omega_D = \omega_n\sqrt{1 - \xi^2}$), la quale è più alta per piccoli valori di ξ .

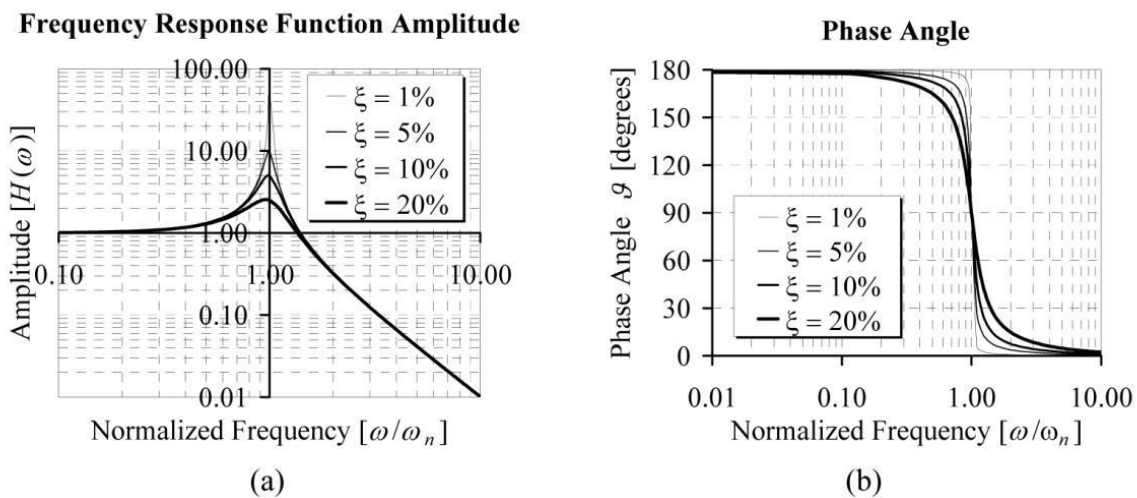


Fig. 7.8 – Funzione FRP: a) ampiezza vs frequenza normalizzata; b) fase vs frequenza normalizzata

Nella figura 7.8 b) è mostrata la fase dell'angolo θ , definito come l'arcotangente del quoziente tra la parte immaginaria e la parte reale dell'equazione (7.4), dipendente dal dominio delle frequenze. Il massimo valore di ampiezza della FRP, mostrato in figura, viene raggiunto con una traslazione di 180° dalla fase.

Infine, la soluzione $q(t)$ dall'inverso della trasformata di Fourier della funzione $Q(t)$, data da:

$$q(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} H(\omega)P(\omega)e^{j\omega t} d\omega$$

7.6.2 Sistemi a più gradi di libertà

Quando il sistema è composto da n gradi di libertà, l'equazione che descrive il moto ottenuta dalla seconda legge di Newton diventa:

$$M\ddot{q}(t) + C\dot{q}(t) + Kq(t) = p(t) \quad (7.5)$$

dove M , C e K sono le matrici $n \times n$, nell'ordine, di massa, di smorzamento viscoso e di rigidità, con i loro componenti m_{ik} , c_{ik} e k_{ik} che rappresentano le generiche forze nella

posizione i -esima, quando l'accelerazione è applicata nelle coordinate k , mentre $p(t)$ è il generico vettore della forzante e $q(t)$ la generica risposta del sistema.

Per risolvere l'equazione (7.5) si può nuovamente usare la trasformata di Fourier, stabilendo una relazione diretta tra la forza eccitante e la risposta, similmente a quanto eseguito nei sistemi ad un grado di libertà, tramite l'FRP:

$$H(\omega) = [-\omega^2 M + j\omega C + K]^{-1}$$

Il calcolo della FRP è molto complesso poiché si deve calcolare la matrice inversa $n \times n$ per ogni frequenza ω . In alternativa si può adottare l'approccio modale, il quale parte dall'assunzione di un problema non smorzato come indicato nella seguente equazione (7.6):

$$M\ddot{q}(t) + Kq(t) = 0 \quad (7.6)$$

La soluzione di questa equazione differenziale è data da:

$$q(t) = \varphi_i e^{\lambda_i t} \quad (7.7)$$

dove φ_i sono gli auto vettori reali ($i=1, \dots, n$) e λ^2 sono gli auto valori reali, i quali, in caso di sistema non smorzato, coincidono con le frequenze naturali del sistema $\omega_i (\lambda_i = j\omega_i)$.

Inserendo l'equazione (7.7) nell'equazione (7.6) si ottiene:

$$[k - (-\lambda_i^2)M]\varphi_i = 0 \quad \forall \quad K\phi = M\phi\Lambda \quad (7.8)$$

I modi sono comunemente raggruppati in matrici modali ϕ dove ogni colonna rappresenta gli auto vettori, e le auto frequenze ω_i sono raggruppate in una matrice diagonale Λ . Per le proprietà di ortogonalità delle matrici:

$$\phi_m^T M \phi_m = [m_i], \quad \phi_m^T K \phi_m = [k_i]$$

dove m_i sono le masse modali, k_i le rigidità modali. Gli auto vettori possono anche essere normalizzati secondo la massa attraverso la funzione ϕ_m composta dagli auto valori normalizzati ($\varphi_{m,i} = \frac{\varphi_i}{\sqrt{m_i}}$), il che porta alla seguente relazione:

$$\phi_m^T M \phi_m = I, \quad \phi_m^T K \phi_m = \Lambda^2$$

dove I è la matrice identità $n \times n$.

Se l'equazione viene pre-moltiplicata per ϕ^T , tenendo conto dell'equazione (7.9), le frequenze naturali di un sistema non smorzato per ogni forma modale i possono essere ottenute similmente a quanto si fa per un sistema ad un unico grado di libertà:

$$\omega_i^2 = \frac{k_i}{m_i}$$

Aggiungendo uno smorzamento proporzionale al sistema, il quale offre una relazione lineare tra la rigidità e la massa, e assumendo che la matrice dello smorzamento sia anch'essa diagonalizzabile, è possibile ottenere:

$$\phi^T C \phi = [c_i] = [2\xi_i \omega_i m_i] = \Gamma [m_i] \quad \text{con} \quad \Gamma = [2\xi_i \omega_i]$$

Introducendo le coordinate di trasformazione $q(t) = \phi q_m(t)$, dove $q_m(t)$ sono gli spostamenti modali, e premoltiplicando l'equazione (7.5) per ϕ^T , si ottiene la seguente equazione semplificata, con tutti i termini con matrici diagonali posti nel membro di sinistra:

$$I\dot{q}_m(t) + \Gamma q_m(t) + \Lambda^2 q_m(t) = \left[\frac{1}{m_i}\right] \phi^T p(t) \quad (7.9)$$

Ancora, se questa equazione viene assunta omogenea, la forma della soluzione che si assume è uguale a quella dell'equazione (7.7) e gli auto valori soddisfano la condizione:

$$\lambda_i^2 + 2\xi_i \omega_i \lambda_i + \omega_i^2 = 0$$

con la soluzione:

$$\lambda_i = -\xi_i \omega_i + j\omega_i \sqrt{1 - \xi_i^2}, \quad \lambda_i^* = -\xi_i \omega_i - j\omega_i \sqrt{1 - \xi_i^2} \quad (7.10)$$

$$\omega_i = |\lambda_i|, \quad \xi_i = \frac{-\text{Re}(\lambda_i)}{|\lambda_i|}$$

dove l'asterisco * denota la soluzione complessa coniugata.

La funzione della trasformata di Fourier può essere usata anche per risolvere l'equazione (7.9), poiché tale equazione è simile a quella di un sistema ad un unico grado di libertà. La risposta viene correlata alla sollecitazione tramite l'FRF nello spazio modale, nella seguente forma:

$$Q(\omega) = H(\omega)P(\omega)$$

dove i termini diagonali della matrice FRF di dimensioni $n \times n$ sono dati da:

$$H_{(i,k)}(\omega) = \sum_{j=1}^n \frac{\varphi_{i,j} \varphi_{k,j}}{(\omega_n^2 - \omega^2) + i(2\xi_n \omega_n \omega)} \quad (7.11)$$

$$\text{con } i \wedge k = 1, \dots, n$$

Questa formulazione ha il vantaggio che la risposta può contenere un numero limitato di modi di vibrare senza significativi errori, così da ridurre lo sforzo computazionale.

La formulazione deterministica per massa e rigidità può essere calcolata estraendo le caratteristiche meccaniche del materiale del sistema strutturale, ma le informazioni sullo smorzamento non possono essere calcolate con questi parametri. Sono necessari test sperimentali in sito per determinare il coefficiente modale di smorzamento ξ_i .

7.7 Tecniche di identificazione dinamica input-output

Le tecniche di identificazione modale input-output sono state dapprima sviluppate nell'ingegneria meccanica e aerospaziale per poi essere implementate anche nell'ingegneria civile attorno agli anni '60. Queste tecniche sono basate sul controllo della sollecitazione della struttura (input) e sulla misura della risposta strutturale nel tempo in una serie di punti di controllo. I parametri modali (frequenze naturali, modi di vibrare e coefficienti di

smorzamento) sono calcolati valutando la Funzione di Risposta in Frequenza (FRF) oppure la Funzione di Risposta all'Impulso (IRF), sia nel dominio del tempo sia in quello delle frequenze. Esistono particolari tipi di test basati sull'applicazione di sollecitazioni sinusoidali a frequenze naturali progressive vicine alla frequenza di risonanza. Questi test sono detti *tuned-sinusoidal forced test* e sono frequentemente applicati alle strutture dell'ingegneria civile attraverso l'uso di vibrodine a massa eccentrica.

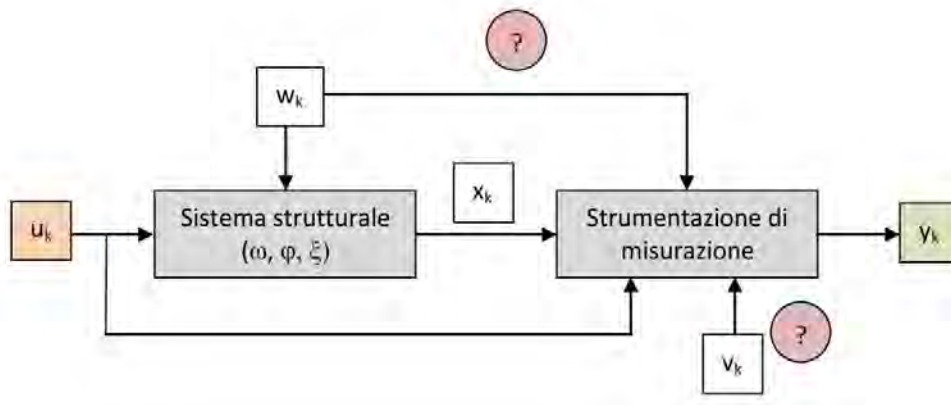


Fig. 7.9 – Schema delle tecniche di identificazione input-output

I metodi *input-output* possono essere classificati in base al tipo di formulazione, al numero di gradi di libertà, al tipo di valore e numero di input/output.

Partendo dal tipo di formulazione, ci sono due possibilità, la formulazione indiretta (*modal*) e la formulazione diretta. Nella formulazione modale (*modal*) si assume la linearità e ortogonalità delle proprietà dei modi vibrazionali e dello smorzamento C proporzionali alla massa M e alla rigidità K . La formulazione diretta tratta le equazioni di equilibrio dinamico differenziale e valuta i coefficienti costanti associati.

La formulazione ha la proprietà di disaccoppiare la risposta strutturale in contributi modali, permettendo il conteggio solo di alcuni di questi in algoritmi *curve-fitting*. Se gli algoritmi di *fitting* dipendono da una frequenza di risonanza e dal coefficiente di smorzamento per regolare la funzione per misurare i dati, allora tale algoritmo è detto *Single Degree of Freedom* (SDOF). Al contrario, se il processo di regolazione valuta diversi modi di vibrare questi algoritmi sono detti *Multiple Degree of Freedom* (MDOF) e, di conseguenza, sono più accurati e più complessi da implementare.

Il tipo delle stime può essere connesso al dominio delle frequenze con formulazioni modali. Queste possono essere suddivise in stime locali o globali, dipende dalla procedura di estrazione delle forme modali, che possono essere basate su prove separate per ogni FRF, per le stime locali, o su un'unica analisi d'insieme delle funzioni FRF per la stima globale. È importante stabilire il numero di punti da eccitare e di cui misurarla risposta. Dal punto di

vista dell'accuratezza, l'ideale è quello di eccitare la struttura in diversi punti per indurre sufficiente energia per permettere di estrarre il maggior numero di informazioni modali. Le difficoltà di sincronizzazione e nell'equipaggiamento costringono spesso ad adottare singoli input test. I test più semplici sono quelli con un singolo input e un singolo output da misurare, i cosiddetti algoritmi *Single-Input-Single-Output* (SISO). I test *single-input* presentano la difficoltà nell'indurre tutti i modi rilevanti e possono essere individuate differenti localizzazioni insieme con differenti risposte trattate simultaneamente o individualmente. Il primo caso porta agli algoritmi *Single-Input-Multi- Output* (SIMO), mentre il secondo porta agli algoritmi *Multi-Input-Multi-Output* (MIMO). La tabella 1 mostra i gli algoritmi di identificazione più usati che riassumono i metodi di classificazione.

classificazione.

	Metodo	Tipo di formulazione	Gradi di libertà (DOF)	Tipo di stima	Numero di input/output
Dominio delle frequenze	Peak Picking	Indiretta (Modal)	SDOF	Locale	SISO
	Circle-fit				
	Inverse				
	Dobson				SISO/SIMO
	Nonlinear LSFD		MDOF	Locale/globale	SIMO/MIMO
	Orthogonal Polynomial				
Time-sinusoid	Mau		SDOF	Locale	SISO
	Asher's		MDOF	Globale	MIMO
	Complex Exponential		SDOF	Locale	SISO
Dominio del tempo	LSCE		MDOF	Globale	SIMO/MIMO
	Ibrahim				
	ERA	Diretta	Globale	MIMO	
	ARMA				

Tab. 7.1 – Classificazione degli algoritmi di identificazione dinamica [Caetano,2000]

7.7.1 Misura della funzione FRF

Secondo la prima definizione di FRF, indicata nelle equazioni (7.4) e (7.11), avendo la misura sia della risposta nel dominio del tempo $y(t)$ per i gradi di libertà sia della sollecitazione $u(t)$ negli j gradi di libertà, la FRF $H_{(i,j)}(\omega)$ può essere calcolata direttamente applicando le funzioni FRF nelle serie temporali:

$$H_{(i,j)}(\omega) = \frac{Y_i(\omega)}{U_j(\omega)}$$

dove U e Y sono, rispettivamente, gli spettri di Fourier delle sollecitazioni e il segnale di risposta.

Un altro processo per calcolare $H_{(i,j)}(\omega)$ avviene attraverso le relazioni stocastiche dell'input-output, riguardo all'incrocio delle funzioni degli spettri di densità tra la sollecitazione e la

risposta, $S_{(i,j)}(\omega)$, e le funzioni spettro di densità spettrale (PSD) di risposta o di sollecitazione, $S_{(i,i)}(\omega)$ e $S_{(j,j)}(\omega)$, rispettivamente, dove le seguenti relazioni possono essere osservate:

$$H_{(i,j)}(\omega) = \frac{S_{(i,j)}(\omega)}{S_{(j,j)}(\omega)} \quad \text{e} \quad |H_{(i,j)}(\omega)|^2 = \frac{S_{(i,j)}(\omega)}{S_{(j,j)}(\omega)}$$

Una volta che le misure vengono discretizzate nel tempo Δt , l'equazione soprastante può essere valutata solo in valori di frequenze discrete ω su un intervallo di frequenze $\Delta\omega$ definito da frequenze semplici f_s , definite come:

$$\Delta\omega = \frac{2\pi}{N \cdot f_s}$$

e le funzioni FRF sono poi calcolate come stima del valore reale attraverso le seguenti equazioni:

$$\widehat{H}_{(i,j)}(\omega) = \frac{\widehat{Y}_i(\omega)}{\widehat{U}_j(\omega)} \quad \widehat{H}_{(i,j)}(\omega) = \frac{\widehat{S}_{(i,j)}(\omega)}{\widehat{S}_{(j,j)}(\omega)} \quad |\widehat{H}_{(i,j)}(\omega)|^2 = \frac{\widehat{S}_{(i,j)}(\omega)}{\widehat{S}_{(j,j)}(\omega)} \quad (7.12)$$

dove ogni spettro $S(x_1, x_2)$ è dato dall'espressione:

$$S_{(x_1, x_2)}(\omega) = \frac{x_1(\omega)x_2(\omega)}{N \cdot \Delta t} \quad (7.13)$$

7.7.2 Peak Peaking Method

Il metodo basato sul dominio delle frequenze più conosciuto e più usato è il *Peak Picking Method*⁵ (PP), il quale assume che in vicinanza delle frequenze di risonanza la risposta è dominata dai modi di risonanza, di conseguenza, non ci sono contributi degli altri modi non in risonanza. La definizione di FRF, secondo l'equazione (11), può essere sostituita dall'equivalente equazione della funzione FRF di un sistema ad un singolo grado di libertà, rappresentata da:

$$H_{(i,j)}(\omega) = \frac{\varphi_{in}\varphi_{j,n}}{(\omega_n^2 - \omega_n) + j(2\xi_n\omega_n\omega)} \quad (7.14)$$

Le frequenze di risonanza ω_n sono poi associate ai picchi in ampiezza della funzione FRF. Per la stima dello smorzamento, si usa il metodo *Half-Power Bandwidth*. Il metodo è basato sul calcolo di frequenze vicine, dove il quadrato dell'ampiezza della FRF è uguale a metà del massimo valore:

$$|H_{(i,j)}(\omega)|^2 = \frac{1}{2} |H_{(i,j)}(\omega_n)|^2$$

Usando la precedente definizione, il coefficiente di smorzamento ξ_n può essere approssimativamente calcolato nel seguente modo:

⁵ Ewins, 2000 e Maia Silva, 1997

$$\xi_n \approx \frac{\omega_2 - \omega_1}{2\omega_n}$$

Nella figura 7.10 vengono mostrate genericamente le procedure per calcolare il valore dei picchi per le frequenze di risonanza e dei coefficienti di smorzamento.

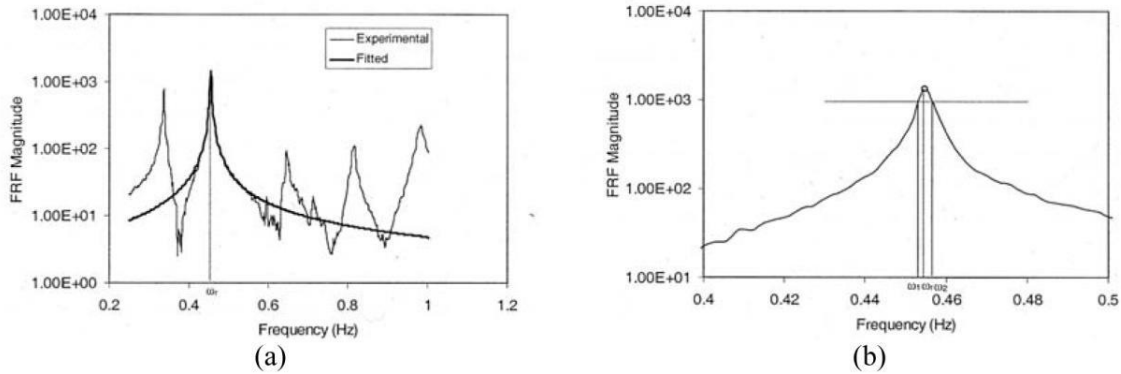


Fig. 7.10 – Metodo Peak Picking [Caetano, 2000]: a) adattamento della funzione FRF con un grado di libertà; b) stima dello smorzamento usando il metodo Half Power Bandwidth

Infine, i vettori delle forme modali si presume siano gli auto vettori reali, i quali possono essere estratti considerando i valori dei picchi di una serie di FRF e secondo l'equazione (7.14), attraverso:

$$H_{(i,j)}(\omega_n) = \frac{\varphi_{i,n}\varphi_{j,n}}{2\xi_n\omega_n^2}$$

e calcolando i termini della prima diagonale, dove le funzioni FRF sono correlate con la misura degli input e degli output nella stessa posizione, gli autocomponenti sono perciò ottenuti così:

$$\varphi_{i,n} = \sqrt{2\xi_n\omega_n^2 H_{(i,i)}(\omega_n)} \quad \text{e} \quad \varphi_{j,n} = \frac{\sqrt{2\xi_n\omega_n^2 H_{(i,j)}(\omega_n)}}{\varphi_{i,n}}$$

La forma dei risultati del metodo PP è molto sensibile al rumore e allo smorzamento strutturale, poiché le stime delle forme modali sono calcolate solo attraverso tre punti per ogni FRF. Altre fonti di errori sulla stima delle forme modali possono apparire quando le frequenze di risonanza sono in uno stretto intervallo, con il risultato di contaminazione dei valori di risonanza, o quando le FRF sono molto acute e conseguentemente la stima dello smorzamento ha una bassa risoluzione.

7.8 Tecniche di identificazione dinamica Output-Only

Le tecniche di identificazione modale *output-only* o *ambient vibration test* sono state sviluppate nell'ambito dell'ingegneria meccanica ed aerospaziale, ma hanno assunto molta importanza anche nelle opere dell'ingegneria civile, come ponti e grattacieli, nei quali l'eccitazione esterna e la determinazione delle forze applicate costituisce un problema. Le

tecniche sono basate sulla misura della risposta dinamica di un sistema virtuale sotto condizioni di carico naturale (sia ambientale che operativo) e sull'assunzione che l'eccitazione esterna sia di natura casuale nel dominio del tempo e nello spazio fisico della struttura.

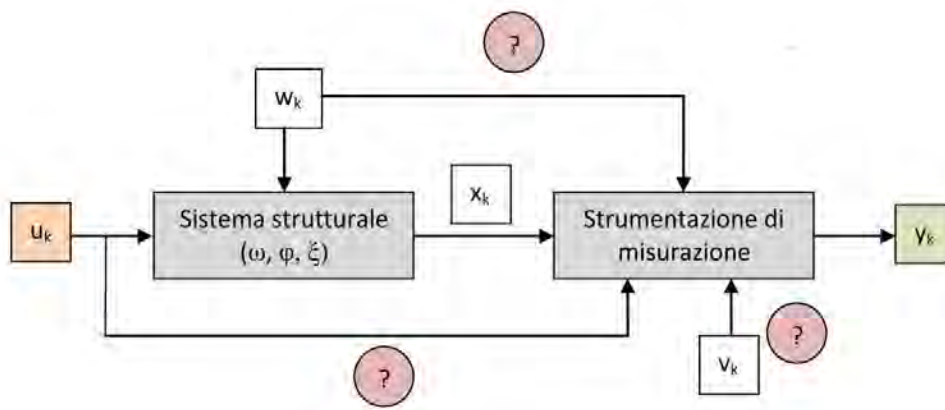


Fig. 7.11 – Schema delle tecniche di identificazione output-only

In questo tipo di tecniche di identificazione, l'ipotesi fondamentale sulle forze di eccitazione del sistema virtuale consiste nel considerare la sollecitazione ambientale u_k come un processo stocastico di rumore bianco nell'intervallo delle frequenze d'interesse. A causa della natura dei dati acquisiti, la risposta y_k include contributi modali delle forze ambientali, il contributo del sistema strutturale e il contributo del rumore del segnale provenienti da fonti indesiderate. Inoltre, la risposta misurata evidenzia i picchi di ampiezza della funzione di densità spettrale, provenienti sia dal sistema strutturale sia dalle forze ambientali, di conseguenza le tecniche di identificazione *output-only* devono essere in grado di separare tali forme modali.

Le tecniche possono essere divise in due gruppi, in relazione al tipo di dati raccolti, che possono essere nel dominio delle frequenze o nel dominio del tempo. Il primo gruppo si basa sull'analisi del segnale di ciascun punto di misurazione (nel dominio delle frequenze attraverso l'applicazione della FFT) e sulla correlazione tra i segnali; queste tecniche vengono chiamate metodi non parametrici. Il secondo gruppo si basa sulla calibrazione del modello attraverso funzioni di correlazione o serie temporali (*time history*), di ciascun punto, misurate nel dominio del tempo; tali tecniche sono dette metodi parametrici.

Generalmente i metodi che sfruttano il dominio delle frequenze hanno processi di elaborazione dati più veloci e sono più semplici da utilizzare per gli utenti, rispetto ai metodi che si fondano nel dominio del tempo. Come svantaggio, però, i metodi nel dominio delle frequenze presentano maggiori difficoltà nell'identificare valori di frequenze vicine, poiché presentano dei limiti per quanto riguarda la risoluzione di frequenze vicine dovuti al processo

di FFT. Nella tabella 7.2 sono elencati i principali metodi di identificazione *output-only*⁶. Si può trarre la conclusione che non esiste un unico metodo da usare nell'identificazione modale, infatti, ogni metodo offre accurati risultati quando applicato convenientemente, inoltre, ogni metodo presenta i propri vantaggi e le proprie limitazioni.

	Metodo	Caratteristiche
Dominio delle frequenze	Peak Picking (PP)	Classico metodo SDOF
	Frequency Domain Decomposition	Metodo MDOF, applicazione della SVD per ridurre il rumore
	Enhanced Frequency Domain Decomposition	Metodo MDOF, applicazione della SVD per ridurre il rumore
	Polimax	Metodo MDOF
Dominio del tempo	Random Decrement (RD)	Opera su serie temporali, porta ad un libero decadimento della curva di analisi
	Recursive Techniques (ARMA)	Modellazione delle serie temporali usando algoritmi ricorsivi
	Maximun Likelihood Methods	Metodo stocastico basato sulla minimizzazione della matrice di covarianza
	Stochastic Subspace Identification Methods (SSI-DATA)	Metodo stocastico basato sul progetto del vettore di stato in relazione a vettori passati

Tab. 7.2 – Classificazione di alcuni dei più rilevanti algoritmi di classificazione *output-only* [Caetano, 2000]

7.8.1 Frequency Domain Decomposition Method (FDD)

Per introdurre il metodo *Frequency Domain Decomposition* (FDD), è importante evidenziare una caratteristica sulla misurazione della funzione FRF nel contesto dell'identificazione *output-only*.

Come la sollecitazione viene considerata un processo stazionario gaussiano a rumore bianco, la funzione PSD della sollecitazione è considerata costante, quindi $S_{jj}(\omega) = C$, questa assunzione influenza la terza assunzione presentata nell'equazione (7.12), rappresentata da:

$$|\widehat{H}_{(l,j)}(\omega)|^2 = \frac{\widehat{S}_{(l,j)}(\omega)}{C}$$

Questa osservazione indica che i picchi della FRF in vicinanza delle frequenze di risonanza del sistema strutturale si possono ottenere direttamente dai picchi della funzione PSD valutandone solo la misura della risposta.

Il metodo FDD può essere visto come una estensione del metodo PP, il quale assume che le frequenze di risonanza siano bene spaziate nella frequenza e che il contributo dei modi nelle vicinanze delle frequenze di risonanza sia nullo. Il metodo è stato presentato da Brincker⁷ e le

⁶ Caetano, 2000

⁷ Brincker et al. 2000

basi del metodo FDD sono rappresentate dal metodo *Singular Value Decomposition* (SVD) della risposta spettrale in densità di massa, data da:

$$S_y(\omega_k) = \psi_k \Lambda_k \psi_k^H$$

dove Λ_k è la matrice diagonale con i valori singolari, gli autovalori positivi e reali della matrice $S_y(\omega)$ disposti in ordine decrescente. Il primo valore equivale per ogni frequenza allo spettro di potenza del sistema ad un unico grado di libertà in conformità ai modi significativi che contribuiscono alla risposta. ψ_k è la matrice ortogonale complessa nella quale ogni colonna contiene i vettori dei modi di vibrare di ogni picco spettrale. L'apice H denota la coniugata trasposta e si può stabilire la seguente relazione per la matrice ψ_k :

$$\psi_k \psi_k^H = \psi_k^H \psi_k = I$$

Il passo successivo è dato dall'analisi dello spettro dei valori singolari di Λ_k per la selezione dei picchi di risonanza e i corrispondenti modi di vibrare e la valutazione delle componenti del modello sui misurati gradi di libertà.

Di seguito sono elencati in dettaglio i passi seguiti nel processo FDD:

1. Per ogni set di misure registrate viene individuata una matrice di densità spettrale di potenza di dimensione $m \times m$, dove m è il numero di strumenti di misura (accelerometri) a disposizione per ogni *setup* di prova:

$$S_{yy}(\omega) = \begin{bmatrix} S_{y_1 y_1}(\omega) & \cdots & S_{y_1 y_m}(\omega) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ S_{y_m y_1}(\omega) & \cdots & S_{y_m y_m}(\omega) \end{bmatrix}$$

dove:

- $G_{y_i y_i}(\omega)$ = funzione di densità autospettrale;
- $G_{y_i y_j}(\omega)$ = funzione di densità spettrale incrociata;

2. Di ciascuna serie y , finestrata e sovrapposta, viene calcolata la trasformata discreta di Fourier:

$$\begin{aligned} \tilde{y}_1 &\leftrightarrow \tilde{Y}_1 \\ \tilde{y}_2 &\leftrightarrow \tilde{Y}_2 \\ \tilde{y}_n &\leftrightarrow \tilde{Y}_n \end{aligned}$$

3. Si mediano le trasformate calcolate:

$$Y_i = \sum_{k=1}^n \tilde{Y}_k$$

4. Dalla trasformata di Fourier si ricavano le funzioni di densità autospettrale e le funzioni di densità spettrale incrociata:

$$S_{y_i y_i}(\omega) = \frac{2 \cdot \Delta t}{n \cdot s} |Y_i|^2$$

$$S_{y_i y_j}(\omega) = \frac{2 \cdot \Delta t}{n \cdot s} |\bar{Y}_i Y_j|$$

5. Si esegue la SVD (*Singular Value Decomposition*) di ciascuna matrice di densità spettrale di potenza in una matrice Λ_k fatta dai *singula value* e in una matrice dei *singular vectors* ψ_k :

$$S_y(\omega_k) = \psi_k \Lambda_k \psi_k^H$$

dove

$$- \Lambda_k = \begin{bmatrix} S_1 & & \\ & \dots & \\ & & S_m \end{bmatrix}$$

$$- \psi_k = \begin{bmatrix} u_{11} & \dots & u_{1m} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ u_{m1} & \dots & u_{mm} \end{bmatrix}$$

6. Dalla rappresentazione grafica dello spettro dei valori singolari è possibile individuare i picchi cui corrispondono i modi da identificare (fig. 7.12):

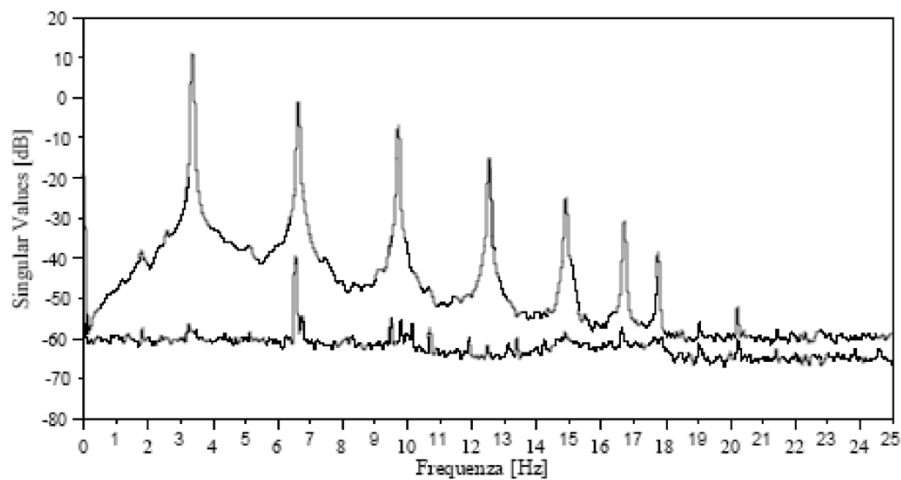


Fig. 7.12 – Valori singolari di un set di dati [Agnifili, 2002]

Il metodo FDD è stato implementato da Brincker⁸ nel 2001 con il metodo EFDD (*Enhanced Frequency Domain Decomposition*). Sostanzialmente il primo passo del metodo EDFF è lo stesso di quello FDD ma la stima dei valori delle frequenze e dei coefficienti di smorzamento sono calcolati attraverso l'applicazione della funzione inversa FTT di ogni funzione di densità spettrale per ogni modo vibrazionale. La funzione risposta di auto-correlazione ottenuta è ora una tipica risposta di un sistema ad un singolo grado di libertà con una risposta dinamica in vibrazioni libere (figura 7.13). L'intersezione con l'asse delle ascisse fornisce le frequenze

⁸ Brincker et al. 2001

naturali per ogni sistema e i coefficienti di smorzamento vengono calcolati attraverso decrementi logaritmici.

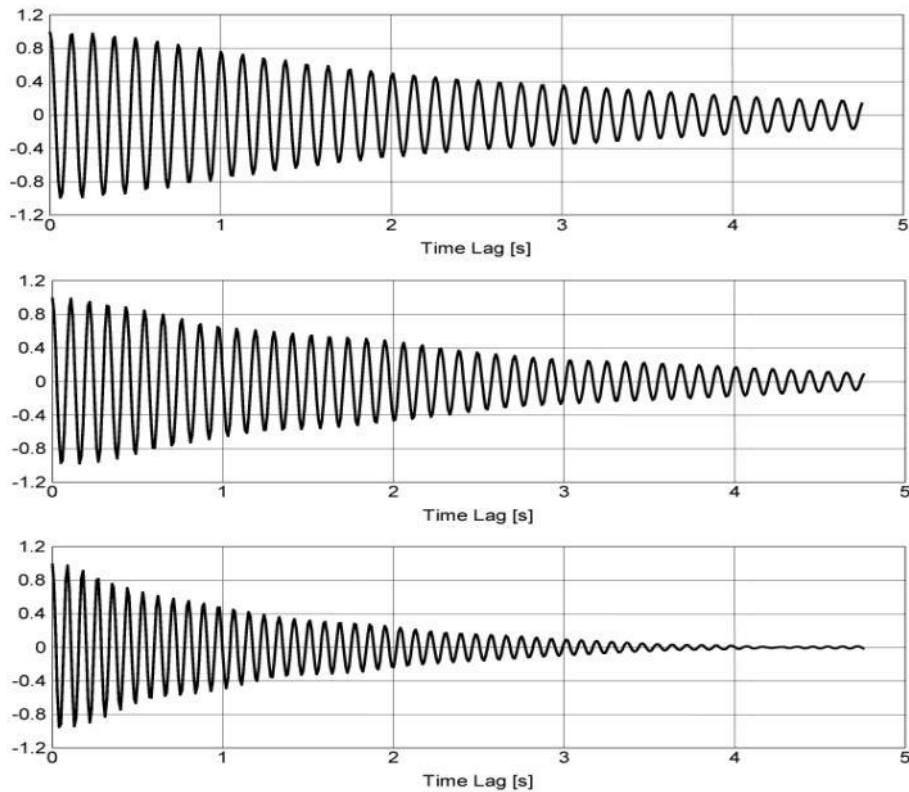


Fig. 7.13 – Funzione di auto-correlazione di un sistema ad un singolo grado di libertà ottenuta col metodo EFDD per i primi tre picchi

Come sopra descritto, i metodi *output-only* devono avere la possibilità di separare i picchi delle funzioni di densità spettrale delle frequenze di risonanza da altri picchi che risultano da fonti indesiderate. Per svolgere questa selezione dei picchi strutturali si usa la funzione scalare di coerenza tra la risposta di due punti misurati, y_i e y_j . I valori della funzione di coerenza $\gamma^2(\omega)$ valgono:

$$\gamma_{i,j}^2(\omega) = \frac{|\widehat{S_{y(i,j)}}(\omega)|^2}{\widehat{S_{y(i,j)}}(\omega)\widehat{S_{(i,j)}}(\omega)}$$

Variano da zero ad uno e indicano, nel dominio delle frequenze, la linearità tra i due segnali misurati e la presenza di modi globali. I valori vicini ad uno indicano una forte relazione tra i segnali. Comunque, per le frequenze di risonanza risultanti da modi locali o da frequenze vibrazionali ambientali che non riescono a mobilitare un modo globale, la funzione di coerenza risulta avere valori bassi⁹. Nella figura 7.14 b) sono evidenziati i valori di coerenza per le densità spettrali tra due punti di riferimento in tutti i set di dati raccolti. Si osserva,

⁹ Paultre et al. 1995

quando il valore della coerenza è vicino ad uno, un picco evidente nel primo valore singolare che appare nella figura 7.14 a).

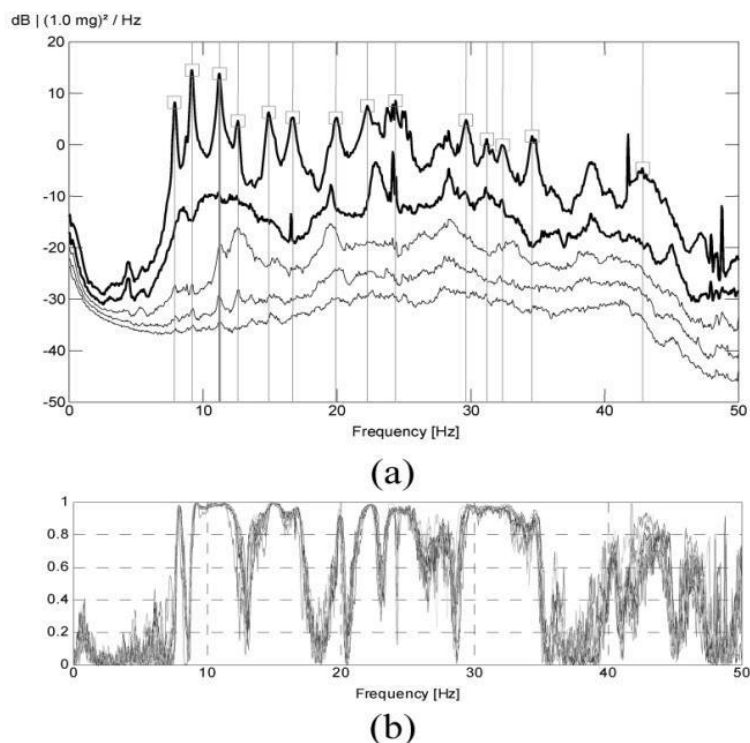


Fig. 7.14 – Metodi FDD: a) decomposizione del singolo valore (SVD) del metodo FDD; b) coerenza della densità spettrale tra trasduttori collegati per tutte le serie di dati

L'implementazione del metodo FDD è semplice. Tuttavia, questo metodo valuta le frequenze di risonanza con valori di frequenze discrete di limitata precisione a causa del fatto che il metodo si basa sull'analisi del segnale attraverso la funzione FFT. In particolare si trovano difficoltà nella stima delle frequenze che presentano valori vicini alle frequenze di risonanza. Per aumentare la risoluzione delle frequenze, devono essere usate serie temporali molto lunghe per l'analisi modale. In alternativa si usa il metodo EFDD, il quale supera questi problemi, poiché utilizza la funzione inversa FFT per la valutazione delle frequenze di risonanza e dei coefficienti di smorzamento.

I metodi FDD ed EFDD sono usati in software per l'identificazione modale come *ARTEMIS Extractor 4.0*.

7.8.2 p-LSCF

Il *poly-reference Least Squares Complex Frequency Domain* (p-LSCF), conosciuto anche con il nome *PolyMAX* (LMS), è una tecnica parametrica sviluppata nel dominio delle frequenze, inizialmente sviluppata tra i metodi input-output per eseguire l'identificazione dei parametri modali dalle FRF.

Tuttavia, per un sistema eccitato da rumore bianco, ci sono alcune delle somiglianze tra la decomposizione modale della FRF e di metà spettro. Perciò tale tecnica è stata esportata anche nel campo dell'identificazione *output-only* da Peeters & Van der Auweraer nel 2005.

Il metodo LMS *PolyMAX* utilizza la FRF come dato di partenza. Come solitamente avviene per i metodi nel dominio del tempo, esso richiede delle risposte impulsive come dati primari (ottenute con la trasformata inversa di Fourier della FRF). Nel metodo *poly-reference LSCF*, la *right matrixfraction* si assume rappresenti la FRF misurata:

$$[H(\omega)] = \sum_{r=0}^p z^r [\beta_r] \left(\sum_{r=0}^p z^r [\alpha_r] \right) \quad (7.15)$$

dove $[H(\omega)]$ è la matrice contenente la FRF tra tutti gli m input e gli l output; $[\beta_r]$ è il numeratore della matrice dei coefficienti polinomiali; $[\alpha_r]$ è il denominatore della matrice dei coefficienti polinomiali e p è l'ordine del modello.

Un modello nel dominio z , ad esempio un modello nel dominio della frequenza derivato da uno a tempo discreto, è utilizzato nell'equazione, tramite:

$$z = e^{j\omega\Delta t}$$

dove Δt è il periodo di campionamento.

L'equazione 7.15 può essere scritta per tutti i valori dell'asse delle frequenze della FRF. I coefficienti polinomiali ignoti $[\beta_r]$, $[\alpha_r]$ sono quindi trovati come soluzione ai minimi quadrati di questa equazione (dopo la linearizzazione). Una volta che i coefficienti del denominatore $[\alpha_r]$ sono determinati, i poli e i fattori di partecipazione modale vengono calcolati come autovalori e autovettori della matrice guida:

$$\begin{pmatrix} 0 & I & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & 0 & I \\ -[\alpha_0^T] & -[\alpha_1^T] & \dots & -[\alpha_{p-2}^T] & -[\alpha_{p-1}^T] \end{pmatrix} \cdot V = V\Lambda$$

I fattori di partecipazione modale sono le ultime m righe di V ; la matrice Λ contiene i poli $e^{-\lambda_i \Delta t}$ sulla diagonale. Essi sono connessi alle frequenze ω_i (rad/s) e ai rapporti di smorzamento ξ_i come segue:

$$\lambda_i, \lambda_i^* = -\xi_i \omega_i \pm \sqrt{1 - \xi_i^2} \omega_i$$

Il segno * denota il coniugato complesso.

Questa procedura permette di costruire un diagramma di stabilizzazione per aumentare l'ordine del modello e usare criteri di stabilità per le frequenze, rapporti di smorzamento e fattori di partecipazione modale.

Teoricamente, le forme modali possono derivare dai coefficienti $[\alpha_r]$, $[\beta_r]$ ma possono essere trovati anche considerando il cosiddetto *pole-residue model*:

$$[H(\omega)] = \sum_{j=1}^n \frac{\{v_i\} \langle l_i^T \rangle}{j\omega - \lambda_i} + \frac{\{v_i^*\} \langle l_i^H \rangle}{j\omega - \lambda_i^*} - \frac{[LR]}{\omega^2} + [UR]$$

dove n è il numero dei modi; H denota il complesso coniugato trasposto della matrice; $\{v_i\}$ sono le forme modali; $\langle l_i^T \rangle$ sono i fattori di partecipazione modale e λ_i sono i poli. $[LR]$ e $[UR]$ sono rispettivamente il residuo più basso e il più alto che modella l'influenza dei modi fuori banda rispetto alla banda di frequenza considerata. L'interpretazione del diagramma di stabilizzazione indica una serie di poli λ_i a fattori di partecipazione corrispondenti $\langle l_i^T \rangle$. Poiché le uniche incognite sono le forme modali $\{v_i\}$ e i residui inferiore e superiore, possono essere ottenute risolvendo l'equazione in modo lineare con il metodo dei minimi quadrati. Questo *step* è chiamato *Least Squares Frequency Domain (LSFD)*.

L'algoritmo p-LSCF è considerato uno dei più accurati nel campo delle tecniche OMA nel dominio delle frequenze. Il diagramma di stabilizzazione ottenuto è estremamente chiaro e rende molto più agevole la selezione dei poli fisici. Tale metodo è implementato nella *Toolbox di Matlab (MACEC 3.2)*.

7.8.3 Pianificazione del test output-only

Uno dei principali aspetti che devono essere progettati nell'applicazione delle tecniche di identificazione *output-only* è la definizione di un test di pianificazione il quale è idealmente composto da sei fasi:

1. La prima fase comprende l'analisi modale del modello agli elementi finiti per avere un'idea preliminare sui valori delle frequenze e sulle forme modali della struttura. Generalmente, per costruzioni in mattoni, deve essere costruito il modello e devono essere pianificati test meccanici per caratterizzare le proprietà meccaniche;
2. La seconda fase fa riferimento alla definizione del numero di sensori e alla loro posizione, in conformità alle necessità del test di identificazione dinamica e alla preliminare analisi dinamica svolta sul modello FE. Il numero di punti che dovranno essere misurati, in generale, è maggiore del numero di sensori disponibili. In questo caso, uno o più punti dovrebbero essere scelti come sensori fissi, mentre gli altri sensori vengono mossi attorno alla struttura.

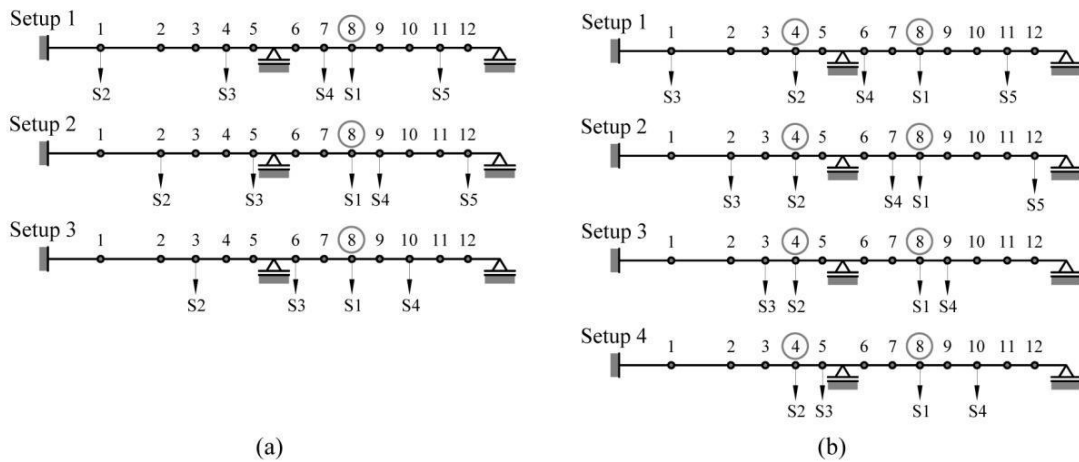


Fig. 7.15 – Esempio di spostamento dei sensori: a) tre setup con un sensore di riferimento; b) quattro setup con due sensori di riferimento

Va sottolineato che almeno un punto di riferimento dovrebbe coincidere con un nodo delle forme modali strutturali, altrimenti si ottengono risultati non accurati. Ogni singolo *step* di misura viene chiamato *setup*, comunemente per semplici identificazioni dinamiche si possono avere anche dieci o più *setup*. Ogni persona coinvolta nel test di identificazione deve essere informata sulle procedure in base alle quali vien svolto il test.

3. Nella terza fase, prima delle misurazioni da effettuare per ciascun *setup*, è importante procedere prima con alcune misure del segnale localizzate per monitorare il livello del segnale stesso, per caratterizzare il rapporto segnale/rumore e per costruirsi un’idea sulle frequenze di risonanza coinvolte. Questo compito può essere svolto applicando la FFT delle risposte misurate in alcuni punti chiave, ad esempio nei punti di riferimento. Dopo questa analisi dinamica preliminare, si potrebbero rendere necessario alcuni cambiamenti nella pianificazione del test al fine di ottenere risultati accurati, per esempio si potrebbero installare diversi tipi di sensori oppure cambiare la posizione a quelli già presenti, oppure potrebbe manifestarsi la necessità di aumentare la sollecitazione per incrementare il rapporto segnale/rumore, in altri casi, serve modificare la frequenza di campionamento delle misurazioni. Se il rapporto segnale/rumore risulta essere troppo basso, si possono applicare fonti di eccitazione casuali cosicché il risultato non soffra di particolari influenze¹⁰.
4. La quarta fase consiste nell’impostazione sei setup di misurazione. Per quel che riguarda la durata, deve essere registrato un elevato numero di punti per avere una buon risoluzione in frequenza. Una prima regola empirica (Rodrigues, 2004) è quella

¹⁰ Peetes, 2000

di considerare 2000 volte il più alto periodo di interesse (ovvero la frequenza naturale minore), per esempio per struttura con frequenze naturali di 2 Hz, la durata totale del campionamento di aggira attorno ai 17 minuti. Osservazioni sull'esperienza pratica e in caso di strutture flessibili (Caetano, 2000), consigliano durate delle misurazioni di 30 o 40 volte maggiori il periodo della struttura, la durata del campionamento, dunque, varia dai 2 agli 11 minuti. Per concludere, la regola empirica di usare un campionamento 1000 volte superiore il periodo (con una durata minima di 10 minuto per ogni *setup*) può essere usata per ottenere risultati accurati se la struttura è ben sollecitata, ma la durata deve essere convenientemente definita considerando il numero di sensori disponibili, il numero di punti di misurazione e la disponibilità di tempo per l'esecuzione del test.

5. La quinta fase è un controllo preliminare sulla qualità dei dati ottenuti. Nella fase di configurazione dei setup e tra ogni setup è importante controllare il segnale misurato per tutti i sensori, per evitare la perdita di dati o un segnale di qualità bassa. Prima di smobilitare la strumentazione per il test dinamico, sarebbe opportuno eseguire una analisi modale preliminare per essere sicuri che i risultati sperimentali acquisiti abbiano una qualità sufficiente al fine di ottenere una buona identificazione dinamica della struttura.
6. Nella sesta fase, è buona pratica studiare il comportamento dinamico della struttura usando almeno due o più metodo di identificazione. Questo accorgimento fornisce la possibilità di controllare la veridicità dei risultati, e può costituire una buona base di partenza per proseguire in seguito con l'applicazione di ulteriori procedure più oggettive.

7.9 Model updating

I dati raccolti durante il monitoraggio, sia statico sia dinamico, possono essere utilizzati per calibrare ed aggiornare il modello numerico agli elementi finiti rappresentativo della struttura. Il *model updating* è quel processo di quantificazione della differenze tra i risultati di un'analisi su un modello agli elementi finiti e i dati sulla risposta misurati sulla struttura, per poi modificare i valori di input dei parametri inseriti nel modello al fine di ottenere un modello valido. Durante questo processo, i dati sperimentali vengono comparati con i risultati delle predizioni numeriche ottenute dal modello. La risposta dinamica viene mostrata sotto forma di spostamenti, danni e possibili meccanismi di collasso, poi viene comparata con i risultati numerici e il modello viene implementato fino ad ottenere risultati soddisfacenti. Gli

aggiornamenti del modello riguardano le proprietà dei materiali, la geometria o la morfologia degli elementi strutturali, la modellazione della connessioni, l'influenza del terreno, le possibili interazioni con edifici adiacenti e la distribuzione del danno (in particolare l'influenza di grosse fessure locali o separazioni).

La validazione è il processo di determinazione del grado al quale un modello è un'accurata rappresentazione del mondo reale dal punto di vista di un previsto uso del modello.

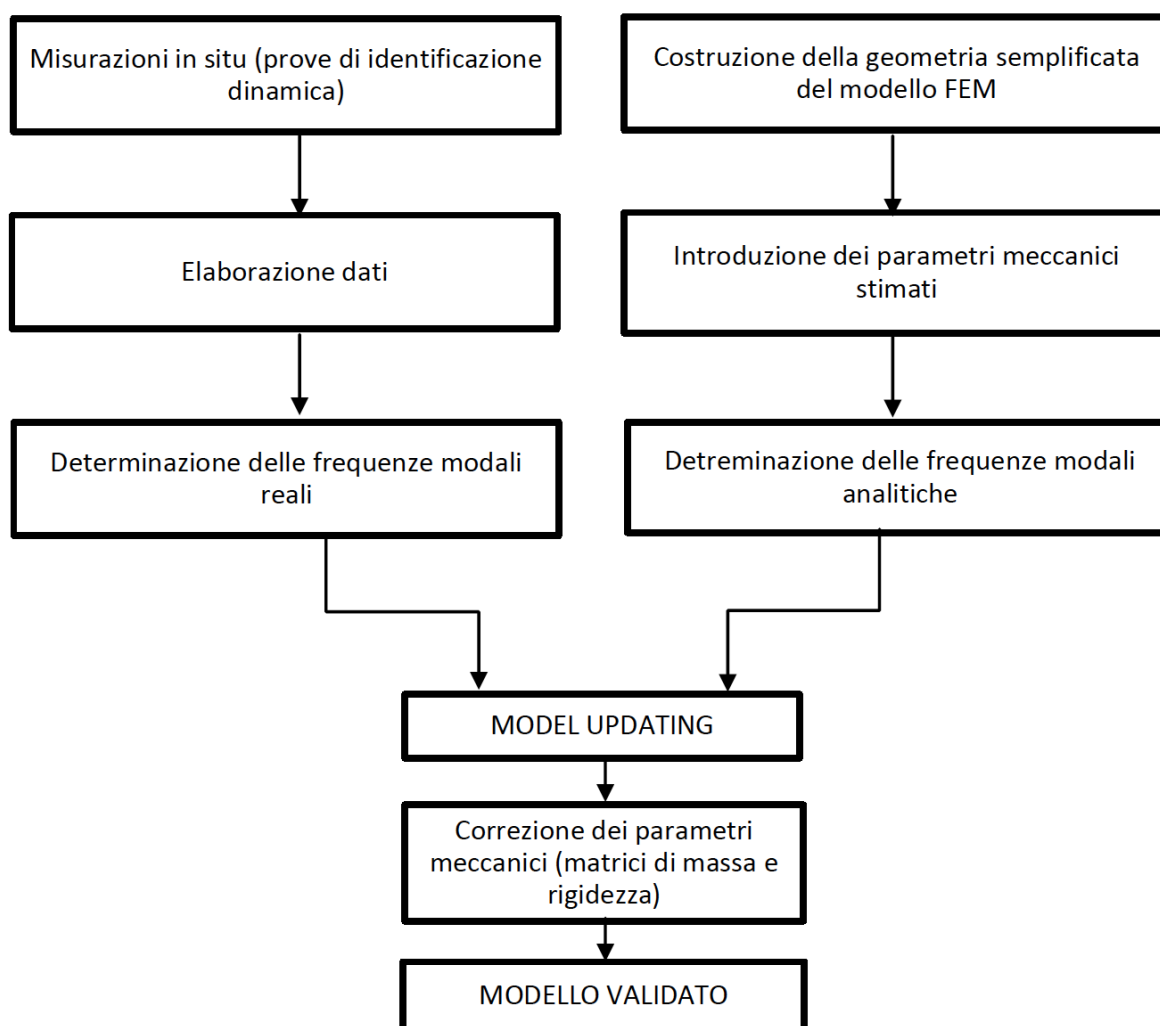


Fig. 7.16 – Procedura adottata durante la correlazione tra test dinamici e il modello FEM

7.10 Conclusioni

Nel capitolo è stata effettuata un'analisi dello stato dell'arte nel campo dell'identificazione dinamica, mostrandone l'evoluzione dai primi utilizzi negli anni settanta fino ai giorni nostri. Dopodiché si è passati a classificare le principali tecniche utilizzate nell'identificazione dinamica, le quali si suddividono principalmente in due gruppi: tecniche *input-output* (nel qual caso si parlerà di Analisi Dinamica Sperimentale, EMA) oppure tecniche *output-only* (Analisi Dinamica Modale). La distinzione risiede nella conoscenza della sollecitazione alla

quale è sottoposta la struttura durante il test, infatti, nell'EMA tale sollecitazione è nota, mentre, nell'OMA la sollecitazione è sconosciuta.

Il processamento del segnale dovrà tenere in considerazione la presenza di errori che nascono dalla conversione dello stesso da analogico a digitale. Tali errori sono rappresentati da: *aliasing* e *leakage* e possono essere risolti con le tecniche del *windowing* e dell'*overlap averaging*.

Per meglio comprendere le tecniche di identificazione dinamica sono stati fatti dei richiami alla dinamica delle strutture per sistemi ad un singolo grado di libertà e per sistemi ad n gradi di libertà. Attraverso tali richiami teorici si sono potuti spiegare concetti quali la trasformata di Fourier (FFT) e la funzione in frequenza di risposta (FRP) utili per meglio comprendere il funzionamento di particolari tecniche di identificazione.

Lo studio delle tecniche di identificazione ha posto l'accento in particolare sulle tecniche FDD ed EFDD, le quali sono utilizzate nel programma *ARTEMIS Extractor 4.0*, utilizzato in seguito per eseguire un'analisi modale delle strutture del Teatro Romano di Verona.

La fase dell'analisi modale di una struttura si conclude con la calibrazione del modello agli elementi finiti che viene creato per studiare l'edificio. Questa fase, denominata *model updating*, permette di fare coincidere, nei limiti del programma di calcolo, il comportamento reale della struttura, esaminato attraverso i test dinamici, con il comportamento derivante dal modello FEM.

IDENTIFICAZIONE DINAMICA

8.1 Introduzione

Nell'ambito della Convenzione tra il Comune di Verona e il Consorzio Padova Ricerche, avente per oggetto indagini sul Teatro Romano di Verona, l'Ing. Daniele Zonta è stato incaricato di gestire una campagna di sperimentazione basate sull'uso di prove dinamiche, su alcune strutture significative del teatro, volte ad identificare il loro comportamento dinamico attraverso l'installazione di accelerometri, posti a differenti livelli.

Le prove si sono svolte tra il 18 e 27 Aprile 2000 e comprendevano prove di vibrazione ambientale (AVT) e prove impulsive (Shock test SHT). Nell'ambito di questo studio si sono analizzate unicamente le prove di tipo AVT, che hanno interessato:

- la coppia di setti murari liberi della zona Est del *Museo* (A3 e A4)
- due dei setti murari liberi della zona Ovest della *Chiesa* (B2 e B3)
- le strutture dell'*edificio scenico*.

Tra le differenti metodologie di indagini non distruttive (NDT) impiegate per la caratterizzazione degli edifici storici in muratura, le indagini dinamiche hanno dimostrato di essere uno strumento particolarmente efficace. Infatti, contrariamente ad altre metodiche di indagine che forniscono dati qualitativi / quantitativi a livello locale, l'indagine dinamica è in grado di fornire dati relativi al comportamento strutturale globale dell'edificio.

I test di identificazione dinamica sono finalizzati alla caratterizzazione della risposta modale della struttura; i risultati che si possono ottenere sono direttamente correlabili a parametri fisici e strutturali della stessa, come la geometria (distribuzione delle masse), la rigidità e le condizioni di vincolo. Grazie ai dati raccolti è possibile fornire un modello numerico affidabile del comportamento meccanico delle strutture ed evidenziare eventuali anomalie

sulla risposta dinamica che possano essere messe in relazione con i problemi di stabilità delle strutture in oggetto.

In questo capitolo sono raccolti i parametri modali estratti dall'identificazione dinamica, eseguita con la tecnica *output-only*. Per l'elaborazione dei dati è stato usato il software *ArteMis Extractor 4.0*, il quale permette di stimare i parametri modali attraverso i metodi EFDD e FDD. I risultati consistono nella definizione delle prime forme modali delle strutture studiate e delle relative frequenze proprie di vibrazione e coefficienti di smorzamento. In seguito tali dati saranno usati per la fase di calibrazione del modello numerico agli elementi finiti, descritta nella tesi '*Vulnerabilità strutturale del Teatro Romano di Verona mediante modellazione analitica e numerica*', di Furlani Silvia. Se ne riportano alcuni risultati all'interno della seguente tesi, a titolo di confronto.

8.2 Equipaggiamento per le prove dinamiche

Le prove dinamiche consistono nella misurazione dell'accelerazione in alcuni punti selezionati della struttura, impiegando degli accelerometri estremamente sensibili connessi ad un'unità di acquisizione dati. Il sistema di acquisizione impiegato per le misure eseguite sulle strutture del Teatro Romano si compone di 14 accelerometri collegati tramite cavo ad un computer e ad una unità di acquisizione dati.

La gestione delle acquisizioni e la loro registrazione viene eseguita da un apposito software sviluppato in ambiente LabVIEW. Il programma esegue automaticamente la conversione del segnale elettrico in formato digitale, e memorizza i segnali registrati nel disco rigido del computer. Lo stesso software consente inoltre:

- la visualizzazione del segnale registrato;
- la configurazione dei diversi canali secondo specifici parametri, eventualmente diversi per ciascun sensore (sensibilità, ecc.);
- il processamento del segnale (FFT, correlazione, ecc.);
- la memorizzazione o il caricamento dei dati acquisiti.

Le prove di identificazione dinamica possono essere applicate in laboratorio, su campioni di muratura in pietra (rinforzata o non rinforzata) testati con prove di compressione monoassiale o di taglio-compressione, al fine di valutarne il danneggiamento. L'obiettivo principale dell'applicazione di queste tecniche in laboratorio è di capire la correlazione tra l'avanzamento del danno e la variazione delle caratteristiche dinamiche, in particolare delle frequenze e degli smorzamenti.

Nel caso studio in esame, invece, le prove sono state eseguite in sito sui setti liberi e sulla zona del proscenio. In questo caso, dunque, le finalità sono molteplici:

- registrazione di una serie di accelerogrammi ed estrazione dei parametri dinamici delle strutture (frequenze naturali, smorzamenti e forme modali) mediante uno specifico programma per il processamento del segnale;
- determinazione dei parametri modali dei singoli elementi strutturali;
- realizzazione e calibrazione dei modelli numerici sulla base dei suddetti parametri.

Da qui è possibile eseguire tutta una serie di analisi, parametriche e strutturali, per valutare rispettivamente l'influenza dei diversi elementi che compongono le strutture, e per definire gli eventuali punti critici in caso di sollecitazioni particolari, come quelle indotte da un evento sismico. Infine, le prove di identificazione dinamica possono essere impiegate per misurare l'influenza di possibili soluzioni di rinforzo sui parametri dinamici delle costruzioni. Il sistema può fornire una valutazione dell'impatto dell'intervento di consolidamento sulla rigidità globale della struttura. L'effetto di operazioni come l'applicazione di materiale fibro-rinforzato, l'iniezione, il pretensionamento, o l'applicazione di dispositivi smorzanti, può essere interpretato attraverso l'influenza che esso ha sulle variabili dinamiche misurate con le prove.

8.3 Prove eseguite in sito

Al fine di ottenere una specifica caratterizzazione dei parametri dinamici della struttura, sono state eseguite sia prove con vibrazione ambientale (AVT, *Ambient Vibration Test*) sia prove impulsive (SHT, *Shock Test*) e, nel caso dell'edificio scenico, sono state misurate le vibrazioni ambientali per la valutazione dell'ammissibilità dei livelli di vibrazione indotta.

Nel caso delle prove di vibrazione ambientale (AVT, sollecitazioni essenzialmente generate dal traffico veicolare e dal vento) lo scopo era quello di individuare i parametri modali di massima (frequenze ed ampiezze modali) su cui calibrare le prove successive, nonché di misurare il livello e lo spettro di frequenze delle vibrazioni indotte dall'ambiente. Le prove consistevano nell'acquisizione di una sequenza di segnali durante alcuni secondi, procedendo poi all'elaborazione dei dati acquisiti. Tale trattamento dei dati consisteva in:

- selezione dei segnali dove vengono scartate le acquisizioni evidentemente spurie o dove sono evidenti sollecitazioni da forzanti non propriamente ambientali;
- frazionamento di ciascuna acquisizione in segnali della durata di alcuni secondi;
- filtraggio digitale passa-alto 0,1 con profilo *Butterworth* di ordine 5;
- autocorrelazione dei segnali;

- calcolo della Densità Spettrale di Potenza (DSP) per ciascun segnale come spettro di *Fourier* dell'autocorrelazione;
- calcolo della media delle DSP.

Nel caso delle prove impulsive (*shock test*, SHT, con forzante corrispondente all'impulso generato da una mazza strumentata), la finalità dei test eseguiti era quella di caratterizzare dinamicamente la struttura in un ampio campo di frequenze (0 - 50 Hz), con l'obiettivo di determinare le Funzioni di Risposta in Frequenza (FRF) per forzanti applicate in più punti significativi. Per ciascuno dei punti di sollecitazione, vengono acquisite 10 *time history*, relativamente al martello e a ciascuno degli accelerometri; l'acquisizione parte su *trigger* impostato sul canale della mazza strumentata.

L'analisi del segnale consisteva in:

- selezione delle acquisizioni per cui sono scartate quelle acquisizioni dove il livello di sollecitazione esce dal *range* elettrico (5V), dove sono evidenti forzanti supplementari (per es. per il rimbalzo del martello) che si presentano altrimenti spurie;
- finestre del canale della forzante con finestra rettangolare attorno all'impulso teorico;
- azzeramento dell'*offset* dei canali della risposta;
- calcolo dello spettro di *Fourier* di tutti i canali;
- calcolo della FRF per ciascuno dei canali di risposta come rapporto fra gli spettri della risposta e della forzante;
- calcolo della FRF come media di quelle calcolate per ciascuna acquisizione.

I sensori sono stati accoppiati alle strutture con la seguente procedura:

- applicazione di una piastrina cilindrica in alluminio alla struttura per mezzo di tasselli espansivi;
- accoppiamento di un cubo in alluminio alla piastrina;
- accoppiamento dei sensori al cubo;
- applicazione dei cavi e fissaggio dei cavi alla struttura vibrante con nastro adesivo.

L'ancoraggio può considerarsi rigido nel campo di frequenze di interesse ($f > 100$ Hz). Il sistema è in accordo con le prescrizioni della UNI ISO 5348.

Nell'ambito di questo studio si analizzano unicamente le prove di tipo AVT. Questo perché le prove effettuate, relative all'anno 2000, risultano molto datate e si ha la sicurezza certa della qualità dei dati e della localizzazione esatta delle prove solo riguardo le *Ambient Vibration*

Test. Per le prove sono stati utilizzati dei trasduttori accelerometrici PCB 393 B12e PCB 393 C.

8.3.1 Posizionamento dei trasduttori

Nella pianta sottostante vengono evidenziate le strutture del teatro oggetto di identificazione dinamica. I setti presi in considerazione sono A3 e A4 della zona *Museo*, B2 e B3 per la zona *Chiesa*, e l'edificio scenico. Il setto B1 è stato preso in considerazione solo per la parte di modellazione FEM e di monitoraggio.

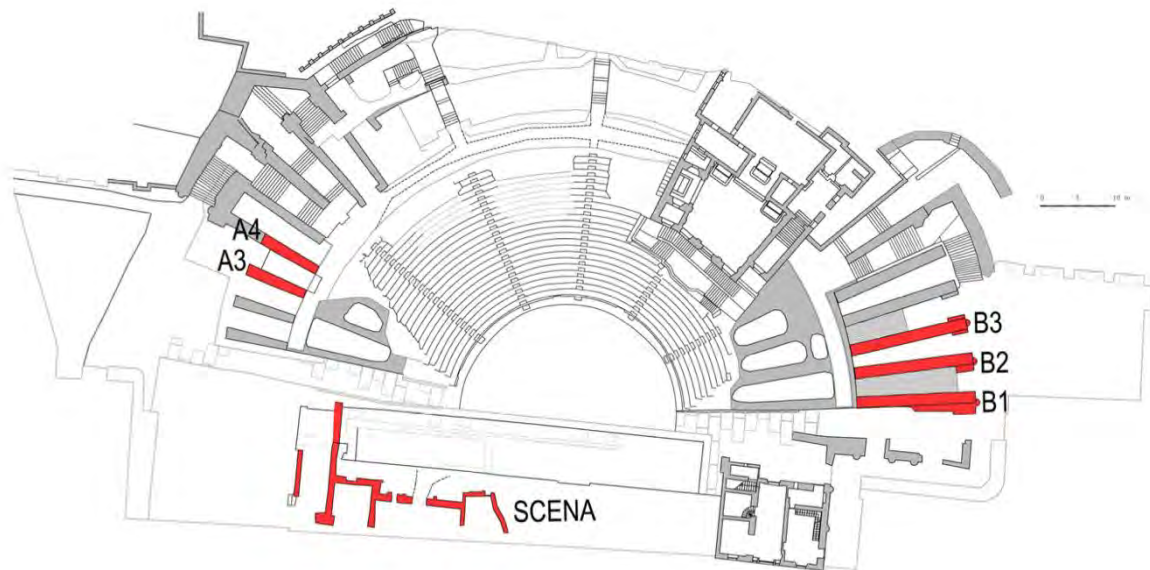


Fig. 8.1 – Pianta con indicazione degli elementi oggetto di studio



Fig. 8.2 – A3, A4 schema rappresentativo della posizione degli accelerometri e della configurazione usata per ArteMis

Nella zona *Museo* (test A) sono stati posizionati in totale 7 accelerometri, con la seguente modalità: canali 1 e 2 sulla sommità del setto a monte in direzione ortogonale al piano del setto, canale 3 in corrispondenza della voltina in direzione ortogonale al piano del setto a monte, canali 4 e 5 sulla sommità del setto a valle in direzione ortogonale al piano del setto, canale 6 in corrispondenza della voltina in direzione ortogonale al piano del setto a valle e infine canale 7 sulla sommità del setto a valle in direzione orizzontale al piano del setto. I setti sono stati sollecitati in prossimità di tutti i punti di misura, eccetto il punto 1.

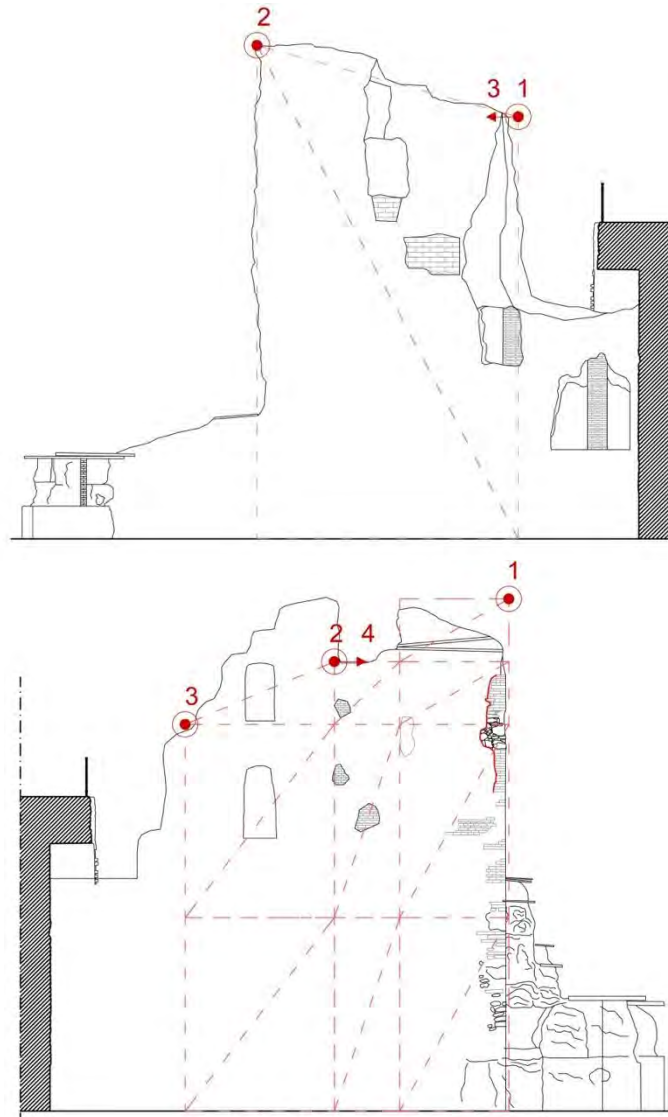


Fig. 8.3 – B2, B3 schema rappresentativo della posizione degli accelerometri e della configurazione isata per Artemis

Nei setti murari della zona *Chiesa* (test B1) sono stati posizionati in totale 3 accelerometri, con la seguente modalità: canali 1 e 2 sulla sommità del setto in direzione ortogonale al piano del setto, canale 3 sulla sommità del setto in direzione orizzontale al piano del setto, con sollecitazione in prossimità di tutti i punti di misura. Nei setti murari della zona est (test B2) sono stati posizionati in totale 3 accelerometri, con la seguente modalità: canali 1 e 2 sulla

sommità del setto in direzione ortogonale al piano del setto, canale 3 sulla sommità del setto in direzione orizzontale al piano del setto, con sollecitazione in prossimità di tutti i punti di misura, ad eccezione del punto 3.

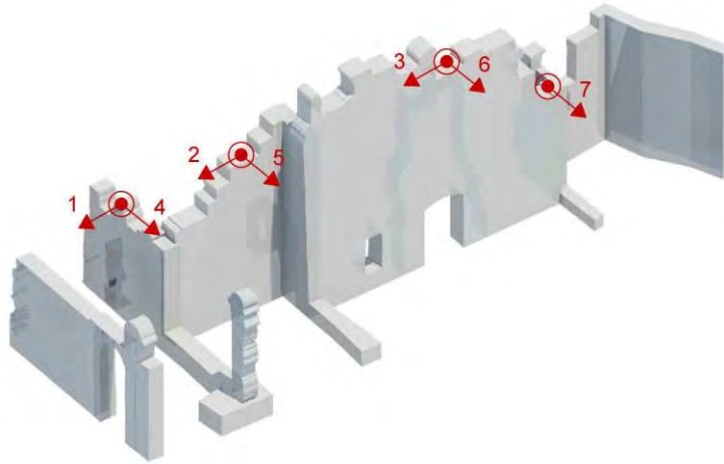


Fig. 8.4 – SCENA schema rappresentativo della posizione degli accelerometri delle prove AVT risalenti all’anno 2000

Nei setti murari del *proscenio* ad ovest (test C) sono state adottate 2 configurazioni accelerometriche: nella prima sono stati posizionati in totale 7 accelerometri, sulla sommità dell’edificio scenico; nella seconda sono state posizionate due terne di accelerometri, una alla base e l’altra in sommità, nella posizione apparentemente più sensibile alle vibrazioni ambientali, in accordo con le indicazioni delle norme UNI 9916 e DIN 4150. Per la sola configurazione 1 sono state eseguite prove forzate nei punti di misura 2, 5,6. I dati ricavati sono ripresi in questa analisi unicamente per effettuare un confronto con le frequenze ricavate dal sistema di monitoraggio. Infatti per l’identificazione dinamica si è preferito usare i dati ricavati dal nuovo monitoraggio installato, utilizzando l’output dei 4 nuovi accelerometri.

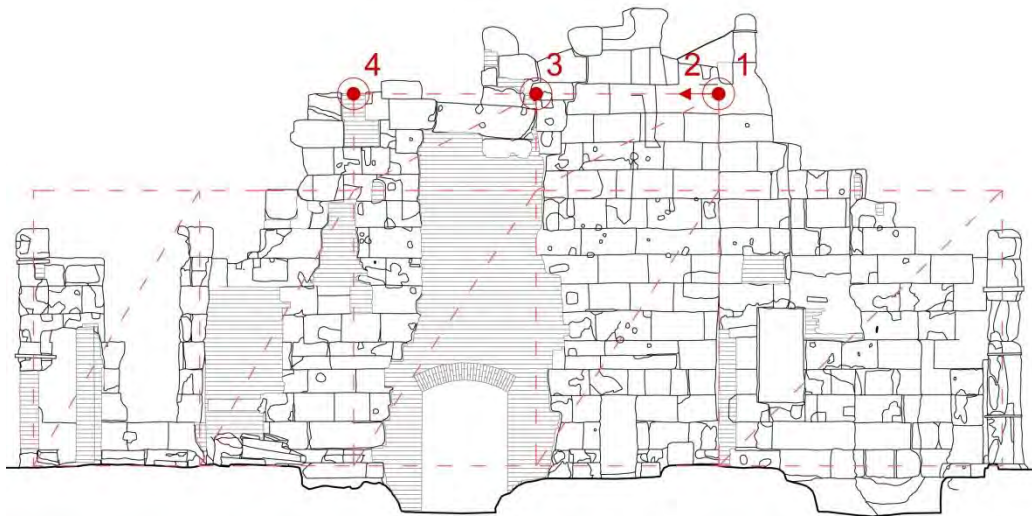


Fig. 8.5 – SCENA schema rappresentativo della posizione degli accelerometri e della configurazione usata per ArteMis

8.4 Analisi modale

Per quanto riguarda l'identificazione dei parametri modali è stata utilizzata la tecnica denominata *output-only*, già descritta nel paragrafo 7.8 che sfrutta le vibrazioni esterne di tipo ambientale, quali ad esempio vento e traffico, alle quali la struttura è costantemente sottoposta. Tali vibrazioni assieme alla risposta strutturale, registrate tramite il sistema di acquisizione elencato precedentemente, sono state successivamente processate attraverso il software *ARTEMIS Extractor 4.0* per la fase denominata *signal processing*. Il software utilizza gli algoritmi *Frequency Domain Decomposition* (FDD) e *Enhanced Frequency Domain Decomposition* (EFDD) per l'estrazione dei parametri modali. Questi algoritmi, già descritti nel paragrafo 7.8.1 derivano da uno sviluppo dell'algoritmo di *Peak Picking* (paragrafo 7.7.2) ovviando al problema di riconoscimento delle forme modali aventi frequenze ravvicinate tra loro. La principale differenza tra l'FDD e l' EFDD consiste nel fatto che quest'ultimo offre una migliore precisione nella stima dei parametri grazie alla procedura denominata *Singular Value Decomposition* (SVD) ed inoltre è in grado di fornire il coefficiente di smorzamento per ogni modo di vibrare.

Di seguito vengono illustrati il funzionamento del programma adottato per l'elaborazione dei dati ed i risultati ottenuti.

Il software *ARTEMIS Extractor 4.0* richiede, come dato iniziale, l'inserimento di un file di testo contenente i dati principali che definiscono la struttura oggetto di studio. Nella procedura di configurazione, questi dati, inseriti a seguito di parole chiave (*keywords*) che vengono riconosciute dal programma, indicano in successione:

1. L'intestazione del file: contenente appunto i dati identificativi del lavoro in oggetto, eventuali note, i nominativo/i del tecnico/i che hanno eseguito l'installazione ed il monitoraggio e i primi due dati necessari per l'elaborazione dei segnali acquisiti e cioè la frequenza di campionamento adottata (SF) e il periodo di campionamento ($T = 1/SF$). Nel nostro caso abbiamo utilizzato valori di SF= 100 Hz e di conseguenza $T=0.01s$.
2. Le caratteristiche geometriche della struttura in esame: partendo dalla definizione di nodi con le relative coordinate spaziali x, y, z che identificano i vertici dei vari piani, seguiti dalla definizione di linee colleganti i nodi e che quindi consentono di fornire l'ordine di successione e collegamenti ed infine devono essere inserite le superfici racchiuse dalle linee (Fig. 8.1-8.2-8.3). Fatto ciò la geometria è completamente definita e lo schema delle strutture viene configurato.

3. Posizionamento degli accelerometri: è necessario dapprima inserire un nominativo relativo al *setup* che si va ad inserire ed il nome del file nel quale sono contenuti i dati registrati dagli accelerometri. Infine, vengono indicati, per ogni accelerometro, il nodo sul quale sono stati installati, le direzioni nelle quali hanno acquisito i dati e la tipologia di dato (ad esempio accelerazione, spostamento, ecc.). In questo modo il programma consente di mantenere una sola configurazione globale anche se si vanno ad analizzare dati provenienti da campionamenti distinti in ordine di tempo. E' quindi necessario variare unicamente il *setup*, se questo in effetti è variato, ed il nome del file contenente i dati che si vogliono far analizzare dal programma.

Nel caso studio in oggetto sono stati analizzati i seguenti file:

- *Setto A3*: sono stati analizzati 15 file di campionamento eseguiti ad intervalli regolari di 1 minuto uno dall'altro, con inizio alle ore 13.59.
- *Setto A4*: sono stati analizzati 15 file di campionamento eseguiti ad intervalli regolari di 1 minuto uno dall'altro, con inizio alle ore 13.59.
- *Setto B2*: sono stati analizzati 10 file di campionamento eseguiti ad intervalli regolari di 1 minuto uno dall'altro, con inizio alle ore 15.08.
- *Setto B3*: sono stati analizzati 10 file di campionamento eseguiti ad intervalli regolari di 1 minuto uno dall'altro, con inizio alle ore 18.40.
- *Scena C*: non sono stati analizzati i 15 file di campionamento delle prove dinamiche avvenute nell'anno 2000, ma è stata fatta l'identificazione dinamica direttamente attraverso i 4 accelerometri installati nel monitoraggio dell'anno 2014. Sono stati analizzati i dati relativi alle domeniche, in modo tale che il segnale fosse disturbato il meno possibile dal traffico veicolare. Vengono riportati i dati dell'identificazione in questo capitolo.

A questo punto il file di configurazione è completo e può essere elaborato ed aperto dal programma, avendo l'unica accortezza di aver inserito il file contenente i dati acquisiti dagli accelerometri nella medesima cartella di destinazione di quello di configurazione.

Si passa quindi alla fase di processazione del segnale. Per fare ciò, il programma offre opzioni per la lettura migliore del segnale come l'inserimento di filtri e modalità per ovviare ai problemi di *aliasing* e *leakage* illustrati nel capitolo precedente. I dati inseriti nel caso in oggetto sono i seguenti:

Setto A3

- ordine di decimazione: 1;
- intervallo e frequenza di campionamento: 0,002 s – 50 Hz;
- ampiezza della finestrazione (windowing): 2048 linee;
- sovrapposizione delle finestre (overlap averaging): 66,67%

Setto A4

- ordine di decimazione: 1;
- intervallo e frequenza di campionamento: 0,002 s – 50 Hz;
- ampiezza della finestrazione (windowing): 2048 linee;
- sovrapposizione delle finestre (overlap averaging): 66,67%

Setto B2

- ordine di decimazione: 1;
- intervallo e frequenza di campionamento: 0,002 s – 50 Hz;
- ampiezza della finestrazione (windowing): 2048 linee;
- sovrapposizione delle finestre (overlap averaging): 66,67%

Setto B3

- ordine di decimazione: 1;
- intervallo e frequenza di campionamento: 0,002 s – 500 Hz;
- ampiezza della finestrazione (windowing): 2048 linee;
- sovrapposizione delle finestre (overlap averaging): 66,67%

Una volta inseriti i dati e processato il segnale è possibile visualizzare il grafico sul quale vengono individuati i picchi relativi alle forme modali, oltre ai relativi parametri dinamici: frequenza e rapporto di smorzamento (solo con EFDD).

Infine, è possibile verificare la corrispondenza tra le forme modali selezionate con i due differenti algoritmi tramite il coefficiente MAC (Modal Assurance Criterion). Quando la correlazione è buona, il coefficiente assume un valore vicino ad 1, viceversa tende ad un valore nullo.

8.5 Risultati delle prove

Di seguito vengono riportati i risultati delle prove. Le tabelle mostrano le forme modali individuate per i setti del teatro, derivanti dell'identificazione dinamica eseguita con il software ARTeMIS Extractor 4.0, implementando sia l'algoritmo EFDD, sia l'algoritmo FDD.

Setto A3

Il setto A3 è stato schematizzato come un elemento a 9 nodi, 15 linee e 8 facce triangolari. I dati processati hanno generato dei grafici con i relativi picchi, che individuano le principali frequenze d’interesse per la struttura e le relative forme modali.

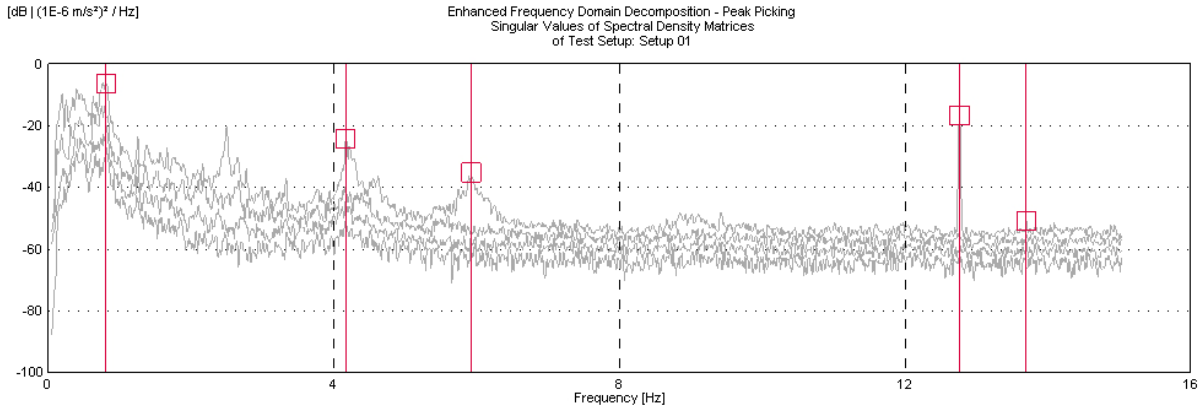


Fig. 8.6 – Frequency Domain Decomposition del setto A3 ottenuta con il software Artemis

La seguente tabella poi raccoglie i dati di media e di deviazione standard delle frequenze ottenute tramite FDD e EFDD, con f_{EXP} che indica la frequenza sperimentale ottenuta facendo la media delle frequenze ricavate dalle misurazioni e con σ che è la deviazione standard. Infine è riportato il confronto tra le forme modali ricavate tramite metodo FDD (orizzontale) e EFDD (verticale) mediante il calcolo del MAC, metodo che fornisce la misura della deviazione rispetto alla perfetta correlazione. La diagonale in verde indica che il rapporto si avvicina all’unità.

MODO	f_{EXP} [Hz]		Deviazione standard		Damping [%]	TIPO
	f_{EXP} FDD	f_{EXP} EFDD	σ FDD	σ EFDD		
1	1,245	1,245	0	0	0	Flessionale
2	4,602	4,59	0,0003	0,036	0,86	Torsionale
3	5,925	5,916	0	0,032	1,85	Nel piano
4	12,765	12,765	0	0,054	0,05	Flessionale
5	13,895	13,895	0,07605	0,076	0	2°Flessionale

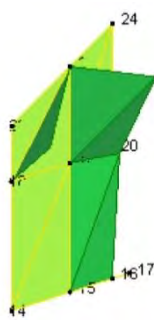
Tabella 8.1 – Frequenze sperimentali ricavate relative al setto A3

Frequenze [Hz]	1,098	2,218	2,762	5,142	6,406
1,100	0,9931	0,03485	0,9254	0,08921	0,6812
2,267	0,03232	0,9976	0,01947	0,8307	0,1715
2,630	0,941	0,007194	0,9968	0,2447	0,8755
5,145	0,09762	0,8654	0,2157	0,9838	0,4884
6,294	0,7749	0,1060	0,9334	0,4924	0,9915

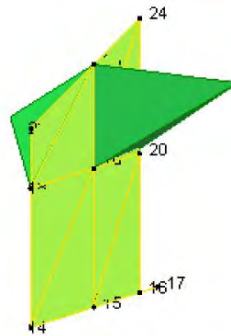
Tabella 8.2 – Frequenze sperimentali ricavate relative al setto A3

L’analisi ha definito cinque forme modali nel *range* di frequenze considerato di interesse per strutture di questo tipo, e cioè tra 0 Hz e 15 Hz. Il primo modo è di tipo flessionale, successivamente troviamo quello torsionale con due componenti indipendenti, in direzione X e poi Y. Il terzo modo è un meccanismo nel piano. Le configurazioni sono illustrate nell’immagine seguente.

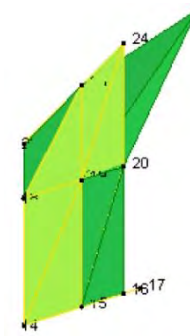
Flessionale $f = 1,245$



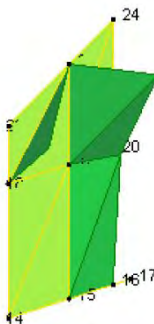
Torsionale $f = 4,6$



Nel piano $f = 5,925$



Flessionale $f = 12,765$



Flessionale $f = 13,895$

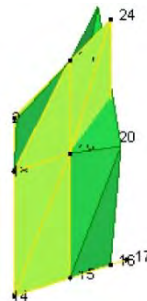


Fig. 8.7 – Setto A3 frequenze modali ricavate da Artemis

Setto A4

Il setto A4 è stato schematizzato come una parete a 11 nodi, 20 linee e 10 facce triangolari. L'individuazione dei picchi non è stata immediata; infatti non si sono colte diverse forme modali, come quella nel piano e la seconda flessionale.

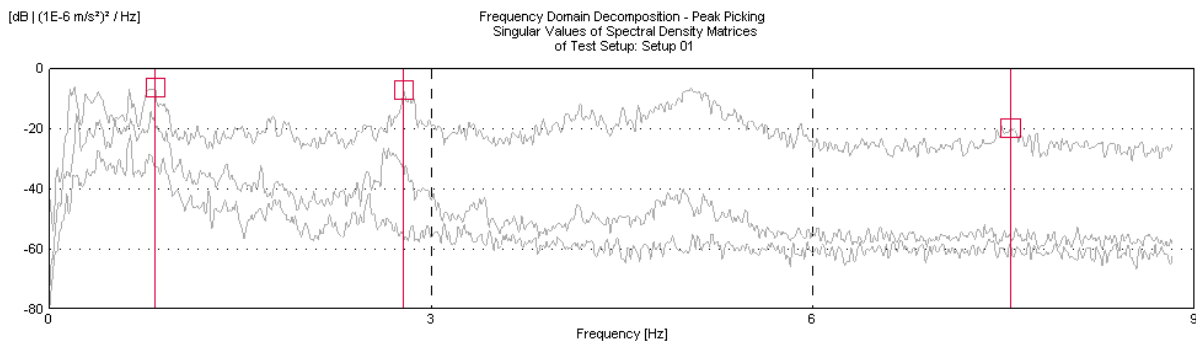


Fig. 8.8 – Frequency Domain Decomposition del setto A4 ottenuta con il software Artemis

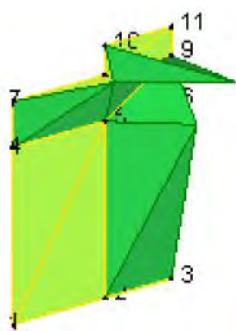
La seguente tabella poi raccoglie i dati di media e di deviazione standard delle frequenze ottenute tramite FDD e EFDD, con f_{EXP} che indica la frequenza sperimentale ottenuta facendo la media delle frequenze ricavate dalle misurazioni e con σ che è la deviazione standard.

MODO	f_{EXP} [Hz]		Deviazione standard		Damping [%]	TIPO
	f_{EXP} FDD	f_{EXP} EFDD	σ FDD	σ EFDD		
1	1,587	1,546	0,03	0,01	4,9	Flessionale
2	2,808	2,894	0,002	0,06	6,89	Torsionale
3	8,301	8,244	0,07	0,008	1,05	Flessionale

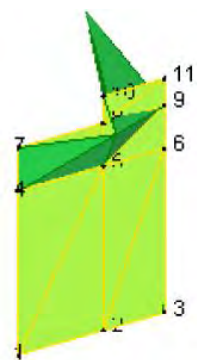
Tabella 8.3 – Frequenze sperimentali ricavate relative al setto A4

L'analisi ha definito tre forme modali nel *range* di frequenze considerato di interesse per strutture di questo tipo, e cioè tra 0 Hz e 15 Hz. Il primo modo è di tipo flessionale, successivamente troviamo quello torsionale con due componenti indipendenti, in direzione X e poi Y. Il terzo modo è un altro flessionale. Le configurazioni sono illustrate nell'immagine seguente.

Flessionale $f = 1,587$



Torsionale $f = 2,808$



Flessionale $f = 8,301$

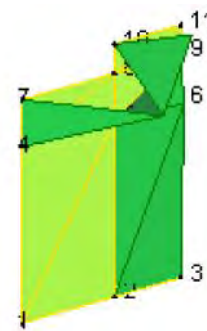


Fig. 8.9 – Setto A4 frequenze modali ricavate da Artemis

Setto B2

Il setto B2 disponeva di 4 misurazioni relative a 3 accelerometri.

La struttura è stata schematizzata con un piano a 4 nodi, 5 linee e 2 facce triangolari. I dati processati hanno generato dei grafici con i relativi picchi, che individuano le principali frequenze d'interesse per la struttura e le relative forme modali.

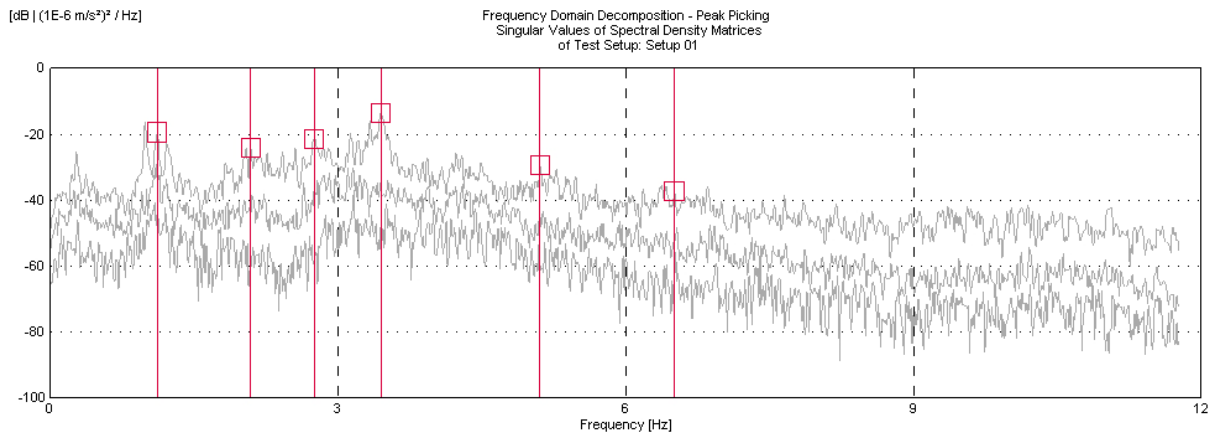


Fig. 8.10 – Frequency Domain Decomposition del setto B2 ottenuta con il software Artemis

La seguente tabella poi raccoglie i dati di media e di deviazione standard delle frequenze ottenute tramite FDD e EFDD, con f_{EXP} che indica la frequenza sperimentale ottenuta facendo la media delle frequenze ricavate dalle misurazioni e con σ che è la deviazione standard. Infine è riportato il confronto tra le forme modali ricavate tramite metodo FDD (orizzontale) e EFDD (verticale) mediante il calcolo del MAC, metodo che fornisce la misura della deviazione rispetto alla perfetta correlazione. La diagonale in verde indica che il rapporto si avvicina all'unità.

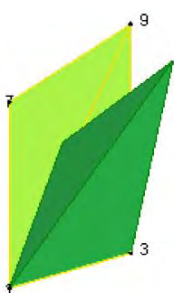
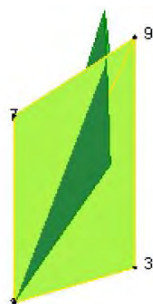
MODO	f_{EXP} [Hz]		Deviazione standard		Damping [%]	TIPO
	f_{EXP} FDD	f_{EXP} EFDD	σ FDD	σ EFDD		
1	1,098	1,100	0,0003	0,00018	0,88	Flessionale
2	2,218	2,267	0,3418	0,2852	3,06	Torsionale
3	2,762	2,630	0,0078	0,1992	1,17	Flessionale
4	5,142	5,145	0,0056	0,0050	0,83	Torsionale
5	6,406	6,294	0,3111	0,2099	0,43	Flessionale

Tabella 8.4 – Frequenze sperimentali ricavate relative al setto B2

Frequenze [Hz]	6,294	2,218	2,762	5,142	6,406
1,100	0,9931	0,03485	0,9254	0,08921	0,6812
2,267	0,03232	0,9976	0,01947	0,8307	0,1715
2,630	0,941	0,007194	0,9968	0,2447	0,8755
5,145	0,09762	0,8654	0,2157	0,9838	0,4884
6,294	0,7749	0,1060	0,9334	0,4924	0,9915

Tabella 8.5 – MAC di confronto tra il metodo FDD e EFDD

L'analisi ha definito cinque forme modali nel range di frequenze considerato di interesse per strutture di questo tipo, e cioè tra 0 Hz e 15 Hz. Il primo modo è di tipo flessionale, successivamente troviamo quello torsionale con due componenti indipendenti, in direzione X e poi Y. Il terzo modo è un altro flessionale. Le configurazioni sono illustrate nell'immagine seguente.

 Flessionale $f = 1,098$

 Torsionale $f = 2,218$

 Flessionale $f = 2,762$

 Torsionale $f = 5,142$

 Flessionale $f = 6,406$


Fig. 8.11 – Setto B2 frequenze modali ricavate da Artemis

Setto B3

Il setto B3 è stato schematizzato in base al posizionamento degli accelerometri come un piano comprendente 17 nodi, 16, linee e 19 facce triangolari.

I dati processati hanno generato dei grafici con i relativi picchi, che individuano le principali frequenze d'interesse per la struttura e le corrispondenti forme modali.

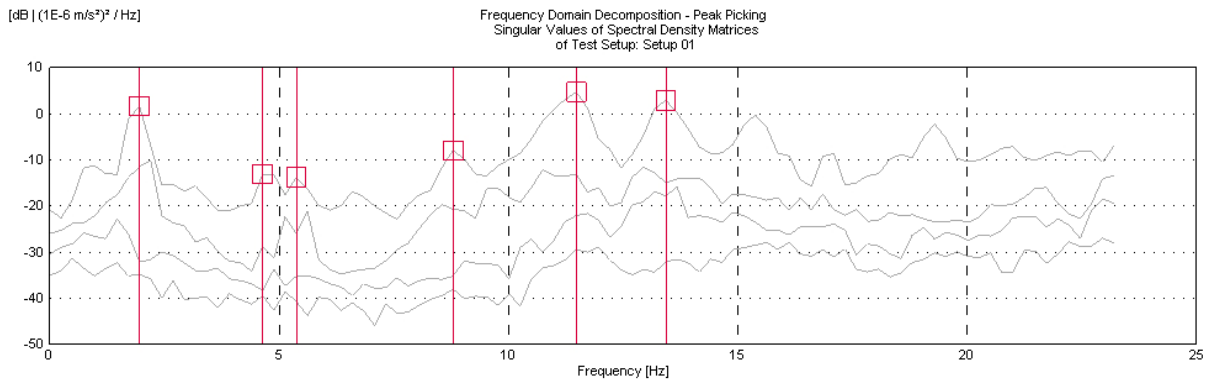


Fig. 8.12 – Frequency Domain Decomposition del setto B3 ottenuta con il software Artemis

La seguente tabella poi raccoglie i dati di media e di deviazione standard delle frequenze ottenute tramite FDD e EFDD, con f_{EXP} che indica la frequenza sperimentale ottenuta facendo la media delle frequenze ricavate dalle misurazioni e con σ che è la deviazione standard. Infine è riportato il confronto tra le forme modali ricavate tramite metodo FDD (orizzontale) e EFDD (verticale) mediante il calcolo del MAC, metodo che fornisce la misura della deviazione rispetto alla perfetta correlazione. La diagonale in verde indica che il rapporto si avvicina all'unità.

MODO	f_{EXP} [Hz]		Deviazione standard		Damping [%]	TIPO
	f_{EXP} FDD	f_{EXP} EFDD	σ FDD	σ EFDD		
1	1,953	1,918	0	0,0242	8,2	Flessionale
2	4,096	3,893	0,607	0,546	2,4	Nel piano
3	5,344	5,311	0,1907	0,385	2,7	Torsionale
4	8,789	8,823	0	0,059	2,2	Flessionale
5	11,392	11,307	0,345	0,236	2,8	Nel piano
6	13,374	13,331	0,110	0,117	1,9	2°Flessionale

Tabella 8.6 – Frequenze sperimentali ricavate relative al setto B3

Frequenze [Hz]	1,953	4,096	5,344	8,789	11,392	13,374
1,918	0,859	0,09851	0,02382	0,8752	0,002837	0,1402
3,893	0,001464	0,8807	0,03935	0,01715	0,9591	0,00274
5,311	0,02416	0,105	0,9961	0,2238	0,04193	0,02035
8,823	0,8829	0,2656	0,1465	0,895	0,03759	0,05058
11,307	0,003693	0,8525	0,05429	0,01039	0,9984	0,004837
13,331	0,1392	0,008747	0,02759	0,06037	0,00225	0,9945

Tabella 8.7 – MAC di confronto tra il metodo FDD e EFDD

L’analisi ha definito sei forme modali nel range di frequenze considerato di interesse per strutture di questo tipo, e cioè tra 0 Hz e 15 Hz. Il primo modo è di tipo flessionale, successivamente il meccanismo nel piano. Il terzo modo è un torsionale con due componenti indipendenti, in direzione X e poi Y. Le configurazioni sono illustrate nell’immagine seguente.

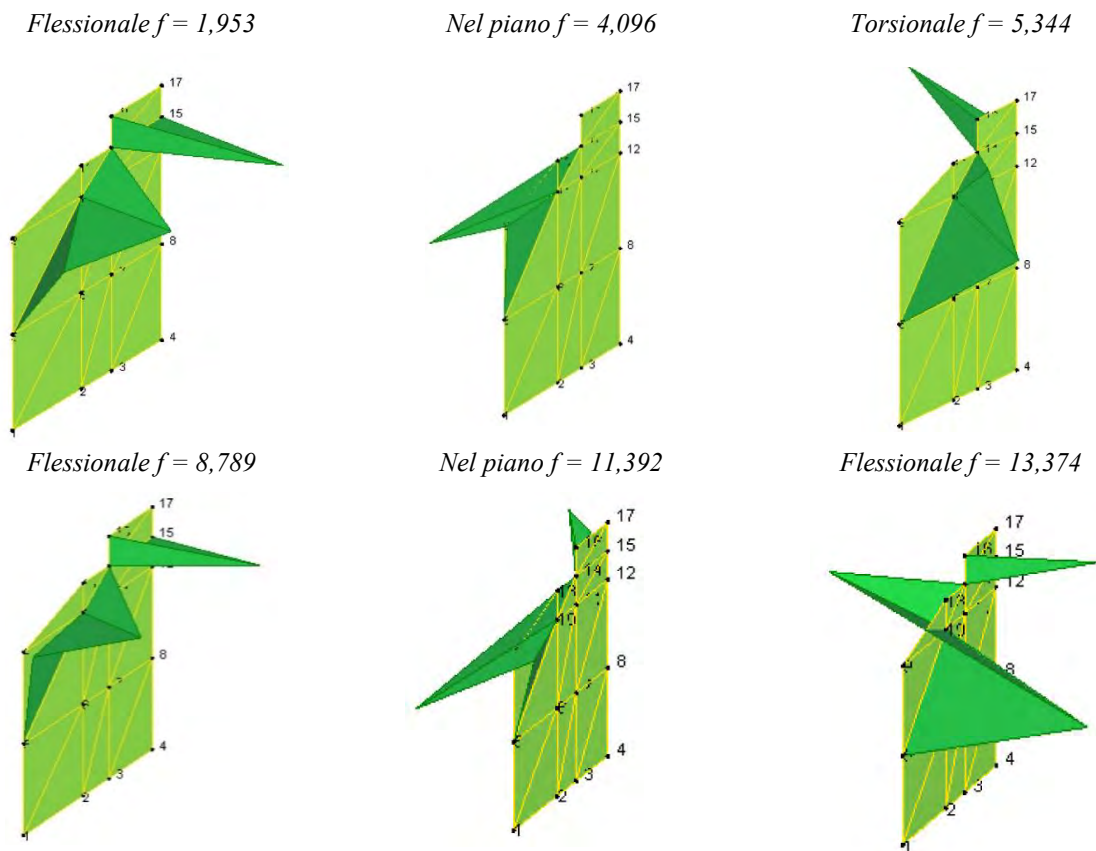


Fig. 8.13 – Setto B3 frequenze modali ricavate da Artemis

Scena

Per l'identificazione dinamica della scena si sono considerati gli output dei 4 accelerometri del nuovo sistema di monitoraggio. L'edificio scenico è stato schematizzato come un elemento a 26 nodi, 51 linee e 26 facce triangolari.

La seguente tabella poi raccoglie i dati di media e di deviazione standard delle frequenze ottenute tramite FDD e EFDD, con f_{EXP} che indica la frequenza sperimentale ottenuta facendo la media delle frequenze ricavate dalle misurazioni e con σ che è la deviazione standard. Infine è riportato il confronto tra le forme modali ricavate tramite metodo FDD (orizzontale) e EFDD (verticale) mediante il calcolo del MAC, metodo che fornisce la misura della deviazione rispetto alla perfetta correlazione. La diagonale in verde indica che il rapporto si avvicina all'unità.

MODO	f_{EXP} [Hz]		Deviazione standard		Damping [%]	TIPO
	f_{EXP} FDD	f_{EXP} EFDD	σ FDD	σ EFDD		
1	3,456	3,453	0,0413	0,038	1,017	<i>Flessionale</i>
2	6,005	6,008	0,060	0,057	1,216	<i>Torsionale</i>
3	8,495	8,657	0,117	0,270	2,639	<i>n.r.</i>
4	10,513	10,490	0,278	0,391	3,194	<i>n.r.</i>
5	11,502	11,567	0,447	0,537	0,89	<i>n.r.</i>
6	13,3	13,308	0,281	0,265	1,24	<i>Nel piano</i>

Tabella 8.8 – Frequenze sperimentali ricavate relative alla Scena

Frequenze [Hz]	3,456	6,005	8,495	10,513	11,502	13,3
3,453	0,9999	0,2636	0,01039	0,5734	0,4169	0,176
6,008	0,2685	0,9992	0,1198	0,6962	0,4535	0,6874
8,657	0,01327	0,1169	0,9996	0,3342	0,5418	0,427
10,490	0,623	0,7507	0,25	0,9861	0,8018	0,6928
11,567	0,1706	0,2671	0,8184	0,6826	0,8406	0,5862
13,308	0,1224	0,5591	0,5206	0,5977	0,6041	0,9729

Tabella 8.9 – MAC di confronto tra il metodo FDD e EFDD

L'analisi ha definito sei forme modali nel *range* di frequenze considerato di interesse per strutture di questo tipo, e cioè tra 0 Hz e 15 Hz. Il primo modo è di tipo flessionale, successivamente troviamo quello torsionale con due componenti indipendenti, in direzione X e poi Y. Per i modi successivi non è stata possibile una chiara identificazione. Le configurazioni sono illustrate nell'immagine seguente.

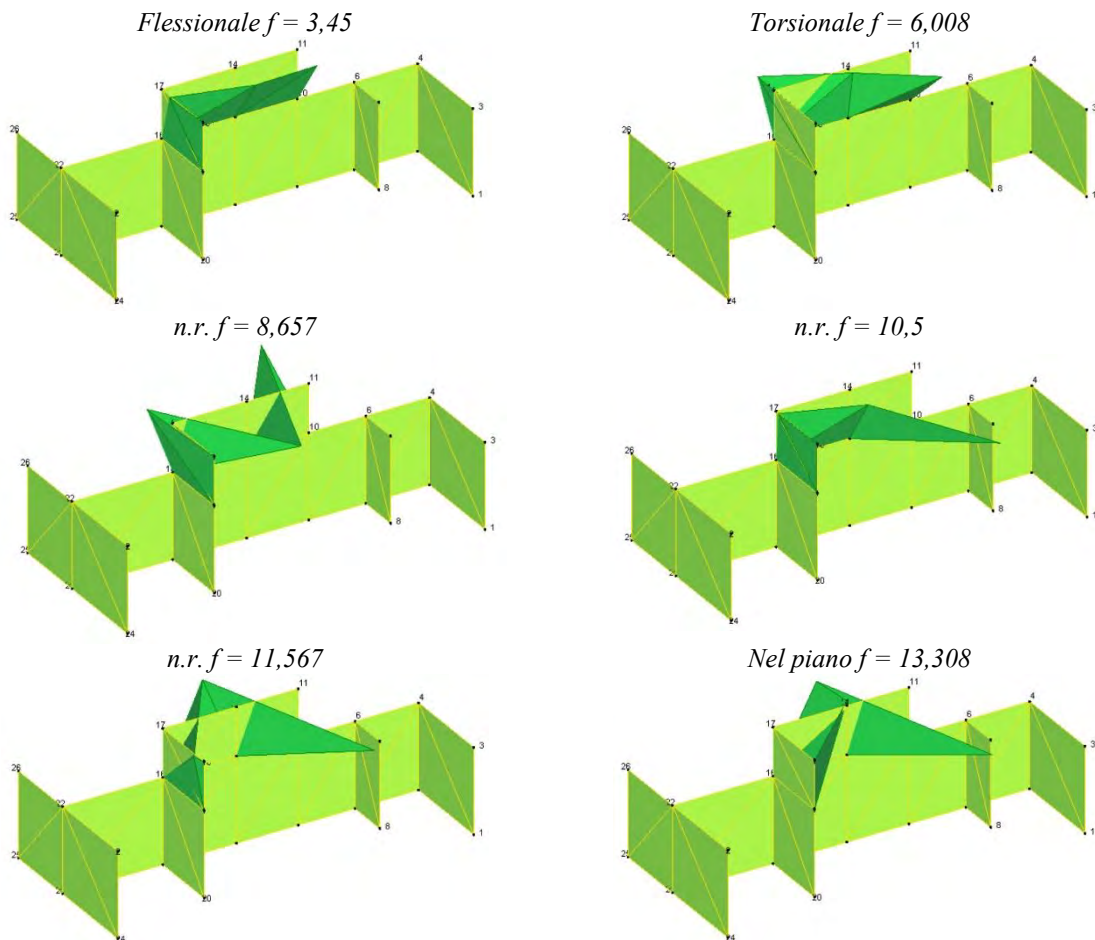


Fig. 8.14 – Scena frequenze modali ricavate da Artemis

SISTEMA DI MONITORAGGIO

9.1 Caratteristiche del sistema di monitoraggio

Un sistema di monitoraggio SHM è composto da sensori, da un sistema di acquisizione e trasmissione dei dati (comprendente anche un digitalizzatore e un condizionamento di segnale) e da un database per l'effettiva raccolta dei dati e la diagnosi strutturale.

Da un punto di vista teorico, una qualunque struttura può essere strumentata in ogni punto per il quale si ritiene possa essere interessante andare a vederne il comportamento.

Dal lato pratico, però, il numero di sensori da applicare affinché si possa compiere un monitoraggio efficiente, è strettamente legato alle risorse finanziarie a disposizione, sia in termini di dispositivi di misura che di acquisizione dei dati.

Risulta quindi molto importante posizionare un numero minimo, ma sufficiente, di dispositivi sulla struttura, in modo tale da poter ottenere tutte le informazioni necessarie.

Le principali grandezze che vengono tenute sotto controllo sono le seguenti: apertura delle principali lesioni nelle strutture murarie, movimenti assoluti e relativi di strutture verticali, rotazioni di strutture, temperature interne ed esterne, cedimenti differenziali delle strutture di fondazione, deformazioni negli elementi strutturali, ma ve ne sono molte altre.

Tutte le misure possono essere eseguite utilizzando sia tecniche di tipo manuale che prevedono l'impiego di strumenti rimovibili, sia tecniche di misura di tipo automatico con strumenti fissi di tipo elettronico collegati ad un'apparecchiatura di acquisizione automatica.

Per raggiungere tale scopo, è necessario osservare la struttura, capire le cause possibili dei fenomeni osservati e avere a priori un'idea approssimativa dei modi propri che si andranno ad individuare (e.g. in seguito a modellazione sia dei parametri statici che dinamici e con l'analisi dinamica).

Bisogna, ad esempio, porre molta attenzione a non posizionare gli accelerometri nei nodi modali (ed in loro prossimità), perché in tali punti l'osservabilità di tale modo è nulla. In generale si deve quindi evitare di posizionare sensori su assi di simmetria per evitare che i modi simmetrici risultino nascosti.

Stabilita quindi la giusta localizzazione e posizione degli strumenti atti ad eseguire il monitoraggio, si misura la risposta della struttura.

I dati rilevati dai sensori vengono inviati a centraline periferiche localizzate in prossimità dei sensori stessi; tali centraline hanno il compito di amplificare i segnali al fine di evitare disturbi dovuti alla trasmissione a distanza di segnali molto deboli. Si rende necessario l'utilizzo di una scheda ADC (*Analog to Digital Converter*) per digitalizzare l'impulso attraverso una serie a tempo discreto e di un condizionamento di segnale SC per stabilizzare la corrente ed elaborare l'informazione fornita.

In generale, le sue funzioni sono le seguenti:

- il tipo più comune di condizionamento è l'amplificazione dei segnali a basso livello per aumentare la risoluzione e ridurre il rumore. Per la massima precisione possibile, il segnale dovrebbe essere amplificato in modo che il massimo *range* di voltaggio del segnale condizionato uguagli l'intervallo massimo di *input* del convertitore analogico digitale (ADC);
- isolare i segnali del trasduttore dal computer, poiché il sistema misurato può contenere alta tensione e anche per assicurarsi che le misurazioni siano sicure da differenze nelle potenzialità del suolo o tensioni dei modi di vibrazione comuni;
- filtrare i segnali indesiderati dai segnali misurati. Filtri di rumore sono utilizzati per aumentare la precisione di misurazione escludendo i segnali in alte frequenze che sono fuori dall'intervallo del sistema misurato. Filtri *anti-alias* rimuovono tutti i componenti di frequenze che superano la larghezza di banda ingresso del computer.
- eccitare i trasduttori che hanno bisogno di tensione esterna o eccitazione (trasduttori passivi);
- linearizzazione della risposta non lineare dei trasduttori durante i cambiamenti nel fenomeno misurato.

I parametri rilevati sono: ampiezza, fase e frequenza.

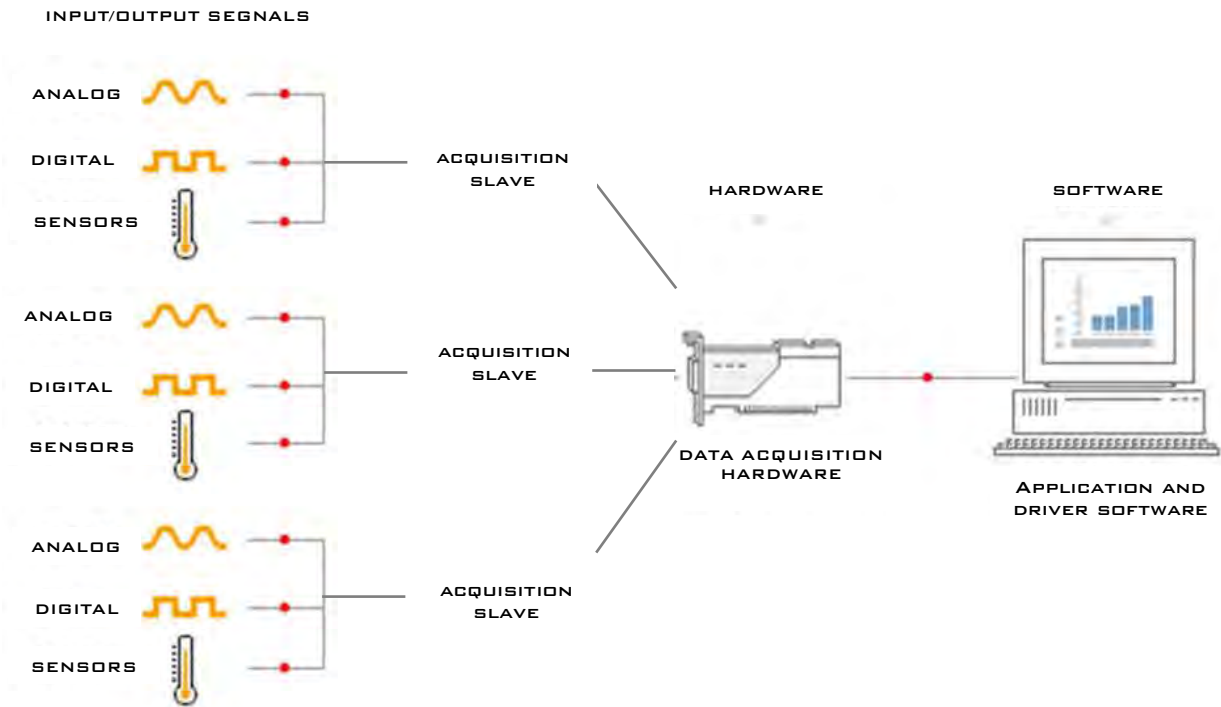


Figura 9.1- schema del sistema di monitoraggio

Uno schema di riferimento per il monitoraggio può essere quello rappresentato nella Fig. 7.1. L'unità centrale che registra tutti i dati nella sua forma più semplice è composta da un elaboratore (che ha il compito di richiedere ai sensori la lettura delle misure ogni dato periodo di tempo), da un registratore su nastro, da una stampante e da un modem per la trasmissione dei dati a distanza. Un esempio di centralina per il monitoraggio è quello riportato nella Fig. 7.2.



Figura 9.2 - centralina per il monitoraggio¹

¹ www.italy.ni.com

Nella progettazione di un sistema di monitoraggio automatico devono essere presi in considerazione i seguenti aspetti:

- Condizioni ambientali: la scelta del sistema di misura e del passaggio dei fili deve essere decisa dopo un'analisi dettagliata delle condizioni ambientali per garantire la necessaria protezione del sistema, l'assenza di disturbi elettrici e l'accessibilità per l'installazione e l'assemblaggio dei fili.
- Precisione: deve essere definita analizzando tutti i tipi di errore (sistematico o *random*) di cui può essere affetto lo strumento. E' importante porre attenzione non solo alla precisione dei singoli componenti ma anche a quella dell'intero sistema.
- Affidabilità: poiché di solito un sistema di monitoraggio viene utilizzato in modo permanente, è necessaria una grande affidabilità. Per questo deve essere posta particolare attenzione nel suo progetto e nell'installazione. Il sistema deve periodicamente effettuare un controllo e riconoscere l'eventuale malfunzionamento. Alcuni errori possono essere trovati comparando i valori misurati con quelli previsti.
- Flessibilità: alcune sostituzioni dei componenti potrebbero rivelarsi necessarie durante il ciclo di vita del sistema.
- Manutenzione: ispezioni periodiche devono essere comunque effettuate per assicurare l'affidabilità e sono necessarie in caso di emergenze.

9.2 Rilievo del quadro fessurativo

Per scegliere la collocazione ottimale per il posizionamento della strumentazione per il monitoraggio statico è stata eseguita un'attenta e accurata ispezione ai setti del Teatro Romano, alla scena e all'arco d'ingresso, al fine di verificare lo stato generale di degrado di tutti i paramenti murari. Oltre a ciò, è stata presa in esame anche la campagna di prove effettuata nell'anno 2000 relativa al degrado dei materiali e i test di *Ambient Vibration* eseguiti nel medesimo anno (cap. 4, cap. 5, cap. 8).

Il problema più evidente è rappresentato da una forte umidità all'interno della struttura muraria causata da diverse infiltrazioni, che non solo favorisce la veicolazione dei sali deliquescenti con la conseguente dissoluzione del materiale lapideo e delle malte, ma risulta anche un pericoloso agente di diffusione di microrganismi (peraltro visibili in molte zone) che attingono il loro nutrimento dal materiale organico che può infatti svilupparsi agevolmente in presenza di acqua. A causa di questo fenomeno molti elementi metallici, posti come rafforzamento nelle aree più critiche, risultano corrosi e arrugginiti.

Sono inoltre visibili, chiaramente, diverse forme di interventi precedenti: la chiusura di aperture, il ripristino di mattoni, la sigillatura con resine o malte di varia natura. Sono presenti alcune fessure più profonde che interessano principalmente la struttura ad arco posta all'ingresso, e numerose microfessurazioni.

9.3 Obiettivi del sistema di monitoraggio

Il sistema di acquisizione implementato per il controllo di parametri strutturali del Teatro Romano di Verona è finalizzato all'acquisizione delle caratteristiche vibrazionali della struttura, registrate mediante trasduttori di accelerazione, ed alla valutazione delle variazioni dell'apertura di alcune lesioni individuate, ottenute mediante trasduttori di spostamento. Tali letture sono relazionate ai parametri ambientali (temperatura e umidità relativa).

La valutazione delle grandezze misurate, ed in particolare di eventuali loro variazioni nel tempo, consente di avere utili indicazioni nella definizione del comportamento della struttura e nella possibile determinazione della presenza od insorgenza di fenomeni di danno.

Grazie ai dati registrati dal sistema di monitoraggio è possibile calibrare il modello numerico elaborato sulla base dell'effettivo comportamento del monumento, anche in presenza di sollecitazioni sismiche di entità non marginale.

Si sottolinea, inoltre, come si è voluto porre particolare attenzione nel garantire la minima interferenza con la struttura e la sua funzione attraverso la minimizzazione dell'impatto dei sensori sul monumento, trattandosi di un bene tutelato.

Il sistema di monitoraggio SHM è composto da sensori, da un sistema di acquisizione e trasmissione dei dati (comprendente anche un digitalizzatore e un condizionamento di segnale) e da un database per l'effettiva raccolta dei dati e la diagnosi strutturale.

Da un punto di vista teorico, una qualunque struttura può essere strumentata in ogni punto per il quale si ritiene possa essere interessante andare a vederne il comportamento.

Dal lato pratico, però, il numero di sensori da applicare affinché si possa compiere un monitoraggio efficiente, è strettamente legato alle risorse finanziarie a disposizione, sia in termini di dispositivi di misura che di acquisizione dei dati.

Risulta quindi molto importante posizionare un numero minimo, ma sufficiente, di dispositivi.

9.4 Descrizione del sistema di monitoraggio

L'installazione del sistema di monitoraggio presso il Teatro Romano di Verona è avvenuta nei mesi di marzo, aprile e giugno dell'anno 2014.

Il sistema è composto da dieci accelerometri monoassiali (trasduttori di accelerazione), da undici potenziometri lineari (trasduttori di spostamento), da due inclinometri e da sensori integrati di temperatura e umidità. Tale sistema è suddiviso in tre zone, denominate per comodità zona Chiesa, zona Museo e Scena, ognuna dotata di una centralina di ricezione dei dati dalla quale partono i cavi per la connessione con la strumentazione.



Fig. 9.3 - Centralina di acquisizione (master) della zona Scena (chiuso e aperto)

Il sistema di acquisizione viene descritto in figura , evidenziando come gli strumenti siano connessi tra di loro. Gli accelerometri e i trasduttori di spostamento sono collegati al master tramite cavi ethernet.

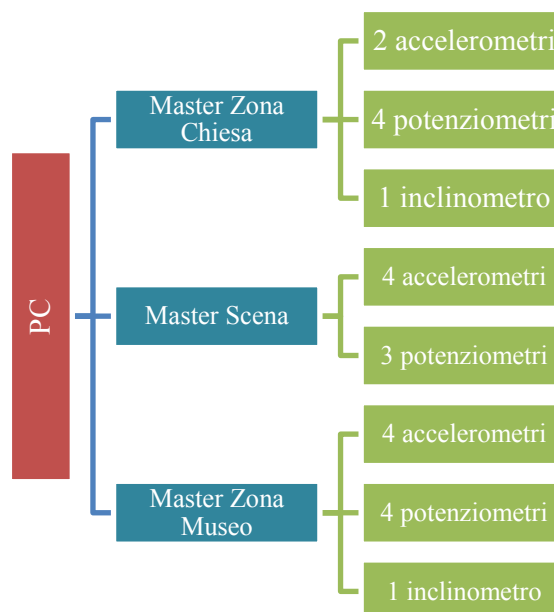


Fig. 9.4 - Schema riassuntivo del sistema di acquisizione e trasmissione dei dati



Fig. 9.5 e 9.6 – Sensori di Temperatura e umidità rispettivamente di Zona Chiesa e Museo

Nelle immagini seguenti viene riassunto il posizionamento di tutti i sensori: dei trasduttori per il monitoraggio statico e degli accelerometri per il monitoraggio dinamico.

I trasduttori di spostamento sono indicati in verde, mentre i trasduttori di accelerazione in rosso. I due inclinometri, posizionati uno in zona Chiesa e uno in Zona Museo nei setti più elevati e più vulnerabili, sono evidenziati in blu. Sono infine presenti sensori integrati di temperatura e umidità sia in Zona Chiesa che in Zona Museo, come mostrano le Figure...

I lavori si sono conclusi con l'installazione degli slave posti ad un'altezza tale da rendere agevole la manutenzione e in posizioni nascoste per non creare disturbo e avere il minimo impatto sul manufatto storico.

Il sistema è stato collegato a fine gennaio, quindi sono disponibili dati a partire dal 28 gennaio 2015.

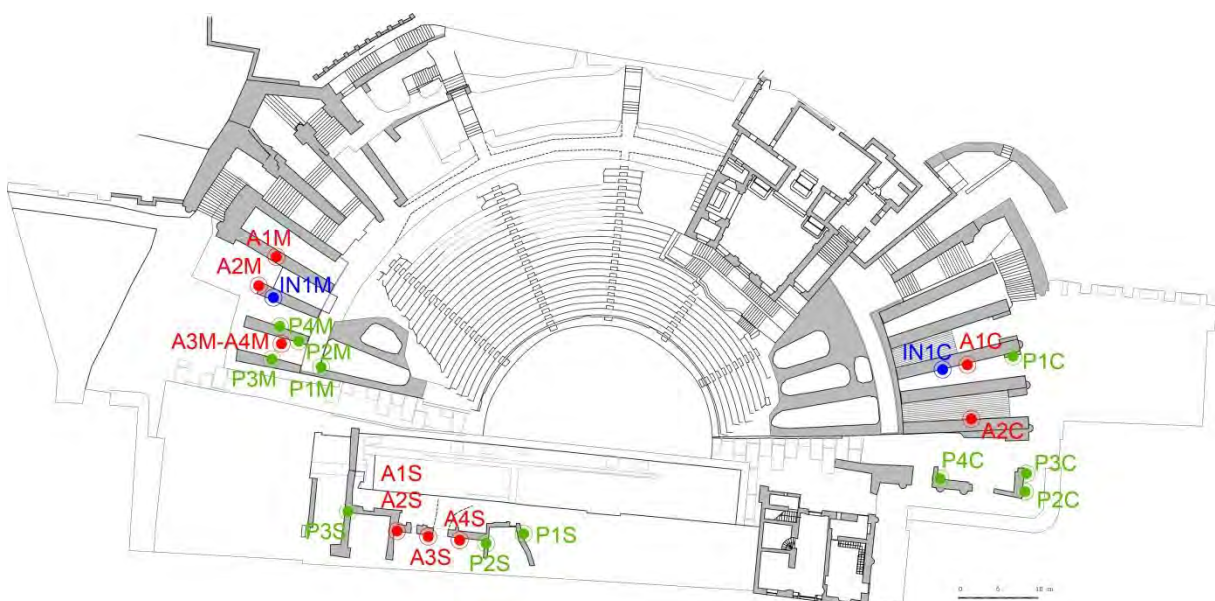


Fig. 9.7 – Posizionamento globale dei sensori

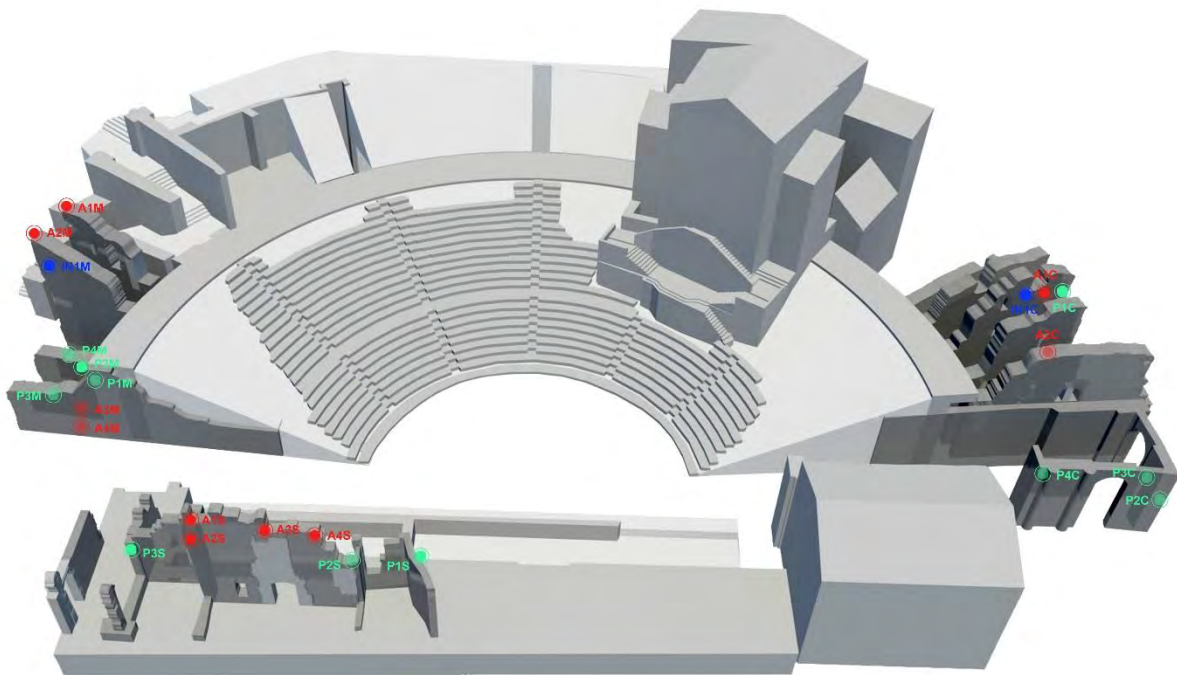


Fig. 9.8– Schema tridimensionale generale del posizionamento dei sensori

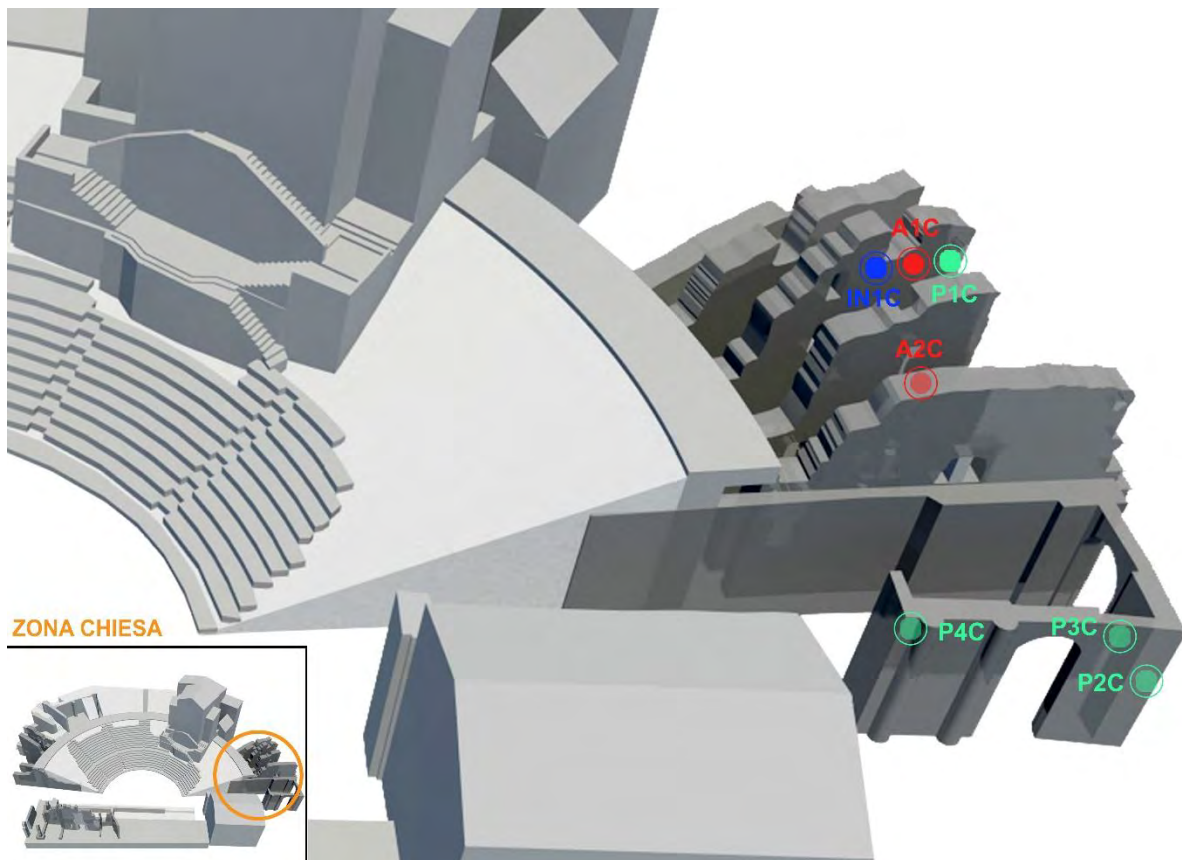
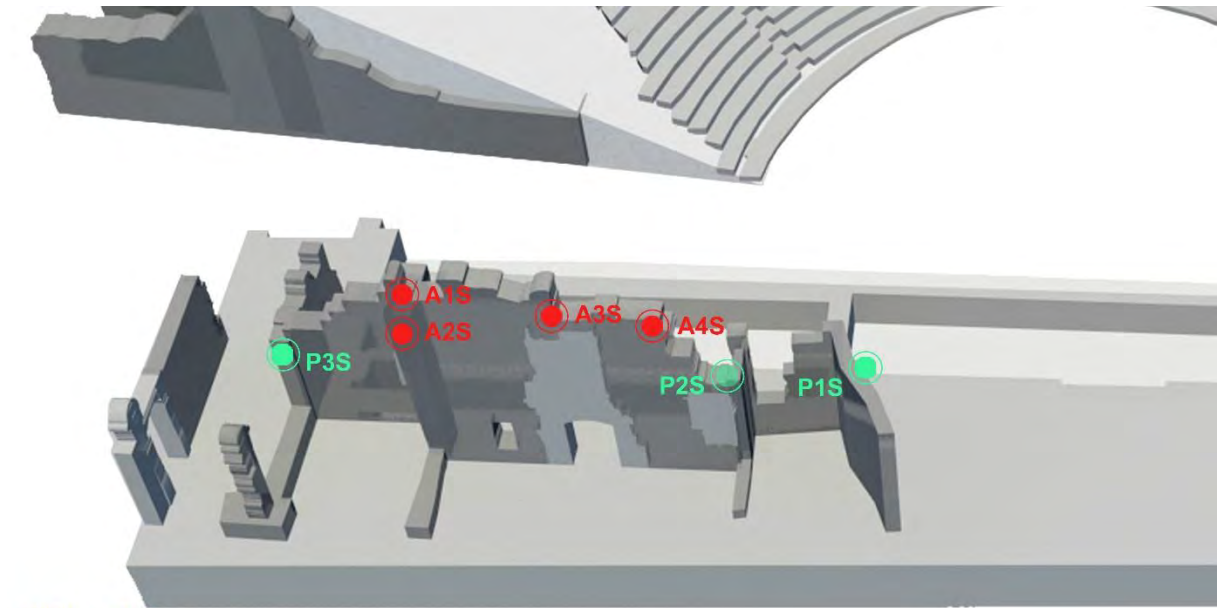


Fig. 9.9 – Schema di posizionamento sensori in Zona Chiesa



ZONA SCENA

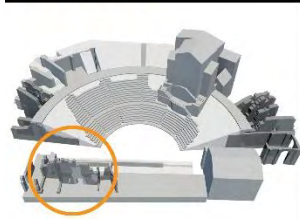
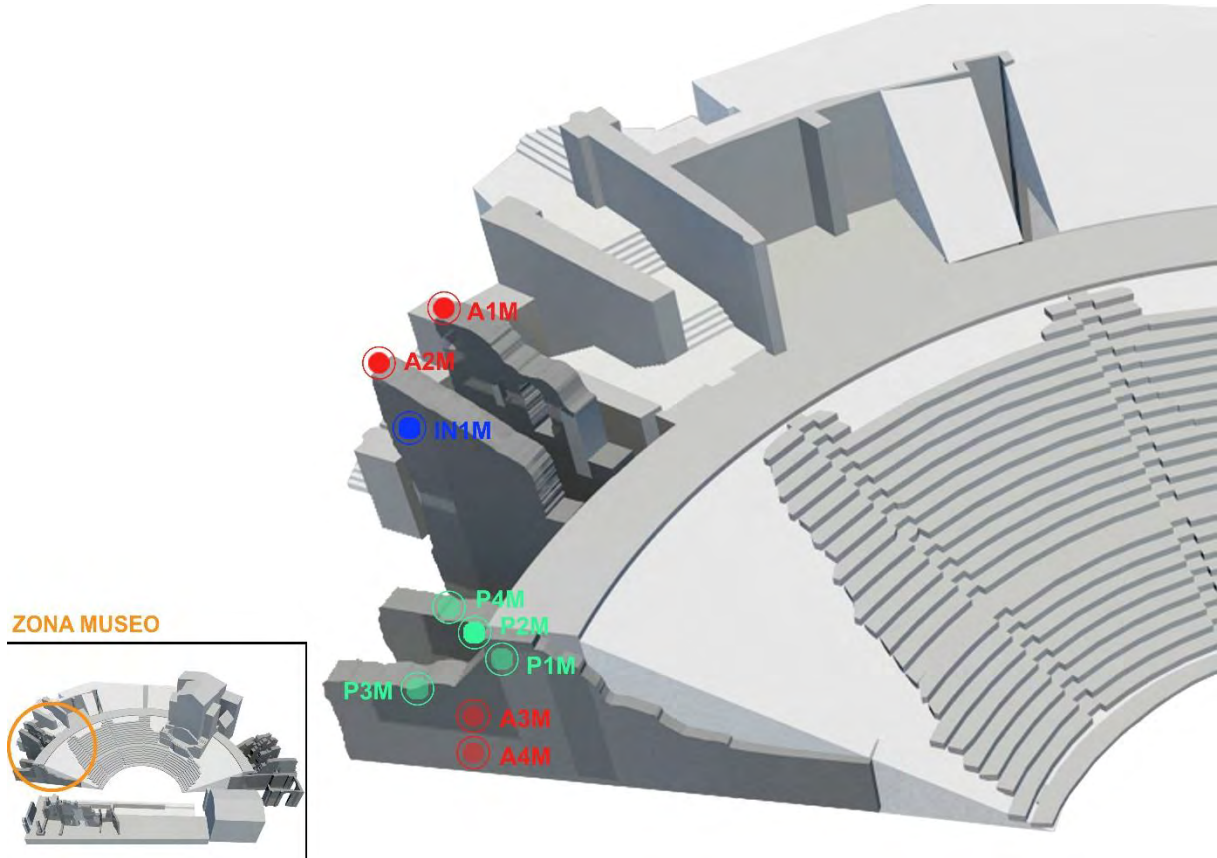


Fig. 9.10 – Schema di posizionamento sensori in Zona Scena



ZONA MUSEO

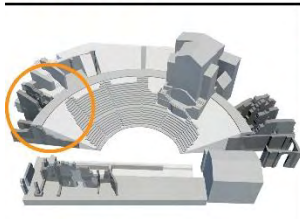


Fig. 9.11 – Schema di posizionamento sensori in Zona Museo

9.4.1 Monitoraggio statico

Con riferimento alle grandezze rilevate il monitoraggio può essere suddiviso in statico e dinamico.

Al fine di monitorare il quadro fessurativo, sono stati installati i trasduttori di spostamento a controllo delle lesioni più significative delle strutture studiate. Le lesioni da monitorare sono state scelte sulla base di un'analisi visiva combinando poi i risultati con un'analisi numerica. Il monitoraggio statico richiede la misurazione ad intervalli di tempo regolari di ridotte variazioni lungo un periodo di osservazione di alcuni anni. Per tale tipo di monitoraggio non vi è la necessità di acquisire dati con una elevata frequenza di campionamento, essendo sufficiente la registrazione di dati ad intervalli di tempo che possono variare dall'ora alla settimana o al mese, per registrare possibili variazioni causate da cambiamenti termigrometrici o dall'evoluzione dei fenomeni di danno.

I trasduttori di spostamento sono stati collocati a cavallo delle lesioni considerate più significative e sono collegati mediante cavi direttamente all'unità di acquisizione.



Fig. 9.12 e 9.13 – Potenziometro posizionato sull'arco d'ingresso del Teatro e inclinometro sul setto B3

9.4.2 Installazione del sistema di monitoraggio statico

Nei giorni 27/03, 31/03, 01/04, 10/06 e 12/06 (anno 2014) sono stati posizionati i trasduttori di spostamento nelle tre zone e le rispettive centraline di acquisizione.

I potenziometri sono situati a cavallo delle principali lesioni, a seguito dello studio del quadro fessurativo e vengono impiegati per valutare l'apertura eventuale della lesione in oggetto, mentre gli inclinometri sono utilizzati prevalentemente per il monitoraggio di fenomeni di stabilità (rotazione, inclinazione) relativi a strutture abitative o monumentali.

Si è iniziato il lavoro nell'arco di ingresso e nei setti della zona *Chiesa*. Per il posizionamento degli strumenti è stato necessario anche l'utilizzo di una piattaforma aerea a ragno, che grazie alle sue caratteristiche ha reso possibile il posizionamento dei sensori a quota elevata.

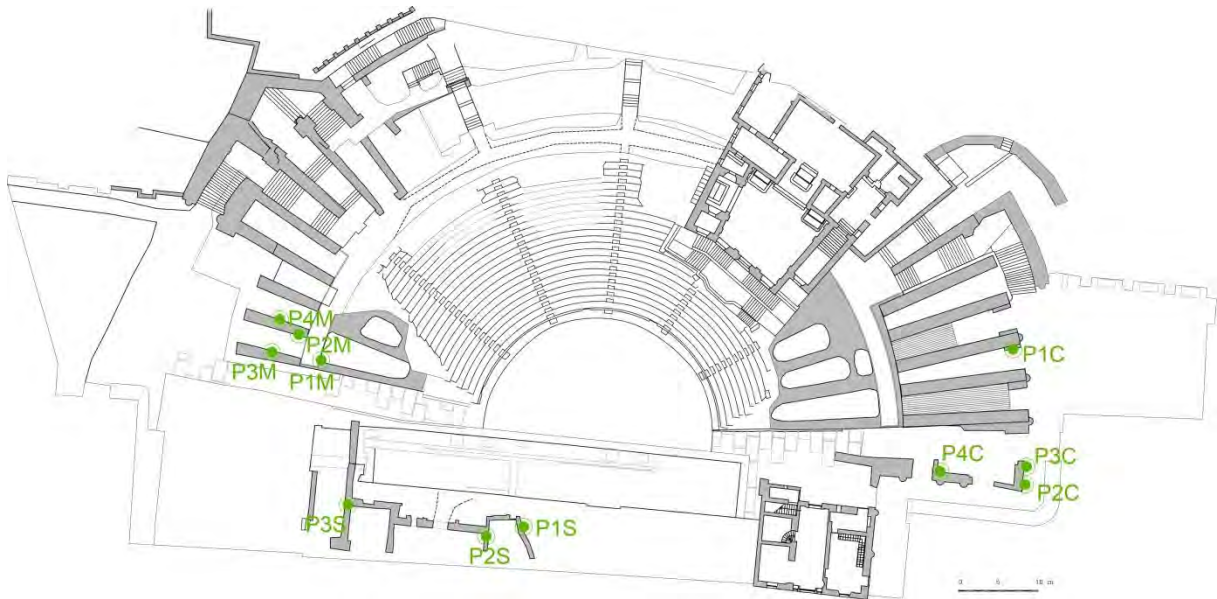


Fig. 9.14 – Posizionamento dei potenziometri al Teatro Romano



Fig. 9.15 - Posizionamento dei sensori tramite piattaforma aerea

Di seguito si elencano le fasi di lavorazione per il fissaggio dei trasduttori di spostamento:

1. Scelta del posizionamento migliore dello strumento perpendicolarmente alla lesione e dei due punti di foratura della muratura;
2. Esecuzione dei fori tramite utilizzo di martello pneumatico alimentato a corrente o a batteria e utilizzo di una pompetta per la rimozione della polvere interna al foro;
3. Inserimento della resina epossidica nel foro tramite pistola per silicone;
4. Inserimento di una barra in acciaio inox, di lunghezza 10 cm circa e diametro 4 mm, all'interno dei fori con avvitato all'estremità un dado in acciaio inox.
5. Pulitura dei bordi e controllo del corretto posizionamento delle barre provando a posizionare il trasduttore di spostamento;

6. Attesa del tempo di asciugatura della resina epossidica. Il tempo varia a seconda della temperatura e del tipo di resina, solitamente intorno ai 15 minuti;
7. Fissaggio del trasduttore di spostamento alle due barre in acciaio tramite dadi in acciaio inox con l'ausilio di pinza e chiave inglese;
8. Fissaggio del filo alla muratura tramite esecuzione di fori nel muro con martello pneumatico e inserimento di tasselli 8 con viti 4 in acciaio inox;
9. Passaggio del filo lungo il bordo della muratura.

SIGLA POTENZIOMETRI

Zona Chiesa P1C-P2C-P3C-P4C

Zona Scena P1S-P2S-P3S

Zona Museo P1M-P2M-P3M-P4M

SIGLA INCLINOMETRI

Zona Museo I1M

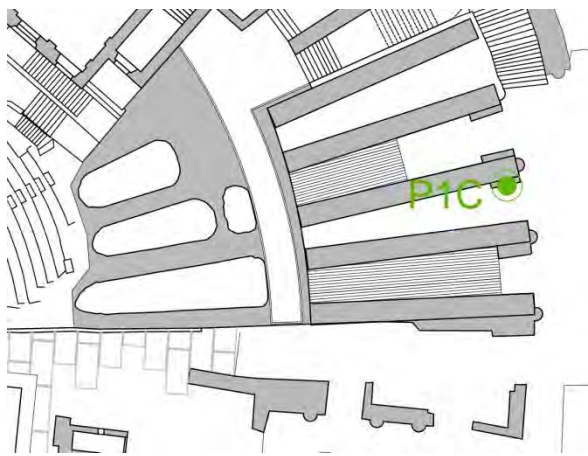
Zona Chiesa I2M

P1C

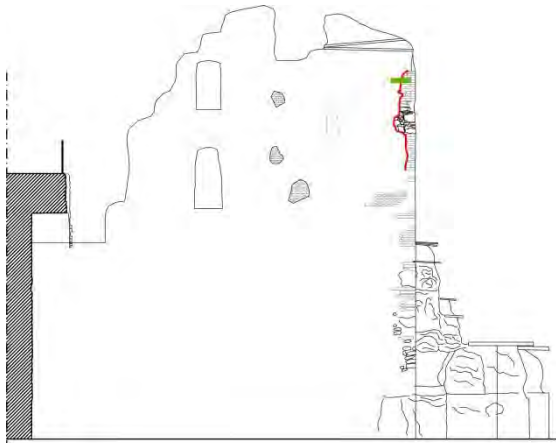
Descrizione

Il sensore P1C è stato posto in sommità del terzo setto della Zona Chiesa. Si è forato ad un'estremità il laterizio aggiunto negli interventi successivi attuati sulla struttura originaria in modo da recare il minor danno possibile alla pietra del setto. Il sensore è collegato alla centralina di acquisizione della Zona.

Posizione del sensore in pianta



Posizione in prospettiva e foto del sensore

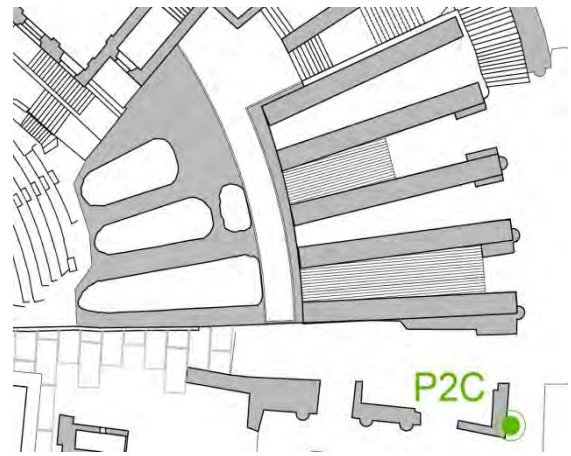


P2C

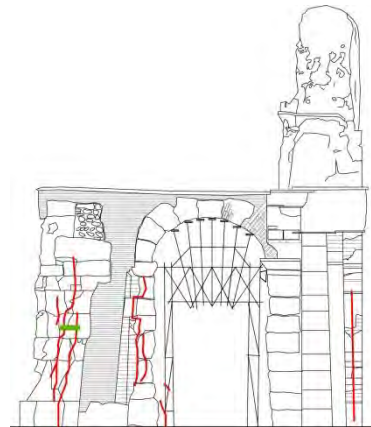
Descrizione

Il sensore P2C è stato posto a cavallo della lesione presente sull'arco d'ingresso della *parados* orientale. Esso è collegato alla centralina della Zona Chiesa.

Posizione del sensore in pianta



Posizione in prospettiva e foto del sensore

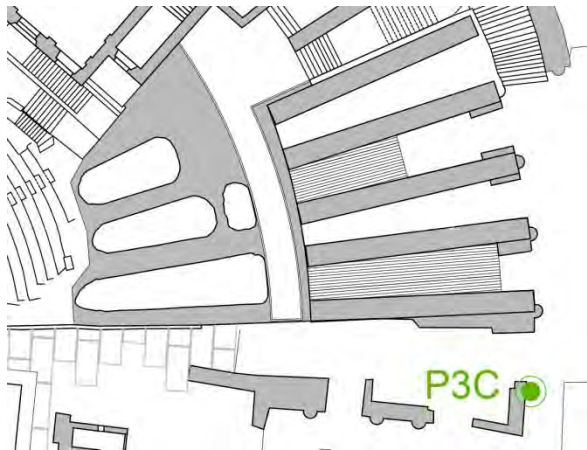


P3C

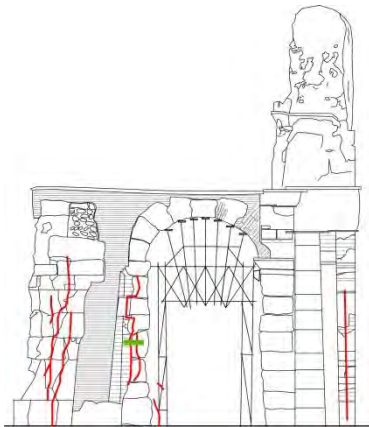
Descrizione

Il sensore P3C è stato posizionato in corrispondenza della discontinuità tra il laterizio del contrafforte e la pietra dell'arco d'ingresso del Teatro. Il sensore è collegato alla vicina centralina di acquisizione.

Posizione del sensore in pianta



Posizione in prospetto e foto del sensore

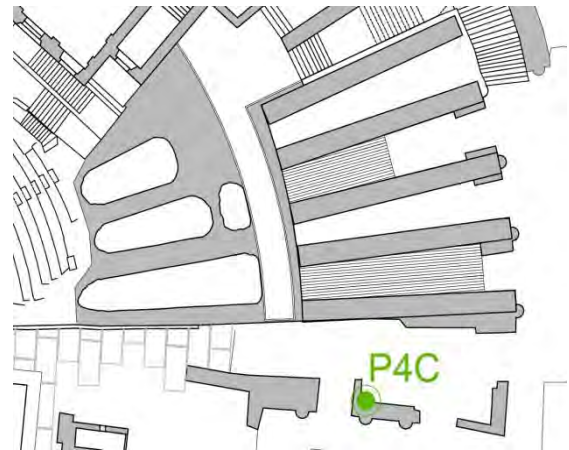


P4C

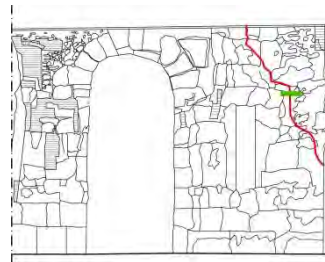
Descrizione

Il sensore P4C è stato posto a cavallo della lesione che interessa lo spigolo dell'arco longitudinale all'arco di ingresso del teatro. Il sensore è collegato alla vicina centralina di acquisizione.

Posizione del sensore in pianta



Posizione in prospetto e foto del sensore



P1M

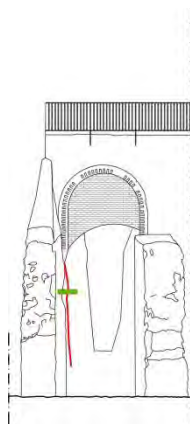
Descrizione

Il sensore P1M è posto sulla parete di fondo compressa tra il primo e il secondo setto. Esso si collega alla centralina della zona Museo.

Posizione del sensore in pianta



Posizione in prospetto e foto del sensore



P2M

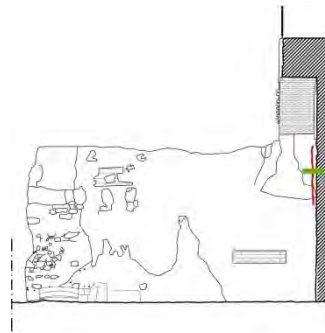
Descrizione

Il sensore P2M è posto nel punto di innesto del setto A2 con la passerella della precinzione. Esso è collocato a cavallo di una lesione e si collega alla centralina della zona Museo.

Posizione del sensore in pianta



Posizione in prospetto e foto del sensore



P3M

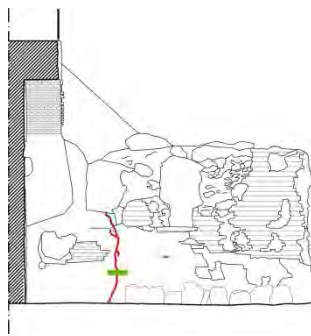
Descrizione

Il sensore P3M è collocato a cavallo della lesione che interessa una porzione del primo setto della zona Museo. Il sensore è posto circa ad un metro da terra e in una posizione nascosta. Il trasduttore si collega alla centralina della zona Museo che è collocata tra il primo e il secondo setto (A1 e A2).

Posizione del sensore in pianta



Posizione in prospetto e foto del sensore



P4M

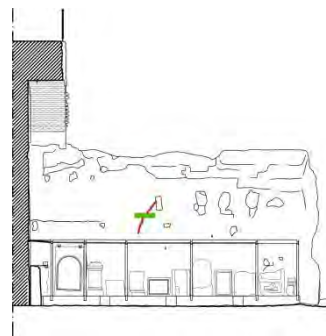
Descrizione

Il sensore P4M è posizionato a cavallo della lesione che interessa il setto A2 della Zona Museo e a circa 2 metri d'altezza. Si collega al vicino master collocato tra primo e secondo setto.

Posizione del sensore in pianta



Posizione in prospetto e foto del sensore

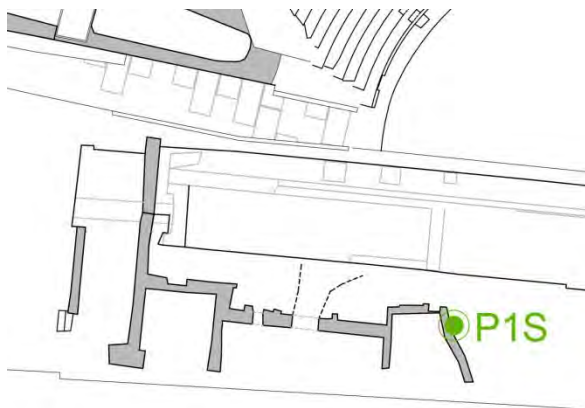


P1S

Descrizione

Il sensore P1S è collocato sul setto curvilineo della scena. Per evitare di arrecare danni alla pietra originaria del teatro i fori per il posizionamento del sensore sono stati effettuati sul laterizio aggiunto in interventi successivi alla costruzione del teatro.

Posizione del sensore in pianta



Posizione in prospettiva e foto del sensore

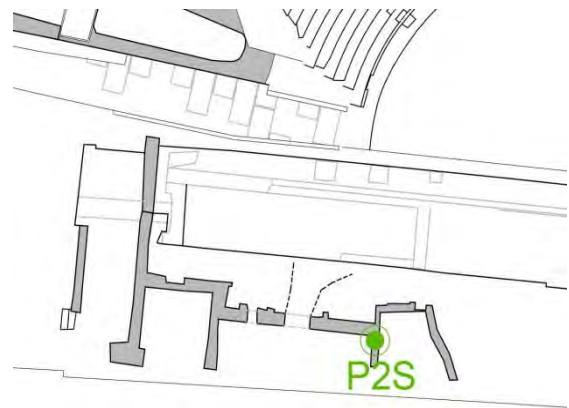


P2S

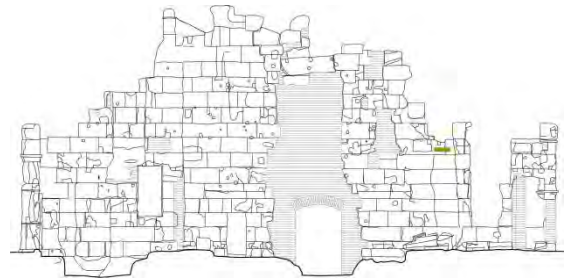
Descrizione

Il sensore PZ 3 è stato posto nell'intersezione tra due porzioni di muratura perpendicolari della scena. Un'estremità del sensore è ancorata al laterizio. Il trasduttore trasmette i dati alla vicina centralina di acquisizione.

Posizione del sensore in pianta



Posizione in prospettiva e foto del sensore

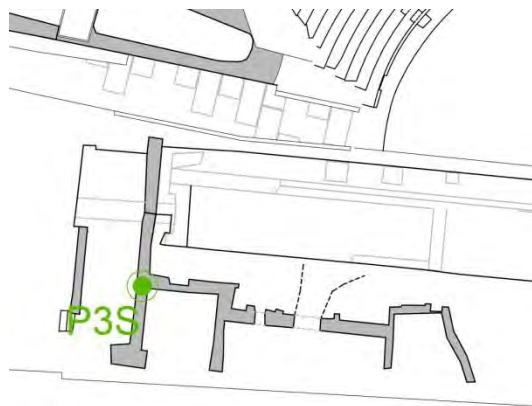


P3S

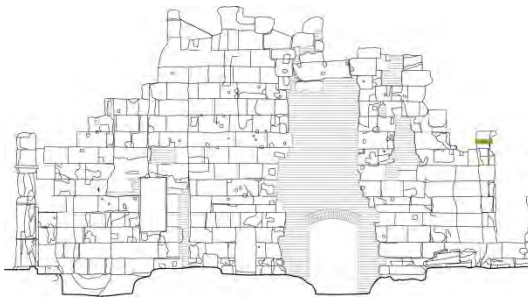
Descrizione

Il sensore PZ 4 è stato posto sulla sommità della porzione di muratura della scena posta ad occidente. Esso è collocato in un punto nascosto e poco invasivo ed è collegato alla vicina centralina di acquisizione della Zona Scena.

Posizione del sensore in pianta



Posizione in prospettiva e foto del sensore

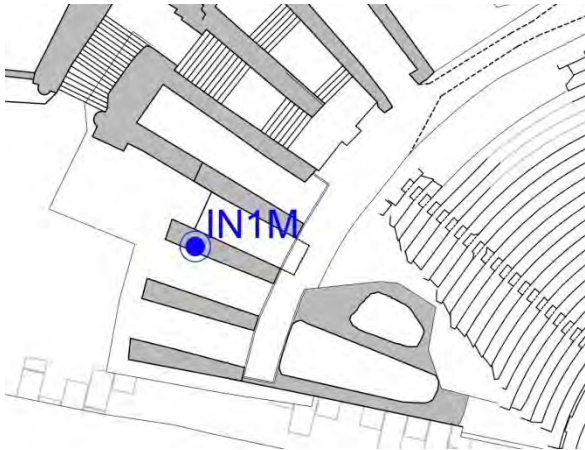


IN1M

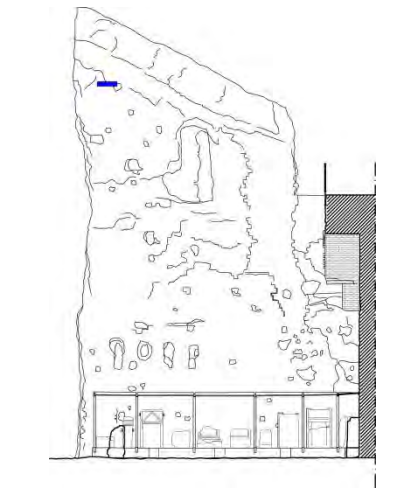
Descrizione

Il sensore IN1M è posto sul setto più alto della Zona Museo in sommità.

Posizione del sensore in pianta



Posizione in prospettiva e foto del sensore

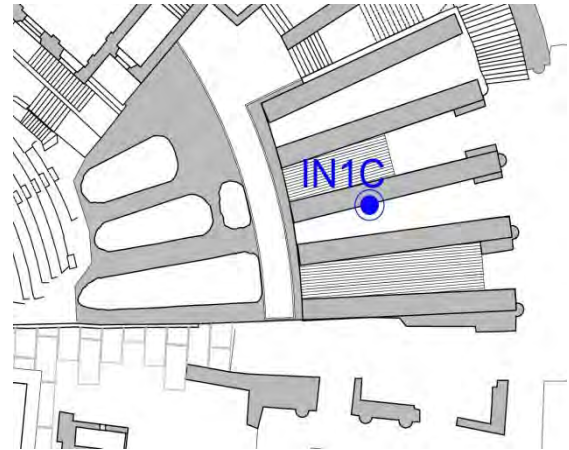


IN1C

Descrizione

Il sensore IN1C è posto sul terzo setto della Zona Chiesa, in quanto ha un'altezza considerevole.

Posizione del sensore in pianta



Posizione in prospettiva e foto del sensore



9.4.3 Monitoraggio dinamico

Il monitoraggio dinamico è finalizzato all’acquisizione di dati utili alla caratterizzazione del comportamento della struttura in ambito dinamico/sismico. Le acquisizioni possono riguardare le accelerazioni, le velocità o gli spostamenti di alcuni punti indicativi della struttura. Le registrazioni possono essere eseguite ad intervalli di tempo regolari, possono essere effettuate in continuo a basse frequenze di campionamento oppure possono essere attivate al superamento di un livello di soglia prestabilito. Al superamento di tale livello (in accelerazione, velocità o spostamento) il sistema comincia a registrare il segnale per un periodo di tempo determinato, avendo termine la registrazione in seguito al rientro nei limiti di soglia della vibrazione. Il monitoraggio dinamico è attualmente l’unica metodologia di controllo in grado di misurare grandezze sperimentali relazionabili al comportamento globale di una struttura storica. Il contributo apportato dal monitoraggio dinamico assume una maggiore importanza in seguito alla correlazione dei dati sperimentali con altri parametri emersi da monitoraggi di natura statica, e se legato ad un’interpretazione di natura qualitativa di possibili fenomeni di degrado strutturale. La posizione dei dieci accelerometri monoassiali è stata decisa in base alle caratteristiche e ai modi di vibrare dell’intera struttura, valutate attraverso la modellazione numerica e l’identificazione dinamica.

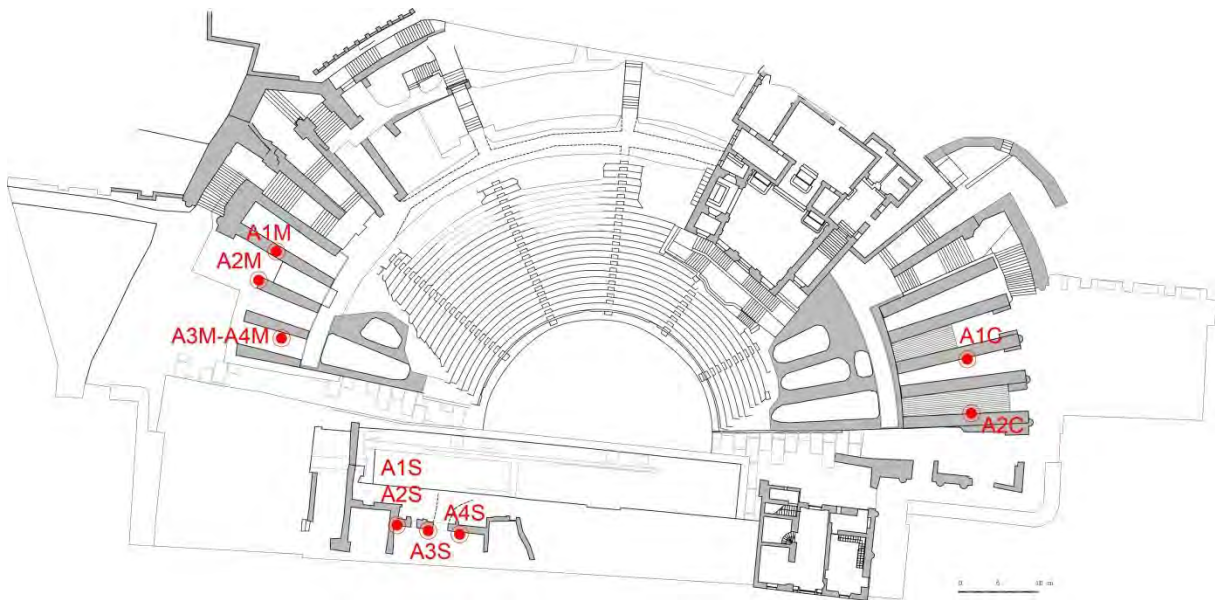


Fig. 9.16 – Pianta della posizione degli accelerometri



Fig. 9.17 - Accelerometro piezoelettrico

Gli accelerometri sono stati collocati nei punti più vulnerabili della struttura, ossia in sommità dei setti e della scena. I trasduttori sono collegati alle tre centraline delle rispettive zone.

Gli slave vengono fissati alla parete tramite l'esecuzione di fori con martello pneumatico e l'inserimento di tasselli e viti in acciaio inox.

9.4.4 Installazione del sistema di monitoraggio dinamico

Di seguito si elencano le fasi di lavorazione per il fissaggio degli accelerometri:

1. Scelta della posizione più idonea per il posizionamento del sensore e indicazione sulla muratura dei punti di fissaggio della piastra tramite pennarello;
2. Esecuzione dei fori tramite utilizzo di trapano alimentato a batteria;
3. Inserimento dei tasselli e fissaggio della piastra circolare o quadrata di appoggio con viti, queste ultime entrambe in acciaio inox;
4. Fissaggio della piastra con avvitatore alimentato a batteria e posizionamento dell'accelerometro sulla piastra proteggendo il collegamento con nastro isolante;
5. Fissaggio del cavo alla parete tramite esecuzione di fori nella muratura con martello pneumatico e inserimento di tasselli e viti oppure ancoraggio a cavi già esistenti tramite l'utilizzo di fascette;
6. Arrivati alla fine del cavo dell'accelerometro si procede con uno nuovo, di lunghezza adeguatamente misurata, per il raggiungimento dello slave.



Fig. 9.18 – Foto dell'installazione di un accelerometro

SIGLA ACCELEROMETRI

Zona Chiesa A1C-A2C

Zona Scena A1S-A2S-A3S-A4S

Zona Museo A1M-A2M-A3M-A4M

A1C

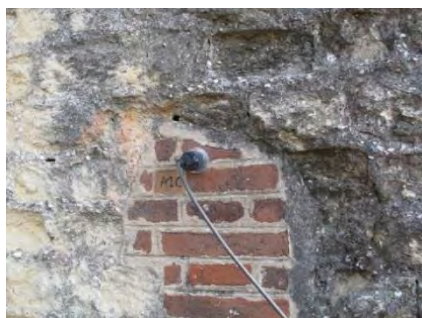
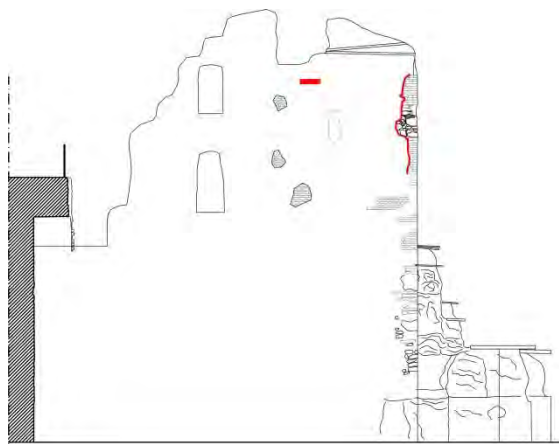
Descrizione

Il sensore A1C è stato posto in sommità del terzo setto della zona Chiesa. Si è scelto di ancorarlo ad una porzione di muratura costituita da laterizio in modo da non forare i blocchi originari del monumento. Il sensore arriva allo slave della zona Chiesa.

Posizione del sensore in pianta



Posizione in prospettiva e foto del sensore

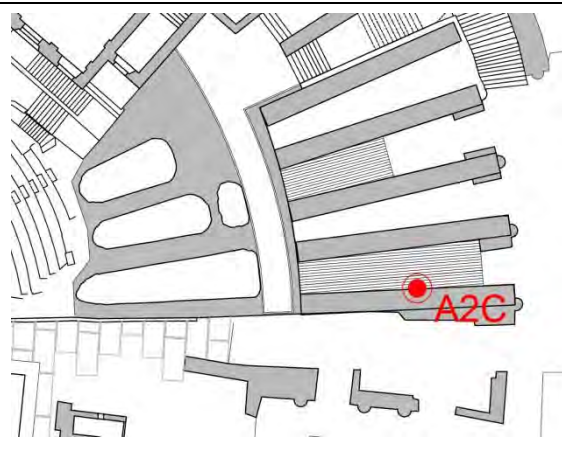


A2C

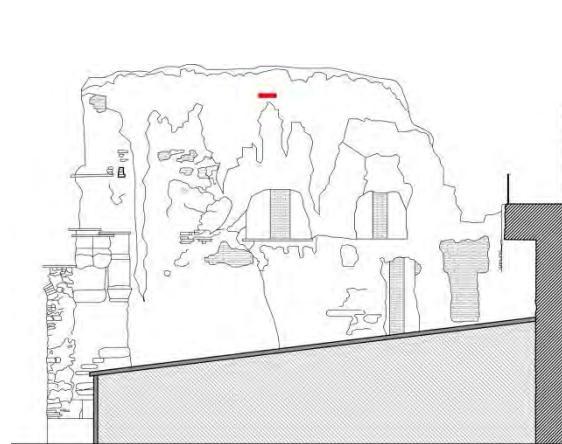
Descrizione

Il sensore A2C è localizzato sulla sommità del primo setto ed è collegato alla centralina della Zona Chiesa.

Posizione del sensore in pianta



Posizione in prospettiva e foto del sensore

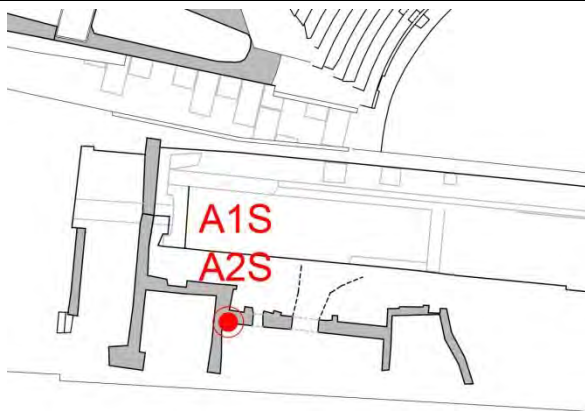


A1S

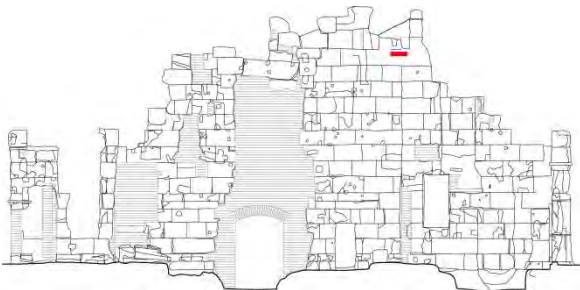
Descrizione

L'accelerometro A1S è posto nella parte retrostante della scena, in posizione nascosta. Esso è collocati in sommità e si collega alla vicina centralina di acquisizione.

Posizione del sensore in pianta



Posizione in prospettiva e foto del sensore

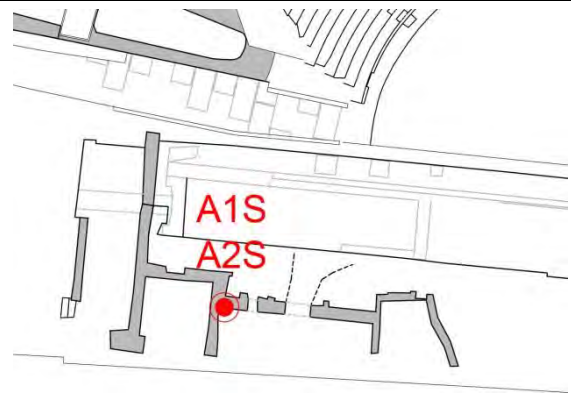


A2S

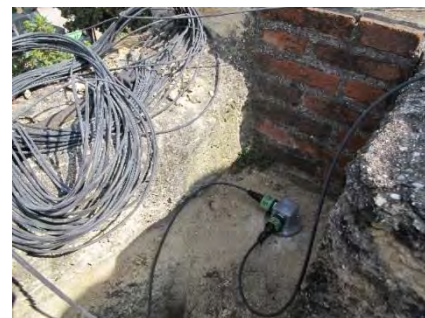
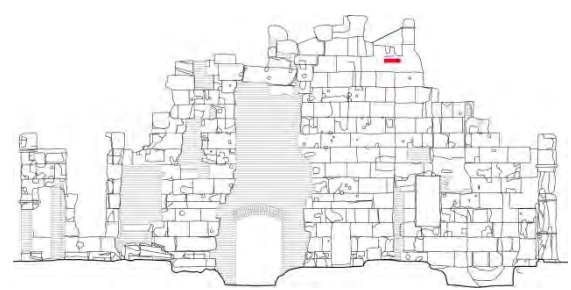
Descrizione

Il sensore A2S è posto nello stesso punto dell'accelerometro A1S e perpendicolare ad esso. Si trova in posizione nascosta e si collega al master della Scena.

Posizione del sensore in pianta



Posizione in prospettiva e foto del sensore

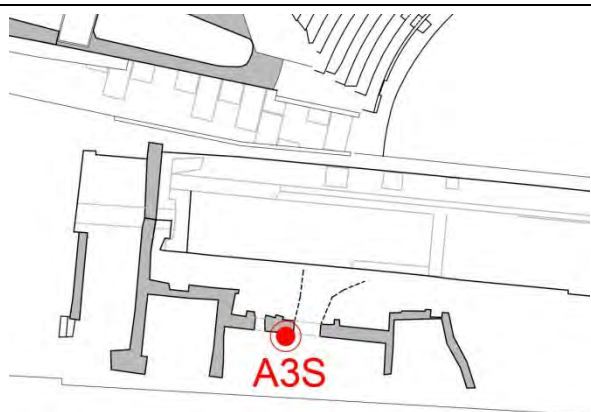


A3S

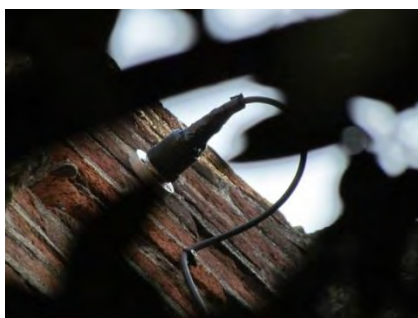
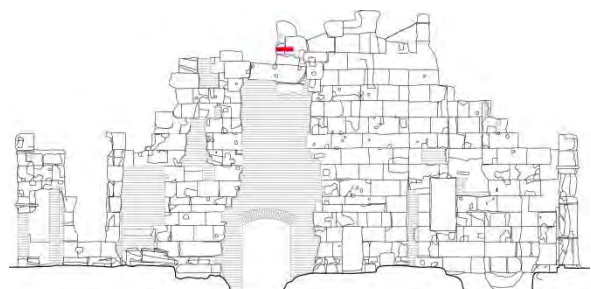
Descrizione

Il sensore A3S è posto a destra dell'apertura presente sulla scena e in sommità. Si collega alla centralina della zona Scena.

Posizione del sensore in pianta



Posizione in prospettiva e foto del sensore

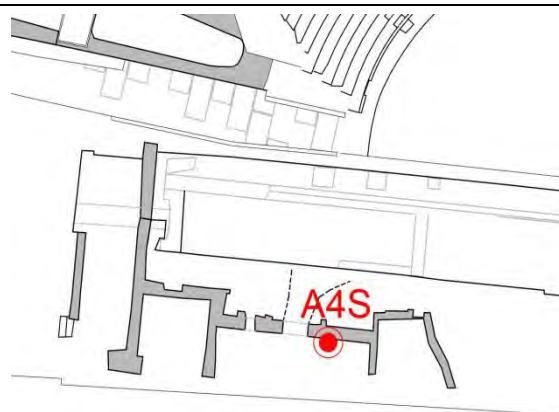


A4S

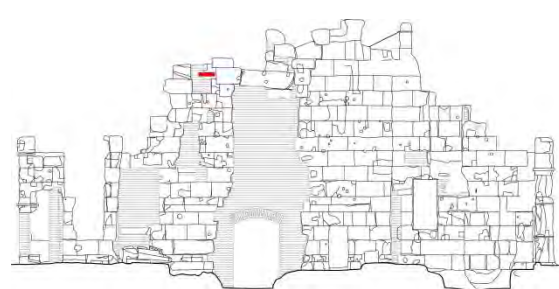
Descrizione

Il sensore A4S è fissato ad un blocco in laterizio a sinistra dell'apertura della scena in sommità. Si collega allo slave della Zona Scena.

Posizione del sensore in pianta



Posizione in prospettiva e foto del sensore

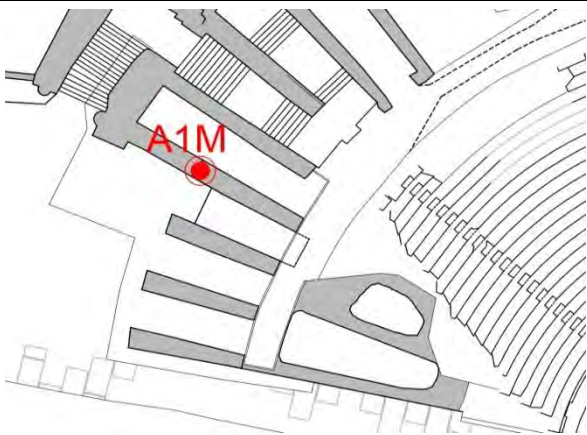


A1M

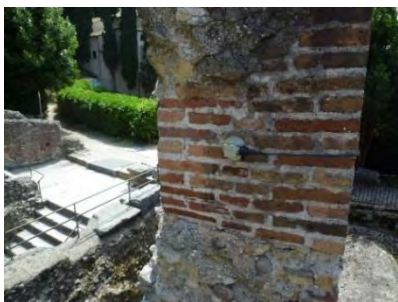
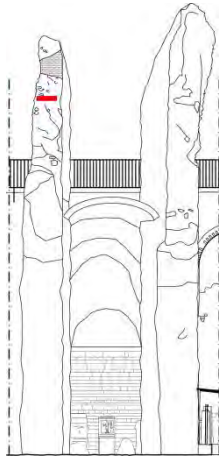
Descrizione

Il sensore A1M è stato collocato sulla parte sommitale del quarto setto della Zona Museo. Il setto, che ha un'altezza considerevole, risulta particolarmente vulnerabile in caso di sisma. Il trasduttore si collega alla centralina posta tra il setto A1 e A2.

Posizione del sensore in pianta



Posizione in prospettiva e foto del sensore

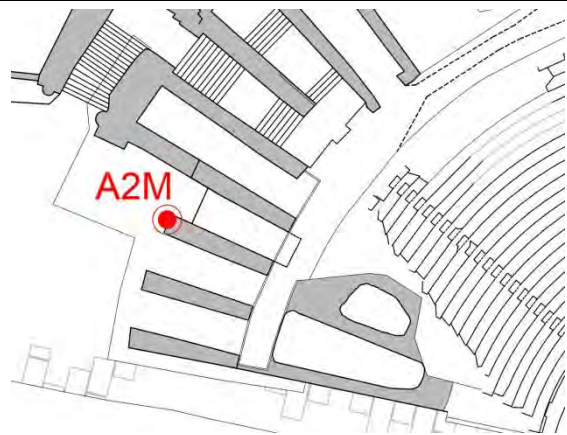


A2M

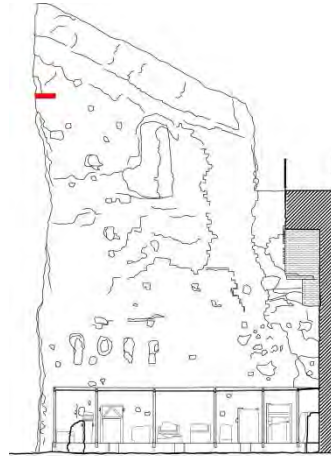
Descrizione

Il sensore A2M è posto sulla parte sommitale del terzo setto della Zona Museo. Il setto, oltre ad avere un'altezza considerevole, presenta una massa concentrata in sommità. Il trasduttore si collega alla centralina posta tra il setto A1 e A2.

Posizione del sensore in pianta



Posizione in prospettiva e foto del sensore



A3M

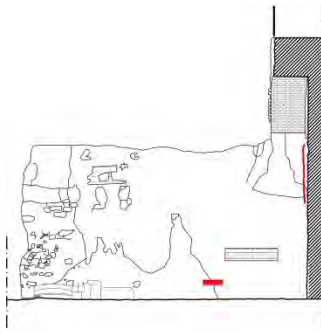
Descrizione

Il sensore A3M è posizionato alla base del setto A2 vicino alla centralina di acquisizione della zona Museo.

Posizione del sensore in pianta



Posizione in prospettiva e foto del sensore



A4M

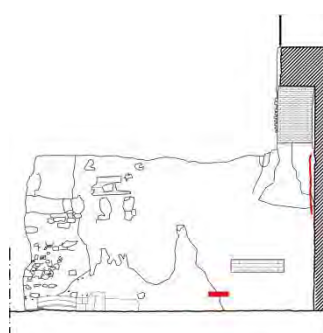
Descrizione

Il sensore A4M è collocato nello stesso punto dell'accelerometro A3M, ossia alla base del setto A2 della Zona Museo.

Posizione del sensore in pianta



Posizione in prospettiva e foto del sensore



9.5 Analisi dei dati

Il sistema utilizzato per questo lavoro di ricerca è di tipo misto, nel quale vengono valutati i parametri a lenta evoluzione, relativi a deformazioni/spostamenti di elementi della struttura, temperatura ed umidità relativa, e grandezze a rapida evoluzione, con centinaia di controlli al secondo, relative a fenomeni di natura dinamica.

9.5.1 Introduzione

I file ottenuti dal monitoraggio statico vengono denominati, dal sistema di acquisizione stesso, *Slow.txt*, mentre quelli registrati dal dinamico si dividono in due categorie: *Fast.txt* per le registrazioni periodiche, *A/F/AF.txt* per quelle di superamento delle soglie (rispettivamente per superamento soglia di ampiezza, banda di frequenza, o per entrambe le soglie). Nel presente capitolo vengono analizzati i file di tipo *slow* per valutare l'evoluzione del comportamento di alcune lesioni ritenute significative per la struttura e quelli di tipo *fast* che permettono di esprimere dei primi giudizi sul comportamento globale dell'edificio.

9.5.2 Periodo analizzato: note sul funzionamento del sistema

Nel seguito vengono analizzati i dati rilevati dal sistema di monitoraggio, nel periodo compreso tra il 28 gennaio 2015 (attivazione sistema) ed il 31 maggio 2015. Si annota che, durante il periodo di registrazione dei dati considerato, si sono verificati degli intervalli di interruzione del funzionamento del sistema, di seguito elencati e motivati:

1. Zona Chiesa

- Dati *Fast.txt*: blocco del sistema nel giorno 24.03.15 e nel giorno 31.03.15 per probabile mancanza di corrente;
- Dati *Slow.txt*: blocco del sistema dal 11.05.15 al 21.05.15 per probabile mancanza di corrente;

2. Zona Museo

- Dati *Fast.txt*: blocco del sistema nel giorno 24.03.15 per probabile mancanza di corrente; blocco del sistema dal 31.03.15 al 09.04.15 per probabile mancanza di corrente;
- Dati *Slow.txt*: blocco del sistema dal 31.03.15 al 09.04.15 per probabile mancanza di corrente; blocco del sistema dal 12.05.15 al 21.05.15 per probabile mancanza di corrente; l'inclinometro registra valori di fondo scala dal giorno 19.04.15;

3. Zona Scena

- Dati *Fast.txt*: il sistema funziona correttamente fino al giorno 19.05.15;
- Dati *Slow.txt*: il sistema funziona correttamente fino al giorno 19.05.15;

9.5.3 Analisi dei dati statici di tipo slow

La prima analisi è stata svolta sui dati di temperatura e umidità rilevata dai sensori T-RH 1(*Chiesa*), T-RH 2(*Museo*) per un periodo di controllo di un mese (marzo), al fine di validarne i risultati ottenuti. I dati rilevati dai sensori di temperatura e umidità sono stati confrontati con quelli registrati nella stazione metereologica di Borgo Trento, una tra le più vicine al Teatro Romano, relativamente alle temperature di picco massimo e di picco minimo, in modo da confrontare la l'esattezza dei valori. La stazione metereologica, infatti, mette a disposizione i picchi massimi e minimi di temperatura ed evidenzia i giorni di pioggia.

Marzo

GIORNO	PICCO MASSIMO STAZ.MET.	PICCO MINIMO STAZ.MET.	TEMPERATURA DEL SENSORE ALL'ORA DEL PICCO MASSIMO	TEMPERATURA DEL SENSORE ALL'ORA DEL PICCO MINIMO	STIMA ERRORE PICCO MASSIMO	STIMA ERRORE PICCO MINIMO
1	14,4	4,6	13,680	5,784	0,72	-1,184
2	11,6	7,4	12,074	7,199	-0,474	0,201
3	15,4	4,3	14,417	5,242	0,983	-0,942
4	15,3	5,7	13,958	6,664	1,342	-0,964
5	13,9	4,5	13,900	5,881	0	-1,381
6	14,4	4,0	12,787	4,734	1,613	-0,734
7	14,7	3,3	13,523	4,224	1,177	-0,924
8	15,1	3,3	13,346	4,715	1,754	-1,415
9	12,3	4,4	11,331	6,142	0,969	-1,742
10	16,7	4,4	14,781	5,867	1,919	-1,467
11	18,1	7,6	15,871	8,321	2,229	-0,721
12	16,4	6,6	15,309	7,702	1,091	-1,102
13	14,5	4,5	14,192	5,458	0,308	-0,958
14	14,5	5,2	13,325	6,252	1,175	-1,052
15	13,4	5,9	13,039	7,305	0,361	-1,405
16	10,9	8,6	10,346	9,016	0,554	-0,416
17	16,4	9,3	15,719	10,392	0,681	-1,092
18	16,4	8,4	15,042	10,046	1,358	-1,646
19	16,8	6,4	15,904	7,251	0,896	-0,851
20	16,7	7,3	16,134	8,545	0,566	-1,245
21	14,4	8,1	13,840	9,589	0,56	-1,489
22	13,6	7,8	13,053	8,827	0,547	-1,027
23	17,9	6,6	16,728	7,656	1,172	-1,056

24	16,8	8,8	16,775	9,596	0,025	-0,796
25	15,9	10,9	14,970	11,796	0,93	-0,896
26	13,3	11,1	13,118	11,492	0,182	-0,392
27	18,2	10,6	17,082	11,906	1,118	-1,306
28	19,2	9,7	18,572	8,749	0,628	0,951
29	18,1	8,6	16,941	9,350	1,159	-0,75
30	22,3	7,6	21,854	9,701	0,446	-2,101
31	22,8	9,4	20,617	10,240	2,183	-0,84

Si è notato che le temperature misurate dalla strumentazione posta al Teatro Romano sono leggermente differenti da quelle registrate dalla stazione meteorologica di Borgo Trento. La differenza di temperatura registrata nei due casi è probabilmente da imputare al fatto che tra la misurazione della stazione e quella del sensore intercorrono una decina di minuti circa. Questa leggera variazione inoltre può essere dovuta alla diversa esposizione nord/sud e quindi ad una posizione più o meno esposta. Si nota comunque che i picchi minimi e massimi in entrambi si registrano più o meno alla stessa ora. Per quanto riguarda le piogge, la stazione meteorologica indica:

GIORNO	04/03	16/03	22/03	25/03	26/03
INTENSITA' PIOGGIA (mm)	4,3	0,5	1,8	6,9	9,1

Se si confronta il grafico della temperatura con quello dell'umidità, si nota una corrispondenza temporale dei principali picchi negativi di RH con i picchi positivi di T, e viceversa, nel rispetto della relazione fisica che lega i due parametri.

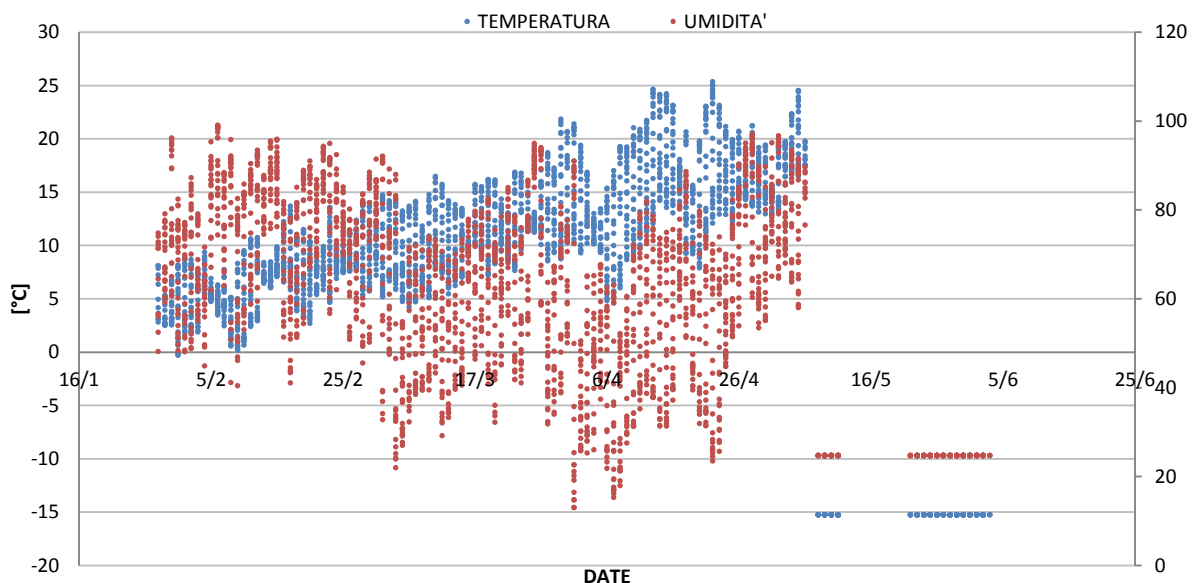


Fig.9.19 – Grafico delle misurazioni di temperatura e umidità per i primi due mesi di funzionamento del sistema di monitoraggio

Le strumentazioni nel Teatro Romano sono state posizionate nella *Zona Chiesa* esposta a sud-est e nella *Zona Museo* esposta a nord-ovest, in zone riparate. Si è ritenuto utile collocarle nelle due estremità del Teatro in quanto il comportamento termo-igrometrico è diverso a causa dell'esposizione diversa.

Per quanto riguarda la strumentazione nel *lato Chiesa*, i sensori esterni mostrano una variabilità ciclica quotidiana, con una attesa escursione termica giornaliera, a conferma della bontà dei dati acquisiti. Inoltre l'andamento della temperatura media giornaliera risulta, come spiegato in precedenza, molto simile a quello dei dati della stazione meteo di Borgo Trento. Analizzando quindi il grafico della temperatura, sono evidenti le escursioni termiche notte-giorno (picchi di massimo e minimo) e tratti costanti in corrispondenza delle giornate piovose-nuvolose senza grandi escursioni termiche.

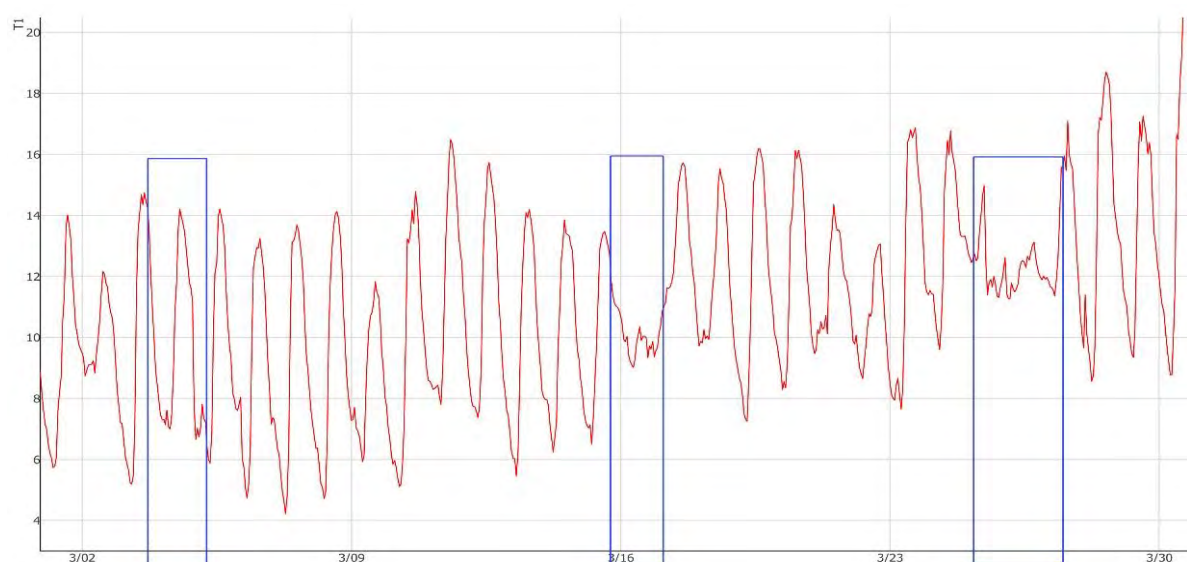


Fig. 9.20 – Grafico del sensore di temperatura in Zona Museo

Analoga considerazione invece non è possibile per i sensori posizionati sul lato Museo. Dall'analisi dei dati questi sensori risultano non funzionare correttamente. Il sensore della temperatura registra un valore costante di circa 10°C, con picchi fino a -20°C, mentre il sensore di umidità registra valori di RH anche del 100%.

A causa del mal funzionamento di questi sensori, i dati relativi non verranno usati al fine dell'analisi. Si utilizzeranno i dati di T e RH relativi alla *zona Chiesa* anche per i sensori presenti nella *zona Museo*, al fine di avere dei valori attendibili, nonostante sia evidente una differente esposizione e quindi una leggera differenza di temperatura tra le due zone di studio. Analoga considerazione viene fatta per i sensori nella *zona Scena*, poiché in essa non sono

stati posizionati sensori di temperatura e umidità relativa, in quanto l'esposizione è simile a quella della *zona Chiesa*.

Si consiglia comunque un sopralluogo per verificare il malfunzionamento e l'eventuale causa e quindi procedere alla riparazione del danno.

Di seguito verranno analizzati i segnali dei trasduttori di spostamento del primo quadrimestre di registrazione dei dati (28/01/2015 – 31/05/2015) in funzione del tempo e confrontati con l'andamento della temperatura esterna rilevata dai sensori ambientali. I canali sono stati raggruppati a seconda della Zona e delle lesioni monitorate. Alcuni sensori hanno palesato dei disturbi durante il periodo di campionamento, e i relativi dati disturbati non sono stati presi in considerazione, ma sono comunque visibili dai grafici.

Zona Chiesa

In questo gruppo sono stati considerati i 4 trasduttori di spostamento posti a cavallo delle principali lesioni che interessano l'arco di ingresso puntellato e un setto della zona Chiesa.

PC_01

Vengono analizzati i dati del trasduttore di spostamento posto in sommità del terzo setto denominato B3, a cavallo di una lesione verticale formatasi in corrispondenza della zona di laterizio aggiunto negli interventi di restauro, posta all'estremità esterna del setto. Il potenziometro rileva la tendenza della lesione ad aprirsi o chiudersi, offrendo valutazioni utili per l'attivazione del meccanismo di distacco di una porzione del setto.

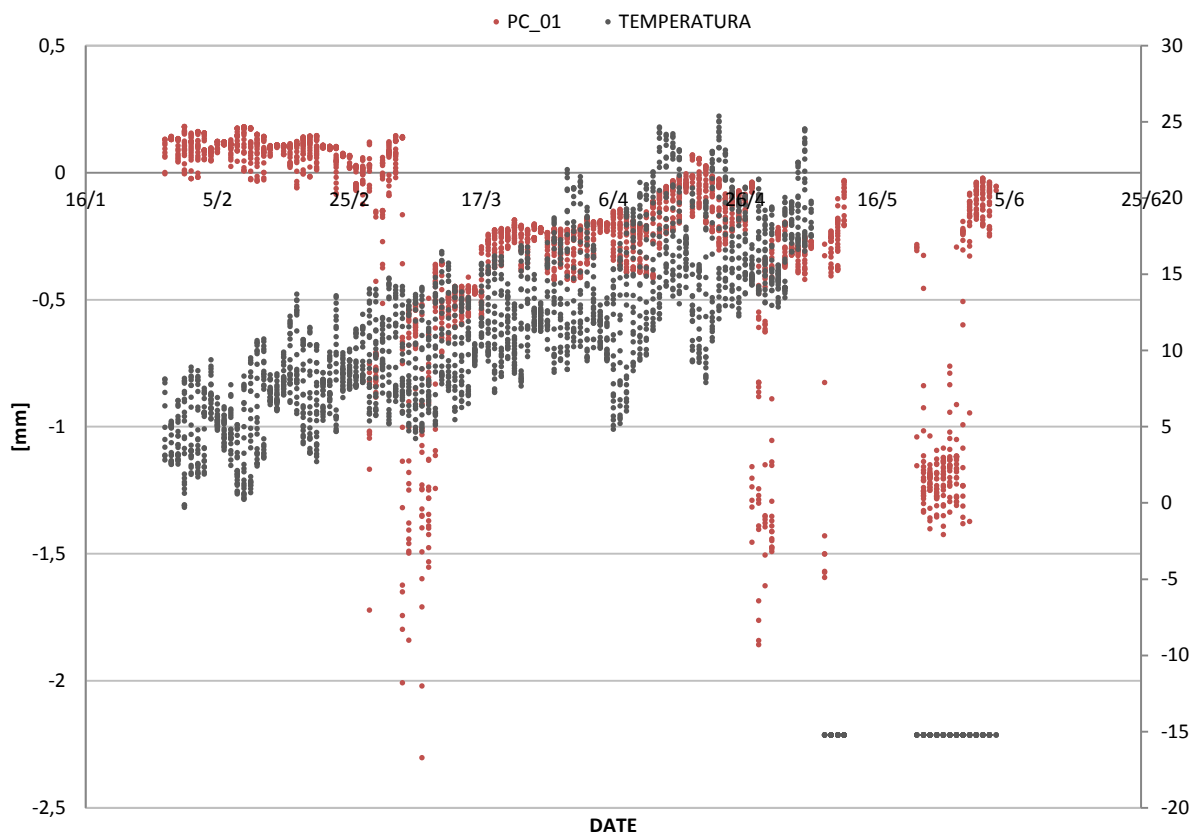


Fig. 9.21 – Grafico temporale degli spostamenti

PC_01	Spostamento [mm]	Data	T [°C]	RH [%]
max	0,182	31/01/15	-0,162	77,602
min	-2,303	08/03/15	11,99	41,538
dev. st.	0,397			

Fig. 9.22 – Tabella riassuntiva dei risultati del potenziometro PC_01

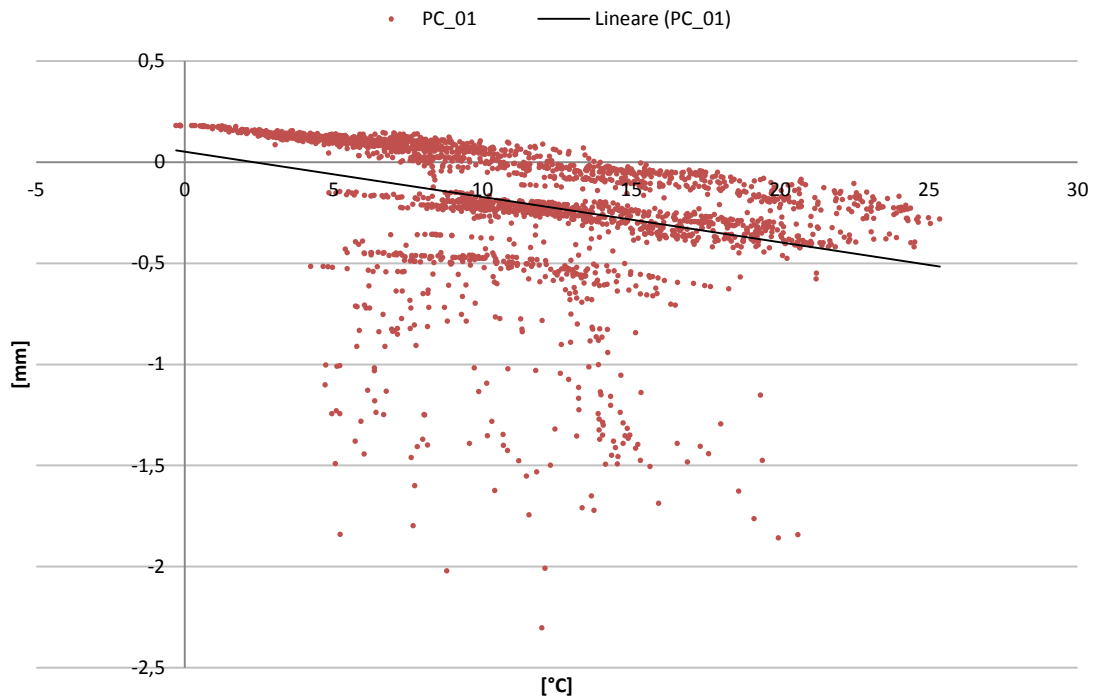


Fig. 9.23 – Grafico dello spostamento in funzione della temperatura

Con l'aumento della temperatura il sensore ha registrato una tendenza alla chiusura della lesione raggiungendo valori prossimi a -2,00 mm in chiusura. Tale andamento risulta essere legato al variare ciclico della temperatura con una tendenza a chiudere la lesione al crescere della temperatura.

PC_02

Vengono analizzati i dati del trasduttore di spostamento posto a cavallo della lesione presente sull'arco d'ingresso della *parados* orientale. L'arco è in uno stato di forte degrado e si sono formate lesioni verticali tra i blocchi di tufo. Il potenziometro è a cavallo della fessura vicino all'angolata, nella facciata esterna e rileva la tendenza al distacco della stessa e all'apertura o chiusura della lesione verticale.

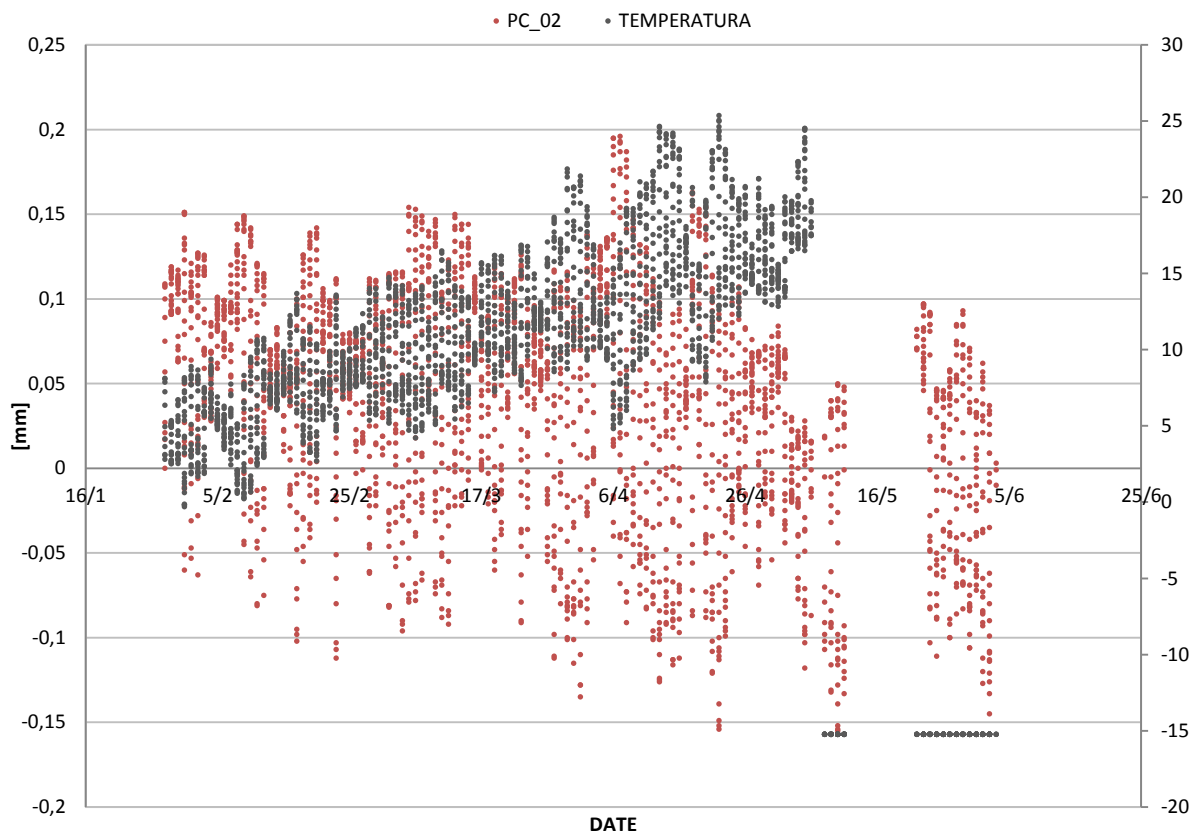


Fig. 9.24 – Grafico temporale degli spostamenti

PC_02	Spostamento [mm]	Data	T [°C]	RH [%]
max	0,196	07/04/15	5,203	59,244
min	-0,155	10/05/15	-15,229 (err)	24,77 (err)
dev. st.	0,067			

Fig. 9.25 – Tabella riassuntiva dei risultati del potenziometro PC_02

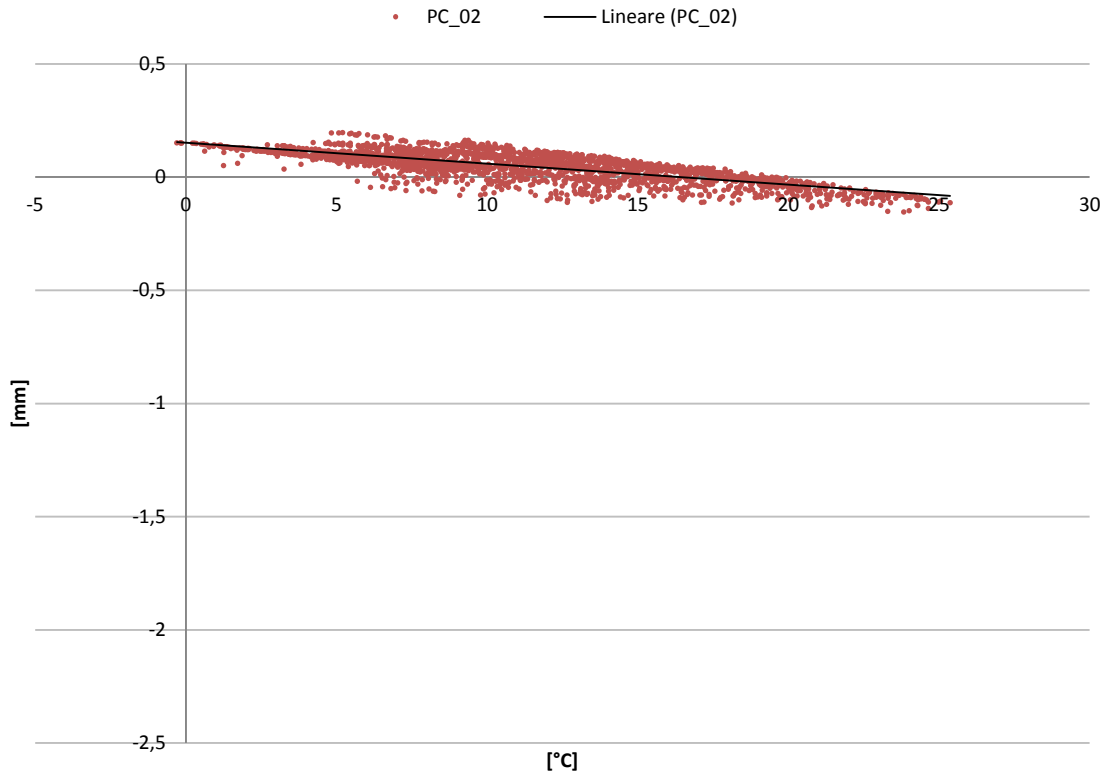


Fig. 9.26 – Grafico dello spostamento in funzione della temperatura

Con l'aumento della temperatura il sensore ha registrato una tendenza alla chiusura della lesione raggiungendo valori prossimi a -0.15 mm in chiusura. Tale andamento risulta essere legato al variare ciclico della temperatura con una tendenza a chiudere la lesione al crescere della temperatura.

PC_03

Vengono analizzati i dati del trasduttore di spostamento posto a cavallo della lesione presente sull'arco d'ingresso della *parados* orientale. L'arco è in uno stato di forte degrado e si sono formate lesioni verticali tra i blocchi di tufo. Il potenziometro è stato posizionato in corrispondenza della discontinuità tra il laterizio del contrafforte e la pietra dell'arco d'ingresso del Teatro e rileva la tendenza dei blocchi puntellati ad allontanarsi o avvicinarsi.

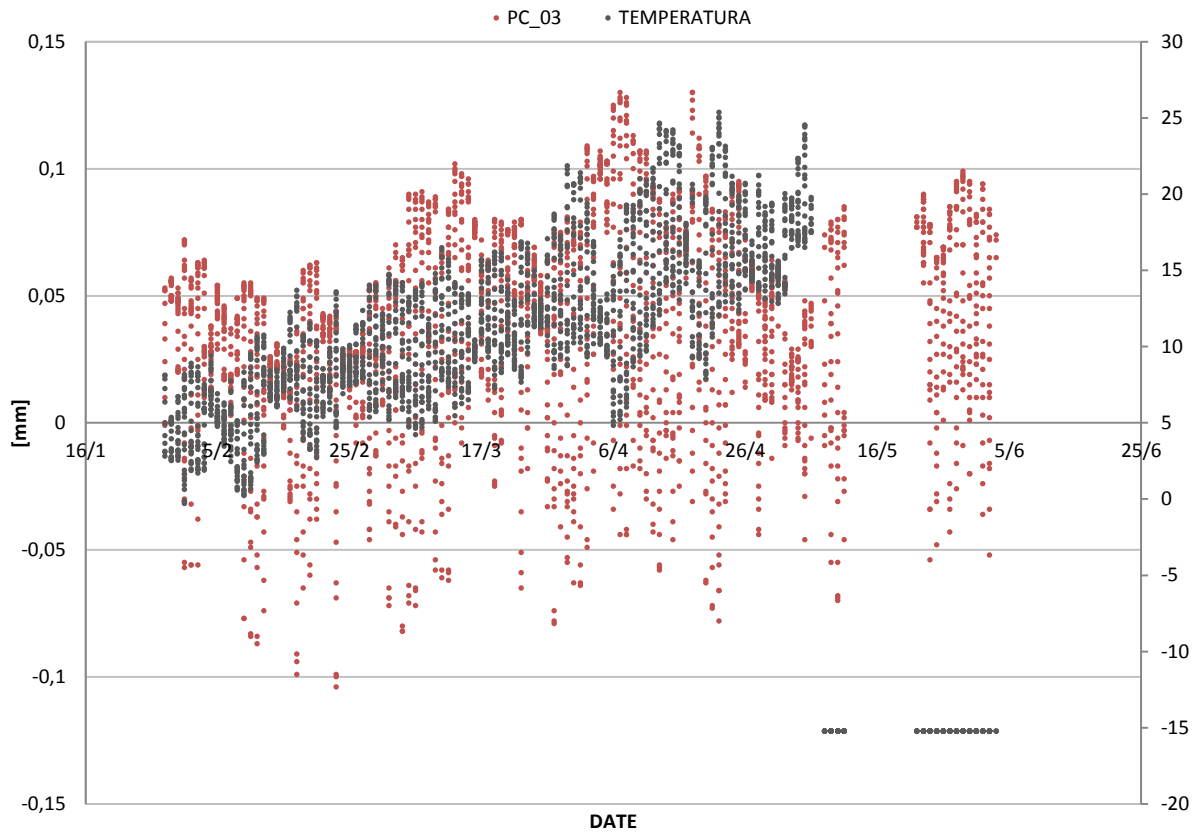


Fig. 9.27 – Grafico temporale degli spostamenti

PC_03	Spostamento [mm]	Data	T [°C]	RH [%]
max	0,13	18/04/15	9,374	87,603
min	-0,104	23/02/15	12,663	63,825
dev. st.	0,039			

Fig. 9.28 – Tabella riassuntiva dei risultati del potenziometro PC_03

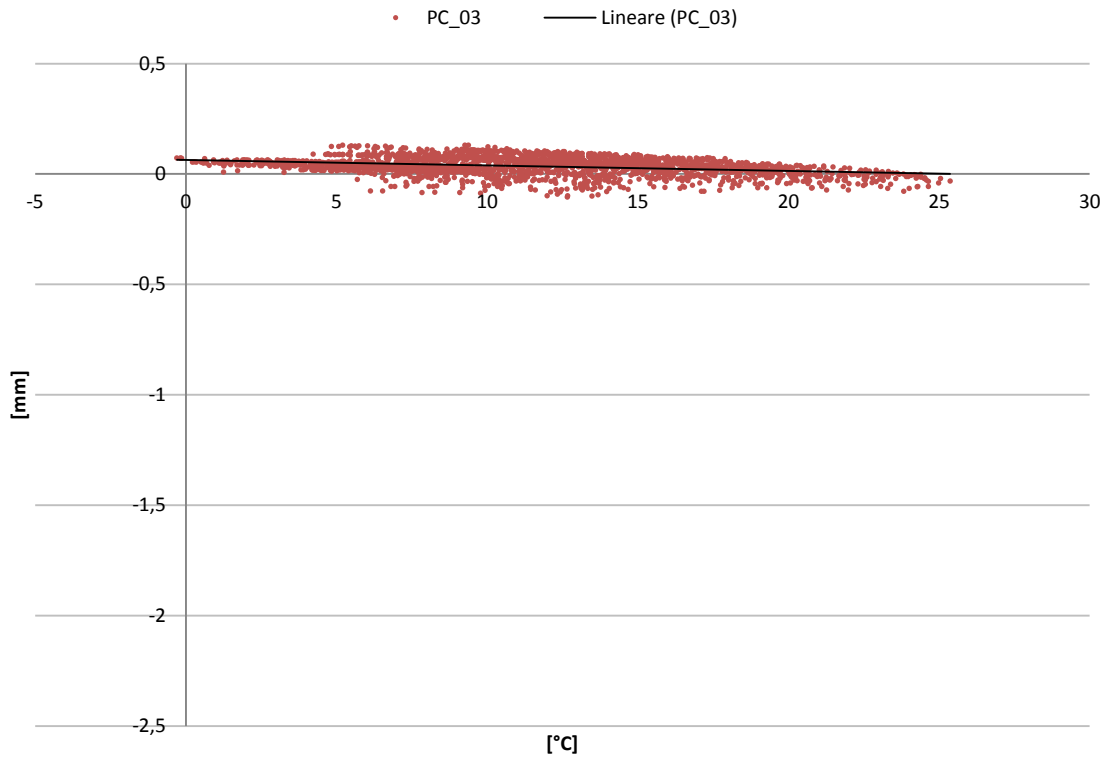


Fig. 9.29 – Grafico dello spostamento in funzione della temperatura

Con l'aumento della temperatura il sensore ha registrato una tendenza alla chiusura della lesione raggiungendo valori prossimi a -0.1 mm in chiusura. Tale andamento risulta essere legato al variare ciclico della temperatura con una tendenza a chiudere la lesione al crescere della temperatura.

PC_04

Vengono analizzati i dati del trasduttore di spostamento posto a cavallo della lesione presente sullo spigolo della parete dell'arco perpendicolare all'arco puntellato d'ingresso. Il potenziometro è stato posizionato a cavallo della fessura diagonale e rileva la tendenza della stessa ad aprire o chiudere, offrendo valutazioni utili per la tendenza all'attivazione del cinematismo del distacco dell'angolata.

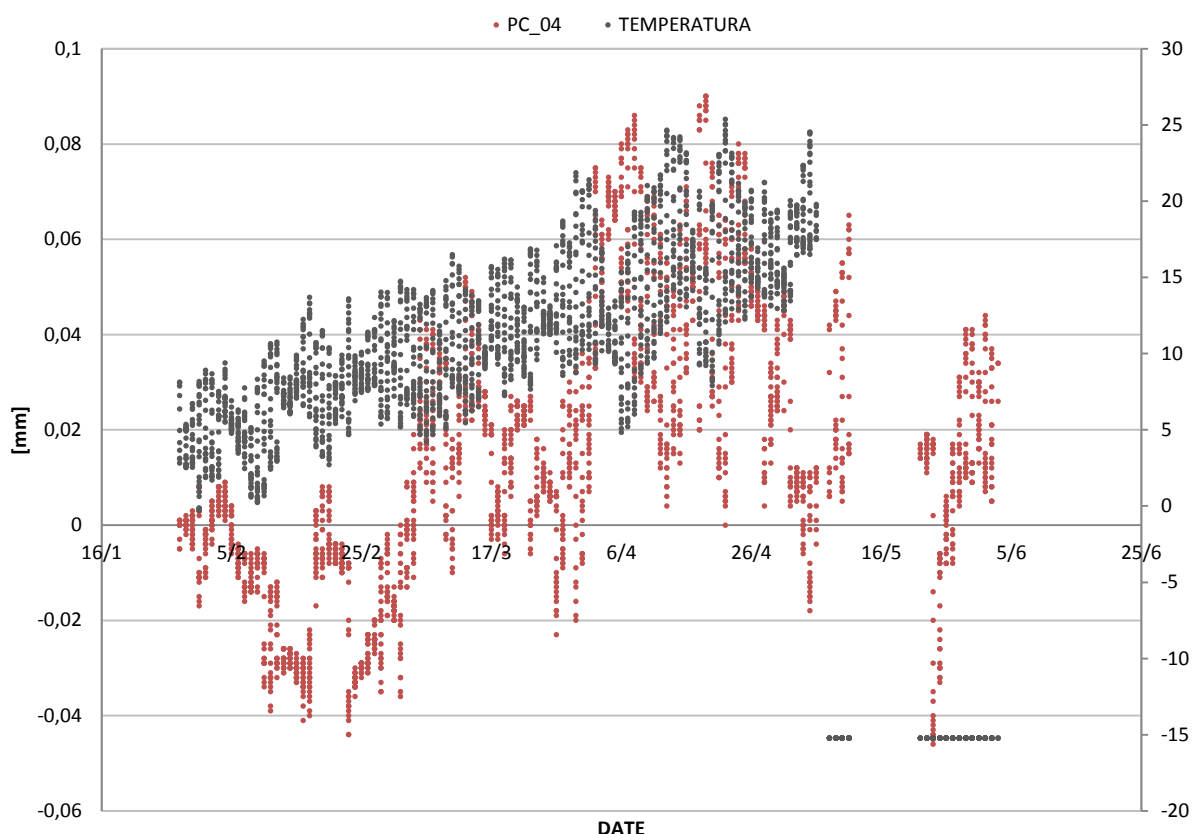


Fig. 9.30 – Grafico temporale degli spostamenti

PC_04	Spostamento [mm]	Data	T [°C]	RH [%]
max	0,09	19/04/15	9,856	72,479
min	-0,046	24/05/15	-15,231 (err)	24,769 (err)
dev. st.	0,028			

Fig. 9.31 – Tabella riassuntiva dei risultati del potenziometro PC_04

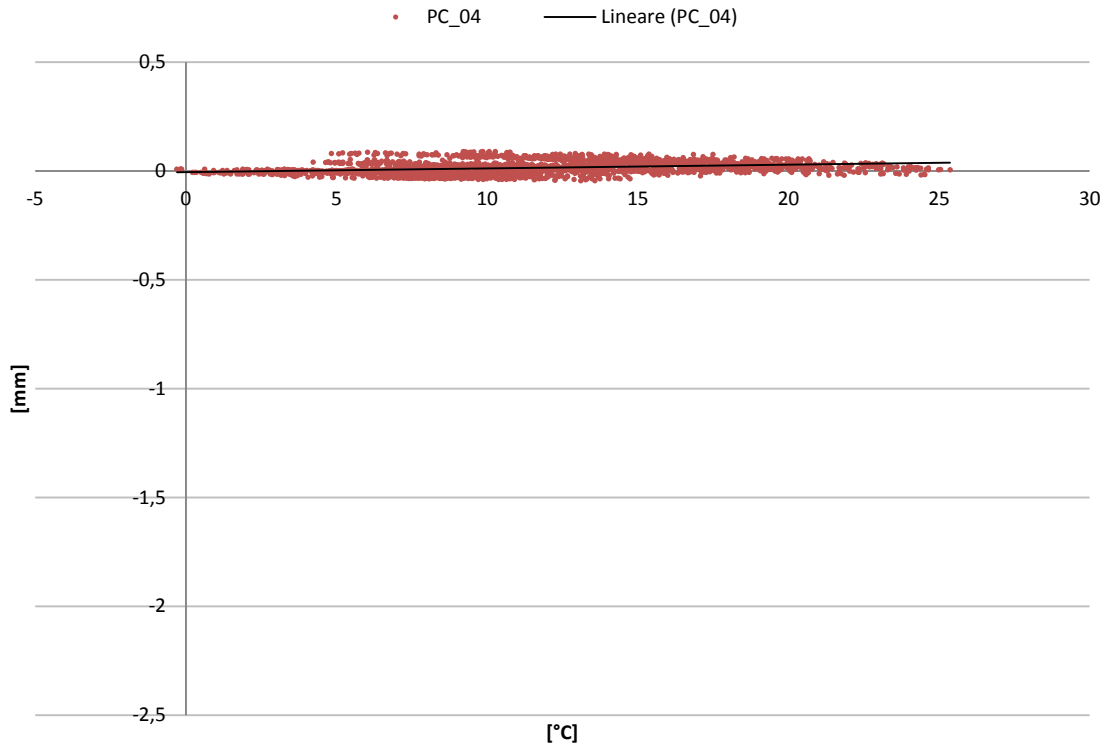


Fig. 9.32 – Grafico dello spostamento in funzione della temperatura

Con l'aumento della temperatura il sensore ha registrato una tendenza all'apertura della lesione raggiungendo valori prossimi a 0.09 mm in apertura. Tale andamento risulta essere legato al variare ciclico della temperatura con una tendenza ad aprire la lesione al crescere della temperatura.

In_1C

Vengono analizzati i dati del trasduttore di spostamento posto sulla cima del setto denominato B3. L'inclinometro è posto sulla parete per misurare le variazioni di inclinazione della superficie, da cui sono attesi spostamenti con componenti rotazionali.

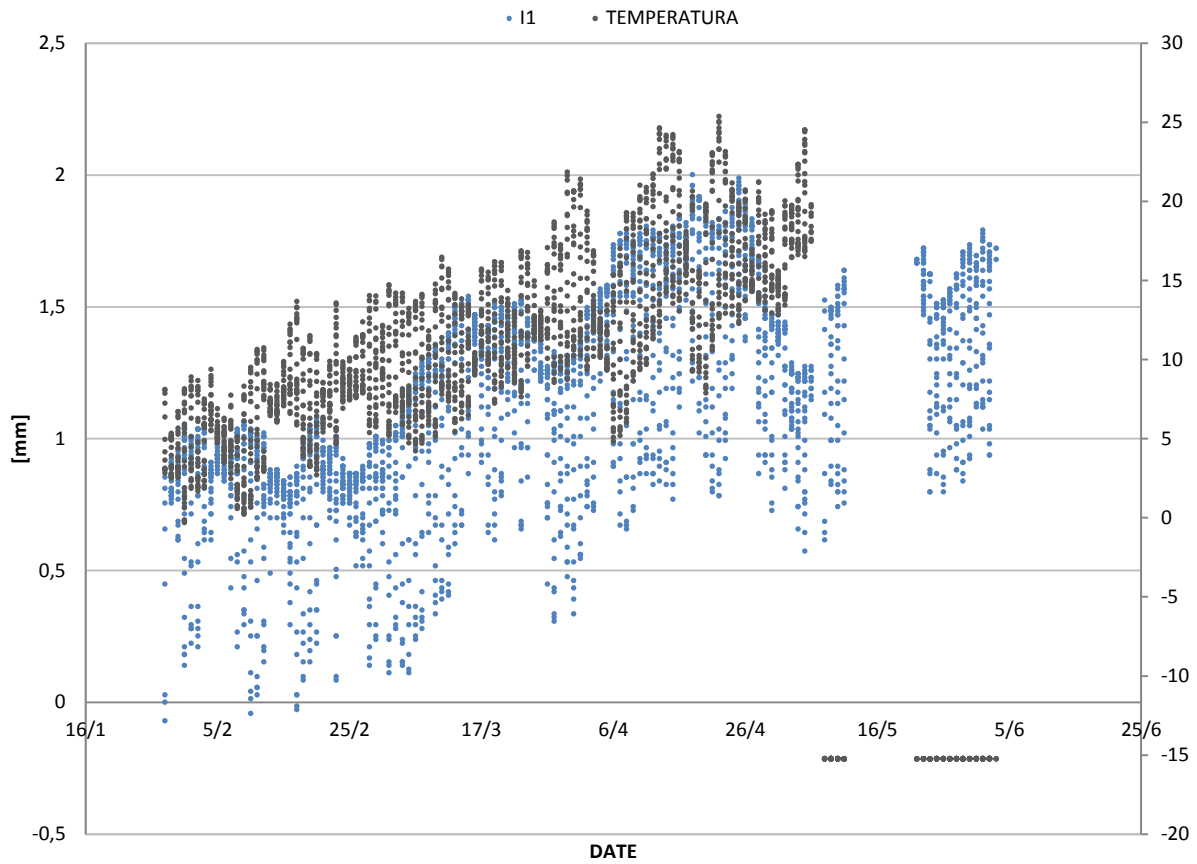


Fig. 9.33 – Grafico temporale degli spostamenti

PC_04	Spostamento [mm]	Data	T [°C]	RH [%]
max	2,002	18/04/15	9,37	87,60
min	-0,07	28/01/15	8,08	48,14
dev. st.	0,39			

Fig. 9.34 – Tabella riassuntiva dei risultati dell'inclinometro *In_1C*

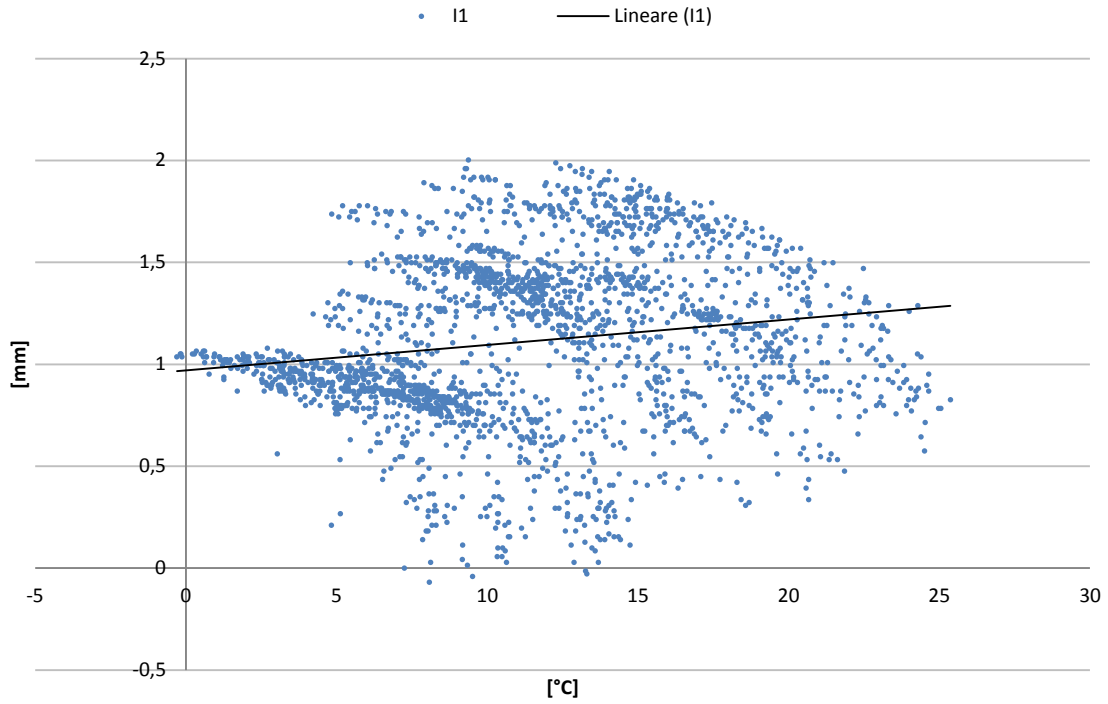


Fig. 9.35 – Grafico dello spostamento in funzione della temperatura

Con l'aumento della temperatura il sensore ha registrato una tendenza all'apertura raggiungendo valori prossimi a 2.00 mm in apertura. Tale andamento risulta essere legato al variare ciclico della temperatura con una tendenza ad aprire al crescere della temperatura.

Zona Museo

In questo gruppo sono stati considerati i 4 trasduttori di spostamento posti a cavallo delle principali lesioni che interessano la *zona Museo* e i relativi *setti*.

PM_01

Vengono analizzati i dati del trasduttore di spostamento posto nella parete di fondo dell'arcovolo, compresa tra il primo e il secondo setto, a cavallo di una lesione verticale e rileva la tendenza della stessa ad aprire o chiudere.

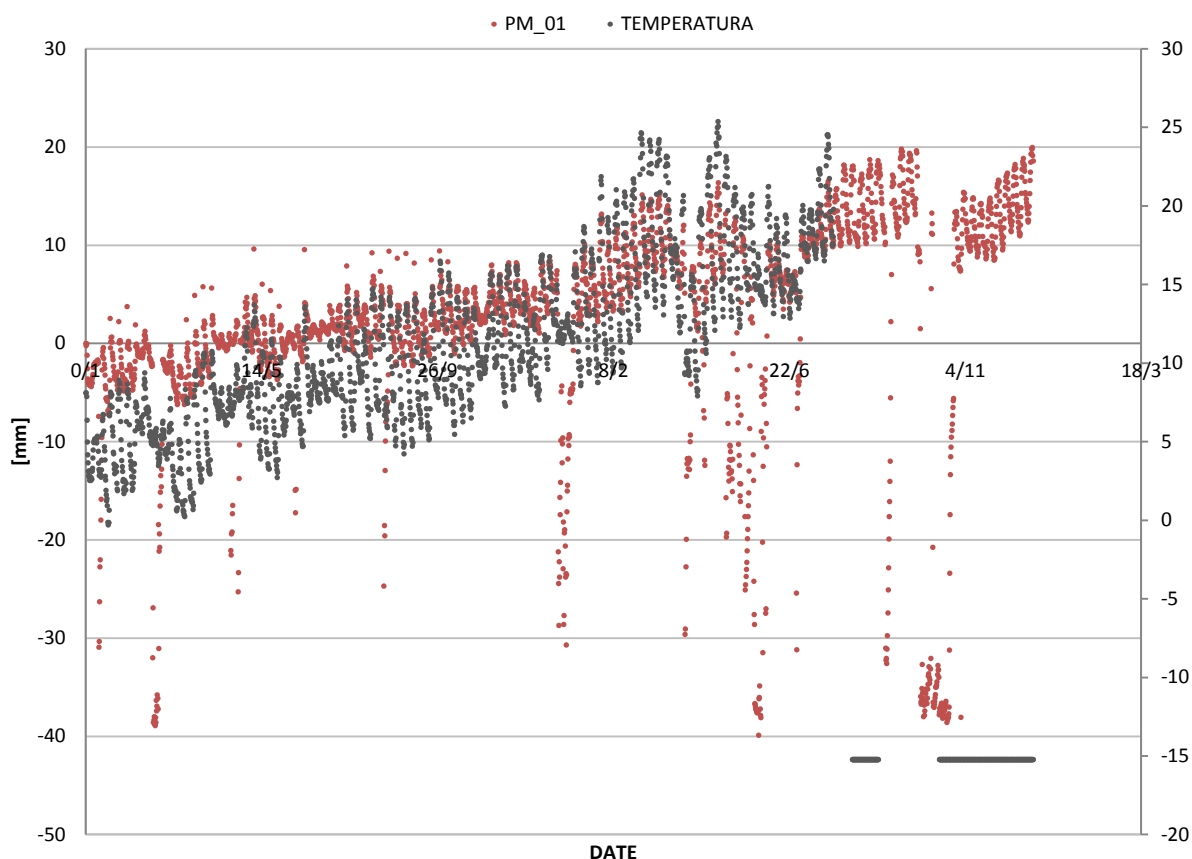


Fig. 9.36 – Grafico temporale degli spostamenti

PM_01	Spostamento [mm]	Data	T [°C]	RH [%]
max	19,957	02/06/15	-15,23 (err)	24,77 (err)
min	-39,889	27/04/15	15,938	88,543
dev. st.	11,426			

Fig. 9.37 – Tabella riassuntiva dei risultati del potenziometro PM_01

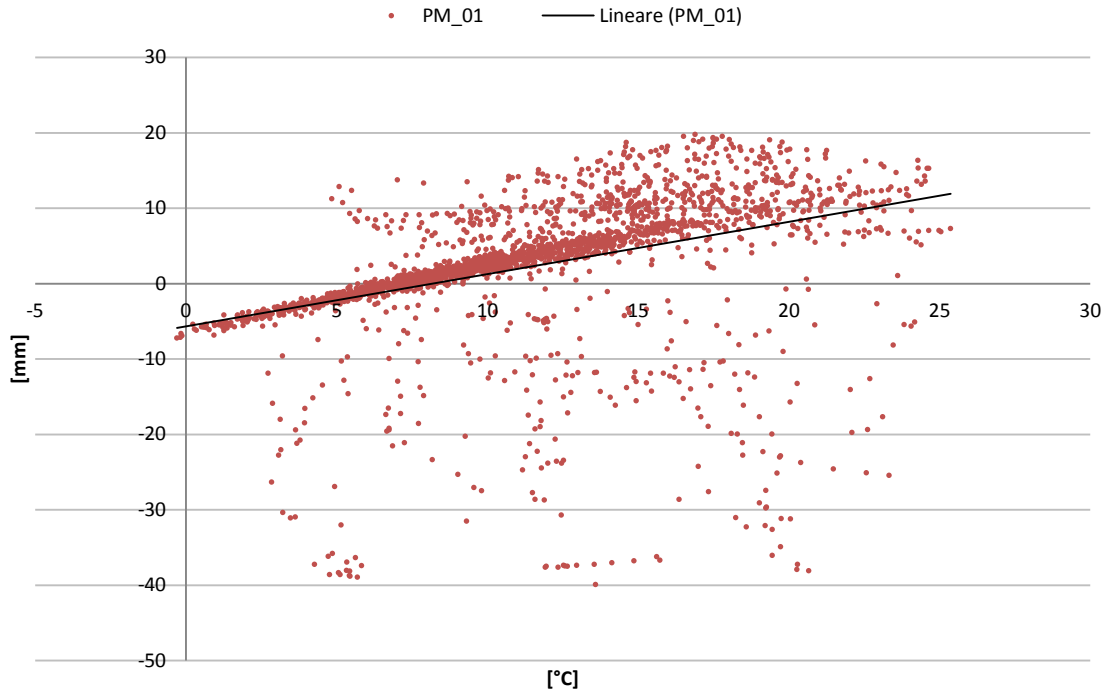


Fig. 9.38 – Grafico dello spostamento in funzione della temperatura

Con l'aumento della temperatura il sensore ha registrato una tendenza all'apertura della lesione raggiungendo valori prossimi a 19,95 mm in apertura. Tale andamento risulta essere legato al variare ciclico della temperatura con una tendenza ad aprire la lesione al crescere della temperatura.

PM_02

Vengono analizzati i dati del trasduttore di spostamento posto nel punto di innesto del setto A2 con la passerella della precinzione. Il potenziometro è stato posizionato a cavallo della fessura verticale e rileva la tendenza della stessa ad aprire o chiudere.

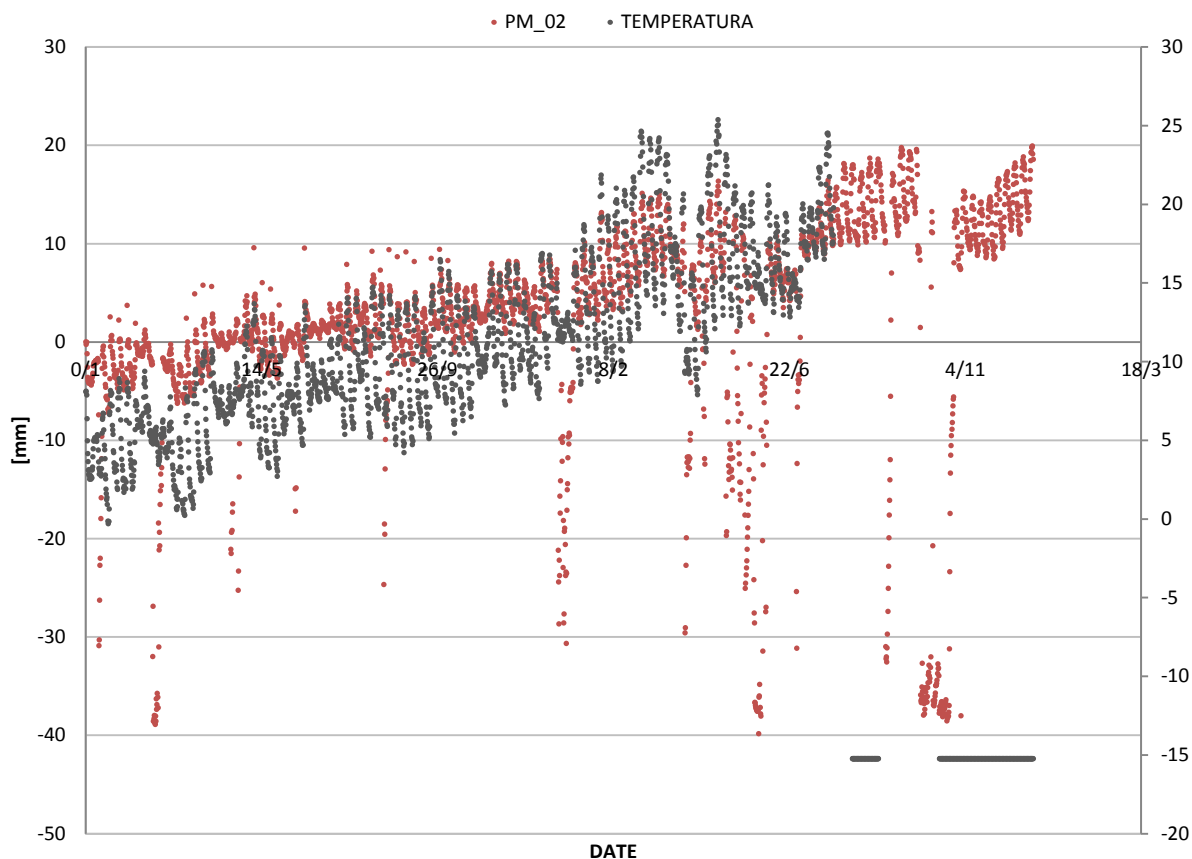


Fig. 9.39 – Grafico temporale degli spostamenti

PM_02	Spostamento [mm]	Data	T [°C]	RH [%]
max	19,934	02/06/15	-15,23 (err)	24,77 (err)
min	-39,835	27/04/15	15,938	88,543
dev. st.	11,412			

Fig. 9.40 – Tabella riassuntiva dei risultati del potenziometro PM_02

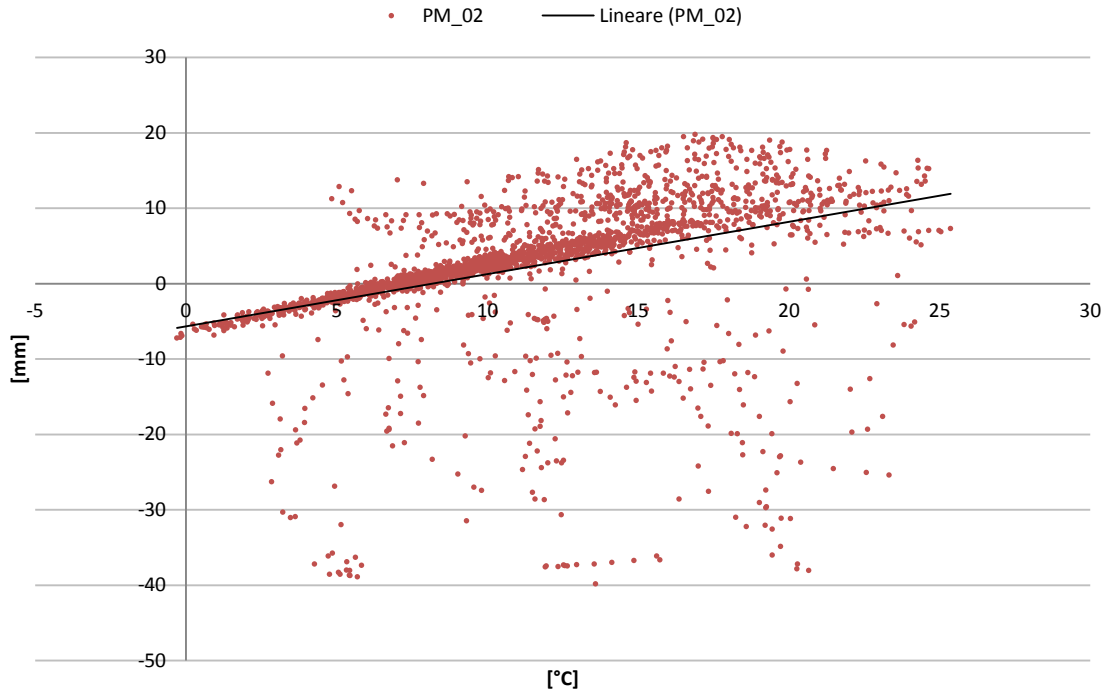


Fig. 9.41 – Grafico dello spostamento in funzione della temperatura

Con l'aumento della temperatura il sensore ha registrato una tendenza all'apertura della lesione raggiungendo valori prossimi a 19,93 mm in apertura. Tale andamento risulta essere legato al variare ciclico della temperatura con una tendenza ad aprire la lesione al crescere della temperatura.

PM_03

Vengono analizzati i dati del trasduttore di spostamento posto a cavallo della lesione che interessa una porzione del primo setto. Il sensore è posto circa ad un metro da terra e misura la tendenza della fessura ad allargarsi o avvicinarsi.

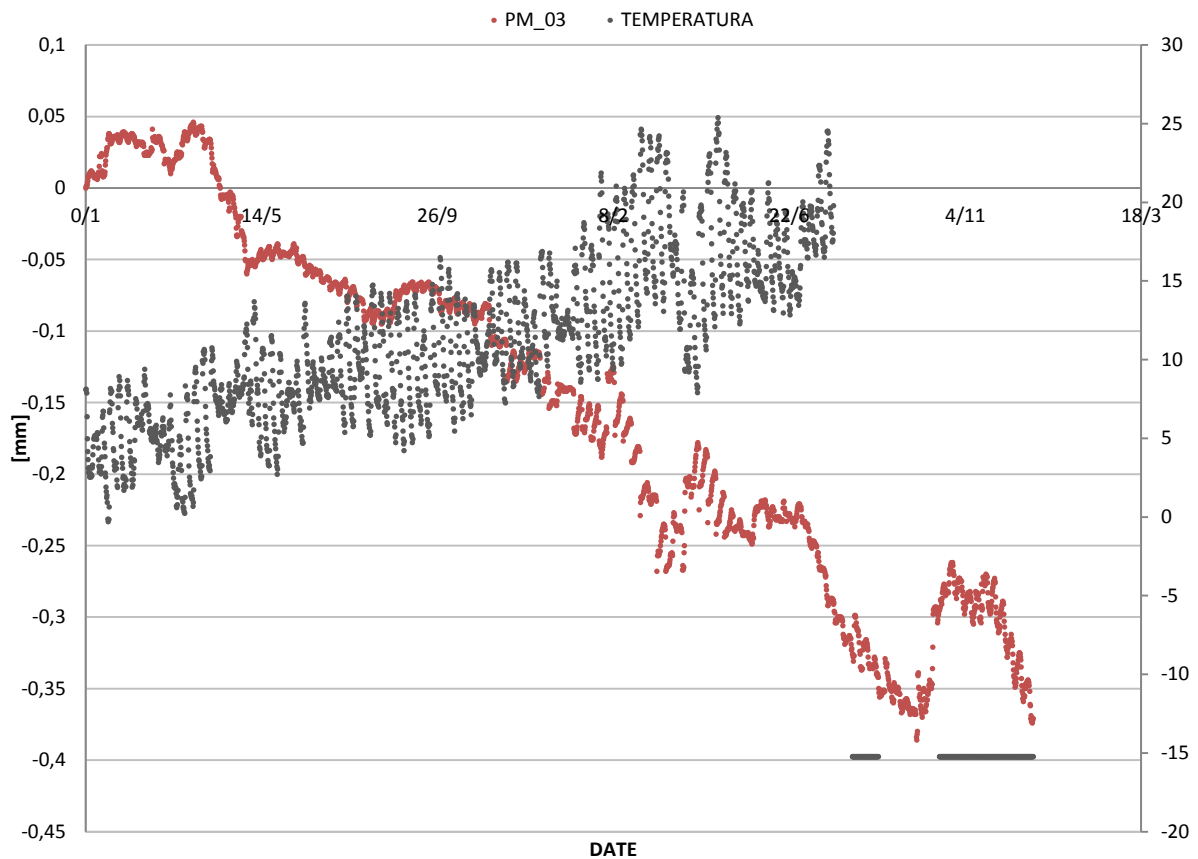


Fig. 9.42 – Grafico temporale degli spostamenti

PM_03	Spostamento [mm]	Data	T [°C]	RH [%]
max	0,046	10/02/15	0,927	83,454
min	-0,386	19/05/15	-	-
dev. st.	0,12			

Fig. 9.43 – Tabella riassuntiva dei risultati del potenziometro PM_03

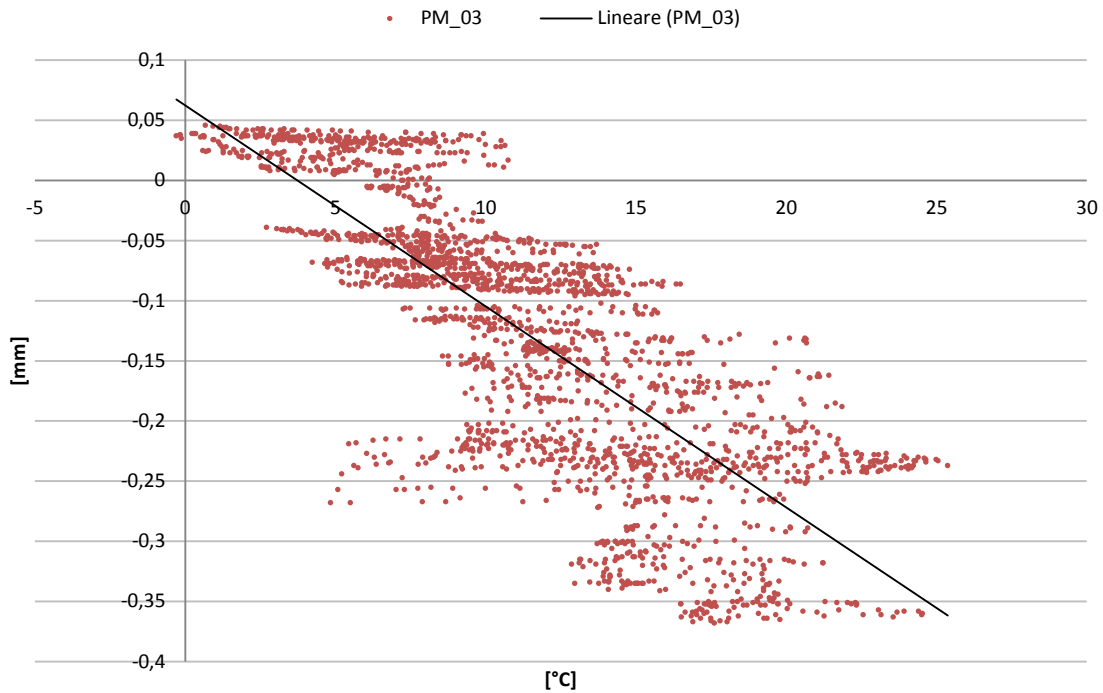


Fig. 9.44 – Grafico dello spostamento in funzione della temperatura

Con l'aumento della temperatura il sensore ha registrato una tendenza all'apertura della lesione raggiungendo valori prossimi a 0,04 mm in apertura. Tale andamento risulta essere legato al variare ciclico della temperatura con una tendenza ad aprire la lesione al crescere della temperatura.

PM_04

Vengono analizzati i dati del trasduttore di spostamento posto a cavallo della lesione che interessa una porzione del setto denominato A2. Il sensore è posto circa a due metri da terra e misura la tendenza della fessura ad allargarsi o avvicinarsi.

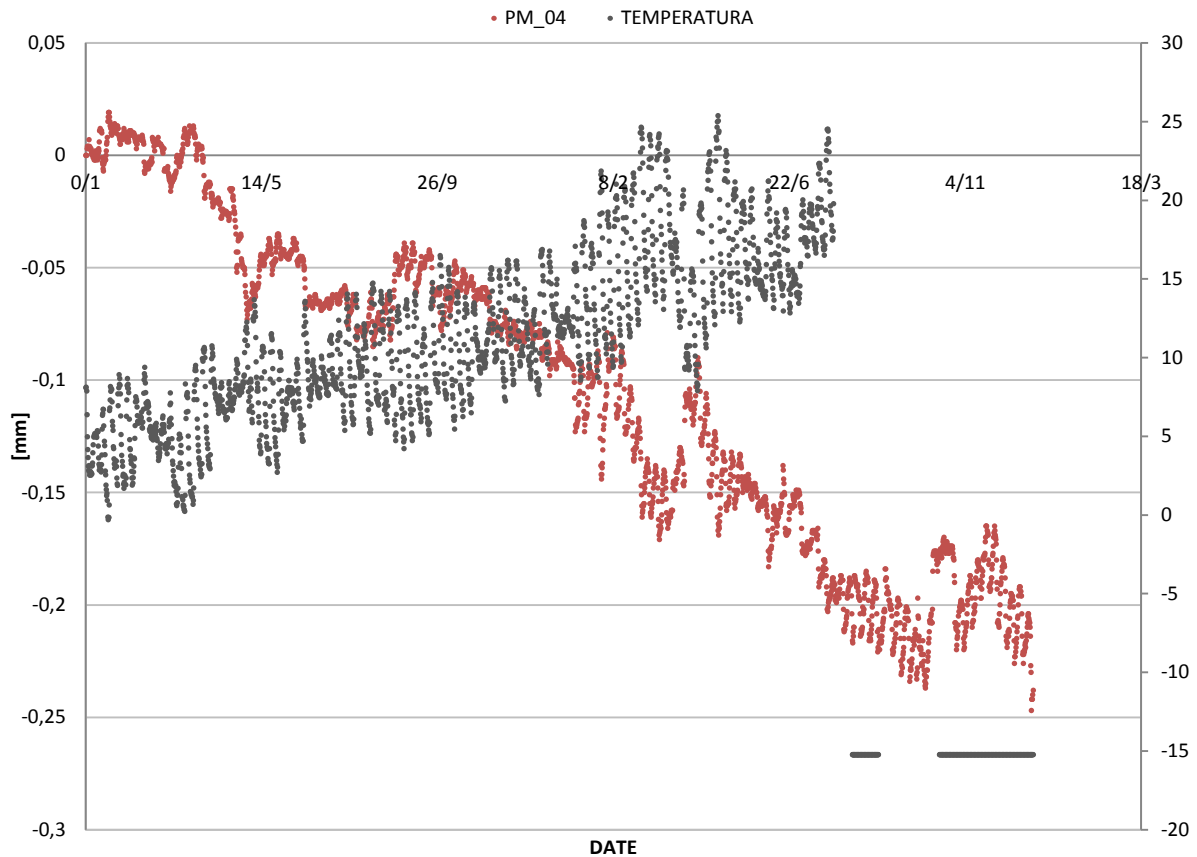


Fig. 9.45 – Grafico temporale degli spostamenti

PM_04	Spostamento [mm]	Data	T [°C]	RH [%]
max	0,019	31/01/15	-0,181	80,908
min	-0,247	02/06/15	-15,23 (err)	24,77 (err)
dev. st.	0,07			

Fig. 9.46 – Tabella riassuntiva dei risultati del potenziometro PM_04

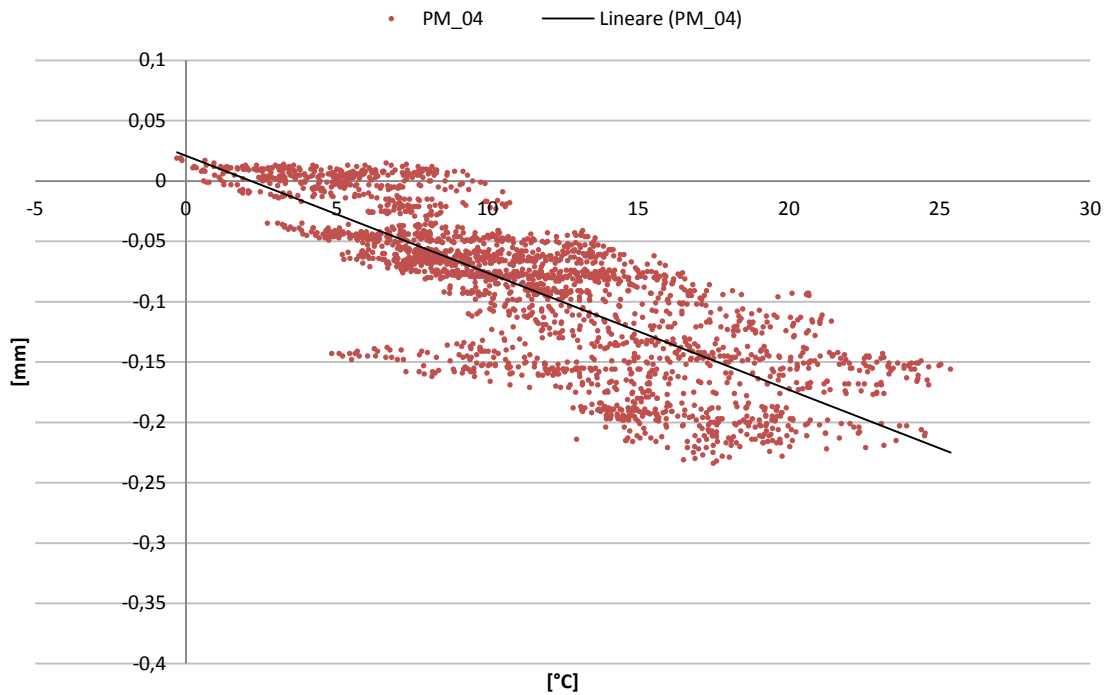


Fig. 9.47 – Grafico dello spostamento in funzione della temperatura

Con l'aumento della temperatura il sensore ha registrato una tendenza alla chiusura della lesione raggiungendo valori prossimi a -0,24 mm in chiusura. Tale andamento risulta essere legato al variare ciclico della temperatura con una tendenza a chiudere la lesione al crescere della temperatura.

In_1M

Vengono analizzati i dati del trasduttore di spostamento posto sulla cima del setto denominato A3. L'inclinometro è posto sulla parete per misurare le variazioni di inclinazione della superficie, da cui sono attesi spostamenti con componenti rotazionali.

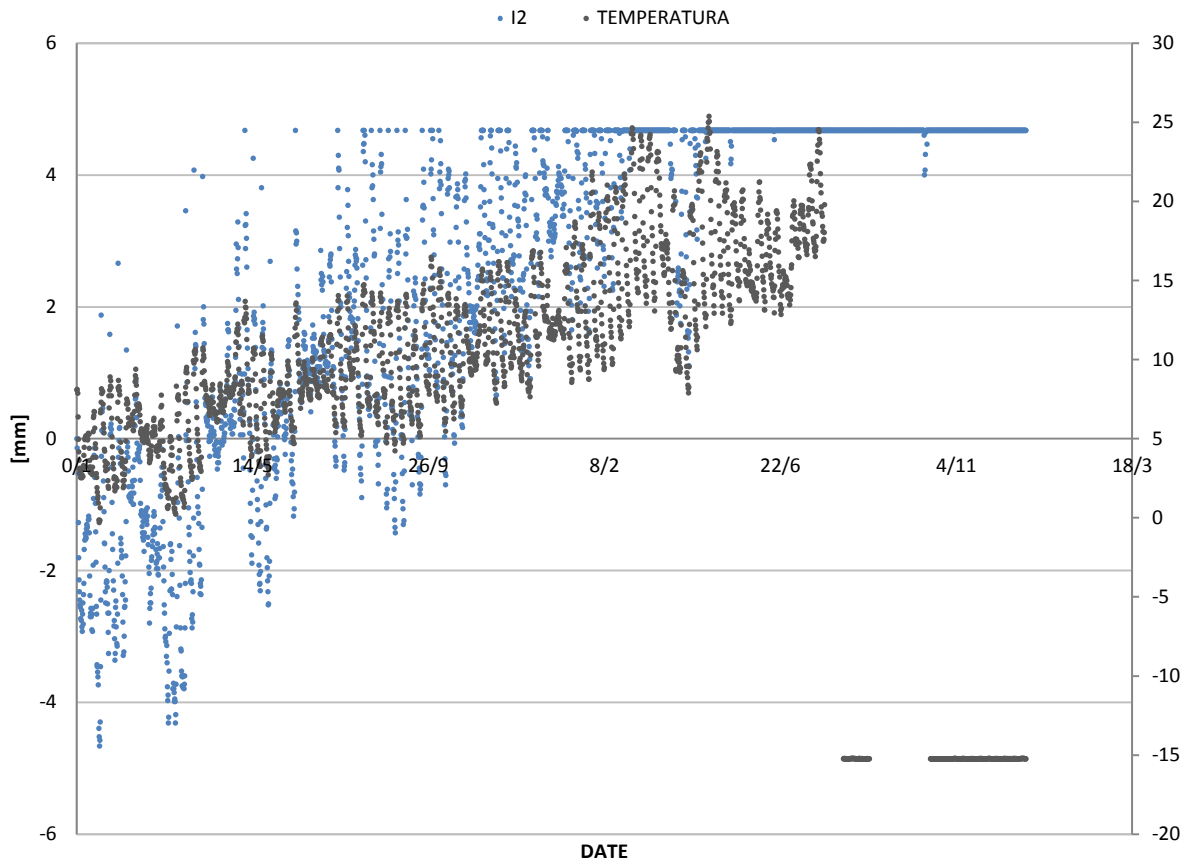


Fig. 9.48 – Grafico temporale degli spostamenti

PM_04	Spostamento [mm]	Data	T [°C]	RH [%]
max	4,676	17/02/15	12,669	52,017
min	-4,662	31/01/15	-0,181	80,908
dev. st.	2,42			

Fig. 9.49 – Tabella riassuntiva dei risultati del potenziometro PM_04

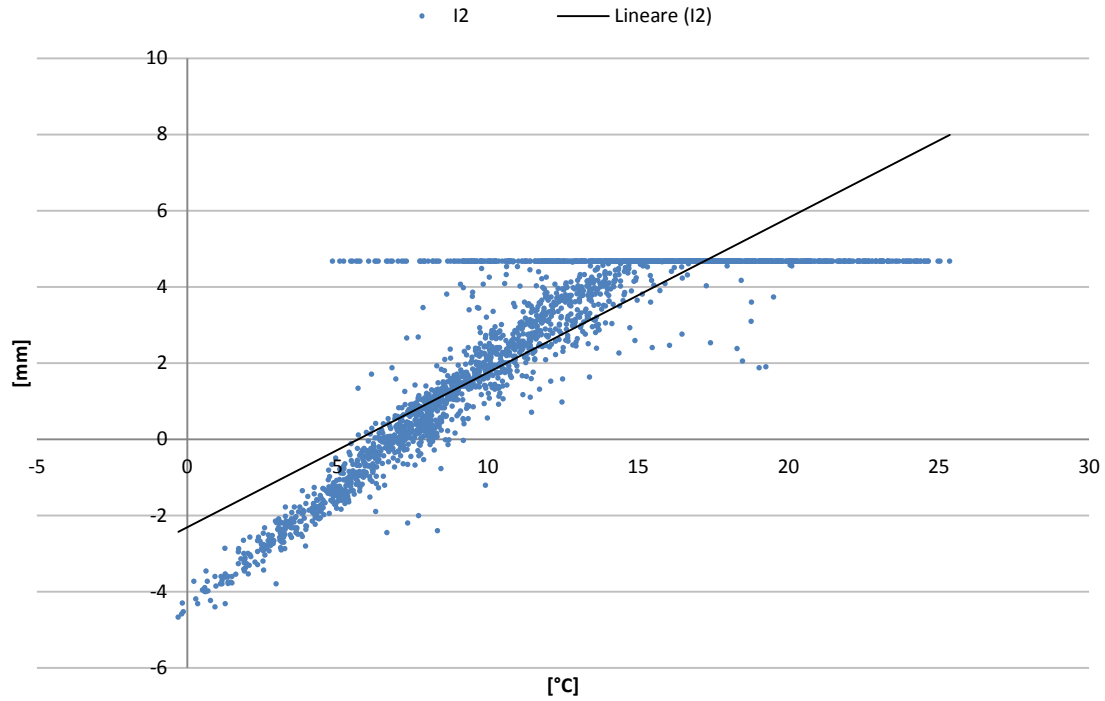


Fig. 9.50 – Grafico dello spostamento in funzione della temperatura

Con l'aumento della temperatura il sensore ha registrato una tendenza all'apertura raggiungendo valori prossimi a 2.00 mm in apertura. Tale andamento risulta essere legato al variare ciclico della temperatura con una tendenza ad aprire al crescere della temperatura.

Zona Scena

In questo gruppo sono stati considerati i 3 trasduttori di spostamento posti a cavallo delle principali lesioni, oltre che per misurare i meccanismi di ribaltamento ‘in piano’, che interessano la *zona Scena*.

PS_01

Vengono analizzati i dati del trasduttore di spostamento collocato sul setto curvilineo della scena, a cavallo della lesione di interesse per verificare la tendenza a chiudere o aprire della stessa. Per evitare di arrecare danni alla pietra originaria, i fori per il posizionamento del sensore sono stati effettuati sul laterizio aggiunto in interventi successivi di restauro.

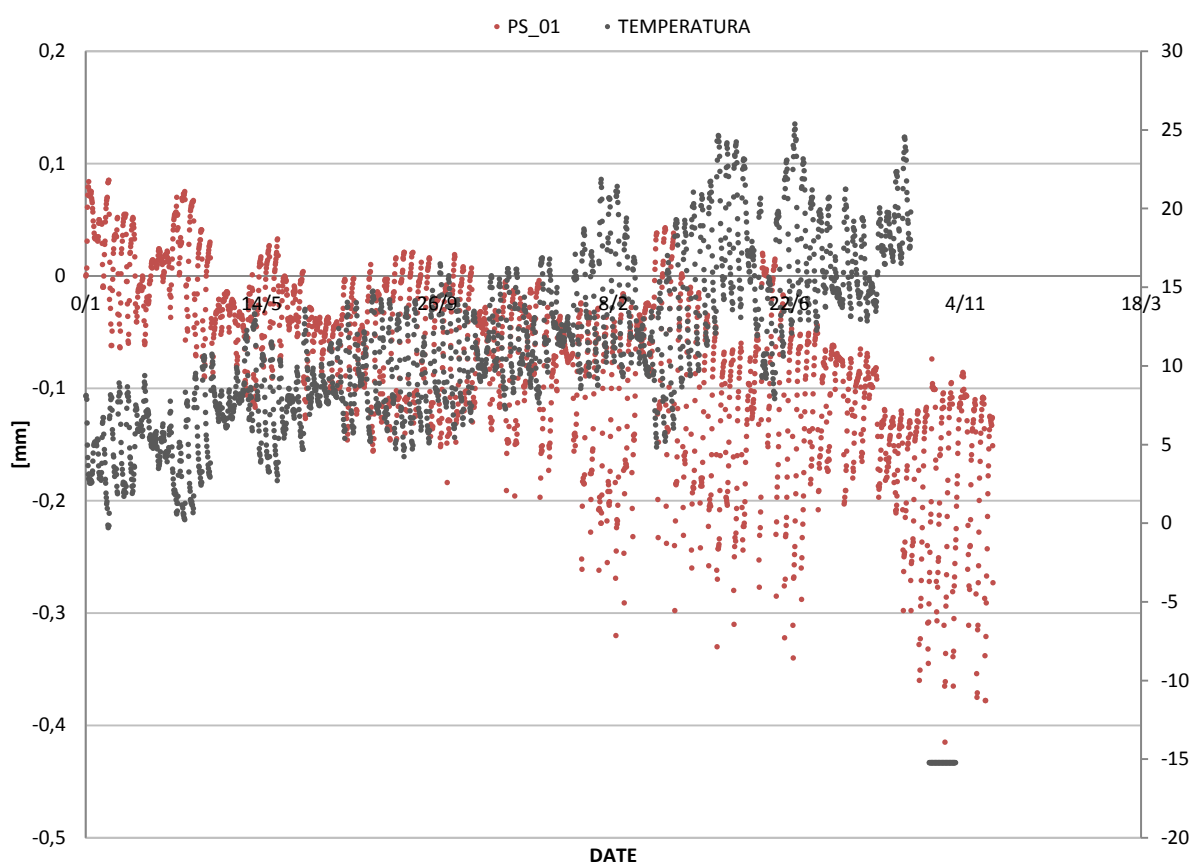


Fig. 9.51 – Grafico temporale degli spostamenti

PS_01	Spostamento [mm]	Data	T [°C]	RH [%]
max	0,085	31/01/15	-0,181	80,908
min	-0,415	10/05/15	-15,23 (err)	24,769 (err)
dev. st.	0,08			

Fig. 9.52 – Tabella riassuntiva dei risultati del potenziometro PS_01

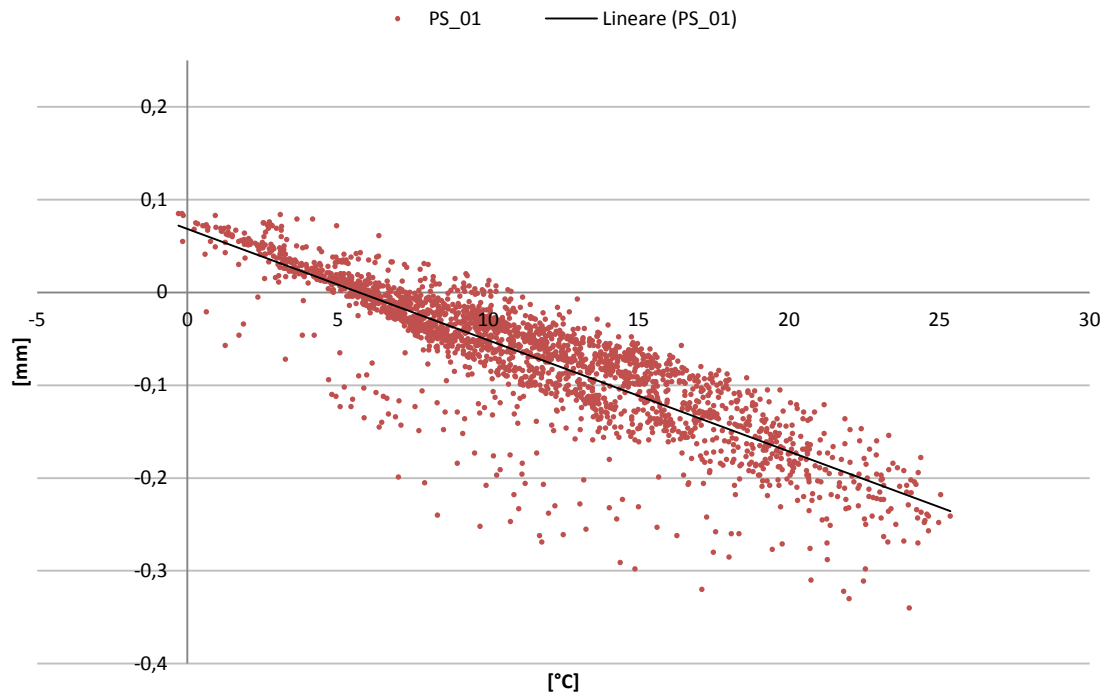


Fig. 9.53 – Grafico dello spostamento in funzione della temperatura

Con l'aumento della temperatura il sensore ha registrato una tendenza alla chiusura della lesione raggiungendo valori prossimi a -0,4 mm in chiusura. Tale andamento risulta essere legato al variare ciclico della temperatura con una tendenza a chiudere la lesione al crescere della temperatura.

PS_02

Vengono analizzati i dati del trasduttore di spostamento posto nell'intersezione tra due porzioni di muratura perpendicolari della scena. Un'estremità del sensore è ancorata al laterizio. Il sensore è posto nella parte retrostante della scena, nella zona interessata da puntelli.

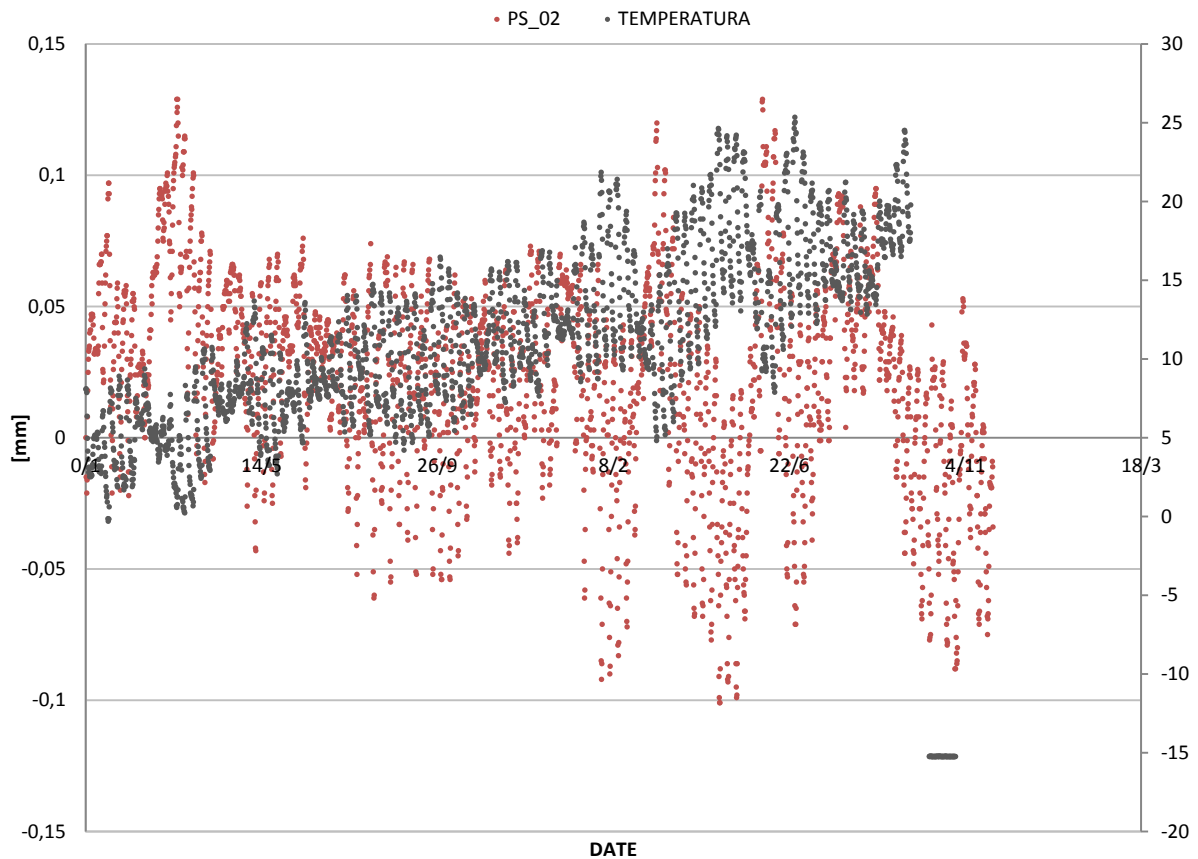


Fig. 9.54 – Grafico temporale degli spostamenti

PS_02	Spostamento [mm]	Data	T [°C]	RH [%]
max	0,129	08/02/15	0,585	91,907
min	-0,101	13/04/15	23,323	39,016
dev. st.	0,039			

Fig. 9.55 – Tabella riassuntiva dei risultati del potenziometro PS_02

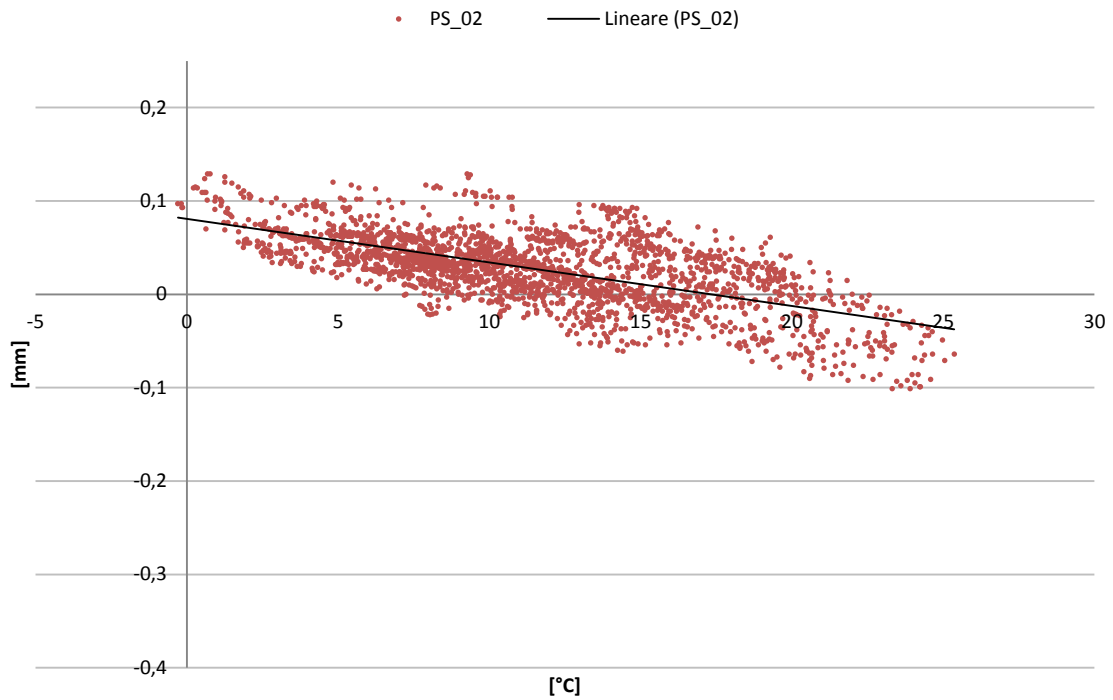


Fig. 9.56 – Grafico dello spostamento in funzione della temperatura

Con l'aumento della temperatura il sensore ha registrato una tendenza alla chiusura della lesione raggiungendo valori prossimi a -0,1 mm in chiusura. Tale andamento risulta essere legato al variare ciclico della temperatura con una tendenza a chiudere la lesione al crescere della temperatura.

PS_03

Vengono analizzati i dati del trasduttore di spostamento posto sulla sommità della porzione di muratura della scena porta ad occidente, in prossimità di un tirante in ferro. Esso è collocato in un punto nascosto e poco invasivo, sul retro della scena.

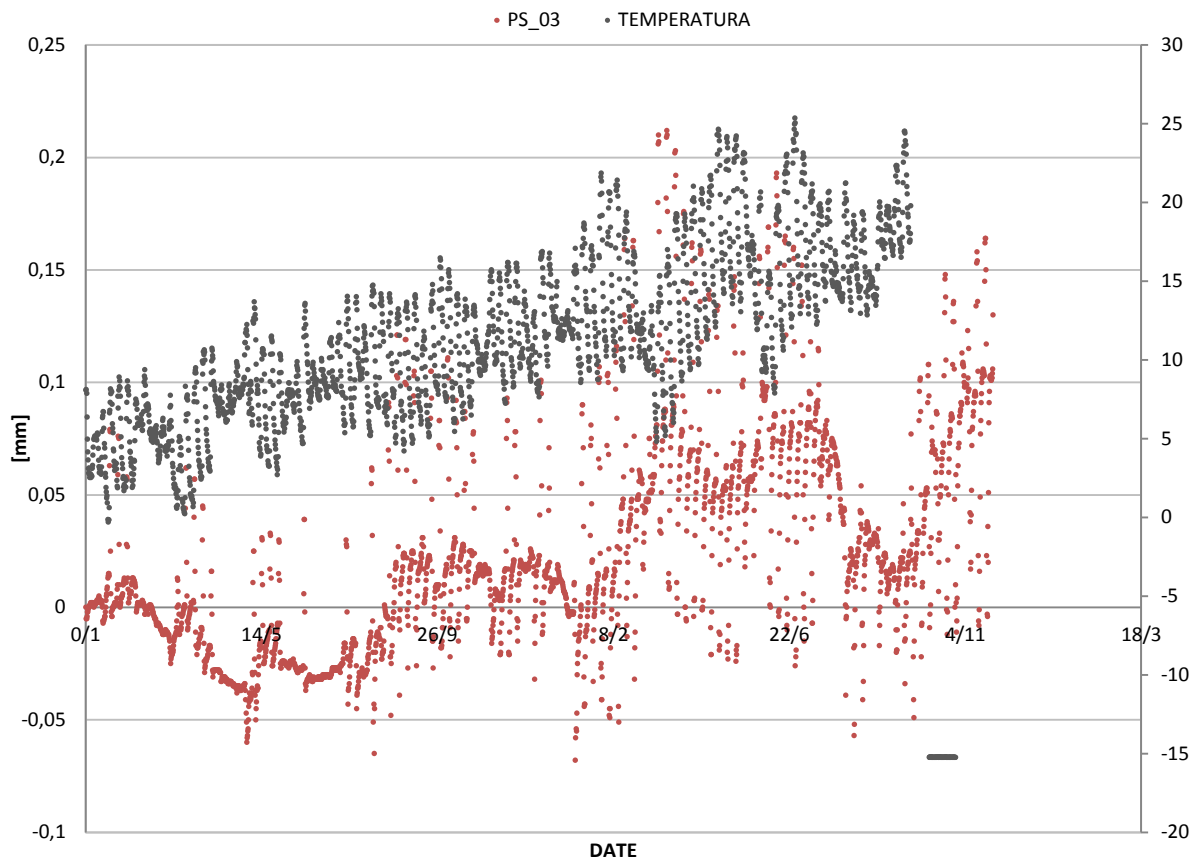


Fig. 9.57 – Grafico temporale degli spostamenti

PS_03	Spostamento [mm]	Data	T [°C]	RH [%]
max	0,212	07/04/15	15,399	16,197
min	-0,068	27/03/15	17,082	58,681
dev. st.	0,046			

Fig. 9.58 – Tabella riassuntiva dei risultati del potenziometro PS_03

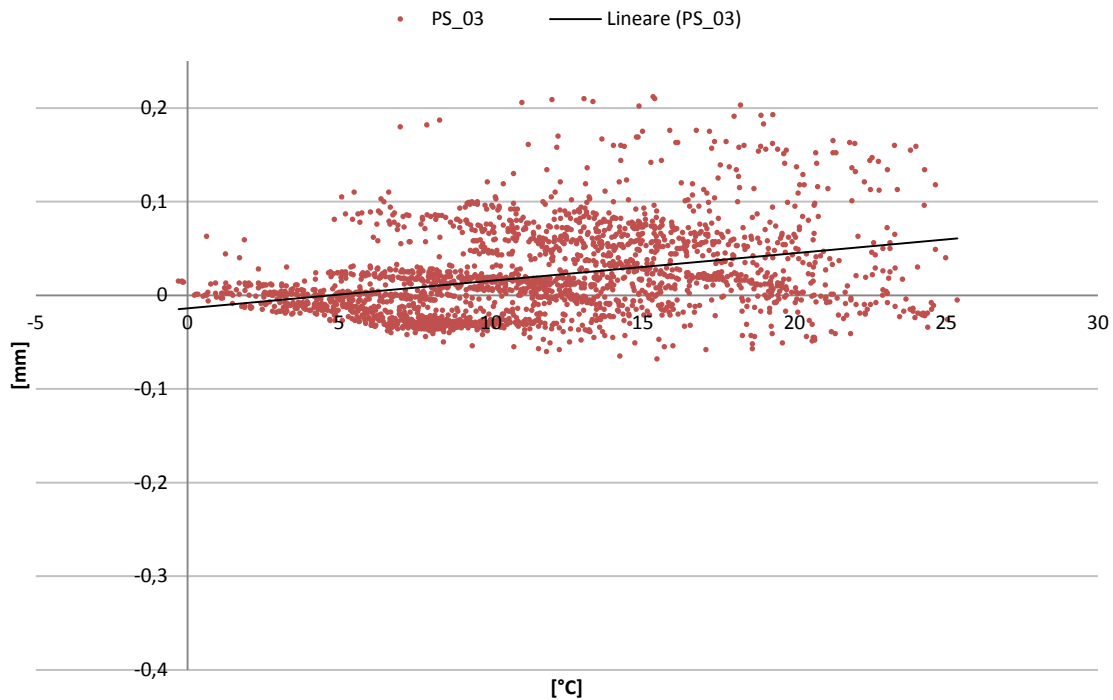


Fig. 9.59 – Grafico dello spostamento in funzione della temperatura

Con l'aumento della temperatura il sensore ha registrato una tendenza all'apertura della lesione raggiungendo valori prossimi a 0,2 mm in apertura. Tale andamento risulta essere legato al variare ciclico della temperatura con una tendenza ad aprire la lesione al crescere della temperatura.

9.5.4 Note generali ai risultati ottenuti

Il periodo di osservazione risulta essere troppo breve per esprimere un giudizio definitivo sui meccanismi che le lesioni vanno ad individuare e per poter offrire indicazioni sul comportamento strutturale delle porzioni di edificio, in quanto è necessario disporre di un ciclo annuale completo per pronunciarsi in tale senso. Perciò non possono essere fatte valutazioni di carattere strutturale in questa fase del monitoraggio. Tuttavia si può stabilire il grado di affidabilità dei dati, anche attraverso un confronto con quelli ottenuti da altri siti monitorati nella città di Verona (come quello dell'Arena), dove si nota che l'ordine di grandezza delle misurazioni ottenute è pressoché lo stesso, indicando quindi che il sistema acquisisce dati significativi ai fini delle future analisi.

9.5.5 Analisi dei dati dinamici di tipo fast

L'analisi dei parametri modali di una struttura può fornire interessanti indicazioni relativamente al comportamento strutturale. Eventuali variazioni di tali parametri nel tempo sono relazionabili al cambiamento nella risposta dinamica della stessa. Esiste una vasta bibliografia relativa alla valutazione del danno tramite l'analisi delle caratteristiche dinamiche delle strutture, sebbene – in tema di edifici storici e monumenti – non sembrano ancora facilmente definibili delle univoche relazioni di dipendenza tra il danneggiamento strutturale e la variazione di tali parametri, in particolar modo relativamente a fenomeni di danno di limitata entità. In altri termini, è nota la correlazione tra il danneggiamento strutturale indotto – ad esempio tramite tavola vibrante – e l'abbassarsi delle frequenze proprie, la modifica delle forme modali e la variazione dello smorzamento, in particolar modo per danni strutturali sostanziali. Tutt'altra cosa è la diretta determinazione del danno limitato in una struttura storica reale, o la localizzazione dello stesso mediante identificazione dinamica. Tra l'altro, gli effetti ambientali inducono variazioni sui parametri modali di entità pari, o superiore, alle variazioni degli stessi parametri attese in caso di effettivo danneggiamento strutturale.

Nel paragrafo è descritto uno studio sui parametri modali di alcune strutture del Teatro Romano, nel quale sono stati installati gli accelerometri, al fine di procedere con il monitoraggio dinamico delle stesse. Si ricorda come i parametri modali forniscano indicazioni relativamente al comportamento strutturale degli edifici ed eventuali variazioni di tali parametri nel tempo influenzino la risposta dinamica della struttura, nel dettaglio, l'abbassarsi delle frequenze proprie, la modifica delle forme modali e la variazione dello smorzamento sono sintomi della presenza di fenomeni di danno all'interno della struttura. Va considerato che anche la variazione di temperatura e umidità induce variazione sui parametri modali, anche di entità superiore degli stessi parametri attesi in caso di presenza di danneggiamento strutturale. Perciò il monitoraggio dei suddetti parametri permette di valutare la loro variazione sotto gli effetti ambientali potendo così meglio definire l'effettivo stato di danno della struttura.

L'analisi dei file fast permetterà di rilevare come variano le frequenze modali delle strutture nel tempo in funzione dei parametri ambientali, non essendosi registrate alterazioni strutturali nella stessa struttura. Si annota la difficoltà nella stima di alcune frequenze dei modi di vibrare. A tal proposito risulta utile un confronto con la fase di identificazione dinamica attraverso le prove dinamiche eseguite nell'anno 2000, con un uso maggiore di accelerometri rispetto a quelli presenti nel sistema installato permanentemente.

Per la ridotta quantità di dati, poiché il sistema è attivo da pochi mesi, non sono possibili osservazioni sul comportamento strutturale quanto, piuttosto, una valutazione sulla bontà dei dati raccolti e sul funzionamento del sistema di monitoraggio dinamico.

Ai fini di questa valutazione sono state estrapolate le frequenze proprie dei primi sei-sette modi di vibrare, ricavate dall'identificazione dinamica. I dati ricavati mostrano una sostanziale corrispondenza tra le frequenze estratte, indice quindi di una buona affidabilità del sistema. Alcune misure di temperatura e umidità relativa risulta mancare a causa di un errato funzionamento del sistema forse per degli sbalzi di corrente, ma sostanzialmente si può osservare come la temperatura rigida causa un aumento delle frequenze e viceversa un'alta temperatura causa una diminuzione delle stesse.

Zona Chiesa

Nel lato Chiesa sono presenti 2 accelerometri, dei quali sono stati analizzati i file *fast.txt* tra i mesi di febbraio – aprile, prendendo i file alternativamente. Vengono riportati di seguito i grafici delle frequenze per ogni accelerometro. L'accelerometro AC_01 è posto sulla sommità setto denominato B3, mentre AC_02 è posto sulla sommità del setto B1.

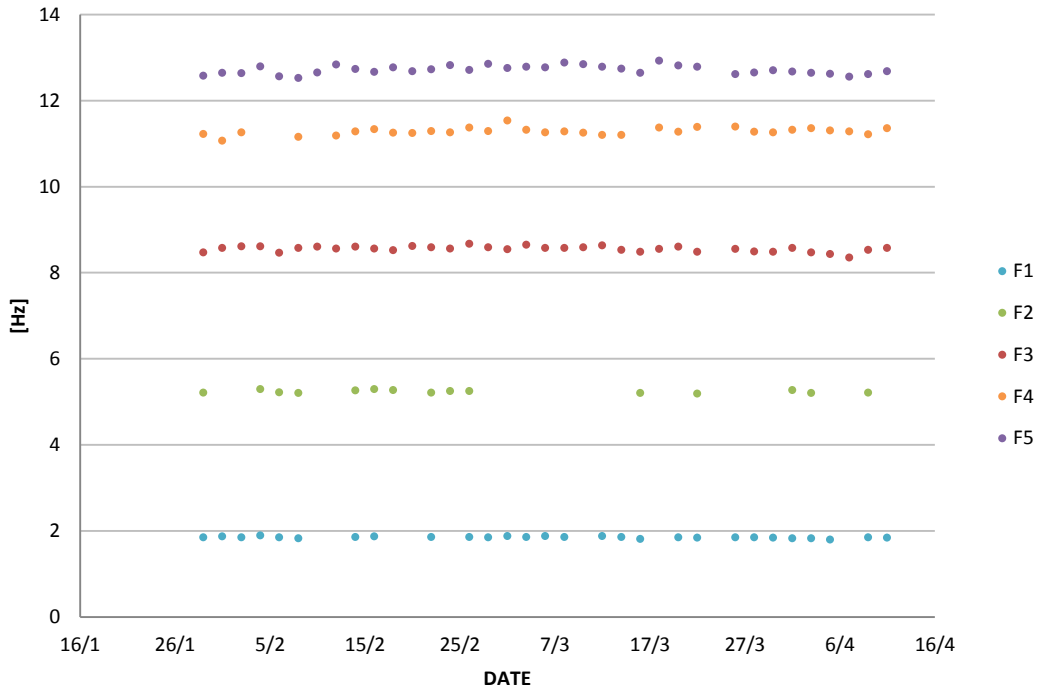


Fig. 9.54 - Grafico delle frequenze modali Setto B3 (AC_01)

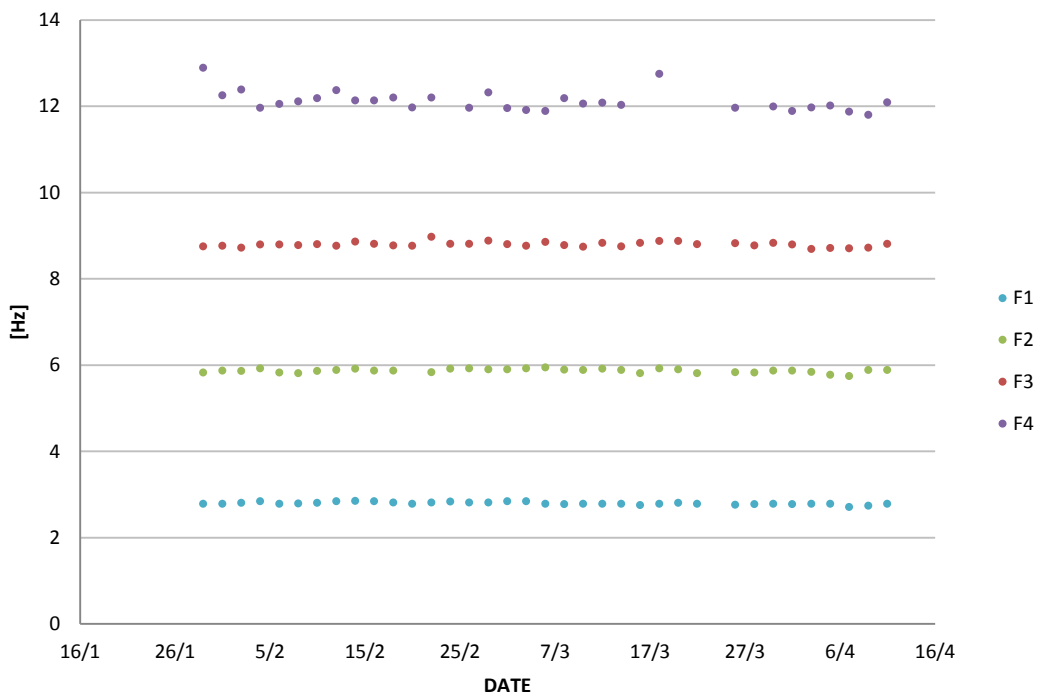


Fig. 9.55 - Grafico delle frequenze modali Setto B1 (AC_02)

Dai grafici si nota la difficoltà di estrapolazione delle forme modali superiori alla terza, relativamente al Setto B1. Infatti per le prime tre i valori delle frequenze ricavati dai picchi della trasformata di Fourier sono molto simili tra loro, mentre per il quarto modo assume un certo margine di incertezza dovuto alla poca chiarezza della trasformata dell'AC_02.

Le relazioni tra le frequenze modali e temperatura – umidità relativa, in questa fase iniziale del monitoraggio, sono ancora poco chiare per via della ridotta quantità di dati analizzati.

[°C]	F1	F2	F3	F4	F5
1,70 min	1,83	5,20	8,57	11,15	12,52
20,7 max	1,83	5,27	8,57	11,32	12,67

Fig. 9.56 –Setto B3 Tabella con temperatura max/min e relative frequenze

[°C]	F1	F2	F3	F4	F5
1,70 min	2,79	5,81	8,79	n.r.	12,11
20,7 max	2,77	5,87	8,79	n.r.	11,89

Fig. 9.57 – Setto B1 Tabella con temperatura max/min e relative frequenze

Tuttavia attraverso una valutazione sui valori estremi della temperatura, si nota che le frequenze estratte con la temperatura minima di 1,7°C risultano, in media, essere più basse di quelle ricavate con la temperatura più elevata di 20,7°C, come ci si attendeva da relazioni teoriche, ad eccezione della F5 relativa al sensore AC_02. Nei prossimi mesi si dovrà, quindi, valutare l'effettivo legame tra temperatura e frequenze modali al variare dei cicli ambientali di temperatura e umidità relativa, al fine di capire l'influenza dei parametri ambientali sulla struttura, per poterli distinguere da eventuali stati di danno che potrebbero insorgere.

Il grafico delle frequenze confrontate con l'umidità, invece, risulta essere poco significativo e in quanto non si manifesta nessuna tendenza e i valori presentano una marcata dispersione, sintomo di scarso legame tra i due parametri.

Per ogni accelerometro è stata stimata la media, la deviazione standard e calcolato l'indice di successo. Per quanto riguarda invece la stima dello smorzamento ottenuta, questa tende a seguire un andamento ciclico di variazione legato, come per le frequenze, alle variazioni stagionali della temperatura. Il comportamento ideale della variazione degli smorzamenti, infatti, dovrebbe rispettare l'andamento delle temperature, ma la poca coerenza ottenuta

nell'analisi è da attribuirsi ad una stima poco accurata che il metodo EFDD, implementato in *ArteMis Extractor 4.0*, permette, oltre alla scarsa quantità di dati disponibili.

Setto B3					
	F1	F2	F3	F4	F5
Media	1,85	5,23	8,54	11,28	12,70
Dev. st.	0,02	0,035	0,066	0,083	0,099
Ind. succ	77,7	41,6	100	88,8	100

Setto B1					
	F1	F2	F3	F4	F5
Media	2,79	5,86	8,79	n.r.	12,11
Dev. st.	0,038	0,061	0,096	n.r.	0,238
Ind. succ	100	100	100	0	86,1

Fig. 9.58 – Tabelle con media/deviazione standard/indice di successo

Zona Museo

Nel lato Museo sono presenti 2 accelerometri, dei quali sono stati analizzati i file *fast.txt* tra i mesi di febbraio – aprile, prendendo i file alternativamente. Vengono riportati di seguito i grafici delle frequenze per ogni accelerometro. L'accelerometro AM_01 è posto sulla sommità setto denominato A4, mentre AM_02 è posto sulla sommità del setto denominato A3.

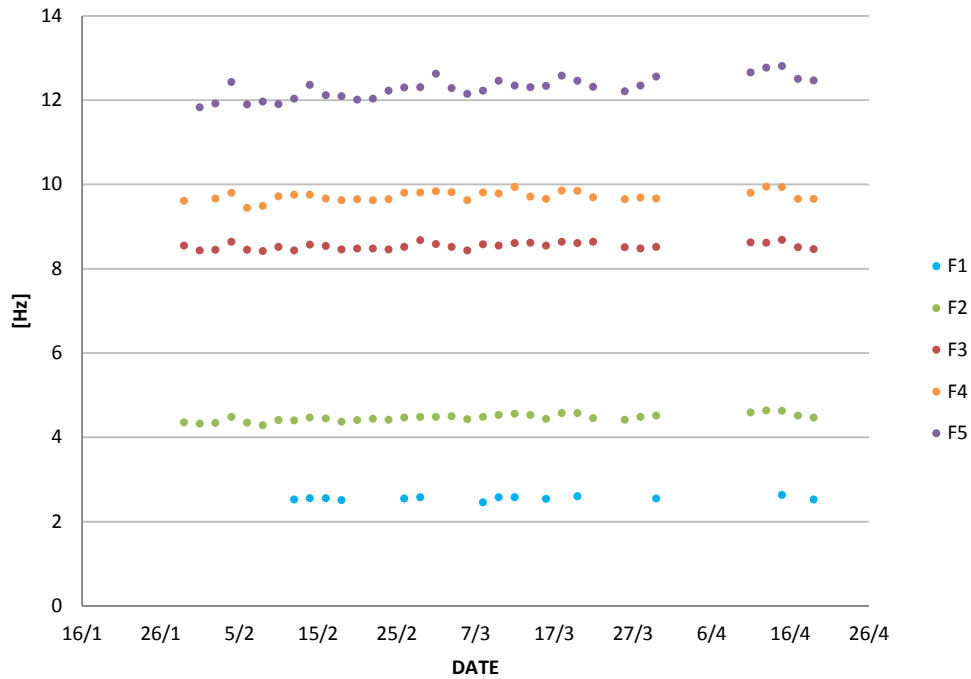


Fig. 9.59 - Grafico delle frequenze modali Setto A4 (AM_01)

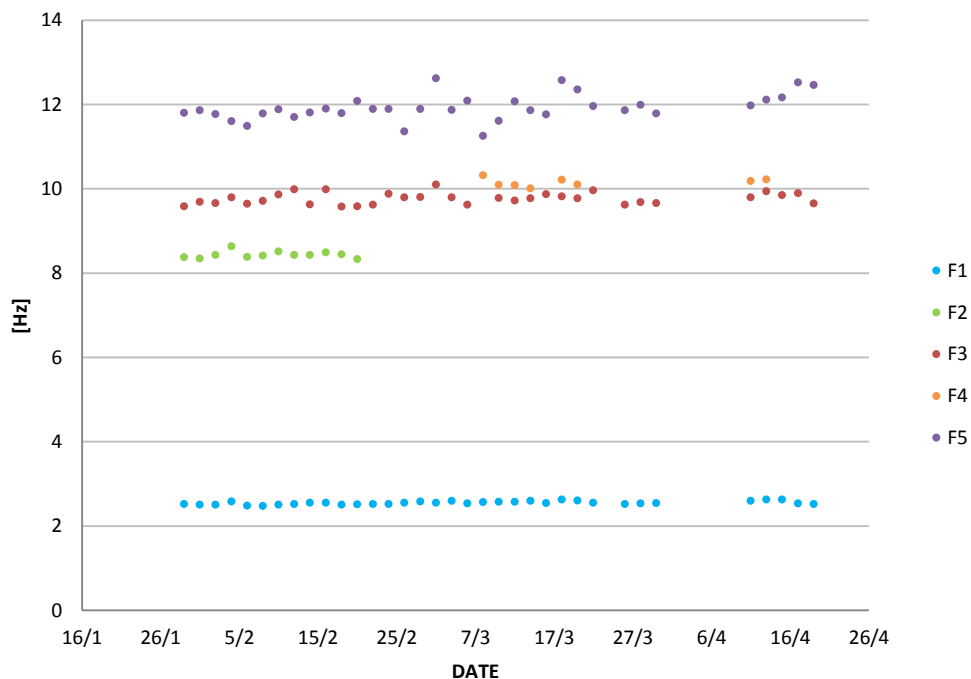


Fig. 9.60 - Grafico delle frequenze modali Setto A3 (AS_02)

Dai grafici si nota la difficoltà di estrapolazione delle forme modali superiori alla terza, relativamente al Setto A3. Infatti per le prime tre i valori delle frequenze ricavati dai picchi della trasformata di Fourier sono pressoché gli stessi, mentre per il quarto e il quinto modo la loro determinazione assume un certo margine di incertezza dovuto alla poca chiarezza della trasformata.

Le relazioni tra le frequenze modali e temperatura – umidità relativa, in questa fase iniziale del monitoraggio, sono ancora poco chiare per via della ridotta quantità di dati analizzati.

[°C]	F1	F2	F3	F4	F5
1,70 min	n.r.	4,28	8,41	9,48	11,96
23,0 max	n.r.	4,63	8,61	9,94	12,76

Fig. 9.61 – Setto A4 Tabella con temperatura max/min e relative frequenze

[°C]	F1	F2	F3	F4	F5
1,70 min	2,47	8,41	9,71	n.r.	11,78
23,0 max	2,62	n.r.	9,94	10,22	12,11

Fig. 9.62 – Setto A3 Tabella con temperatura max/min e relative frequenze

Tuttavia attraverso una valutazione sui valori estremi della temperatura, si nota che le frequenze estratte con la temperatura minima di 1,7°C risultano essere più basse di quelle ricavate con la temperatura più elevata di 22,7°C, come ci si attendeva da relazioni teoriche, ad eccezione della F5. Nei prossimi mesi si dovrà, quindi, valutare l'effettivo legame tra temperatura e frequenze modali al variare dei cicli ambientali di temperatura e umidità relativa, al fine di capire l'influenza dei parametri ambientali sulla struttura, per poterli distinguere da eventuali stati di danno che potrebbero insorgere.

Il grafico delle frequenze confrontate con l'umidità, invece, risulta essere poco significativo e in quanto non si manifesta nessuna tendenza e i valori presentano una marcata dispersione, sintomo di scarso legame tra i due parametri.

Per ogni accelerometro è stata stimata la media, la deviazione standard e calcolato l'indice di successo. Per quanto riguarda invece la stima dello smorzamento ottenuta, questa tende a seguire un andamento ciclico di variazione legato, come per le frequenze, alle variazioni stagionali della temperatura. Il comportamento ideale della variazione degli smorzamenti, infatti, dovrebbe rispettare l'andamento delle temperature, ma la poca coerenza ottenuta

nell'analisi è da attribuirsi ad una stima poco accurata che il metodo EFDD, implementato in *ArteMis Extractor 4.0*, permette, oltre alla scarsa quantità di dati disponibili.

Setto A4					
	F1	F2	F3	F4	F5
Media	2,54	4,46	8,53	9,72	12,28
Dev. st.	0,011	0,041	0,084	0,076	0,116
Ind. succ	40	100	100	97,1	97,1

Setto A3					
	F1	F2	F3	F4	F5
Media	2,54	7,78	9,76	10,15	11,92
Dev. st.	0,039	0,082	0,136	0,099	0,310
Ind. succ	100	34,3	97,1	22,8	100

Fig. 9.63 – Tabelle con media/deviazione standard/indice di successo

Zona Scena

Nella *scena* sono presenti 4 accelerometri, dei quali sono stati analizzati 20 file *fast.txt* tra i mesi di febbraio – maggio. Si è deciso di scegliere solo 20 misurazioni e di prediligere le domeniche, poiché i dati del segnale risultano essere buoni e la domenica è un giorno di poco traffico veicolare, quindi le frequenze sono più nitide e precise.

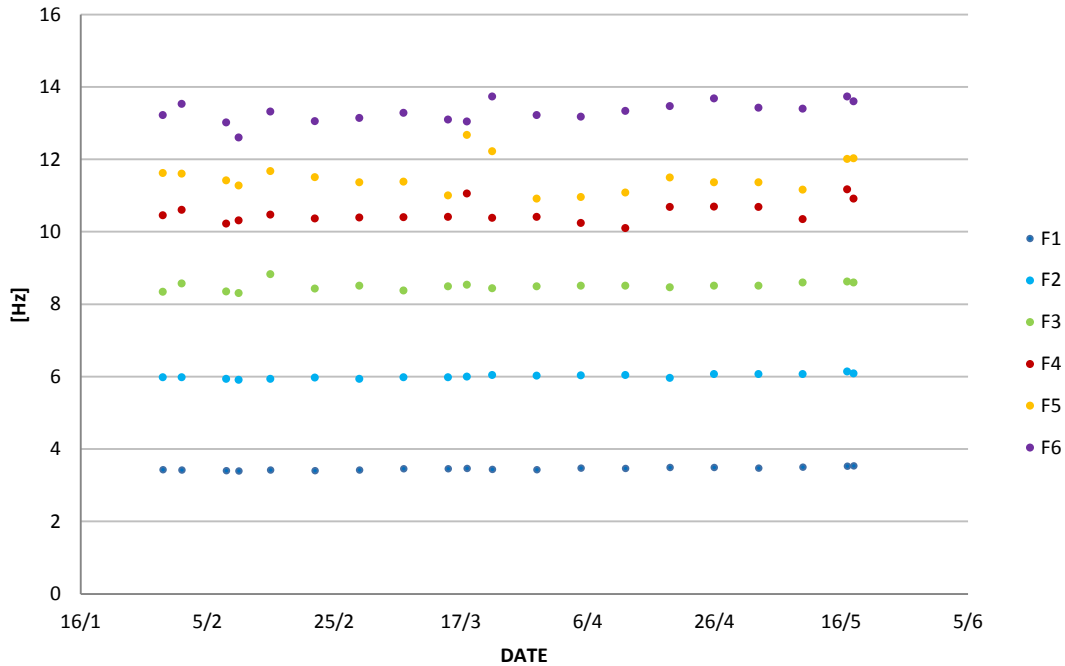


Fig. 9.64 - Grafico delle frequenze modali della Scena

Dai grafici si nota la difficoltà di estrapolazione delle forme modali superiori alla quinta, infatti per le prime quattro i valori delle frequenze ricavati dai picchi della trasformata di Fourier sono pressoché gli stessi, mentre per il quinto sesto e settimo modo la loro determinazione assume un certo margine di incertezza dovuto alla poca chiarezza della trasformata.

Le relazioni tra le frequenze modali e temperatura – umidità relativa, in questa fase iniziale del monitoraggio, sono ancora poco chiare per via della ridotta quantità di dati analizzati.

[°C]	F1	F2	F3	F4	F5	F6
1,70 min	3,39	5,92	8,46	10,23	11,41	13,36
22,7 max	3,41	6,04	8,76	10,46	11	13,37

Fig. 9.65 – Tabella con temperatura max/min e relative frequenze

Tuttavia attraverso una valutazione sui valori estremi della temperatura, si nota che le frequenze estratte con la temperatura minima di 1,7°C risultano essere più basse di quelle ricavate con la temperatura più elevata di 22,7°C, come ci si attendeva da relazioni teoriche, ad eccezione della F5. Nei prossimi mesi si dovrà, quindi, valutare l'effettivo legame tra temperatura e frequenze modali al variare dei cicli ambientali di temperatura e umidità relativa, al fine di capire l'influenza dei parametri ambientali sulla struttura, per poterli distinguere da eventuali stati di danno che potrebbero insorgere.

Il grafico delle frequenze confrontate con l'umidità, invece, risulta essere poco significativo e in quanto non si manifesta nessuna tendenza e i valori presentano una marcata dispersione, sintomo di scarso legame tra i due parametri.

Per ogni accelerometro è stata stimata la media, la deviazione standard e calcolato l'indice di successo. Per quanto riguarda invece la stima dello smorzamento ottenuta, questa tende a seguire un andamento ciclico di variazione legato, come per le frequenze, alle variazioni stagionali della temperatura. Il comportamento ideale della variazione degli smorzamenti, infatti, dovrebbe rispettare l'andamento delle temperature, ma la poca coerenza ottenuta nell'analisi è da attribuirsi ad una stima poco accurata che il metodo EFDD, implementato in *ArteMis Extractor 4.0*, permette, oltre alla scarsa quantità di dati disponibili.

Scena FDD						
	F1	F2	F3	F4	F5	F6
Media	3,45	6,00	8,49	10,51	11,50	13,30
Dev. st.	0,041	0,060	0,117	0,278	0,447	0,281
Ind. succ	100	100	100	100	100	100

Fig. 9.66 – Tabelle con media/deviazione standard/indice di successo FFD

Scena EFDD						
	F1	F2	F3	F4	F5	F6
Media	3,45	6,00	8,65	10,49	11,56	13,30
Dev. st.	0,038	0,057	0,270	0,391	0,537	0,265
Ind. succ	100	100	100	100	100	100

Fig. 9.67 – Tabelle con media/deviazione standard/indice di successo EFDD

ANALISI DELLE FREQUENZE

10.1 Introduzione

Grazie ai dati registrati dal sistema di monitoraggio dinamico è possibile calibrare il modello numerico elaborato sulla base dell'effettivo comportamento del monumento, anche in presenza di sollecitazioni sismiche di entità non marginale.

Il monitoraggio dinamico è attualmente l'unica metodologia di controllo in grado di misurare grandezze sperimentali relazionabili al comportamento globale di una struttura storica. Il contributo apportato dal monitoraggio dinamico assume una maggiore importanza in seguito alla correlazione dei dati sperimentali con altri parametri emersi da monitoraggi di natura statica, e da un'interpretazione di natura qualitativa di possibili fenomeni di degrado strutturale. Ai fini della calibrazione e validazione dei modelli sono stati confrontati i valori ricavati da:

- Prove AVT, identificazione dinamica, anno 2000
- Monitoraggio dinamico, anno 2015

L'analisi dei dati inviati dagli accelerometri, elaborati mediante software NI DIADEM, ha permesso di ricavare le frequenze modali della struttura, che corrispondono ai picchi della Trasformata di Fourier (come spiegato nel capitolo precedente).

Per la calibrazione dei modelli è stata fatta un'*Analisi delle frequenze naturali (Natural Frequency)*. Le frequenze ottenute vengono quindi confrontate con quelle derivanti dalle analisi effettuate attraverso il software *ArteMis* e con quelle derivanti dal nuovo sistema di monitoraggio.

Sia in fase di pre calibrazione che di post calibrazione vengono calcolati l'errore medio percentuale tra la frequenza del modello e quella sperimentale, e l'indice MAC.

L'errore medio è definito come:

$$\varepsilon (\%) = \frac{f_{FEM} - f_{EXP}}{f_{FEM}} \cdot 100$$

indicando con f_{FEM} la frequenza ottenuta dal modello agli elementi finiti elaborato in *Diana TNO* e con f_{EXP} la frequenza sperimentale media misurata tramite analisi dinamica attraverso il programma *ArteMis Extractor 4.0*.

Il MAC (*Modal Assurance Criterion*) fornisce una misura della deviazione dei punti dalla linea della perfetta correlazione (per reciproche forme modali). Esso è definito come:

$$MAC (X, A) = \frac{|\sum_{j=1}^n \Phi_{X,j} \Phi_{A,j}|^2}{|\sum_{j=1}^n \Phi_{X,j} \Phi_{X,j}| |\sum_{j=1}^n \Phi_{A,j} \Phi_{A,j}|}$$

Il MAC tra due vettori che hanno una relazione lineare è prossimo a 1. Mentre il MAC tra due vettori linearmente indipendenti è prossimo a 0. (Gentile et al., 2004; Casarin, 2006).

10.2 Analisi frequenze naturali dei setti

Per quanto riguarda il **setto B3** si può operare un confronto sia con le frequenze sperimentali delle prove di identificazione dinamica sia con quelle ricavate dal sistema di monitoraggio. Le tabelle seguenti indicando l'errore medio percentuale e il MAC tra frequenze del modello del setto non calibrato e quelle sperimentali.

Modo	f_{FEM} [Hz]	f_{EXP} [Hz]	f_{SHM} [Hz]	ε (%)		MAC
				ε (%) EXP	ε (%) SHM	
1	1,68	1,953	1,85	16,25	10,119	0,9
2	-	4,096	-	-	-	-
3	5,45	5,344	5,23	1,96	4,036	0,78
4	7,22	8,789	8,54	21,73	18,282	0,9
5	9,53	11,392	11,28	19,54	18,363	0,79
6	12,45	13,374	12,7	7,42	2,008	0,2

Tabella 10.1 – Confronto tra frequenze sperimentali, frequenze ricavate dal sistema di monitoraggio e frequenze del modello B3 non calibrato

Dove f_{EXP} è la frequenza sperimentale, f_{SHM} è la frequenza del sistema di monitoraggio e ε è l'errore medio percentuale. Come si nota dalle tabelle l'errore minore si ha per la terza e l'ultima forma modale. L'indice MAC si avvicina all'unità per le prime cinque forme modali. Del **setto B2** si hanno a disposizione solo i dati della campagna di indagini del 2000, perciò il confronto è fatto solo tra modello e frequenze sperimentali derivanti da prove dinamiche.

Modo	f_{FEM} [Hz]	f_{EXP} [Hz]	f_{SHM} [Hz]	ε (%)		MAC
				ε (%) <i>EXP</i>	ε (%) <i>SHM</i>	
1	1,69	1,11	-	34,94	-	0,87
2	-	2,087	-	-	-	-
3	-	2,747	-	-	-	-
4	5,89	5,103	-	12,67	-	0,7
5	7,6	6,51	-	16,3	-	0,5

Tabella 10.2 – Confronto tra frequenze sperimentali e frequenze del modello B2 non calibrato

Dal calcolo dell'errore medio percentuale si rileva che la prima forma modale del modello FEM si discosta in maniera significativa da quella sperimentale. Inoltre *DIANA* non ha restituito la forma modale torsionale e flessionale 2 Hz, riscontrata in *ArteMis*. L'indice MAC si avvicina all'unità nelle forme modali analizzate.

A completamento delle analisi sui setti della zona *Chiesa* si considera il **setto B1**, sul quale è installato un trasduttore di accelerazione in sommità. L'output del sensore ha permesso di individuare alcune frequenze significative, che possono essere confrontate con quelle derivanti da *DIANA* per la verifica dell'attendibilità del modello.

Modo	f_{FEM} [Hz]	f_{EXP} [Hz]	f_{SHM} [Hz]	ε (%)		MAC
				ε (%) <i>EXP</i>	ε (%) <i>SHM</i>	
1	2,18	-	2,79	-	27,98	-
2	4,5	-	5,86	-	30,22	-
3	7,28	-	8,79	-	20,74	-
4	8,82	-	9,86	-	11,79	-
5	9,67	-	11,9	-	23,06	-

Tabella 10.3 – Confronto tra frequenze sperimentali e frequenze del modello B1 non calibrato

Per quanto riguarda la zona *Museo*, il **setto A3** è oggetto sia della campagna sperimentale del 2000 che del sistema di monitoraggio del 2014. La tabella sottostante fa un parallelo tra le diverse frequenze ottenute.

Modo	f_{FEM} [Hz]	f_{EXP} [Hz]	f_{SHM} [Hz]	ε (%)		MAC
				ε (%) <i>EXP</i>	ε (%) <i>SHM</i>	
1	1,2	1,245	1,23	3,75	2,5	0,83
2	-	-	2,45	-	-	-
3	5,2	4,602	5,6	11,5	7,69	0,42
4	5,8	5,925	6,16	2,15	6,21	0,22
5	-	-	8,3	-	-	-
6	13,8	13,895	11,9	0,68	13,76	0,77

Tabella 10.4 – Confronto tra frequenze sperimentali, frequenze ricavate dal sistema di monitoraggio e frequenze del modello A3 non calibrato

L'errore è contenuto per tutte le forme modali, mentre il MAC si discosta in maniera significativa da 1, fatta eccezione per la prima e ultima forma modale.

Infine si confrontano i valori delle frequenze ricavate per il **setto A4**, sia tramite prove sperimentali che mediante monitoraggio dinamico. Le prove sperimentali hanno permesso di ricavare solo tre forme modali, quindi il confronto con le frequenze del modello e del monitoraggio è limitato.

Modo	f_{FEM} [Hz]	f_{EXP} [Hz]	f_{SHM} [Hz]	ε (%)		MAC
				ε (%) EXP	ε (%) SHM	
1	1,81	1,587	1,70	12,32	6,07	0,7
2	-	2,808	2,54	-	-	-
3	7,56	-	-	-	12,43	0,9
4	-	-	4,46	-	-	-
5	8,5	8,301	8,53	2,35	11,76	-

Tabella 10.5 – Confronto tra frequenze sperimentali, frequenze ricavate dal sistema di monitoraggio e frequenze del modello A4 non calibrato

Si è scelto infine, da questa analisi, di calibrare i modelli dei setti prendendo a riferimento il **setto B3** in quanto per questo si hanno a disposizione valori sperimentali sia relativi alla campagna di indagini del 2000 sia relativi al sistema di monitoraggio.

Per effettuare la calibrazione del modello attraverso il confronto con le frequenze sperimentali si è proceduto con uno studio di tipo parametrico al fine di valutare l'influenza che hanno la variazione di alcune proprietà meccaniche dei materiali e delle caratteristiche geometriche della struttura sul comportamento globale della struttura e sui modi propri di vibrare. Tale studio è definito analisi di sensitività e permette di capire come le risposte della struttura sono influenzate da modifiche alle variabili di progetto. Le variabili considerate riguardano il *modulo elastico E* e la *densità* della muratura.

Sulla base dei risultati ottenuti si è deciso di assumere:

- il valore del *modulo elastico* della muratura a pietre a conci sbozzati pari a $E = 1630$ MPa
- il valore del *modulo elastico* della pietra degradata pari a $E = 780$ MPa
- il valore della *densità* della muratura a pietre a conci sbozzati pari a $\rho = 1950$ Kg/m³
- il valore della *densità* della pietra degradata pari a $\rho = 1600$ Kg/m³

Come evidenzia la tabella riassuntiva delle caratteristiche dei materiali utilizzati nel modello, il materiale che ha maggior influenza sul comportamento del setto B3 è la pietra a conci sbozzati. Tale materiale è infatti l'unico che varia in modo significativo, mentre gli altri due rimangono costanti o variano di poco.

MATERIALE	E pre-cal. [MPa]	ρ Pre-cal. [Kg/m ³]	E finale [MPa]	ρ finale [Kg/m ³]
<i>Pietra conci sboz.</i>	1230	2000	1630	1950
<i>Mattoni</i>	1500	1800	1500	1800
<i>Pietra degradata</i>	1080	1600	780	1600

Tabella 10.6 – Confronto materiali non calibrati e calibrati

Se si confrontano i valori delle frequenze del modello B3 calibrato con quelle sperimentali si nota una diminuzione dell'errore per tutte le forme modali, fatta eccezione per la forma modale torsionale, per la quale si ha un aumento dell'errore, seppur contenuto.

Modo	f_{FEM} [Hz]	f_{EXP} [Hz]	f_{SHM} [Hz]	ε (%)		MAC
				ε (%) EXP	ε (%) SHM	
1	1,95	1,918	1,85	0,153	5,1	0,97
2	-	4,096	-	-	-	-
3	6,24	5,311	5,23	14,375	16,1	0,98
4	8,24	8,823	8,54	6,662	3,64	0,91
5	10,91	11,307	11,28	4,417	3,39	0,8
6	13,43	13,331	12,7	0,416	5,44	0,3

Tabella 10.7 – Confronto tra frequenze sperimentali, frequenze ricavate dal sistema di monitoraggio e frequenze del modello B3 calibrato

Dove f_{EXP} è la frequenza sperimentale, f_{SHM} è la frequenza del sistema di monitoraggio e ε è l'errore medio percentuale. L'indice MAC evidenzia una buona corrispondenza tra le forme modali sperimentali e del modello, tranne per l'ultima.

In definitiva, il modello risulta avere una buona calibrazione, presenta infatti errori medi inferiori al 10% per 4 delle prime 5 forme modali. I valori di MAC, calcolati confrontando gli autovettori delle forme modali estratti con i metodi FDD, EFDD con quelli estratti dal modello FEM, sono quasi sempre superiori allo 0,5, ad eccezione dell'ultima forma modale, che presenta un valore di MAC che evidenzia una scarsa correlazione delle frequenze. Quindi rispetto alla fase di pre calibrazione, l'indice di MAC si avvicina leggermente di più all'unità.

Ponendo gli stessi materiali del setto B3 nei modelli successivi si nota che:

- nel setto B2 l'errore diminuisce per tutte le forme modali considerate
- nel setto B1 l'errore si attesta al di sotto del 15% e vi è una diminuzione dello stesso
- nel setto A3 l'errore si attesta al di sotto del 15% con una buona corrispondenza delle forme modali
- nel setto A4 si ha una buona corrispondenza con le frequenze del monitoraggio dinamico

10.3 Analisi frequenze naturali della scena

Analogo procedimento è stato fatto per l'edificio scenico, confrontando le frequenze ricavate dalle prove AVT dell'anno 2000 con i dati ottenuti dal nuovo sistema di monitoraggio e con le frequenze del modello non calibrato.

Modo	f_{FEM} [Hz]	f_{EXP} [Hz]	f_{SHM} [Hz]	ε (%)		MAC
				ε (%) EXP	ε (%) SHM	
1	3,1	3,51	3,45	13,225	11,290	0,93
2	7,3	6,17	6	15,479	17,808	0,92
3	8,4	8,88	8,6	5,714	2,380	0,10
4	10,3	-	10,5	-	1,942	0,95
5	12,6	12,38	11,5	1,746	8,730	0,80
6	13,6	-	13,3	-	2,206	0,32

Tabella 10.8 – Confronto tra frequenze sperimentali e modello FEM della scena

L'errore maggiore si attesta in corrispondenza della seconda forma modale, torsionale. Per quanto riguarda l'indice MAC, la terza forma modale evidenzia una scarsa correlazione. Dopo un'analisi parametrica, variando il *modulo elastico* e la *densità* dei materiali costituenti il modello dell'edificio scenico, si è deciso di assumere:

- il valore di *modulo elastico* per la muratura (*pietra a spacco con buona tessitura*) pari a $E = 1640$ MPa
- il valore della *densità* per la muratura (*pietra a spacco con buona tessitura*) pari a $\rho = 2100$ Kg/m³
- il valore del *modulo elastico* per i mattoni pari a $E = 1800$ MPa
- il valore della *densità* per i mattoni pari a $\rho = 1800$ Kg/m³ (valore da circolare per le *murature in mattoni e malta di calce*)

Come evidenzia la tabella riassuntiva delle caratteristiche dei materiali utilizzati nel modello, in fase di post calibrazione variano sia i parametri del materiale *pietra a spacco con buona tessitura* che dei mattoni. Alla variazione dei parametri della pietra corrispondono le diminuzioni o gli incrementi significativi delle frequenze.

MATERIALE	E pre-cal. [MPa]	ρ Pre-cal. [Kg/m ³]	E finale [MPa]	ρ finale [Kg/m ³]
<i>Pietra a spacco</i>	1740	2100	1640	2100
<i>Mattoni</i>	1500	1800	1800	1800

Tabella 10.9 – Confronto materiali non calibrati e calibrati

Se si confrontano le frequenze del modello FEM della scena calibrato con quelle sperimentali si nota una diminuzione dell'errore per tutte le forme modali, fatta eccezione per la forma modale torsionale per la quale si ha un aumento dell'errore che risulta comunque contenuto.

Modo	f_{FEM} [Hz]	f_{EXP} [Hz]	f_{SHM} [Hz]	ε (%)		MAC
				ε (%) EXP	ε (%) SHM	
1	3,2	3,51	3,45	9,687	7,812	0,94
2	7,1	6,17	6	13,098	15,380	0,93
3	8,64	8,88	8,6	2,777	0,463	0,20
4	10,45	-	10,5	-	0,478	0,97
5	12,3	12,38	11,5	0,650	6,504	0,90
6	13,31	-	13,3	-	0,0751	0,30

Tabella 10.10 – Confronto frequenze sperimentali, frequenze ricavate dal sistema di monitoraggio e frequenze del modello di B3 calibrato

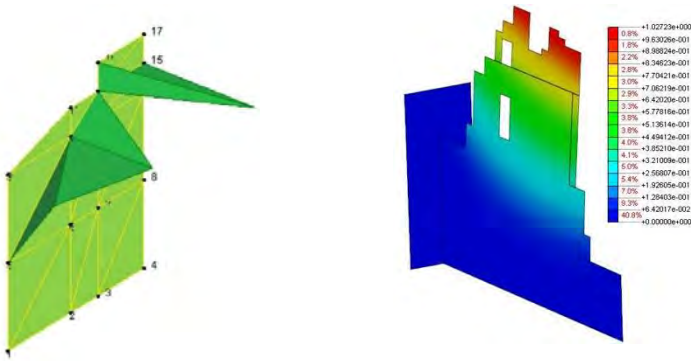
Il modello risulta avere una buona calibrazione, presenta infatti errori medi inferiori al 16% per tutte le forme modali analizzate. I valori di MAC, calcolati confrontando gli autovettori delle forme modali estratti con i metodi FDD, EFDD con quelli estratti dal modello FEM, sono quasi tutti superiori allo 0,5, ad eccezione della terza e dell'ultima forma modale, che presenta un valore di MAC che evidenzia una scarsa correlazione delle frequenze. Con la calibrazione il MAC di tutte le forme modali si avvicina maggiormente all'unità.

10.4 Considerazioni conclusive

Risulterebbe auspicabile svolgere delle prove dinamiche che coinvolgano il setto A4, in quanto i dati delle indagini dell'anno 2000 non hanno portato a risultati esaustivi. Dall'analisi di sensitività è risultato che i due materiali che influenzano in modo significativo il comportamento degli elementi strutturali del teatro sono:

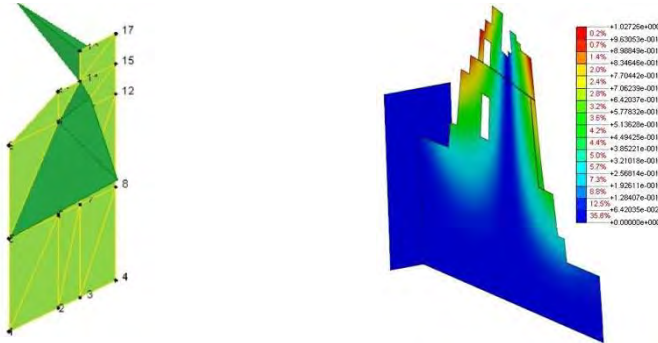
- per i setti: *pietra a conci sbozzati*
- per la scena: *pietra a spacco con buona tessitura*

Sia nell'edificio scenico che nei setti la variazione delle caratteristiche del laterizio, presente in porzioni limitate, non ha fornito risultati particolarmente significativi. Mediante il confronto tra i valori delle prove dinamiche e del sistema di monitoraggio recentemente installato è possibile dedurre che i setti sono costituiti da materiali che presentano più o meno le stesse proprietà. La complessità delle strutture e il gran numero di variabili in gioco (degrado, masse concentrate, lacune, variazioni di sezioni resistenti ecc...) consentono di giungere a definite dei modelli approssimati, ma che rispecchiano sufficientemente il comportamento delle strutture del Teatro Romano di Verona. Questi modelli possono essere utilizzati come base per svolgere delle analisi strutturali che mettano in evidenza eventuali vulnerabilità presenti. Di seguito vengono riportate le prime 5 forme modali estratte dal modello FEM e confrontate con le frequenze sperimentali per il setto B3 e per l'edificio scenico.



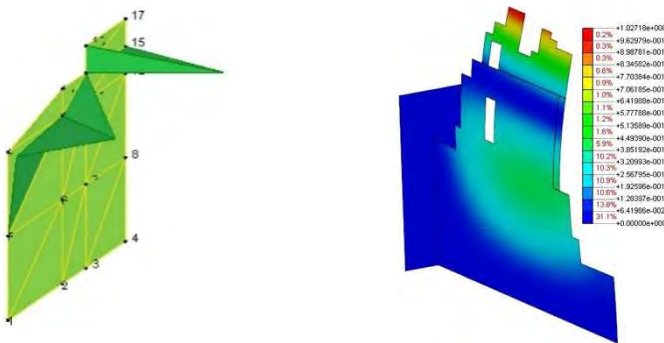
*Prima forma modale
FLESSIONALE*

*ArteMis: 1,9 Hz
Diana: 1,95 Hz*



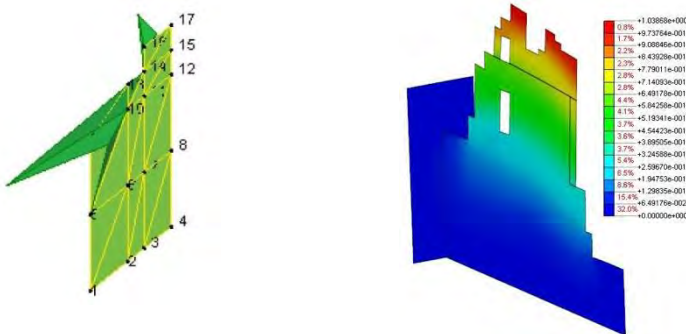
*Seconda forma modale
TORSIONALE*

*ArteMis: 5,311 Hz
Diana: 6,24 Hz*



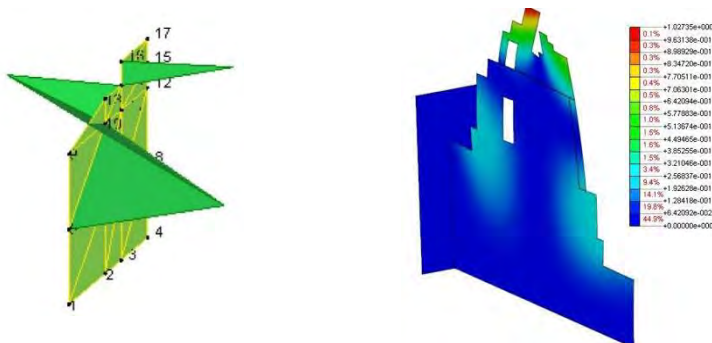
*Terza forma modale
FLESSIONALE*

*ArteMis: 8,823 Hz
Diana: 8,24 Hz*



*Quarta forma modale
NEL PIANO*

*ArteMis: 11,307 Hz
Diana: 10,91 Hz*



*Quinta forma modale
2° FLESSIONALE*

*ArteMis: 13,331 Hz
Diana: 13,43 Hz*

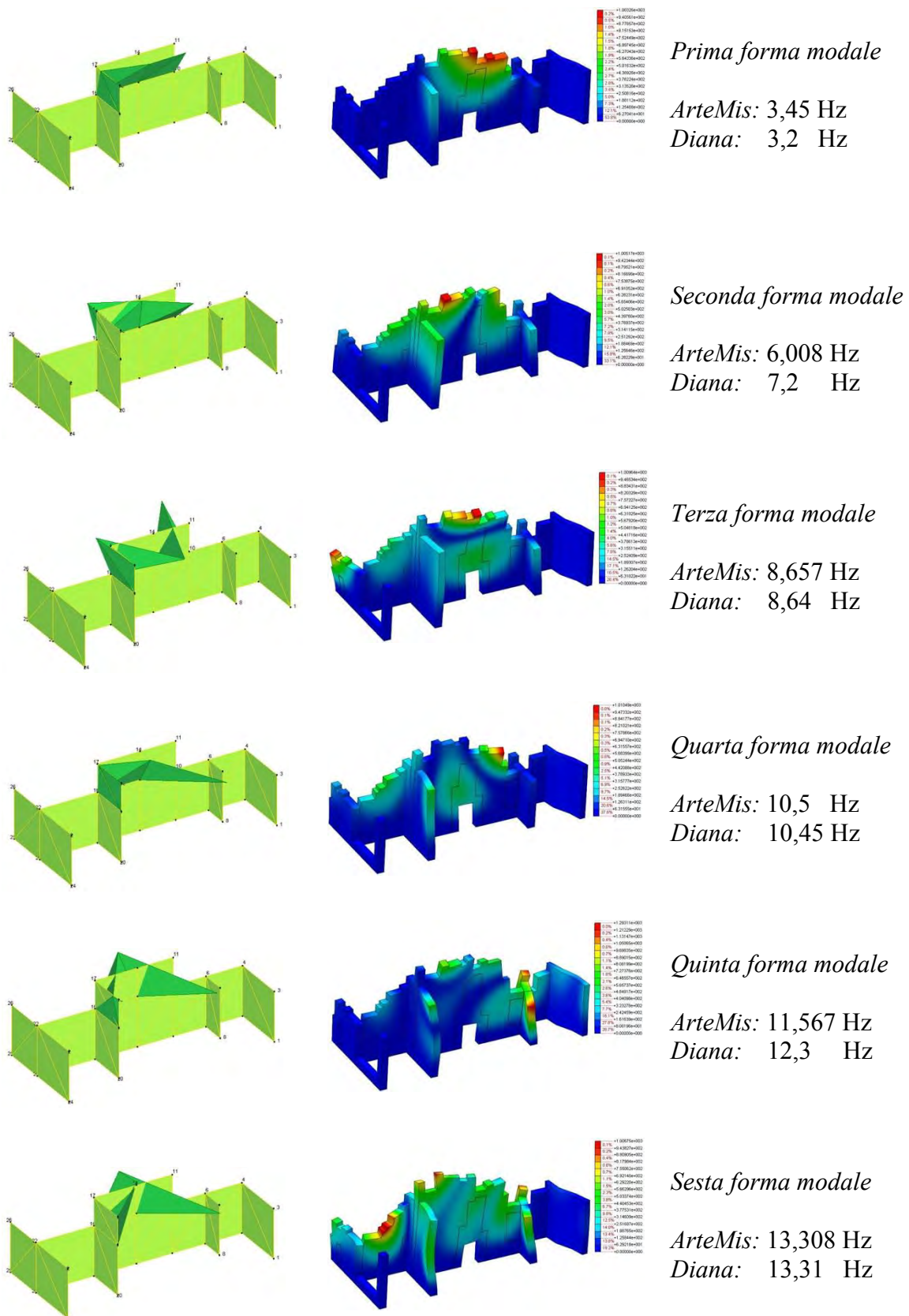


Fig. 10.1 – Confronto frequenze del setto B3 e dell'edificio scenico, con ArteMis e Diana

10.5 Analisi non lineare pushover

In questo paragrafo ci si occupa di sintetizzare i risultati dell'analisi non lineare condotta sull'arco d'ingresso e sull'edificio scenico del Teatro Romano mediante il software *FX+ for DIANATM* al fine di illustrare un possibile utilizzo dei modelli, per definirne eventuali vulnerabilità.

Si sono determinate delle curve di capacità delle strutture attraverso delle analisi di tipo *pushover*, che consistono nell'applicare alla struttura i carichi gravitazionali ed un sistema di forze orizzontali lungo la direzione dell'azione sismica considerata. Tali forze sono scalate in modo da far crescere monotonamente lo spostamento di un punto di controllo sia in direzione positiva che negativa, fino al raggiungimento delle condizioni di collasso locale o globale della costruzione.

Al fine di valutare il ruolo dei diversi parametri non lineari dei materiali, si è inoltre proceduto all'esecuzione di un'analisi di sensitività eseguendo analisi di tipo *pushover*, dove si sono mantenuti fissi gli n-1 parametri non lineari ad eccezione di quello allo studio.

L'analisi statica non lineare (anche definita *pushover*) consente una previsione sufficientemente realistica della risposta sismica di una struttura perché tiene conto del comportamento non lineare della struttura e del processo di redistribuzione delle sollecitazioni dopo la formazione della prima cerniera fino al collasso.

Essa consiste nello "spingere" la struttura fino a che questa collassa o fino a che un parametro di controllo di deformazione non raggiunga un valore limite prefissato; la "spinta" si ottiene applicando in modo incrementale monotono un profilo di forze o di spostamenti prestabilito al modello della struttura soggetto ai carichi gravitazionali. In sostanza l'analisi di spinta è una tecnica di soluzione incrementale-iterativa delle equazioni di equilibrio statico della struttura in cui la forzante è rappresentata dal sistema di spostamenti o forze applicato. L'analisi di spinta consente di definire un legame scalare forza-spostamento caratteristico del sistema studiato, detto curva di capacità, che permette di ricondurre la ricerca dello spostamento massimo di un sistema soggetto ad una certa azione esterna a quella di un sistema SDOF equivalente.

La curva di capacità, ottenuta dall'analisi *pushover* del sistema, rappresenta l'involuppo dei cicli d'isteresi prodotti durante la realizzazione del sisma e può essere considerata come un indicatore del comportamento post-elastico della struttura. Ad ogni punto della curva può essere associato uno specifico stato di danno dell'intero sistema, ed è possibile pertanto associare a determinati livelli di spostamento il grado di funzionalità atteso e il danno corrispondente. La "capacità" offerta dalla struttura deve essere infine confrontata, nell'ottica

di una verifica sismica, con la “domanda” richiesta dalla forzante esterna, cioè da un determinato evento sismico.

10.5.1 Arco d'ingresso

Inizialmente si sono svolte analisi considerando i materiali del setto con caratteristiche non lineari e in seguito le stesse analisi sono state svolte applicando proprietà lineari al setto. Confrontando le curve di capacità, prendendo come riferimento il nodo in sommità dell'arco puntellato e considerando i parametri non lineari, si evidenzia che le due curve sono praticamente coincidenti. Il modello in cui è considerato il setto con proprietà lineari, tuttavia, raggiunge la convergenza.

Dal momento che l'analisi in questo studio è concentrata sull'arco, si sono applicate proprietà lineari al setto ad esso collegato, in modo che questo non inficiasse sulla convergenza del modello. In un secondo tempo, in particolare quando si è applicata un'azione sismica ortogonale al setto, sono state assegnate proprietà non lineari anche a B1 in modo da poter confrontare i risultati ottenuti con l'analisi cinematica.

Dopo aver svolto un'analisi parametrica, facendo variare prima il valore dell'energia di frattura G_f , e poi modificando i valori della resistenza a trazione f_t dei materiali costituenti il modello, è stato studiato il comportamento dell'arco nel modello non lineare.

Il modello è soggetto all'azione del peso proprio (accelerazione di gravità in direzione verticale $g = 9,81 \text{ m/s}^2$) e ad un set di forze orizzontali nella direzione orizzontale (azione sismica) pari a $9,81 \text{ m/s}^2$. Le accelerazioni orizzontali vengono incrementate fino al raggiungimento di spostamenti incompatibili con la struttura. L'analisi non lineare è stata condotta utilizzando il metodo iterativo *Newton-Raphson* modificato¹.

In un primo momento si è considerata l'azione sismica agente lungo la direzione x positiva, ricavandone la curva di capacità per 4 punti. Nell'analisi di sensitività successivamente svolta, sono stati presi a riferimento solo i nodi 1 e 2.

Per l'azione sismica in direzione +x è stata svolta un'analisi parametrica al fine di valutare l'incidenza dei parametri meccanici G_f (energia di frattura a trazione) e f_t (resistenza a trazione) sulla definizione della curva di capacità.

La curva di capacità ricavata dall'analisi di pushover con il software DIANA per il nodo 1 mostra che a partire da circa 0,2 g di accelerazione orizzontale iniziano a formarsi le prime zone fessurate.

¹ Per informazioni dettagliate in merito ai risultati ottenuti dall'analisi, si veda la tesi *'Vulnerabilità strutturale del Teatro Romano di Verona mediante modellazione analitica e numerica'*, di Furlani Silvia, anno 2015.

Analoghi analisi e confronti sono stati fatti anche per le direzioni $-x$, $+y$, $-y$, ricavandone un quadro generale dei risultati ottenuti², mediante modello bidimensionale e tridimensionale.

Si riportano le viste assonometriche del modello recanti, grazie alla visualizzazione per livelli di colore, i valori delle deformazioni all'aumentare dell'accelerazione.

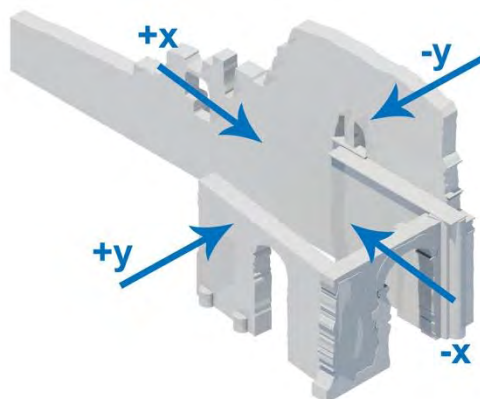


Fig. 10.2 – Forze applicate nell'analisi pushover

Direzione $+x$: i valori maggiori delle tensioni si trovano in corrispondenza delle intersezioni angolari. Risulta lecita l'ipotesi di rottura e di conseguente rotazione del macroelemento comprendente l'arco puntellato in tutta la sua altezza. Un altro possibile meccanismo locale è dato dal ribaltamento nel piano dell'arco ortogonale a quello puntellato, come si nota dalle deformazioni concentrate alla base della struttura e nelle zone adiacenti alla chiave dell'arco.

Direzione $-x$: all'aumentare degli step di carico si nota l'incremento delle deformazioni presenti sull'arco puntellato oltre che alla formazione di cerniere plastiche al piede e in sommità. La concentrazione delle deformazioni all'intersezione tra setto – arco puntellato e alla base dell'arco stesso fanno presupporre un possibile meccanismo di ribaltamento fuori piano dell'arco. Prima ancora del ribaltamento globale, potrebbe verificarsi l'espulsione di materiale in chiave all'arco, visto l'accentuato stato deformativo ivi presente.

La formazione di cerniere plastiche nell'arco ortogonale a quello puntellato, invece, fa pensare ad un ribaltamento nel piano dell'arco stesso. Si evidenziano infine le tensioni e deformazioni nel punto dove si collegano setto e passerella.

Direzione $+y$: si evidenzia la presenza di deformazioni concentrate alla base del setto e in corrispondenza dell'attacco setto e passerella. Si potrebbe supporre un possibile meccanismo di ribaltamento del setto fuori piano. Inoltre sull'arco puntellato ortogonale al setto si

² Per informazioni dettagliate in merito ai risultati ottenuti dall'analisi, si veda la tesi '*Vulnerabilità strutturale del Teatro Romano di Verona mediante modellazione analitica e numerica*', di Furlani Silvia, anno 2015.

riscontrano tre zone dove si concentrano le deformazioni. Tale configurazione sembra confermare l'ipotesi fatta in analisi cinematica del possibile ribaltamento nel piano dell'arco puntellato. Il posizionamento delle cerniere in analisi limite sembra trovar conferma dai risultati della *pushover*. La cerniera a sinistra si forma leggermente sopra rispetto al punto dov'era stata ipotizzata, mentre quella a destra è pressoché coincidente. Interessante è l'individuazione delle zone dove si concentrano tensioni e deformazioni, perché consente di localizzare i punti più vulnerabili della struttura, che necessitano di un controllo e di un'attenzione particolare.

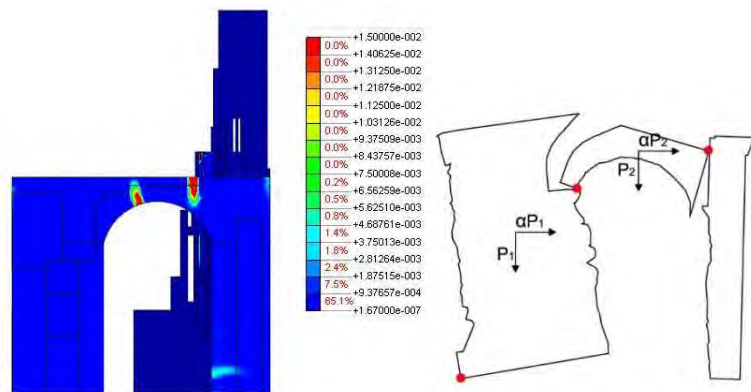


Fig. 10.3 – Formazione delle cerniere plastiche nell'arco puntellato, direzione +y

Direzione -y: si notano deformazioni sull'arco puntellato, che indicano la possibile formazione di cerniere. Inoltre si evidenziano nuove zone di concentrazione delle tensioni e deformazioni, alla base di entrambi gli archi, nella loro intersezione in sommità e in prossimità della chiave dell'arco ortogonale a quello puntellato. Interessante notare che l'analisi *pushover* individua una configurazione delle cerniere plastiche che differisce da quella ipotizzata in analisi limite. La cerniera a destra risulta più in basso, quella centrale è in alto e quella a sinistra è nello spigolo opposto.

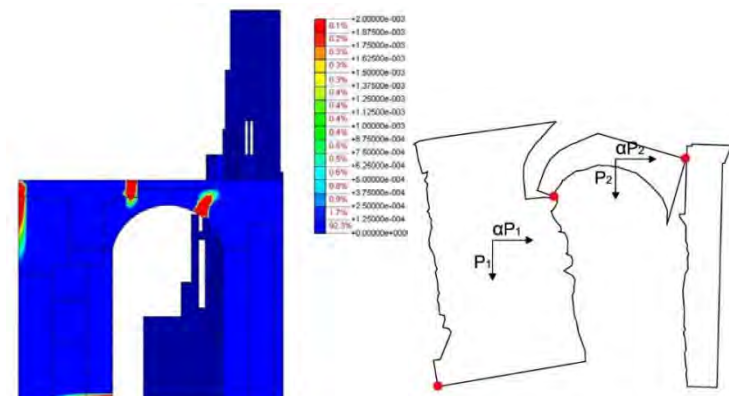
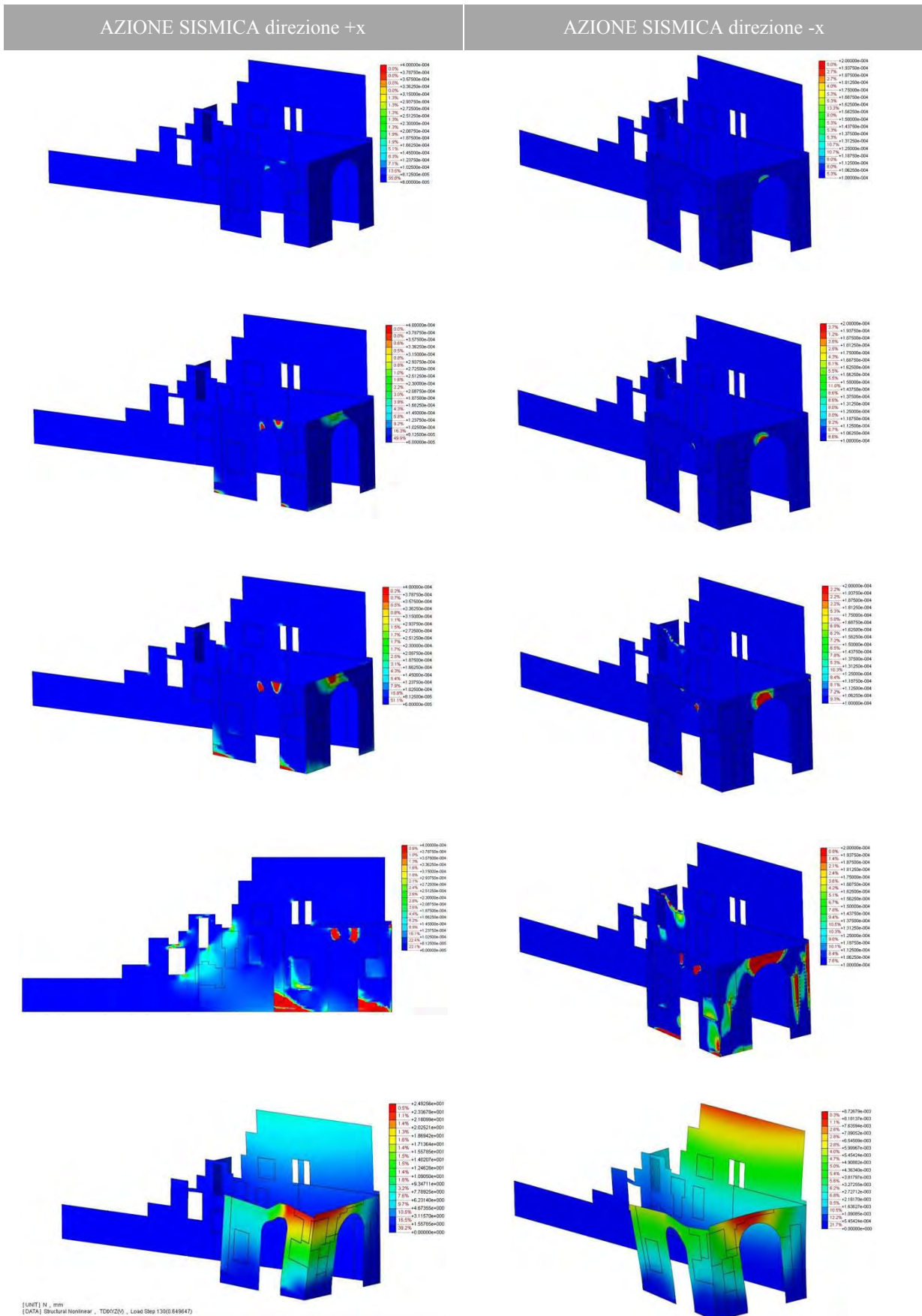
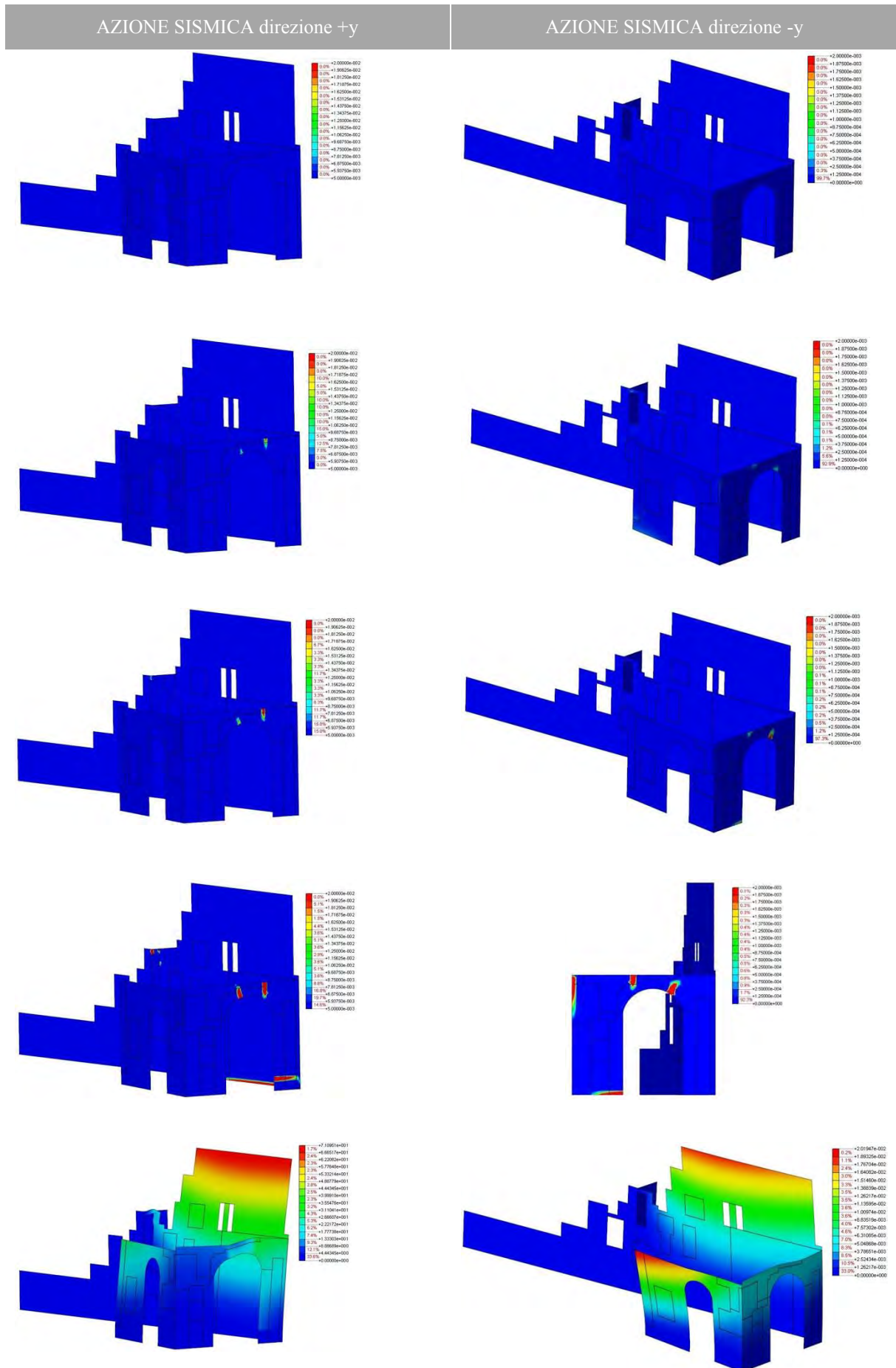


Fig. 10.4 – Formazione delle cerniere plastiche nell'arco puntellato, direzione -y





10.5.2 Edificio scenico

Per quanto riguarda l'edificio scenico, esso è soggetto all'azione del peso proprio (accelerazione di gravità in direzione verticale $g = 9,81 \text{ m/s}^2$) e ad un set di forze orizzontali nella direzione orizzontale (azione sismica) pari a $9,81 \text{ m/s}^2$. Le accelerazioni orizzontali vengono incrementate fino al raggiungimento di spostamenti incompatibili con la struttura. Come punto di controllo si è assunto la sommità terminale della parte centrale del setto. L'analisi non lineare è stata condotta utilizzando il metodo iterativo *Newton-Raphson* modificato. In un primo momento si è considerata l'azione sismica agente in direzione $-y$ positiva orizzontale, poiché già dalle prime indagini effettuate si è notato come essa sia la condizione più sfavorevole. Tale condizione rappresenta anche l'ipotesi di partenza nell'ambito dell'analisi limite. A seguito dell'applicazione dell'azione sismica orizzontale secondo l'asse orizzontale $-y$ per mezzo di passi di carico successivi, si è ottenuta la curva di capacità relativa ai punti di controllo stabiliti.

Analoghe considerazioni sono state fatte per le direzioni $+y$ e $+x$. Non si è svolta un'analisi in direzione $-x$ in quanto ritenuta meno gravosa per la struttura e quindi non particolarmente significativa.

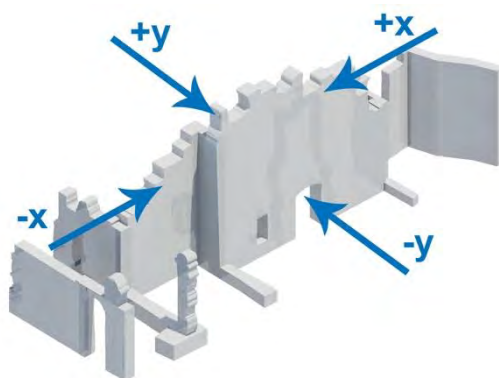


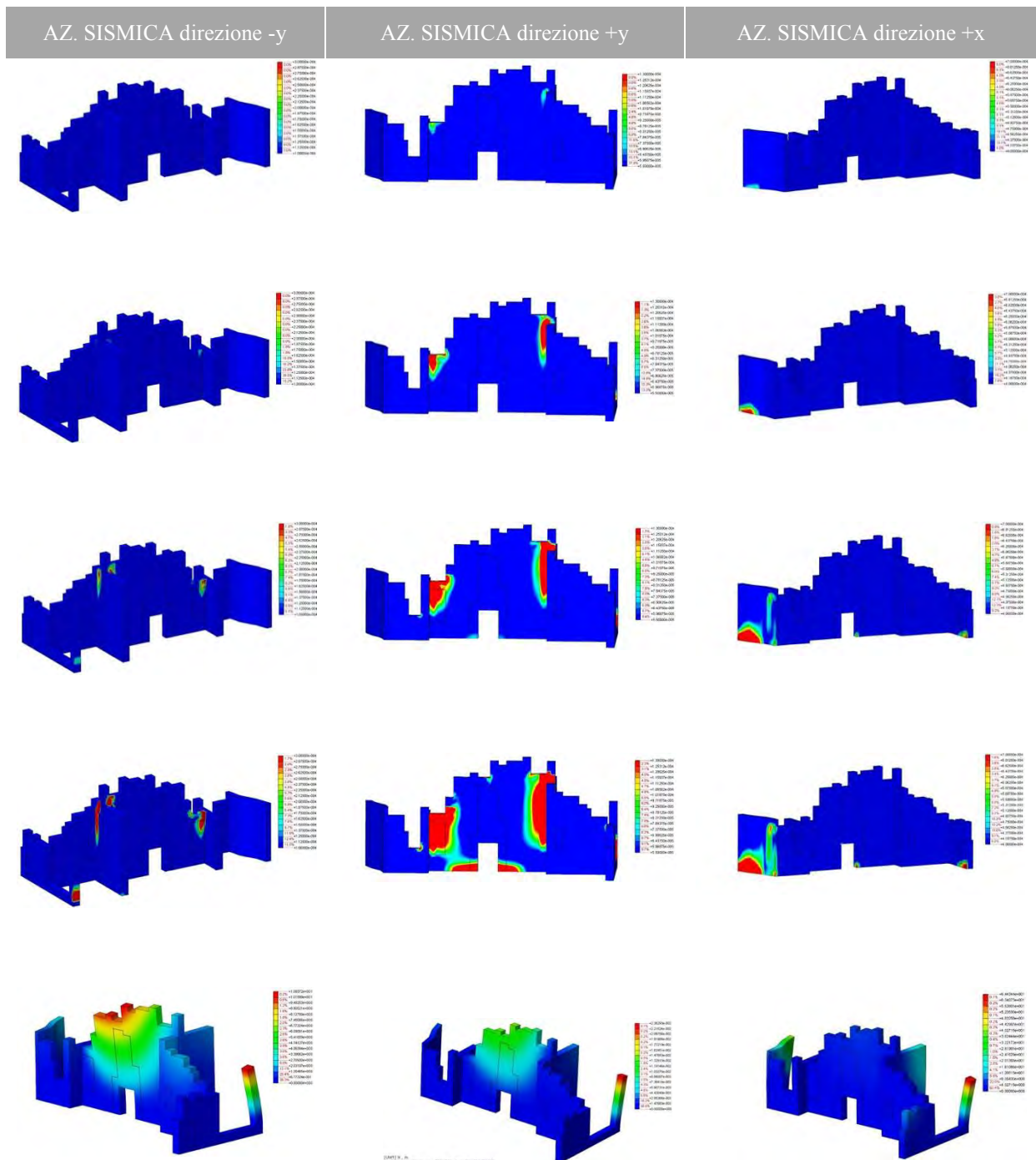
Fig. 10.5 – Forze applicate nell'analisi pushover

Direzione $-y$: come mostrano le immagini nelle tabelle seguenti, vi è una concentrazione delle tensioni in corrispondenza delle intersezioni tra la parete e i setti ad essa ortogonali e alla base della colonna. Il ribaltamento della parete centrale, come ipotizzato in analisi cinematica, è avvalorato anche dall'analisi pushover.

Direzione $+y$: i valori maggiori delle tensioni si trovano in corrispondenza di tutte le intersezioni angolari del setto nella direzione principale di azione della forza sismica. In particolar modo, delle intersezioni angolari ai lati della parete centrale, lungo tutta l'altezza e alla base della colonna laterale, comunque ben ammorsata al resto del corpo, dove per gli

evidenti motivi di instabilità dovuti alla considerevole snellezza, risulta notevole il valore dello stato tensionale. Ragion per cui risulta lecita l'ipotesi di rottura e di conseguente ribaltamento del macroelemento comprendente la parte centrale del setto.

Direzione +x: dall'analisi dello stato deformativo si evidenzia una concentrazione crescente di tensioni e deformazioni alla base delle pareti ortogonali alla direzione del sisma.



CONCLUSIONI

Sin dalla sua edificazione, in epoca augustea, il Teatro è stato un punto di riferimento per la città di Verona e quindi un luogo da salvaguardare e mantenere in vita, essendo utilizzato tutt'ora sia per visite turistiche che per la rappresentazione di spettacoli, teatrali e musicali.

Lo studio delle strutture archeologiche del Teatro Romano di Verona è stato eseguito attraverso una precisa metodologia, che mira ad avere una conoscenza approfondita del luogo, delle vicende storiche, facendo un'anamnesi delle strutture oggetto di studio, per avere un quadro generale d'insieme esaustivo. In un primo luogo, il lavoro di tesi ha evidenziato, attraverso la ricerca storica e bibliografica, una vasta quantità di informazioni in merito al complesso del Teatro, per lo più però frammentate. Dopo aver catalogato l'ampia bibliografia presente e aver scremato le fonti, tenendo solo le più utili e significative, è stato possibile ricostruire e capire l'importanza del susseguirsi delle vicende storiche che hanno reso il sito archeologico così come ci appare ai nostri giorni.

La ricerca storica ha permesso quindi di ricostruire e unificare l'articolata genesi temporale del complesso: da monumento a rovina, fino alla rinascita e riscoperta archeologica. Questo studio ha avuto un ruolo fondamentale nella fase conoscitiva preliminare e sicuramente servirà da base per l'eventuale progettazione di interventi di miglioramento e conservazione delle strutture.

Successivamente alla fase di ricerca storica, è seguito lo studio dello stato di fatto del complesso, il quale si è basato inizialmente su un attento rilievo fotografico e rilievo geometrico preciso, che risultavano mancanti.

Fondamentale, poi, per comprendere appieno le tipologie differenti di degradi presenti nei materiali costituenti le strutture portanti del Teatro, è stato il confronto avvenuto tra le indagini sperimentali *in situ*, avvenute nell'anno 2000, di cui era presente la documentazione,

con il rilievo geometrico e critico dettagliato svolto in questa tesi. Inizialmente, pertanto, è stata svolta l'analisi diretta del quadro di danno e dissesto, ed è stata confrontata e controllata con la campagna di indagini conoscitive geognostiche (ai fini della determinazione della natura e della morfologia del sottosuolo), le indagini relative allo stato di degrado del materiale lapideo, le indagini debolmente distruttive sulle strutture murarie e le indagini non distruttive relative alla risposta dinamica di alcune porzioni.

Analizzando poi il degrado e catalogandone le informazioni, si è riscontrato che le principali cause dello stesso risultano essere la natura calcareo-marnosa dei materiali costruttivi, l'inquinamento atmosferico e veicolare, causato dalla strada adiacente al Teatro, l'esposizione delle strutture che ad esempio a nord-est presentano molta vegetazione composta da muschi e licheni, infine la natura grossolana delle rocce e la presenza di discontinuità che aumentano le vie di infiltrazione dell'acqua piovana.

Tutte queste informazioni preliminari, insieme allo studio finale del quadro fessurativo presente su alcune porzioni murarie e insieme ad un'analisi visiva delle principali vulnerabilità, ha permesso di avere un quadro conoscitivo ampio e dettagliato delle strutture del Teatro Romano di Verona.

Le informazioni fino a qui acquisite, sono state una premessa fondamentale al fine dell'installazione del nuovo sistema di monitoraggio nel Teatro Romano. In base al rilievo del quadro fessurativo, infatti, e alle analisi precedentemente svolte, è stato possibile decidere il corretto e più efficace posizionamento dei sensori sulle strutture, per aumentare il livello di conoscenza del complesso. All'interno del sito sono stati posizionati i sensori sia per il sistema di monitoraggio statico che per quello dinamico, che rimarranno attivi per i prossimi anni, con i quali sarà possibile controllare lo stato di salute delle strutture, indicandone l'eventuale insorgenza di nuovi stati di danno.

Il monitoraggio strutturale è tra gli aspetti fondamentali per la conoscenza del manufatto storico poiché è l'unica metodologia di controllo in grado di misurare grandezze sperimentali relazionabili tanto al comportamento locale, deformazione delle lesioni, quanto a quello globale della struttura, modi e frequenze di vibrare.

Di particolare interesse risulta il fatto che il metodo di controllo strutturale può, subordinatamente alla comprensione dei fenomeni di dissesto in atto, porsi come valida alternativa all'intervento di consolidamento, a vantaggio della conservazione. Oltre a questo, in seguito all'applicazione di eventuali interventi di consolidamento ma anche dopo eventi sismici significativi, il monitoraggio offre la possibilità di procedere seguendo il metodo osservazionale, ovvero consentendo di controllare in tempo reale l'efficacia delle tecniche

adottate o consentendo di controllare il danno indotto dall'evento traumatico per la struttura. Processando quindi tutti i parametri statici e dinamici monitorati e rilevati dal sistema, è possibile una valutazione sul comportamento globale della struttura, sull'esecuzione di eventuali interventi per la riduzione della vulnerabilità sismica, sulla bontà di interventi strutturali pregressi o su eventuali danni causati da eventi significativi per il manufatto.

L'analisi dei dati di monitoraggio strutturale, insieme ai dati delle prove dinamiche AVT, ha proposto risultati di grande importanza per le attività di studio. Analizzando in particolare modo i dati *fast* di tipo dinamico è stato possibile procedere con un'identificazione dinamica delle principali strutture monitorate, al fine di ricavare frequenze e modi di vibrare utili per valutare, in futuro, l'evoluzione del comportamento strutturale sotto l'effetto degli agenti ambientali. I valori delle frequenze ricavati sono piuttosto stabili ed eventuali oscillazioni sono esclusivamente dovute alle variazioni cicliche stagionali della temperatura. Inoltre confrontando le frequenze ricavate dal nuovo monitoraggio con quelle ricavate dall'analisi dei dati dell'anno 2000 non si notano particolari differenze di valori, a conferma del fatto che non ci sono state particolari alterazioni strutturali.

L'identificazione modale risulta essere quindi un importante strumento per la valutazione della risposta globale della struttura e può essere utilizzato per la valutazione delle caratteristiche dinamiche della costruzione, per successive modellazioni numeriche, per valutare gli effetti di vibrazioni ambientale (per esempio dovute al traffico o al vento) e per monitorare l'evoluzione dell'eventuale danno presente sulla struttura. Specialmente nel campo delle costruzioni in muratura, questa tecnica rappresenta una soluzione ottimale per l'investigazione del comportamento dinamico e delle proprietà meccaniche dei materiali e delle strutture, avendo bassi costi di applicazione e richiedendo brevi periodi di studio ma, soprattutto, avendo una bassa invasività nel rispetto dei principi del restauro e della conservazione.

Per quanto riguarda il monitoraggio dei parametri di natura statica, la brevità del periodo di osservazione non permette ancora di esprimere dei giudizi significativi circa le variazioni deformative delle lesioni controllate. Il periodo di osservazione è infatti troppo ridotto per riuscire a filtrare gli spostamenti registrati delle lesioni dalle variazioni termiche di apertura/chiusura caratterizzate da un andamento ciclico stagionale. Tuttavia, i sensori seguono in maniera diretta o inversa la correlazione con la temperatura registrata dal sistema.

Da un punto di vista complessivo, siamo in una fase precoce del monitoraggio, perciò risulta impossibile esprimere giudizi su come il comportamento dinamico e statico della struttura sia influenzato da fattori ambientali, in quanto è necessario disporre almeno di un ciclo annuale di

misurazioni per dare valutazioni significative a tal proposito. Per quanto riguarda i primi quattro mesi di monitoraggio si possono trarre solo delle conclusioni sul funzionamento del sistema, il quale, dopo un primo periodo di test, funziona correttamente e i dati raccolti hanno permesso di eseguire l'identificazione dinamica della struttura.

Il lavoro svolto è stato quindi utilizzato come base per lo sviluppo di ulteriori analisi strutturali, trattate nella della tesi '*Vulnerabilità strutturale del Teatro Romano di Verona mediante modellazione analitica e numerica*', di Furlani Silvia.

I dati acquisiti dal sistema di monitoraggio dinamico del Teatro Romano hanno consentito di calibrare in maniera precisa i modelli numerici dei setti, dell'arco d'ingresso e dell'edificio scenico. Partendo da un'analisi di sensitività sui parametri geometrici e materici delle strutture, tali modelli sono stati calibrati sul comportamento reale delle strutture stesse e hanno permesso di eseguire analisi non lineari avanzate.

Gli spessori della muratura, eventuali distacchi e riduzioni di sezione resistente, le particolari tecniche costruttive risalenti all'epoca romana e la complessità e irregolarità geometrica causata dall'azione del tempo sulle strutture, sono solo alcuni fattori che hanno inciso sulla bontà dei dati ottenuti dai modelli elaborati. Si ritiene comunque che lo studio condotto sia sufficientemente rappresentativo e possa essere un valido ausilio e supporto per interpretare e comprendere il reale comportamento del complesso del Teatro Romano.

Con il proseguimento dell'analisi dei dati del monitoraggio nei mesi seguenti sarà possibile avvicinarsi sempre di più alla situazione reale, passando da modelli numerici a modelli sempre più rappresentativi del reale comportamento delle strutture. La validazione dei modelli analitici infatti consente il loro efficace impiego nella valutazione del rischio sismico per la struttura in esame. In questo modo sarà possibile capire quali saranno gli effettivi punti deboli del complesso studiato e le eventuali possibili vulnerabilità future che potrebbero verificarsi a seguito di eventi sismici e definire, quindi, un eventuale programma di interventi di consolidamento più efficiente e poco invasivo, che andrà a intervenire in zone mirate, salvaguardando l'integrità della costruzione storica.

Bibliografia

- Abruzzese D., Angelaccio M., Buttarazzi B., Giuliano R., Miccoli L., *Long Life Monitoring of Historical Monuments via Wireless Sensors Network*, International Symposium on Wireless Communication Systems, IEEE, 2009, pp. 570-574.
- Adam J. P., *L'arte di costruire presso i romani. Materiali e tecniche*. Milano, Longanesi, 1984.
- Aktan, A. E., Chase, S., Inman, D. & Pines, *Monitoring and managing the health of infrastructure systems*. In Proc. SPIE 4337, xi–xxi, 2001.
- Aktan, A.E., Ciloglu, S.K. Grimmeisman, Pan, Q. and Catbas, F.N., *Opportunities and challenges in health monitoring of constructed systems by modal analysis*, Proc. of International Conference on Experimental Vibration Analysis for Civil Engineering Structures, Bordeaux, France, 2005.
- Albasini A., *La Ricostruzione del Teatro Romano di Verona*, Emporium, vol. 28, 1908, pp. 53-61.
- Bartoli G., Blasi C., *Il sistema di monitoraggio della cupola di Santa Maria del Fiore: problematiche relative al funzionamento degli strumenti ed alla gestione dei dati*, Università di Firenze, Firenze, 1993.
- Bastianello S., Caldon M., *Metodologie integrate per la valutazione della sicurezza di edifici storici basate sul monitoraggio strutturale. Applicazione a tre casi studio*, Tesi di laurea, Dipartimento di Costruzioni e Trasporti, 2012.
- Beccaro E., Milan C., *SHM (Structural Health Monitoring) di strutture storiche: analisi statica e dinamica dell'Arena di Verona*, Tesi di laurea, Dipartimento di Costruzioni e Trasporti, 2012.
- Beconcini M.L., Croce P., Mengozzi M., *Caratterizzazione dinamica del campanile di San Nicola in Pisa*, Atti di convegni workshop WONDERmasonry, DICEA Firenze, 2006, pp. 100-112.
- Beschi L., Verona Romana-i Monumenti, in “Verona e il suo territorio”, vol.I, 1960, pp.409-432.

- Bessi P., *Il Teatro Romano di Verona*, Rivista “Natura e Arte”, 1908.
- Biancolini G., *Cronica della Città di Verona di Pier Zagata*, vol.III, tav. 1, 1749, pag. 126.
- Bocca M., Cosar E. I., Salminen J., Eriksson L.M., *A Reconfigurable Wireless Sensor Network for Structural Health Monitoring*; 4th International Conference on Structural Health Monitoring of Intelligence Infrastructure, Zurich, Switzerland, 2009.
- Bolla M., *Il Teatro Romano di Verona e le sue sculture*, Grafiche Aurora, Anno 2010.
- Bolla M., *Il teatro romano di Verona*, in *Italia antiqua. Envois degli architetti francesi (1811-1950). Italia e area mediterranea*, catalogo della mostra (Parigi-Roma, 2002), Parigi 2002, pp. 26-40.
- Borsi G.F., *Leon Battista Alberti e le antichità romane*, Firenze, 2004.
- Brederode P., De Winter P., Van Staalduinen P., Segers W., *Dynamic offshore structure test (DOST) project—a new approach to quality assessment of offshore structures*, in Proc. Inspection, repair and maintenance IRM/AODC86, Aberdeen, 1986.
- Brincker, R., Andersen, P., Jacobsen, N.J., *Automated Frequency Domain Decomposition for Operational Modal Analysis*, Proceedings of the 25th SEM International Modal Analysis Conference, Orlando, FL, USA, 2007.
- Brownjohn J. M. W., P. Moyo P., Rizos C., Tjin S. C., *Practical issues in using novel sensors in SHM of civil infrastructure: problems and solutions in implementation of GPS and fibre optics*, In Proc. 4th Int. workshop on structural health monitoring, Stanford University, Destech Publications Inc., USA, 2003, pp. 499-506.
- Brownjohn J., Tjin S.C., Tan G.H., Tan B.L., Chakraboorty S., *A Structural Health Monitoring Paradigm for Civil Infrastructure*, 1st FIG International Symposium on Engineering Surveys for Construction Works and Structural Engineering, Nottingham, United Kingdom, June 28 – July 1, 2004.
- Brownjohn J.M.W., *Structural health monitoring of civil infrastructure*, Phil. Trans. R. Soc. A, p.589, 2007.
- Brownjohn J.M.W., *Structural health monitoring of civil infrastructure*, in Phil. Trans. R. Soc. 2007, pp.610-613.
- Caccin P., *Sviluppo di procedure automatiche di trattamento e analisi dei dati statici per il monitoraggio strutturale*, Università di Padova, 2012.
- Capparozzo G., *Gli scavi dell’Antico Teatro di Verona per opera di A. Monga*, 1838
- Caroto G., *De l’antiquità de Verona*, tav.XVI, 1560.

- Casarin F., Bello E., *Structural Monitoring*, atti di Advanced Masters in Structural Analysis of Monuments and Historical Constructions, 2010.
- Cavalieri Manasse G., *Il contesto urbanistico del santuario: l'area forense; La tipologia architettonica*, in *L'area del Capitolium di Verona. Ricerche storiche e archeologiche*, a cura di - Cavalieri Manasse G., Verona 2008, pp. 293-326.
- Celebi M., *Seismic instrumentation of buildings (with emphasis on federal buildings)*, Technical Report No. 0-7460-68170, United States Geological Survey, Menlo Park, CA, 2002.
- Cençon M., *Il complesso del teatro romano di Verona: un sito d'eccezione per la compresenza di monumenti di epoche diverse. Conoscere la storia antica attraverso i musei archeologici*, Venezia, 2006, pp. 145-152.
- Ceravolo R., Pescatore M., De Stefano A., *Symptom-based reliability and generalized repairing cost in monitored bridges*, Politecnico di Torino, Torino, Italy, 2007.
- Cessi C., *Andrea Monga ed il Teatro Romano di Verona*, in *Madonna Verona*, anno 1920 ottobre-dicembre, n.4, Verona, Editore Tipografia Cooperativa, pp. 229-242.
- Chang F. K. , *A summary report of the 2nd workshop on structural health monitoring held*, at Stanford University on September 8–10, 1999.
- Cipriani E., *Il Teatro romano*, Verona Time, n. 2, 1995, pp. 10-24.
- Dalgleish W. A., Rainer J. H., *Measurements of wind induced displacements and accelerations of a 57-storey building in Toronto, Canada*, In Proc. 3rd Colloquium On industrial Aerodynamics, Aachen, Building Aerodynamics, pt. 2, 1978, pp. 67–78.
- Dal Forno F., *Il teatro romano di Verona*, Vita veronese, 1954.
- Dal Forno F., *Il teatro romano di Verona*, Vita veronese, 1975.
- Dal Forno F., *Il teatro romano di Verona*, in *Vita Veronese*, anno 1961, Verona, Editore Edizioni di 'Vita Veronese', Anno 1961, pp. 7-44.
- Da Persico G., *Verona e la sua Provincia*, in *Sala bolognese*, Forni, Verona, Editore.
- Del Grosso A., Lanata F., *Model Data analysis and Interpretation for Long-term Monitoring of Structures*, International Journal for Restoration of Buildings and Monuments, 7, 2001, pag.285–300.
- Del Grosso A., Lanata F., Torre A., *Recent Structural Health Monitoring applications in Italy*, 3rd European Structural Health Monitoring, 2006, pag.439 – 446.
- Del Grosso A., Lanata F., Inaudi D., Posenato D., *Data management and damage identification for continuous static monitoring of structures*, 4th World Conference on Structural Control and Monitoring, 11-13 jul 2006.

- Deraemaeker, A., Reynders, E., De Roeck, G., Kullaa, J., *Vibration-based structural health monitoring using output-only measurements under changing environment*, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 22, pp. 34-56, 2008.
- Det Norske Veritas, *Rules for the design, construction and inspection of offshore structures*, Norway, DNV, 1977.
- Dyke S. J., Bernal D., Beck J., Ventura C., *Experimental phase 2 of the structural health monitoring benchmark problem*, In Proc. ASCE Engineering Mechanics Conference, WA, 2003.
- Fabbrocino G., C.Ranieri, G.M. Verderame, *L'analisi dinamica sperimentale e il monitoraggio delle strutture esistenti*.
- Faretina E, *Analisi di vulnerabilità dell'Ala dell'Arena di Verona*, Tesi di laurea, Dipartimento di Costruzioni e Trasporti, 2008.
- Farrar C. R., Ph.D., P.E., *New Trends in Vibration-Based Structural Health Monitoring: A Statistical Pattern Recognition Paradigm for SHM*, 2006.
- Farrar C.R. , K. Worden, *An introduction to structural health monitoring*, Phil. Trans. R. Soc., pp. 303-306, 2007.
- Fattoretto M., *Sviluppo di procedure automatiche di stima dei parametri modali per il monitoraggio strutturale*, Università di Padova, 2012.
- Fonte Basso A., *Il Teatro Romano di Verona*, in Vie d'Italia, rivista mensile del Touring Club Italiano, n.10, Milano, Editore G. Modiano, anno 1935 ottobre, pp. 789-797.
- Franzoni L., *Tribuna imperiale nel Teatro Romano di Verona*, in Studi Storici Veronesi, Luigi Simeoni, volume 7, Verona, anno 1956, pp. 3-7.
- Franzoni L., *Il Teatro Romano di Verona*, in Nova Historia, n.1, Verona, Editore Linotipia Veronese Ghidini e Fiorini, anno 1960, pp. 178-187.
- Franzoni L., *Nuovi elementi per la conoscenza del Teatro Romano di Verona*, in Nova Historia, anno 13, n.1, Verona, Editore Linotipia Veronese Ghidini e Fiorini, anno 1961, gennaio-aprile, pp. 55-62.
- Franzoni L., *Un Mancato restauro del Teatro Romano*, Vita veronese, n. 11-12, 1969, pp. 421-424.
- Franzoni L., *Vent'anni di interventi conservativi al Teatro Romano e Museo Archeologico*, in Vita Veronese, anno XXXII, n.11-12, Verona, Edizioni di 'Vita Veronese', anno 1979 novembre-dicembre, pp. 315-319.

- Franzoni L., *Il Teatro Romano*, in Palladio e Verona, catalogo della mostra a cura di Paola Marini, Vicenza, Editore Neri Pozza Editore, anno 1980, pp.54-62.
- Franzoni L., Lampronti G., *Il Teatro Romano: la storia e gli spettacoli*, Verona, Editore Comune di Verona, anno 1988.
- Frezouls E., *Aspects de l'histoire architecturale du theatre romain*, in Aufstieg du Niedergang, II, 12, 1 Berlin 1982, pp. 343-441.
- Ghirardini G., *Notizie preliminari sugli scavi del Teatro Romano di Verona*, Notizie scavi 1905.
- Ghirardini G., *Discorso di Gherardo Ghirardini, letto nell'occasione della visita di S. M. Il Re*, il 17 marzo 1906, Verona, Editore G. Franchini, anno 1906.
- Ghirardini G., *Il Teatro Romano di Verona*, Verona, Stabilimento Tipo-Litografico G. Franchini, 1907.
- Giani E., *L'antico Teatro di Verona*, Verona 1908.
- Gros P., *L'architettura romana: dagli inizi del 3° secolo a.C. alla fine dell'alto impero*, Longanesi, Milano, 2001.
- Guan, H., Karbhari, V.M., Sikorski, C.S., *Timedomain output only modal parameter extraction and its application*, Proceedings of the 1st International Operational Modal Analysis Conference, Copenhagen, Denmark, pp. 577-584, 2005.
- Inama V., *Il teatro antico greco-romano*, Hoepli, Milano, 1910.
- Inaudi D., *SOFO sensors for static and dynamic measurements*, in Symp. on Engineering Surveys for Construction Works and Structural Engineering, Nottingham, UK, 2004.
- Kijewski T. L., Correa, Kareem A., *The Chicago monitoring project: a fusion of information technologies and advanced sensing for civil infrastructure*, in Structural Health Monitoring and Intelligent Infrastructures, vol. 2, ed. Z. Wu & M. Abe., Amsterdam, 2003, pp. 1003–1010.
- Kiremidjian A., Straser E., *A modular wireless damage monitoring system for structures*, Report TR128, Blume Centre, Stanford CA, 1998.
- Kullaa J., *Functions of a Structural Health Monitoring System*, 2008.
- Lanata F., *Damage detection algorithms for continuous static monitoring of structures*, PhD Thesis, University of Genoa, DISEG, Italy, 2005.
- Lancaster L., *Roman Engineering and Construction*. In Oleson J.P. (Ed.) «The Oxford Handbook of Engineering and Technology in the Classical World», Oxford University Press, 2008.

- Lugli G., *La tecnica edilizia romana*. 2 Voll., Giovanni Bardi ed, Roma, 1957.
- Maffei S., *Verona illustrata*, Milano, 1825.
- Magalhães, F., Cunha, A., Caetano, E., *Permanent monitoring of “Infante D. Henrique” bridge based on FDD and SSI-COV methods*, Proceedings of ISMA2008, Leuven, Belgium, 2008.
- Maguire J. R., *Condition monitoring of structures: a briefing note for clients and authors*. In Proc. Institution of Civil Engineers, Structures and Buildings 134, pp. 279–280, 1999.
- Marconi P., *Verona Romana*, Bergamo, 1937.
- Marotto M., *Indagini sperimentali, monitoraggio e modellazione strutturale per la valutazione della sicurezza sismica dell’Arca di Cansignorio della Scala*, Verona, Università di Padova, 2008.
- Masri S.F., Sheng L.H., Caffrey J.P., Nigbor R.L., Wahbeh M., Abdel-Ghaffar A.M., *Application to a Webenabled Real-time Structural Health Monitoring System for Civil Infrastructure Systems*, Smart Materials and Structures, 13, 2004, pag.1269–1283.
- Melani A., *I nuovi scavi del Teatro Romano di Verona*, L’illustrazione Italiana, n. 41, 1905, pp. 358-359.
- Mita A., *Emerging needs in Japan for health monitoring technologies in civil and building structures*. In Proc. 2nd Int. workshop on structural health monitoring, Stanford University, 1999.
- Mita A., Inamura T., Yoshikawa S., *Structural health monitoring system for buildings with automatic data management system*, 4th International Conference on Earthquake Engineering Taipei, Taiwan October 12-13, 2006.
- Modena C., Casarin F., Valluzzi M. R., Da Porto F., *Structural monitoring for the evaluation of the dynamic response of historical monuments, Masonry and Timber Structures*, Publisher RILEM Publications, 2008.
- Mufti A., *Guidelines for structural health monitoring*. ISIS Design Manual No. 2. ISIS Canada, 2001.
- Omenzetter P., Brownjohn J.M.W., *Applications of Time Series Analysis for Bridge Monitoring*, Smart Materials and Structures, 15(1), 2006, pag.129–138.
- Omenzetter P., Brownjohn J.M.W., Moyo P., *Identification of Unusual Events in MultiChannel Bridge Monitoring Data*, Mechanical Systems & Signal Processing, 2004, pag.409– 430.

-
- Perkins W., *Architettura romana*, vol. Storia dell'Architettura, C.Pirovano, a cura di Electa, Milano.
 - Pinali G., *Relazione degli scavi dell'antico romano teatro che ha esistito sulle falde del colle or detto castello di S. Pietro in Verona*, anno 1845.
 - Poncelet, F., Kerschen, G., Golinval, J.C., Verhelst, D., *Output-only modal analysis using blind source separation techniques*, 2007, Mechanical Systems and Signal Processing, pp. 2335-2358.
 - Pozzi M., Zonta D., Zanon P., *Monitoring Heritage Buildings with Wireless Sensor Networks: The Torre Aquila Deployment*, Proceedings of the 8th ACM/IEEE International Conference on Information Processing in Sensor Networks, San Francisco (CA, USA), April 13-16, 2009.
 - Rainieri, C., Fabbrocino, G., *ARES, una procedura ibrida per l'identificazione dinamica automatica e il monitoraggio strutturale*, 2011, ANIDIS, Bari, Italy.
 - Rainieri, C., Fabbrocino, G., Cosenza, E., *Automated Operational Modal Analysis as structural health monitoring tool: theoretical and applicative aspects. Key Engineering Materials*. Vol. 347. pp. 479-484, 2007.
 - Reynders E., De Roeck G., *Fully automated modal parameter estimation for Structural Health Monitoring*, 2011, EVACES, pp. 477-184.
 - Ricci S., *Il Teatro Romano di Verona studiato sotto il rispetto storico e archeologico con la bibliografia di Manga, suo scopritore*, Venezia, Editore Tipografia F. Ili Visentin, anno 1895.
 - Rucker, W., Rohrmann, R. G. & Hille, F. 2006 *Guidelines for monitoring and assessment – a SAMCO initiative as a basis for international standardization*. In Proc. SHMII-2, structural health monitoring and intelligent infrastructures, vol. 2 (ed. J. Ou, H. Li and Z. Duan), pp. 1671–1676. London, UK: Taylor & Francis Group.
 - Saraina T., *De origine et amplitudine civitatis Veronae*, Verona, 1540.
 - Serino G., Spizzuoco M., Marsico M.R., *Application of structural isolation and health monitoring The 'Our Lady of Tears Shrine' in Syracuse (Italy)*, Structure and Infrastructure Engineering, 2009.
 - Serlio S., *I sette libri dell'architettura*, libro III, 1537.
 - Sikorsky C., *Development of a Healthy Monitoring System for Civil Structures Using a Level IV Non-destructive Damage Evaluation Method*, F.K. Chang, Structural Health Monitoring, 2000, pag.68–81.

- Small D.B, *Studies in roman theater*, in American journal of archeology, 87, 1983, pp.55-68.
- Sohn H., Czarneski J.A., Farrar C.R., *Structural Health Monitoring Using Statistical Process Control*, Journal of Structural Engineering, 126(11), 2000, pag.1356–1363.
- Tosi G., *Gli edifici per spettacolo di Verona*, in *Spettacolo in Aquileia e nella Cisalpina romana (Antichità Altoadriatiche, XLI)*, Udine, pp. 241-257, 2002.
- Tosi G., *Gli edifici per spettacoli nell'Italia romana*, I-II, Roma 2003, pp. 537-540.
- Verboven, P, Parloo, E, Guillaume, P, and Van Overmeire, M., *Autonomous structural health monitoring –Part I: modal parameter estimation and tracking*, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 16(4), pp.637-657, 2002.
- Viana D., *Un rilievo del Teatro Romano di Verona al Museo Maffeiano*, Verona, 1937.
- Worden K., Manson G.; *Structural Health Monitoring using Pattern Recognition*; in *New Trends in Vibration-Based SHM*, CISM, Udine, September, 2008.
- Worden S. K., Farrar C. R., Manson G. and Park G.; *The Fundamental Axioms of Structural Health Monitoring*, *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences Issue*, June, 2007.
- Yanev B., *Structural health monitoring as a bridge management tool*, In Proc. SHMII-1, *Structural Health Monitoring and Intelligent Infrastructures*, vol. 1, ed. Z. Wu & M. Abe, 2003, pp. 87–98.
- Zanolli G., *Il Teatro di Verona in un foglio di Leonardo*, in *Civiltà Veronese*, anno III, n.9 ottobre 1987, pp.15-20.

Fonti archivistiche

- Carteggio Ditta Righetti Francesco, *Lavori di manutenzione Teatro Romano*, Carteggi 1931-1970, n° protoc. 33311, categ. IX, clas. 5, fasc. 2, Archivio Generale Comune di Verona, 1936-1937.
- Carteggio Ditta Righetti Francesco, *Demolizione casa attigua Teatro Romano*, Carteggi 1931-1970, n° protoc. 16141, categ. X, clas. 10, fasc. 4, Archivio Generale Comune di Verona, 1939.
- Carteggio Ditta Righetti Francesco, *Sistemazione archeologica al Teatro Romano*, Carteggi 1931-1970, n° protoc. 24202, categ. X, clas. 2, fasc. 2, Archivio Generale Comune di Verona, 1940.

- Carteggio Ditta Bellè Nazareno, *Restauro e opere di consolidamento al Teatro Romano*, Opere murarie, Carteggi 1931-1970, n° protoc. 29585, categ. IX, clas. 8, fasc. 1, Archivio Generale Comune di Verona, 1967.
- Carteggio Ditta Isalberti Luciano, *Lavori di restauro al Teatro Romano*, Carteggi 1931-1970, n° protoc. 11211, categ. IX, clas. 8, fasc. 1, Archivio Generale Comune di Verona, 1967.
- Carteggio Ditta Olivieri Ernesto, *Restauro e opere di consolidamento al Teatro Romano*, Opere in ferro, Carteggi 1931-1970, n° protoc. 29585, categ. IX, clas. 8, fasc. 1, Archivio Generale Comune di Verona, 1969-197.

Bibliografia tecnica di riferimento

- *Linee Guida per la riparazione e il rafforzamento di elementi strutturali, tamponature e partizioni*, DPC-ReLUIS, agosto 2009.
- *Linee guida per la riduzione della vulnerabilità di elementi non strutturali, arredi e impianti*, Dipartimento della Protezione Civile, giugno 2009.
- Circolare 2 febbraio 2009, n. 617, *Istruzioni per l'applicazione delle "Norme Tecniche per le Costruzioni"* di cui al D. M. 14/01/2008.
- Decreto Ministeriale 14/01/2008, *Norme Tecniche per le Costruzioni*.
- *Linee Guida per la valutazione e riduzione del rischio sismico del patrimonio culturale con riferimento alle norme tecniche per le costruzioni*, 12 ottobre 2007.
- *Eurocodice 8 - Progettazione delle strutture per la resistenza sismica - UNI EN 1998-1: 2005 Parte 1: Regole generali, azioni sismiche e regole per gli edifici*.