

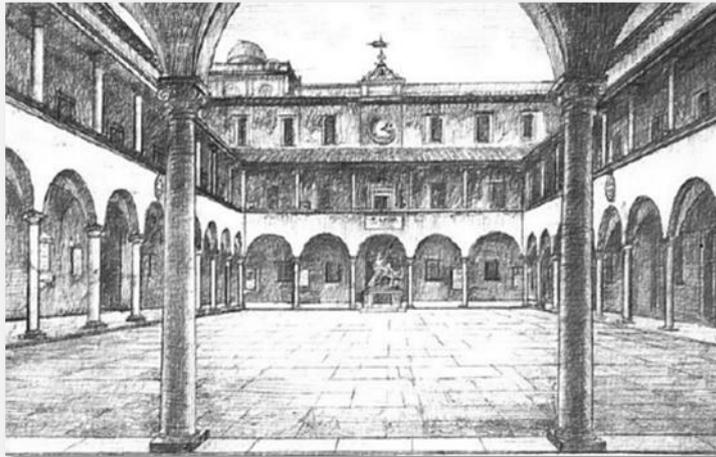


Ministero dei beni e delle attività
culturali e del turismo



Università di Pisa
DICI - DIPARTIMENTO DI
INGEGNERIA CIVILE E INDUSTRIALE

Verifica della sicurezza statica ed analisi della vulnerabilità sismica dell'edificio *La Sapienza* di Pisa



IL RESPONSABILE SCIENTIFICO PER IL DICI
Prof. Ing. Walter SALVATORE

IL RESPONSABILE SCIENTIFICO PER IL MIBACT
Dott. Ing. Paolo IANNELLI

ANALISI DELLA VULNERABILITÀ STATICA E SISMICA DELL'EDIFICIO DELLA SAPIENZA DI PISA

GRUPPO DI LAVORO DEL DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE E INDUSTRIALE (DICI):

Silvia Caprili, Marco Ferrini, Francesco Lippi, Federico Mangini, Francesco Morelli, Walter Salvatore (Responsabile Scientifico).

RESPONSABILE DELLE ATTIVITÀ NELLA SAPIENZA - DIREZIONE EDILIZIA, UNIVERSITÀ DI PISA:

Simona Burchi

ANALISI STORICO-CRITICA:

Ewa Karwacka Codini (DESTEC, Dipartimento di Ingegneria dell'Energia, dei Sistemi, del Territorio e delle Costruzioni)

RILIEVO GEOMETRICO:

Marco Giorgio Bevilacqua, Claudio Iozzia Maddaleno, Valerio Cutini (DESTEC)

ANALISI GEOTECNICHE E RILIEVO DELLE FONDAZIONI:

Giuseppe Scarpelli (Università Politecnica delle Marche), Nunziante Squeglia (DESTEC)

ANALISI SPERIMENTALI SU MATERIALI E STRUTTURE DELL'EDIFICIO:

Centro Interdipartimentale "Laboratorio Ufficiale per le Esperienze sui Materiali da Costruzione" dell'Università di Pisa

Stefano Bennati (Direttore), Riccardo Barsotti, Simone Cavallini, Giuseppe Chellini, Mirko Donati.

MONITORAGGIO TOPOGRAFICO:

Gabriella Caroti (DICI)

HANNO FORNITO IL LORO PREZIOSO CONTRIBUTO I SEGUENTI STUDENTI/LAUREANDI/BORSISTI DELL'UNIVERSITÀ DI PISA:

Tirocinanti: Fabio Santaniello, Alessandro Ariel Terranova, Giovanni Bruschi, Fabio Simoni, Gianluigi Lombardi, Marco Valenti, Valentina Baffi, Elena Sofia Iozzi, Riccardo Bartali (DESTEC - CdLM Ingegneria Edile Architettura)

Laureandi: Alessandro Fiorentini (DESTEC - CdLM Ingegneria Edile Architettura)

Daniela Stiaffini: collaborazione all'esegesi delle fonti d'archivio dell'analisi storica

Indice

1. Introduzione

2.1. *L'edificio La Sapienza di Pisa*

2. Obiettivi dello studio e metodologia

2.1. *La fase conoscitiva: il percorso della conoscenza*

2.2. *La fase di analisi*

2.3. *La fase conclusiva*

3. Analisi storico-critica dell'edificio della Sapienza

3.1. *Il Palazzo della Sapienza nelle testimonianze cartografiche*

3.2. *Il sito e le strutture del palazzo nel periodo medievale*

3.2.1. Contesto storico ed urbanistico del sito

3.2.2. Forum frumentarium: spazio preesistente di una rara bellezza e razionalità

3.2.3. L'interpretazione dei dati acquisiti e ipotesi.

3.3. *Il palazzo della Sapienza nel periodo rinascimentale*

3.3.1. Il progetto e l'edificazione della Sapienza rifondata da Lorenzo Magnifico

3.3.2. La trasformazione di Cosimo I

3.4. *Trasformazioni dal XVII al XIX secolo. Accademiae Pisanae- magnificum theatrum.*

3.4.1. Vicende costruttive tra il '600 e il '700

3.4.2. Progetti e realizzazione delle nuove stanze del collegio e della cappella, sopraelevazione del corpo est nella zona mediana: 1782

3.4.3. Dissesti e interventi di risanamento nel 1782

3.4.4. Altri lavori

3.5. *L'Ottocento: il rilancio dello Studio pisano, il nuovo assetto e le trasformazioni architettoniche del palazzo*

3.5.1. La soppressione del Collegio medicco situato nel palazzo della Sapienza e la radicale trasformazione architettonica del primo piano ad uso della cancelleria, archivio e biblioteca pubblica (1819-24, 1832)

3.5.2. La nuova fabbrica della Libreria (1819-24): progetti per la nuova biblioteca pubblica, testimonianze documentarie e interpretazione degli interventi realizzati

3.5.3. Interventi tesi a soddisfare le cresciute esigenze didattiche

3.5.4. Interventi sulle strutture dissestate

3.5.5. Rifacimenti, ripristini, ristrutturazioni, integrazioni, risanamenti delle strutture danneggiate dall'umidità e vari "restauri"

3.5.6. Dissesti tra il Settecento e l'Ottocento: sintesi

3.6. *Dall'Unità d'Italia all'ampliamento dell'inizio del XX secolo*

3.6.1. Configurazione del Palazzo prima degli interventi Novecenteschi

3.6.2. Progetti e realizzazione dell'ampliamento del palazzo della Sapienza: 1902- 1922

3.6.3. Ristrutturazioni e ampliamento della Biblioteca negli anni venti/trenta del secolo scorso

3.6.4. Interventi nella seconda metà del secolo

4. Rilievo architettonico

4.1 Metodologia di rilievo e questioni operative

4.1.1. Rilievo strumentale

4.1.2. Rilievo integrato diretto-strumentale

4.1.3. Il rilievo della Biblioteca Universitaria

4.1.4. Il rilievo del sottotetto

4.2. La restituzione grafica

5. Rilievi ed analisi geotecniche

5.1. Indagini in sito

5.2. Definizione della geometria del sottosuolo e regime idraulico

5.3. Granulometria e proprietà indice

5.4 - Parametri di compressibilità e storia tensionale

5.5. Caratteristiche di resistenza al taglio

5.6. Valori della resistenza alla punta da prove CPTU

5.7. Velocità delle onde di taglio e rigidità trasversale dei terreni

5.8. Analisi di risposta sismica locale

6. Rilievo delle strutture

6.1. Strutture verticali

6.1.1. Indagini sui paramenti murari

6.1.2. Classificazione delle strutture murarie

6.2. Strutture orizzontali

6.2.1. Rilievo dei solai piani

6.2.2. Rilievo delle volte

6.2.3. Le strutture di copertura

6.2.4. Rilievo dei soppalchi

6.3. Rilievo dei carichi

6.4. Strutture di fondazione

6.4.1. Indagini eseguite sulla muratura in fondazione

6.4.2. Interpretazione delle indagini e geometria delle fondazioni

7. Rilievo dello stato fessurativo

8. Caratterizzazione dei materiali e delle strutture

8.1. Caratterizzazione delle strutture murarie

8.1.1. Organizzazione delle prove

8.1.2. Strumentazione utilizzata

8.1.3. Modalità di esecuzione delle prove ed elaborazione dei risultati

8.1.4. Risultati delle prove

8.2. *Caratterizzazione meccanica dell'acciaio da carpenteria*

8.3. *Prove di carico sui solai*

9. Monitoraggio delle strutture

9.1. *Organizzazione dei sistemi di monitoraggio*

9.2. *Monitoraggio periodico del quadro fessurativo*

9.2.1. Localizzazione dei punti di misura al piano terra e misurazioni

9.2.2. Localizzazione dei punti di misura a primo piano e misurazioni

9.3. *Monitoraggio continuo del quadro fessurativo*

9.3.1. Implementazione e realizzazione del sistema di misura

9.3.2. Strumentazione utilizzata

9.3.3. Gestione del sistema di monitoraggio continuo ed elaborazione dei dati

9.3.4. Risultati provvisori del monitoraggio continuo

9.4. *Monitoraggio topografico*

9.4.1. Introduzione

9.4.2. Fasi del monitoraggio topografico

10. Modellazione e verifica strutturale

10.1 *Il quadro normativo*

10.2 *Livelli di modellazione e livelli di verifica*

10.3. *Analisi strutturale globale*

10.3.1 Modellazione e analisi della risposta globale statica e sismica

10.3.2 Verifiche di sicurezza

10.4 *Analisi e verifica dei meccanismi locali di collasso*

10.5 *Analisi e verifica degli orizzontamenti*

10.5.1 Solai piani

10.5.2 Volte in muratura

10.6 *Analisi e verifica delle fondazioni*

11. Conclusioni e criteri di intervento

11.1. *Analisi delle criticità rilevate*

11.1.1. Criticità riconducibili ad interventi con caratteristiche di urgenza.

11.1.2. Criticità riconducibili ad ulteriori interventi di miglioramento sismico.

11.2. *Criteri di intervento e misure prescrittive*

11.2.1. Interventi con caratteristiche di urgenza.

11.2.2. Ulteriori interventi di miglioramento sismico.

Bibliografia

Allegati:*- Tavole del Rilievo Architettonico:*

TAV. RA01_Pianta del Piano terra, scala 1:100.
TAV. RA02_Pianta del Piano primo, scala 1:100.
TAV. RA03_Pianta del Piano primo – livello soppalchi, scala 1:100.
TAV. RA04_Pianta del Piano secondo, scala 1:100.
TAV. RA05_Pianta del Piano secondo, livello soppalchi, scala 1:100.
TAV. RA06_Prospetto Sud, scala 1:100.
TAV. RA07_Prospetto Est, scala 1:100.
TAV. RA08_Prospetto Nord, scala 1:100.
TAV. RA09_Prospetto Ovest, scala 1:100.
TAV. RA10_Sezione verticale A-A, scala 1:100.
TAV. RA11_Sezione verticale B-B, scala 1:100.
TAV. RA12_Sezione verticale C-C, scala 1:100.
TAV. RA13_Sezione verticale D-D, scala 1:100.

- Analisi storica:

Regesti

Appendice 1. Trascrizione dei documenti sulla Sapienza di Pisa
Appendice 2. Festa del 1785 secondo la descrizione di Pieraccini

- Analisi geotecniche:

Prove penetrometriche con piezocono
Prove con dilatometro sismico

- Rilievo delle strutture:

Saggi e prove endoscopiche sui paramenti murari
Saggi sui solai piani: relazione
Pianta dei solai: piano terra
Pianta dei solai: piano primo
Pianta dei solai: piano secondo
Saggi sulle volte: schede
Rilievo dei soppalchi: schede
Rilievo dei carichi: schede
Rilievo dei carichi: pianta primo piano
Rilievo dei carichi: pianta secondo piano
Carotaggi in fondazione

- Rilievo dello stato fessurativo:

Rilievo delle fessure: schede
Rilievo delle fessure: pianta piano terra
Rilievo delle fessure: pianta primo piano
Rilievo delle fessure: pianta secondo piano
Rilievo delle fessure: prospetti

- Verifiche strutturali:

Verifica globale e verifiche locali
Verifiche delle volte
Verifiche dei solai

1. INTRODUZIONE

a cura di Walter Salvatore e Paolo Iannelli

Il presente documento, redatto dai coordinatori scientifici, prof. ing. Walter Salvatore del Dipartimento di ingegneria civile e industriale (DICI) dell'Università di Pisa (UNUPI) ed ing. Paolo Iannelli del Ministero dei beni e delle attività culturali e del turismo (MiBACT), con il contributo degli esperti del Gruppo di Lavoro appositamente istituito presso il DICI e di altri esperti individuati dai coordinatori scientifici in relazione alle specifiche attività da svolgere, riporta la verifica della sicurezza statica e l'analisi della vulnerabilità sismica dell'edificio "La Sapienza" di Pisa.

I provvedimenti propedeutici all'avvio dell'attività sono i seguenti:

1. 29/05/2012 - ordinanza del Sindaco del Comune di Pisa DN-20/56 che dispone di
 - a) mantenere inutilizzato per le attuali destinazioni l'intero edificio in attesa delle verifiche e degli interventi sotto indicati;
 - b) effettuare immediatamente ulteriori e più approfondite verifiche in grado di accertare la compatibilità tra le strutture dell'edificio e i carichi attualmente presenti;
 - c) effettuare gli idonei interventi necessari alla risistemazione di tutte le situazioni che evidenziano problemi di natura strutturale e/o di manutenzione, con particolare riferimento alle biblioteche, al fine di ricostituire le originarie condizioni di sicurezza;
2. 27/09/2012 - incontro programmatico fra il Ministero dei beni e delle attività culturali e del turismo, l'Università degli Studi di Pisa ed il Comune di Pisa, in cui è stato concordato di rendere operativo un gruppo composto da tecnici dell'UNUPI e del MiBACT, con il compito di effettuare una perizia di vulnerabilità sismica integrativa a quella già effettuata dall'Università stessa ed il piano tecnico di trasferimento dei volumi per l'allestimento di un punto di consultazione e l'espletamento dei servizi essenziali di biblioteca;
3. 3/10/2012 - delibera del Consiglio di Amministrazione UNUPI con la quale il prof. Ing. Walter Salvatore è designato membro del Gruppo di Lavoro MiBACT-UNUPI, incaricato di effettuare la perizia di vulnerabilità sismica integrativa a quella già effettuata dall'Università stessa, per l'edificio "La Sapienza" di Pisa nonché le valutazioni tecniche relative all'eventuale piano di trasferimento dei volumi che dovesse risultare necessario;
4. 3/10/2012 - delibera del Consiglio di Amministrazione UNUPI con la quale la Direzione Edilizia UNUPI conferisce al DICI l'incarico per l'effettuazione delle attività necessarie alla perizia di vulnerabilità sismica integrativa a quella già effettuata dall'Università stessa, per l'edificio "La Sapienza" di Pisa; nello stesso atto il prof. ing. Walter Salvatore è stato designato responsabile tecnico e scientifico delle predette attività;
5. 11/10/2012 - decreto n. 13/2012 del Segretario Generale MiBACT con il quale l'ing. Paolo Iannelli è designato membro del Gruppo di Lavoro MiBACT-UNUPI incaricato di effettuare la perizia di vulnerabilità sismica integrativa a quella già effettuata dall'Università stessa, per l'edificio "La Sapienza" di Pisa nonché le valutazioni tecniche relative all'eventuale piano di trasferimento dei volumi che dovesse risultare necessario;
6. 18/10/2012 - provvedimento del Dirigente per la Direzione Edilizia UNUPI con il quale l'ing. Simona Burchi è individuata quale soggetto referente rappresentante dell'Ateneo – Direzione Edilizia nei rapporti con il MiBACT in ordine ai processi diagnostici ed alle attività del Gruppo di Lavoro MiBACT-UNUPI incaricato di effettuare la perizia di vulnerabilità sismica integrativa a quella già effettuata dall'Università stessa, per l'edificio "La Sapienza" di Pisa nonché le valutazioni tecniche relative all'eventuale piano di trasferimento dei volumi che dovesse risultare necessario.

In esito al sopralluogo del 23/10/2012 effettuato dai coordinatori scientifici congiuntamente al Rettore dell'Università di Pisa ed al Sindaco di Pisa, si è ritenuto indispensabile prevedere un percorso conoscitivo completo ed adeguato per l'analisi dei fenomeni in atto e per la valutazione delle condizioni di sicurezza dell'edificio della "Sapienza" di Pisa, nel rispetto peraltro di quanto previsto nella Direttiva del Presidente del Consiglio dei Ministri 9 febbraio 2011 "*Linee guida per la valutazione e riduzione del rischio sismico del patrimonio culturale con riferimento alle nuove Norme tecniche per le costruzioni ...*".

1.1. L'edificio La Sapienza di Pisa

Il Palazzo della Sapienza (figura 1.1), edificio storico realizzato in muratura portante, si sviluppa su pianta approssimativamente trapezoidale (figura 1.2) per tre piani fuori terra, di seguito indicati come piano terra (PT), piano primo (P1) e piano secondo (P2). E' inoltre presente un sottotetto non praticabile ma accessibile per ispezioni e manutenzioni. Le dimensioni complessive in pianta sono pari a 80,0 m per 53,7 m (lunghezze dei lati maggiori); il cortile centrale, dotato di un porticato al piano terra e di un colonnato al piano primo pressoché parallelo ai lati della pianta di base, ha dimensioni massime di 35,5 m per 21,2 m (figura 1.2 e 1.3). L'altezza utile del piano terra è variabile a causa della presenza di diverse tipologie di orizzontamento (volte a crociera, volte a padiglione, volte con lunette, solai piani di vario tipo), da un minimo di 430 cm (in presenza di controsoffittature) ad un massimo di 550 cm (nel caso delle volte). Analoghe situazioni si ritrovano anche ai piano primo e secondo, dove si raggiunge un'altezza massima rispettivamente pari a 560 cm e 520 cm, come riscontrato dai rilievi eseguiti in situ.

Sono presenti quattro diversi accessi al Palazzo della Sapienza, due collocati in corrispondenza di Piazza Dante, uno lato via Curtatone e Montanara e uno in prossimità del Vicolo della Sapienza (figura 1.4). Il collegamento verticale tra i vari piani è realizzato mediante tre diversi vani scala, posti in corrispondenza dei lati lunghi del fabbricato; sul lato di via della Sapienza è presente anche un vano ascensore, di più recente realizzazione, mentre un altro ascensore è situato di fronte alle scale antiche sul lato di Piazza Dante.

Per quanto riguarda la *destinazione funzionale dei locali* il piano terra ospitava, oltre ad alcuni vani destinati al personale di servizio (portineria, aule bidelli, servizi igienici), alcune aule universitarie (Aule da I a IX), l'Aula Magna storica e alcuni dipartimenti (figura 1.5). Al piano primo (figura 1.6), oltre ad alcuni dipartimenti, si trova la Biblioteca Universitaria, che occupa la superficie completa di due lati del fabbricato (lato Piazza Dante e lato Vicolo dell'Ulivo). I locali della Biblioteca Universitaria si trovano anche al piano secondo (figura 1.7), in parte in corrispondenza di quelli sottostanti, in parte in corrispondenza del lato opposto (lato Via della Sapienza). I locali destinati alla biblioteca presentano inoltre, sia al piano primo sia al piano secondo, strutture soppalcate per la raccolta dei volumi (figura 1.8). Biblioteche "di settore" sono inoltre presenti all'interno dei vari Dipartimenti. Al piano primo è presente l'Aula Magna Nuova, caratterizzata dalla presenza di un doppio volume con loggiato (piano primo e piano secondo), altezza massima pari a 10,20 m e solaio costituito da una volta a botte con lunette triangolari.

Le figure da 1.5 a 1.7 riportano le piante del piano terra, primo e secondo con l'indicazione delle destinazioni funzionali.



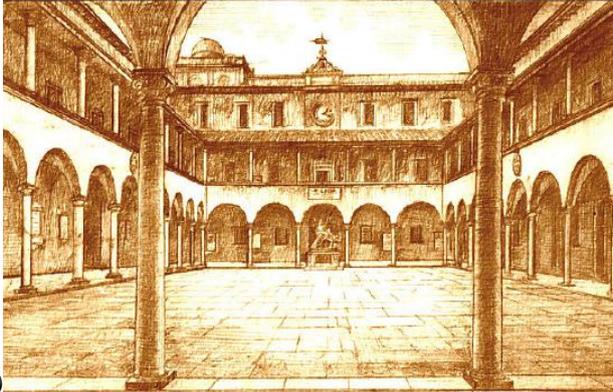
Figura 1.1: Viste esterne del Palazzo della Sapienza di Pisa: a) lato via Curtatone e Montanara, b) lato Piazza Dante.



a)



b)



c)



d)

Figura 1.2: Viste esterne del Palazzo della Sapienza: a) lato Vicolo della Sapienza, b – c – d) cortile interno.



a)



b)

Figura 1.3: Il porticato al piano terra e al piano primo (colonnato, dettaglio solaio).

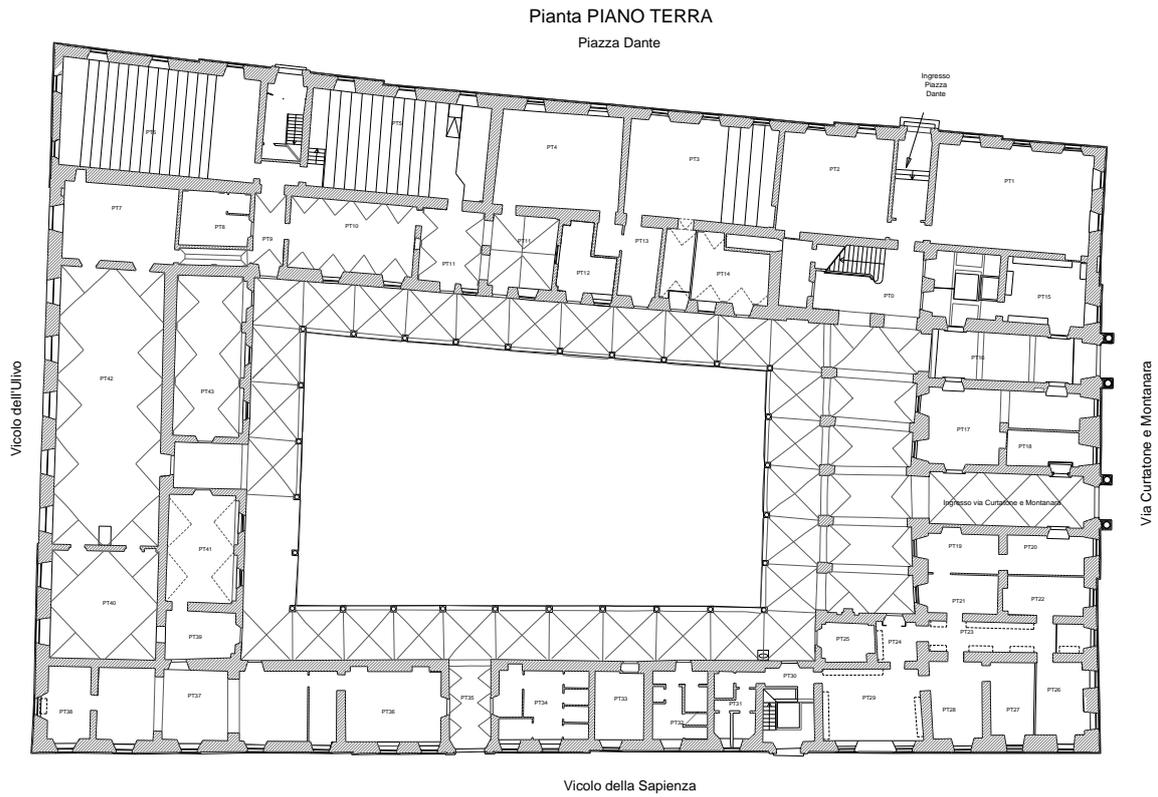


Figura 1.4: Pianta piano terra.



Figura 1.5: Destinazione d'uso dei locali piano terra.

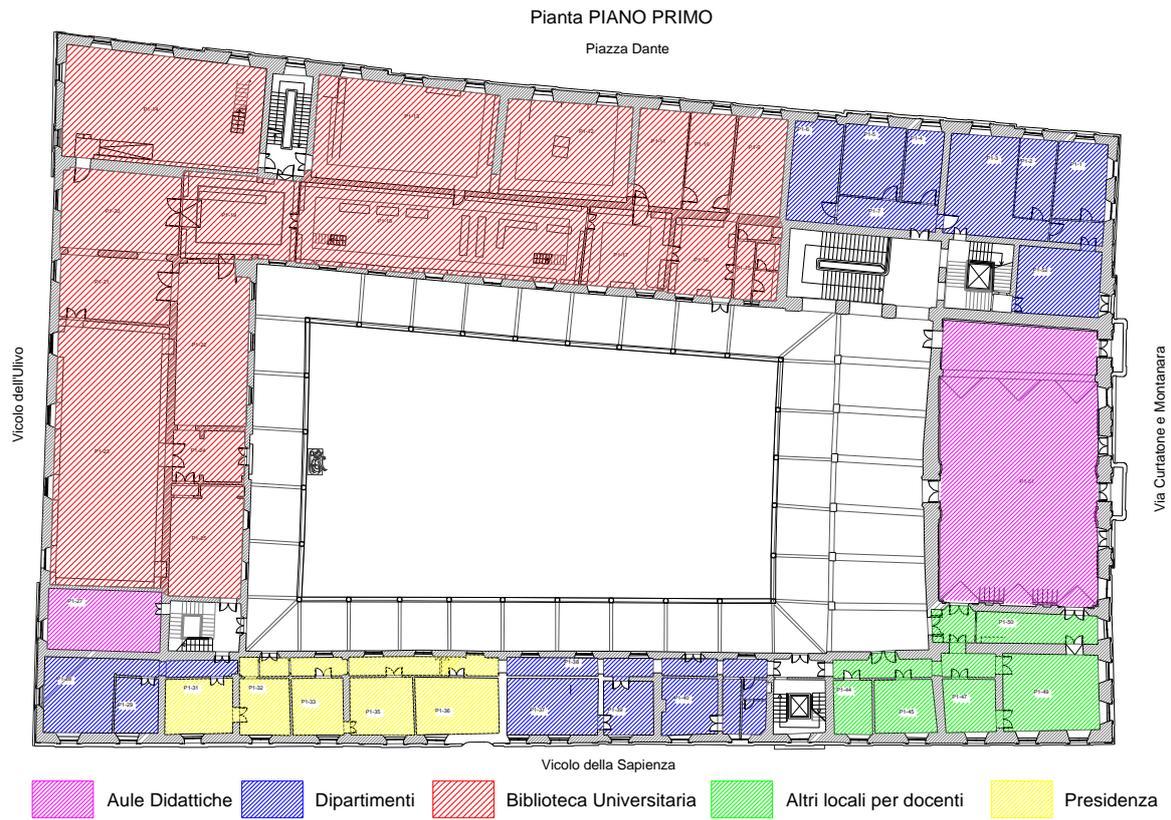


Figura 1.6: Destinazione d'uso dei locali piano primo.

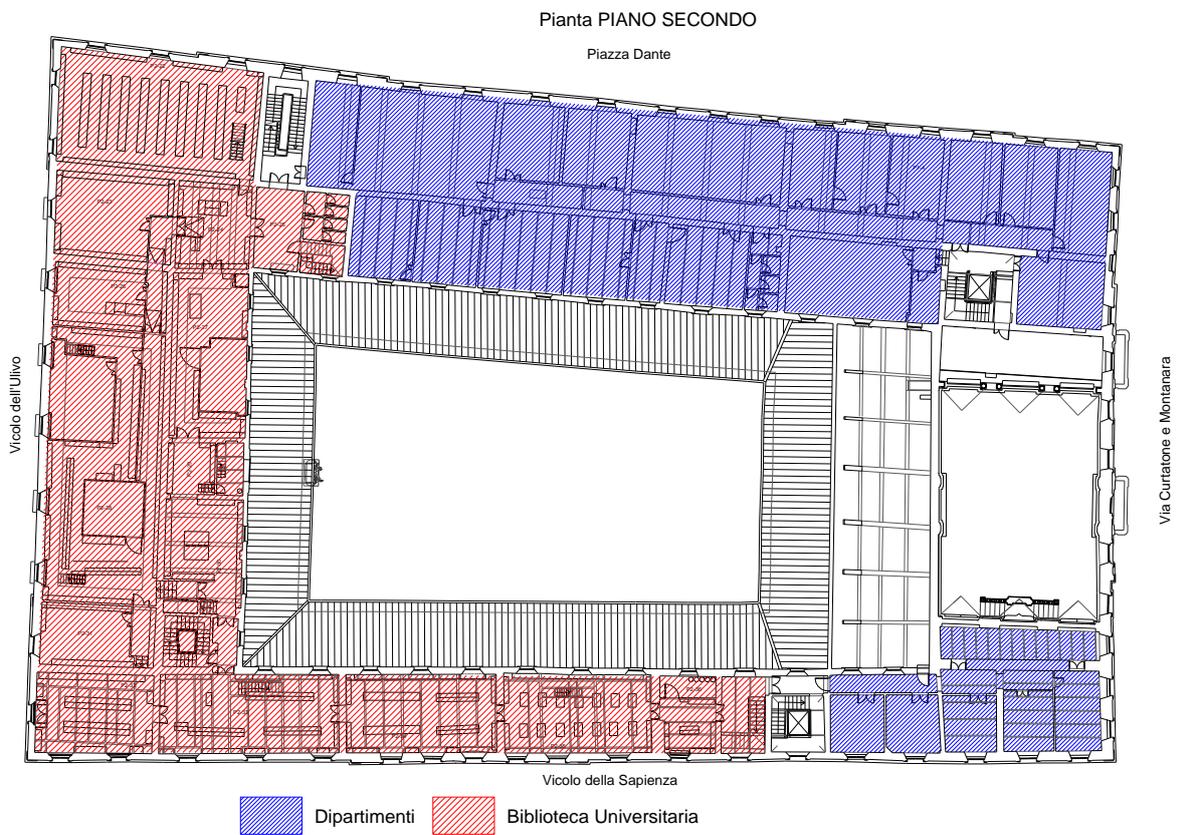


Figura 1.7: Destinazione d'uso dei locali piano secondo.

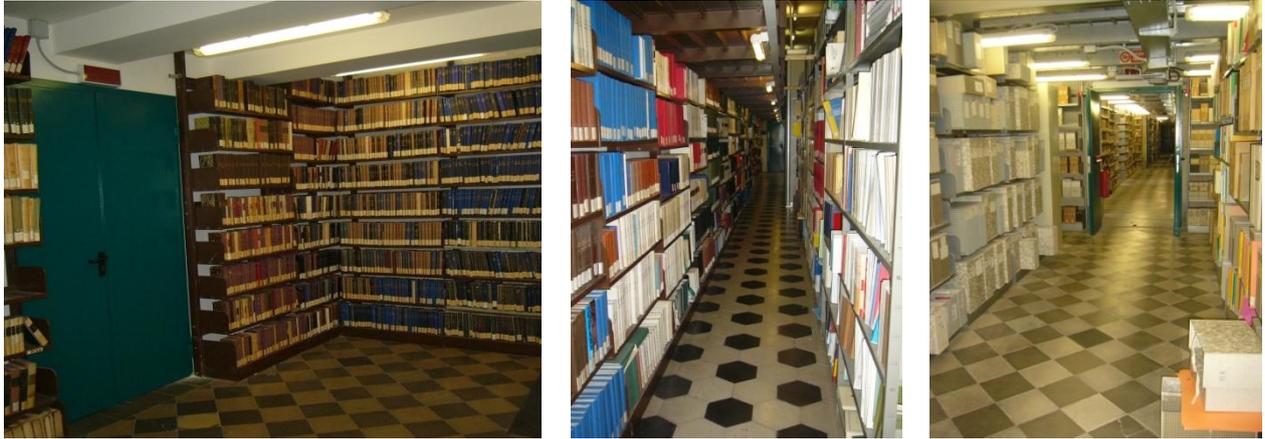


Figura 1.8: Locali biblioteca al piano secondo.

La struttura portante del Palazzo della Sapienza è costituita da setti murari di spessore (al netto dell'intonaco) variabile tra 100-120 cm (soprattutto per le pareti esterne) e 45-50 cm (per i setti murari interni) al piano terra, andandosi progressivamente a ridurre passando ai piani superiori dove si hanno, generalmente, spessori pari a 80-100 cm per le pareti esterne (fatta eccezione per quelle in corrispondenza dell'Aula Magna nuova che rimangono a tutti i livelli di spessore pari a 120 cm) e 40-50 cm per le pareti interne. Al piano secondo si verifica un'ulteriore diminuzione dello spessore murario esterno, che in alcuni casi raggiunge i 60 cm. All'interno del fabbricato sono state individuate diverse tipologie di orizzontamento: volte a botte e a crociera semplice (specialmente in corrispondenza degli ingressi, figura 1.9), volte a padiglione semplici o con lunette (soprattutto in corrispondenza delle aule del piano terra, figure 1.4 e 1.9), volte a botte con lunette (Aula Magna Nuova). Sono inoltre presenti dei solai costituiti da travi in acciaio e volterrane a semplice e doppia orditura; al piano secondo sono presenti anche solai con voltine poste ad interasse variabile (figura 1.9). Per quanto riguarda la copertura, essa è costituita in parte da capriate in legno e in parte da capriate in acciaio (figura 1.9.g÷l); è inoltre presente una struttura a spinta eliminata per il sostegno della volta dell'Aula Magna Nuova.



a)



b)



c)



d)

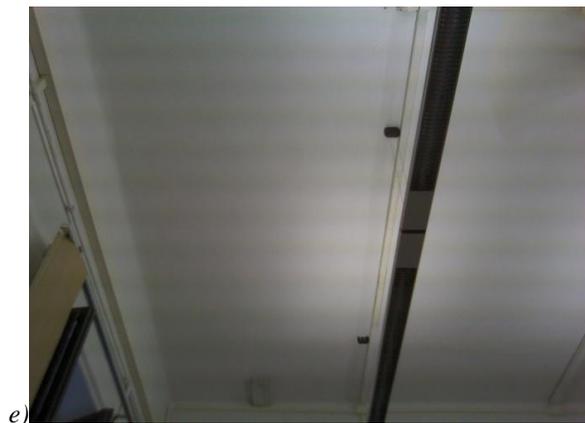


Figura 1.9: Varie tipologie di orizzontamento presenti all'interno del Palazzo della Sapienza: a) volta a crociera in prossimità di un ingresso, b – c) volte con lunette, d) solaio piano con travi ricalate, e) solaio piano di cui si individua l'orditura, f) solaio con profili metallici e voltine, g – h) tetto con capriate di legno, i-l) tetto con capriate di acciaio.

2. OBIETTIVI DELLO STUDIO E METODOLOGIA

a cura di Walter Salvatore e Paolo Iannelli

L'obiettivo dello studio è la verifica della sicurezza statica e l'analisi della vulnerabilità sismica dell'edificio "La Sapienza" di Pisa con riferimento ai pesi propri strutturali, ai carichi permanenti non strutturali ed ai carichi variabili, valutati considerando le destinazioni d'uso al momento dell'emanazione dell'ordinanza del Sindaco del 29/05/2012.

La verifica statica ha interessato gli orizzontamenti, la copertura, le strutture portanti verticali e le strutture di fondazione secondo le previsioni delle Norme Tecniche per le Costruzioni di cui al D.M. 14/01/2008.

Per quanto riguarda l'analisi di vulnerabilità sismica, è stata eseguita, nel rigoroso rispetto della Direttiva del Presidente del Consiglio dei Ministri 9 febbraio 2011 "*Linee guida per la valutazione e riduzione del rischio sismico del patrimonio culturale con riferimento alle nuove Norme tecniche per le costruzioni ...*", seguendo un percorso di conoscenza, valutazione del livello di sicurezza nei confronti delle azioni sismiche ed individuazione dei principali interventi di miglioramento sismico, concettualmente analogo a quello previsto per le costruzioni non tutelate, ma opportunamente adattato alle esigenze e alle peculiarità di un immobile, la Sapienza di Pisa, sottoposto a tutela e quindi rientrante nell'ambito del patrimonio culturale.

Sono state inoltre individuate le principali carenze con potenziali effetti sulla sicurezza strutturale ed i corrispondenti criteri di intervento.

Per il raggiungimento dell'obiettivo lo studio ha previsto 3 fasi, la fase conoscitiva finalizzata a riconoscere la storia, la morfologia e le caratteristiche strutturali dell'edificio, la fase di analisi con le verifiche statica e l'analisi di vulnerabilità sismica e la fase finale di sintesi ed elaborazione dei risultati.

2.1. La fase conoscitiva: il percorso della conoscenza

La conoscenza della costruzione storica in muratura è un presupposto fondamentale sia ai fini di una attendibile valutazione della sicurezza sismica e sia per l'individuazione delle criticità rilevanti nei confronti della sicurezza strutturale e dei corrispondenti criteri d'intervento di miglioramento sismico efficaci e rispettosi delle esigenze della tutela del bene. Le problematiche da affrontare sono quelle comuni a tutti gli edifici esistenti, anche se nel caso del patrimonio culturale tutelato, ancora più importante risulta la conoscenza delle caratteristiche originarie della fabbrica, le modifiche intercorse nel tempo dovute ai fenomeni di danneggiamento derivanti dalle trasformazioni antropiche, dall'invecchiamento dei materiali e dagli eventi calamitosi. In relazione alla necessità di evitare danni al patrimonio culturale, l'esecuzione di una completa campagna di indagini è risultata, come peraltro usuale, troppo invasiva sulla fabbrica stessa.

Tale condizione ha imposto la necessità di affinare le tecniche di analisi ed interpretazione del manufatto essendo la conoscenza conseguita da considerare in rapporto ai diversi livelli di approfondimento e quindi di attendibilità, funzione cioè dell'accuratezza delle operazioni di rilievo, delle ricerche storiche e delle indagini sperimentali.

Lo studio delle caratteristiche della fabbrica è finalizzato alla definizione del modello interpretativo che ha consentito sia un'interpretazione qualitativa del funzionamento strutturale, sia l'analisi strutturale per una valutazione quantitativa dello stato di sollecitazioni e di valutazione della sicurezza. Il grado di attendibilità del modello è anch'esso strettamente legato al livello di approfondimento ed ai dati disponibili, tenuti in conto attraverso i fattori di confidenza utilizzati nell'analisi.

Il percorso della conoscenza presuppone i seguenti obiettivi:

- identificazione dell'organismo e sua localizzazione sul territorio, al fine di individuare la sensibilità della fabbrica nei riguardi dei diversi rischi ed in particolare di quello sismico. Questa fase dell'analisi ha consentito di individuare gli elementi particolarmente sensibili al danneggiamento che, nel caso di perdita, porterebbero ad un danno irrimediabile al patrimonio culturale, e di identificare gli elementi di pregio e quindi le possibili zone di sacrificio ove realizzare le indagini distruttive e localizzare eventuali interventi di miglioramento sismico;
- rilievo geometrico della costruzione nello stato attuale, con la completa descrizione stereometrica della fabbrica e l'individuazione delle caratteristiche plano-altimetriche degli elementi costitutivi rilevando ad ogni livello, la geometria di tutti gli elementi in muratura, delle volte (spessore e profilo), dei solai e della copertura (tipologia e orditura), delle scale (tipologia strutturale), la

- localizzazione delle eventuali nicchie, cavità, aperture richiuse (con quali modalità), canne fumarie, elementi estranei inclusi;
- rilievo dei fenomeni fessurativi e deformativi presenti, in modo tale da consentire l'individuazione delle cause e delle possibili evoluzioni delle problematiche strutturali dell'organismo. Le lesioni sono state classificate secondo la loro geometria (estensione, ampiezza) ed il loro cinematismo (distacco, rotazione, scorrimento, spostamento fuori dal piano).
 - individuazione della evoluzione della fabbrica, intesa come sequenza delle fasi di trasformazione edilizia, dall'ipotetica configurazione originaria all'attuale. La conoscenza dell'opera ha quindi previsto l'analisi, anche storica, dell'evoluzione funzionale dell'edificio e delle sue articolazioni, finalizzata a riconoscere quali utilizzazioni si siano succedute nel tempo ed in quali ambienti. Il risultato di questa analisi ha fornito notizie utili per capire anche le ragioni delle modifiche strutturali e geometriche intervenute nel tempo, per motivare eventuali segni o notizie di dissesti, per individuare interventi di riduzione della vulnerabilità sismica;
 - individuazione degli elementi costituenti l'organismo resistente, nell'accezione materica e costruttiva, con una particolare attenzione rivolta alle tecniche di realizzazione, ai dettagli costruttivi ed alla connessione tra gli elementi. Il tutto finalizzato a definire la geometria del modello da utilizzare nel calcolo, i suoi vincoli ed i carichi agenti, con le loro caratteristiche ed gli elementi significativi per il modello di calcolo ivi comprese le masse degli elementi e i carichi gravanti su ogni elemento di parete;
 - identificazione dei materiali ed in particolare della muratura, del loro stato di degrado, dei parametri meccanici di deformabilità e resistenza;
 - conoscenza del tipo e della consistenza del sistema di fondazione, unitamente alla caratterizzazione geotecnica del terreno compreso nel volume significativo di sottosuolo finalizzata all'individuazione del modello geotecnico adatto all'analisi di risposta sismica locale e d'interazione statica e dinamica terreno-struttura. Tali indagini sono state condotte in coerenza con i principi generali della progettazione geotecnica indicati nel Cap. 6 e nel punto 7.11 delle Norme Tecniche per le Costruzioni;
 - controllo periodico della costruzione inteso sia come elemento di acquisizione di conoscenza, ai fini della valutazione dei livelli di sicurezza sismica, e sia come 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.

La fase conoscitiva ha previsto le seguenti attività:

1. l'analisi storico-critica dell'edificio
2. il rilievo geometrico ed architettonico, il rilievo e la valutazione della effettiva distribuzione dei carichi e della loro entità
3. il rilievo delle strutture portanti, della tessitura muraria, dei solai, della copertura e delle fondazioni
4. le indagini geologiche/geotecniche
5. l'analisi sperimentale sui materiali e sulle strutture per la valutazione della qualità e del loro stato di conservazione. In particolare sono state eseguite prove di caratterizzazione delle murature portanti con martinetti piatti singoli e doppi, delle travi dei solai in acciaio e prove di carico sui solai;
6. il rilievo del quadro fessurativo
7. la messa a punto e l'attivazione di tre sistemi di monitoraggio (monitoraggio periodico delle lesioni, monitoraggio continuo delle lesioni e monitoraggio topografico). In particolare è stato progettato ed installato un sistema completo per il monitoraggio continuo dell'edificio al fine di verificare l'evoluzione temporale del quadro fessurativo. Tale sistema consente la lettura e l'acquisizione - in tempo reale ed in remoto - dei dati misurati dai numerosi sensori posizionati in corrispondenza delle lesioni più importanti dell'edificio. E' stato inoltre previsto un secondo sistema di monitoraggio, di tipo topografico, al fine di misurare e monitorare gli spostamenti assoluti di alcuni capisaldi individuati sulla struttura.

2.2. La fase di analisi

Una volta terminata la fase conoscitiva, nella seconda fase di analisi, sono state eseguite le seguenti attività:

1. l'analisi dei risultati delle indagini conoscitive.
2. l'analisi strutturale per la valutazione della sicurezza statica degli orizzontamenti, della copertura, delle strutture portanti verticali e delle strutture di fondazione;
3. l'analisi della vulnerabilità sismica secondo il livello LV3 delle linee guida, con riferimento allo stato limite ultimo della costruzione nel suo complesso e delle singole sue parti significative (macroelementi). Tale livello si è reso indispensabile in considerazione del fatto che si tratta di un edificio di elevata importanza e per rispondere all'esigenza di conoscere in modo attendibile la sicurezza di tale struttura anche in riferimento all'ordinanza del Sindaco del Comune di Pisa DN-20/56 del 29/05/2012.

2.3. La fase conclusiva.

Sulla base dei risultati della fase di analisi si è proceduto alla fase finale di sintesi ed elaborazione dei risultati delle fasi precedenti ed individuazione delle criticità rilevanti nei confronti della sicurezza strutturale e dei corrispondenti criteri d'intervento, al fine di garantire un'adeguata sicurezza nei confronti dei carichi statici di esercizio e la riduzione della vulnerabilità nei confronti delle azioni sismiche attraverso la previsione di interventi di miglioramento sismico, come previsto dalle normative vigenti nel caso di immobili sottoposti a tutela.

Gli interventi sulla struttura, volti a ridurre la vulnerabilità sismica, sono stati valutati nel quadro generale della conservazione della costruzione; la scelta della strategia e della tecnica d'intervento, nonché l'urgenza di attuarlo, dipendono dai risultati della fase di analisi.

L'obiettivo principale resta sempre la conservazione non solo della materia ma anche del funzionamento strutturale accertato, qualora questo non presenti carenze tali da poter comportare la perdita del bene.

Gli interventi sono in genere rivolti a singole parti del manufatto, contenendone il più possibile l'estensione ed il numero, e comunque evitando di alterare in modo significativo l'originale distribuzione delle rigidità negli elementi. L'esecuzione di interventi su porzioni limitate dell'edificio è stata comunque valutata nel quadro di una indispensabile visione d'insieme, portando in conto gli effetti della variazione di rigidità e resistenza degli elementi.

Il progetto degli interventi dovrà garantire la conservazione dell'architettura in tutte le sue declinazioni, in particolare valutando l'eventuale interferenza con gli apparati decorativi.

La valutazione della sicurezza ed una chiara comprensione della struttura sono alla base delle decisioni e delle scelte degli interventi. In particolare, l'intervento è stato proporzionato agli obiettivi di sicurezza e durabilità, contenendo gli interventi in modo tale da produrre il minimo impatto sul manufatto storico. E' opportuno ricordare che, anche nei riguardi della prevenzione dai danni sismici, la semplice manutenzione può spesso evitare interventi fortemente trasformativi.

La scelta delle tecniche d'intervento andrà valutata caso per caso, dando la preferenza a quelle meno invasive e maggiormente compatibili con i criteri della conservazione, tenendo conto dei requisiti di sicurezza e durabilità.

Gli interventi dovranno, per quanto possibile, rispettare la concezione e le tecniche originarie della struttura, nonché le trasformazioni significative avvenute nel corso della storia del manufatto. Da questo punto di vista gli elementi strutturali danneggiati, quando possibile, devono essere riparati piuttosto che sostituiti e le deformazioni ed alterazioni, costituendo una testimonianza del passato, dovrebbero essere mantenute, eventualmente adottando misure atte a limitarne gli effetti negativi sulle condizioni di sicurezza.

Particolare attenzione dovrà essere posta anche alla fase esecutiva degli interventi per assicurare la reale efficacia degli stessi ed evitare dissesti che comportino il peggioramento delle caratteristiche della muratura o del funzionamento degli elementi costruttivi. Per quanto possibile, è opportuno che gli interventi proposti siano controllabili in corso d'opera.

3. ANALISI STORICO-CRITICA DELL'EDIFICIO DELLA SAPIENZA

a cura di Ewa Karwacka Codini

Fin dalle origini La Sapienza di Pisa è stata vista e vissuta come il luogo simbolo che racchiude al suo interno la storia dell'Università e del suo rapporto con la città. Ricopre un ruolo emotivo fondamentale per l'Ateneo, racchiudendo al suo interno le memorie di eventi e di persone che lo hanno reso celebre.

Ma non solo: rappresenta uno dei primi esempi in Italia di edificio universitario, destinato sia all'attività universitaria sia al collegio, e costituisce per di più uno dei rari edifici rinascimentali realizzati a Pisa. Sicuramente rappresentativo nella tipologia dell'edificio universitario, esso è altrettanto sicuramente un manufatto architettonico fortemente stratificato e, nella sua molteplice entità, poco investigato. Il palazzo che oggi conosciamo è il frutto di una complessa evoluzione segnata da trasformazioni, demolizioni, ristrutturazioni e ampliamenti. Plasmato in epoca medicea sui resti di una medievale Piazza del Grano, si è trasformato e evoluto nel tempo in funzione delle mutate esigenze della scienza, della ricerca e della didattica, ma anche in funzione delle cambiate prerogative della città, fino a raggiungere l'aspetto monumentale assegnatogli all'inizio del secolo scorso per mano di Vincenzo Pilotti.

La conoscenza del monumento in esame - prerogativa fondamentale per comprendere la concezione strutturale dello stesso - è stata eseguita attraverso diversi livelli di approfondimento in funzione dell'analisi storica e architettonica. I dati acquisiti sono stati sottoposti alla lettura critica e hanno permesso a formulare una sintesi finalizzata alla definizione del processo evolutivo del manufatto, con le fasi costruttive salienti, le geometrie degli elementi strutturali e la stratificazione dell'edificio.

Le approfondite ricerche sul materiale documentario, finalizzate alla comprensione del processo evolutivo dell'edificio, sono state condotte principalmente presso Archivio di Stato di Firenze (ASF), Archivio di Stato di Pisa (ASP) e Archivio della Soprintendenza dei Beni Culturali e Ambientali. All'esegesi sono stati sottoposti circa 370 manoscritti; sono state schedate o trascritte le fonti ritenute d'interesse per questa ricerca.

Nelle indagini storiche si è tenuto conto anche dell'evoluzione funzionale dell'edificio e degli suoi singoli ambienti e si è posta l'attenzione particolare sulle alterazioni dell'originario schema strutturale, non trascurando gli altri aspetti rilevanti per l'individuazione delle cause del degrado.

I risultati della ricerca sono stati sintetizzati anche graficamente in forma degli schemi degli interventi riferiti a diversi periodi.

3.1. Il Palazzo della Sapienza nelle testimonianze cartografiche

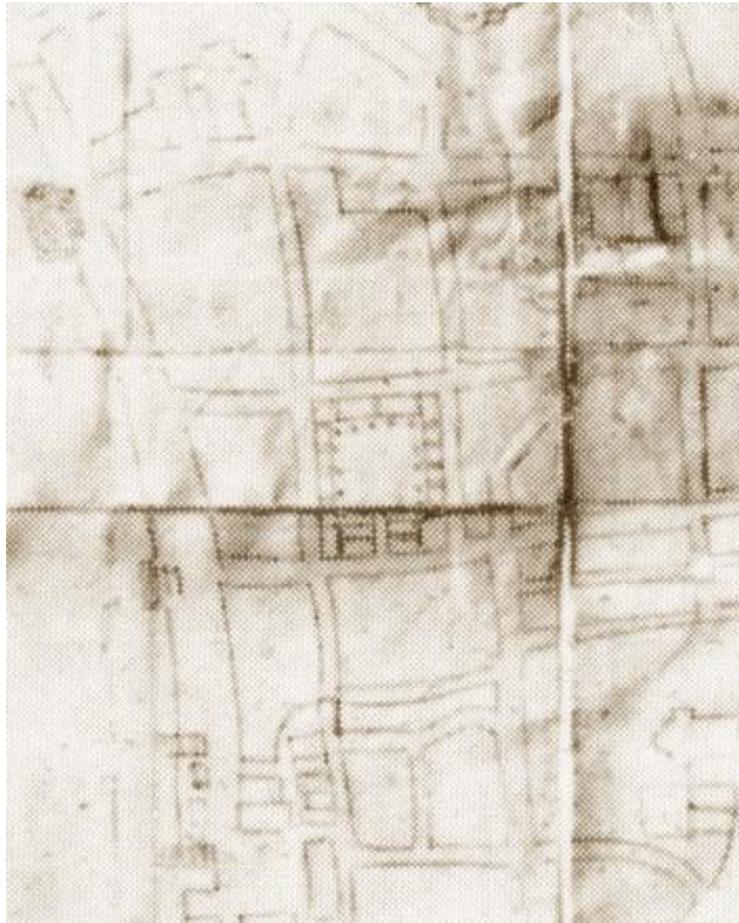


Figura 3.1: Giuliano da Sangallo, *Pianta di Pisa, spolvero e disegno sanguigno, particolare dell'area della Sapienza, raffigurata a impianto idealizzato con peristilio*, 1474-1494 (GDS, Uffizi, n.7950).

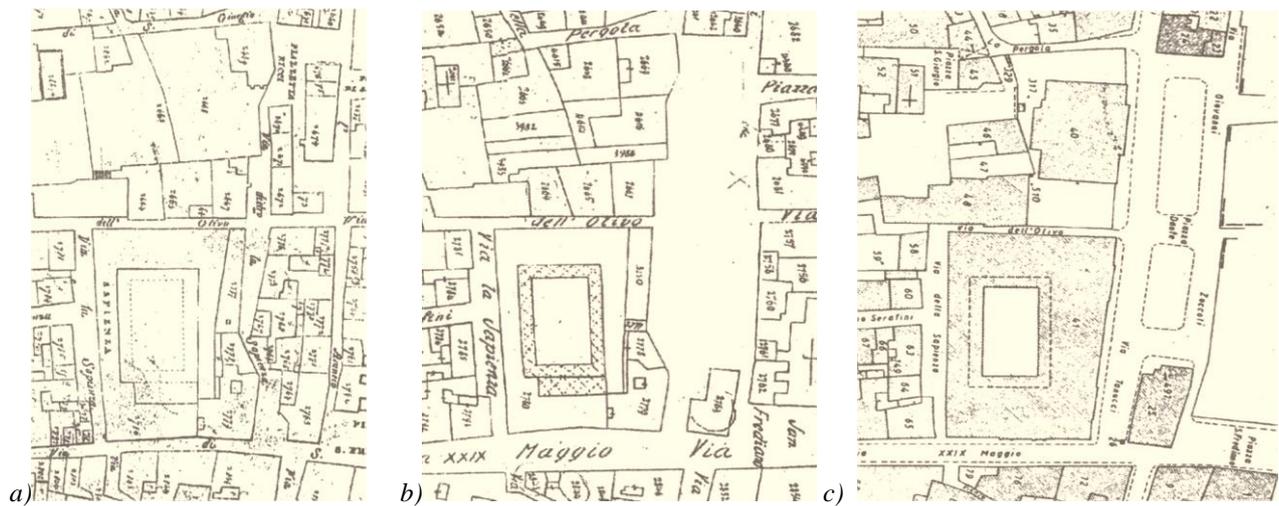


Figura 3.2: La Sapienza nelle mappe catastali della città di Pisa del 1830 (a), 1860 (b), e 1942 (c)

3.2. Il sito e le strutture del palazzo nel periodo medievale

3.2.1. Contesto storico ed urbanistico del sito

L'area in cui è situata la Sapienza ha una valenza storica di straordinaria importanza per la città. La zona costituì probabilmente il nucleo insediativo più antico della città medievale. Collocata nella porzione meridionale della *civitas* altomedievale, dovette costituire un'area di prima intensa urbanizzazione. Le testimonianze documentarie delineano un paesaggio urbano pressoché privo di spazi non costruiti e ricco di torri, case solariate, edifici accorpatis, vie e chiassi comunali¹. La zona era caratterizzata dall'alto addensamento di chiese, strade e strutture abitative anche nel XIII secolo. I numerosi edifici sacri scandivano le maglie di questo abitato fitto: nelle vicinanze erano situate le chiese di S. Isidoro, S. Biagio, (detta poi "alle catene"), SS.mo Martino e Frediano, S. Salvatore in Porta Aurea, S. Simone in Porta Maris, S. Giorgio in Porta Maris e S. Maria Vergine.

L'area beneficiava di una favorevole posizione stradale, nei pressi della proiezione di due tra i principali accessi urbani: la Porta Aurea che si apriva sull'Arno e collegava la "*civitas*" con la via proveniente da Firenze e la Emilia; e la Porta Maris (vicino a S. Nicola) che apriva la strada in direzione del mare.

La costruzione della nuova Piazza del Grano nel sito occupato alla fine del Quattrocento dalla Sapienza, posto tra le chiese di S. Maria Vergine e S. Isidoro, costituì un episodio di notevole rilievo urbanistico.

3.2.2 *Forum frumentarium*: spazio preesistente di una rara bellezza e razionalità

Come è ben noto, Lorenzo Magnifico decise di adattare alla Sapienza la trecentesca Piazza del Grano, il cui impianto trecentesco, caratterizzato da una razionale funzionalità, convinse il duca a riconvertirlo in luogo di studio.

Forum frumentarium, come venne chiamato allora, fu costruito nel 1346 per l'iniziativa del conte Fazio della Gherardesca (lo stesso che aveva fondato lo Studio Pisano, confermato nel 1343 da Clemente VI) e già nel 1360 funzionava con appositi regolamenti. La realizzazione della piazza è ricordata da una iscrizione lapidea incisa sull'architrave del portale della chiesa di S. Maria Vergine, che è tutt'oggi conservata.

L'operazione comportò l'esproprio dei terreni e l'abbattimento di edifici in un'area piuttosto estesa. Una di queste era la "*domus*" degli eredi di Vanni Cecchi di Corte distrutta "per farne via alla piazza del grano nuova"².

La struttura progettata dall'architetto Cecco di Lemmo - un'opera di rilevante qualità architettonica - si sviluppava su un impianto del quadrilatero recinto, con una corte interna affiancata su due lati da ventidue botteghe a portico e con due accessi, uno a nord e uno a sud.

Un anonimo cronista dei primi del Quattrocento descriveva questo luogo pubblico nel modo seguente: "*Et più v'è in questo quartier la Piazza del Grano ed è chon'un castello murato con due torri in fortezza de è bella cosa, ed alla sera si serra. Et dentro tuata la piazza è matonata per choltello e d'attorno sono le botteghe*"³. Le botteghe, cominciando dalla porta verso l'Arno, avevano i seguenti nomi a seconda della loro insegna: "*falcone, gallo, della gassa, colombo, pavone, grua, gufo, tetto basso, ogha bigia, toro, porcho, scimmia, cane, gamello, levre, orso, cercia, tecto basso, beccho leocorno e montone*".

Il Tronci nel suo manoscritto del 1643 ricordava la Piazza così: "*Piazza dove si vendeva il grano e biade che da una parte vi era la dogana del sale fabbricata già dalli Pisani per detto l'Anno 1341, come apparisce ne' libri delle provvisioni ove si dice che per accomodar la detta piazza con buona proporzione nella parrocchia di S. Ilario si comprasse una casa dall'eredi di Vanni di Cecco di Corte per prezzo di lire sessanta, et Duca includendovi ancora la detta chiesa fece fabbricare un bel teatro con portici sostenuti da colonne e vi*

¹ G. Garzella, *Pisa come era: topografia e insediamento dall'impianto tardoantico alla città murata del secolo XII*, Napoli 1990, pp. 119-120.

² E. Tolaini, *Forma Pisarum*, Pisa, 1979, p. 104, nt.96.

³ L. Tanfani-Centofanti, *Notizie di artisti tratte dai documenti pisani*, Bologna 1897, pp. 354-79; cfr. anche F. Redi, *Pisa com'era: archeologia, urbanistica e strutture materiali (secoli V-XIV)*, Napoli 1991, p.335.

accomodò un buon numero di squole, e sopra fecevi ballatoi con colonnette a proporzione con camere per li collegiali”⁴.

Sappiamo inoltre che nel 1494, quando la Sapienza fu aperta al pubblico (anche se i lavori erano ancora da terminare), al piano inferiore dell’edificio esisteva almeno un magazzino del sale⁵.

Preziosa testimonianza è fornita anche dalla fotografia della facciata sulla via XXIX Maggio, poi via Curtatone e Montanara, scattata nel 1905, che fissa il momento dello scrostamento del prospetto effettuato nella fase preliminare al progetto dell’ampliamento della Sapienza. Quattro domus a più solai - cosiddette case-torri di spiccato prestigio, con piante allungate in profondità, ma ognuna di diversa ampiezza, - si affacciano a schiera sulla via (allora asse viario principale tra lungarno e la Piazza degli Anziani), accostate le une alle altre con muri comuni. Sono strutture a pilastri liberi, con architravi ai singoli piani, probabilmente in origine dotate di archi di scarico e sporti chiusi; cronologicamente attribuibili tra la metà del XII sec. e la metà del XIII sec. Gli architravi del primo piano allineati alla stessa altezza indicano la unione delle domus in un unico edificio, avvenuta in periodo successivo, probabilmente nel Trecento. L’apparato murario è costituito dal materiale litico (verrucano e calcare) nei pilastri e dal laterizio nelle zone intermedie. Il pilastro angolare rivela la muratura a conci rettangolari con misure maggiori, rifilati e spianati a scalpello. Nella terza domus è visibile l’archivolto della porta a pieno centro a “monta depressa”.



Figura 3.3: La Sapienza, 1905. Facciata sulla via XXIX Maggio, poi via Curtatone e Montanara

Fabio Redi⁶ ricorda, inoltre, che dalla termografia eseguita nel 1986 è risultata la presenza di alcune torri a pilastri nella facciata e all’inizio dei lati del complesso, mentre a ovest, nel lato meridionale dello stesso, erano leggibili le tracce di muro a conci ben sagomati, alto da terra solo tre metri e interrotto da un portale archivolto riconoscibile appena a ovest della porta di accesso meridionale.

Lo stesso Redi menziona la stonacatura dei lati interni del porticato eseguita in occasione della posa delle condutture elettriche, da cui risulta che a intervalli piuttosto regolari, nei muri laterali del cortile, sono apparsi bassi pilastri di mattoni, con plinto a conci di calcare cavernoso e “grezzoni”, privi quasi sempre dell’arco di scarico del portico originale, riferibili a strutture delle botteghe. Sono rinvenuti, anche, i resti del

⁴ P. Tronci, *Descrizione delle chiese, monasteri et oratori della città di Pisa*, 1643, c. 264’.

⁵ G. Del Guerra, *Pisa attraverso i secoli*, Pisa 1967, p. 154.

⁶ F. Redi, *Pisa com’era: archeologia, urbanistica e strutture materiali (secoli V-XIV)*, Napoli 1991, p. 337.

pavimento a mattoni disposti a coltello con disegno a spina del pesce, posti a circa 60 cm sotto il selciato attuale del cortile.

I saggi che furono effettuati durante la progettazione dell'ampliamento della Sapienza nel 1905 su altre parti della facciata est e sulle strutture presso la via Tinucci (ancora non appartenenti all'Università ma interessate dal progetto), misero in evidenza che molti muri erano di antica struttura medievale con paramento a mattoni, il quale è rimasto per molti anni esposto alle intemperie prima di ricevere l'intonaco di malta che lo ha ricoperto fino ai primi del Novecento (figure 3.4, 3.5, 3.6 e 3.7).

All'interno delle abitazioni private poste in angolo fra via Tanucci e via XXIX Maggio furono rinvenuti i resti di un'antica cappella (figura 3.6), di un antico archivolto formato da mattoni impressi (figura 3.5), alcune scodelle di maiolica medievale e un pezzetto di un serpentello verde, evidentemente un avanzo di un antico pavimento romano.

La Commissione Conservatrice dei Monumenti della Provincia di Pisa dopo numerose visite e sopralluoghi nelle strutture medievali rinvenute, ritenne che i resti scoperti non avessero un particolare interesse artistico, mentre la loro conservazione avrebbe arrecato un grave danno all'economia e all'architettura del palazzo in costruzione. Reputò che fosse opportuno conservare solo e non *in situ* delle parti caratterizzate da qualche valore artistico.

In seguito a queste decisioni, vari elementi decorativi, tra cui l'arco nominato sopra, furono trasportati all'interno del Museo Civico di Pisa, mentre delle strutture medievali allora non appartenenti all'Università, una fu demolita e una fu inglobata nel nuovo palazzo.

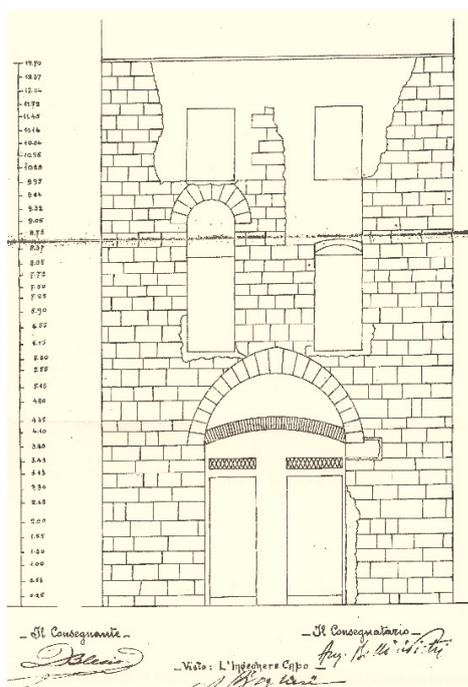


Figura 3.4: Avanzi di una torre su Via XXIX Maggio, rilievo dei ritrovamenti medievali 1906, china su carta lucida (ASPi, Fondo Genio Civile, classe XXVII, f. 49, fasc. 287 A).

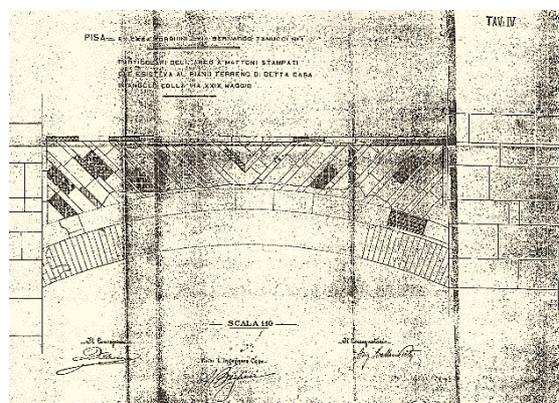


Figura 3.5: Particolare dell'archivolto su Via B. Tanucci, rilievo dei ritrovamenti medievali 1906, china su carta lucida (ASPi, Fondo Genio Civile, classe XXVII, f. 49, fasc. 287 A).

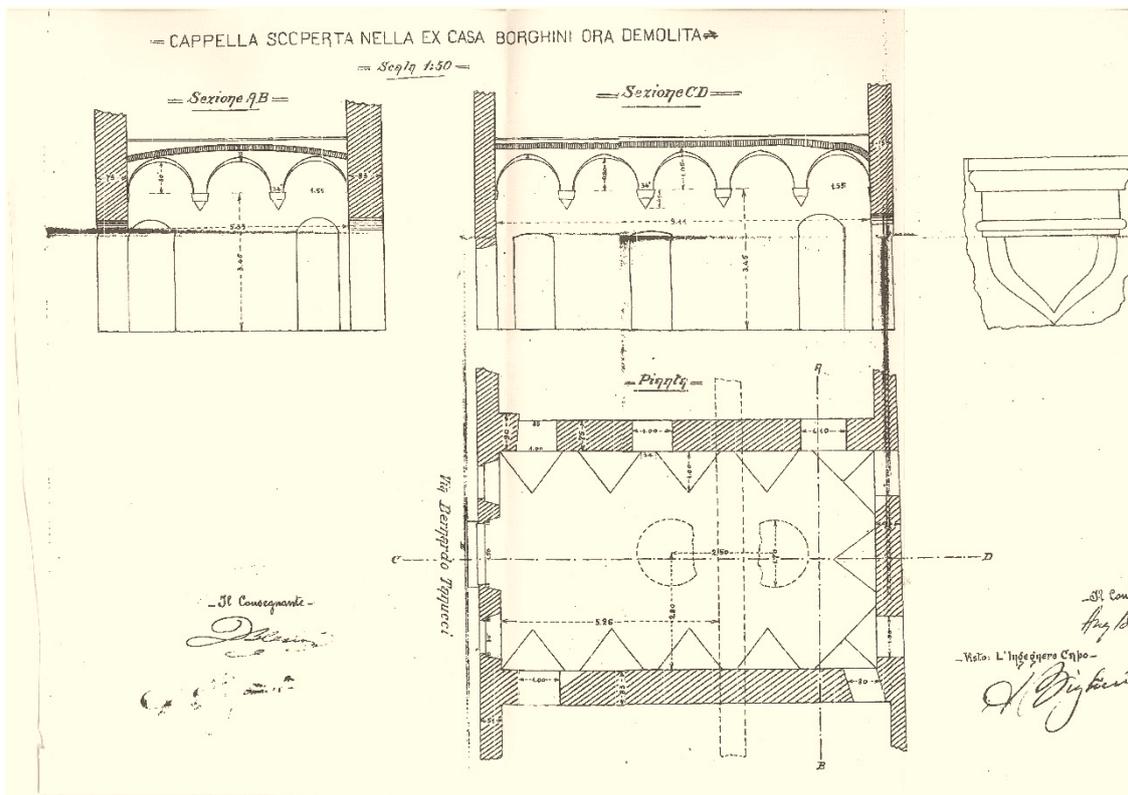


Figura 3.6: Cappella scoperta nella ex casa Borghini in Via B. Tanucci. Rilievo dei ritrovamenti medievali 1906, china su carta lucida (ASPi, Fondo Genio Civile, classe XXVII, f.49, fasc. 287 A).

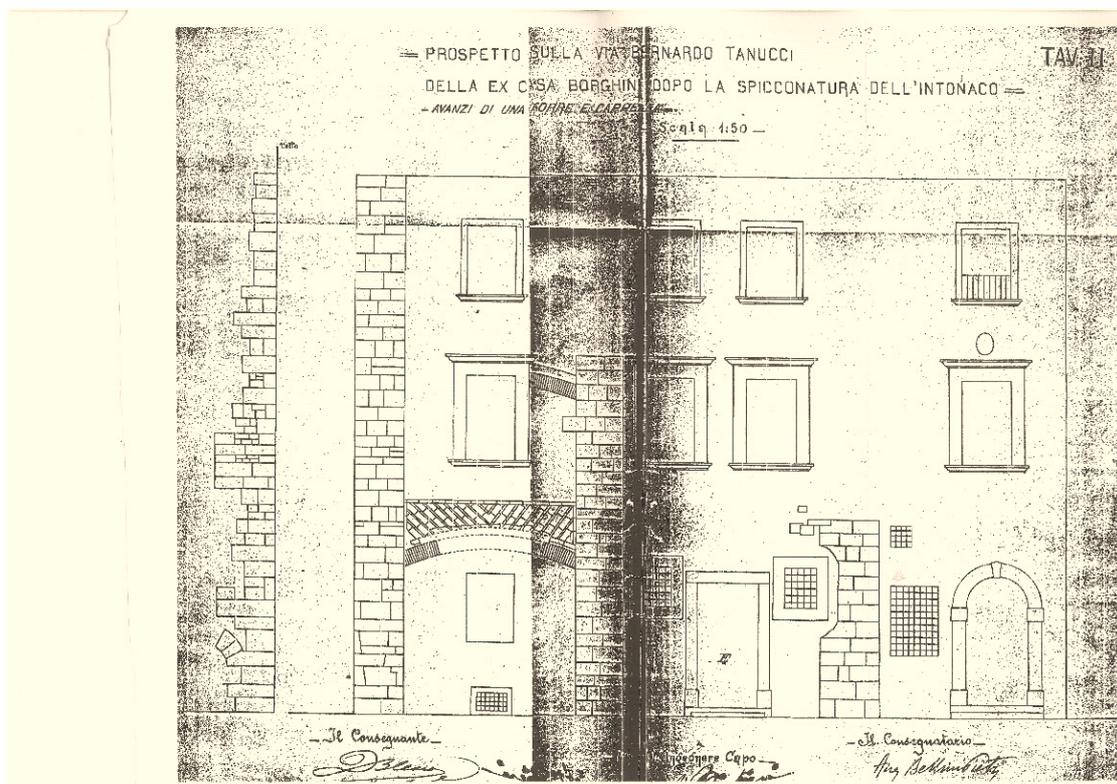


Figura 3.7: Prospetto su Via B. Tanucci, rilievo dei ritrovamenti medievali 1906, china su carta lucida (ASPi, Fondo Genio Civile, classe XXVII, f. 49, fasc. 287 A).

3.2.3 L'interpretazione dei dati acquisiti e ipotesi.

L'analisi dello stato attuale del manufatto, la lettura comparata dei dati tratti dalle testimonianze documentarie, uniti agli indizi forniti da Fabio Redi, ci induce a ipotizzare che le strutture medievali inglobate nell'impianto rinascimentale risalgono a periodi diversi e rappresentano tipologie differenti: le più antiche sono da ritenere quelle appartenenti alla sede della Dogana del Sale, situate a est e prospicienti la via Curtatone e Montanara, mentre le strutture che hanno formato il mercato sono state accostate agli edifici preesistenti, quelli cioè ad uso della Dogana, e per tanto sono cronologicamente successive rispetto alle prime (figura 3.8).

Riassumendo, si delinea la piazza del mercato concepita in forma di un quadrilatero recinto, con due file di undici botteghe a portico disposte lungo i lati del cortile, tutte alte un piano ma di differenti ampiezze, tutte realizzate in muratura. Ciascuna bottega probabilmente era delimitata dal tettuccio sporgente sopra al banco di vendita, sostenuto da pilastri del portico antistante.

La presenza dei resti di due archivolti, rinvenuti negli ultimi saggi su due lati opposti del cortile (figura 3.9), ci induce a ipotizzare che essi potessero appartenere a due ingressi: uno a nord, verso la platea (segnata ancora nella pianta seicentesca della Sapienza), e l'altro a sud, verso l'Arno, dove si trovavano i scali. E' probabile quindi che l'asse viario da nord a sud attraversava la Piazza.

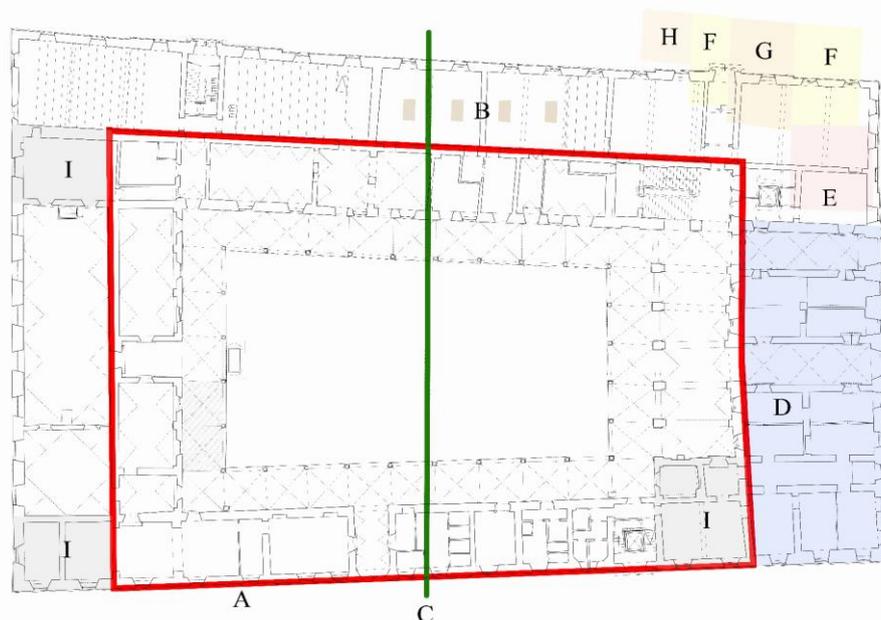


Figura 3.8: Ipotesi ricostruttiva dell'impianto medievale. Pianta piano terra

Legenda.

- A Piazza del Grano
- B Pilastri del portico (ingresso al mercato?)
- C Asse della Piazza del Grano
- D Dogana del Sale
- E Casa- torre medioevale
- F Casa- torre medioevale, poi Casa Borghini
- G Edificio medioevale, poi Cappella
- I Edificio medioevale, poi Casa Bellini

L'impianto del mercato con le botteghe confinava: a est con la Dogana del Sale; a nord in parte con un vicolo stretto affiancato da abitazioni, in parte con la piazza; a ovest probabilmente in parte con case torri e in parte con un vicolo; a sud con una via presso la quale, di fronte alla porta d'ingresso al mercato, si trovava la chiesa dedicata a S. Maria Vergine (tutt'oggi esistente).

Per ciò che riguarda le strutture situate a nord, allora non appartenenti all'Università ma inglobate nell'edificio solo all'inizio del XX secolo (segnate con le lettere E, F, G, I, figura 3.8), si tratta di una torre

(E) con affaccio sulla via Via XXIX Maggio, e di alcune case prospicienti la via Tanucci, di cui una (G) fu trasformata in seguito in cappella.

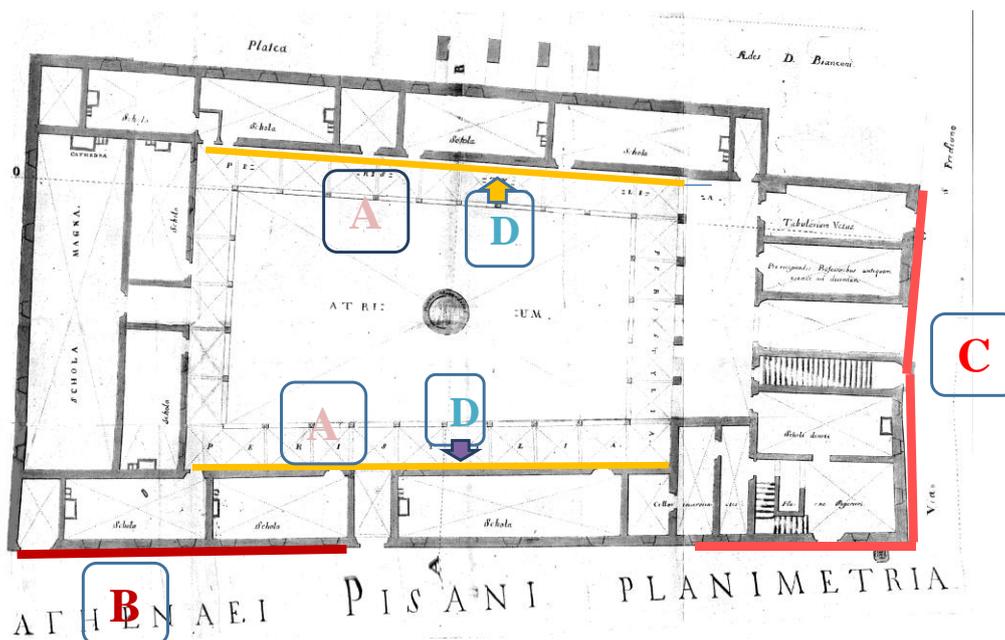


Figura 3.9: Testimonianze delle strutture medievali documentate; schema indicativo

Legenda.

A: Bassi pilastri di mattoni con plinto a conci di calcare cavernoso e “grezzoni” nei muri laterali del cortile, posti a intervalli abbastanza regolari (da F. Redi, 1991).

B: Tracce di un muro a conci di pietra ben sagomati e apparecchiati, alto da terra solo 3m ca., con un portale archivoltato a ovest della porta d’accesso meridionale (da F. Redi, 1991).

C: Strutture medievali dalla fotografia della Sapienza del 1905.

D: Tracce di archivoltto rinvenute durante i saggi (2012, 2013).

3.3. Il palazzo della Sapienza nel periodo rinascimentale

Il disegno laurenziano di incrementare e razionalizzare le strutture dello Studio Pisano e di aggregarvi tutte le discipline in un unico sito, interpretando in modo paradigmatico l’idea umanistica del sapere, si realizzava nel 1472. Alla sua riapertura mancava però ancora un appropriato edificio universitario e le lezioni si svolsero ancora per lungo periodo presso le sedi conventuali di San Filippo, San Michele in Borgo, San Pierino, Santa Caterina e San Nicola. Il Magnifico volle adattare alla Sapienza la trecentesca Piazza del Grano appartenente all’Opera del Duomo, il cui impianto, caratterizzato da una razionale funzionalità, convinse il duca a riconvertirlo in luogo di studio. L’edificazione rinascimentale, prolungatasi nell’arco di mezzo secolo per sfavorevole clima politico, difficoltà finanziarie e la scomparsa di Lorenzo il Magnifico nel 1492, vide due fasi di attuazione: quella laurenziana e quella voluta da Cosimo I.

3.3.1 Il progetto e l’edificazione della Sapienza rifondata da Lorenzo Magnifico

Il progetto laurenziano per un edificio idoneo a contenere tutte le attività didattiche assieme a un collegio dovette maturare negli anni successivi, tra il 1473 e il 1486. Il Magnifico scelse Pisa come luogo «più comodo a tale esercizio», considerando la sua felice situazione geografica e la facilità dei collegamenti per gli studenti forestieri, nonché le sue gloriose tradizioni⁷. Questo ambizioso progetto, per il quale Lorenzo «mentre visse non si perdonò a spesa per tenervi condotti eccellentissimi dottori in ogni facoltà», faceva

⁷ Archivio di Stato di Firenze (ASF), *Consigli della Repubblica, Provvisioni. Registri*, 163, c.156v. Sulle vicende riguardanti la riapertura dello studio pisano cfr. Del Gratta, *L’età della dominazione fiorentina (1406-1543)*, in *Storia dell’Università di Pisa*, 2000, I, pp. 34-36.

parte del piano di valorizzazione dello stato fiorentino in cui mancava «uno degno e reputato studio»⁸. Il 19 dicembre 1472, con la provvisione del Consiglio del popolo veniva così ripristinata in questa «città celebre» come *Studium Generale* l'accademia pisana, istituita già nel 1343 da Papa Clemente VI⁹.

La collocazione dell'immagine del cherubino, simbolo dello studio, con la scritta «*ubi Sapienza est faccenda*», sopra la porta dell'Abbondanza prospiciente la Piazza, segna il momento decisivo nella storia della Sapienza e fa supporre che l'incarico all'architetto doveva essere già stato affidato¹⁰. Ordinato lo sfratto ai bottegai del «*forum frumentarium*» nel 1487¹¹, terminata l'epidemia della peste e rinnovati i contributi finanziari grazie al vescovo Raffaele Riario, mediatore di iniziative medicee nei confronti di Pisa, nel 1489 il cantiere risulta finalmente attivo, come si apprende da una delibera dei Priori fiorentini nel settembre di quell'anno: «*a Pisa s'ordina una Sapientia, che già vi s'è murato qualche camera et sarà opera et bella et degna*»¹². I lavori però, pur essendo personalmente seguiti da Lorenzo - raffinato e colto intenditore di architettura, legato in modo particolare a questa iniziativa - procedevano in modo così discontinuo da poter far poi dichiarare, nell'estate del 1490, al bidello Bartolomeo di Pasquino che «*la Sapienza va chosi piano piano*» e, pochi mesi dopo, procurare soddisfazione allo stesso committente dopo una sua visita in situ¹³. Nel 1490 doveva essere, comunque, terminata l'ala est del cortile, nonché ben avviata la costruzione del primo piano, come si deduce dall'informazione di Francesco Cambini, economo di Lorenzo e responsabile del cantiere. Lo stesso anno venne valutata l'opportunità di dotare le camere degli studenti di soppalchi¹⁴. Nel 1491 è documentata anche l'esecuzione della campana, decorata con giglio fiorentino, che serviva a scandire le ore delle lezioni¹⁵.

I lavori, indubbiamente ben avanzati, come confermato anche dal summenzionato bidello che scriveva all'inizio del 1492 al sovrano «Hoggi lo studio è bellissimo», vennero interrotti con la morte del Magnifico, lasciando incompiute alcune aule, tanto che ancora nel 1493 varie lezioni si continuavano a tenere nel monastero di san Michele¹⁶.

Per ciò che riguarda la paternità del progetto è molto probabile che lo stesso Lorenzo il Magnifico, raffinato e colto intenditore di architettura come era, prima di rivolgersi ad un architetto si fosse impegnato non solo nella scelta del luogo, ma anche nella definizione di massima degli aspetti formali e funzionali della sede deputata allo Studio. Le recenti ricerche, evidenziando un concorso significativo di fatti e circostanze, hanno identificato in Giuliano da Sangallo l'interprete del pensiero laurenziano¹⁷. Egli fu architetto di fiducia del Magnifico che seppe tradurre in concreto ogni suo sapiente pensiero e aveva legami strettissimi con Pisa. Ricordiamo che già nel 1472 seguì il Francione in questa città (collaborando con lui almeno fino al 1483) e soprattutto che tra il 1474 e il 1494 disegnò la pianta di Pisa, in cui, tra l'altro, raffigurò con particolare cura la Sapienza a impianto idealizzato con peristilio. Fu anche autore dei progetti per la Cittadella e risulta costantemente impegnato nella città tra il 1509 e il 1512 in una serie di interventi su vasta scala, come i Bastioni, la Cittadella, la Porta san Marco, il Ponte della Spina. Il suo assiduo interesse per Pisa è inoltre

⁸ Cfr. Tongiorgi Tomasi, *L'Università e gli artisti*, in *Storia dell'Università di Pisa*, 2000, II, p.664.

⁹ A favore dello studio pisano vennero stanziati seimila fiorini nell'arco di cinque anni (Del Gratta, *L'età della dominazione fiorentina*, in *Storia dell'Università di Pisa*, 2000, I, p. 35).

¹⁰ C. Fedeli, *Documenti e pagine di storia universitaria: 1427- 1800*, Pisa 1912, p.26.

¹¹ Alla fine dell'anno 1487 i proprietari delle botteghe vennero invitati a trasferire le loro attività altrove, visto che «in quel luogo doveva costruirsi la Sapienza» (ASF, Uff.St.10. f.16; Del Gratta, *L'età della dominazione fiorentina*, in *Storia dell'Università di Pisa*, Pisa, 2000, I, p.67. La nuova piazza dei Grani sarà costruita a partire dal 1493 nel luogo dove si trova oggi.

¹² Fedeli C., *Documenti e pagine di storia universitaria, 1427-1912*, Stabilimento tip. Toscano, Pisa, 1912, pp.18-19. Gli interventi furono già iniziati, o almeno predisposti, nel novembre del 1488.

¹³ ASF, Uff.St. 10, f. 225, Lettera del bidello al Provveditore dello Studio Luigi Venturi; Del Gratta, *L'età della dominazione fiorentina*, cit., p. 68. L'arcivescovo Raffaele Riario scrisse a Lorenzo, alla fine del 1490: «Io credo che ogni giorno abbiate nuove come va avanti e come sia bella la vostra Sapienza. Et perché sta male a me lodarla, la lascio lodare al M. Lorenzo, el quale alla sua venuta qui nel verno venne a scavalcare ivi e mostrò sommamente gli piacesse, perché disse in fine, qui non si può apporre nulla, e fatela bella che merita di essere favorita sommamente da ciascuno» (ASF, *Consigli della repubblica. Provvisioni. Registri*, 163, c. 157r; M.A. Giusti, *La Sapienza: "accademia pisana per Laurentium renovata"*, in Morolli, Acidini Luchinat, Marchetti, Firenze, 1992, p. 207).

¹⁴ R. Del Gratta, *L'età della dominazione fiorentina*, in *Storia dell'Università di Pisa*, Pisa, 2000, I p. 70.

¹⁵ Tongiorgi Tomasi, *L'Università e gli artisti*, in *Storia dell'Università di Pisa*, Pisa, 2000, II, p. 664.

¹⁶ R. Del Gratta, *L'età della dominazione fiorentina*, in *Storia dell'Università di Pisa*, Pisa, 2000, I, p. 70. Bartolomeo di Pasquino si lamentava, infatti, subito dopo la morte del Magnifico, che «era mancho verghogna non averla cominciata che lasciarla a questo modo». Gli scoraggiamenti da parte degli Ufficiali di Stato rivolti al Cambini in seguito alla scomparsa di Lorenzo e i loro suggerimenti di non assumere altre iniziative fino a quando non fossero terminati i lavori in corso, ci fanno capire chiaramente quanto la Sapienza fosse strettamente legata all'iniziativa del Magnifico.

¹⁷ Cfr. E. Karwacka Codini, *La Sapienza*, in *Architettura a Pisa nel primo periodo mediceo*, Roma Gangemi, 2010, pp.48-62.

testimoniato dai disegni del Taccuino senese¹⁸, in cui studia e disegna i monumenti della Piazza del Duomo e la chiesa di S. Zeno.

È significativo ricordare, inoltre, che per le ideazioni delle fabbriche di alto pregio architettonico il Magnifico si rivolgeva proprio a Giuliano. E infine, probabilmente proprio considerando l'esperienza dello Studio pisano, egli ebbe nel 1492, assieme a Francesco di Giorgio Martini, l'importante incarico per il progetto della Sapienza di Siena.

Per la Sapienza pisana, si trattava di un progetto assai ambizioso nel quale, per rendere lo Studio "celebre e frequentato"¹⁹ venivano curati peculiarmente aspetti funzionali, offrendo una soluzione spaziale in cui l'"universalità" metafisica dei codici dell'architettura monastica (tramite la quale si realizza un chiaro collegamento con quei centri della cultura medievale da cui le università stesse erano derivate) si sposava (seguendo i consigli teorici albertiani) con i richiami alla spazialità dei luoghi profani.

Significative risposte a riguardo dell'entità del progetto ci sono offerte dagli anonimi disegni del palazzo della Sapienza (due piante e una sezione), provenienti dall'archivio della famiglia Alliata e donati alla Domus Galileiana²⁰ (figura 3.10). Essi, sebbene tracciati nel tardo Settecento, costituiscono copie di un rilievo eseguito tra il 1591 e il 1613 e documentano, quindi, l'impianto della Sapienza rinascimentale, in cui, tra l'altro, è possibile distinguere l'intervento cosimiano dall'ideazione quattrocentesca.

L'edificio si presenta come un blocco chiuso, libero da strutture su quasi l'intero perimetro esterno (in quanto confinante con una abitazione solo su un breve tratto del lato nord), la cui forma lievemente trapezoidale è da imputarsi ad un assetto viario preesistente. Il cortile porticato, situato al centro dell'impianto, che costituisce il nucleo matrice dell'intera composizione, gli conferisce un'immediata somiglianza a uno spazio conventuale.

Le planimetrie e la sezione illustrano un organismo a due piani, estremamente curato dal punto di vista funzionale: un loggiato a due ordini, spazioso e soleggiato, attorno al quale si aprono gli ambienti destinati alla didattica, al piano terra, e quelli del collegio al primo piano. Al piano terra, le undici 'scuole' di varie dimensioni, dotate di cattedre e ben illuminate, di cui una grande destinata a Schola magna, assieme alle stanze dei professori, alla *Tabularium vetus*, alle scale e alla stanza dei bidelli, si affacciano sul cortile a peristilio, al centro del quale è collocato il pozzo.

È da notare che originariamente ambedue i lati corti dell'*atrium* dovevano avere il porticato 'doppio', con i sostegni intermedi a pilastri e non a colonne. La presenza del secondo porticato occidentale (annullata dai lavori promossi da Cosimo I tra il 1547 e il 1551) è testimoniata tutt'oggi dai peducci in pietra serena inseriti all'interno delle aule prospicienti la vecchia Aula Magna. Il vestibolo meridionale, quello situato sull'asse verso l'Arno introdotto da Cervelliera per volontà di Cosimo I (figura 3.11), si discorda con la posizione centrale del pozzo. Inoltre, la disposizione dell'ala est (quella confinante con la via San Frediano) mostra una doppia profondità rispetto ad altre: scelta condizionata dalla presenza delle strutture medievali qui incorporate (figure 3.8 e 3.9).

Al primo piano viene ripetuto lo schema del loggiato sui quattro lati del cortile, con due portici che si raddoppiano sui lati corti. Oltre alle 42 comode e luminose camere, allineate ai lati del porticato, trovano posto l'abitazione del rettore, il *Coenaculum*, la *Popina*, la cappella, la biblioteca, le scale e i servizi igienici, quest'ultimi ubicati in fondo all'impianto. Si nota che nella distribuzione degli ingressi alle camere si ricorre alla soluzione speculare rispetto le pareti divisorie, applicando poi le porte affiancate o binate.

Gli accessi dall'esterno per la zona delle aule risultano separati da quelli per le stanze degli studenti, per il *Tabularium* e per i servizi al primo piano: si sottolinea in questo modo una netta divisione tra le funzioni didattiche e quelle del collegio, volendo garantire un clima di privacy agli scolari. I porticati e le stanze del piano basale sono coperti da volte, mentre tutti gli ambienti del primo piano sono dotati di palchi. Ai due lati corti dell'atrio sono sovrapposte le soffitte praticabili, illuminate dal cortile.

Domina su tutto la semplicità dell'impianto, esaltata dall'armonioso proporzionamento dell'insieme che vede i piani terreno e primo in progressiva diminuzione.

¹⁸ L. Zdeukauer (a cura di), *Il taccuino senese di Giuliano da Sangallo*, Bologna 1979.

¹⁹ ASF, *Otto di Pratica*, Missive esterne, 7, f.171r-v; R. Del Gratta, *L'età della dominazione fiorentina (1406-1543)*, in *Storia dell'Università di Pisa*, cit. I, 1°, p.68.

²⁰ C. Lombardo, *Di un'antica planimetria dello Studio pisano e del Collegio*, in "Bollettino Storico Pisano" 1942, pp.61, 65, 75. Si tratta di tre disegni acquerellati, appartenenti alla famiglia Alliata che, entrati poi in possesso di Gino Tondelli, sono stati da lui donati alla Domus Galileiana. La serie completa conteneva quattro disegni, di cui uno oggi è mancante. La scritta con l'indicazione del nome del proprietario della casa confinante a Nord della Sapienza, un certo D. Bianconi, ha permesso di stabilire la data di esecuzione del rilievo originale.

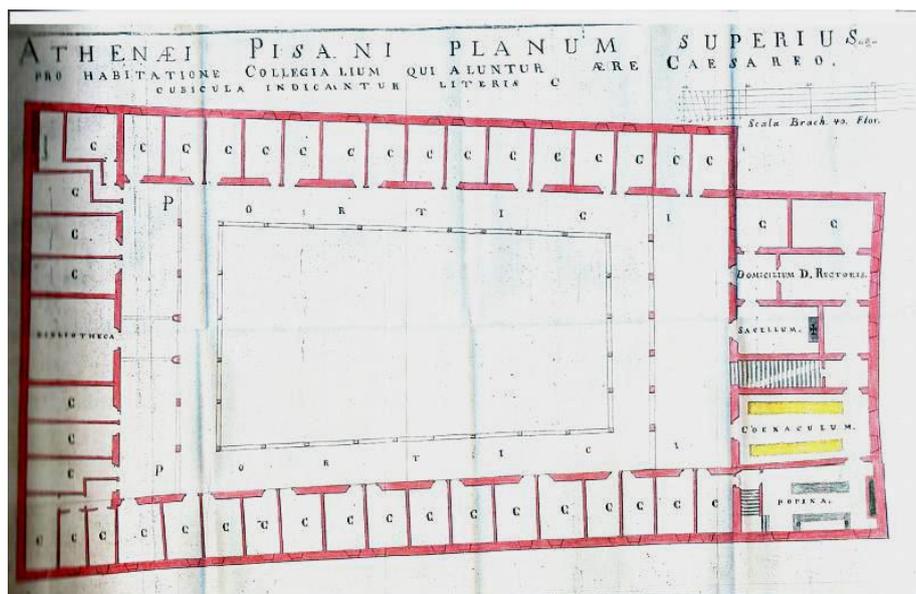
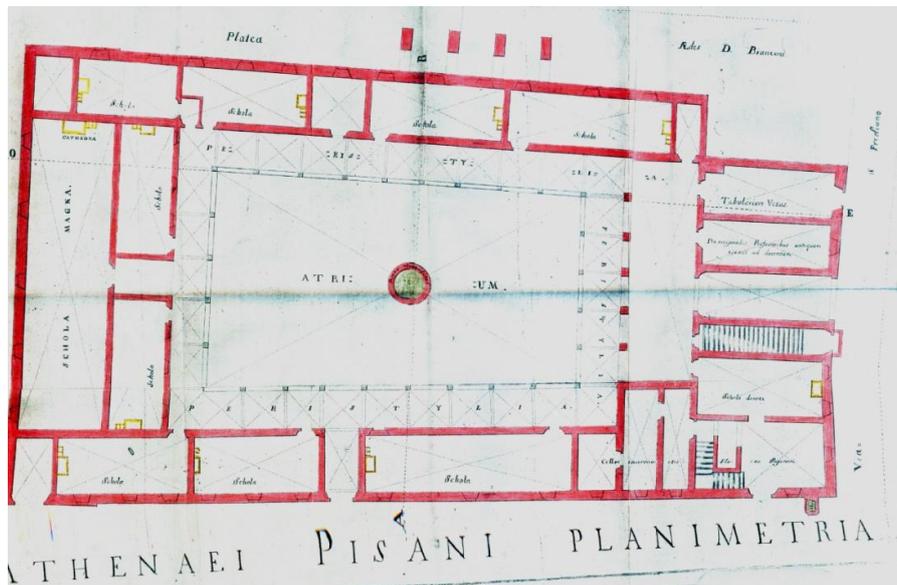
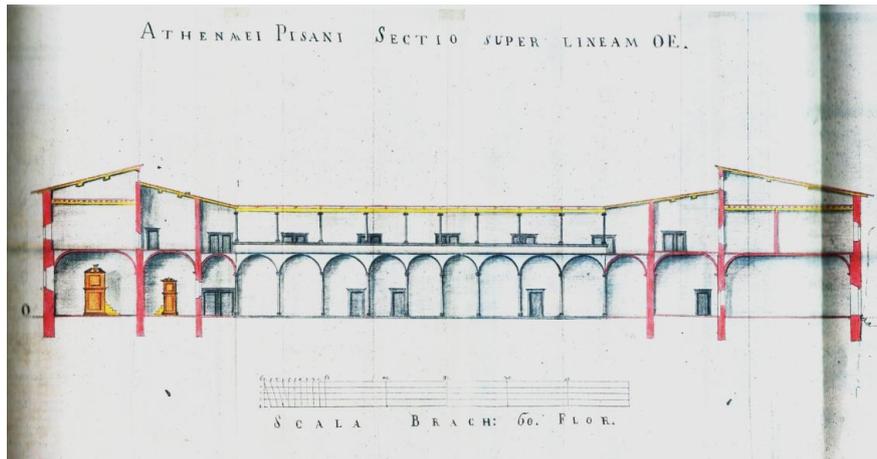


Figura 3.10: Athenaei Pisani sectio super lineam OE, Athenaei Pisani planimetria, piano terra, Athenaei Pisani planum superius pro habitatione Collegialium qui aluntur aere cesareo (Pisa, Domus Galileana, XVIII sec.). Copia del rilievo eseguito tra il 1591 e il 1613.

Soffermandoci ancora sugli aspetti formali, osserviamo che, pur dovendo agire entro i limiti planimetrici non modificabili, in quanto definiti dalla medievale piazza del Grano, ed essendo vincolati da strutture preesistenti che in parte furono inglobate in questa fabbrica, si riuscì a proporre un impianto segnato da razionalità e da una chiara ricerca di geometrizzare lo spazio, riproporzionandolo con accorgimenti metrici di derivazione brunelleschiana. Notiamo, così, che le allungate proporzioni del cortile interno vengono aggraziate dall'inserimento di doppi loggiati; che vi è presente un asse di simmetria a cui viene assegnato il compito di unire visivamente l'ingresso principale con l'aula magna al piano terra e la cappella con la biblioteca al piano superiore, nonché di regolare la varietà degli spazi didattici, e, infine, che i moduli campata del porticato terreno ricercano lo spazio cubico e l'arco a tutto sesto.

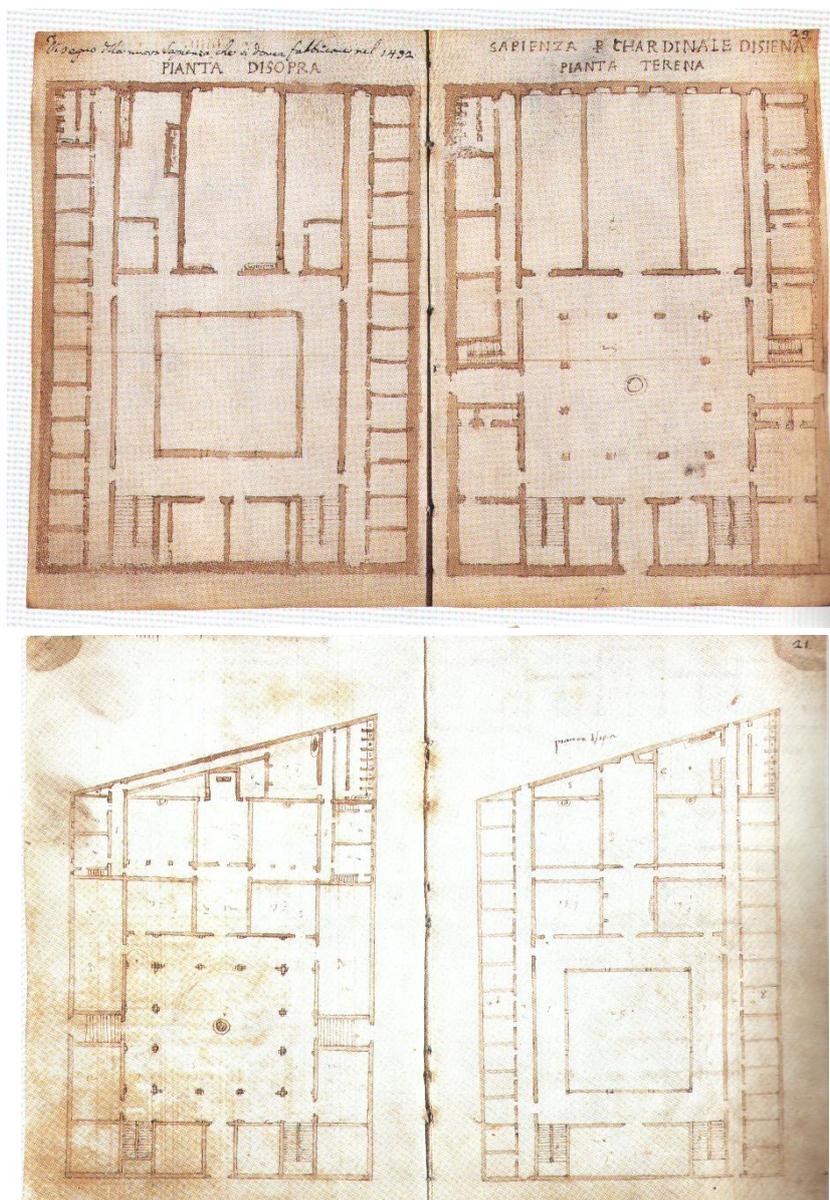


Figura 3.11: Giuliano da Sangallo, due progetti per una nuova casa della Sapienza a Siena, 1492 (Siena, Biblioteca Comunale, Taccuino di Giuliano da Sangallo, codice s.IV, 8, ff.28v-29r, ff.20v-21r e ff.28v-29r). I disegni rivelano una notevole cura per la distribuzione degli ambienti interni e come a Pisa, la cappella è situata sull'asse centrale e le latrine sono disposte nel lontano angolo dell'edificio.

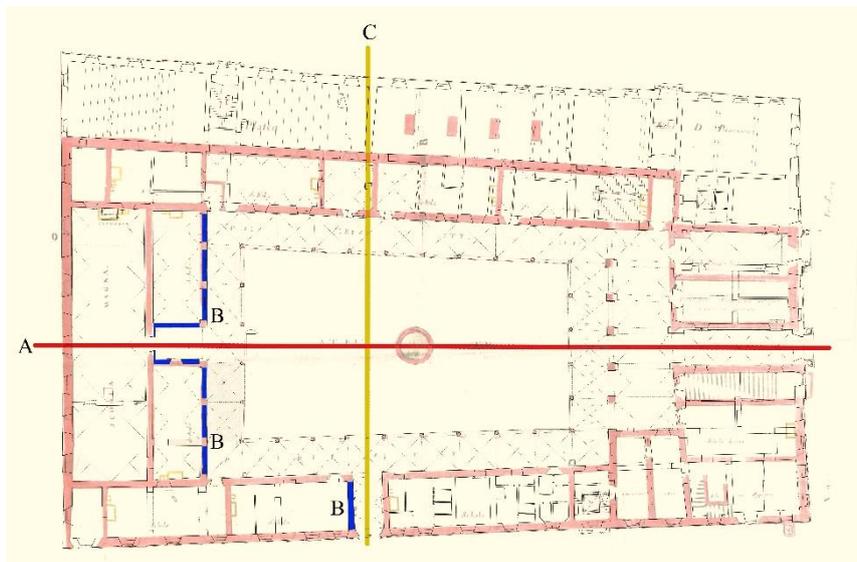
In questa soluzione progettuale si può intravedere, inoltre, il modello antiquario familiare alla teoria albertiana: palestra a peristilio intersecata con domus a peristilio, e ciò spazio aperto contornato da portici e anticipato da due ali edificate. A proposito dei nuovi 'generi' architettonici universitari, è interessante ricordare le riflessioni teoriche dell'Alberti nel suo trattato *De Re Aedificatoria*, stampato per la prima volta nel 1485 e

dedicato proprio a Lorenzo il Magnifico. Egli accostando opportunamente l'impianto dei monasteri, «la cui missione religiosa si accompagna allo studio delle discipline liberali», alle palestre a peristilio, «che assai bene si attagliano a quel genere di religiosi cui or ora s'è fatto cenno», consiglia di «disporre il porticato, il cortile e tutto il resto in modo che nessun conforto venga a mancare a chi vi sosta». Tali suggerimenti dovevano essere ben noti a Lorenzo ancora prima della stampa del trattato, considerando che egli seguiva con attenzione gli avvenimenti nel campo dell'architettura, ammirava le opere albertiane e aveva stretti rapporti con l'artista.

La conformazione delle membrature architettoniche in pietra serena applicate nel cortile sull'intonaco chiaro (ancora oggi visibile nel doppio ordine delle colonne e nelle semplici incorniciature di porte del cortile), appellandosi alla lezione brunelleschiana, conferiva all'insieme un'eleganza di linee e affermava un'idea di organicità dello spazio. Per i colonnati venne scelto l'ordine ionico, qui presente in versione michelozziana. Le differenti interpretazioni dei capitelli conservati oggi sono dovute probabilmente all'esecuzione da parte di più scalpellini o botteghe, ma soprattutto alle successive sostituzioni di tali elementi.



Figura 3.12: architrave del portale del palazzo su via XXIX Maggio.



Legenda

A	Asse longitudinale di Lorenzo de' Medici
B	Intervento di Cosimo I
C	Nuovo asse trasversale introdotto da Cosimo I

Figura 3.13: Schema dell'impianto architettonico rinascimentale, piano terra.

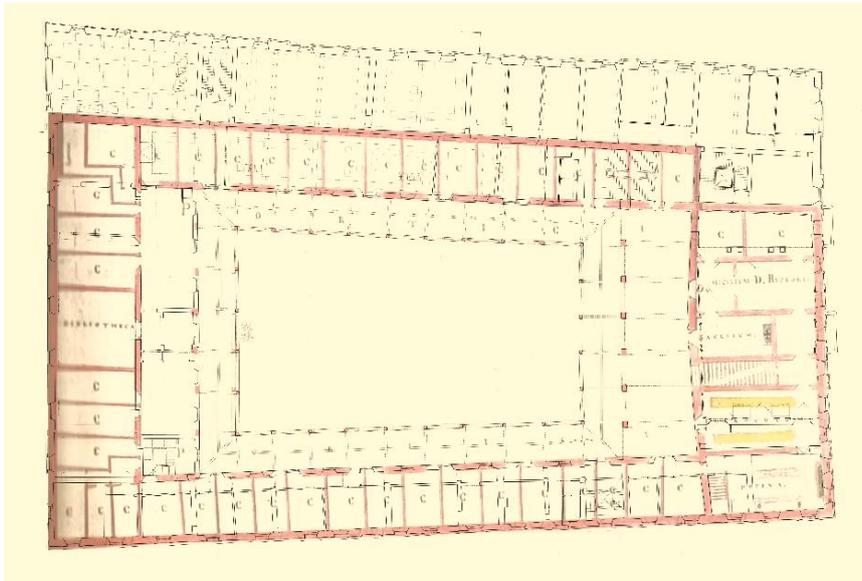


Figura 3.14: Schema dell'impianto architettonico rinascimentale, primo piano.

3.3.2 La trasformazione di Cosimo I

Il primo novembre del 1543 (esattamente duecento anni dopo la sua fondazione) lo Studio riaprì i suoi corsi e un anno dopo veniva istituito il Collegio della Sapienza, detto anche Ducale o di Cosimo I, per gli scolari provenienti da famiglie in condizioni disagiate e meritevoli di essere aiutati negli studi con vitto e alloggio gratuiti. Alla riapertura istituzionale si associò l'intervento sull'edificio: Cosimo I introdusse un nuovo ingresso principale verso l'Arno, sul lato meridionale prospiciente la via della Sapienza (figura 3.13) e chiuse uno dei 'doppi' loggiati al piano terra, quello presso la Scuola Magna, ricavandovi due nuove aule. L'artefice di questo intervento fu Giovanni Battista Cervelliera, incaricato nel 1545, assieme al maestro muratore Arrigo di Berto da Como, dai Consoli del Mare a disegnare la nuova via tra la Sapienza e il Lungarno²¹. Alla fine del 1543 si provvide all'esecuzione dell'orologio posto "sopra una torre continua alla Sapienza"²². Cervelliera fu probabilmente anche l'esecutore dei lavori della trasformazione dell'edificio del "rinnovato studio"²³. L'attenzione principale venne posta sull'"ornamento" dell'architettura, tramite il quale si voleva glorificare l'illuminato governo. Si inserirono per ciò essenziali segni, decorativi e complementari, dell'adeguamento al nuovo gusto estetico e al nuovo corso politico, che facevano parte del programma di Luca Martini, il primo Provveditore del riformato Ufficio dei Fossi di Pisa, a cui il principe affidò il compito di mutare l'aspetto della città²⁴. Il maestoso stemma mediceo, guarnito dal collare di toson d'oro (sculpto da Niccolò Tribolo, Pierino da Vinci e collaboratori), che fu collocato sopra la nuova porta verso l'Arno nel 1549, assieme all'iscrizione lapidea *INITIUM SAPIENTIAE TIMOR DOMINI* (attualmente posta nel vestibolo principale) e qualche membratura in pietra serena, sono le poche testimonianze che abbiamo oggi di questo intervento. L'aspetto della facciata cosimiana ci viene comunque trasmesso dal disegno tracciato dal Tronci (figura 3.23). Tale immagine ha costituito il punto di riferimento per una ipotetica ricostruzione delle due facciate della Sapienza medicea (figura 3.24).

²¹ Nell'ottobre del 1543 sono documentati i finanziamenti destinati per le opere murarie da eseguire: "Sonsi ricevuti li 200 scudi per la muraglia della Sapientia che ce n'era necessità"- scriveva il 23 ottobre di questo anno Francesco Campana a Pier Francesco Riccio (ASF, Mediceo del Principato, 1170, ins.6, c.38). Sull'incarico del Cervelliera per il progetto di via nuova cfr. M. Fanucci Lovitch, *Artisti attivi a Pisa tra XII e XVIII secolo*, Pisa Pacini 1991, pp. 151-152. Per i lavori da lui eseguiti si veda ASP, Università, 680, cc. 11v e 68v.

²² ASF, Mediceo del Principato, f.1170, ins.6, c.337.

²³ Tali lavori sono documentati nel 18 febbraio al 24 marzo 1554.

²⁴ Sull'apparato decorativo cfr. R. Ciardi, *Il Cinquecento*, in Ciardi, Casini, Tongiorgi Tomasi, 1987, pp.113-114.

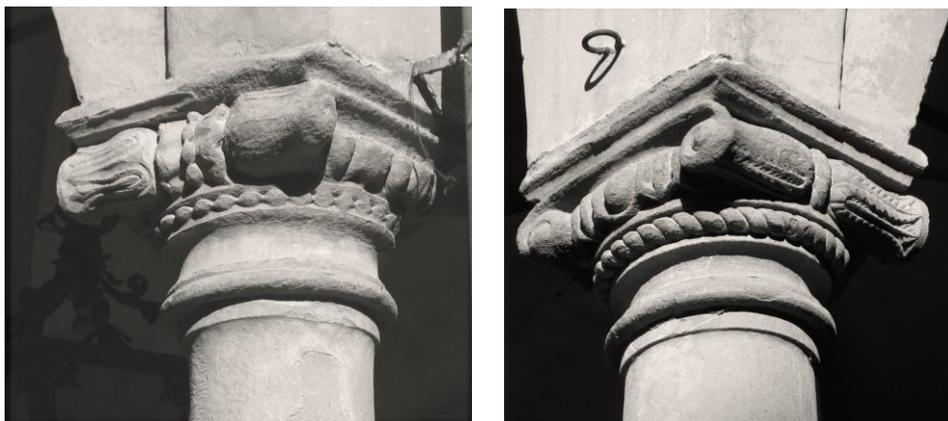


Figura 3.15: Capitelli del piano terreno - esemplificazione dell'articolazione morfologica



Figura 3.16: Capitelli del verone - esemplificazione dell'articolazione morfologica



Figura 3.17: Peducci - esemplificazione dell'articolazione morfologica



Figura 3.18 : Il 'doppio' porticato orientale al piano terra

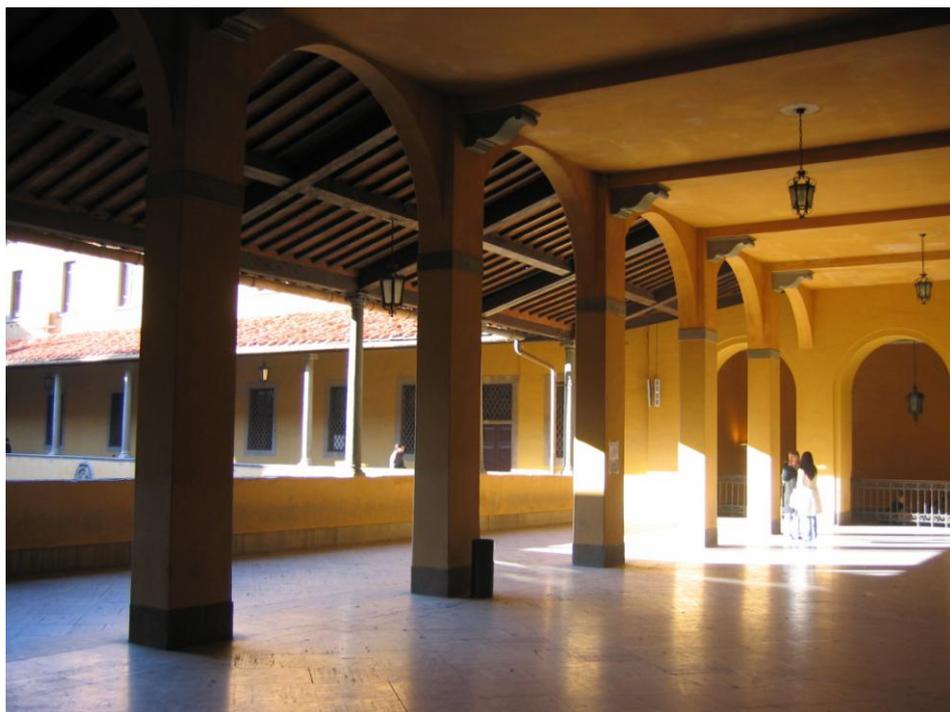


Figura 3.19: Il 'doppio' porticato orientale al primo piano



Figura 3.20: Porta binata conservata al primo piano.



Figura 3.21: Vestibolo d'ingresso all'Aula Magna medica appartenente in origine al "doppio" porticato.



Figura 3.22: loggiati del verone.

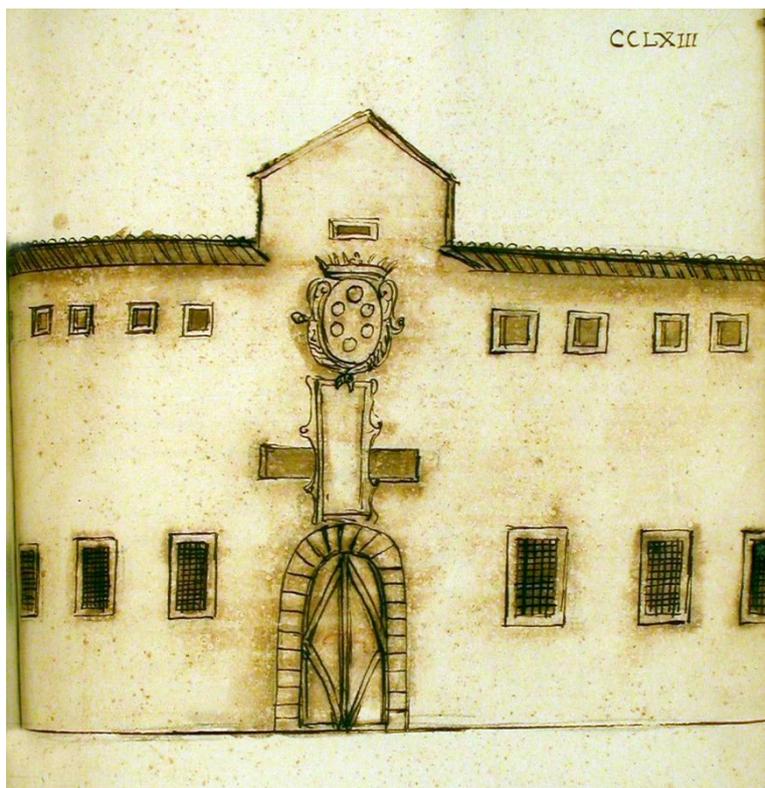


Figura 3.23: Facciata meridionale della Sapienza, P. Tronci, *Descrizione delle chiese, monasteri et oratori della città di Pisa*, 1643 ca.

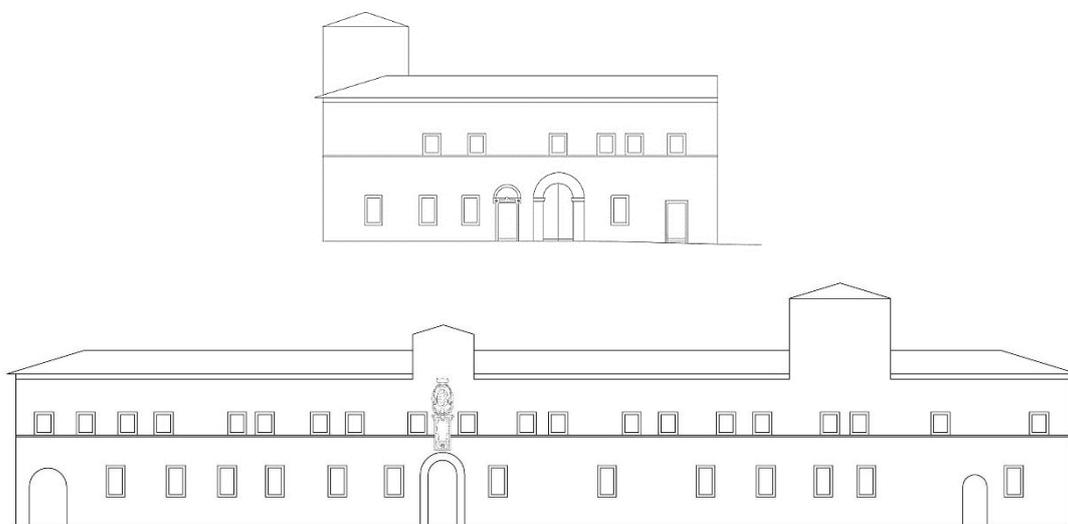


Figura 3.24: Ricostruzione ipotetica dell'articolazione delle facciate nel periodo mediceo a) ad est (presso la via Curtatone e Montanara); b) a sud (presso la via della Sapienza)

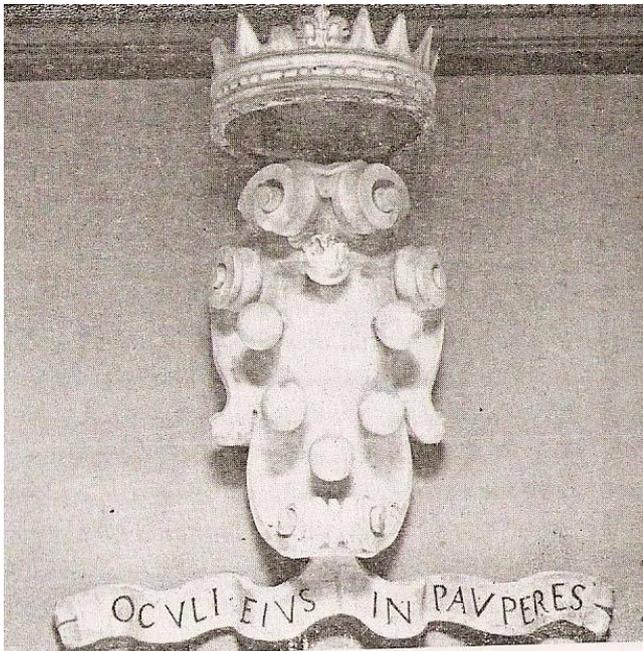


Figura 3.25: Stemma che sovrastava l'ingresso del Collegio della Sapienza sulla facciata est, (Pisa, cortile del museo di San Matteo)



Figura 3.26: Stemma medico corredato dal collare del toson d'oro, Niccolò Tribolo, Pierino da Vinci, 1549, (Palazzo della Sapienza, facciata sud).

3.4. Trasformazioni dal XVII al XIX secolo. Accademiae Pisanae- magnificum theatrum.

La prestigiosa sede universitaria pisana, assai stimata fin dalla sua origine per eccellente livello di studi, vide grande vivacità nel periodo lorenese, divenendo per fine una meta prediletta di “eruditi forestieri”²⁵ e luogo visitato da personaggi illustri. Negli appunti d’archivio sono ricordate, ad esempio, la visita dell’arciduca Francesco per l’apertura dello Studio l’11 novembre 1782 e in seguito il 13 gennaio e il 27 marzo del 1783; mentre il 10 marzo del 1783 vi si recò Massimiliano, fratello del granduca.

Negli ultimi decenni del secolo la Sapienza venne eletta a luogo rappresentativo della città, emblema della sua anima non solo colta, ma insieme nobile ed elegante, come dimostrano le feste organizzate nel 1785 da Pietro Leopoldo in onore dei reali di Napoli. E’ il “gran ballo”, organizzato nella fabbrica della Sapienza, a lasciare una traccia indelebile, come documenta il racconto di Giovanni Anguillesi: “*Erane stato ridotto il cortile ad una vastissima sala, coperta da un tetto sopra essa espressamente costruito con eguale solidità ed ingegno, onde ripararsi contro la pioggia o altre intemperie.[..]. Tutte le stanze che attorniano l’indicato cortile, e che servivano prima alle lezioni dei diversi professori dell’Università, trasformate erano in ridenti salotti da giuoco, adorni di pitture e di specchi [..]; tanto più che poterono in qualche parte esser goduti anche dai più infimi, i quali esclusi dall’interno della sala, erano ammessi liberamente nell’ampia superior galleria, che per ogni parte la circonda e la domina*”²⁶.

La realizzazione in soli 19 giorni di questo imponente” apparato” - una “macchina sostenuta da 28 travi d’abeto” con gli ornati ideati da Domenico Conti e con la decorazione pittorica eseguita da Giuseppe Terreni

²⁵ Dal 1773 la Sapienza è presente nelle guide di Pisa, a partire da quella di Giovacchino Cambiagi.

²⁶ G. Anguillesi, *Notizie storiche dei palazzi e ville appartenenti alla I.R. Corona di Toscana*, Pisa 1815, pp. 189-190.

- è stata minutamente tracciata da Francesco Pieraccini in *Descrizione delle feste state fatte nella città di Pisa nella primavera dell'anno MDCCLXXXV*²⁷ (si veda Appendice 2).

Nel "Campione delle case e orti [...] della città di Pisa", redatto nel 1783-1784, il palazzo della Sapienza è descritto in modo seguente: "*Il piano terra della fabbrica della Sapienza di figura rettangolare nella quale si ha l'accesso da due lati per due diversi ingressi che il principale in faccia alla scala della catena con cortile e loggiato e pozzo in mezzo sotterraneo e circondata da quindici stanze a volta reale di diverse grandezze per servizio delle scuole ed altri usi compresovene due inservibili ed escluse altre stanze che sono addette al collegio superiore, posto in cura di santa Margherita detta la Madonna dei Galletti a cui confina a primo via che dalle stallette conduce a via S. Frediano, a secondo parte collegio con le stanze terrene e parte via S. Frediano, a terzo parte beneficio di S. Giuseppe in S. Andrea, parte Domenico Baldinotti, parte piazzetta e via sterrata dietro la Sapienza, a quarto vicolo delle stallette*"²⁸.

3.4.1. Vicende costruttive tra il '600 e il '700

Fino al XVII secolo i lavori sono poco documentati (anche a causa della perdita del materiale archivistico relativo a questo periodo), quasi sempre furono eseguiti senza programmazione, consistono in cosiddetti restauri²⁹ e mirarono essenzialmente ad un diverso impiego di locali oppure al loro accorpamento.

Rimasto pressoché abbandonato nell'ultimo periodo dei granduchi medicei, lo Studio tornò all'attenzione durante la dinastia lorenese. Conformemente alle tendenze culturali e scientifiche dell'età dell'Illuminismo, vide istituire cattedre nuove, come quelle di fisica sperimentale e di chimica, e scorse un notevole incremento dei fondi librari. A tali nuove esigenze fu strettamente connessa la necessità di disporre di nuovi spazi, ben adeguati a specifico uso: necessità che venne corrisposta dalla costruzione della Specola, dall'apertura della biblioteca universitaria pubblica (1742), dall'ampliamento dell'orto botanico e del museo di scienze naturali.

Nella seconda metà del Settecento il provveditore Angelo Fabroni (1769-1803) - grande studioso a cui va il merito di disciplinare e incrementare la biblioteca e le istituzioni scientifiche - pose l'attenzione particolare sulle strutture edilizie che rivelarono la mancanza degli spazi adeguati per le attività didattiche e palesemente annunciarono il bisogno di interventi edilizi straordinari. Per la sua iniziativa, ad esempio la medicina, con il Teatro anatomico situato nella medievale chiesa di Santa Maria Vergine (di fronte alla facciata cinquecentesca della Sapienza) fu spostata all'ospedale di Santa Chiara, trovando una nuova sede adeguata. Egli promosse lavori di ristrutturazioni nella Specola, nella torre dell'orologio dell'Università, nel Museo e giardino dei Semplici e nel palazzo della Sapienza³⁰. Relativamente a quest'ultimo, due interventi risultarono particolarmente significativi, come risulta dalla documentazione archivistica conservata: l'uno - riguardante la sopraelevazione del corpo soprastante la zona mediana del lato est del palazzo (con la destinazione alla nuova cappella, due camere e una stanza per il rettore) e l'altro - mirato a risolvere problemi strutturali causati dal cedimento di quattro pilastri del porticato est al piano terreno (figure 3.31 e 3.32).

3.4.2. Progetti e realizzazione delle nuove stanze del collegio e della cappella, sopraelevazione del corpo est nella zona mediana: 1782

Nel 1782 al Collegio della Sapienza fu unito il Collegio Vittoriano. Secondo le disposizioni testamentarie di Vittorio de' Rossi, la Sapienza doveva ospitare gli altri due studenti di Civita Ducale. Oltre alla mancanza delle camere per nuovi allievi, si rilevava che la vecchia cappella medicea del Collegio, situata al piano primo a confine con lo scala principale, era troppo piccola per accogliere tutti gli studenti. Per rispondere alle nuove esigenze funzionali, l'ingegnere Francesco Bombicci formulò due progetti. Nel primo, redatto il 20 febbraio del 1782, egli propose destinare la vecchia cappella al luogo della ricreazione per gli studenti,

²⁷ *Descrizione delle feste state fatte nella città di Pisa nella primavera dell'anno MDCCLXXXV*, in *Pisa MDCCLXXXV* per Francesco Pieraccini, pp. 244-247.

²⁸ ASF, Fiumi e Fossi, 2791, cc. 39 r-v

²⁹ Nel 1765, ad esempio, dallo scalpellino Michele Sarti sono state restaurate alcune colonne del piano terreno: le loro basi deteriorate sono state sostituite con le nuove eseguite in pietra serena. (ASPi, Università, 552), cc.n.n.)

³⁰ Tra gli altri, nel 1780 vengono effettuati restauri nell'Aula Magna (cfr. Regesto, 29).

“mentre l’attuale stanza di ricreazione [predisporre per] una camera”³¹. Per la nuova cappella e altre due camere mancanti l’ingegnere prospettò la sopraelevazione del corpo est, nella zona mediana prospiciente la via San Frediano, collocandovi la cappella nello spazio soprastante il vecchio refettorio e altre due camere a confine con essa. L’attuazione della proposta necessitava l’innalzamento dei muri perimetrali e di quelli divisorii di braccia 4 circa, la sostituzione della vecchia scala in mattoni con una nuova in pietra e l’abbassamento “del palco del refettorio di Braccia uno e mezzo circa, giacché riesce al presente troppo alto” e l’apertura “in detta nuova Cappella di tre finestre”. L’altro progetto, presentato a distanza di un mese, il 26 marzo 1782, prevedeva, invece, di ricavare le due camere e la cappella nello spazio ottenuto dal tamponamento del doppio loggiato al primo piano, situato sul lato ovest del cortile³² (figura 3.28). La proposta della chiusura del loggiato venne criticata fortemente da Antonio Quarantotto: “*Non devo per altro tacere, che questa proposizione ancora dà i suoi difetti; Primieramente si viene a togliere al Collegio tutto il luogo A:B:C:D: quale serve alla ricreazione dei Giovini, et al passeggio nelle giornate, che non possono sortire di casa, né altro né rimane da sostituirgli, e dove sono quaranta e più giovini adunati non pare che un tal luogo sia interamente superfluo.*

In Secondo luogo le due nuove Camere, che verrebbero costruite accanto alla nuova Cappella non potendo prender lume, che dalla parte del Cortile, e frapponendosi fra esse et il Cortile un largo corridore, li assai basso dalla parte che riceve l’aria stante il declive, e pendenza del tetto, che lo copre pendente per quella parte, non potrebbero ricevere, che un lume secondario, e poco, onde nelle scure giornate dell’Inverno appena averanno luce”³³.



Figura 3.27: G.M. Terreni, *La festa da ballo nel cortile della Sapienza nel 1785* (Firenze, Palazzo Pitti).

Pur essendo approvato dal Provveditore Fabbroni il secondo progetto, fu eseguita la prima proposta di Bombicci, introducendo solo alcune modifiche volute da Antonio Quarantotto. Le spese per la scala d’accesso al secondo piano³⁴ e quelle a carico di altri lavori, intestate al muratore Orazio Cecconi, al fornaciaio Bartolomeo Gattai, al falegname Ranieri Santi, allo scalpellino Giuseppe Rimediotti al Matteo

³¹ ASPI, Università, II vers., G.8, c. 89.

³² Bombicci precisava poi che “la maggiore delle (stanze) potrà servire per la cappella e altre due per le camere”. ASPI, Università, II vers., G.8, c. 89.

³³ *Ibidem.*

³⁴ Una nota di pagamento “per diverse giornate consumate [...] nel fare metà della scala nuova e riguardare i muri della medesima” è contenuta in ASPI, Fondo Università di Pisa, I versamento, n. 904, Copia dei mandati entrata e uscita del Collegio Imperiale di Sapienza (1779-1783). Cfr anche l’allegato XXX

cartoni per opere di gesso, al Giuseppe Ferri per gli stucchi, al pittore Francesco Attanasio e ad altri artefici³⁵ - documentate nei manoscritti d'archivio nel 1782 - testimoniano l'attuazione dell'intervento in virtù del ricavato della eredità di Vittorio De Rossi.

La destinazione funzionale di questi nuovi vani ricavati nel corpo sopraelevato fu in breve tempo cambiata, visto che la sede del Collegio della Sapienza fu soppressa a partire dal secondo decennio dell'Ottocento. Con l'assegnazione del primo piano alla biblioteca e alla cancelleria (1819), le stanze del secondo piano furono destinate all'abitazione del custode, come confermano anche i rilievi novecenteschi.

La cappella costruita al secondo piano nel 1782 e impreziosita dall'affresco *Madonna con Bambino* di Giovan Battista Tempesti, fu demolita già dopo quattro decenni, nel 1824. “[...] una pittura a fresco del Sig. Giovanni Tempesti fatta eseguire dal Sig Cesare Malanima, professore di lingue Orientali, e Rettore del Collegio, nell'Altare della nuova Cappella fabbricata in occasione del nuovo accrescimento fatto nel 1782 a spese del collegio Vittoriano. Questo doveva erigersi in luogo separato per testamento di Vittorio de Rossi di Civita Ducale, ma poiché l'eredità non fu per tale effetto sufficiente, il G.D. di Toscana ordinò, che detto Collegio Vittoriano a questo della Sapienza si riunisse” - ricorda in proposito Da Morrone³⁶. Nella fase dello smantellamento della cappella l'affresco era stato lasciato nella parete verso via Curtatone e Montanara. Durante i lavori di ristrutturazione del Novecento, dovendosi demolire tale parete ma volendo comunque conservare l'affresco, quest'ultimo venne staccato per essere conservato altrove, ma mentre veniva calato giù, le corde cedettero e l'affresco andò in minutissimi frantumi; oggi dell'opera del Tempesti non rimane che una vecchia fotografia³⁷.

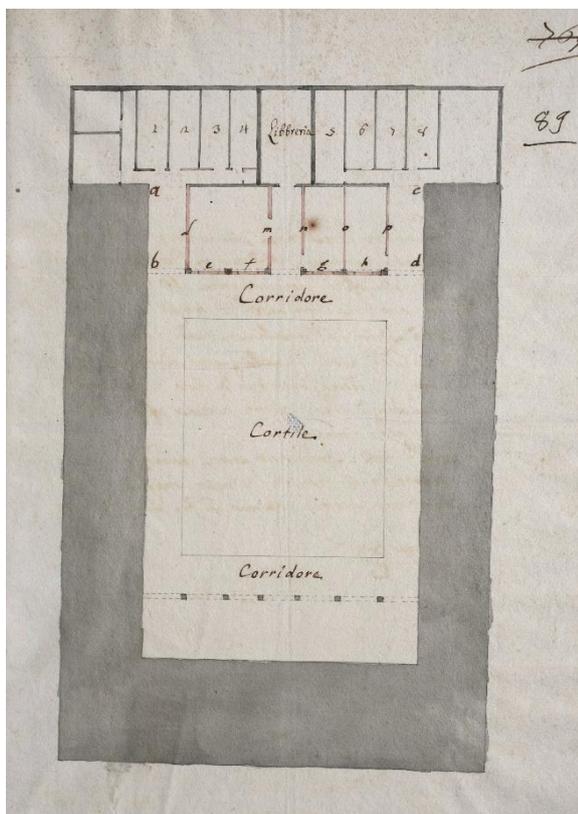


Figura 3.28: Progetto per le nuove camere e la cappella della Sapienza, Francesco Bombicci, ASPi, Università, II vers., G.8, c. 89.



Figura 3.29: G.B Tempesti, *Madonna con Bambino*, 1782 circa. (da Lombardo, 1943).

³⁵ ASPi, Università, II vers., G.8, cc. 189-213, cc. 218-232. Vari pagamenti effettuati dall'Università a legnaioli, muratori, manovali, magnani, stuccatori, pittori e doratori “ a conto di lavori fatti e da fare alla nuova fabbrica fatta nel collegio della Sapienza” sono presenti in ASPi, Università di Pisa, II vers, Sez F.X, vol 3.

³⁶ A. Da Morrone, *Pisa illustrata nelle arti del disegno*, Pisa 1793, vol. III..

³⁷ C. Lombardo, 1943 , p. 21 nota 4.

3.4.3. Dissesti e interventi di risanamento nel 1782

Avvalendosi dal 1775 del contributo professionale degli ingegneri Giovanni Andreini (dal 1780) e Giovanni Caluri (dal 1785), e dal 1785 anche di Giovanni Caluri, il provveditore Fabbroni promosse gli interventi mirati a risanare le strutture dal punto di vista igienico ed estetico, ma soprattutto finalizzate a prevenire danni, o disastri, causati da problemi statici.

Il più significativo e il più urgente intervento riguardava la volta del loggiato grande orientale, situato a piano terra della Sapienza dalla parte di Via San Frediano, dove si è verificata una rilevante lesione. L'ingegnere Francesco Bombicci, che effettuò il sopralluogo, scrive in proposito: *“ho osservato che nella vertice della med.ma vi è un considerevole screpolo andante per tutta la lunghezza che resta tra le diciture dei filari delle colonne che racchiudono dall'alari due lati il cortile, che detta volta è dall'elisse, e che ha pochissimo sesto, ed in conseguenza verso il suddetto vertice pochissima curvatura. La scollegazione che produce detto screpolo e la poca resistenza che oltre alla coesione della calcina, di cui non è da farsi gran conto, oppongono i fianchi della volta al calo dell'altra parte di mezzogiorno dell'istessa, la quale è di un notevole peso stante la sua ampiezza, rendono molto facile la rovina di questa volta, particolarmente se sopravvenisse qualche piccola scossa di terremoto.”* Bombicci individuò la causa della crepa nel cedimento dei quattro pilastri. A gennaio del 1782 redasse il progetto di rinforzo, proponendo *“di fabbricare 8 pilastrini, di cui 4 appoggiati ai vecchi pilastri ed altri 4 al muro opposto, e di girare sopra di essi 4 archi a guisa di ghiere, i quali serviranno come di tanti fortissimi puntelli alla volta.(pilastrini di 1 braccio di faccia e di ½ braccio d'oggetto, ben collegati col vecchio muro e con vecchi pilastri, con un buon fondamento largo almeno di 1 braccio e ½ per un verso e 1 braccio per l'altro, profondo fino alle riseghe sufficienti posarvi detti pilastri). In tutto: 8 pilastri, 4 archi; fondamento, 48 pali da piantarsi nei fondamenti; rimurare la porta della prima scuola a destra dell'ingresso a motivo che vi cade un pilastro; risarcire ammattonato attorno ai pilastri.”*. L'intervento fu eseguito secondo le proposte formulate dall'ingegnere. Le significative lesioni, che secondo i periti minacciavano il crollo, si verificarono anche nella volta all'ingresso sud del palazzo³⁸.

3.4.4. Altri lavori

Tra gli altri lavori documentati dai documenti d'archivio, si segnalano i restauri dell'aula magna (1780)³⁹, della stanza del rettore⁴⁰ e delle camere degli studenti (1781) e la lastricatura del cortile, reimpiegando il lastrico vecchio (1794)⁴¹.

Di particolare interesse risulta l'erezione nel 1785 della torretta per l'orologio della Sapienza sul lato ovest del cortile. La vicenda dell'orologio e della campana dello Studio appare piuttosto articolata. Da un documento del 1543 si evince, infatti, che l'orologio, realizzato su modello di quello della Fortezza da Basso⁴², e la campana si trovavano sulla torre contigua alla Sapienza. Si trattava allora dell'unico orologio pubblico della città di Pisa che suonava “le ore debite al giorno e di notte”, mentre la campana comunicava l'orario dello Studio⁴³. Nel 1624, il 2 agosto, la torre fu danneggiata fortemente dal crollo di un'altra torre posta dietro. Considerato che la necessaria sistemazione non fu mai effettuata, nel 1785 la torre fu demolita. L'orologio pubblico fu collocato sulla ristrutturata torre del Palazzo Pretorio, mentre la campana nuova “per suonare le ore dello studio” fu sistemata nella torre posta nella piazza di Santa Margherita, detta poi del Campano⁴⁴. Con molta probabilità proprio in questa occasione l'Università provvide ad avere un orologio a proprio uso, collocandolo nella torretta sul lato ovest del cortile della Sapienza.

³⁸ La lesione venne prontamente “restaurata” dal maestro Orazio Cecconi (ASPi, Università C.I.4, c.22).

³⁹ Cfr. Regesto, n.29.

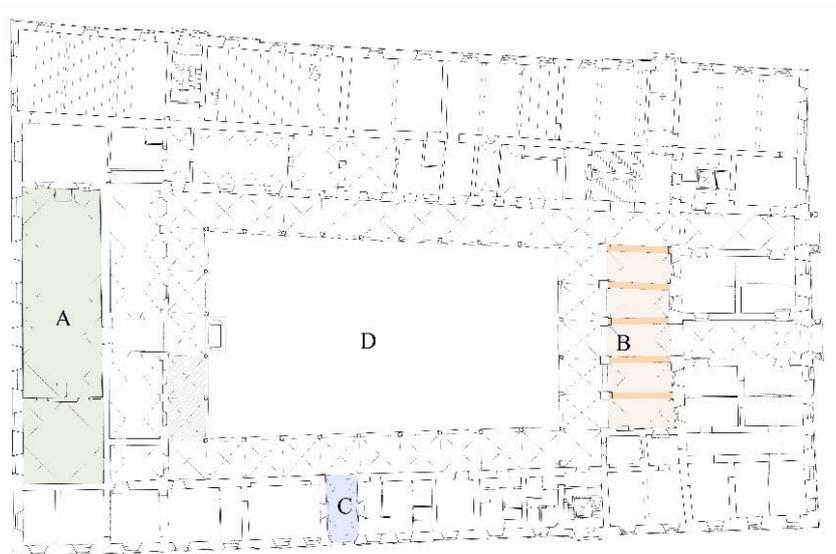
⁴⁰ Cfr. Regesto, n. 31 e 32.

⁴¹ ASPi, G.11, cc. 634-635 e c. 646. Oltre alla superficie interna del cortile, sono state lastricate le zone dei tre ingressi, “quello cioè di via S. Frediano, quello che guarda l'Arno, e quello che introduce nella Scuola magna di d.tta Sapienza ».

⁴² ASF, Mediceo Principato, f. 1170, ins.6, c. 337.

⁴³ ASPi, Università II versamento, g 104, ins. 13.

⁴⁴ La campana è stata fusa da Alessandro Murena a Firenze nel 1785. Si veda in proposito ASPi, Università II versamento, g 104, ins. 13.



Legenda:

A	1780: "Restauro" della Scuola Magna
B	1782: Rafforzamento della volta del porticato est (verso Via San Frediano) con semipilastri e ghiere degli archi (evidenziati con arancione più scuro)
C	1782: Restauro della volta all'ingresso sul lato sud (presso via della Sapienza), perché minacciava crollo
D	1794: Rifacimento del lastricato del cortile

Figura 2.30: Ristrutturazioni, restauri e interventi di risanamento nel '700 a piano terra.



Legenda:

A	1781: Restauri e modifiche della zona evidenziata
B	1782: Sopraelevazione di un secondo piano
C	1782: Cappella con l'affresco di G B. Tempesti nel piano sopraelevato (demolita nel 1824)
	1782: Realizzazione della scala di accesso al secondo piano
D	1785: Realizzazione della torretta dell'orologio

Figura 2.31: Ristrutturazioni, restauri e interventi di risanamento nel '700 a primo piano.

3.5. L'Ottocento: il rilancio dello Studio pisano, il nuovo assetto e le trasformazioni architettoniche del palazzo.

Come è ben noto, l'Ottocento è segnato da un forte rilancio dell'Università pisana: le ricerche scientifiche si intensificarono avvalendosi di nuovi metodi e di nuove attrezzature, i fondi librari si arricchirono da donazioni e acquisti potenziando il prestigio dello Studio, le cattedre si accrebbero, vantandosi di una schiera di maestri valentissimi, e aumentarono il numero degli studenti che seguivano le lezioni degli illustri professori. Ricordiamo in proposito che nel 1862 lo Studio Pisano fu riconosciuto come una delle sei primarie università nazionali, assieme a quelle di Torino, Pavia, Bologna, Napoli e Palermo.

Già nei primi decenni di questo periodo, in corrispondenza con vigoroso sviluppo di studi scientifici, si verificò il problema della ristrettezza degli ambienti in cui operano i professori e di loro adeguamenti alle nuove esigenze.

Così, con la nuova organizzazione dell'Accademia si provvide ad attuare vari ampliamenti degli spazi esistenti e alla creazione dei nuovi, come quelli della Biblioteca dell'Università, della Cancelleria, del Teatro Anatomico e del laboratorio di fisica sperimentale. A partire dall'anno 1819 la Sapienza acquisì il nuovo assetto funzionale e architettonico.

3.5.1 La soppressione del Collegio medico situato nel palazzo della Sapienza e la radicale trasformazione architettonica del primo piano ad uso della cancelleria, archivio e biblioteca pubblica (1819-24, 1832).

La nuova organizzazione dell'Accademia di Pisa, sancita dal decreto del 9 novembre 1814, segnò significativamente il mutamento dell'assetto dell'edificio, in particolare del primo piano. La soppressione del Collegio medico, ubicato per tre secoli al primo piano della Sapienza, avviò lo smantellamento di storiche camere degli studenti bisognosi che studiavano a spese dell'Università tutti riuniti in un unico e prestigioso luogo. La tipologia dell'edificio che coniugava la didattica e il collegio in un'unica sede, introdotta da Lorenzo il Magnifico e confermata da Cosimo I, vide così il traguardo definitivo. Con la nuova sistemazione degli studenti in abitazioni private, prese in affitto a spese dell'Università, il piano superiore del palazzo fu adibito alla biblioteca e alle funzioni amministrative della Sapienza. La nuova destinazione d'uso comportò significativi cambiamenti strutturali, sia per ciò che riguarda l'assetto interno - perché lo schema "conventuale" con le camere binate sul verone venne cancellato a favore di grandi ambienti - sia a riguardo dell'articolazione dei prospetti - perché determinò la trasformazione dello schema a finestre abbinato del primo piano a favore di più ampie aperture poste in relazione con nuovi ambienti. Il Collegio, abbandonato per dieci anni per lasciare spazio alle truppe francesi e servire per diversi anni ad uso di caserma, fu consegnato all'Università nell'aprile del 1810 in uno stato di rovina⁴⁵. Necessitava urgentemente di una revisione dei tetti e della sostituzione di molte travi, di rinforzi statici e dell'esecuzione di nuovo intonaco al muro perimetrale del piano terreno. Nell'arco di dieci anni furono definiti vari progetti riguardanti la nuova destinazione del primo piano alla cancelleria, all'archivio e alla biblioteca.

Alla cancelleria e all'archivio della Sapienza che, non avendo una sede fissa usufruì per tre secoli dei locali affittati dall'Ordine di Santo Stefano⁴⁶ e per un breve periodo fu collocata nella casa della Specola - cosa che causò la perdita di una cospicua parte dei registri - fu destinato nel 1815 il corpo sud del vecchio Collegio di Sapienza. Il progetto di riunire in un'unica sede, articolata in sette stanze, gli ambienti per il provveditore, per il cancelliere, per l'archivio e per il personale addetto, fu promosso dal provveditore Sproni e progettato dall'architetto Florido Galli. L'intervento attuato negli anni 1819-20 richiese la demolizione di 4 pareti, costruzione di 2 nuove e della volterrana, nonché l'apertura di 8 finestre e 2 porte nuove.⁴⁷

⁴⁵ ASPi, Università, II versamento, G. 103, cc.nn.

⁴⁶ Per quasi due secoli, dagli ultimi decenni del Cinquecento fino alla metà del Settecento, la cancelleria e l'archivio usufruivano degli ambienti dell'Ordine di Santo Stefano. Solo attorno al 1710 è stata assegnata a queste funzioni "una sede fissa, e per tal fine fu prescelta una stanza del Palazzo delle Scuole [sic], dove fu parimente trasferito il già mancante e lacerato Archivio". Lo spazio non era comunque sufficiente e nel 1745 fu deciso di trasferire i registri nella casa della torre dell'osservatorio, nota come Casa della Specola, al piano terreno. Lo spostamento, per mancanza di mezzi, verrà eseguito solo nel 1760. Ad accelerare lo spostamento era stato il motuproprio del 27 maggio 1818 che aveva imposto la restituzione all'Ordine di Santo Stefano dei locali della Canonica dei Cavalieri occupati dalle filze dell'Università.

⁴⁷ ASP, Università di Pisa (secondo deposito), sezione G, 20, cc. 431r-435r. e G, 21, cc. 85r-101v.

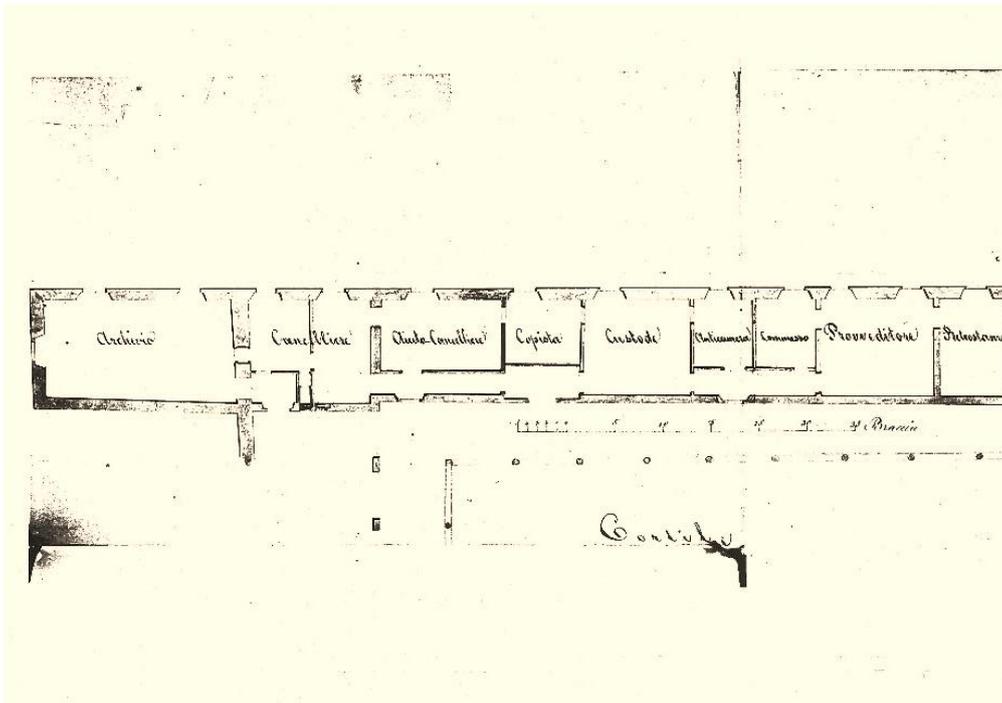


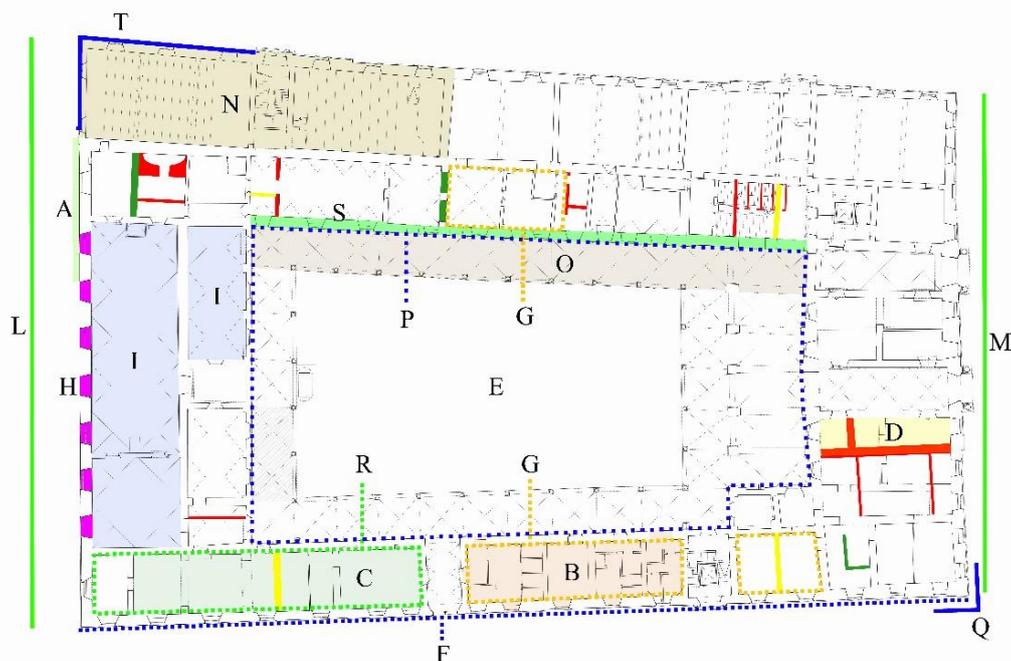
Figura 3.32: Assetto degli uffici amministrativi al primo piano della Sapienza, lato sud, progetto di F. Galli; ASPi, Università II vers., G. 62, fasc. 106, c. n.n.

3.5.2. La nuova fabbrica della Libreria (1819-24): progetti per la nuova biblioteca pubblica, testimonianze documentarie e interpretazione degli interventi realizzati.

Fin dalla riapertura della Sapienza nel 1543, la Biblioteca del Collegio, detta la Libreria, occupava il posto importante nell'impianto architettonico dell'edificio: sull'asse compositivo est-ovest dell'impianto sangallesco, al centro del lato ovest del primo piano e nel mezzo tra le camere degli studenti, con l'accesso dal secondo loggiato a pilastri. Nell'arco di due secoli sono aumentate le esigenze di incrementare il materiale librario nelle materie letterarie e scientifiche, così che nel 1734 nacque il desiderio di istituire una biblioteca centrale comprendente i fondi librari del Collegio Ferdinando, del convento di san Michele in Borgo e quello della Biblioteca Cateriniana.

Nel 1742, con la donazione del fondo librario di Giuseppe Averani, la Libreria divenne la biblioteca pubblica e, considerato la necessità di spazio ben più ampio rispetto alla medicea stanza del Collegio, essa fu insediata nella "Casa dell'Università", poi chiamata Casa della Specola, situata in via Santa Maria.

Con le donazioni dei fondi e gli acquisti successivi volti a provvedere agli aggiornamenti culturali e a potenziare il prestigio dello Studio - quali ad esempio, il dono di Luigi Maria Baffini, di Leopoldo I, di Ferdinando III, di Ippolito Montelatici, l'acquisto di preziosissima Libreria di Antonio Francesco Gori arricchita da prestigiosi libri di Giovanni Battista Doni, Filippo Buonarroti e fratelli Salvini, seguito poi dalla raccolta di Verzani - il patrimonio librario consta nel 1769 in più di 15.000 volumi. Anche ultimo trentennio del secolo fu caratterizzato dall'accrescimento dei fondi librari, qualificanti l'istituzione soprattutto come biblioteca umanistica (libreria del marchese Manfredi Malaspina e i volumi provenienti dalla biblioteca mediceo-palatina, i tomi dell'Accademia di Pietroburgo, Libri della soppressa Abbazia di Nicosia e una copiosa serie di riviste scientifiche provenienti da Parigi). Considerato il notevole incremento dei volumi, nel 1795 venne formulata dal bibliotecario Malanima la richiesta di poter disporre di locali capienti, ubicati preferibilmente nel palazzo della Sapienza, ritenendolo il luogo più idoneo e più funzionale per i docenti e per gli studenti. Alla formalizzazione di tale idea si dovette tuttavia aspettare più di ventennio e la decisione fu stata accelerata dalla necessità di smantellare la Specola, divenuta pericolante.



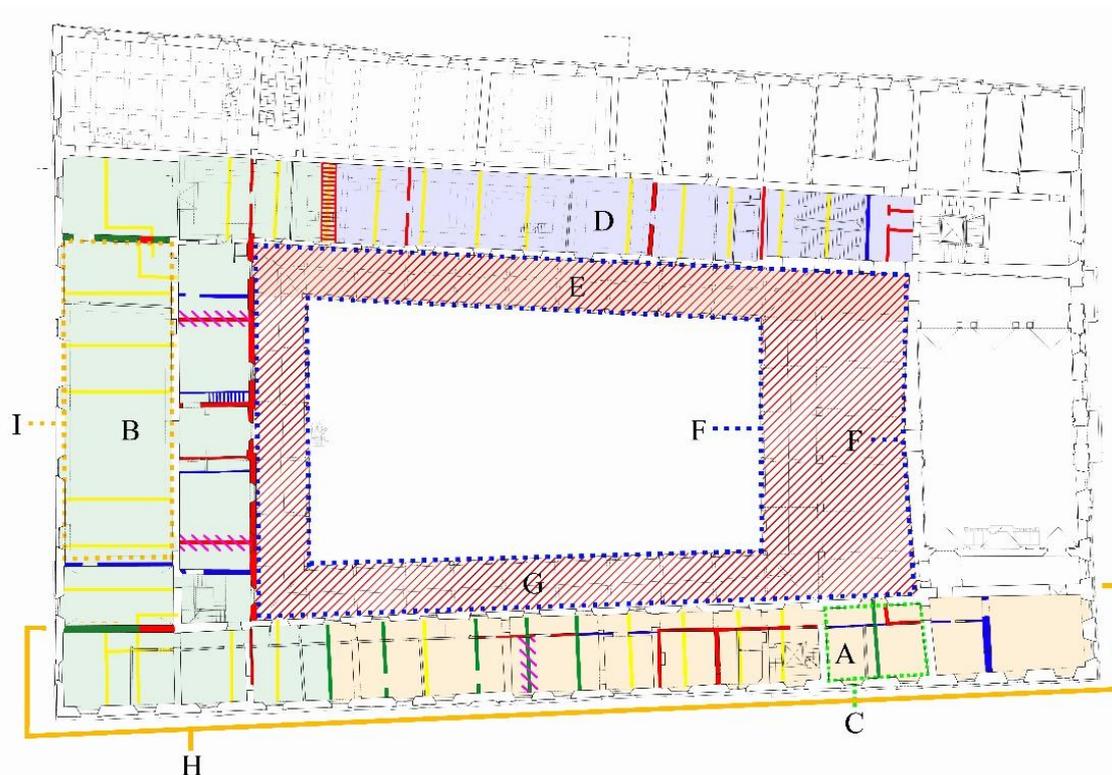
Legenda:

A	1816: Rifacimento in pietra di una parte del muro della facciata presso via dell'Ulivo
B	1816: Lavori occorrenti per la stanza della Scuola di legge (13) a destra dell'ingresso di via Sapienza (le tre finestre nuove, ampliate alla grandezza di quelle delle stanze attigue)
C	1823: Riunione di due scuole in una grande per contenere 200 studenti (a sinistra dell'ingresso principale (evidenziato in giallo il muro demolito tra le due aule))
D	1824: Progetto della nuova scala al secondo piano, lato est
E	1829: Rifacimento lastricatura del cortile
F	1836: Lavori sulla facciata meridionale per rimetterla in piombo
G	1837: Restauri
H	1839: Ingrandimento di sette finestre nella Scuola Magna
I	1839: Ristrutturazione dell'aula a destra dell'ingresso della Scuola Magna e risanamento dall'umidità
L	1839: Intonaco su via dell'Ulivo
M	1839, 1846, 1856: Intonaco su via San Frediano
N	1840: Ampliamento di due aule a nord
O	1841: Ripristino della loggia sul lato nord del cortile della Sapienza. Le dieci colonne mancanti, con i loro capitelli, vengono ricollocati nella posizione originaria
P	1843: Coloritura del cortile
Q	1846: Installazione di catene nel cantonale
R	1846: Installazione di 5 catene in ferro
S	1849: Intervento al muro nord del cortile per eliminare lo strapiombo
T	1854: Rimpello delle pareti laterali nella stanza confinante a nord con la Scuola Magna

Nelle zone NON coperte da ombreggiature, sono evidenziate in:

- Verde scuro, le pareti presenti nell'impianto rinascimentale, che permangono nell'impianto ottocentesco, e vengono poi demolite nel Novecento;
- Rosso, i muri edificati tra il Seicento e la fine dell'Ottocento, di cui non abbiamo indicazione dell'intervento
- Giallo, i muri demoliti tra il Seicento e la fine dell'Ottocento, di cui non abbiamo indicazione dell'intervento

Figura 3.33: Interventi nell'Ottocento, piano terra.



Legenda:

A	1819: realizzazione del quartiere della cancelleria e modifica degli ambienti
B	1819-1923: Costruzione della nuova biblioteca.
C	1820: Restauro stanze del custode della cancelleria a 2° piano della torretta
D	1832: Ampliamento della biblioteca
E	1841: Ripristino della loggia al primo piano di tramontana.
F	1843: Coloritura del cortile
G	1846: Rifacimento pavimento del loggiato al 1° piano
H	1849: Sostituzione dei palchi con le volterrane
I	1854: Rifacimento delle volte in sala di lettura

Nelle zone coperte da ombreggiature, sono evidenziate in:

- Verde scuro, le pareti presenti nell'impianto rinascimentale, che permangono nell'impianto ottocentesco, e vengono poi demolite nel Novecento;
- Rosso, i muri di nuova edificazione realizzati nell'ambito di quell'intervento
- Giallo, i muri demoliti nell'ambito di quell'intervento
- Evidenziati in blu, i muri realizzati successivamente all'intervento, di cui non abbiamo documentazione, e con tratteggio a 45° viola, i muri demoliti successivamente all'intervento, di cui non abbiamo documentazione.

Figura 3.34: Interventi nell'Ottocento, primo piano

Riunioni tecniche e sondaggi per il carico dei solai precedettero la decisione di un radicale cambiamento della destinazione del primo piano del palazzo alla biblioteca e alla cancelleria. I progetti, redatti nel 1819, furono seguiti prontamente dai lavori, realizzati principalmente tra il 1819 e il 1822, mentre il trasferimento del patrimonio librario nei nuovi locali (che sono questi attuali) avvenne nel 1824.

Altre donazioni importanti furono quelle di Antonio Ferrucci, del giurista Francesco Carrara, di Filippo Corridi e Alessandro d'Ancona.

Nell'anno 1819 furono formulati tre progetti per la nuova biblioteca. Il primo, redatto dall'ingegnere Giovanni Andreini, era orientato verso la capienza di cento mila volumi e prevedeva il settore bibliotecario ubicato sul lato ovest del cortile. La nuova sede doveva essere articolata da una grande sala di lettura estesa su tutto il lato dell'edificio, da due "gabinetti", uno a nord e uno a sud, e da otto stanze ricavate nello spazio ottenuto chiudendo il secondo porticato. Tutti gli ambienti dovevano essere coperti da volte a botte. L'altezza

degli ambienti interessati doveva essere aumentata di braccia 6 sul lato esterno e di braccia 4 sul lato del cortile.

Riscontrato il costo troppo elevato, di Lire 31.331, e considerate le criticità rilevate, soprattutto a riguardo della troppo allungata forma della sala di lettura, Andreini redasse il secondo progetto per la capienza ridotta a 30.000 volumi e per il costo di Lire 19.834. Anche questa volta il parere di Giuseppe Piazzini e di Giuseppe Peselli non fu del tutto positivo: il costo troppo elevato, gli spazi troppo esigui e la scarsa illuminazione. L'ingegnere Peselli venne incaricato a redigere un terzo progetto, in cui la sala di lettura appare di proporzioni più felici ed è affiancata ai lati da due ampie gallerie. Ingresso e quattro stanze per i libri furono ricavati, come nel progetto di Andreini, nello spazio corrispondente al vecchio loggiato.

I lavori, avviati il 19 settembre 1819, termineranno dopo tre anni⁴⁸. La realizzazione fu seguita da Giovanni Andreini e, dopo la sua morte nel settembre del 1822, dal figlio Giuseppe e dall'ingegnere Stefano Piazzini. La nuova biblioteca idonea a ospitare gli studiosi e 30.000 volumi, costruita tenendo conto delle proposte di Giuseppe Peselli, era composta da uno "Stanzone lungo B.a 52, largo B.a 14", di "14 stanze annesse che 10 per libri e due Gabinetti per i SS.ri Bibliotecario e Professori dell'Università".

Come era già previsto nel progetto di Andreini, gli ambienti furono coperti da volte a botte e l'altezza del corpo ovest è stata aumentata di braccia 6 sul lato esterno e di braccia 4 sul lato del cortile. All'ingegnere Piazzini si devono alcune modifiche delle finestre, l'innalzamento dei parapetti sul cortile e il cambiamento della disposizione di alcune porte sul lato nord e sud.

Negli anni 1832-33 lo spazio della biblioteca venne ulteriormente ampliato con le nuove stanze nel lato Nord che furono destinate a magazzini librari, alle opere rare, a nuove donazioni e depositi. Per ciò che riguarda il portale, esso fu realizzato sul disegno eseguito da Giuseppe Andreini nel 1820.

Il completamento del nuovo assetto della Sapienza fu realizzato pochi anni dopo, nel 1824, con la sostituzione della medicea scala d'accesso al piano superiore (da via San Frediano, oggi via Curtatone e Montanara) - a una rampa unica, scomoda e "deforme", composta di quaranta alti scalini in laterizio, diversi l'uno dall'altro - con la scala nuova a due rampe tramezzate da pianerottolo, "tutta in pietra di Golfolina"⁴⁹, progettata e realizzata dall'architetto Gaetano Pasquini.

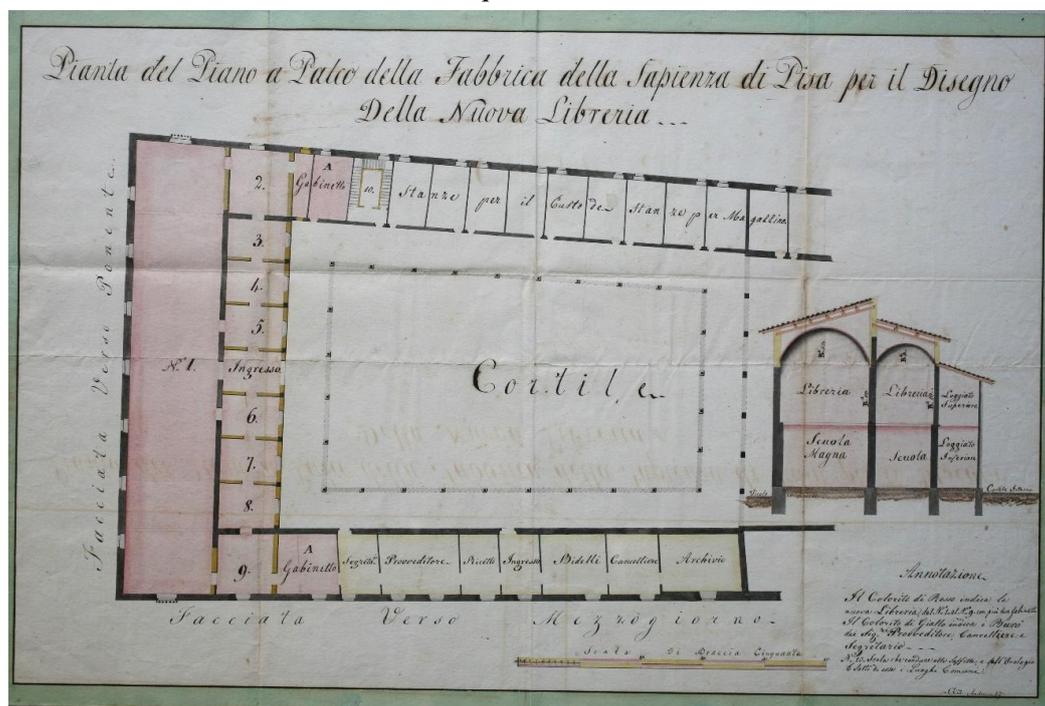


Figura 3.35: Pianta del Piano a Palco della Fabbrica della Sapienza di Pisa per il Disegno della Nuova Libreria, Giovanni Andreini; ASPi, Università II versamento, G n. 22, c. 18.

⁴⁸ ASPi, Università, II versamento, G. 22, cc.3-79.

⁴⁹ Dalla relazione redatta dall'ingegnere Stefano Piazzini risulta che la larghezza della vecchia rampa variava da B.a 3 e 173 in basso a B.a 4 e 1/4 in alto; la rampa era coperta con volta "andante" ed era composta da scalini di diverse altezze. Si veda anche Perizia dell'ing. Pampaloni alla variazione proposta alla scala per accedere alla Cancelleria e Biblioteca di questa Università, 18 agosto 1824(ASP, Università di Pisa, secondo deposito, sezione G, 25, cc. 1025r-1031r.; disegno della scala a c. 1031).

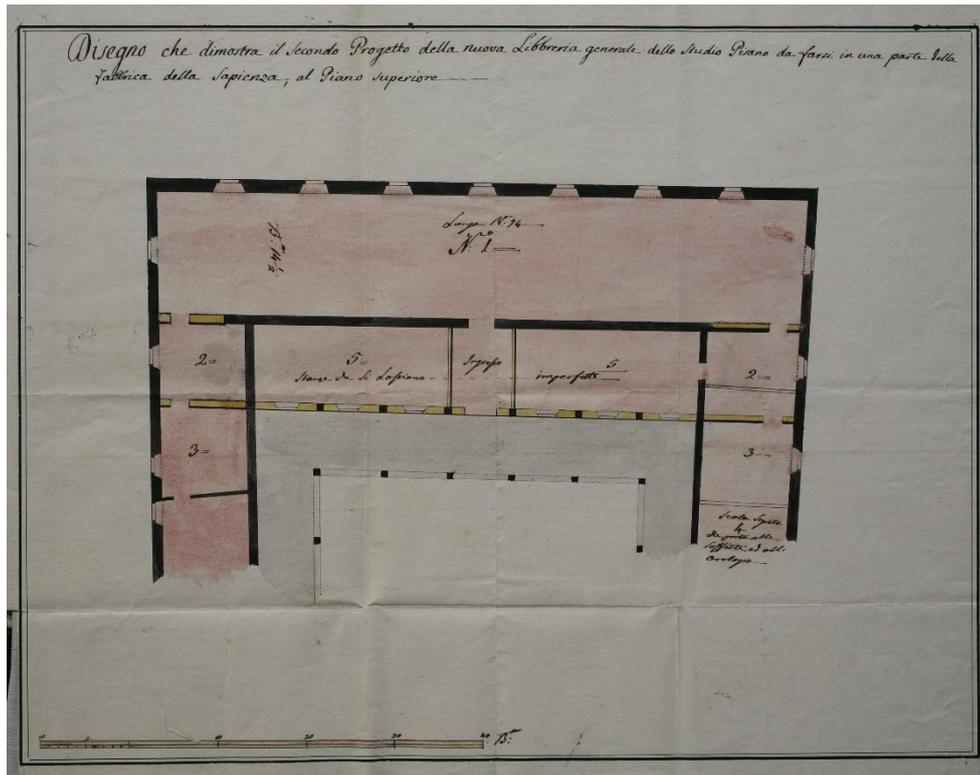


Figura 3.36: Disegno che dimostra il secondo progetto della nuova libreria generale dello Studio Pisano da farsi in una parte della fabbrica della Sapienza, al piano superiore, ASPi, Università II versamento, G. 22, c. 29.

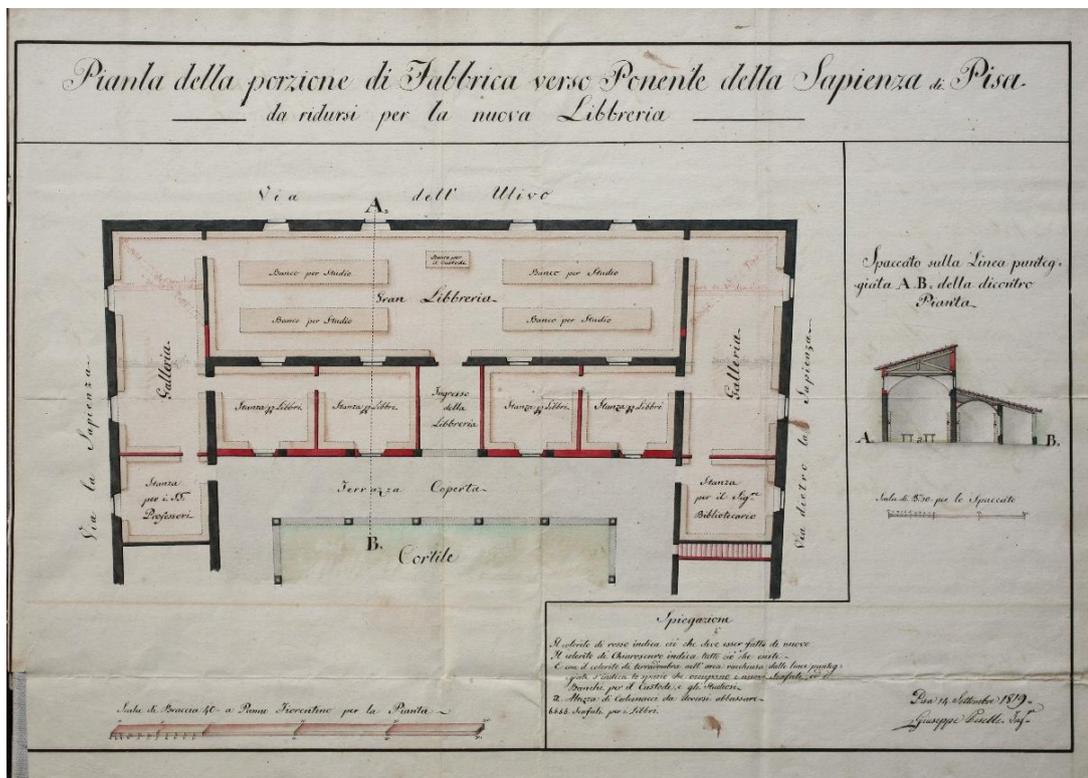


Figura 3.37: Pianta della porzione di Fabbrica verso Ponente della Sapienza di Pisa, da ridursi per la nuova Libreria [...]. Pisa 14 settembre 1819, Giuseppe Peselli, ingegnere; ASPi, Università, II versamento, G. 22, c. 46.

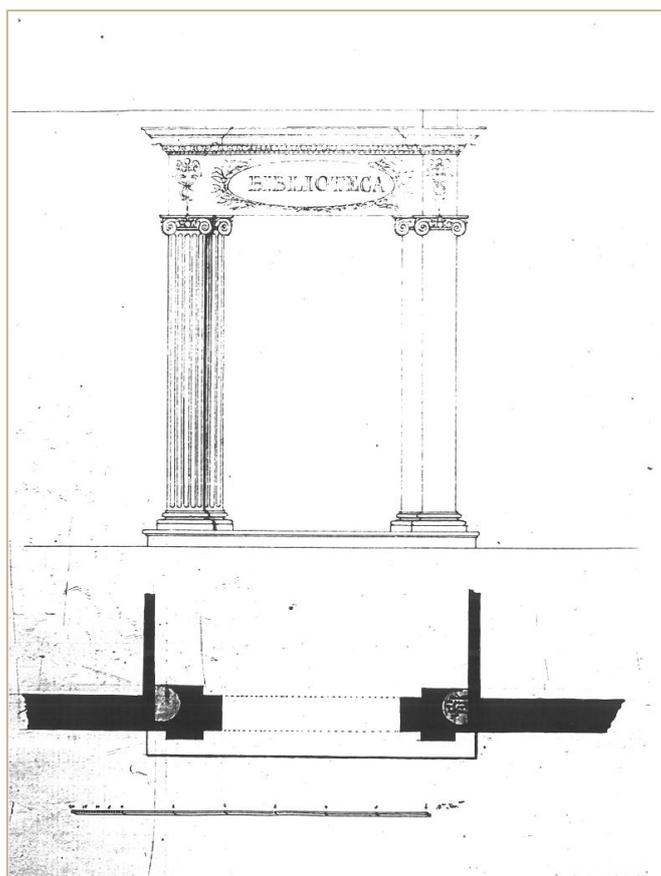


Figura 3.38: Disegno per il portale d'ingresso alla Biblioteca, l'ingegnere Giovanni Andreini, 27 ottobre 1820, ASPi, Università, II vers. G.22.

3.5.3. Interventi tesi a soddisfare le cresciute esigenze didattiche

Al forte rilancio dello Studio pisano - segnato dall'intensificarsi delle ricerche scientifiche, dall'accrescimento delle cattedre e dall'aumento degli studenti che seguivano le lezioni dei famosi professori - corrispose l'esigenza di aumentare la capienza degli spazi didattici e di ricerca. Per questo motivo le due aule piccole, situate a sinistra dell'ingresso principale, furono unite in una più grande⁵⁰, la stanza della Scuola a destra dello stesso ingresso fu ristrutturata, ma soprattutto si provvide all'ampliamento dell'edificio a nord, presso la via Dietro la Sapienza. Quest'ultimo intervento fu reso indispensabile anche dall'inderogabile trasferimento del laboratorio di fisica sperimentale dalla pericolante Specola nel palazzo della Sapienza. Assecondando la proposta redatta a luglio 1840 dall'architetto Floridi Galli, pochi mesi dopo fu avviata la costruzione di due nuove aule.

3.5.4. Interventi sulle strutture dissestate

Nonostante che dalla fine del Settecento la manutenzione avesse ricorrenza annuale, nei primi decenni del secolo successivo la Sapienza verteva in uno stato deplorabile, come si evince dalle testimonianze documentarie dell'anno 1830.⁵¹ Oltre alla mancanza dei finanziamenti adeguati, il deterioramento fu causato dall'occupazione da truppe militari nel 1799 e dopo nel 1849.

Nelle perizie redatte dai tecnici si trovano le osservazioni a riguardo della degradazione operata nel tempo sui materiali e della degradazione per cause dell'umidità, ma soprattutto furono rilevate le fessurazioni manifestatesi in varie parti dell'edificio, di cui alcune gravemente compromettenti la stabilità. Già nel 1833

⁵⁰ Il 23 agosto del 1823 l'ingegner Gaetano Pasquini presenta il progetto di unire due aule a Beniamino Sproni, provveditore generale dell'Università di Pisa, per cui vedi Regesto n. 69. Per lavori nell'aula a destra dell'ingresso cfr. il regesto n.62.

⁵¹ Cfr. Regesto n. 83.

l'ingegnere Francesco Ricetti sottolineò la presenza di lesioni e aperture assai significanti nelle volterrane che coprivano le stanze del quartiere della biblioteca sul lato nord del cortile, annotò l'esistenza di alcuni screpoli nei parapetti delle finestre dalla parte del cortile e la sconnessione nelle guide degli ammattonati, segnalò la presenza di crepe su tutte le pareti verso tramontana e commentò infine che tali fenomeni denotavano un cedimento della struttura. Anche dall'esame delle due stanze al piano inferiore, che servivano una per magazzino e l'altra per i bidelli, si evinceva la presenza di molte lesioni⁵². Lo stesso anno il granduca concesse la somma di £. 1588 per i lavori necessari alla stabilità della Sapienza, in particolare per le aule di geometria e di fisica⁵³. Tre anni dopo venne approvato l'intervento alla facciata meridionale della Sapienza di "rimettere in piombo" il dissestato paramento murario⁵⁴. Nel 1838 l'ingegnere Ricetti segnalò la necessità di ristuccatura di varie lesioni nella scuola di teologia e nell'aula di teologia⁵⁵.

Negli anni successivi la situazione sembrò aggravarsi ulteriormente: pochi giorni prima del terremoto avvenuto il 14 agosto 1846, l'ingegnere segnalò la necessità di eseguire lavori per rimediare alle crepe presenti sul cantonale sud-est e sulla facciata, consigliando di applicare le catene di ferro, e mise in evidenza l'esigenza di collocare cinque catene di ferro sotto il pavimento delle stanze della biblioteca, sul lato meridionale⁵⁶.

Dalla perizia sui danni del terremoto si viene a sapere che le scosse di terremoto provocarono molte lesioni nelle pareti della cancelleria, nella biblioteca e la facciata meridionale della fabbrica. Il palazzo mostrò avere sofferto sulla cantonata a ponente, nel punto in cui nell'ultima perizia l'ingegnere aveva proposto di mettere cinque catene di ferro. Erano presenti, poi, lesioni nella sala di lettura e nei muri interni della parte nord della fabbrica. Le riparazioni proposte, oltre alle cinque catene di ferro, consistevano in una ventina di leghe di pietre da inserire in diversi muri. A causa delle scarse risorse finanziarie, fu approvato solo l'inserimento di cinque catene di ferro nella cantonata a ponente della facciata meridionale della Sapienza⁵⁷.

I dissesti della struttura continuarono a manifestarsi ancora negli anni successivi. Nel 1849 l'architetto Florido Galli segnalò l'esigenza di risarcire il muro nord del cortile, il quale per le spinte delle volte continuava a sconnettersi e strapiombare. Per rimediare il dissesto propose il ringrosso del muro di ½ B.o, e la realizzazione del fondamento profondo di B.a 3, lungo B.a 70, largo B.a 1 e ½⁵⁸.

Quattro anni dopo la stanza della cancelleria richiese il restauro delle volte lesionate in più punti, mentre la sala di lettura della biblioteca necessitò del rifacimento della volterrana. Si segnalò anche l'esigenza della scrostatura e del rimpello fino a una certa altezza dei muri laterali delle stanze dietro la Scuola Magna, ma anche la necessità della collocazione di 3 catene di ferro indispensabili per sorreggere in piombo i muri delle stanze della Biblioteca che dimostravano i segni di poca resistenza, rivelano le crepe e fenditure estese in varie direzioni e che investivano perfino le volterrane con le quali le stanze stesse sono coperte⁵⁹.

Come emerge da questo elenco, si tratta di numerosi dissesti verificatisi con una certa continuità nell'arco di vent'anni, a partire dal 1833. Se inizialmente i periti tacquero del tutto a riguardo della motivazione delle cause correlate a questi fenomeni, nel 1849 la ragione del dissesto fu assegnata alle spinte di una delle volte costruite al primo piano nel 1819. Dall'esame da noi condotto risulta molto probabile, infatti, che tali estesi dissesti erano derivati soprattutto dal flusso dei carichi eccessivi provenienti dal materiale librario depositato nelle stanze e soprattutto dalle volte costruite al posto dei palchi durante la radicale trasformazione architettonica del primo piano ad uso della *cancelleria*, *archivio* e *biblioteca pubblica*, attuata negli anni 1819-24. Infatti, nel 1840 il perito propose la demolizione delle volterrane che coprivano le sette stanze prospicienti il loggiato.⁶⁰

Una maggiore attenzione ai problemi statici fu dimostrata nel 1856, quando fu proposto il rifacimento del pavimento nel verone al primo piano, sul lato rivolto a ponente, indicando la realizzazione dei vespai in modo da alleggerire il peso sulle volte sottostanti.⁶¹

⁵² ASP, Università di Pisa (secondo deposito), sezione G, 36, cc. 189r-190v, 197r-198r. e Regesto n.89.

⁵³ Si tratta della perizia dello stesso ingegnere Ricetti approvata dal granduca il 13 settembre 1833 (ASP, Università di Pisa (secondo deposito), sezione G, 36, cc. 174rv.; e qui Regesto n. 89).

⁵⁴ ASP, Università di Pisa (secondo deposito), sezione G, 42, c. 246r. e Regesto nn. 96 e 98.

⁵⁵ ASP, Università di Pisa (secondo deposito), sezione G, 50, affare 117. Cfr. anche Regesto n.99.

⁵⁶ ASP, Università di Pisa (secondo deposito), sezione G, 59, fasc. n. n.; ma anche Regesto n.130.

⁵⁷ ASP, Università di Pisa (secondo deposito), sezione G, 59, fasc.86. Cfr. anche Regesto nn. 134, 135.

⁵⁸ ASP, Università di Pisa (secondo deposito), sezione G, 62, fasc. 82; Regesto nn.138 e 140.

⁵⁹ Cfr Regesto nn. 142, 144.

⁶⁰ ASP, Università di Pisa (secondo deposito), sezione G,49, cc. 623-629; regesto n. 111.

⁶¹ Cfr. Regesto n. 145.

3.5.5. Rifacimenti, ripristini, ristrutturazioni, integrazioni, risanamenti delle strutture danneggiate dall'umidità e vari "restauri"

Si rendono disponibili qui di seguito, le altre notizie utili per la conoscenza del manufatto, non solo per la sua evoluzione morfologica e funzionale, ma anche per l'identificazione delle concause del degrado.

Dall'esame degli interventi eseguiti nell'Ottocento emergono, infatti, anche altre alterazioni dell'originario schema strutturale, come degrado dei materiali per opera dell'umidità, nuove aperture e soppressione di alcune pareti portanti.

Nelle perizie di lavori sono attestate, ad esempio, le sostituzioni delle travi dei tetti nel 1826⁶² e nel 1835⁶³, i risanamenti delle strutture danneggiate dall'umidità nel 1832 (in particolare l'esecuzione di vespai per difendere gli ambienti dall'umidità)⁶⁴, i "restauri" delle stanze della cancelleria nel 1837⁶⁵, nonché frequenti ammattonati, arricci, intonaci nuovi e tinteggiature a olio e catrame, rimpelli dei muri impregnati di umidità.

Tra i lavori spicca il ripristino del loggiato nord al primo piano, di cui non è pur troppo documentata la data del suo tamponamento. Dalla perizia, formulata dall'architetto Florido Galli il 2 luglio 1840 e approvata il 17 luglio seguente, si viene a sapere che i muri di chiusura del verone furono eliminati e le dieci colonne mancanti, con i loro capitelli, furono ricollocati nella posizione originaria⁶⁶.

Di notevole rilievo risultano gli interventi eseguiti in vista del Congresso degli Scienziati. Nell'autunno del 1839 la Sapienza visse giorni memorabili, accogliendo i naturalisti accorsi a Pisa in occasione dello storico Primo Congresso degli Scienziati Italiani. Considerata l'importanza dell'evento "*il palazzo della Università, senza riguardo di spesa, fu per nuovi lastricati e mutamenti ridotto a maggior comodo e nettezza; i pubblici stabilimenti che ne dipendono, risarciti e forniti di abbondante suppellettile*"⁶⁷. Gli interventi erano mirati a adeguare alcune aule a sale per le riunioni scientifiche, a adattare gli ambienti per accoglienza degli scienziati e, soprattutto, a restituire al palazzo un aspetto gradevole. Nella Scuola Magna furono ingrandite le finestre, il vano fu rintonacato e tinteggiato, la volta fu dipinta a motivi di lesene e cornici. Altre stanze furono ornate da "filettature" a bozze e da zoccoli a lesene. Le facciate esterne, quella sulla via San Frediano e quella a ponente, furono intonacate.

Il Congresso degli Scienziati Italiani, oltre a rilanciare lo Studio pisano all'antico splendore, segnò di fatto la piena e consapevole riabilitazione di Galileo Galilei, assunto ad alfiere del primato dell'Italia nelle scienze naturali e come nume tutelare dell'intera manifestazione. La rinnovata attenzione nei confronti del culto di Galileo si concretizzò con una celebrazione monumentale, che la mattina del 2 ottobre del 1839 radunò nel portico della Sapienza scienziati, professori e semplici curiosi, per assistere alla solenne inaugurazione del monumento galileiano. La statua dello scienziato - seduto con ieratica compostezza, con la mano destra appena sollevata in aria e la sinistra sorreggente un globo, ormai 'dominato' dopo la scoperta delle leggi che lo regolano⁶⁸ - fu scolpita dallo scultore livornese Paolo Emilio Demi e acquistata dall'università nel 1839⁶⁹. Per un decennio fu proprio il monumento galileiano a caratterizzare il cortile del palazzo, calamitando l'attenzione di artisti e viaggiatori. Si Ricorda che nel 1848 la scultura fu trasferita all'interno dell'aula Magna storica per arrestare il deterioramento avvenuto in questi pochi anni.

Il cortile della Sapienza per tutto l'Ottocento continuò a svolgere il ruolo cardinale nella vita universitaria e ad apparire come l'elemento architettonico che identifica la Sapienza di Pisa. E' qui che furono poste lapidi marmoree in ricordo di uomini ed avvenimenti che in vari modi hanno contribuito alla storia di questo palazzo. Ne sono un esempio le iscrizioni per la riapertura dello studio dopo l'Unità d'Italia, quelle commemorative gli studenti caduti nelle battaglie risorgimentali (1862), quelle in onore di Giuseppe Garibaldi e Giosuè Carducci, ma anche i busti dei più insigni docenti che hanno prestato servizio presso l'ateneo pisano.

⁶² ASP, Università di Pisa (secondo deposito), sezione G, 26, cc. 825r, 827r-829v. e Regesto n. 77.

⁶³ ASP, Università di Pisa (secondo deposito), sezione G, 40, c. 451r. e Regesto n. 94.

⁶⁴ ASP, Università di Pisa (secondo deposito), sezione G, 34, cc. 75r-98r.

⁶⁵ Cfr. Regesto n. 97.

⁶⁶ Cfr. Regesto nn. 111 e 114.

⁶⁷ *Su la prima riunione dei naturalisti italiani in Pisa*, in *Atti della Prima riunione degli Scienziati italiani*, 1939, p. 414.

⁶⁸ F. Tognoni, *La sapienza ed il mito di Galileo: storia di un monumento*, in R.P. Coppini - A. Tosi (a cura di), *La Sapienza di Pisa*, Pisa 2004, pp. 161-183.

⁶⁹ ASP, Università di Pisa (secondo deposito), sezione G, 52, fasc. 12.

3.5.6. Dissesti tra il Settecento e l'Ottocento: sintesi

I dati rintracciati nei documenti d'archivio sull'evoluzione architettonica del palazzo, sulle trasformazioni funzionali (con una capillare ricostruzione delle utilizzazioni succedute nel tempo e in vari ambienti), la conoscenza degli interventi di vario genere applicati nel manufatto, hanno permesso di individuare le zone o strutture che sono state in modo particolare interessate da dissesti.

Tra le cause delle manifestazioni fessurative documentate tra il Settecento e l'Ottocento, sembra opportuno segnalare le sopraelevazioni, l'introduzione delle volte al posto delle coperture lignee, le nuove aperture, la soppressione delle varie pareti portanti, le cause naturali (terremoto), ma anche il degrado strutturale dei materiali per opera dell'umidità e, per ciò che riguarda il lato est dell'edificio, per la destinazione ai magazzini del sale attestata prima della destinazione a sede universitaria.

3.6. Dall'Unità d'Italia all'ampliamento dell'inizio del XX secolo

Dalla fine dell'Ottocento la Sapienza rimase la sede esclusiva del Rettorato, della Facoltà di giurisprudenza e della Biblioteca. Il palazzo fu considerevolmente ristrutturato e ampliato per assecondare le nuove esigenze funzionali, seguendo i progetti dell'ing. Crescentino Caselli e dell'arch. Vincenzo Pilotti⁷⁰, ma conservò quasi intatto il cortile rinascimentale.

Le lodevoli proposte del Pilotti, orientate sull'applicazione dello stile ispirato al Rinascimento, non garantirono, tuttavia, un dialogo perfetto tra il 'vecchio' e il 'nuovo'. Nel disegno della facciata, inaugurata il 29 maggio 1911, si ricorse ai riferimenti formali della maestosità romana del Palazzo della Cancelleria e nell'Aula Magna, terminata nel 1922 con il contributo di Adolfo de Carolis, si rievocava una versione lussuosa degli edifici pubblici fiorenti di fine Ottocento, offrendo le soluzioni piuttosto estranee all'austera impaginazione del nucleo quattrocentesco.



Figura 3.39: M. de La Morinière, *Cour de l'Université*, 1840 (Pisa, collezione Cassa di Risparmio di Pisa).

⁷⁰ Cfr. U. Tramonti, *Vincenzo Pilotti e il nuovo edificio de La Sapienza*, in R.P. Coppini, A.Tosi (a cura di), *La Sapienza di Pisa*, cit., pp. 131-147.

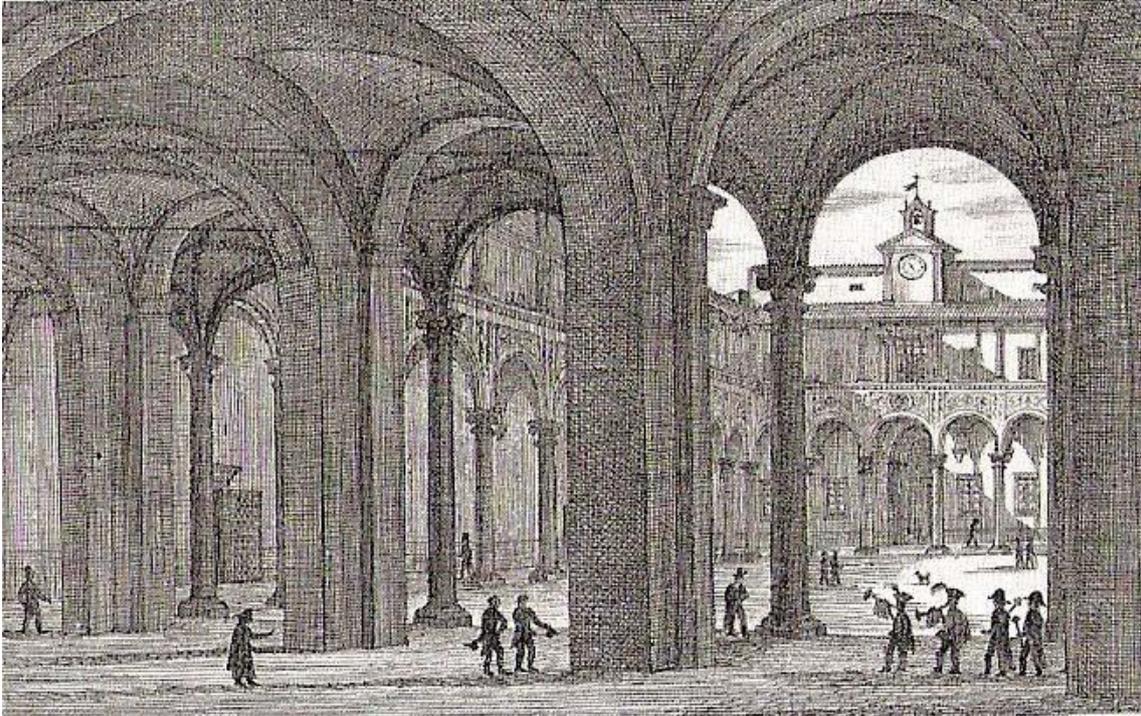


Figura 3.40: B.Polloni, Atrio dell'alto Studio Pisano, 1836 (Pisa, collezione Cassa di Risparmio di Pisa).

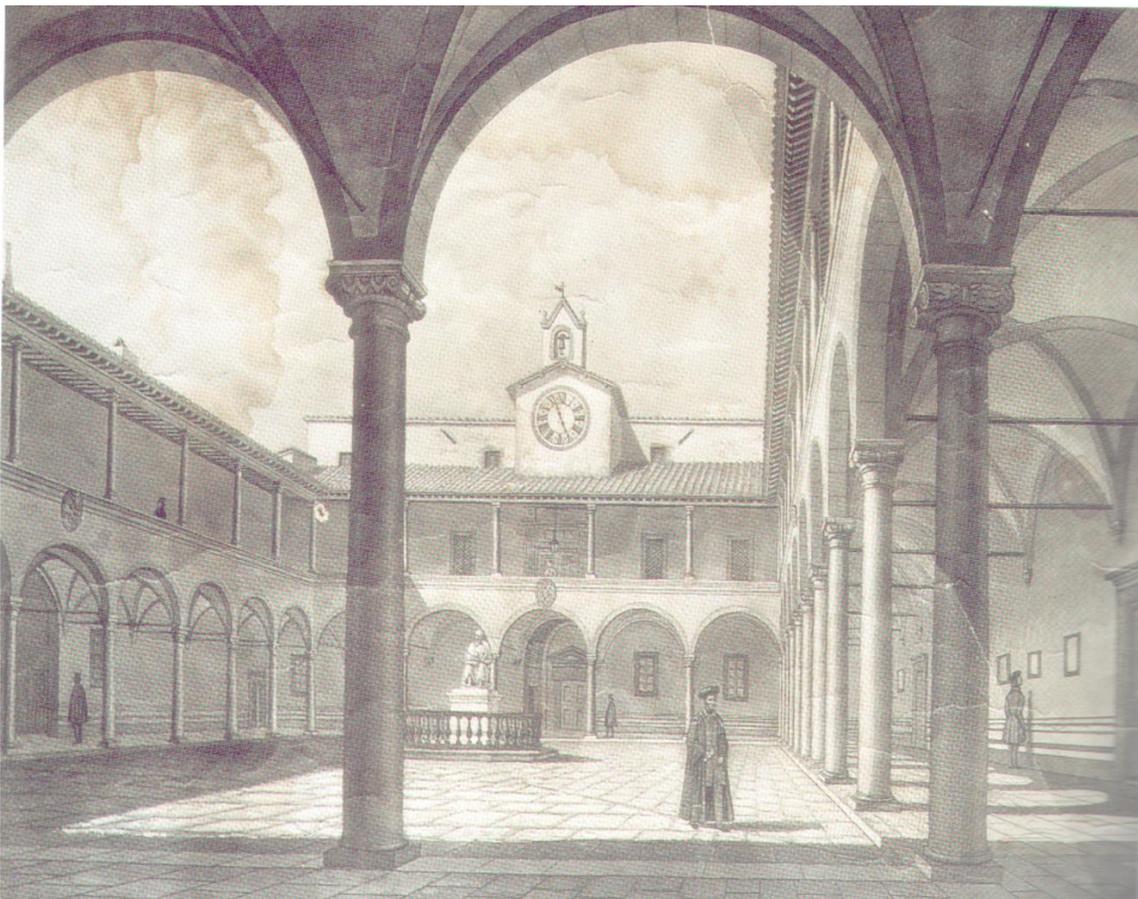


Figura 3.41: A. M. Pierro, F. Corsi, Veduta del cortile della Sapienza, 1845 (Pisa, collezione privata).



Figura 3.42: Zone particolarmente interessate da dissesti e degrado strutturale tra il '700 e l'800. Piano terra.



Figura 3.43: Zone particolarmente interessate da dissesti e degrado strutturale tra il '700 e l'800. Primo piano.

3.6.1. Configurazione del Palazzo prima degli interventi Novecenteschi

L'assetto del palazzo prima della trasformazione e l'ampliamento è ben testimoniato da un rilievo eseguito nel 1905 e dalla allegata relazione redatta dall'ingegnere A. Biglieri.

Il palazzo era composto essenzialmente da quattro corpi di fabbrica a due piani che racchiudevano un ampio cortile fiancheggiato sui quattro lati da un loggiato, pure a due piani⁷¹. Soltanto il braccio sulla via XXIX Maggio, oggi via Curtatone e Montanara, si innalzava nella zona mediana del secondo piano mentre a nord l'impianto originale fu ampliato da un corpo alto un piano unico, destinato alle aule.

A nord l'edificio confinava con le case private, appena distanziate dal palazzo per permettere illuminazione delle aule.

Dalla descrizione degli ambienti allegata alle piante storiche si evince che la distribuzione funzionale è simile a quella di mezzo secolo prima.

⁷¹ A. Biglieri, *Relazione di accompagnamento al progetto di sistemazione dell'edificio Centrale de la Sapienza*, 20 Giugno 1905, ASPi, Fondo Genio Civile, classe XXVII, f. 49, fascicolo 287 A.

3.6.2 Progetti e realizzazione dell'ampliamento del palazzo della Sapienza: 1902- 1922

Alla fine del XIX secolo, il palazzo della Sapienza si presentava notevolmente degradato, come si evince dalla relazione dell'ingegnere Crescentino Caselli del 15 Aprile 1902: "L'Università di Pisa in questi ultimi vent'anni ha provveduto nuova residenza a quasi tutti i suoi istituti scientifici. Gli istituti di Chimica, di Fisica e di Storia Naturale, di Botanica hanno trovato nuova sede in vecchi edifici sistemati e ingranditi, gli istituti di Scuola Medica si sono insediati in un grandioso palazzo fabbricato nuovo di pianta; le scuole di Disegno e di Geometria Descrittiva, occupano presentemente i locali demaniali di Piazza San Nicola. Da ultimo si è iniziata la costruzione di una nuova residenza per le cliniche. Si è fatto tutto ciò, ma per l'antico edificio centrale della Sapienza si è ancora fatto nulla. Le lezioni orali di Matematica, di Giurisprudenza e di Archeologia, si tengono in aule a terreno quasi tutte anguste e mancanti di igiene e di proprietà. Alcune aule prendono luce e aria dagli stretti cortili delle case private attigue che contendevano alla Sapienza il prospetto su Via dietro la Sapienza. Altre aule non hanno altra illuminazione e aereazione che quella indiretta che prendono dal porticato del cortile. L'Aula Magna, pur posizionata a terreno riceve scarsissima luce dalla strettissima Via dell'Ulivo, non ha che cinque metri di altezza ed è eccessivamente lunga e poco larga e quindi poco adatta alla natura delle riunioni a cui è destinata. I locali di Rettorato, di Segreteria, di Economato e di Archivio che sono discretamente bene istallati a primo piano sul lato verso via della Sapienza, vorrebbero in parte essere aggregati alla Biblioteca che rigurgita di libri da lungo tempo e necessità di nuovi locali. Lo scaloncino che direttamente dalla via San Frediano mette in linea retta al primo piano, intercetta le regolari comunicazioni fra i locali a terreno e quelli di primo piano, e produce non poche perdite di tempo e irregolarità nei servizi universitari. Gli ambienti al piano terra verso via San Frediano che anticamente servivano da deposito del Sale, hanno nuovi guasti e resi inservibili dal salnitro e dall'umidità, ma servono più a rovinare che a conservare i materiali medesimi"⁷².

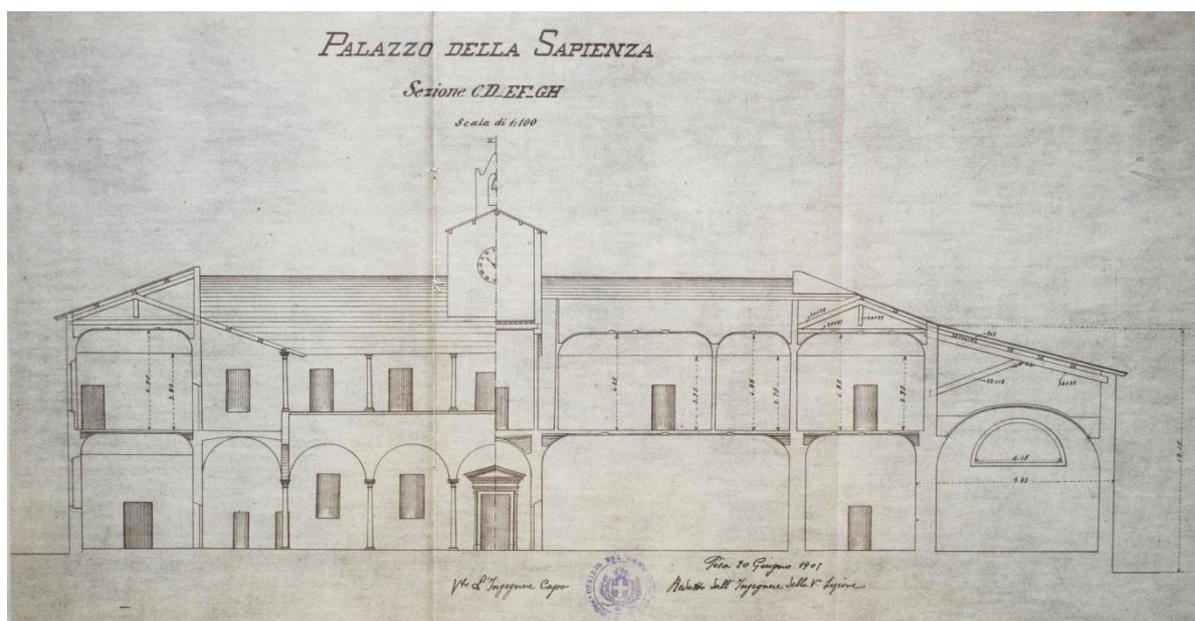


Figura 3.44: A. Biglieri, Relazione di accompagnamento al progetto di sistemazione dell'edificio Centrale della Sapienza, 20 Giugno 1905, ASPi, Fondo Genio Civile, Classe XXVII, Cartella 49, Fascicolo 287°. Palazzo della Sapienza e fabbricati attigui da espropriarsi. Sezione CD EF GH, Scala 1:200. Rilievo.

⁷² C. Caselli, Relazione di accompagnamento al Progetto di sistemazione dell' Edificio Centrale de La Sapienza. 15 Aprile 1902. ASPi, Fondo G.C., classe XXVII, Edifici Demaniali e Assetto Edilizio Ateneo Pisano, cart. 49.;

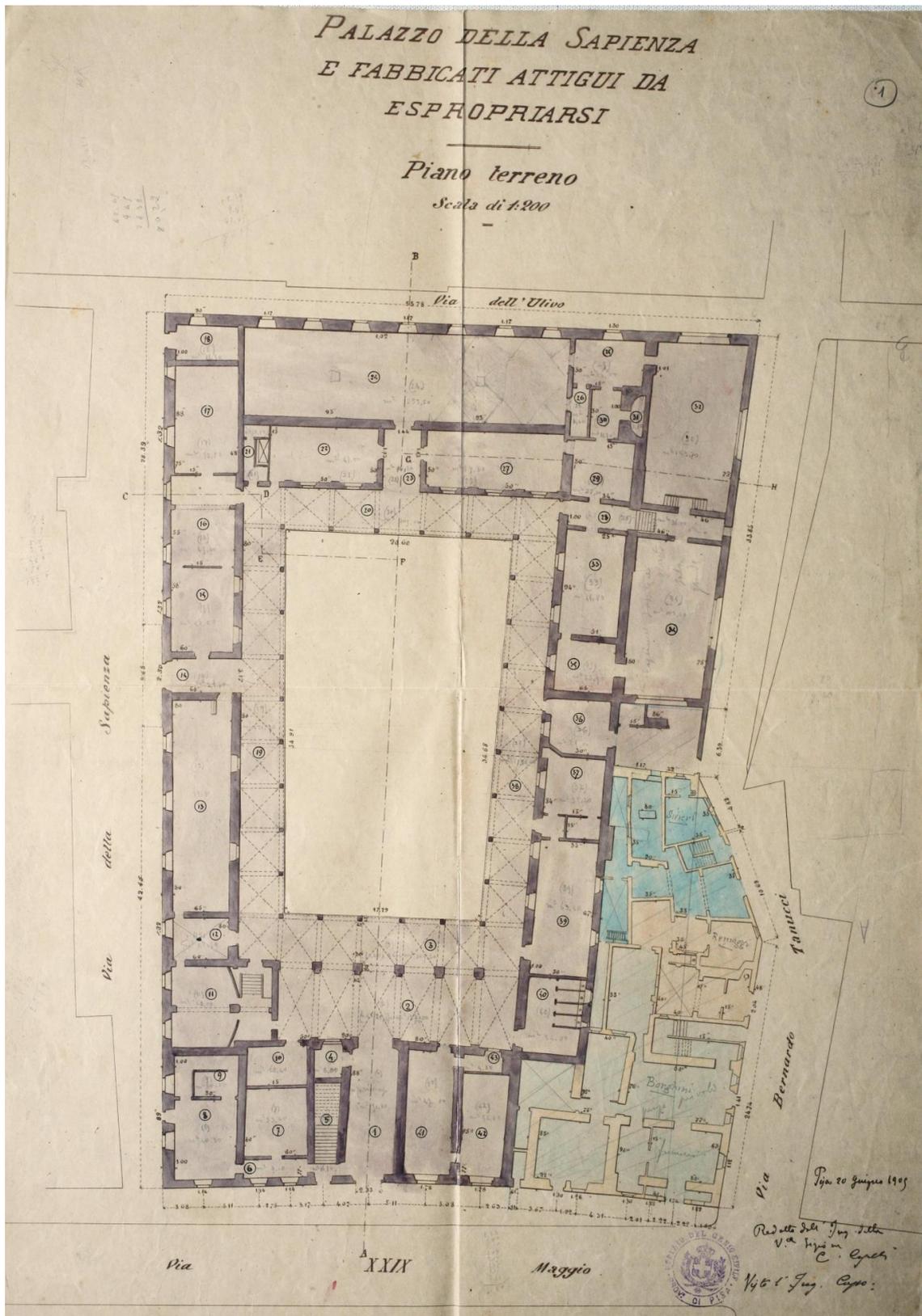


Figura 3.45: A. Biglieri, Relazione di accompagnamento al progetto di sistemazione dell'edificio Centrale della Sapienza, 20 Giugno 1905, ASPi i, Fondo Genio Civile, Classe XXVII, Cartella 49, Fascicolo 287°. Palazzo della Sapienza e fabbricati attigui da espropriarsi. Pianta Piano Terreno. Scala 1:200 (Rilievo prima degli interventi di ristrutturazione, Inizio '900).

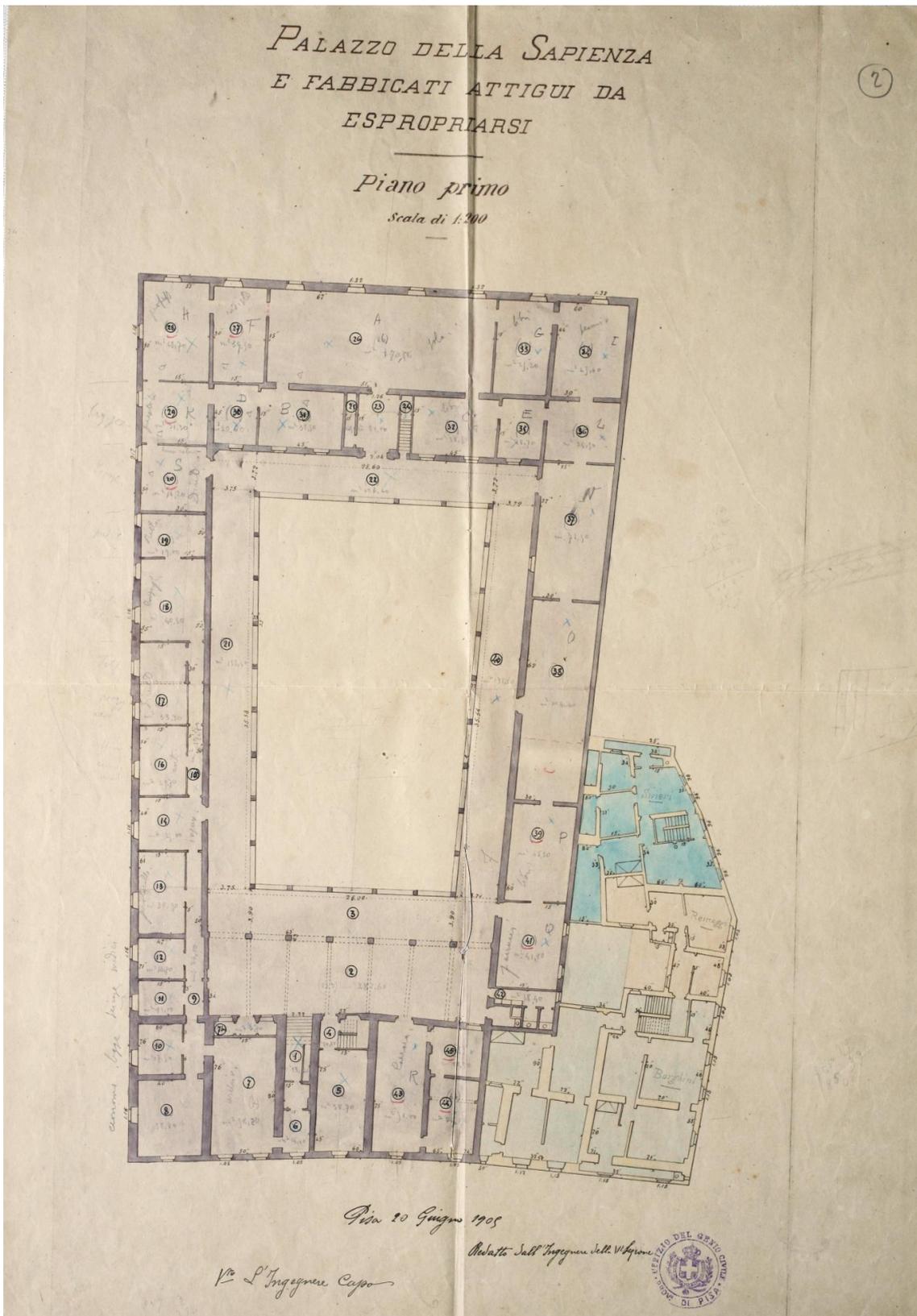


Figura 3.46: A. Biglieri, Relazione di accompagnamento al progetto di sistemazione dell'edificio Centrale della Sapienza, 20 Giugno 1905, ASPi i, Fondo Genio Civile, Classe XXVII, Cartella 49, Fascicolo 287°. Palazzo della Sapienza e fabbricati attigui da espropriarsi. Pianta Piano Primo Scala 1:200

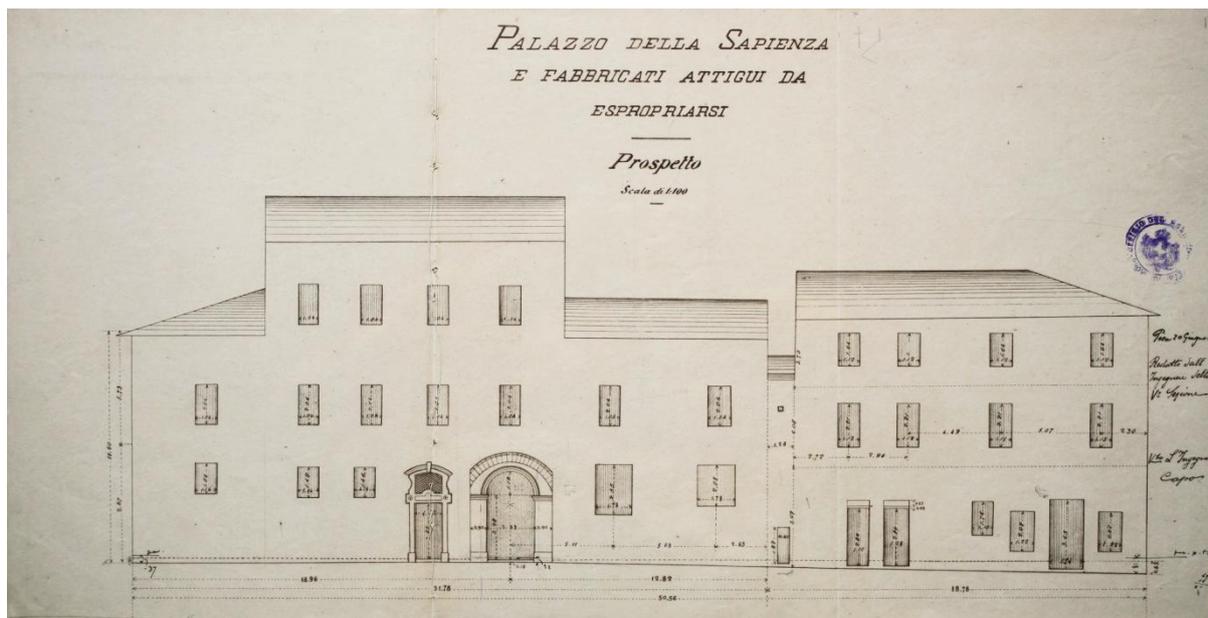


Figura 3.47: A. Biglieri, *Relazione di accompagnamento al progetto di sistemazione dell'edificio Centrale della Sapienza*, 20 Giugno 1905, ASPi i, Fondo Genio Civile, Classe XXVII, Cartella 49, Fascicolo 287°. Palazzo della Sapienza e fabbricati attigui da espropriarsi. Prospetto via XXIX Maggio, Scala 1:200.

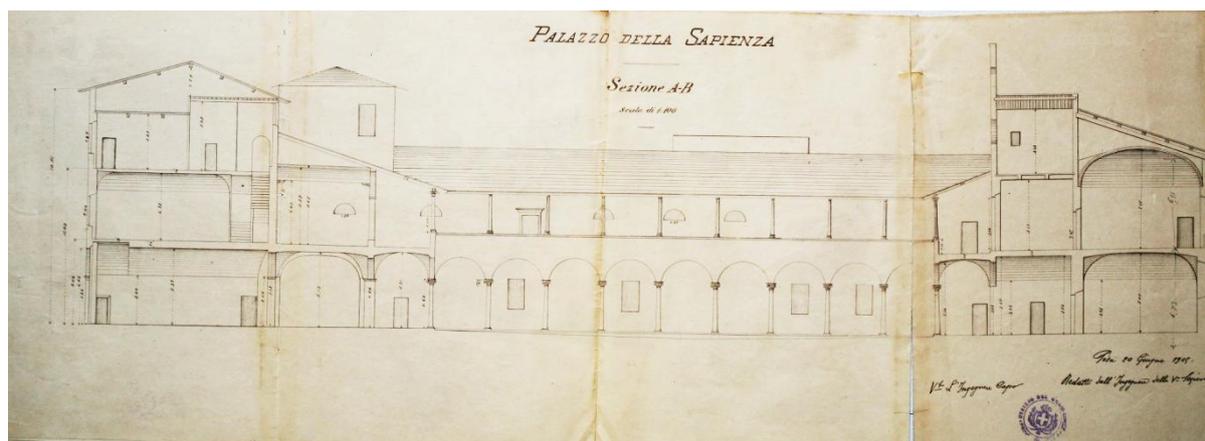


Figura 3.48: A. Biglieri, *Relazione di accompagnamento al progetto di sistemazione dell'edificio Centrale della Sapienza*, 20 Giugno 1905, ASPi i, Fondo Genio Civile, Classe XXVII, Cartella 49, Fascicolo 287°. Palazzo della Sapienza e fabbricati attigui da espropriarsi. Sezione AB, Scala 1:200.

Il degrado avanzato delle murature è testimoniato anche in una relazione del 1909, in cui il sale viene ritenuto responsabile di aver “disfatto non solo il materiale di collegamento, ma perfino i mattoni e le pietre di cui i muri stessi erano costruiti”⁷³.

L'attività didattica accusava la carenza degli spazi: “La scuola di archeologia non ha spazio per accogliere le collezioni e non può migliorare il suo insegnamento con l'aiuto delle proiezioni fotografiche. La scuola di Geodesia lamenta la mancanza di una torretta o specula di osservazioni.”⁷⁴ Il rettore indicava la necessità di risistemazione generale del palazzo, dell'ampliamento dei locali della biblioteca; dell'ampliamento del numero delle aule al piano terreno e degli uffici del rettorato, della costruzione di una nuova Aula Magna (possibilmente al primo piano); e infine della realizzazione della nuova scala e della nuova facciata dell'edificio.

⁷³ A. Biglieri, *Relazione 25 gennaio 1909*. ASPi, Fondo Genio Civile, classe XXVII, f.49, fascicolo 287 A.

⁷⁴ *Relazione di Accompagnamento al progetto di sistemazione dell'edificio Centrale de La Sapienza 1904*, ASPi, Fondo Genio Civile, classe XXVII, f. 49, fascicolo 287 A.

Palazzo della Sapienza in Roma
Indice e classificazione dei locali attuali (11 febbraio 1905)

N.°	Destinazione dei locali	Assegnazione					
		Area m ²	Aule	Uffici	Biblioteca	Vari Passaggi	
* PIANO TERRENO *							
1	Ingresso	57,80	-	-	-	57,80	
2	Portico	137,00	-	-	-	137,00	
3	Lato del portico orientale a levante	109,20	-	-	-	109,20	
4	Portina	5,00	-	-	6,00	-	
5	Scaloni	16,80	-	-	-	16,80	
6	Passaggio	9,10	-	-	-	9,10	
7	Magazzino	33,60	-	-	33,60	-	
8	"	40,30	-	-	40,30	-	
9	"	20,20	-	-	20,20	-	
10	Legnami (biblioteca)	18,40	-	-	18,40	-	
11	Aula di matematica	63,00	63,00	-	-	-	
12	Anti-aula	18,50	-	-	18,50	-	
13	Aula di legge	99,90	99,90	-	-	-	
14	Ingresso secondario	21,70	-	-	-	21,70	
15	Aula di archeologia	28,60	28,60	-	-	-	
16	Museo	45,10	45,10	-	-	-	
17	"	57,80	57,80	-	-	-	
18	Magazzino del munistero	15,50	-	-	-	15,50	
19	Portico a nord	131,90	-	-	-	131,90	
20	" a ponente	105,00	-	-	-	105,00	
21	Calcinio della biblioteca	10,80	-	-	10,80	-	
22	Aula di matematica	47,00	47,00	-	-	-	
23	Passaggio all'aula magna	16,20	-	-	-	16,20	
24	Aula magna	233,60	-	233,60	-	-	
25	Stanza adiacente all'aula magna	24,00	-	-	-	24,00	
26	Stampino	6,60	-	-	-	6,60	
A riportare		1376,60	350,40	233,60	0,00	169,90	622,70

N.°	Destinazione dei locali	Assegnazione					
		Area m ²	Aule	Uffici	Biblioteca	Vari Passaggi	
* PRIMO PIANO *							
1	Scaloni	12,20	-	-	-	12,20	
2-3	Portico a levante	281,60	-	-	-	281,60	
4	Scala per l'abitazione custode	10,80	-	-	-	10,80	
5	Sala delle adunanze	38,70	-	38,70	-	-	
6	Provista di cancelleria	14,40	-	14,40	-	-	
7	Arancio	58,20	-	58,20	-	-	
7 ^b	Stampino	6,70	-	6,70	-	-	
8	Comunali	38,80	-	38,80	-	-	
9	Passaggio	26,00	-	-	-	26,00	
10	Segreteria	17,50	-	17,50	-	-	
A riportare		508,90	0,00	174,30	0,00	400	336,60

N.°	Destinazione dei locali	Assegnazione				
		Area m ²	Aule	Uffici	Biblioteca	Vari Passaggi
* SECONDO PIANO *						
(Si divide come al primo piano)						
1	Scala per l'abitazione custode	10,80	-	-	-	10,80
5	Camera del custode	38,70	-	-	-	38,70
6	"	14,40	-	-	-	14,40
7	"	58,00	-	-	-	58,00
8	"	10,14	-	-	-	10,14
9	"	12,00	-	-	-	12,00
11	"	16,70	-	-	-	16,70
13	"	51,00	-	-	-	51,00
13	"	13,50	-	-	-	13,50
Totale		224,94	0,00	0,00	0,00	224,94

N.°	Destinazione dei locali	Assegnazione					
		Area m ²	Aule	Uffici	Biblioteca	Vari Passaggi	
* Riepilogo *							
1	Piano terreno	1376,60	1	233,60	0,00	169,90	622,70
2	Primo piano	508,90	0,00	174,30	0,00	400	336,60
3	Secondo piano	224,94	0,00	0,00	0,00	224,94	224,94
Totale generale		2110,44	1	407,90	0,00	894,64	1184,24

Figura 3.49 : A. Biglieri, Relazione di accompagnamento al progetto di sistemazione dell'edificio Centrale della Sapienza, 20 Giugno 1905, ASPi i, Fondo Genio Civile, Classe XXVII, Cartella 49, Fascicolo 287°, Indice e sistemazione dei locali attuali.



Figura 3.50: cortile della Sapienza, 1849, foto Alinari.



Figura 3.51: cortile della Sapienza, metà del secolo scorso.

Il primo progetto redatto da Crescentino Caselli nel 1902 non fu approvato dal corpo accademico e l'ingegnere ebbe l'incarico di redigere un'alternativa mirata a *“rendere più ampia, più comoda e più decorosa questa antica residenza principale dello Ateneo Pisano”*⁷⁵.

Il primo progetto esecutivo per la risistemazione e l'ampliamento del palazzo della Sapienza fu presentato al rettore dell'Università di Pisa e al Ministro della Pubblica Istruzione in data 20 giugno 1905. Redatto dallo stesso Caselli, venne sviluppato insieme con gli ingegneri della V sezione del Genio Civile, sotto la direzione dell'ingegnere capo A. Biglieri, responsabile della sezione. I punti salienti della proposta erano i seguenti: *“L'esproprio delle tre case private attigue e prospicienti la via Bernardo Tanucci; la demolizione di quelle case e la fabbricazione sopra una parte dell'area acquistata di un braccio di fabbrica nuovo di pianta; la costruzione di nuovi locali a secondo piano superiormente alla gran parte dei locali attuali al primo piano; la realizzazione di una piccola torretta attigua al padiglione dove si trova[va] l'orologio, e destinata a diventare una piccola specola ad uso dell'insegnamento di Geodesia; la formazione di una nuova Aula Magna a primo piano nel corpo prospiciente via XXIX Maggio; la costruzione di un nuovo scalone e due scale secondarie, una riservata alla Biblioteca ed una alle Segreteria”*⁷⁶. L'intero edificio doveva essere sopraelevato fino all'altezza di tre piani.

Il progetto prevedeva di portare il numero di aule da 11 a 16, di cui 5 situate al secondo piano nel nuovo braccio da realizzare dopo la demolizione delle case private. La disposizione della aule fu proposta in funzione dell'illuminazione adeguata all'attività. Il Museo di Archeologia, che allora occupava il lato sud, doveva essere ampliato.

Per la nuova Aula Magna - alta due piani - si prevedeva la collocazione nella zona centrale del braccio est, in prossimità del rettorato e uffici amministrativi posti sul lato sud. Notevole aumento dello spazio era previsto per la Biblioteca, dalle 19 alle 26 stanze per un totale di 1533,12 mq. Le sale riunioni e locali vari dal numero di 33 dovevano passare a 59.

Il quadriportico che serviva da disimpegno per le aule e per gli altri locali, sia al piano terreno sia al primo piano, doveva rimanere invariato, previo la decorazione pittorica istoriata da eseguire sulle pareti e sulle volte. Si prevedeva inoltre il riposizionamento della statua di Galileo al centro del cortile.

Il prospetto principale, quello sulla via Curtatone e Montanara, doveva acquisire il carattere monumentale, quello in via Tanucci doveva essere modificato radicalmente, quello sulla via dell'Ulivo doveva rimanere pressoché identico, mentre quello su via della Sapienza, ampliato in altezza di un piano, doveva conservare il carattere preesistente.

Al progetto esecutivo del 20 giugno 1905 seguirono alcune modifiche immediate che furono suggerite agli ingegneri del Genio Civile dal Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici in data 14 agosto 1905. Le osservazioni riguardarono soprattutto l'aspetto architettonico della Specola e della facciata est (presso la via di Curtatone e Montanara) che nella prospettata interpretazione neomedievale appariva del tutto priva del dialogo con il del cortile. Pertanto l'ulteriore proposta fu elaborata in stile neorinascimentale, ritenuto più adatto all'edificio mediceo.

Il primo impedimento si verificò subito nel 1906, quando, dopo aver effettuato i primi saggi sulle murature, venne riscontrata la presenza di due torri medioevali e di un arco in cotto. Ritenendo però che *“gli avanzi scoperti non presenta(va)no interesse storico di tale valore né [avevano] carattere artistico mentre la loro conservazione tornerebbe di grave danno alla economia ed alla architettura del costruendo edificio”*, si proponeva di abatterli, previo l'esecuzione dei loro rilievi, ad eccezione della conservazione dell'arco e di altri oggetti di valore artistico rinvenuti durante l'intervento. (figure 3.4, 3.5, 3.6 e 3.7).

Dato la necessità di rafforzare i vecchi muri intorno alla nuova Aula Magna e di regolarizzare la sua planimetria, al suo interno furono previste due tribune con due gallerie estese sui lati lunghi che secondo i progettisti le avrebbero conferito un *“notevole effetto estetico”*⁷⁷.

I lavori, iniziati il 18 giugno 1906, furono affidati mediante appalto pubblico all'impresa esecutrice Antonini Giovanni. Ufficialmente il cantiere fu riconsegnato dopo tre anni, il 19 Agosto del 1910, anche se il palazzo, ancora con l'intervento non terminato, fu inaugurato il 29 Maggio del 1911.

Durante lo svolgimento dei lavori si manifestò la necessità di intervenire a livello progettuale

⁷⁵ A. Biglieri, *Relazione di Accompagnamento al progetto di sistemazione dell'edificio Centrale de La Sapienza 20 giugno 1905*, ASPi, Fondo Genio Civile, classe XXVII, cart. 49, fascicolo 287 A.

⁷⁶ C. Caselli, *Relazione di accompagnamento al Progetto di ingrandimento del Palazzo della Sapienza. 1 Dicembre 1904*. ASPi, Fondo G.C., classe XXVII, Edifici Demaniali e Assetto Edilizio Ateneo Pisano, cart. 51.

⁷⁷ A. Biglieri, *Relazione di accompagnamento al progetto di risistemazione dell'edificio Centrale de La Sapienza. 20 Giugno 1905*. ASPi, Fondo Genio Civile, classe XXVII, f. 49, fascicolo 287A

per modificare alcune disposizioni contenute nel progetto esecutivo del 20 giugno 1905 e approvate dalla commissione giudicatrice. Tale esigenza nacque essenzialmente a causa di alcune deficienze presenti nella proposta originaria, quali la demolizione e la ricostruzione di alcuni muri che, contrariamente alle previsioni iniziali, si rivelarono fatiscenti, le variazioni per ragioni statiche e i miglioramenti richiesti dalla giunta amministrativa del consorzio universitario. Infatti vista l'instabilità del terreno su cui sorgeva il palazzo e le non molto adeguate dimensioni delle fondazioni alla nuova mole dell'edificio, si rese necessario limitare la spinta orizzontale che le volte di copertura del primo e secondo piano esercitavano sulle murature portanti. Alla costruzione di volte venne quindi preferito un solaio più moderno e non spingente, costituito da travi principali a doppio T in ferro e travi secondarie intramezzate da "mattoni tubolari detti tavelloni". Per i tetti del nuovo corpo di fabbrica sulla via Tanucci e per la copertura della nuova Aula Magna, furono proposte delle capriate in ferro di tipo Polonceau.

I miglioramenti richiesti dalla giunta amministrativa del consorzio universitario si riferivano essenzialmente ai prospetti e alla variazione dell'altezza delle aule.

Assai complicata e prolungata nel tempo apparve la questione delle articolazioni delle facciate. Dopo varie soluzioni presentate dal Caselli e le modifiche da lui apportate più volte, alla fine furono approvati i progetti in stile neorinascimentale presentati nella variante del 1907.

Particolati problemi sulle murature apparvero in occasione della realizzazione della nuova Aula Magna, in quanto, come si evince da una relazione del 25 Gennaio 1909, "[...] Per coprire l'ala est, ove dovrà essere collocata l'aula magna, di dimensioni non comuni (23.50 x 11.60) quali esigono grandi capriate di copertura (già viste con la perizia 13/08/1907) approvata ed in corso di esecuzione), si presenta la necessità di demolire e ricostruire alcuni muri, i quali dalla loro struttura apparente nella soluzione del progetto originario, furono valutati in buono stato, ed invece, privati dell'intonaco e mediante alcune brecce praticatevi mostrano all'interno la necessità di essere demoliti e rifatti perché fatiscenti e tali da non essere staticamente buoni.

Il fatto è ora perfettamente spiegabile essendosi saputo che quei locali furono per molto tempo adibiti a deposito di sale, dal quale viene intaccato e disfatto non solo il materiale di collegamento, ma proprio i mattoni e la pietra, di essere i muri stessi erano costruiti. [...]"⁷⁸.

Si rese necessario quindi demolire e ricostruire i muri degradati: quelli paralleli alla via XXIX Maggio (via Curtatone e Montanara) furono ricostruiti fino all'altezza del piano di posa delle grandi incavallature in ferro del tetto, mentre quelli perpendicolari ad asse, solo per l'altezza del piano terreno, in quanto non dovevano oltrepassare il solaio dell'Aula Magna. Le murature sono state realizzate con pareti vuote in mattoni tubolari a 2 o 3 fori, posizionati per testa o per taglio.

Nella solita relazione veniva sottolineato che "anche nelle fondazioni esistenti si sono manifestati gli effetti deleterie del sale, depositato nel piano terreno, tanto che anche di esse si ripropone la rimozione e la sostituzione totale con altre di novello materiale e uniformando la nuova fondazione a quelle già eseguite nelle altre parti dell'edificio di recente sistemato"⁷⁹.

I lavori, interrotti per la mancanza di risorse economiche nel 1911, furono ripresi due anni dopo e interessarono la costruzione di un secondo piano sul lato sud prospiciente sulla via la Sapienza e sul lato nord; la sistemazione del piano terreno e primo piano in tutto il lato sud e il completamento del secondo piano del lato ovest; il completamento e la decorazione della nuova aula magna; la decorazione dello scalone principale e di alcune sale e la realizzazione degli impianti.

Il 3 Gennaio 1911 è stato iniziato il completamento del braccio est del palazzo che, come si legge dalla relazione del 26 Gennaio 1910, consisteva nella "rinnovazione della copertura del tratto di porticato del 1° piano laterale alla nuova Aula Magna, in cui trovavansi sette volte a botte a tutto sesto poggianti sopra travi in legno, che oltre a presentare un aspetto antiestetico, sul quale si potrebbe sorvolare, è in condizioni tali di deperimento da dover ritenere pericolosa la sua conservazione. Le volte sono in più parti lesionate e tali lesioni aumenteranno ancora perché le travi sulle quali sono impostate, per verità si sono notevolmente incurvate e non presentano più le necessarie condizioni di stabilità"⁸⁰. La ristrutturazione consistette nella

⁷⁸ Relazione per il Progetto di opere urgenti per demolire e ricostruire vecchi muri riscontrati in cattivissimo stato e per collocare delle inferiate in alcune finestre del piano terra 25 Gennaio 1909. ASPi, Fondo Genio Civile, Classe XXVII, Cart. 51, fascicolo 287C

⁷⁹ Relazione per il Progetto di opere urgenti per demolire e ricostruire vecchi muri riscontrati in cattivissimo stato e per collocare delle inferiate in alcune finestre del piano terra 25 Gennaio 1909. ASPi, Fondo Genio Civile, Classe XXVII, Cart. 51, fascicolo 287C

⁸⁰ Verbale di consegna dei lavori. Lavori di completamento del braccio est della Sapienza, Sistemazione della copertura del porticato laterale della nuova Aula Magna, spostamento del serbatoio dell'acqua portabile. 03 Gennaio 1911. ASPi, Fondo Genio Civile, Sezione XXVII, Cartella 52, Fascicolo 287

sostituzione delle travi in legno e delle volte di laterizio con un soffitto in piano formato con travi maestre e travicelli in ferro e tavelloni forati.

Nel gennaio del 1908 il rettore David Supino, propenso ad accelerare i lavori e porre rimedio alle carenze dei progetti stilati dai tecnici del Genio Civile, affidò all'architetto marchigiano Vincenzo Pilotti - professore di ruolo di Ornato e Architettura Elementare alla facoltà di Scienze Matematiche presso la Sapienza - l'incarico di sviluppare i dettagli decorativi delle finestre e del cornicione del palazzo, nonché di modificare parzialmente i disegni del progetto approvato e già in fase di edificazione. La parte artistica dei lavori della Sapienza fu per Pilotti la prima grande occasione professionale, nell'ambito della quale poteva misurarsi con una ridefinizione edilizia di un punto nodale della città antica e avere la possibilità di poter prefigurare un nuovo scenario urbano.

Per quanto riguarda il suo apporto nel periodo che va dal 1908 al 1911, anno della fine della prima fase dei lavori, non è noto di preciso quale fosse stato il suo impegno effettivo; l'architetto presentò una serie di bozzetti per l'apparato decorativo dell'aula (caratterizzata in questa fase dalla presenza di una sola tribuna), predisponendo anche i materiali lapidei di pregio per la sua realizzazione (lastre di Venato Belga delimitate da fasce di Giallo di Verona per il pavimento; Verde Polcevere, Statuario e Paonazetto Rabescato per le zoccolature, pilastri e lesena; Giallo di Siena e di Verona per la tribuna e Breccia Violetta per tutte le specchiature delle pareti). Per la parte pittorica, Pilotti coinvolse Adolfo de Carolis che ideò il programma iconografico molto apprezzato dalla commissione ministeriale tecnico-artistica⁸¹. L'architetto sottolineava il suo notevole impegno prestatosi per la Sapienza con queste parole: “[...]per la facciata ho dovuto lavorare su uno schizzo che mi era stato sottoposto, e del quale ho rispettato solamente la disposizione dei buchi [porte e finestre], e per il resto ho dovuto fare ben più della parte decorativa, ma anche quella architettonica”⁸². L'Aula Magna fu inaugurata in occasione dell'apertura dell'anno accademico 1922-1923.

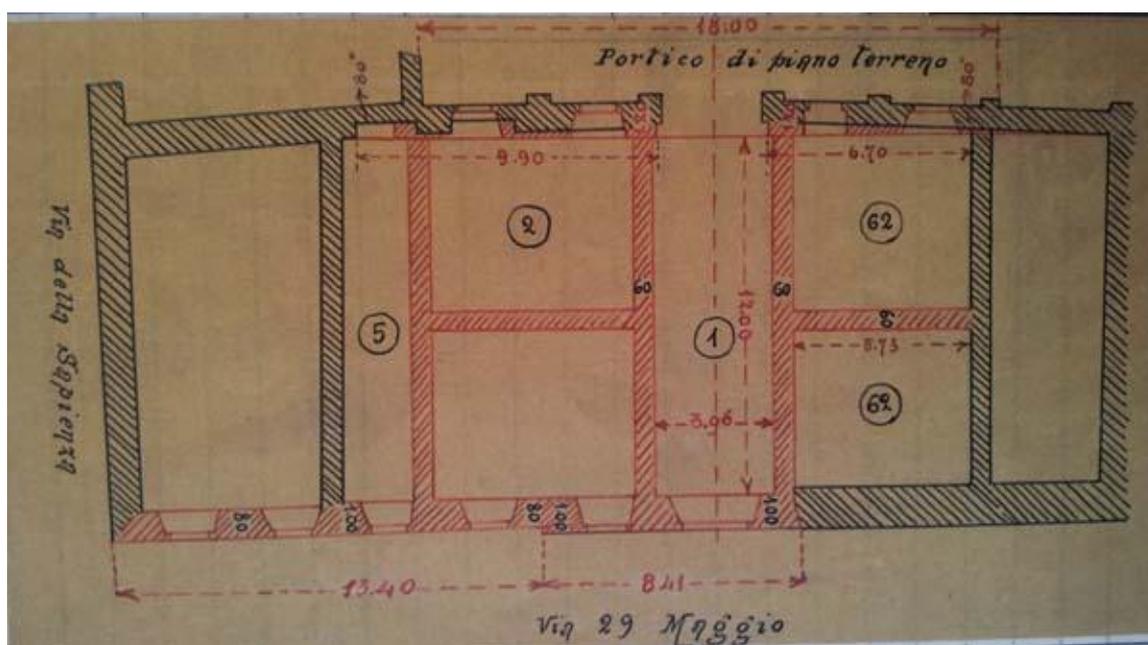


Figura 3.52: Pianta dei muri da demolire e ricostruire, Relazione per il Progetto di opere urgenti per demolire e ricostruire vecchi muri riscontrati in cattivissimo stata e per collocare delle inferiate in alcune finestre del piano terra 25 Gennaio 1909.ASPi, Fondo Genio Civile, Classe XXVII, Cart. 51, fascicolo 287C.

⁸¹ Sul programma allegorico cfr. U. Tramonti, *Vincenzo Pilotti e il nuovo edificio de La Sapienza*, in R. P. Coppini, A. Tosi, *La Sapienza di Pisa*, Pisa, Pisa University Press, 2004, pp. 140-143.

⁸² R. Simonelli, *Edifici Universitari*, "Il Ponte di Pisa", anno, XVII, n° 39, 26 Settembre 1909.

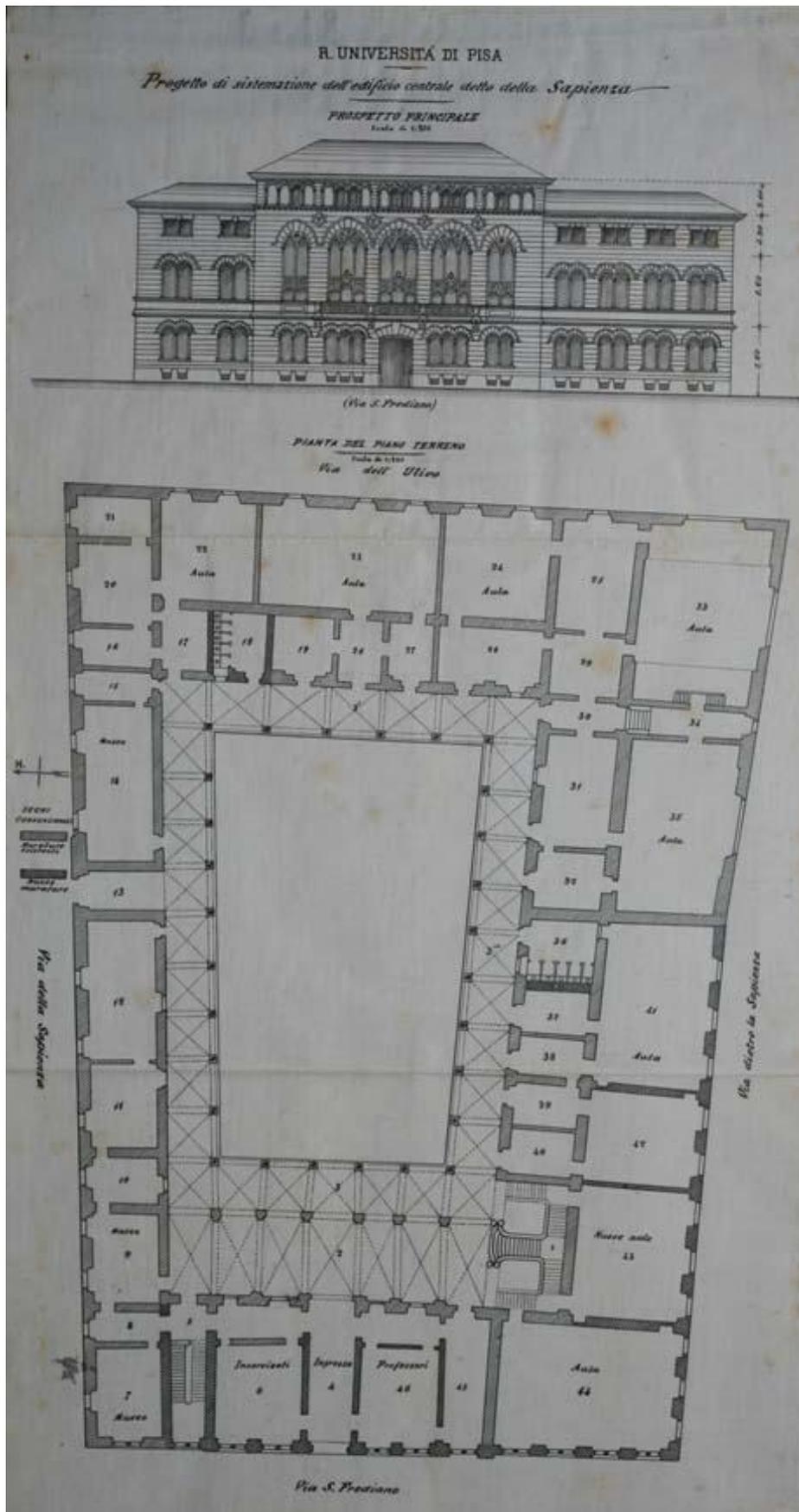


Figura 3.53: Progetto di sistemazione dell'edificio centrale della Sapienza. 1905., ASPi, Fondo Genio Civile, classe XXVII, cart. 49, fascicolo 287°. Sezione sull'asse del cortile e pianta del piano terra. Scala 1:200.

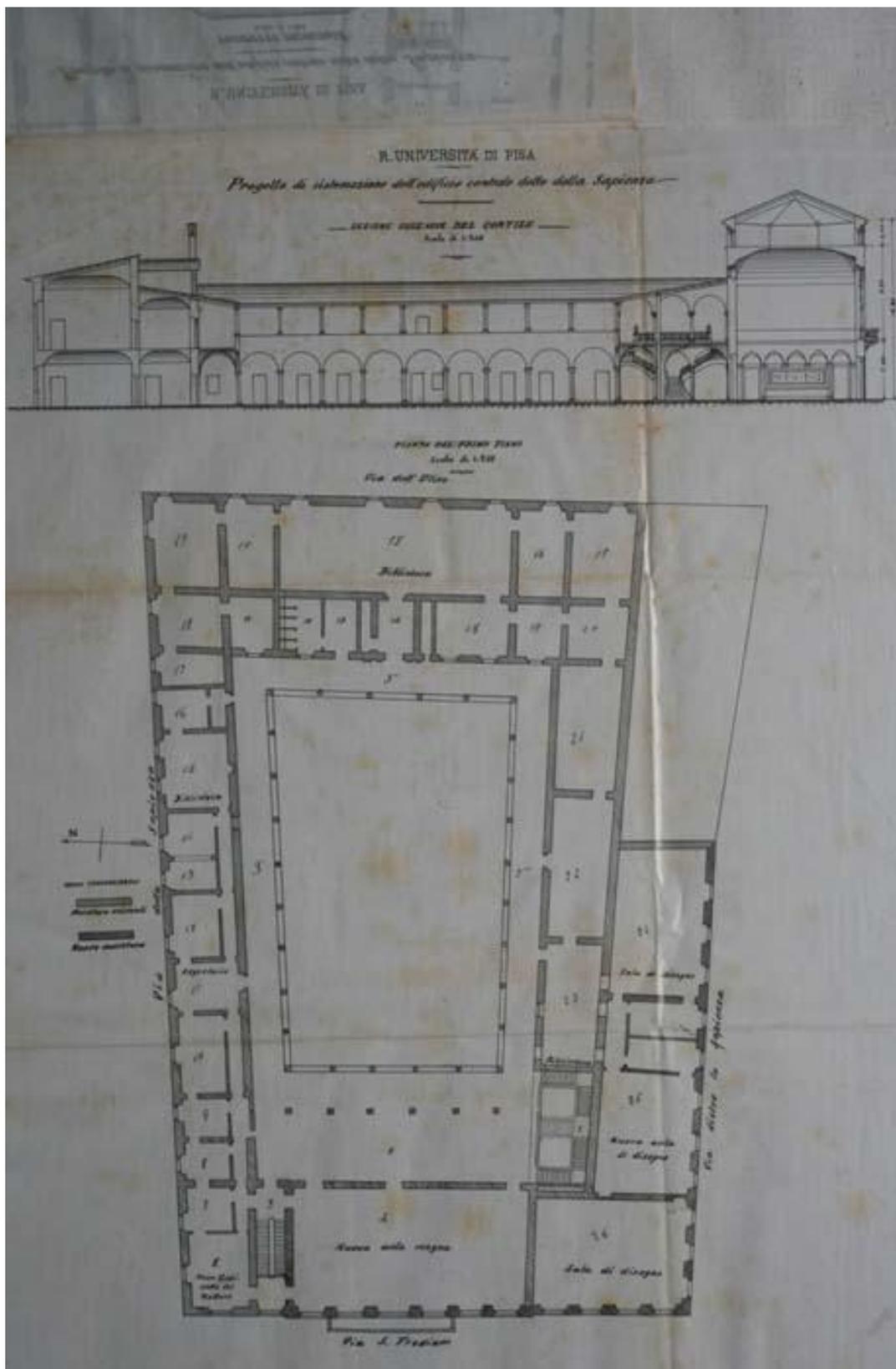


Figura 3.54: Progetto di sistemazione dell'edificio centrale della Sapienza. 1905. ASPi, Fondo Genio Civile, classe XXVII, cart. 49, fascicolo 287°. Sezione sull'asse del cortile e pianta del primo piano. Scala 1:200 TAV 6. Appendice alla Relazione sul progetto 20 Giugno 1905 d'ampliamento del palazzo universitario detto della Sapienza di Pisa. 30 Novembre 1905. ASPi Fondo Genio Civile, classe XXVII, cart. 51, fascicolo 287.

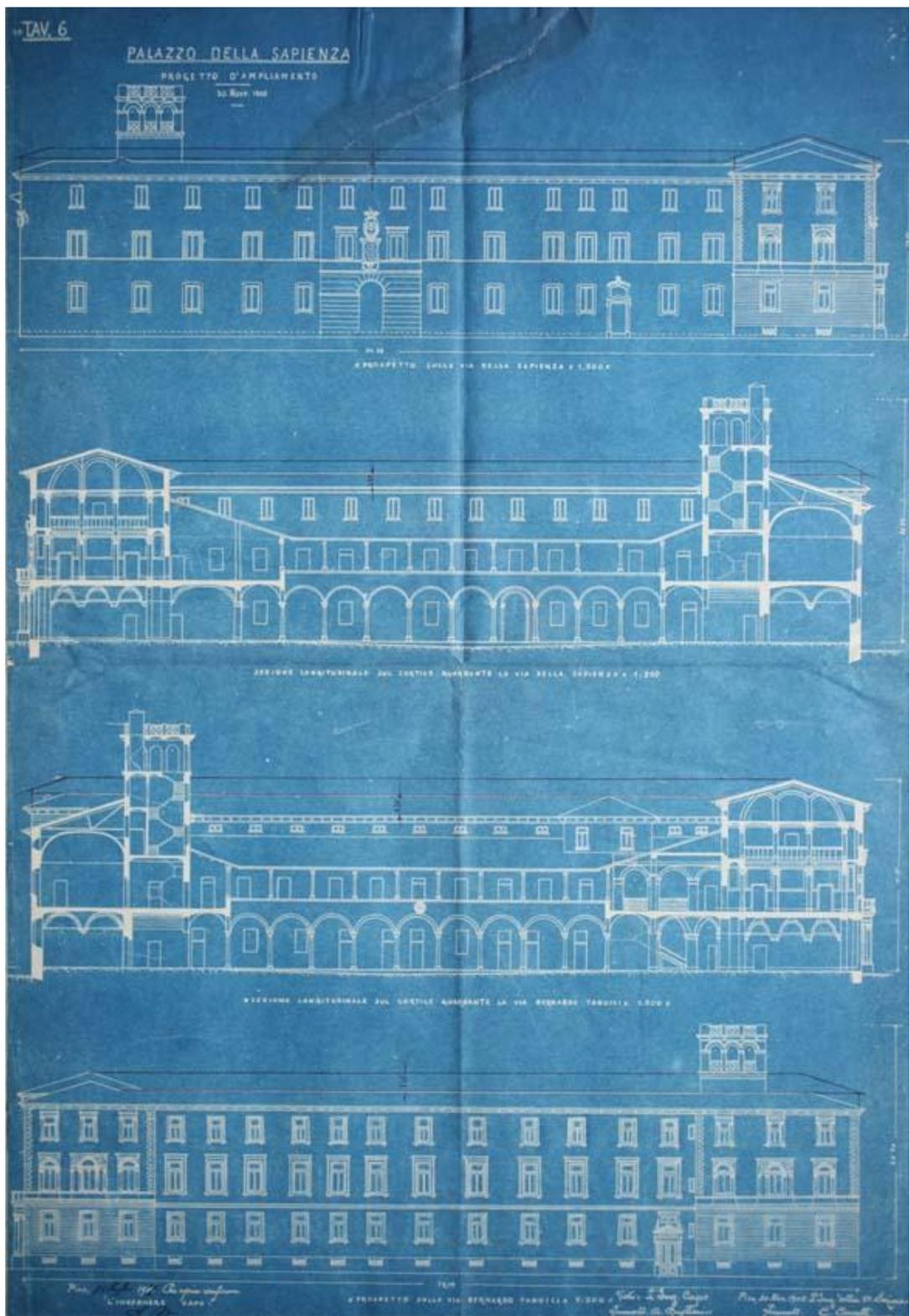


Figura 3.55: Palazzo della Sapienza. Progetto d'ampliamento, TAV 6; Appendice alla Relazione sul progetto 20 Giugno 1905 d'ampliamento del palazzo universitario detto della Sapienza di Pisa. 30 Novembre 1905. ASPi Fondo Genio Civile, classe XXVII, cart. 51, fascicolo 287A.

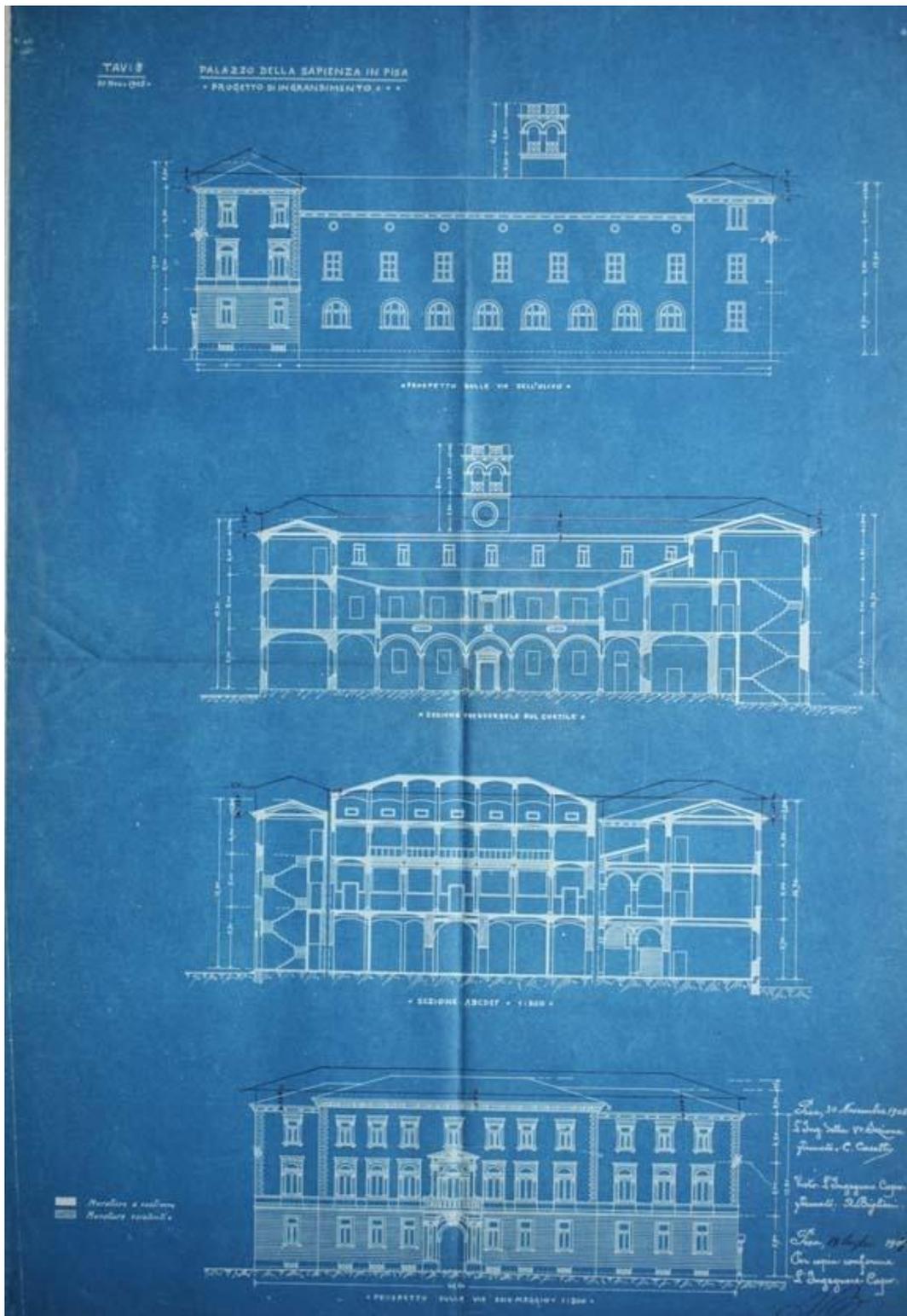


Figura 3.56: Palazzo della Sapienza. Progetto d'ampliamento Palazzo della Sapienza. Progetto d'ampliamento, TAV 5; Appendice alla Relazione sul progetto 20 Giugno 1905 d'ampliamento del palazzo universitario detto della Sapienza di Pisa. 30 Novembre 1905. ASPi, Fondo Genio Civile, classe XXVII, cart. 51, fascicolo 287A.

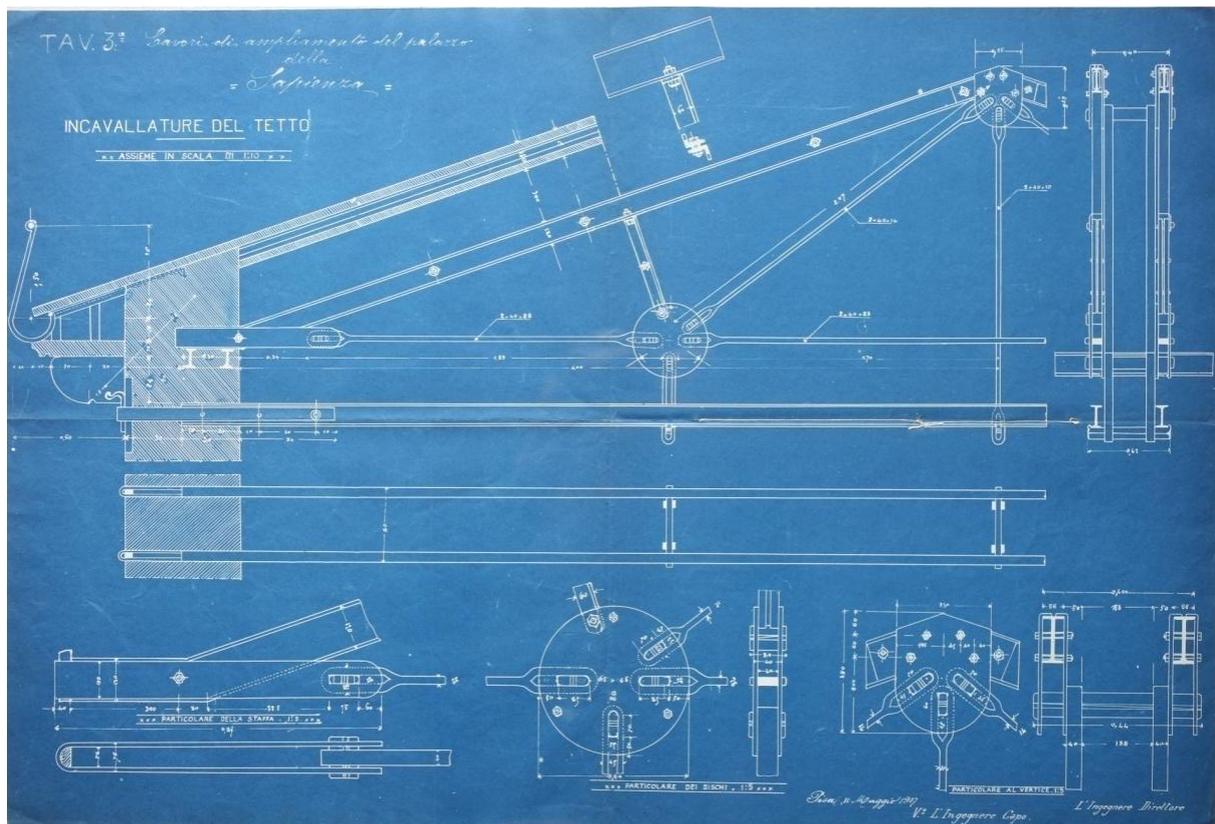


Figura 3.57: Incavallature del tetto, Progetto di opere urgenti per demolire e ricostruire vecchi muri riscontrati in cattivissima stata e per collocare delle inferiate in alcune finestre del piano terra 25 Gennaio 1909. Tav 3 ; ASPi, Fondo Genio Civile, Classe XXVII, Cart. 51, fascicolo 287C.

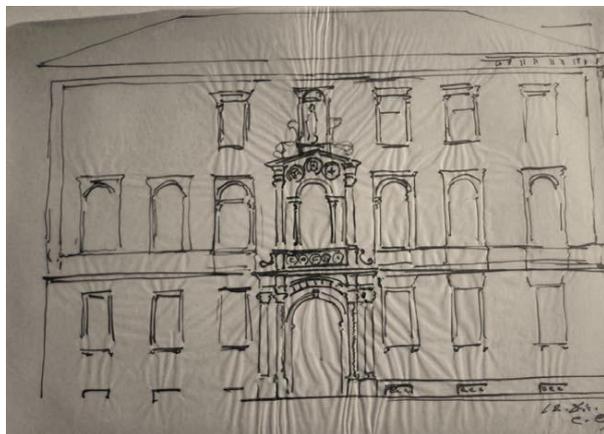


Figura 3.58: C.Caselli, Schizzi per il progetto su Via XXIX Maggio, 1906, china su carta lucida ; ASPi, Fondo Genio Civile.

3.6.3. Ristrutturazioni e ampliamento della Biblioteca negli anni venti/trenta del secolo scorso.

Il terremoto avvenuto il 7 Settembre 1920 arrecò nel palazzo i danni non indifferenti: nella volta della sala di lettura della Biblioteca si verificarono sei lesioni gravi che necessitavano un urgente intervento.⁸³

I lavori di demolizione e ricostruzione iniziarono il 1 Luglio 1922: in sostituzione della volta danneggiata, che era realizzata con mattoni in foglio e intonaco, venne eseguito un solaio con travicelli in ferro a doppio T

⁸³ Relazione dei Lavori di demolizione della volta della sala di lettura della R. Biblioteca universitaria e costruzione di un solaio in ferro e volterrane di tipo Ferrari. Aprile 1922. ASPi, Fondo Genio Civile, Classe XXVII, Cartella 40, fasc. 202

di altezza 160 mm e passo 0,85 m, con voltine tubolari tipo Ferrari, composte da tre pezzi con copri ferro, murate a gesso con e spianate con renone, e con un getto di calcestruzzo dello spessore di 4 cm sovrapposto⁸⁴. Come travi principali vennero adottati sempre profili in acciaio a doppio T dell' altezza di 450 mm, disposte ad un passo di 3.35 m. Durante l' esecuzione dei lavori , furono realizzati due tramezzi fra il nuovo solaio e la copertura, in corrispondenza delle volte adiacenti, in modo da creare un grande ambiente di sottotetto per immagazzinare i volumi fuori uso.

La necessità di ampliare e di riordinare i locali della Biblioteca della Regia. Università si fece sentire fortemente nel terzo decennio del secolo⁸⁵. Occorrevano maggiori spazi, non tanto per le esigenze della consultazione, ma per quelle della conservazione del materiale librario.



Figura 3.59: Prospetto su Via XXIX Maggio, variante del 1907 al primo progetto originario; A. Biglieri, *Relazione perizia suppletiva di tutti i lavori ad opera compiuta*. 31 luglio 1907. ASPi, Fondo Genio Civile, classe XXVII, cart 49, fascicolo 287 A.

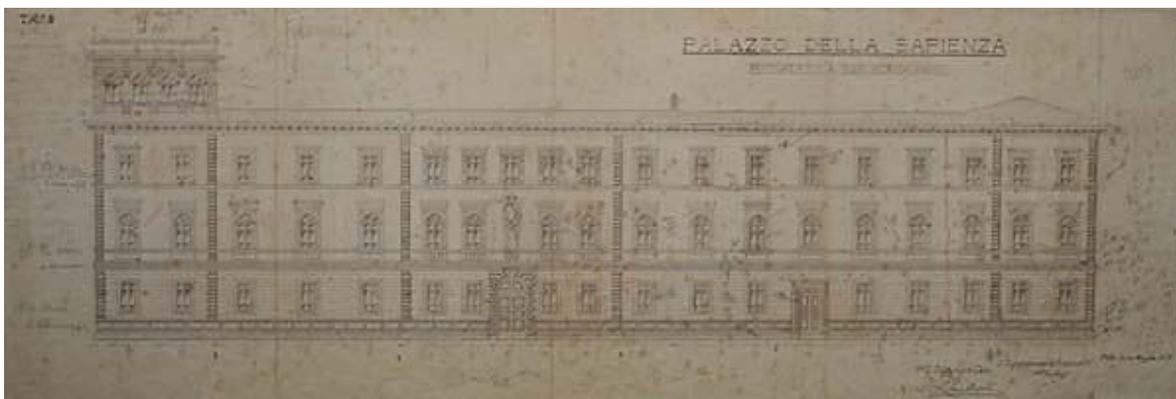


Figura 3.60: Progetto di completamento del Palazzo della Sapienza della R. Università di Pisa. 10 Ottobre 1913; *Relazione del Opere di riassetto e miglioramento delle R. Università di Pisa*, TAV 8 . ASPi, Fondo Genio Civile, Classe XXVII, cart. 49.

⁸⁴ *Verbale di consegna dei Lavori di demolizione della volta della sala di lettura della R. Biblioteca universitaria e costruzione di un solaio in ferro e volte travi di tipo Ferrari*. 01 Luglio 1922. ASPi, Fondo Genio Civile, Classe XXVII, Cartella 40, fasc. 202

⁸⁵ *Relazione al progetto dei lavori di risistemazione della R. Biblioteca Universitaria di Pisa*. Gennaio 1928. ASPi, Fondo Genio Civile, Classe XXVII, Cartella 110, Fascicolo 3

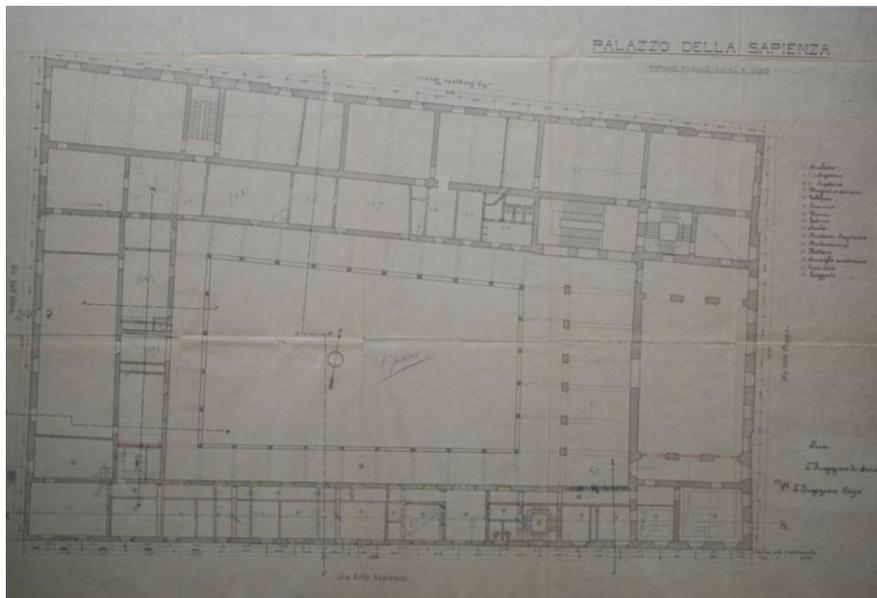


Figura 3.61: Progetto di completamento del Palazzo della Sapienza della R. Università di Pisa. 10 Ottobre 1913, Pianta piano terra e Pianta Primo Piano, Scala 1:100; Relazione del Opere di riassetto e miglioramento delle R. Università di Pisa.. ASPI, Fondo Genio Civile, Classe XXVII, f. 49 (in giallo le demolizioni e in rosso le nuove edificazioni)

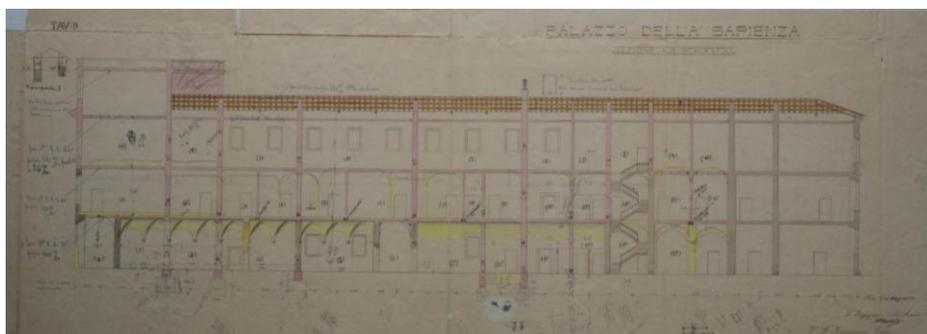


Figura 3.62: Progetto di completamento del Palazzo della Sapienza della R. Università di Pisa. 10 Ottobre 1913, Sezione longitudinale, Scala 1:100; Relazione del Opere di riassetto e miglioramento delle R. Università di Pisa.. ASPI, Fondo Genio Civile, Classe XXVII, f. 49 (in giallo le demolizioni e in rosso le nuove edificazioni).

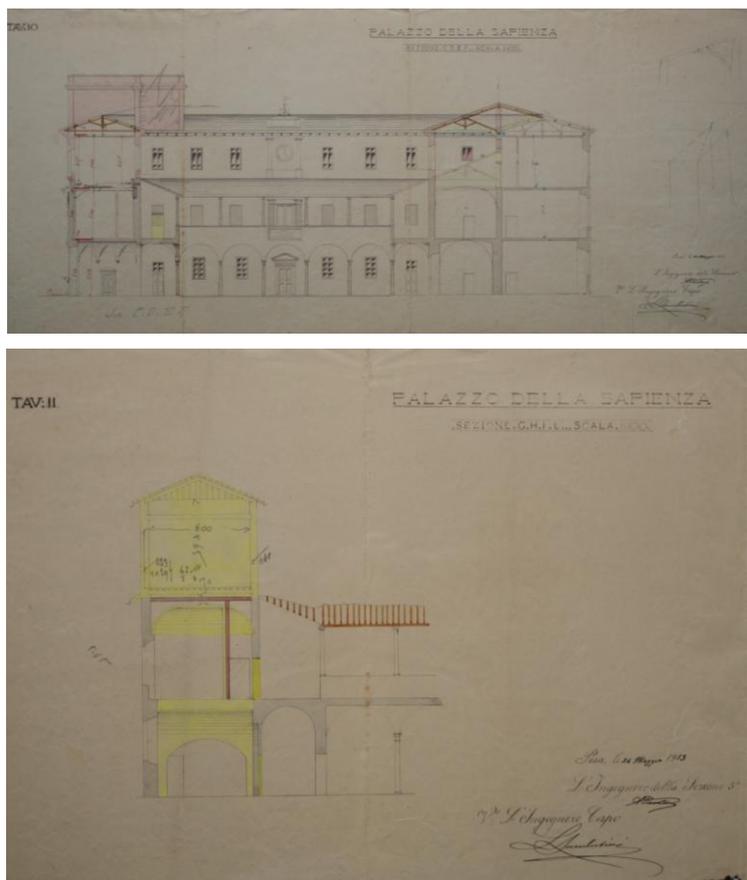


Figura 3.63: Progetto di completamento del Palazzo della Sapienza della R. Università di Pisa. 10 Ottobre 1913, sezione trasversale e sezione G H I L; Relazione del Opere di riassetto e miglioramento delle R. Università di Pisa.. ASPi, Fondo Genio Civile, Classe XXVII, f. 49 (in giallo le demolizioni e in rosso le nuove edificazioni).

Per rispondere a tale richiesta, nel 1928 venne presentato il Progetto dei lavori di risistemazione della R. Biblioteca Universitaria di Pisa, “di sopraelevare la parte dell’edificio della Sapienza dove ha sede la Biblioteca fino all’altezza degli attigui corpi laterali, ricavandovi un secondo piano con tre stanze spaziose ed un salone centrale di conveniente altezza in relazione alle esigenze dei servizi”⁸⁶, redatto dall’Ingegnerie Capo del Genio Civile. Considerato che la sopraelevazione proposta andrebbe a precludere il collegamento con la terrazza dell’osservatorio astronomico, fu proposto un nuovo accesso alla Specola. Venne progettata la sistemazione della facciata sulla Via dell’Ulivo, il cui disegno fu impostato seguendo la continuità con la parte già esistente. Per quanto riguarda i metodi costruttivi, per le strutture parietali furono impiegati il pietrame e malta con ricorsi di mattoni, oppure solo il laterizio, mentre le volte furono eseguite con armatura di longarine, utilizzando il metodo misto in laterizio e cemento armato.

3.6.4 Interventi nella seconda metà del secolo

Dagli anni trenta del secolo scorso ad oggi il palazzo della Sapienza è stato sottoposto a normali interventi di manutenzione ordinaria, fino a quando, negli anni novanta, il Provveditorato alle Opere Pubbliche per la Toscana ha commissionato e diretto, con la supervisione della Soprintendenza dei beni Architettonici di Pisa, una serie di lavori sull’edificio che hanno interessato il restauro dei prospetti, delle finestre e dei portoni di facciata e infine delle falde di copertura.

L’unico intervento importante è stato effettuato negli anni cinquanta, come si evince da un documento del 22 marzo 1957: il rifacimento della volta dell’Aula Magna nuova, che fu danneggiata da eventi bellici durante la seconda guerra mondiale. La decorazione pittorica di De Carolis (risalente al 1921) fu rovinata in modo tale da non permettere le eventuali integrazioni e per tanto la volta è stata tinteggiata di bianco.

⁸⁶ Relazione al progetto dei lavori di risistemazione della R. Biblioteca Universitaria di Pisa. Gennaio 1928. ASPi, Fondo Genio Civile, Classe XXVII, Cartella 110, Fascicolo 3

In anni recenti l'amministrazione universitaria si è fatta carico di numerosi interventi di conservazione e restauro, nell'intento di mantenere in efficienza il manufatto, migliorarne la fruibilità e il decoro: ad esempio, per consentire una piena accessibilità alla struttura, nel 2000 sono stati inseriti due ascensori nei vani liberi lasciati dalle scale secondarie sul lato nord e sud del palazzo. Più recentemente il cortile interno è stato oggetto di lavori di restauro volti ad eliminare gravi cause di degrado, come le infiltrazioni dalle coperture che avevano provocato il degrado di alcune travi. Il risanamento della copertura ha permesso di eseguire ulteriori interventi conservativi sulla struttura: attraverso il restauro degli elementi lapidei che sostengono il loggiato inferiore e superiore del cortile, sono stati scongiurati gravi e irreversibili fenomeni di degrado, quali il distacco di consistenti parti di arenaria.

Il manufatto architettonico in esame presenta oggi una stratigrafia estremamente articolata, segnata da numerosi interventi effettuati nell'arco di più di ottocento anni in connessione con usi differenti ad essa assegnati nel tempo: da quello del mercato e del deposito del sale della Dogana, alle aule didattiche e il collegio e, infine, alle funzioni didattiche, scientifiche e quelle della grande biblioteca universitaria. Il quattro - cinquecentesco palazzo della Sapienza - di modesto aspetto architettonico e di altezza limitata a soli due piani- subì, soprattutto a partire dall'inizio dell'Ottocento fino ai primi decenni del secolo scorso, una significativa trasformazione morfologica e dimensionale - divenendo una struttura alta tre piani e dotata di un impianto planimetrico accresciuto rispetto al nucleo originale- e vide una marcata monumentalizzazione che le è stata conferita con la realizzazione della imponente *facies* esterna.

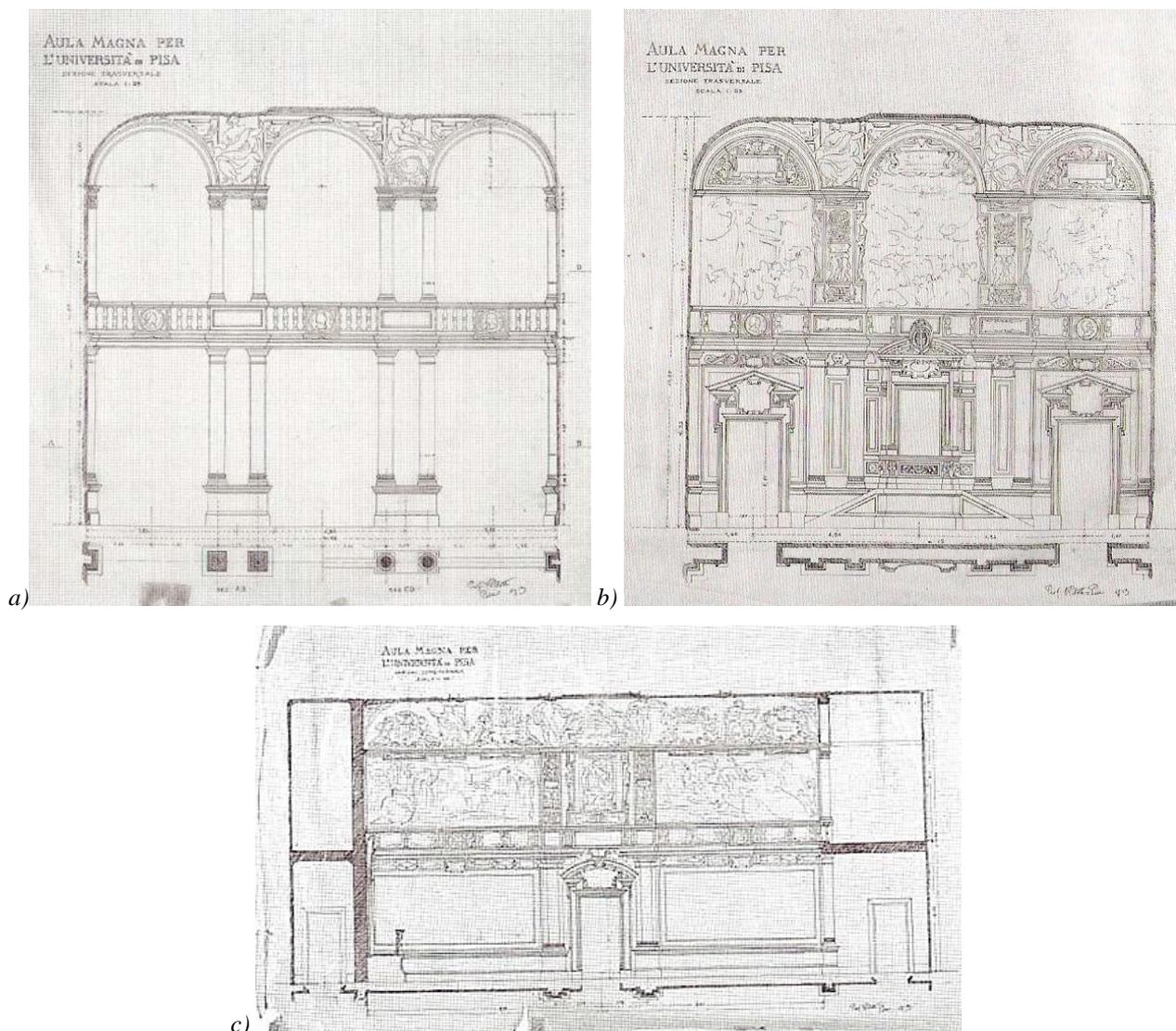


Figura 3.64: V. Pilotti, Aula Magna dell'Università di Pisa, progetto della decorazione: a) Sezione trasversale sud; b), Sezione trasversale nord; c) sezione longitudinale (da U. Tramonti, Vincenzo Pilotti e il nuovo edificio, in R.P. Coppini, A. Tosi, *La Sapienza*, Edizioni Plus, Pisa 2004, pp.137, 138, 139).



Figura 3.65:Aula magna- a) Sezione longitudinale ovest; b), Decorazione del soffitto ,1913, china su carta lucida, Archivio Privato (da R. P.Coppini. A. Tosi, *La Sapienza*, Edizioni Plus, Pisa 2004) .

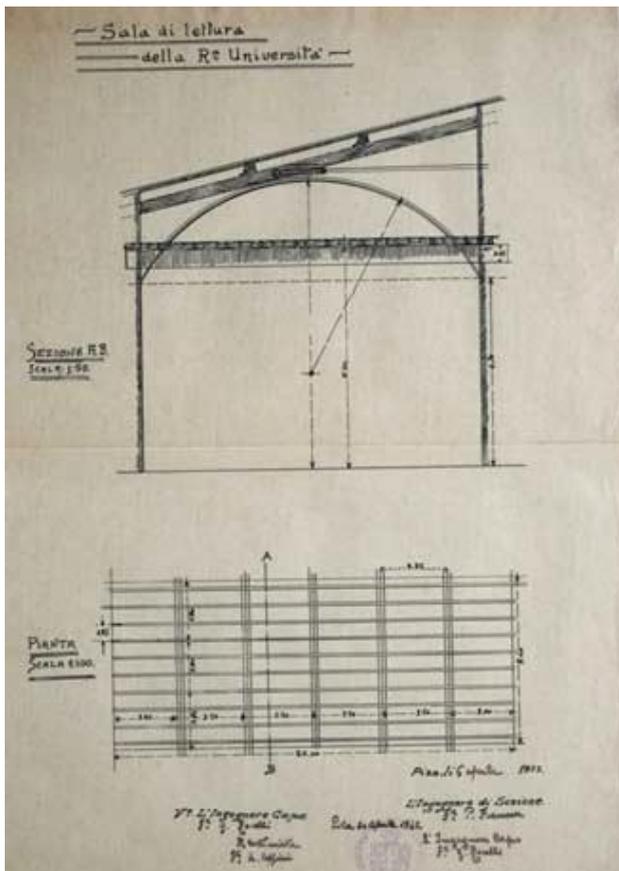


Figura 3.66: - Progetto per la copertura della sala di lettura della Biblioteca, *Relazione dei Lavori di demolizione della volta della sala di lettura della R. Biblioteca universitaria e costruzione di un solaio in ferro e volterrane di tipo Ferrari.* 6 Aprile 1922. ASPi, Fondo Genio Civile, Classe XXVII, Cartella 40, fasc. 202.

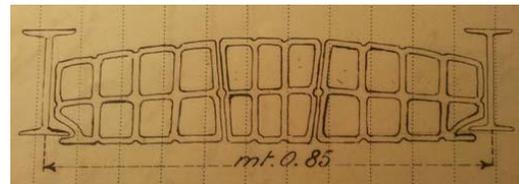


Figura 3.67: Particolare della volterrane tipo Ferrari, *Relazione dei Lavori di demolizione della volta della sala di lettura della R. Biblioteca universitaria e costruzione di un solaio in ferro e volterrane di tipo Ferrari.* 6 Aprile 1922. ASPi, Fondo Genio Civile, Classe XXVII, Cartella 40, fasc. 202.

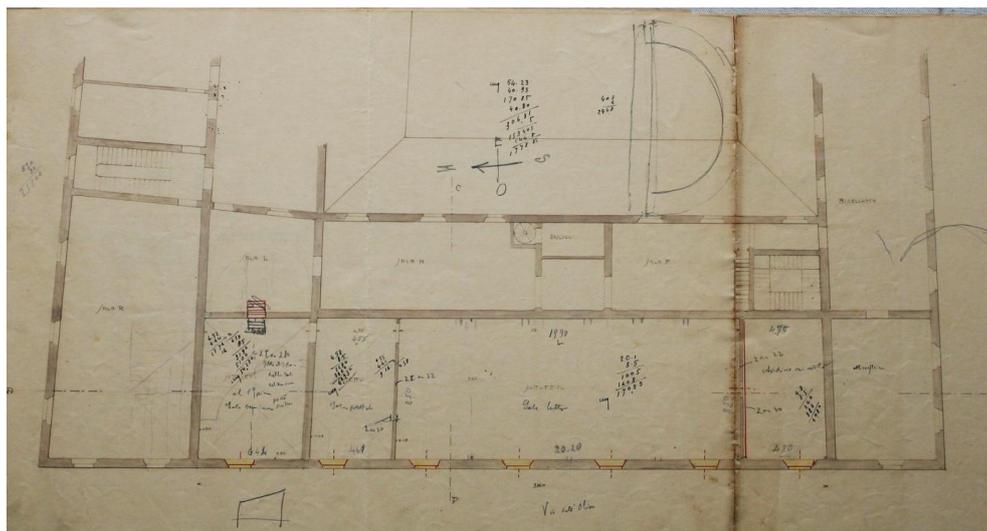


Figura 3.68: Progetto dei Lavori di sistemazione e sopraelevazione della R.Biblioteca. *Pianta piano secondo dell'ala ovest, Scala 1:100.* ASPi, Fondo Genio Civile, Classe XXVII, Cartella 110, Fascicolo 2.

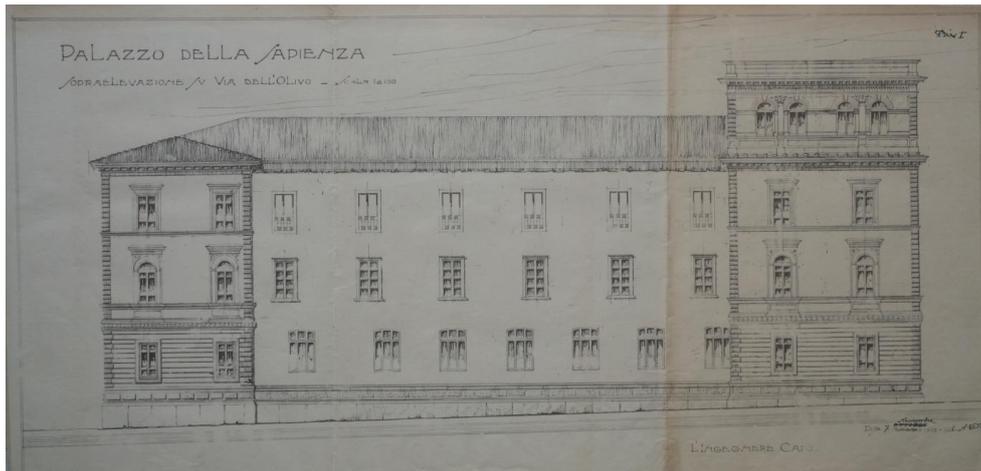


Figura 3.69: Progetto dei Lavori di sistemazione e sopraelevazione della R. Biblioteca. Prospetto presso la via dell'Ulivo, Scala 1:100. ASPI, Fondo Genio Civile, Classe XXVII, Cartella 110, Fascicolo 2.

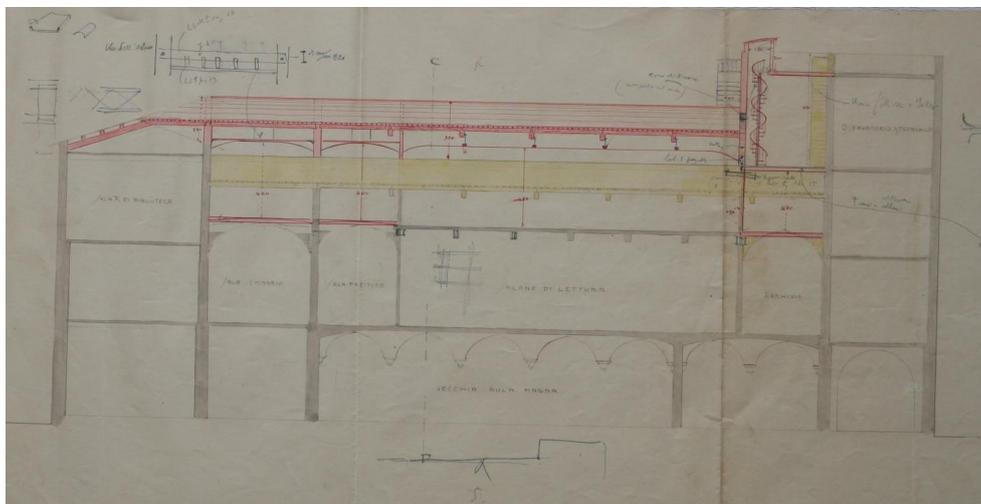


Figura 3.70: - Progetto dei Lavori di sistemazione e sopraelevazione della R. Biblioteca. Sezione AB, Scala 1:100. ASPI, Fondo Genio Civile, Classe XXVII, Cartella 110, Fascicolo 2.

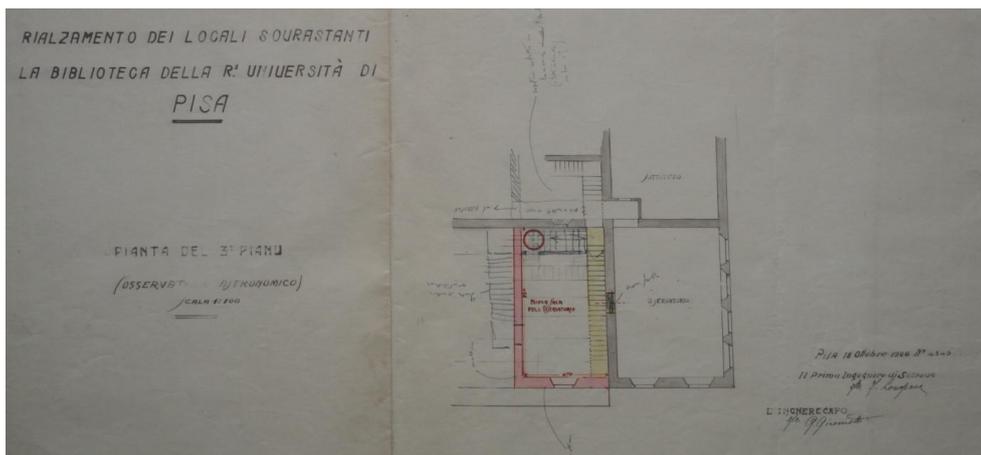


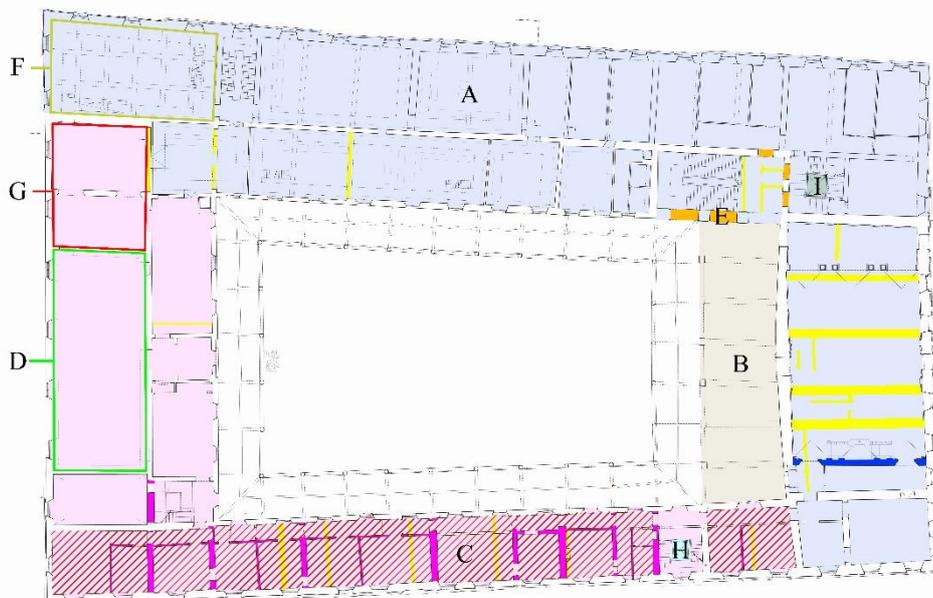
Figura 3.71: Rialzamento dei locali sovrastanti la Biblioteca della Regia Università di Pisa. Pianta del Terzo piano, Scala 1:100. ASPI, Fondo Genio Civile, Classe XXVII, Cartella 110, Fascicolo 2.



Legenda:

A	1905: Zona interventi del 1905
	1905: Nuove edificazioni a seguito dell'intervento del 1905
	1905: Demolizioni a seguito dell'intervento del 1905
	1909 : Progetto di demolizione e ricostruzione dei muri indicati, a causa della condizione di degrado
B	1913: Zona intervento del 1913
	1913: Nuove edificazioni a seguito dell'intervento del 1913
C	1991: Installazione impianto elevatore
D	1995: Realizzazione servizi igienici
E	1996: Installazione impianto elevatore

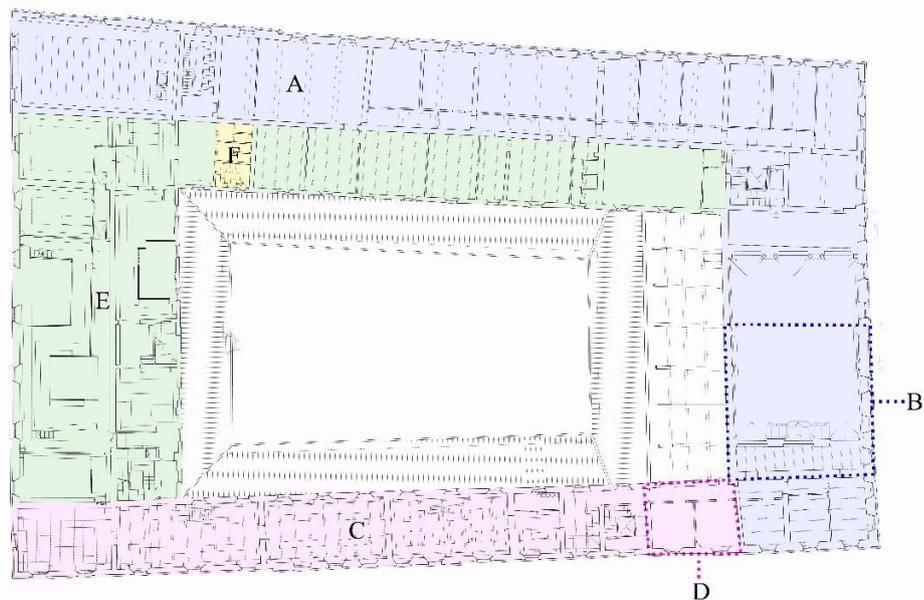
Con **tratteggio a 45° rosso** sono evidenziati i solai e volte previsti da demolire e da ricostruire nei progetti
Figura 3.72: Interventi nel XX secolo, piano terra. Schema interpretativo



Legenda:

A	1905: Zona interventi del 1905
	1905: Nuove edificazioni a seguito dell'intervento del 1905
	1905: Demolizioni a seguito dell'intervento del 1905 e del 1913
B	1910: Sostituzione delle sette volte a botte lesionate
C	1913: Zona intervento del 1913
	1913: Nuove edificazioni a seguito dell'intervento del 1913
D	1921: Demolizione e ricostruzione del solaio della sala di lettura
E	1934: Apertura delle arcate e della porte dal pianerottolo
F	1937: Demolizione e ricostruzione del solaio della Sala delle riviste della Biblioteca
G	1938: Demolizione e ricostruzione del solaio sulla sala catalogo e prestiti della Biblioteca
H	1991: Installazione impianto elevatore
I	1996: Installazione impianto elevatore

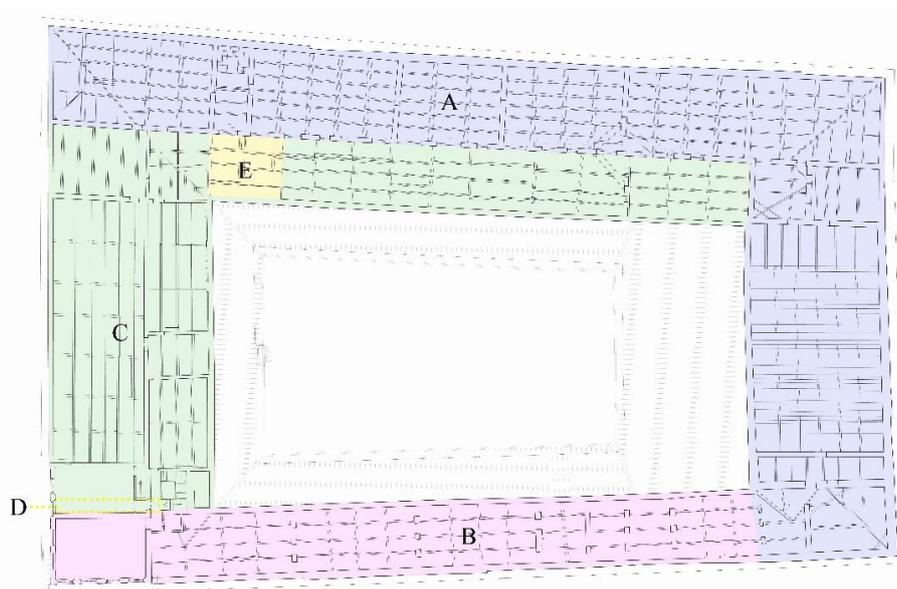
Con tratteggio a 45° rosso, sono evidenziati i solai di cui nei progetti è prevista la demolizione e la ricostruzione
 Figura 3.73: Interventi nel XX secolo, primo piano. Schema interpretativo.



Legenda:

A	1905: Zona interventi del 1905
B	Preesistenze del 1782
C	1913: Zona intervento del 1913
D	1913: Demolizione della torretta preesistente
E	1928: Zona intervento del 1928
F	2002: Realizzazione servizi igienici e soppalco

Figura 3.74: Interventi nel XX secolo, secondo piano. Schema interpretativo.



Legenda:

A	1905: Zona interventi del 1905
B	1913: Zona intervento del 1913
C	1928: Zona intervento del 1928
D	Posizione della scala di accesso alla terrazza dell'osservatorio, demolito con l'intervento del 1928
F	2002: Realizzazione servizi igienici e soppalco

Figura 3.75: Interventi nel XX secolo, piano sottotetto . Schema interpretativo

4. RILIEVO ARCHITETTONICO

a cura di Marco Bevilacqua e Valerio Cutini

Il rilievo architettonico del Palazzo della Sapienza di Pisa si è concentrato sull'analisi e la restituzione degli aspetti formali del complesso.

Il rilievo, nella sua globalità, è stato organizzato in due fasi: la fase operativa di prelievo delle misure e la fase di restituzione grafica degli elaborati finali.

Sulla base del programma di lavoro concordato, il rilievo ha fornito i seguenti elaborati grafici:

- piante generali in scala 1:100 dei tre livelli principali dell'edificio (piano terra, primo e secondo), piante parziali dei 2 livelli di soppalchi presenti in alcuni spazi al primo e al secondo piano ad uso della Biblioteca Universitaria, pianta del sottotetto comprensiva degli spazi della specola (6 elaborati in totale);
- 4 prospetti esterni in scala 1:100;
- 4 sezioni verticali rappresentative in scala 1:100 (due sezioni verticali lungo l'asse longitudinale e due sezioni verticali lungo l'asse trasversale del chiostro del palazzo).

4.1. Metodologia di rilievo e note operative

La fase operativa di prelievo delle misure è stata eseguita con una metodologia integrata diretta-strumentale (figura 4.1). Si è scelto infatti di strutturare il rilievo su due livelli operativi tra loro coordinati e sviluppati parallelamente. Un primo livello ha riguardato tutte le operazioni di misura di tipo strumentale, realizzate con una Stazione Totale modello LEICA TS02. Il secondo livello concerne invece le misure parziali e di dettaglio, eseguite con metodologia diretta e con l'uso di strumentazione tradizionale.

4.1.1. Rilievo strumentale

Si è proceduto anzitutto alla definizione di un sistema globale di riferimento, realizzato in sito con l'ausilio della stazione totale e segnalato da numerosi capisaldi, diffusi nel complesso. A tale sistema sono state riferite tutte le misurazioni di natura sia strumentale che diretta tradizionale.

Al piano terra, il sistema di riferimento è composto da una poligonale principale disposta nel chiostro interno (figura 4.2); il caposaldo 1000 – posto al mezzo del lato orientale del portico del chiostro al piano terra - definisce l'origine del sistema di inquadramento generale delle operazioni di rilievo (punto di coordinate 0,0,0).

Al piano primo, è stata realizzata una poligonale definita da quattro capisaldi disposti nei pressi delle mezzerie dei lati che descrivono il perimetro interno della loggia (figura 4.3).

Alle due poligonali principali, tra loro coordinate, sono stati collegati rami secondari di riferimento, chiusi dove possibile, costituiti da un discreto numero di capisaldi diffusi in modo ordinato, rispettivamente lungo tutti i lati del porticato e gli androni di ingresso al piano terra e lungo tutti i lati del loggiato al piano primo (figure 4.2 e 4.3). Da questo sistema di capisaldi è stato effettuato un rilievo strumentale di dettaglio della stereometria del portico al piano terra, delle logge al piano primo, degli androni di ingresso, nonché di tutti i prospetti dell'edificio verso il chiostro interno.

La metodologia strumentale è stata applicata inoltre al rilievo di dettaglio di alcuni spazi interni ritenuti più significativi, quali: l'aula magna storica, l'aula magna nuova, lo scalone di rappresentanza di accesso al piano primo, più altri spazi secondari al piano terra ritenuti comunque significativi per posizione e pregio architettonico e formale. Anche in questi casi, il rilievo strumentale è stato eseguito con opportune stazioni su capisaldi secondari collegati alla poligonale principale di riferimento.



Figura 4.1: Schema assometrico di ogni livello dell'edificio, con in evidenza la metodologia di rilievo adottata: rilievo strumentale (celeste), rilievo tradizionale diretto (giallo), rilievo integrato strumentale-diretto (verde).



Figura 4.2: Pianta del piano terra, con in evidenza i capisaldi principali della rete di inquadramento generale.



Figura 4.3: Pianta del piano primo, con in evidenza i capisaldi dei rami di poligonale al livello.

Lo stesso approccio metodologico è stato utilizzato per il rilievo dei prospetti esterni. Si è proceduto infatti alla realizzazione di una poligonale esterna, collegata a quella interna di riferimento principale (figura 4.2). I capisaldi esterni sono stati piazzati lungo il perimetro dell'edificio, in posizione opportuna per permettere la visibilità di tutte le facciate esterne. Si è quindi proceduto al rilievo strumentale di dettaglio dei prospetti, utile per definirne da un lato la geometria, dall'altro il profilo esterno ai vari livelli di pianta.

Completa queste operazioni il rilievo strumentale eseguito da opportuni capisaldi posti al livello della specola, dal quale sono stati misurati alcuni punti esterni sulla copertura, determinanti per la descrizione della geometria dei colmi e delle gronde dall'esterno.

L'elaborazione di queste operazioni ha permesso una prima ricostruzione tridimensionale della volumetria dell'edificio e ha garantito, in fase di restituzione, la presenza di un sistema di elementi di controllo per limitare la ridondanza degli errori di misura e orientamento (figura 4.6).

4.1.2. Rilievo integrato diretto-strumentale

Parallelamente alle operazioni di rilievo strumentale, descritte nel paragrafo precedente, si è proceduto al prelievo delle misure con metodologia diretta di tutti gli spazi residui.

Le operazioni di rilievo sono state quindi organizzate in due livelli operativi: misure in pianta, misure in elevato.

Tutte le misurazioni, sia in pianta che in elevato, sono state riferite ad una serie di piani di riferimento orizzontali - uno per ogni livello di pianta - posti a circa 1.40-1.60 m dal piano di calpestio, realizzati in sito mediante una livella laser autolivellante Leica Lino L360.

I piani di riferimento orizzontali sono stati inoltre coordinati altimetricamente al sistema di riferimento globale mediante la collimazione dalla stazione totale di alcuni punti significativi appartenenti ai piani.

Si è proceduto quindi al rilievo del profilo di pianta degli spazi alla quota di riferimento con metodo della trilaterazione. Queste misure hanno permesso una prima restituzione parziale delle piante dei singoli spazi, effettuata in sito, necessaria per verificare la qualità delle operazioni di misura effettuate. Gran parte degli spazi secondari al piano terra e di alcuni al piano primo e al secondo sono stati riferiti al sistema topografico mediante collimazione di almeno due punti del profilo planimetrico alla quota del piano orizzontale di riferimento locale e di punti significativi per definirne la stereometria sommaria. Questo ha permesso, in fase di elaborazione, di avere comunque un controllo affidabile sulla propagazione degli errori di orientamento dei singoli spazi.

Il rilievo degli elevati, rivolto alla lettura delle altezze dei vani e alla definizione dei plafoni di copertura, è stato eseguito con distanziometri laser tipo Leica disto A2 D/5 e canne metriche telescopiche. Come anticipato, tutte le misure in altezza sono state riferite ai piani orizzontali di riferimento precedentemente battuti e, di conseguenza, al sistema di riferimento globale dell'edificio.

Si è inoltre provveduto alla misura diretta di tutti gli spessori murari nei vani delle porte e delle finestre. Misure di maggior dettaglio hanno riguardato poi il rilievo degli elementi architettonici di pregio, di tutti i vani delle finestre e di quelle porte aperte nei maschi murari.

Contestualmente alle operazioni di prelievo delle misure, si è proceduto ad un rilievo fotografico approfondito di tutti gli spazi del complesso. La documentazione fotografica ha costituito un valido apporto nella fase di restituzione grafica.



Figura 4.4: Pianta del piano secondo - in alto - e del livello soppalco al piano - in basso - con in evidenza i capisaldi dei rami di poligonale ai due livelli.

4.1.3. Il rilievo della Biblioteca Universitaria

Il rilievo degli spazi ad uso della Biblioteca Universitaria è stato condizionato, in tempi e modalità di attuazione, dalle esigenze di accessibilità controllata.

Per ridurre i tempi operativi, alla luce della difficoltà di misura dovuta alla presenza di diffuse scaffalature e all'eccessiva frammentazione degli spazi, si è scelto di procedere con metodologia tradizionale diretta in quanto più flessibile. È stata comunque realizzata una poligonale di riferimento ai due livelli principali di pertinenza della biblioteca e al livello del soppalco al secondo piano, per riferire le misure parziali al sistema di riferimento globale ed avere un controllo sufficiente sugli errori di rotazione nel piano dei singoli spazi rilevati.

Al piano primo, la poligonale corre lungo tutti gli spazi principali della biblioteca verso il chiostro interno (figura 4.3). Un ramo secondario intercetta gli spazi verso piazza Dante. È stato possibile, a questo livello, chiudere la poligonale su due capisaldi della rete secondaria di riferimento presente nel loggiato, descritta nel paragrafo precedente.

Al piano secondo e al corrispondente piano del soppalco, non è stato possibile realizzare una poligonale chiusa per la mancanza di collegamenti al piano con gli spazi di pertinenza dell'Università. Per tale ragione, la poligonale consiste in un ramo aperto coordinato al sistema globale attraverso operazioni di misura realizzate attraverso le finestre verso il chiostro e riferite direttamente alla poligonale esterna del loggiato al piano primo (figura 4.4). Le misure di dettaglio sono state eseguite in modo analogo a quanto descritto nel paragrafo precedente.

Il rilievo dei piani di soppalco, infine, è stato integrato con misure riferite a piani orizzontali locali, coordinati a quelli generali attraverso le scale di accesso al livello.

Si è proceduto infine alla misura di tutte le scaffalature, al fine di restituirne una sommaria conformazione stereometrica e la loro posizione in pianta.



Figura 4.5: Pianta del sottotetto; in rosso la distribuzione della fitta rete di capisaldi necessari per il rilievo strumentale dello spazio.

4.1.4. Il rilievo del sottotetto

Riguardo le operazioni di misura dello spazio di copertura dell'edificio, vista la complessità stereometrica degli spazi, si è scelto di operare con metodologia strumentale (figura 4.5), limitando le misure dirette al prelievo delle dimensioni delle sezioni delle membrature, degli spessori murari e di altri elementi significativi.

Il rilievo strumentale è stato utilizzato, quindi, per la descrizione della geometria principale dello spazio – dimensione dei vani, pendenze delle coperture – e della posizione delle strutture di copertura principali – capriate lignee e in acciaio, orditura lignea principale, travi di colmo e arcarecci.

Il sottotetto accessibile dalla Biblioteca Universitaria, che costituisce buona parte del volume rivolto verso piazza Dante e via dell'Ulivo, presenta un'altezza di colmo media di circa 2.90 metri. Questo ha permesso di pianificare le operazioni di rilievo strumentale senza particolari difficoltà.

Lo stesso non può dirsi per il sottotetto del lato verso via della Sapienza, dove il colmo raggiunge altezze nette di circa 1.40 m. La distribuzione abbastanza fitta delle capriate, unitamente agli spazi poco agevoli, ha fortemente limitato le operazioni di rilievo strumentale, che sono state principalmente volte alla definizione della quota del piano di calpestio, del passo delle capriate e della pendenza delle falde. In questo caso, il metodo diretto ha permesso una maggiore flessibilità di azione, colmando le limitazioni operative dovute alla difficoltà di posizionare la stazione totale in spazi molto angusti.

Per l'effettuazione del rilievo delle strutture di copertura dell'Aula Magna Nuova, l'accessibilità in sicurezza allo spazio è stata assicurata per mezzo di due passerelle in legno, della lunghezza di circa 3.00 metri ciascuna, poste agli ingressi nel vano su entrambi i lati corti. Questo ha permesso il posizionamento della stazione totale in posizione più avanzata, dalla quale è stato possibile misurare la pendenza delle falde ed il passo di tutte le capriate in acciaio che sorreggono la copertura ed il passo e la geometria delle travi in laterocemento che sorreggono la volta dell'aula magna.

4.2. La restituzione grafica

La restituzione grafica è stata eseguita in ambiente CAD e ha previsto la redazione dei disegni in scala 1:100 che rappresentano le piante di tutti i livelli, i prospetti esterni e le quattro sezioni significative lungo gli assi del chiostro.

Il rilievo strumentale ha fornito una grande mole di dati, elaborata e gestita in ambiente CAD, che ha permesso una prima restituzione discreta della volumetria dell'intero edificio. In particolare, è stato possibile ricostruire digitalmente la conformazione stereometrica dei prospetti esterni, dell'intero chiostro comprensivo di porticato al piano terra e loggiato al piano primo, delle due aule magne, più di una serie di spazi, sia al piano terra che al piano primo, significativi per posizione e pregio (figura 4.6).

Dal modello discreto 3D sono stati quindi elaborati i profili delle varie piante ai diversi livelli, che sono state opportunamente elaborate con l'integrazione delle informazioni mancanti (spazi rilevati con metodologia diretta, segni grafici convenzionali, quotature ecc.).

Completate le piante dei livelli principali dell'edificio, si è proceduto alla redazione degli elaborati in elevato – prospetti e sezioni.

Per i prospetti, i dati elaborati della stazione totale sono stati sufficienti a definirne una geometria pressoché completa, alla quale sono state aggiunte solo informazioni grafiche relative all'apparato decorativo e di dettaglio, tratte da un rilievo fotografico puntuale.

Nelle sezioni, i dati della stazione totale sono stati integrati con quelli elaborati dal rilievo con metodologia diretta, coordinati ai primi grazie alla referenziazione delle quote dei piani di riferimento al sistema topografico globale.

Conclude nella tempistica operativa la restituzione grafica della pianta e degli spazi di sottotetto, anch'essa basata sulla elaborazione dei dati significativi da stazione totale. La rielaborazione della pianta della copertura ha completato quindi l'insieme degli elaborati necessari alla descrizione architettonica del complesso e ha permesso quindi una verifica finale della qualità dell'intero lavoro.

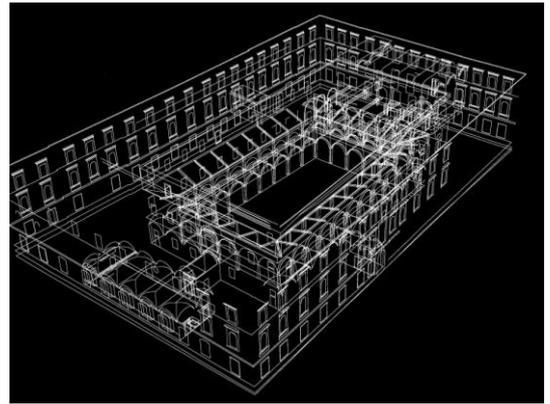
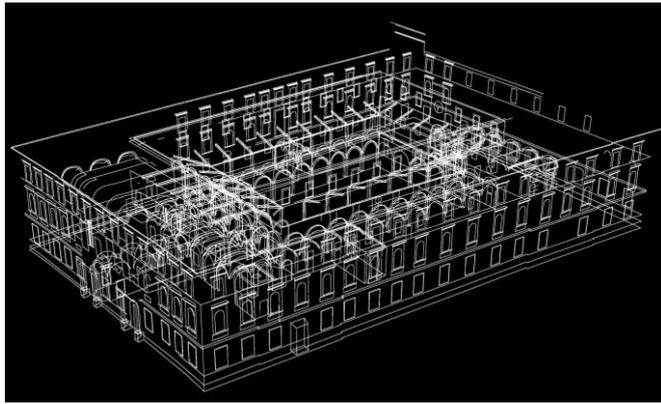


Figura 4.6: Viste di alcune fasi di elaborazione del modello 3D desunto dai dati strumentali.

5. INDAGINI ED ANALISI GEOTECNICHE

a cura di Giuseppe Scarpelli e Nunziante Squeglia

5.1. Indagini in sito

Per la definizione del modello geotecnico del sottosuolo è stata eseguita una campagna di indagini comprendente:

- sette perforazioni a carotaggio continuo, di cui due all'interno del cortile e cinque in prossimità del perimetro esterno dell'edificio;
- sei prove penetrometriche statiche (CPTU), di cui una eseguita sul perimetro esterno a nord del fabbricato mentre cinque prove sono state effettuate nel cortile interno;
- due prove con dilatometro sismico (SDMT) eseguite in corrispondenza delle verticali penetrometriche nord e sud interne al cortile;
- una prova DPSH eseguita sul perimetro esterno del fabbricato lato nord-est.

Nella figura 5.1 si riporta la pianta riferita al piano terra dell'edificio con la disposizione planimetrica delle indagini interne ed esterne.



Figura 5.1: Disposizione planimetrica delle indagini geotecniche eseguite nel maggio 2013.

I due sondaggi all'interno del cortile dell'edificio sono stati eseguiti fino alla profondità di 40 m dal piano di campagna mentre le cinque perforazioni esterne sono state effettuate sino ad una profondità di 10 m. In ciascuno dei fori di sondaggio è stato eseguito il prelievo di campioni indisturbati con l'uso di campionatore tipo Shelby o Osterberg, in dipendenza del tipo di terreno. Complessivamente sono stati prelevati 29 campioni indisturbati 20 dei quali sono stati sottoposti a prove geotecniche presso il Laboratorio di Geotecnica del Dipartimento di Ingegneria dell'Energia, dei Sistemi, del Territorio e delle Costruzioni dell'Università di Pisa. Le due perforazioni interne al cortile (denominate S1 e S2) sono state attrezzate

ciascuna con un piezometro tipo Casagrande avente la cella a profondità di 33 metri per il sondaggio S1 e di 12 metri per il sondaggio S2.

Tutti i dettagli delle indagini, prove in sito ed in laboratorio e della strumentazione installata possono essere ritrovati nei rapporti tecnici allegati ed ai quali si rimanda. Nel seguito si riporta per brevità solo un quadro di sintesi delle prove di laboratorio eseguite, per un'elencazione completa si rimanda agli allegati. Inoltre, tenuto conto che non tutti i campioni indisturbati prelevati sono stati sottoposti alle prove, restano a disposizione ancora 9 campioni per eventuali ulteriori indagini ed approfondimenti che potranno essere necessari.

Nella tabella 5.1 si riportano le profondità dei 20 campioni esaminati e le prove effettuate su ciascuno di essi. Trattasi di prove di classificazione (granulometrie e limiti di consistenza) e di prove meccaniche (Triassiali consolidate non drenate, Edometriche, Colonna risonante).

Tabella 5.1 – Denominazione dei campioni aperti e prove eseguite.

Sondaggio	n° reg.	Profondità (m)	Gran.	Limiti	Aerom.	Tx CIU	EDO	CR
S1 Est	687	3,70 - 4,00						
S1 Est	688	6,00 - 6,50	X	X	X		X	
S1 Est	689	9,50 - 10,00	X	X	X	X	X	
S1 Est	690	10,50 - 11,00	X	X	X	X	X	X
S1 Est	691	14,00 - 14,50	X	X	X		X	
S1 Est	692	16,00 - 16,50						
S1 Est	693	18,50 - 19,00	X	X	X		X	X
S1 Est	694	22,50 - 23,00						
S1 Est	695	26,50 - 27,00	X	X	X	X		
S1 Est	696	31,50 - 32,00	X	X	X		X	X
S2 Ovest	697	3,50 - 4,20	X	X	X	X	X	
S2 Ovest	698	6,00 - 6,70	X	X	X	X	X	
S2 Ovest	699	9,00 - 9,70	X	X	X	X	X	
S2 Ovest	700	10,60 - 11,30	X	X	X		X	
S2 Ovest	701	15,00 - 15,50	X	X	X	X		X
S2 Ovest	702	17,00 - 17,50	X	X	X		X	
S2 Ovest	703	19,50 - 20,00						
S2 Ovest	704	21,50 - 22,00	X	X	X		X	
S2 Ovest	705	25,50 - 26,00	X	X	X		X	X
S2 Ovest	706	31,20 - 31,70						
S3 Nord-Est	707	7,50 - 8,00						
S4 Nord-Ovest	716	5,50 - 6,00	X	X	X	X		X
S4 Nord-Ovest	717	7,50 - 8,00						
S5 Sud-Ovest	718	4,50 - 5,00						
S5 Sud-Ovest	719	7,50 - 8,00	X	X	X	X		
S6 Sud-Est	720	7,00 - 7,50	X	X	X	X		
S6 Sud-Est	721	9,00 - 9,60	X	X	X	X		
S7 Sud	722	7,40 - 8,00	X	X	X	X		
S7 Sud	723	8,80 - 9,30						

Le prove di laboratorio, unitamente ai risultati delle prove in sito, hanno consentito la ricostruzione stratigrafica del sottosuolo e l'attribuzione delle caratteristiche fisiche e meccaniche ai vari materiali individuati. Utili ai fini della caratterizzazione meccanica dei terreni per l'analisi sismica dell'edificio sono le prove in colonna risonante, che forniscono valori molto attendibili della rigidità del terreno nel campo delle

deformazioni di interesse per questo particolare aspetto progettuale.

Nei paragrafi che seguono saranno esposte le varie fasi che hanno consentito la determinazione del modello geotecnico di sottosuolo del palazzo della Sapienza.

5.2. Definizione della geometria del sottosuolo e regime idraulico.

Nel terreni di fondazione della Sapienza si riconoscono due stratificazioni fondamentali che possono essere considerate pressoché orizzontali. La similitudine stratigrafica con i terreni di fondazione della Torre Pendente consente di utilizzare, per descrivere gli strati, le stesse denominazioni utilizzate nel lavoro della Commissione Polvani, poi ripreso più recentemente dalla Commissione Jamiolkowski.

Il primo gruppo di strati, denominato Complesso A, si estende dal piano campagna ad una profondità di circa 14 m, e cioè tra le quote di circa 5 m s.l.m.m. e di circa - 9 m s.l.m.m. Nella parte superiore del Complesso A, fino ad una profondità di circa 2 m, è presente uno strato di materiale di riporto di natura e costituzione molto variabili. Al di sotto dello strato di riporto si trova uno strato denominato A1 dove sono presenti sabbie, limi e argille in strati e lenti di spessore variabile, di colori diversi (grigio-grigio nocciola-grigio azzurro) e di scarsa continuità laterale. Nella parte inferiore del complesso è presente uno strato di sabbie fini con intercalazioni limose (denominato A2).

La seconda stratificazione, denominata Complesso B, si estende fra le quote di - 9 m s.l.m. e - 35 m s.l.m. circa. E' costituita in prevalenza da terreni argillosi intercalati da uno strato di sabbia dello spessore di 2 m che è presente tra le quote - 23 m s.l.m. e - 25 m s.l.m. All'interno del complesso la natura e le caratteristiche dei terreni variano entro limiti abbastanza ampi, ma di norma con gradualità e, a differenza di quanto avviene nel Complesso A, esiste una marcata continuità orizzontale.

Il complesso B è costituito da quattro strati. Le argille superiori (strato B1) sono delimitate superiormente dai terreni del complesso A e giungono fino a quota - 19 m s.l.m. circa. Esse sono argille sensibili leggermente sovraconsolidate, di plasticità da media ad elevata e di consistenza ridotta. Il colore varia da grigio a grigio scuro e sono caratterizzate da una notevole uniformità e senza evidenze di stratificazioni.

Le argille intermedie (strato B2) si estendono tra le quote - 19 m s.l.m. e - 23 m s.l.m. circa; sono argille con limo in percentuale variabile, talvolta di colore scuro, talvolta più chiare con frequenti chiazze oca. Si tratta di argille di media plasticità e con valori del grado di sovraconsolidazione e della consistenza più elevati rispetto alle sovrastanti argille dello strato B1.

Al di sotto dello strato di argille intermedie si trovano le sabbie intermedie (strato B3). Esse sono sabbie fini limose di colore grigio scuro e occupano uno spessore di circa 2 m tra le quote - 23 m s.l.m. e - 25 m s.l.m.

Infine le argille inferiori (strato B4) si rinvergono tra le quote - 25 m s.l.m. e - 35 m s.l.m. circa. Lo strato è formato da argille più o meno limose di colore grigio scuro normalmente consolidate o leggermente sovraconsolidate, di media consistenza. La figura 5.2 mostra lo schema stratigrafico descritto in precedenza.

Le due perforazioni interne al cortile (S1, S2 in figura 5.1) sono state attrezzate con un piezometro tipo Casagrande con le celle di misura a profondità di 33 m per il sondaggio S1 e a 12 m per il sondaggio S2. La misura della quota piezometrica in più punti e la modellazione stratigrafica del sito hanno permesso di ricostruire il profilo delle pressioni neutre nel sottosuolo. Le misurazioni effettuate nel periodo estivo consentono di affermare che a 33 metri la quota piezometrica è mediamente a circa -5,6 m dal piano campagna (-0,6 m s.l.m), mentre, per il piezometro più superficiale, la quota piezometrica è circa a - 2,6 m dal piano campagna (+ 2,4 m s.l.m). L'andamento della pressione neutra con la profondità può essere quindi ricostruito nel modo riportato nel grafico di figura 5.3, in cui la linea tratteggiata indica la distribuzione idrostatica.

Il grafico evidenzia lo scostamento delle quote piezometriche dalla corrispondente distribuzione idrostatica, per la presenza di una certa circolazione idrica sotterranea. E' noto infatti che dagli strati più profondi e più permeabili della piana pisana sono estratte grandi quantità di acqua, principalmente a scopo industriale. Questa operazione porta ad una depressione della quota piezometrica negli strati più profondi che oscilla di alcuni metri durante l'anno e che nel periodo estivo raggiunge il suo minimo, con quota spesso inferiore al livello del mare.

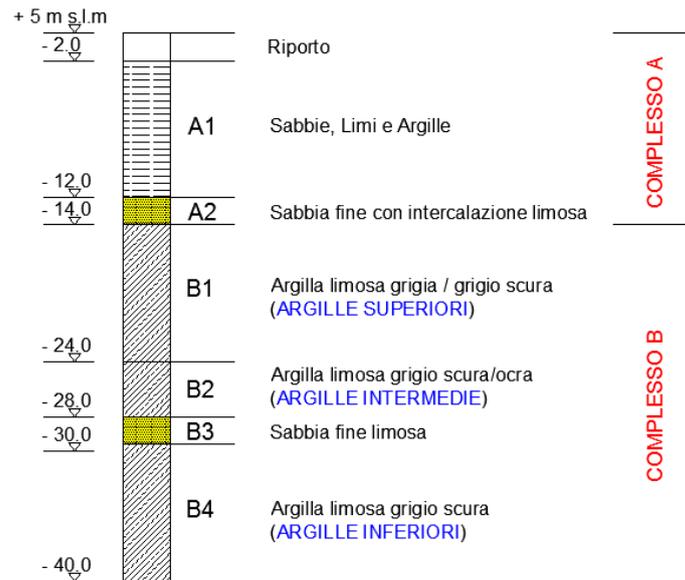


Figura 5.2: Schema stratigrafico del sottosuolo.

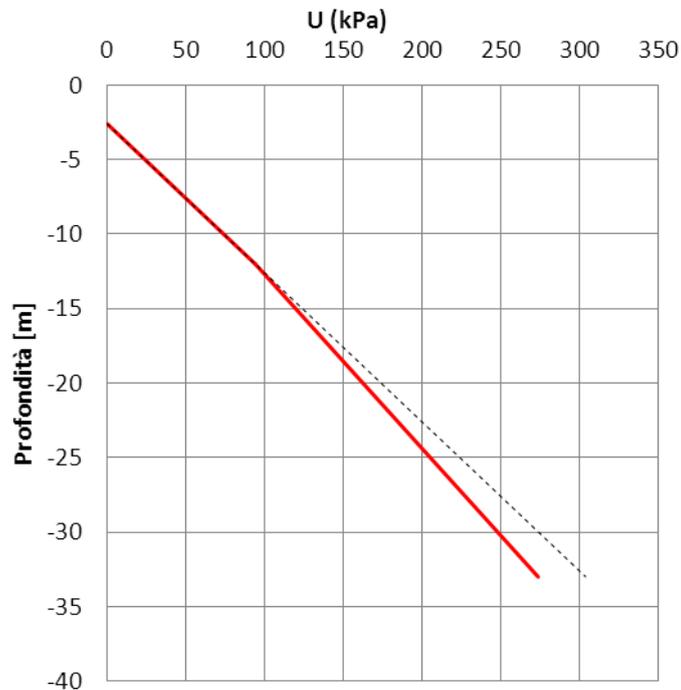


Figura 5.3: Profilo delle pressioni neutre.

5.3. Granulometria e proprietà indice.

Le prove di laboratorio hanno permesso di definire con buona accuratezza le caratteristiche del sottosuolo. Come già riportato nella tabella 5.1, i venti campioni aperti sono stati tutti sottoposti alla determinazione delle caratteristiche fisiche ed alla classificazione granulometrica. La tabella 5.2 riporta i risultati delle analisi granulometriche eseguite sui vari campioni raggruppate per singoli strati, secondo lo schema stratigrafico di figura 5.2.

Analogamente la tabella 5.3 riporta i risultati della determinazione delle proprietà indice, unitamente ai valori del peso dell'unità di volume (γ) del contenuto in acqua naturale (W_N) e all'indice di consistenza (IC). Anche in questo caso i dati sono stati elaborati per ogni singolo strato.

Tabella 5.2: Frazioni granulometriche medie.

Strato	Sabbia (%)	Limo (%)	Argilla (%)
A1	25,70	49,20	25,10
A2	56,4	30,3	13,2
B1	7,1	37,5	55,4
B2	10,5	38,5	51
B3	57,7	33,6	8,6
B4	10,1	36,7	54,2

Tabella 5.3: Proprietà fisiche ed indice.

Strato	γ (kN/m ³)	W_N (%)	W_L (%)	I_p (%)	IC
A1	19,35 ± 0,6	29,5 ± 4	31,65 ± 10	11,3 ± 6	0,23
A2	18,07 ± 0,8	37,3 ± 6,5	55,7 ± 8	30,4 ± 7	0,28
B1	17,08 ± 0,85	54,05 ± 10	63 ± 6	36 ± 5	0,27
B2	19,88 ± 0,6	27,7 ± 0,3	46,5 ± 2,5	20,5 ± 6	0,94
B3	19,11 ± 0,5	29,4 ± 3	33 ± 5	8,5 ± 3,5	0,30
B4	17,66 ± 0,5	46 ± 5	61 ± 6	32 ± 5	0,43

Il valore del peso dell'unità di volume γ varia con la profondità entro limiti piuttosto ampi, in particolare decresce da 19,35 a 17 kN/m³ passando dal Complesso A alle argille superiori dello strato B1. Valori più alti competono alle argille intermedie B2, alle sabbie intermedie B3 e alle argille inferiori B4, per i quali γ varia tra 17,5 e 20 kN/m³.

I valori del contenuto di acqua naturale W_N , del limite liquido W_L e dell'indice di plasticità IP relativi al Complesso A sono stati determinati sulle frazioni di materiale coesivo. I risultati delle analisi hanno mostrato che le frazioni coesive del Complesso A sono costituite da limi argillosi di bassa plasticità con valori del contenuto di acqua naturale e del limite liquido nell'ordine, rispettivamente, di 25 - 35% e 30 - 40%, con valori dell'indice di plasticità variabile dal 10 al 20%.

Le argille superiori (B1) risultano caratterizzate da valori più alti del contenuto di acqua naturale (da 50 a 65%), del limite liquido (da 60% a 70%) e dell'indice di plasticità (da 35% a 40%). Valori leggermente inferiori a quelli dello strato B1 competono alle argille inferiori (B4).

Nelle argille intermedie dello strato B2 l'indice di plasticità scende a valori di circa 20% ed il contenuto di acqua naturale è molto prossimo al limite di plasticità; questa differenza è da attribuire a una preconsolidazione dello strato.

In conclusione, le argille superiori possono essere classificate come argille di elevata plasticità, mentre le intermedie e le inferiori come argille di media plasticità. Il confronto fra i valori delle proprietà indice e del contenuto in acqua naturale permette di valutare lo stato di consistenza dei terreni a grana fine. Coerentemente con i dati classici di letteratura per il sottosuolo della Torre Pendente, le argille superiori possono essere classificate come argille di bassa consistenza mentre quelle intermedie e inferiori rispettivamente di alta e media consistenza.

Tutto ciò è sintetizzato dai grafici delle figure 5.4, 5.5 e 5.6 dove si riportano i profili con la profondità relativi al peso dell'unità di volume γ (kN/m³), al contenuto naturale d'acqua W_N (%), all'indice dei vuoti e_0 (-), al limite liquido W_L (%), all'indice di plasticità IP (%) e al contenuto d'argilla C_F (%).

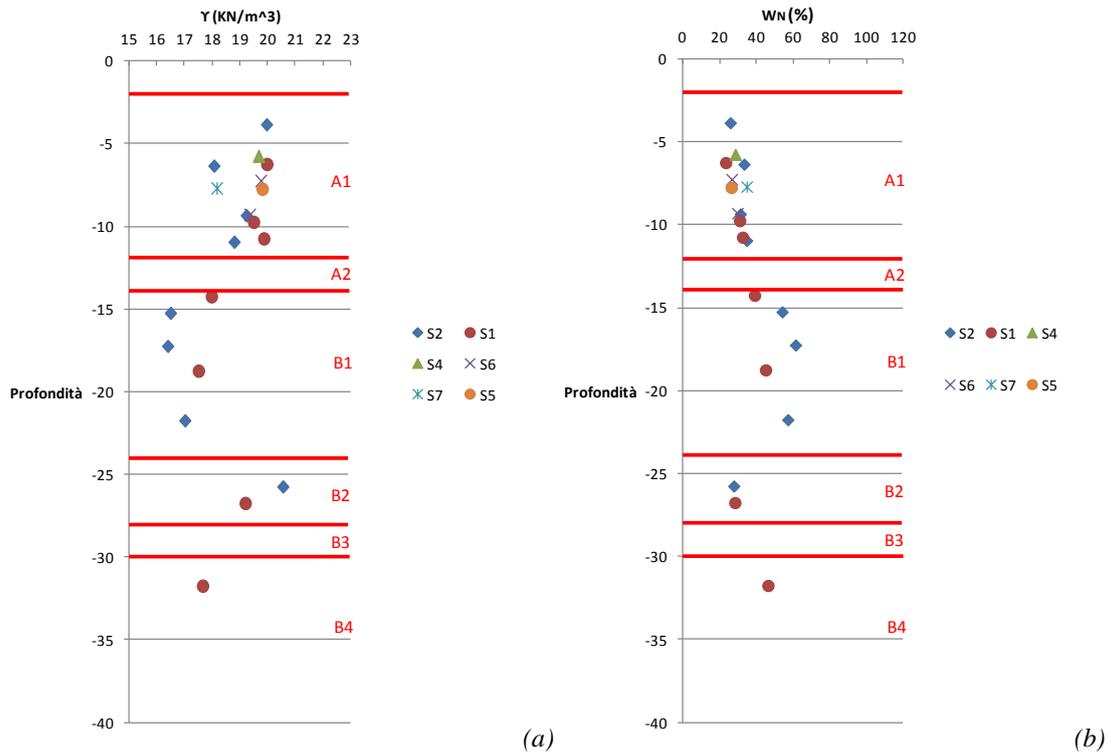


Figura 5.4: Profilo del peso dell'unità di volume (a) e del contenuto d'acqua naturale (b).

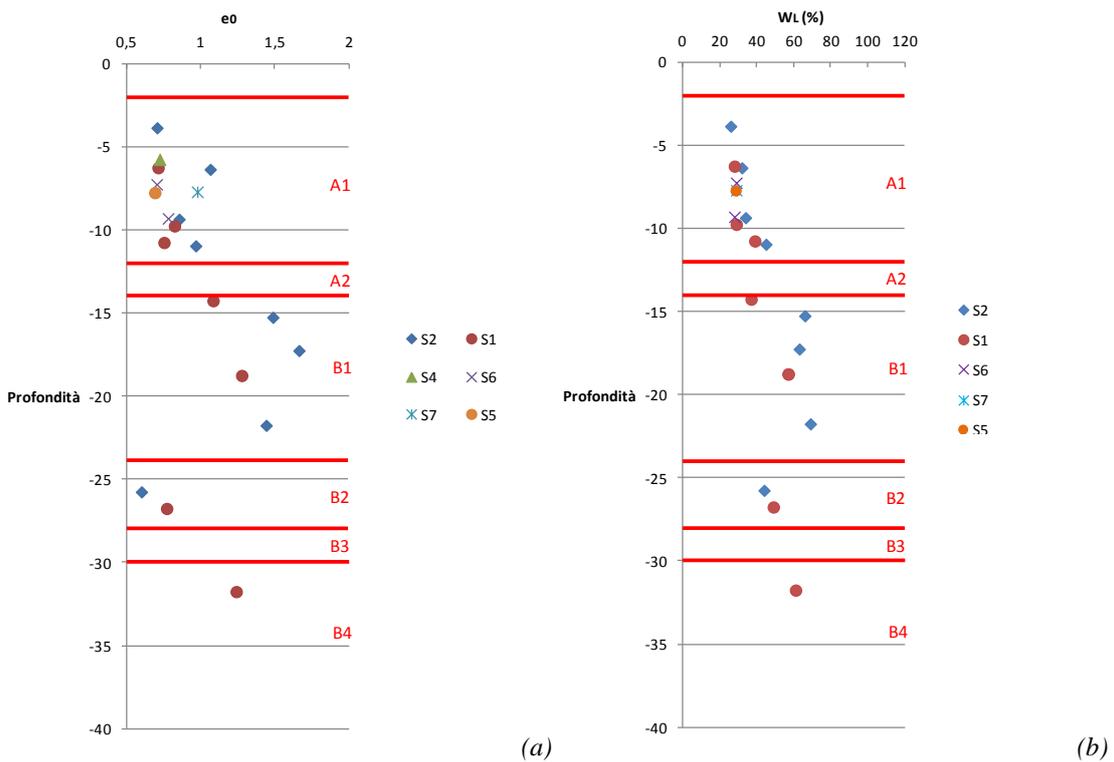


Figura 5.5: Profilo dell'indice dei vuoti (a) e del limite liquido (b).

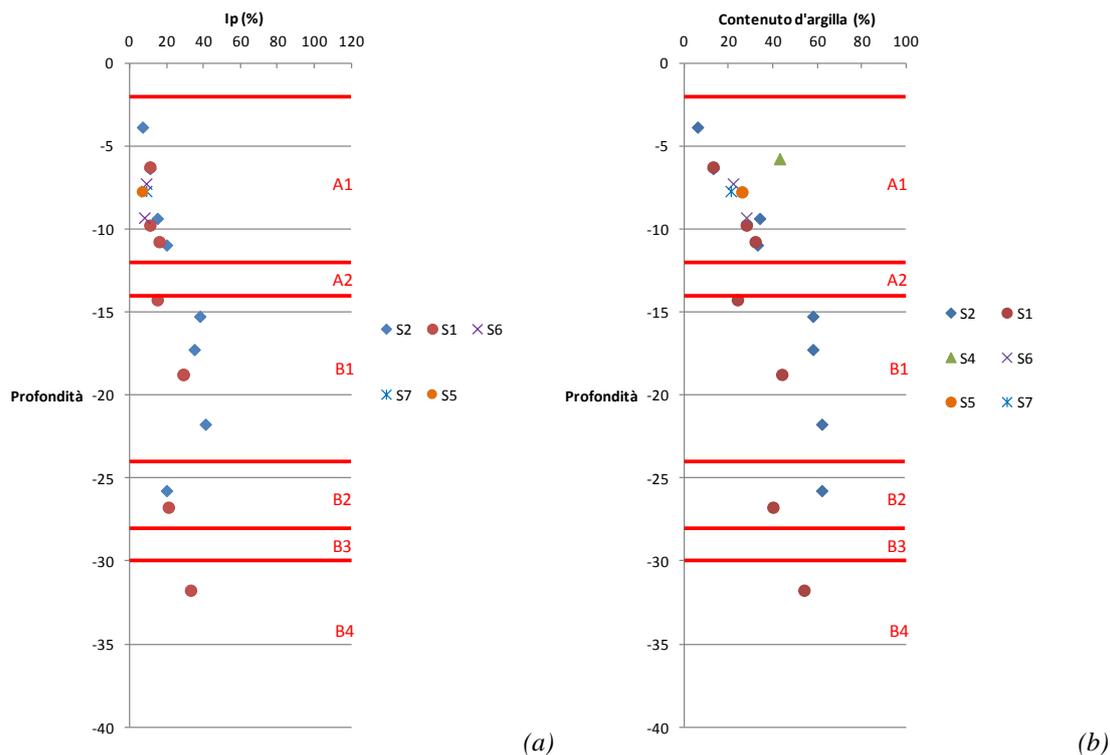


Figura 5.6: Profilo dell'indice di plasticità (a) e del contenuto d'argilla (b).

5.4. Parametri di compressibilità e storia tensionale

La ricostruzione della storia tensionale e la definizione delle caratteristiche di compressibilità dei materiali è stata possibile attraverso l'esecuzione delle prove edometriche ad incrementi di carico su provini prelevati nei vari strati argillosi. Come già fatto per le proprietà indice e fisiche, l'elaborazione dei dati è stata effettuata seguendo la suddivisione degli strati. Nelle figure 5.7, 5.8 e 5.9 si riportano i profili con la profondità relativi all'indice di compressione C_c (-), all'indice di rigonfiamento C_s (-), al coefficiente di consolidazione primaria C_v (m^2/s), al coefficiente di consolidazione secondaria C_α , al coefficiente di permeabilità K (m/s) ed al grado di sovraconsolidazione OCR. Nel caso dei materiali dello strato A1, i valori di C_c variano nell'intervallo 0.1 - 0.3. Per le argille dello strato B1 i valori di C_c sono superiori e variano tra 0.4 e 0.65. Per le argille intermedie (B2) il valore di C_c risulta compreso tra 0.1 e 0.2 per poi risalire nelle argille inferiori (B4) a valori di circa 0.4 - 0.5.

L'andamento con la profondità dell'indice di rigonfiamento C_s tende a crescere dai valori nell'intervallo 0.02 e 0.03 dello strato A1 fino ai valori compresi tra 0.1 e 0.2 dello strato B1. Nello strato B2 il valore di C_s diminuisce portandosi nell'intorno di 0.02 per poi risalire nelle argille inferiori (B4) a valori simili a quelli delle argille superiori (B1).

Il coefficiente di consolidazione primaria C_v , misurato con riferimento a una tensione verticale efficace prossima a quella esistente in sito, oscilla nel campo $10^{-8} \div 10^{-6} m^2/s$; i valori più elevati sono stati osservati nello strato A1 e nello strato B2.

Il coefficiente di consolidazione secondaria C_α varia tra 0.002 a 0.02; i valori più alti competono alle argille superiori (B1) ed alle argille inferiori (B4).

Il coefficiente di permeabilità K (m/s), ricavato come di consueto dall'analisi del processo di consolidazione, per quanto riguarda lo strato A1, i valori misurati si presentano significativamente dispersi e variabili in un intervallo piuttosto ampio (da 10^{-9} a 10^{-7} m/s). Valori più bassi, variabili nel campo $10^{-11} \div 10^{-10}$ m/s, competono alle argille degli strati B1 e B4. Le argille intermedie presentano valori più elevati dell'ordine di 10^{-8} m/s.

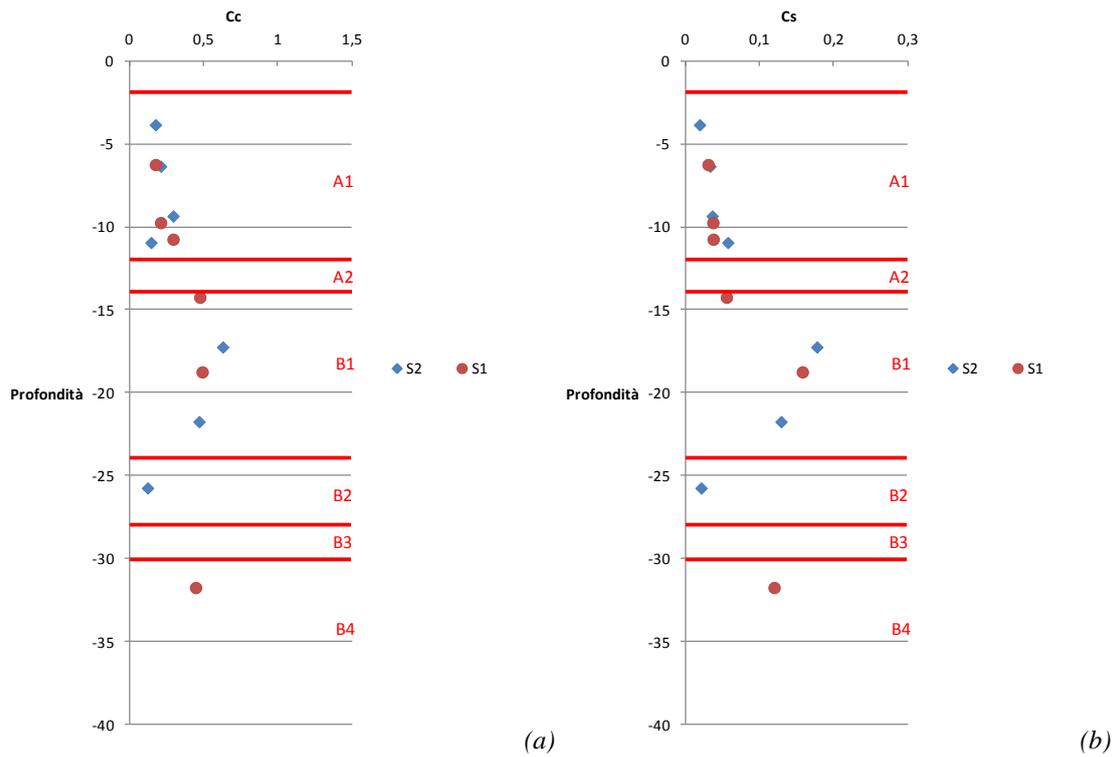


Figura 5.7: Profilo dell'indice di compressibilità (a) e dell'indice di rigonfiamento (b).

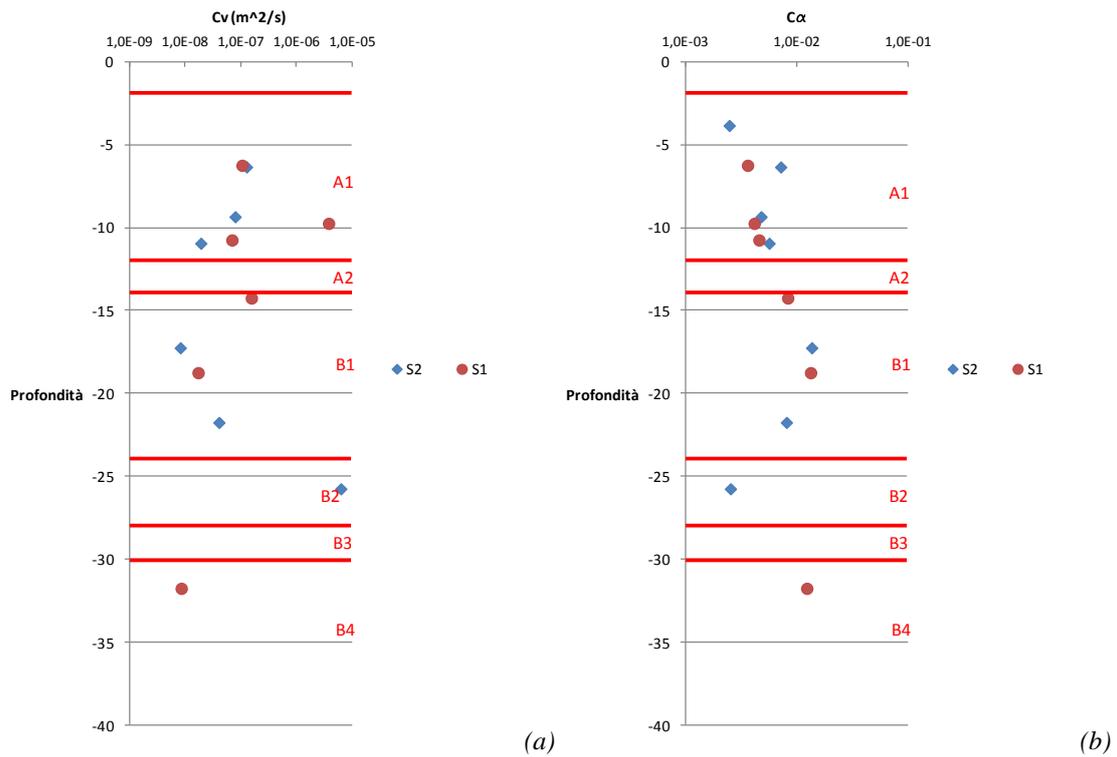


Figura 5.8: Profilo del coefficiente di consolidazione (a) e di quello secondario (b).

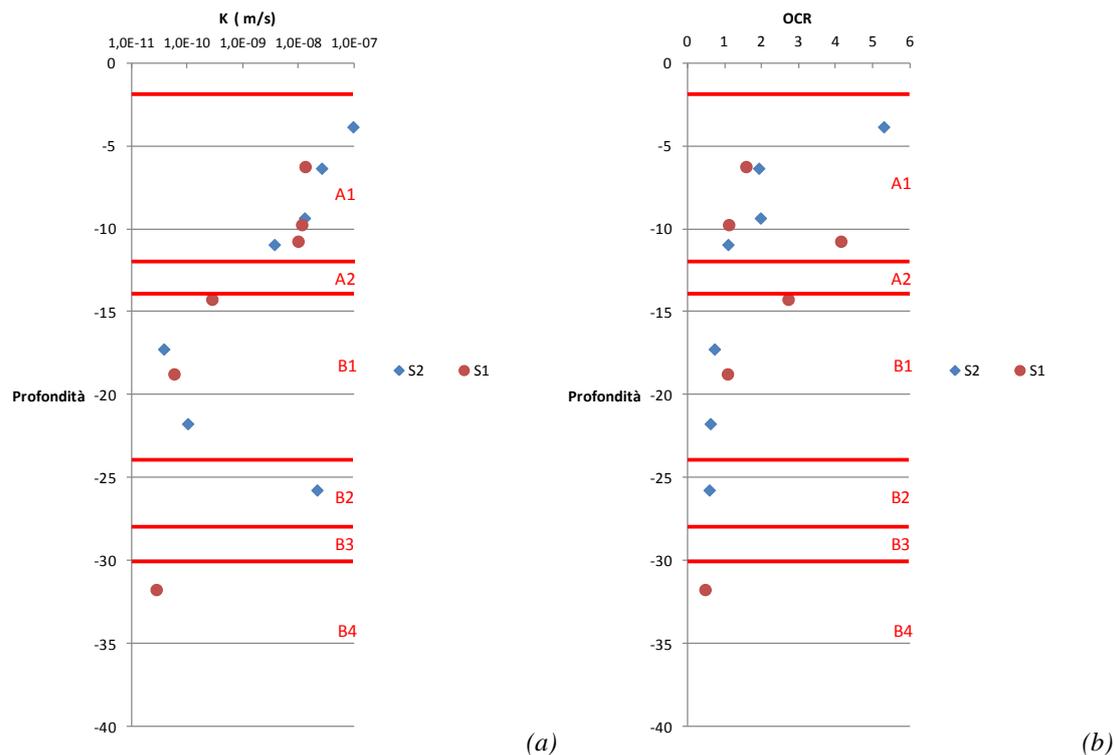


Figura 5.9: Profilo del coefficiente di permeabilità (a) e dell'OCR (b).

I valori di OCR riportati nella figura 5.9(b) possono essere confrontati con quelli ricavabili dalle quattro prove CPTU effettuate all'interno dell'edificio e riportati nella figura 5.10. I valori di OCR relativi al Complesso A sono piuttosto dispersi, e più alti di quelli che corrisponderebbero a soli fenomeni di preconsolidazione meccanica e quindi sono attribuibili a fenomeni di oscillazione della falda ed essiccamento. Le argille superiori ed inferiori sono caratterizzate da valori del grado di sovraconsolidazione OCR di poco superiori all'unità mentre le argille intermedie (strato B2) presentano valori più elevati. Il valore di OCR ricavato dall'unica prova edometrica eseguita nello strato B2 risulta praticamente unitario. Questa discrepanza di risultati può essere attribuita ad un effetto del campionamento.

5.5. Caratteristiche di resistenza al taglio

Le caratteristiche di resistenza al taglio del materiale naturale sono state investigate attraverso l'esecuzione di prove triassiali in condizioni non drenate (TX CIU). Le prove hanno riguardato ovviamente solo gli strati campionabili del sottosuolo (A1, B1 e B2).

I dati relativi alla condizione di rottura sono stati diagrammati sul piano (s' ; t) nei grafici delle figure da 5.11 a 5.13. I risultati delle prove triassiali sono stati raggruppati per strati che risultano omogenei in base alle caratteristiche di classificazione, per ottenere una stima dei parametri di resistenza che tenga conto di tutte le prove effettuate. I valori dei parametri della resistenza al taglio del materiale naturale in termini di tensioni efficaci sono stati ottenuti, per ciascuno strato, interpolando i dati con una relazione lineare mediante il metodo dei minimi quadrati (tabella 5.4).

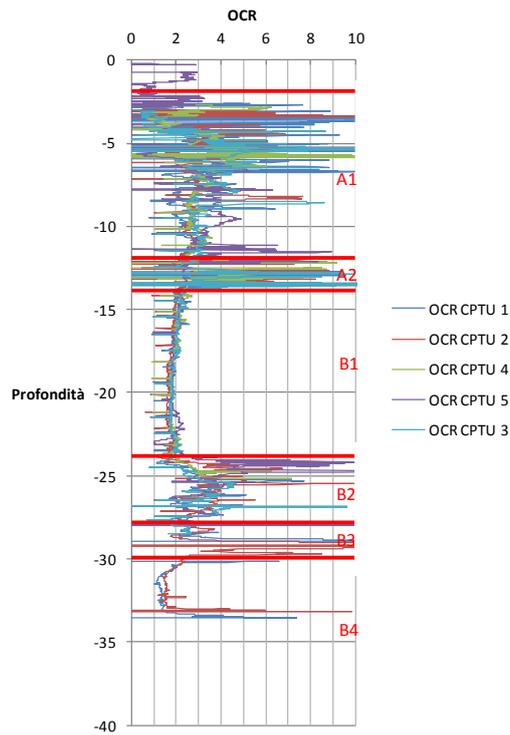


Figura 5.10: Profilo di OCR con la profondità ricavato dalle prove CPTU

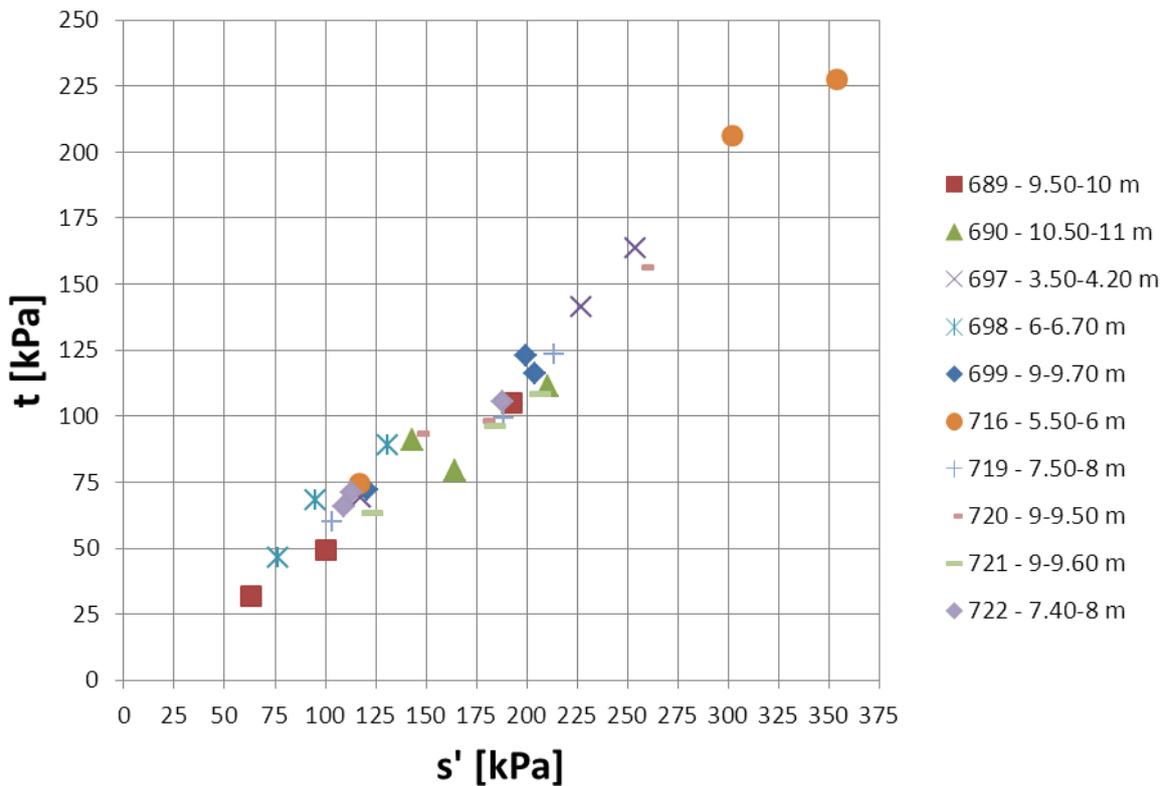


Figura 5.11: Rappresentazione dello stato tensionale a rottura per lo strato A1.

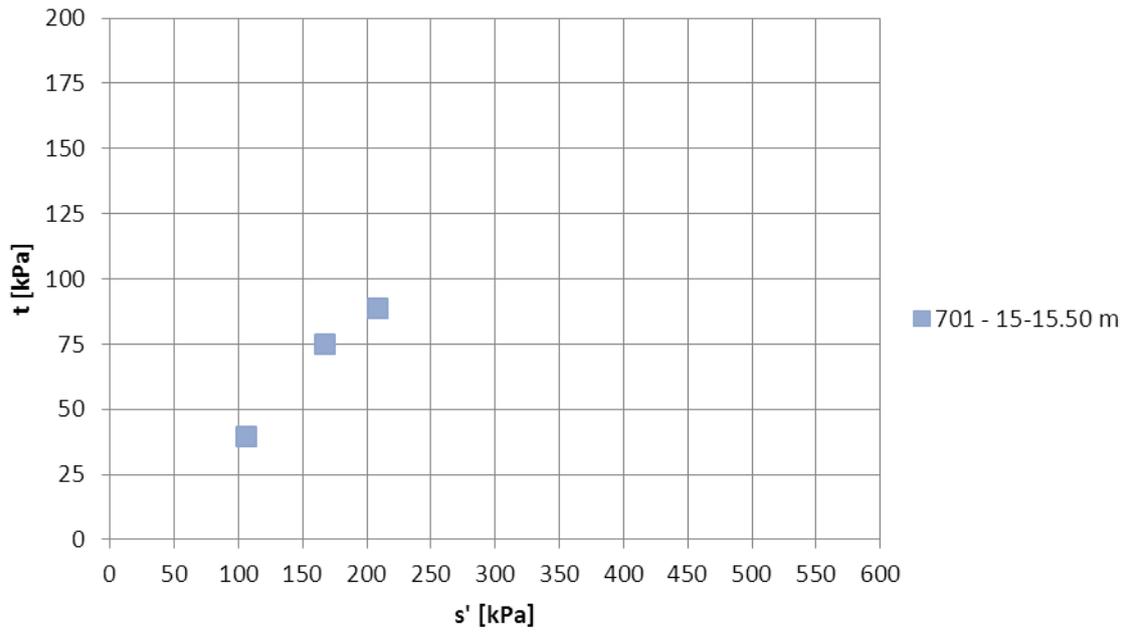


Figura 5.12: Rappresentazione dello stato tensionale a rottura per lo strato B1.

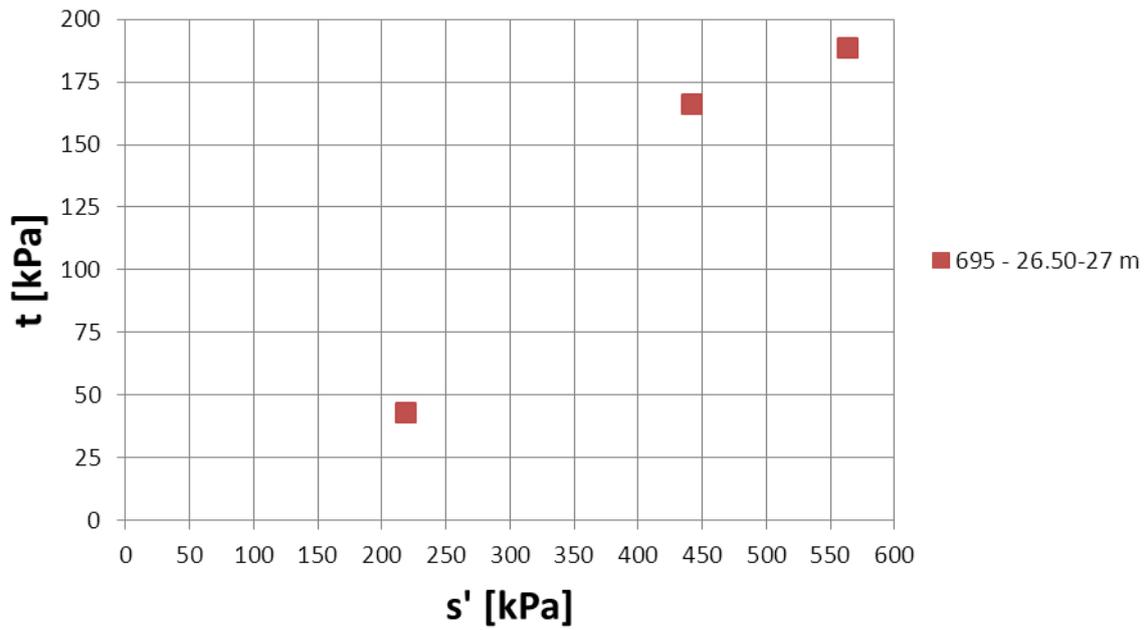


Figura 5.13: Rappresentazione dello stato tensionale a rottura per lo strato B2.

Tabella 5.4: Parametri di resistenza.

Complesso	Strato	φ' (°)	c' (kPa)
A	A1	36	0
B	B1	25	0
B	B2	20	0

5.6. Valori della resistenza alla punta da prove CPTU

Le prove CPTU effettuate nel maggio 2013 sono riportate nella figura 5.14. I profili con la profondità ottenuti dalle diverse prove sono sovrapposti in virtù della sostanziale uguaglianza delle quote del piano di campagna per ogni verticale. Dal grafico è possibile notare che, per gli strati argillosi B1 e B4, i valori di resistenza alla punta q_c hanno un andamento caratterizzato da una limitata variabilità ed i valori misurati sono inferiori a 2 MPa, mentre per le argille intermedie dello strato B2 si riscontrano valori maggiori. Lo strato A1 presenta valori di q_c più elevati e caratterizzati da una maggiore variabilità dovuta alla granulometria più grossolana ed alla già citata disomogeneità. La variabilità è più marcata fino ad una profondità di 7 m (-2 m s.l.m.), mentre nella restante parte dello strato i valori tendono a diminuire e l'andamento tende a stabilizzarsi. Infatti nella parte superiore dello strato - anche in riferimento alla composizione granulometrica accertata in laboratorio - è più corretto parlare di un limo con sabbia, mentre nella parte inferiore di un limo con argilla. Per gli strati sabbiosi A2 e B3 si hanno valori elevati di q_c , tipici dei materiali sabbiosi.

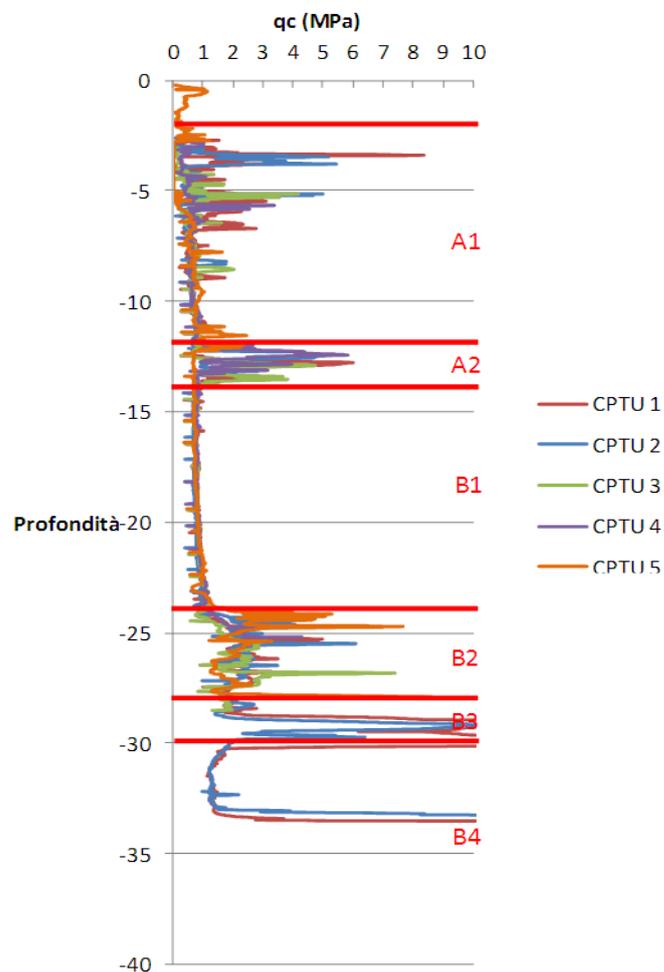


Figura 5.14: Profili penetrometrici.

5.7. Velocità delle onde di taglio e rigidezza trasversale dei terreni.

I valori della velocità di propagazione delle onde di taglio V_s , determinati attraverso le due prove con dilatometro sismico (SDMT 1, SDMT 2), sono riportati in funzione della profondità nel grafico di figura 5.15. Dal grafico si può notare che per gli strati A1, A2 e B1 il valore di V_s rimane pressoché costante nell'intorno dei 200 m/s. Per le argille intermedie dello strato B2, la V_s aumenta raggiungendo i 400 m/s e per le sabbie dello strato B3 sfiora i 500 m/s. I valori tendono poi a calare per le argille inferiori dello strato B4 su valori compresi tra 200 e 300 m/s.

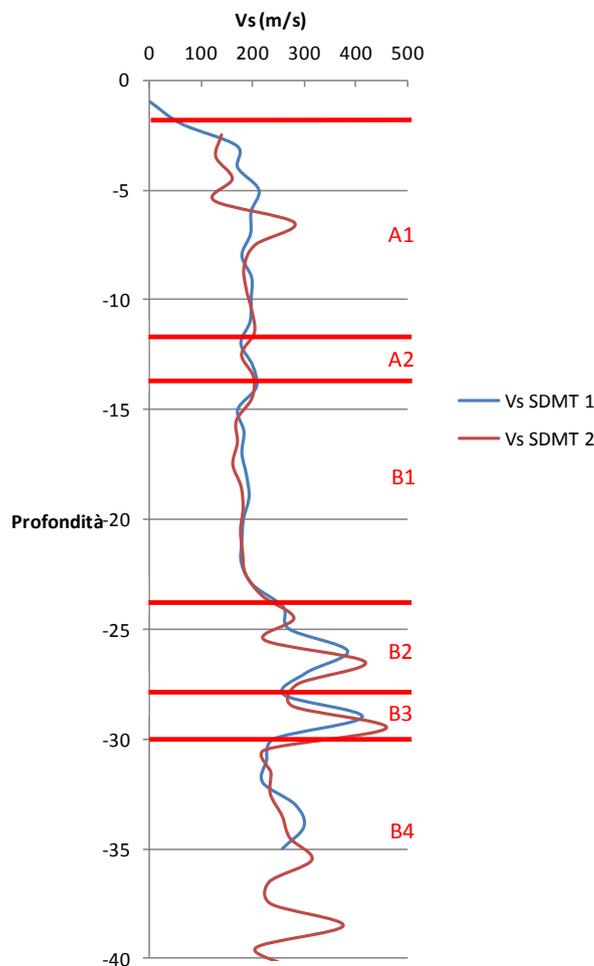


Figura 5.15: Profili della velocità delle onde di taglio.

I valori del modulo di rigidezza trasversale G_0 a piccole deformazioni, determinati tramite le prove di colonna risonante, sono riportati nel grafico di figura 5.16 unitamente a quelli ottenuti dall'interpretazione delle misure della velocità delle onde di taglio in sito. I valori dedotti dalle misure in sito risultano leggermente più elevati nei terreni più profondi, denotando essenzialmente un maggiore danneggiamento del campione durante le operazioni di prelievo.

Si riportano inoltre nelle figure da 5.17 a 5.22 l'interpretazione dei risultati delle sei prove di colonna risonante eseguite sui campioni appartenenti agli strati A1, B1, B2 e B4. Per ogni campione è riportato l'andamento del modulo di taglio G normalizzato rispetto al valore massimo G_0 e dello smorzamento D , entrambi in funzione della deformazione γ .

I dati sperimentali ottenuti dalle prove di colonna risonante sono quindi stati utilizzati per definire i parametri che entrano nelle relazioni analitiche che legano gli sforzi alle deformazioni ed il rapporto di smorzamento alle deformazioni, da impiegare per l'analisi di risposta sismica locale. A tal fine, esistono in letteratura numerosi modelli di comportamento dinamico; nel seguito si farà riferimento al modello di decadimento

iperbolico di Yokota (1981) definito dalla relazione:

$$\frac{G}{G_0} = \frac{1}{(1 + \alpha \gamma^\beta)} \quad (5.1)$$

mentre per lo smorzamento è stata impiegata la corrispondente legge di variazione esponenziale:

$$D = D_{\max} e^{\lambda \frac{G}{G_0}} \quad (5.2)$$

I coefficienti sperimentali α , β , D_{\max} e λ sono stati ricavati attraverso regressione lineare sui dati sperimentali. Per quanto riguarda gli strati sabbiosi A2 e B3, non essendo possibile eseguire prove di colonna risonante per l'impossibilità di procedere al campionamento, i modelli di comportamento dinamico sono definiti attraverso le curve elaborate da Seed & Idriss (1970), facendo riferimento ad un valore dell'indice di plasticità pari a zero (ipotesi di terreno incoerente).

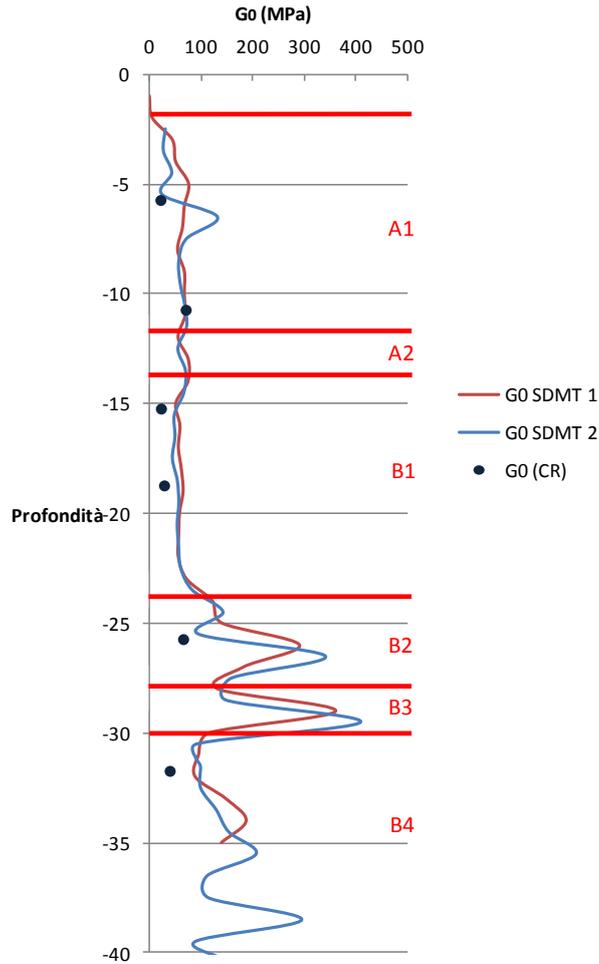


Figura 5.16: Profilo del modulo di rigidezza trasversale G_0 .

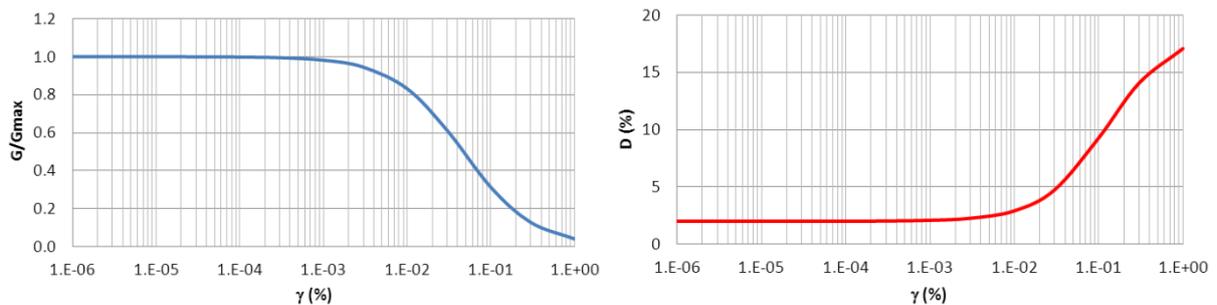


Figura 5.17: Caratterizzazione dinamica del campione 716.

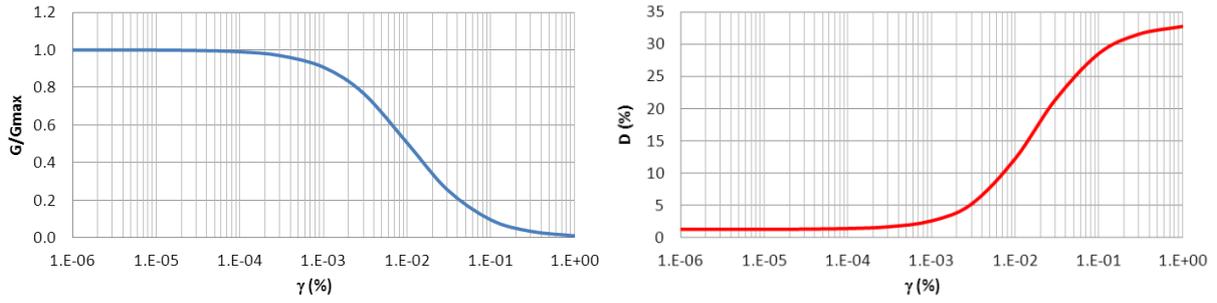


Figura 5.18: Caratterizzazione dinamica del campione 690.

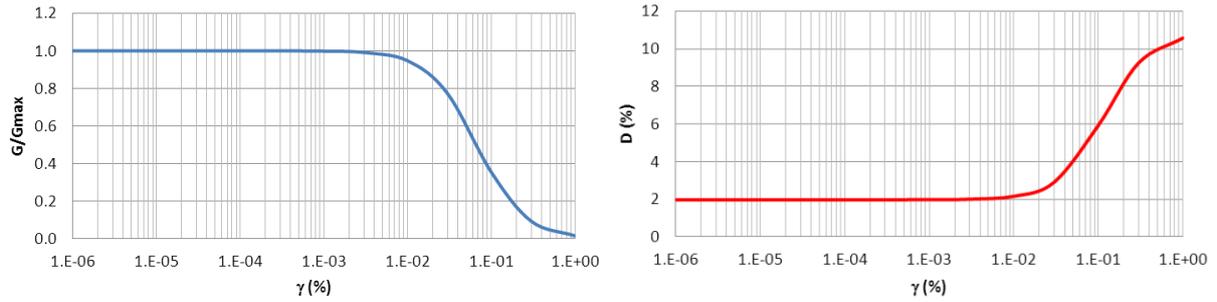


Figura 5.19: Caratterizzazione dinamica del campione 701.

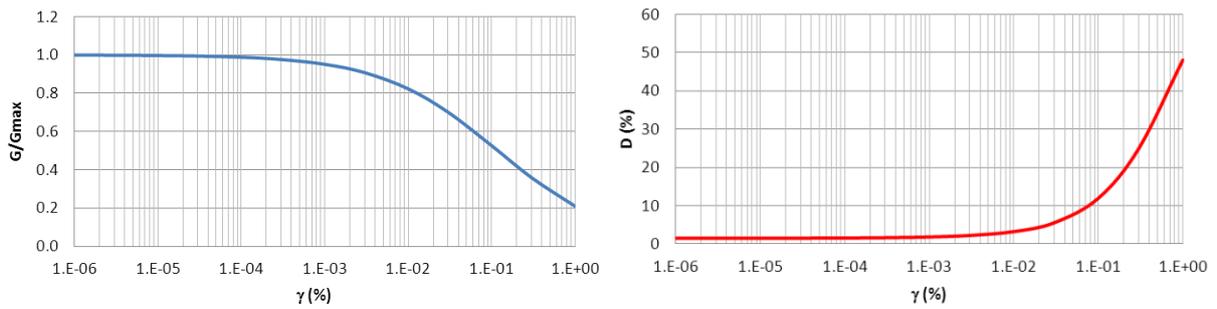


Figura 5.20: Caratterizzazione dinamica del campione 693.

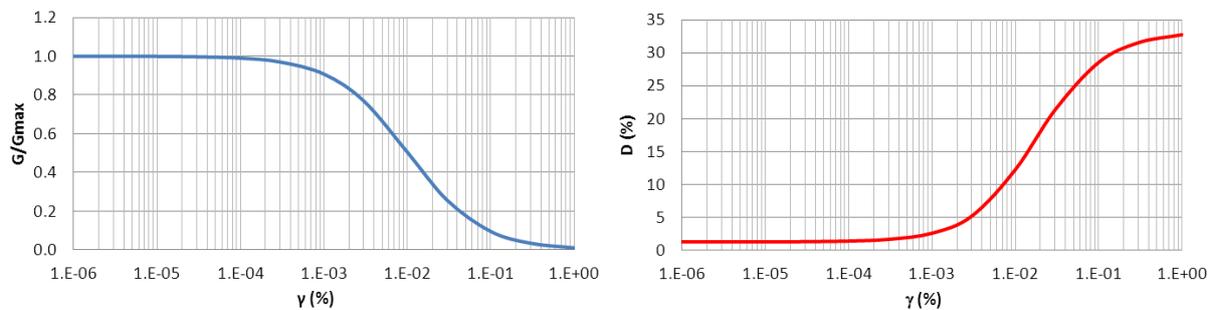


Figura 5.21: Caratterizzazione dinamica del campione 705.

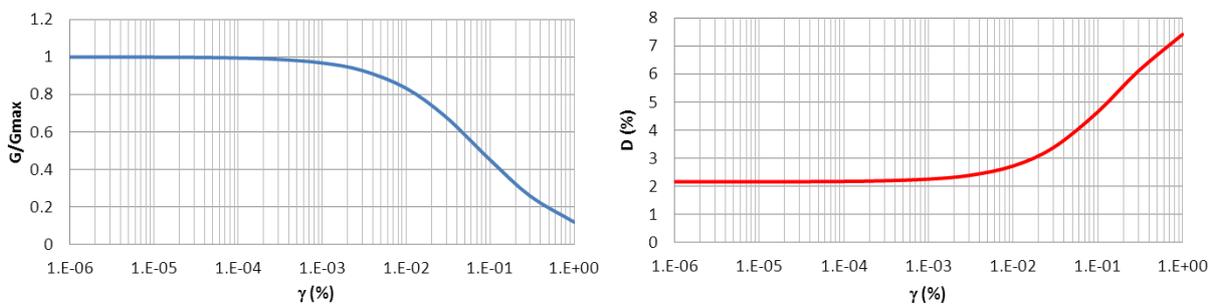


Figura 5.22: Caratterizzazione dinamica del campione 696.

5.8. Analisi di risposta sismica locale.

La caratterizzazione dinamica dei terreni di fondazione dell'edificio consente di effettuare una analisi di risposta sismica locale. L'analisi è stata effettuata come di consueto in una situazione di *free-field*, cioè trascurando la presenza dell'edificio, ed in condizioni monodimensionali, giustificate dalla stratigrafia praticamente orizzontale.

Per la definizione dell'input sismico sono stati selezionati sette accelerogrammi spettro-compatibili all'interno di diverse banche dati accelerometriche mediante due software specifici: Rexel 3.4 beta (Iervolino et al., 2010) e Scalcona-2.0 (Lai et Al., 2012).

Il software Rexel 3.4 beta permette l'estrazione di accelerogrammi da più banche dati, quali quella europea ESD (Ambraseys et al., 2004), quella italiana ITACA (Working Group ITACA 2010) e la banca dati Simbad (Smerzini e Paolucci, 2011), mediante un'interfaccia semplice elaborata in ambiente Matlab®. Il software Scalcona-2.0 consente quindi di ottenere un set di accelerogrammi spettro-compatibili specificamente per un sito ricadente all'interno del territorio toscano, per i periodi di ritorno di 50 anni, 75 anni, 101 anni, 475 anni, 712 anni e 949 anni.

L'analisi dinamica vera e propria è svolta attraverso il codice di calcolo Strata in cui il modello del sottosuolo consiste di un numero finito di strati piani e paralleli, aventi estensione orizzontale infinita, assimilato ad un mezzo elastico equivalente posto su un semispazio visco-elastico che rappresenta il *bedrock*. Ogni strato, considerato omogeneo ed isotropo, è caratterizzato dallo spessore h , dalla densità ρ , dal modulo di rigidezza trasversale G e dal fattore di smorzamento D . Il codice di calcolo, una volta definito l'*input sismico* al *bedrock*, fornisce lo spettro di risposta specifico per il sito in esame.

Pertanto, la prima informazione necessaria per la definizione dell'azione sismica sulla struttura è il valore dell'accelerazione di progetto del sito (a_g), a cui occorre scalare ognuno dei 7 accelerogrammi costituenti l'*input sismico*. Per definire tale parametro è stato utilizzato lo strumento di calcolo Spettri-NTCver.1.0.3 rilasciato dal Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici. I parametri che occorre definire per giungere alla stima dell'accelerazione di progetto sono la vita di riferimento e lo stato limite ultimo prescelto. Con riferimento alle *Linee Guida per la valutazione e riduzione del rischio sismico del patrimonio culturale* - allineamento alle Nuove Norme Tecniche per le Costruzioni - è stata scelta una durata della vita nominale pari a 50 anni, una classe d'uso III e lo stato limite di salvaguardia della vita, SLV, quale stato limite ultimo, ricavando così i principali parametri per la definizione dell'azione sismica per il sito in cui sorge l'edificio della Sapienza a_g , F_0 e T_c^* .

Attraverso la disaggregazione del valore di a_g , per lo stesso sito è stato possibile stabilire la magnitudo M e la distanza epicentrale. Con la disponibilità di tutte queste informazioni è quindi possibile selezionare in modo appropriato gli accelerogrammi necessari all'analisi di risposta sismica locale. Nella tabella 5.5 sono riportati i dati necessari alla definizione del modello utilizzato per l'analisi di risposta sismica locale.

Tabella 5.5: Dati del modello sismostratigrafico.

Denominazione	Spessore (m)	γ (kN/m ³)	V_s (m/s)	Descrizione
A1	12	19,35	200	Limi con sabbie e argille
A2	2	18,07	200	Sabbia fine limosa
B1	10	17,08	180	Argille superiori
B2	4	19,88	320	Argille inferiori
B3	2	19,11	360	Sabbia fine limosa
B4	10	17,66	280	Argille inferiori

Per ogni strato sono state altresì inserite le curve di variazione del modulo di taglio G e del rapporto di smorzamento D in funzione del livello di deformazione già discusse in precedenza e riportate nelle figure da 5.17 a 5.22. Per quanto riguarda gli strati A2 e B3, valgono le considerazioni già esposte per quanto riguarda la caratterizzazione dinamica, mentre come ulteriore ipotesi di lavoro, al di sotto dello strato B4 è stato inserito uno stato sabbioso fino alla profondità di 50 metri dal piano campagna, oltre la quale è stata ipotizzata la presenza del *bedrock*. La caratterizzazione dinamica dello strato sabbioso è stata effettuata utilizzando i dati disponibili in letteratura riguardo il sottosuolo di Piazza dei Miracoli.

L'analisi di risposta sismica locale è stata quindi effettuata calcolando la media degli effetti, in termini di accelerazione nel tempo alla profondità del piano di fondazione, di ciascuno dei sette accelerogrammi

selezionati. La figura 5.23 riporta i risultati finali in termini di spettro di risposta elastico, confrontati con lo spettro di normativa per suolo tipo A per i periodi di ritorno pari a 475 e 712 anni, mentre la figura 5.24 riporta lo spettro di risposta elastico relativamente ad un suolo di tipo C ed un periodo di ritorno pari a 712 anni. Sebbene le analisi siano state effettuate con entrambi i set di accelerogrammi selezionati con i software REXEL e SCALCONA, lo spettro riportato è stato ricavato utilizzando il segnale di input selezionato mediante il software SCALCONA in quanto calibrato sul territorio Toscano e sulle sue zone sismogenetiche.

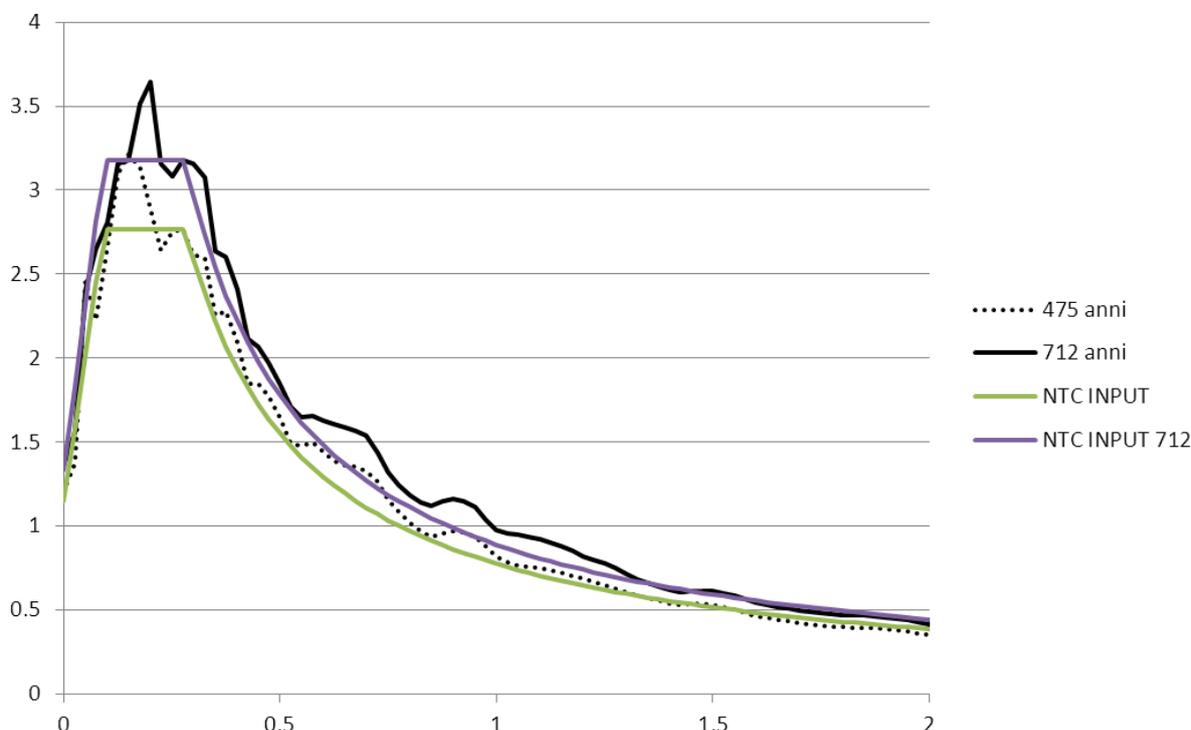


Figura 5.23: Spettro di risposta per il sito in cui sorge l'edificio della Sapienza di Pisa, suolo tipo A.

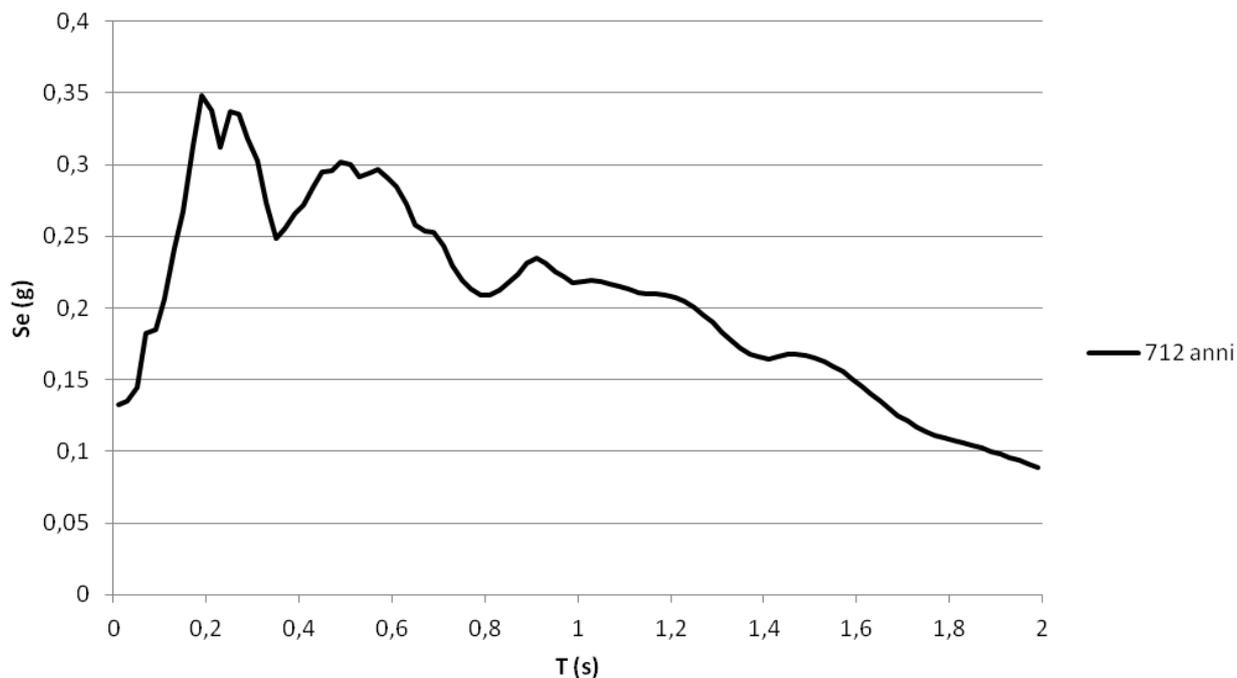


Figura 5.24: Spettro di risposta per il sito in cui sorge l'edificio della Sapienza di Pisa, suolo tipo C.

6. RILIEVO DELLE STRUTTURE

6.1. Strutture Verticali

a cura di Silvia Caprili, Federico Mangini

In assenza di informazioni sufficientemente dettagliate relative alle strutture verticali portanti dell'edificio, sono state eseguite campagne di indagine in situ finalizzate alla determinazione delle tessiture murarie presenti e della resistenza meccanica delle principali tipologie di pareti verticali. In particolare, per l'individuazione della tipologia di tessitura muraria sono stati eseguiti saggi in situ mediante rimozione di intonaco su porzioni di parete di dimensione minima di 50x50 cm con successiva endoscopia per la valutazione della presenza di un nucleo interno di riempimento o, viceversa, di soli paramenti murari accostati.

6.1.1 Indagini sui paramenti murari

Le indagini finalizzate alla determinazione delle varie tipologie di tessitura muraria hanno previsto le seguenti attività.

- Saggi mediante rimozione di intonaco diffusi ai vari piani del fabbricato. La localizzazione dei saggi è stata effettuata in funzione delle informazioni reperite circa l'origine e l'evoluzione storica del fabbricato, al fine di individuare le diverse tipologie di tessitura muraria (murature in pietra, in mattoni, miste pietra-mattoni, con ricorsi e listature, ...) e la loro successione cronologica, le connessioni tra pareti adiacenti, la presenza di ammorsamenti tra pareti ortogonali e, infine, la presenza di aperture (porte, finestre, archi) successivamente tamponate ed oggi conseguentemente non visibili a occhio nudo.
- Endoscopie diffuse in corrispondenza dei saggi precedentemente descritti finalizzate alla valutazione dell'eventuale presenza di un nucleo di riempimento interno nel caso di murature a doppio paramento.

Le indagini eseguite sono state organizzate in modo da minimizzare eventuali disagi alle attività tuttora svolte all'interno del fabbricato e da recare il minor danno agli affreschi e alle decorazioni presenti e da conservare. I saggi sono stati posizionati in modo da ricavare informazioni sul maggior numero possibile di pareti murarie e sono stati eseguiti rimuovendo l'intonaco in una porzione di parete di dimensioni approssimativamente 50x50 cm, come visibile ad esempio nelle figure 6.1.a e 6.1.b.

I saggi sulle tessiture murarie sono stati eseguiti in conformità con le indicazioni della Soprintendenza BAPSAE di Pisa e Livorno, essendo il fabbricato in esame soggetto a tutela: sono state pertanto effettuate preliminarmente indagini stratigrafiche, a cura di una ditta di restauro incaricata dall'Università di Pisa, finalizzate a individuare prima della rimozione dell'intonaco l'eventuale presenza di affreschi o decorazioni di pregio storico artistico (figura 6.1.c). Laddove possibile, le indagini sono state effettuate su entrambi i lati della parete muraria per evidenziare eventuali differenze tra paramento interno e paramento esterno.

Le endoscopie sono state eseguite in corrispondenza di tutti i punti in cui è stata effettuata la rimozione dell'intonaco per la verifica della tessitura muraria, inclusi i saggi effettuati durante la prima campagna di indagine. L'esecuzione delle endoscopie ha permesso la raccolta di video e fotografie raffiguranti la reale composizione interna della parete. Le riprese sono state eseguite, previa rimozione della polvere e del materiale di risulta, attraverso un foro del diametro di 20 mm praticato ortogonalmente all'asse della parete, figura 6.2, fino ad una profondità di 40 cm.

Nelle figure da 6.3 a 6.8 sono riportate le piante dei vari piani del fabbricato con l'indicazione dei saggi eseguiti. Al fine di permettere una rapida individuazione e catalogazione delle indagini, a ciascun saggio è stato attribuito un codice, definito come di seguito riportato.

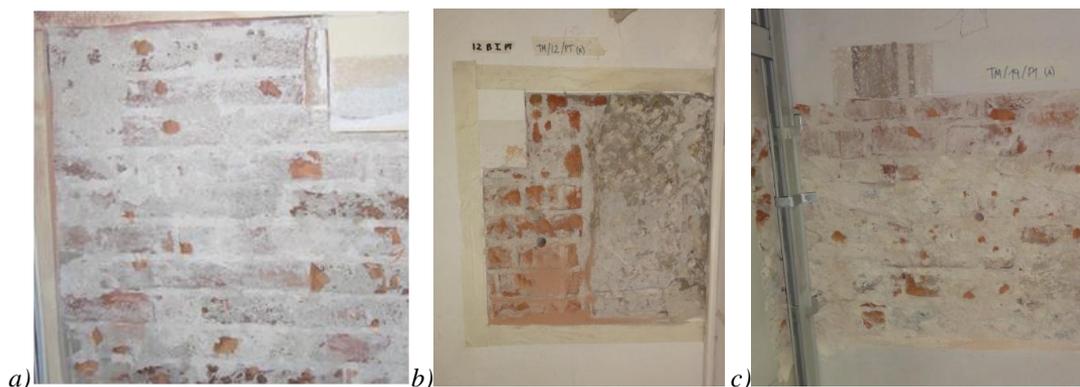


Figura 6.1.a-b: Esempi di stonacature per l'individuazione delle tessiture murarie (indagini eseguite a piano terra), c) dettaglio stratigrafia eseguita prima della stonacatura ad opera di restauratori (piano primo).



Figura 6.2: Fasi delle indagine endoscopiche: a) esecuzione del foro; b) pulizia del foro; c) endoscopia.

In particolare, i saggi sulle tessiture murarie sono indicati come:

TM/V01/PT

In cui:

- TM Tessitura muraria;
- V Indica la I fase di esecuzione dei saggi;
- 01 Indica il numero progressivo del saggio eseguito;
- PT (P1, o P2) Indica il piano in cui è stata eseguita l'indagine.

oppure:

TM+C/01A/P

In cui:

- TM Tessitura muraria;
- C Saggio eseguito sul cantonale per verificare la presenza di ammorsamento;
- 01 Indica il numero progressivo del saggio eseguito;
- A Nel caso in cui sia stato eseguito il saggio su entrambi i paramenti murari, la A e B indicano quale dei due sia preso in considerazione;
- PT (P1 o P2) Indica il piano in cui è stata eseguita l'indagine.

mentre le endoscopie (in verde nelle piante) sono indicate mediante il seguente codice:

End./01A I/PT

In cui:

- End. Endoscopia;
- 01A Numero del saggio sulla tessitura muraria sul quale è eseguita l'endoscopia;
- I Nel caso in cui il saggio sulla muratura comprenda due paramenti murari distinti, I o II indica su quale dei due lati è stata eseguita l'endoscopia;
- PT (P1 o P2) Indica il piano in cui è stata eseguita l'indagine.

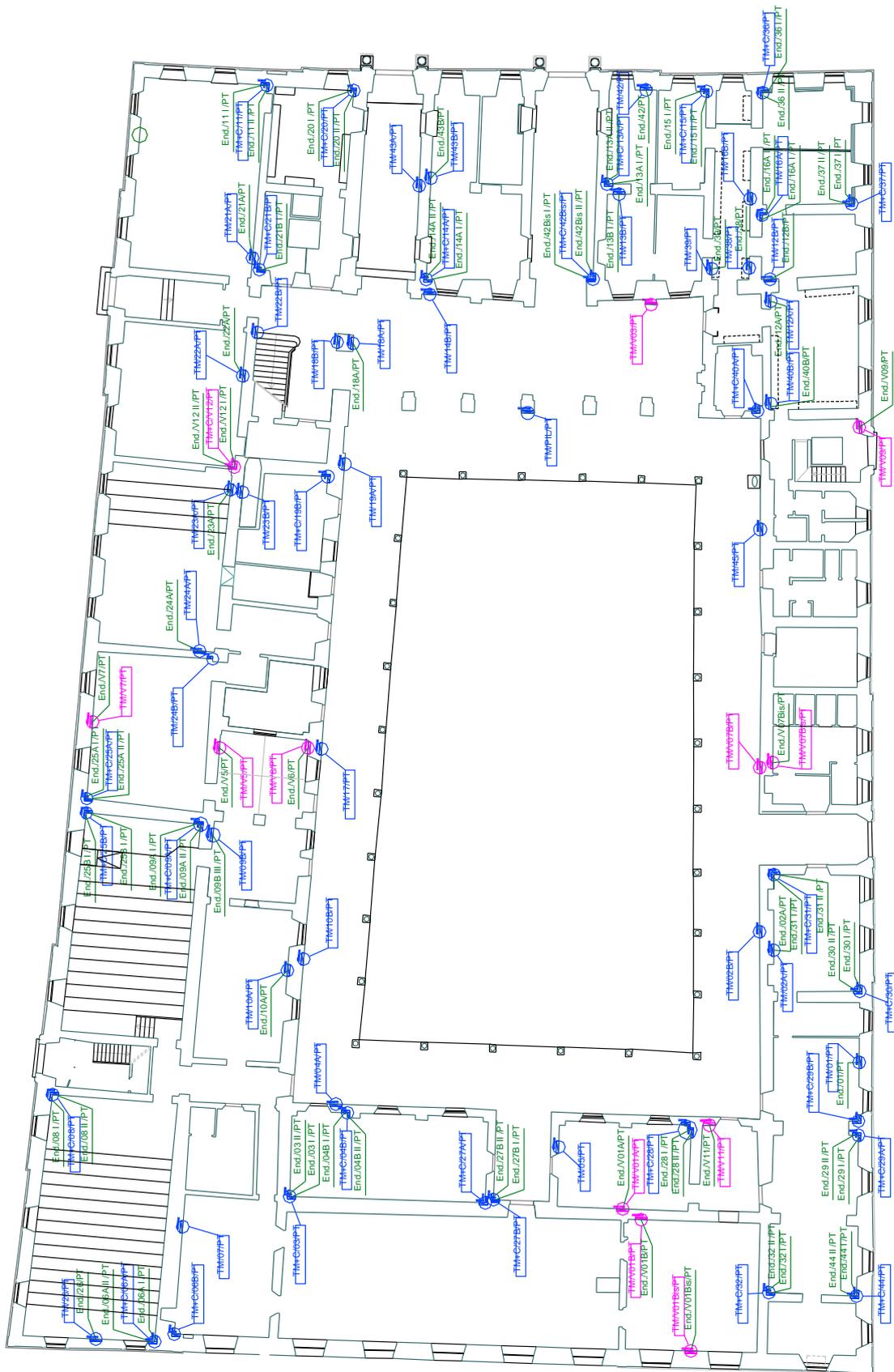


Figura 6.3: Individuazione saggi tessiture murarie ed endoscopie, Piano Terra.

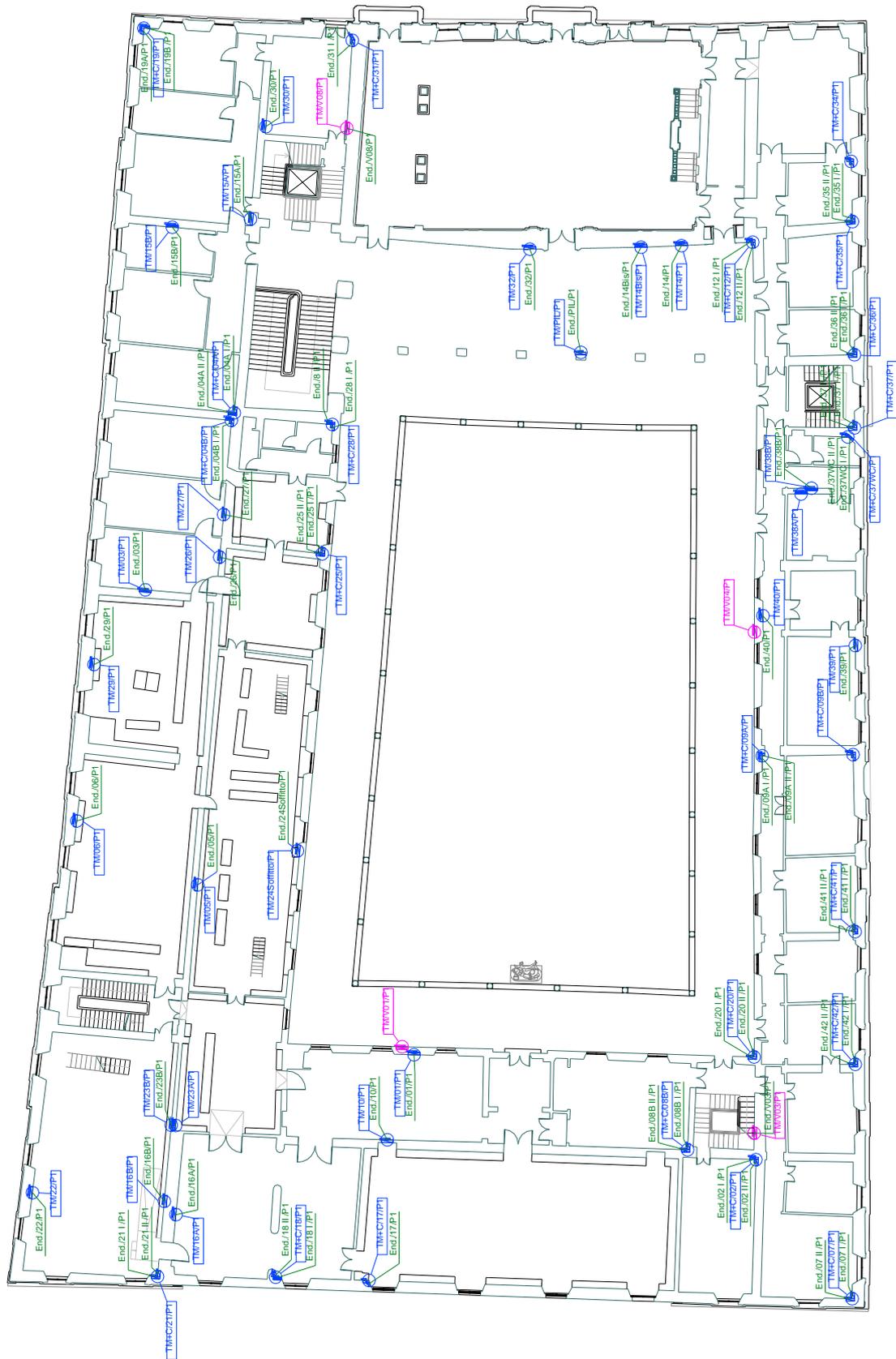


Figura 6.4: Individuazione saggi tessiture murarie ed endoscopie, Piano Primo.

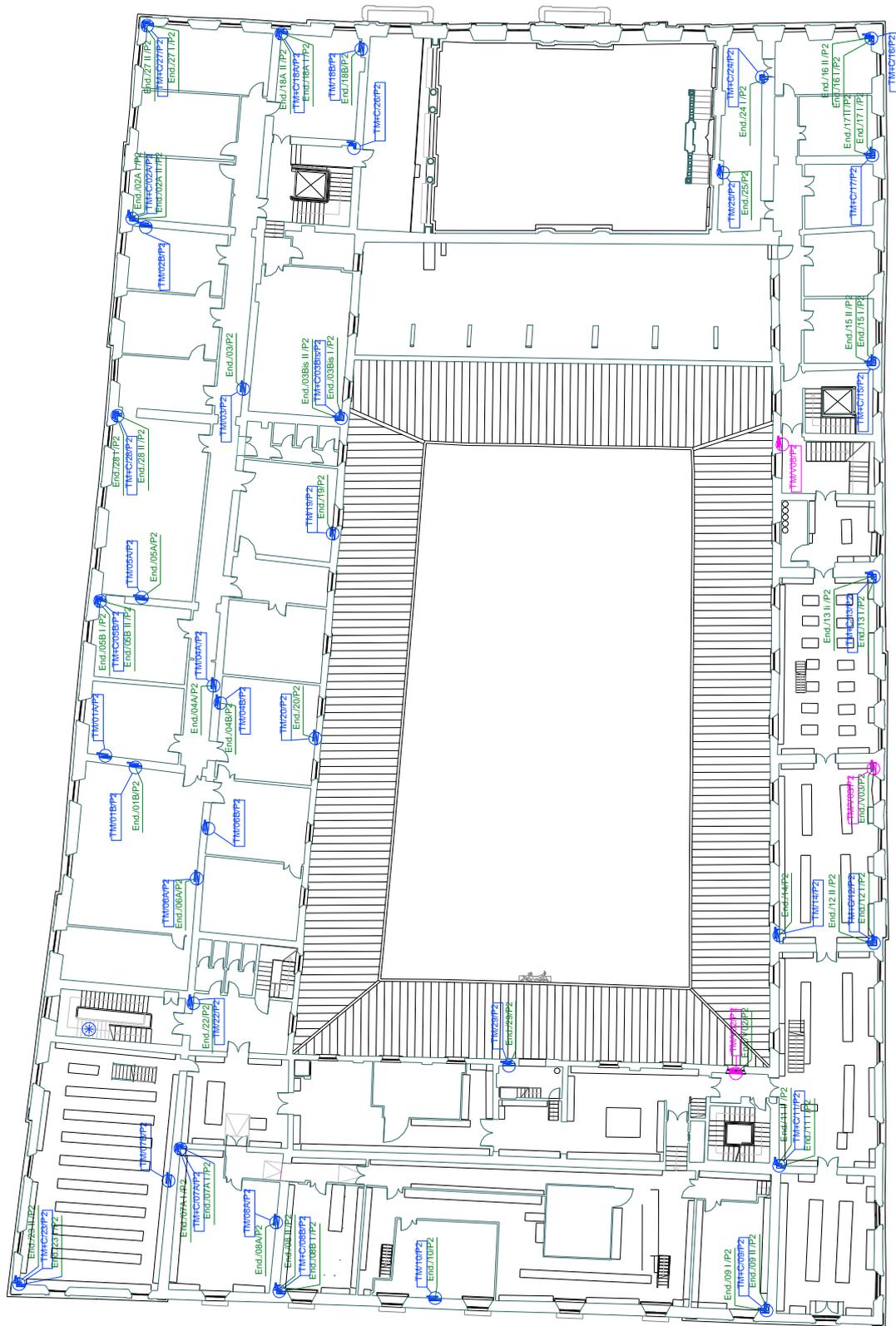


Figura 6.5: Individuazione saggi tessiture murarie ed endoscopie, Piano Secondo.

Caratterizzazione delle tessiture murarie.

L'esecuzione dei saggi sulle tessiture murarie ha permesso di individuare sei diverse tipologie di murature, di seguito riportate.

1. *Muratura in mattoni pieni*: caratterizzata dalla presenza di mattoni pieni in laterizio di forma regolare aventi tessitura regolare. I vari strati di laterizio sono connessi fra loro mediante strati di malta (figura 6.6.a).
2. *Muratura in mattoni pieni e pietre a spacco irregolari*, caratterizzata dalla presenza di mattoni pieni in laterizio ed elementi lapidei di forma e dimensioni irregolari. Gli elementi lapidei si presentano con angoli vivi e i vari elementi sono connessi fra loro mediante strati di malta (figura 6.6.b).
3. *Muratura in mattoni pieni e pietra a spacco sbozzata*, caratterizzata dalla presenza di mattoni pieni in laterizio ed elementi lapidei di dimensioni variabili. I vari elementi sono connessi fra loro mediante strati di malta (figura 6.7.a).
4. *Muratura in mattoni pieni e pietra squadrata*, caratterizzata dalla presenza di mattoni pieni in laterizio e elementi lapidei squadrati di dimensioni variabili. Gli elementi sono connessi fra loro mediante strati di malta (figura 6.7.b).
5. *Muratura in mattoni pieni e pietra squadrata con ricorsi*, caratterizzata dalla presenza di mattoni pieni in laterizio e elementi squadrati di dimensioni omogenee. Gli elementi di laterizio e lapidei sono disposti in modo da formare dei ricorsi alternati e i vari elementi sono connessi fra loro mediante strati di malta (figura 6.8.a).
6. *Muratura in pietra a spacco irregolare*, caratterizzata da elementi lapidei di dimensioni e forma variabile, connessi fra loro mediante strati di malta (figura 6.8.b).

Le figure 6.6, 6.7 e 6.8 mostrano alcuni esempi delle tessiture murarie individuate; il dettaglio dei saggi eseguiti e dei risultati delle endoscopie sono riportati nelle schede in allegato. In relazione a quanto osservato in situ, la figura 6.9 si riporta una sintesi grafica di quanto direttamente osservato dalle sulle pareti verticali del piano terra; diversi colori sono stati assegnati alle tipologie di tessitura muraria sopra elencate, come visibile nella sottostante legenda. Analoghe considerazioni sono state eseguite anche al piano primo (figura 6.10) e al piano secondo (figura 6.11). Si sottolinea che l'estensione della tipologia di tessitura muraria individuata mediante il saggio all'intero paramento murario come riportato nelle figure 6.9, 6.10 e 6.11 è stata effettuata solamente in corrispondenza delle pareti verticali di cui si conosce con relativa certezza l'evoluzione storica, lasciando conseguentemente non tipologicamente definiti i setti murari su cui non sono state eseguite indagini dirette (in bianco nelle figure 6.9, 6.10 e 6.11). La definizione della tipologia muraria di tali pareti, e la conseguente assegnazione di parametri di resistenza, deve essere effettuata tenendo conto di opportune valutazioni relative alle successive modifiche, ampliamenti e demolizioni di porzioni del fabbricato nonché in relazione a quanto messo in luce dall'analisi storico critica.

Dall'analisi delle tessiture murarie, è possibile in particolare notare un elevato livello di complessità dei paramenti murari in corrispondenza della zona prospiciente Via Curtatone e Montanara al piano terra, sotto i locali dell'Aula Magna Nuova. Questa zona del fabbricato, come specificato nella relazione storica, fu oggetto di numerosi rifacimenti. Nei documenti dell'epoca si fa riferimento alla presenza di mattoni forati a "due o tre fori" che vennero inseriti per rafforzare le murature esistenti in seguito alle mutate esigenze del fabbricato.

In relazione alle indagini effettuate in situ precedentemente descritte, è stata riscontrata in corrispondenza delle pareti nell'angolo tra Via Curtatone e Montanara e Via della Sapienza la presenza di alcune pareti affrescate internamente rivestite con elementi in laterizio forato. Una situazione analoga è stata inoltre individuata in corrispondenza delle pareti principali del lato corto del Palazzo lato Via Curtatone e Montanara, dove internamente è presente un rivestimento in laterizio. Dal momento che non è stato possibile verificare il grado connessione di questo paramento con quello originario né la sua effettiva consistenza, tale contributo è stato trascurato nelle successive analisi e verifiche. Elementi in laterizio sono stati inoltre diffusamente riscontrati in corrispondenza delle pareti situate al di sotto dell'Aula Magna Nuova parallele al lato lungo dell'edificio (pareti presenti solamente al piano terra), costituite da una muratura mista di laterizio e pietra, come evidenziato dalle indagini effettuate in situ (figura 6.9).



a)



b)

Figura 6.6: a) Muratura in mattoni pieni, TM+C/44/PT, b) Muratura in mattoni pieni e pietre a spacco irregolari, TM+C/08/PT.



a)



b)

Figura 6.7: a) Muratura in mattoni pieni e pietre a spacco sbazzate, TM+C/13A/PT, b) Muratura in mattoni pieni e pietre squadrate, TM+C/42Bis/PT

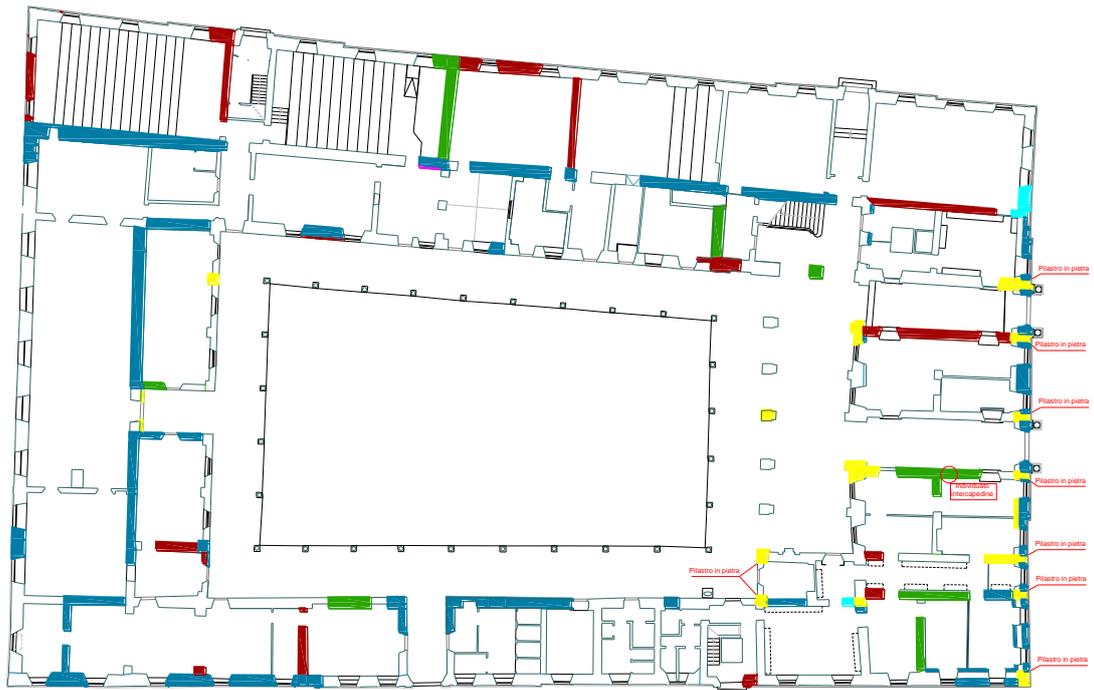


a)



b)

Figura 6.8: a) Muratura in mattoni pieni e pietre squadrate con ricorsi, TM+C/11/PT, b) Muratura in pietre a spacco irregolari, TM/09B/PT.



Muratura in mattoni pieni	■	Muratura in mattoni e pietra squadrata	■
Muratura in mattoni e pietra a spacco irregolare	■	Muratura in mattoni e pietra squadrata con ricorsi	■
Muratura in mattoni e pietra a spacco sbazzata	■	Muratura in pietra a spacco irregolare	■

Figura 6.9: Esito indagini su tessiture murarie, piano terra.



Muratura in mattoni pieni	■	Muratura in mattoni e pietra squadrata	■
Muratura in mattoni e pietra a spacco irregolare	■	Muratura in mattoni e pietra squadrata con ricorsi	■
Muratura in mattoni e pietra a spacco sbazzata	■	Muratura in pietra a spacco irregolare	■

Figura 6.10: Esito indagini su tessiture murarie, piano primo.



Figura 6.11: Esito indagini su tessiture murarie, piano secondo.

Per quanto concerne i risultati delle endoscopie, sono state riscontrate due categorie distinte di strutture verticali: la prima caratterizzata da setti murari composti da un paramento compatto con una sezione interna totalmente piena (figure 6.12 e 6.13), la seconda caratterizzata dalla presenza di due paramenti esterni di spessore variabile e dalla presenza di spazi vuoti di modesta entità talvolta riempiti con materiale sciolto di piccola taglia (figure 6.14 e 6.15).

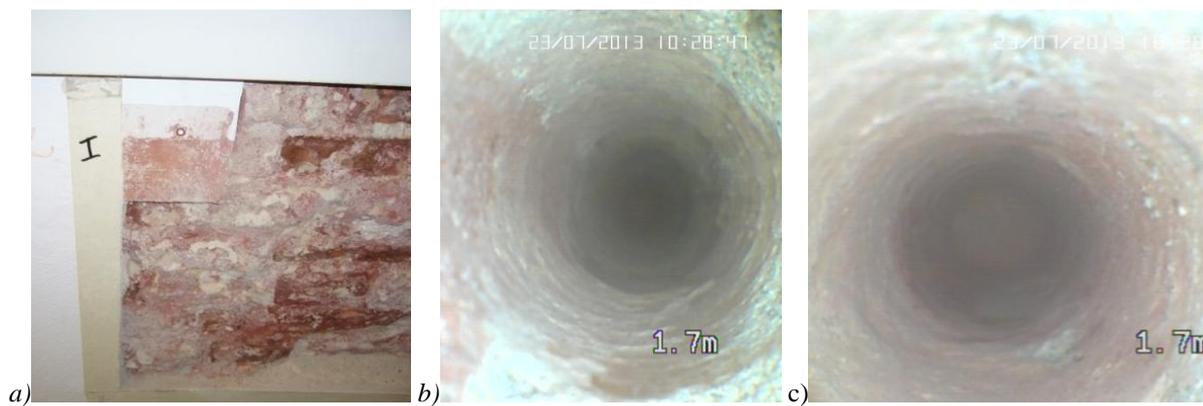


Figura 6.12: a) Esecuzione dell'endoscopia in corrispondenza del Saggio TM+C/32/PT, b) End./32 II/PT, Profondità 5 cm, c) End./32 II/PT, profondità 25 cm

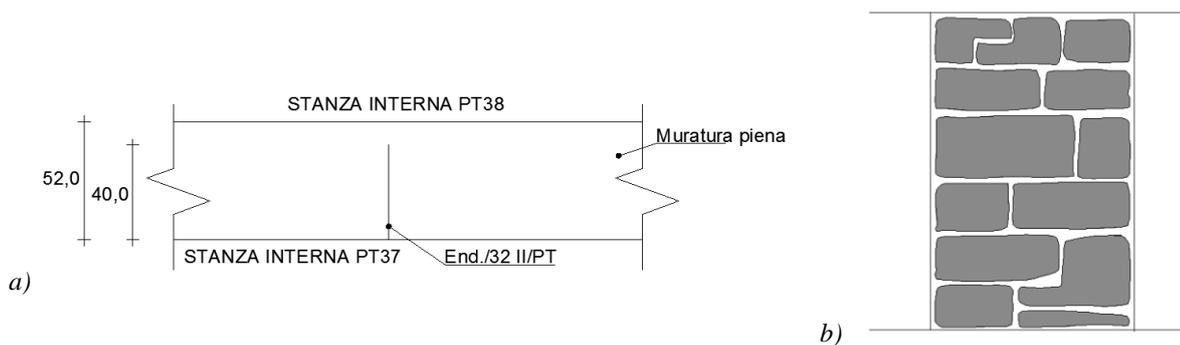


Figura 6.13: a) Schema dell'endoscopia nel paramento murario esaminato, b) esempio di paramento compatto.



Figura 6.14: a) Esecuzione dell'endoscopia in corrispondenza del saggio TM/09B/PT, b) Saggio TM+C/09A/PT, c) End./09BPT, Profondità 25 cm.

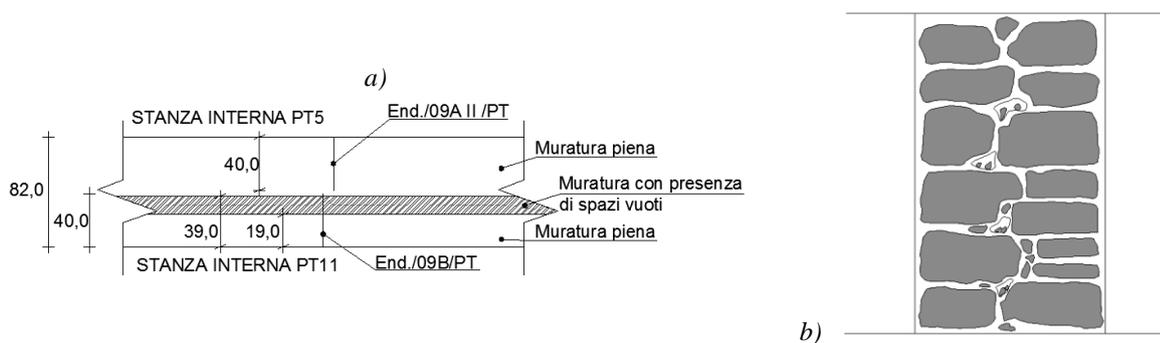
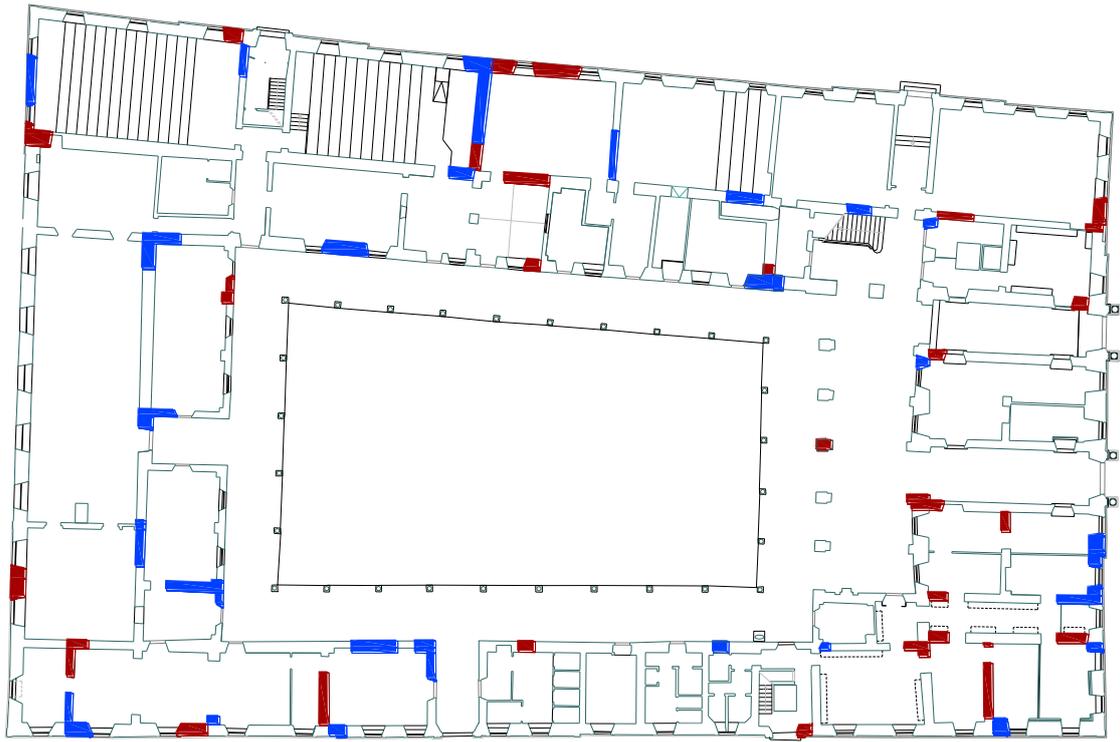


Figura 6.15: Schema dell'endoscopia nel paramento murario esaminato; e) esempio di paramento misto.

Le figure 6.16, 6.17 e 6.18 riportano le schematizzazioni delle disposizioni delle due tipologie di paramento per i piani terra, primo e secondo del fabbricato.

Grado di ammorsamento delle pareti

Dall'osservazione dei saggi sui cantonali è stato possibile determinare la presenza o meno dell'ammorsamento fra le pareti ortogonali. Le informazioni ottenute sono limitate al solo paramento analizzato, in quanto non tutti i saggi sono stati eseguiti su entrambi i lati della muratura. All'interno del Palazzo della Sapienza sono state individuate sia pareti con ammorsamento in corrispondenza dei cantonali d'angolo sia pareti prive di ammorsamento. In alcuni casi non è stato possibile determinare la presenza o meno dell'ammorsamento fra le murature ortogonali. Le figure 6.19, 6.20 e 6.21 riportano i risultati delle indagini sui cantonali appartenenti ai piani terra, primo e secondo.



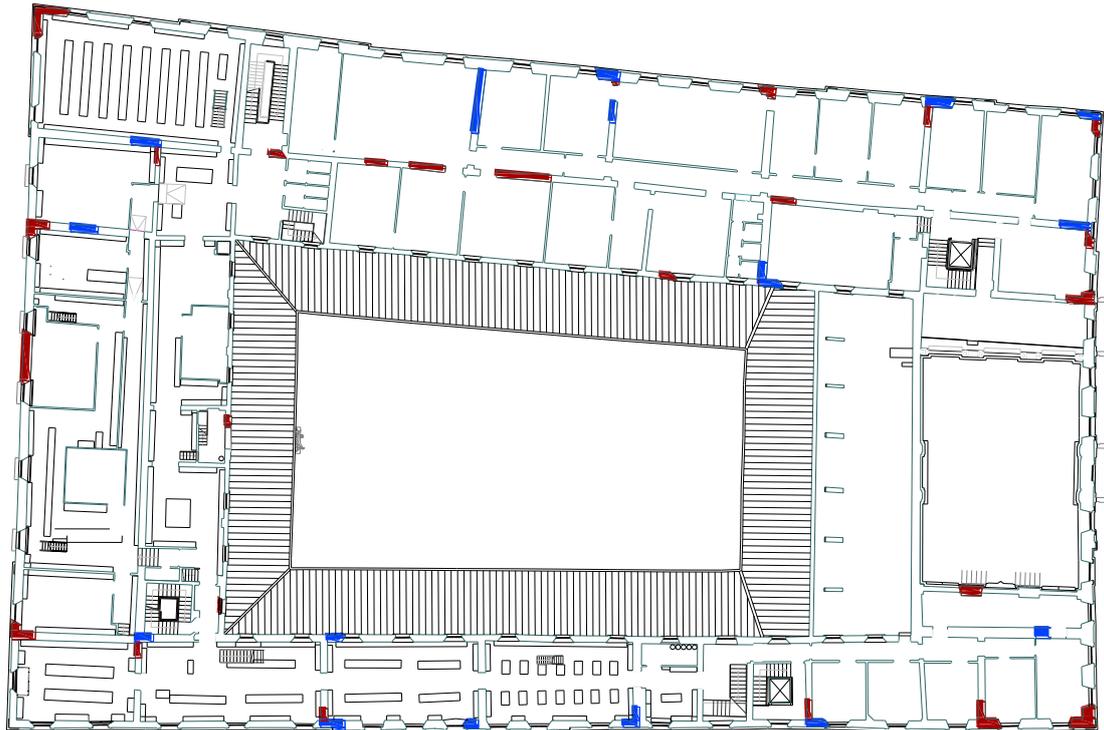
Paramento compatto ■ Paramento misto ■

Figura 6.16: Risultati delle endoscopie, piano terra.



Paramento compatto ■ Paramento misto ■

Figura 6.17: Risultati delle endoscopie, piano primo.



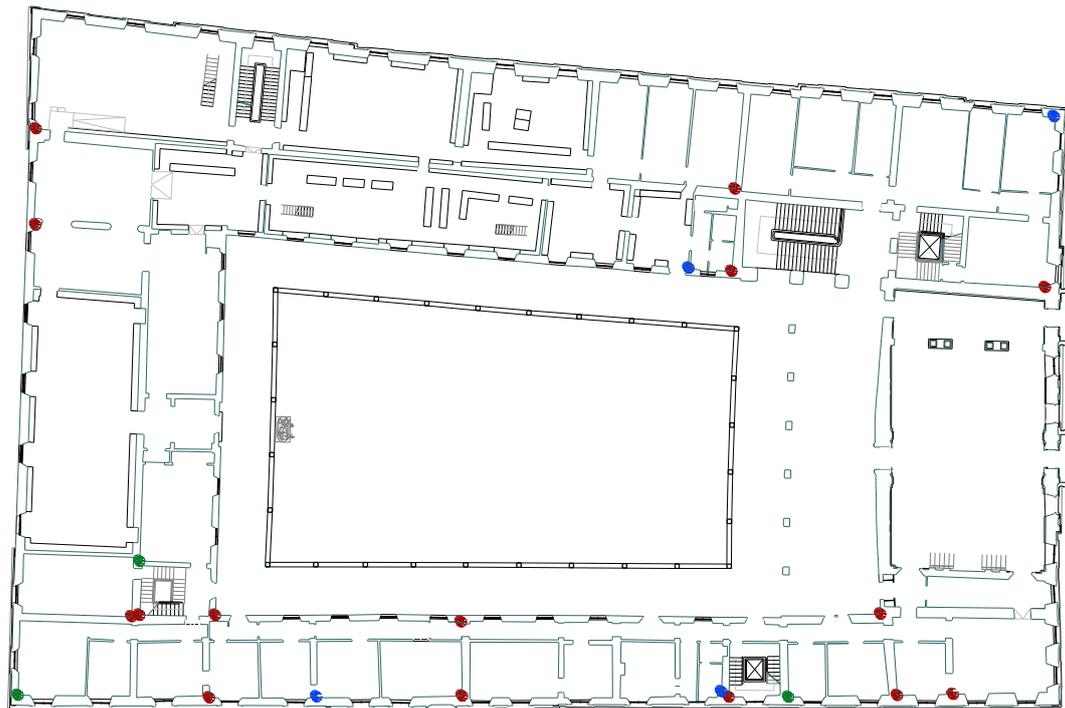
Paramento compatto ■ Paramento misto ■

Figura 6.18: Risultati delle endoscopie, piano secondo.



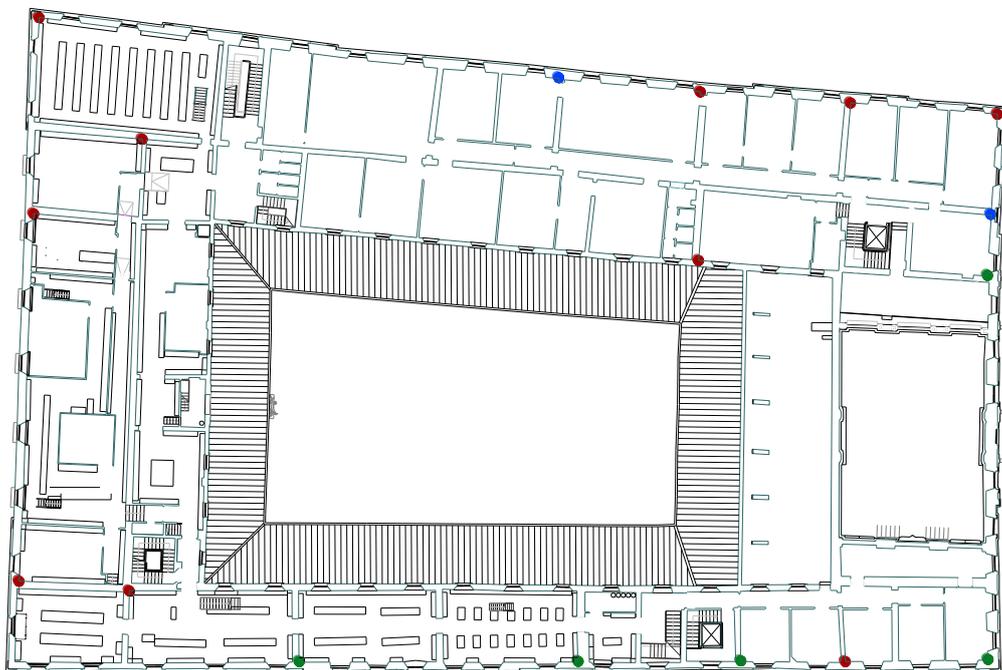
Cantonale con ammorsamento ■ Cantonale senza ammorsamento ■ Cantonale non definito ■

Figura 6.19: Risultati delle indagini sui cantonali, Piano Terra.



Cantonale con ammortamento ■ Cantonale senza ammortamento ■ Cantonale non definito ■

Figura 6.20: Risultati delle indagini sui cantonali, Piano Primo.



Cantonale con ammortamento ■ Cantonale senza ammortamento ■ Cantonale non definito ■

Figura 6.21: Risultati delle indagini sui cantonali, Piano Secondo.

6.1.2 Classificazione delle strutture murarie

In relazione ai risultati delle indagini condotte sulle varie pareti verticali mediante rimozione dello strato di intonaco e tenendo in considerazione il percorso storico-evolutivo del fabbricato, è stata effettuata una ipotesi di distribuzione delle tessiture murarie ai diversi piani dell'edificio. Le figure 6.23, 6.24 e 6.25 presentano le piante del piano terra, primo e secondo dell'edificio e l'indicazione delle tipologie di muratura, distinguendo tra muratura di mattoni pieni, muratura in mattoni e pietra a spacco irregolare o sbazzata, muratura in mattoni e pietra squadrata con e senza ricorsi e, infine, muratura in pietra a spacco irregolare (figura 6.22).

Il piano terra del Palazzo La Sapienza (figura 6.23) è costituito da due tipologie prevalenti di murature: muratura mista in mattoni e pietra a spacco irregolare nella porzione esterna prospiciente Piazza Dante e muratura in mattoni pieni nella porzione interna lato Piazza Dante, lato Via dell'Ulivo e Vicolo della Sapienza. Si riscontrano inoltre muratura di mattoni e pietra squadrata nella zona d'angolo tra Vicolo della Sapienza e Via Curtatone e Montanara con frequenti pilastri in pietra (probabilmente derivanti dalla presenza di antiche case torre) ed infine alcune pareti costituite da mattoni e conci di pietra sbazzata. Alcuni pilastri in pietra sono stati ritrovati in corrispondenza del porticato lato Via dell'Ulivo. La situazione è meno complicata al piano primo (figura 6.24), in cui si ipotizza la presenza di muratura in mattoni e pietra a spacco irregolare nella zona esterna prospiciente Piazza Dante (analogamente a quanto avviene al piano terra) e nella zona lato Vicolo della Sapienza. Murature in mattoni pieni sono nuovamente presenti in corrispondenza della zona lato Via dell'Ulivo e nella porzione interna del fabbricato lato Piazza Dante, nonché nella zona dell'Aula Magna Nuova. Per quanto riguarda invece il piano secondo (figura 6.25), l'ipotesi effettuata prevede la presenza di muratura in mattoni e pietra a spacco irregolare in tutta la porzione prospiciente Piazza Dante (sia verso la Piazza sia verso l'interno del porticato) e in buona parte dell'edificio lato Vicolo della Sapienza, dove ad essa si alterna muratura in mattoni e pietra a spacco sbazzata. Lungo il lato di Via dell'Ulivo e in corrispondenza dell'Aula Magna Nuova si trovano, analogamente al piano inferiore, murature di mattoni pieni.

Muratura in mattoni pieni		Muratura in mattoni e pietra squadrata	
Muratura in mattoni e pietra a spacco irregolare		Muratura in mattoni e pietra squadrata con ricorsi	
Muratura in mattoni e pietra a spacco sbazzata		Muratura in pietra a spacco irregolare	

Figura 6.22: Legenda delle tessiture murarie individuate.



Figura 6.23: Ipotesi della distribuzione delle tessiture murarie al piano terra, in funzione delle indagini e dell'analisi storico-evolutiva.

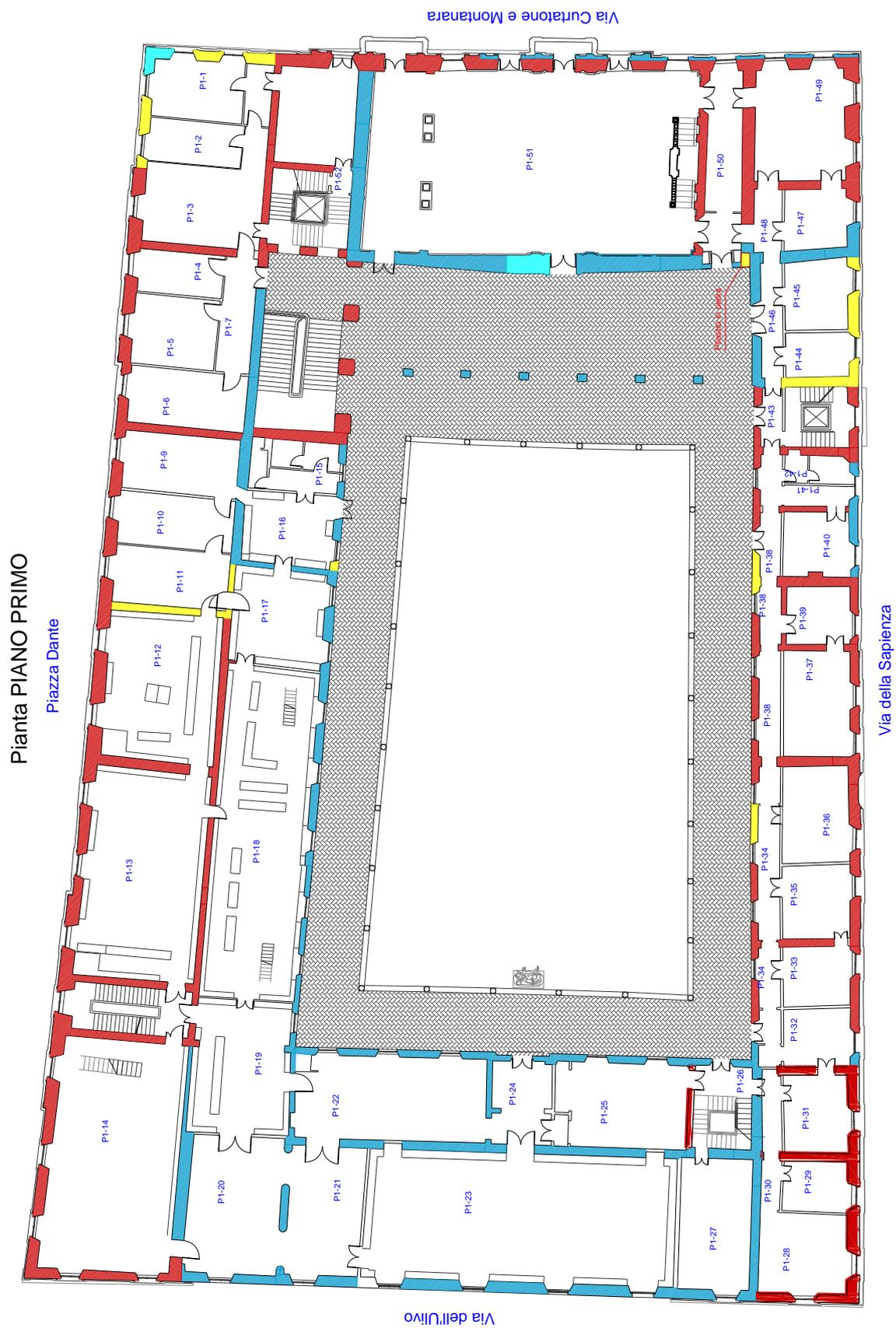


Figura 6.24: Ipotesi della distribuzione delle tessiture murarie al piano primo, in funzione delle indagini e dell'analisi storico-evolutiva.

Pianta PIANO SECONDO

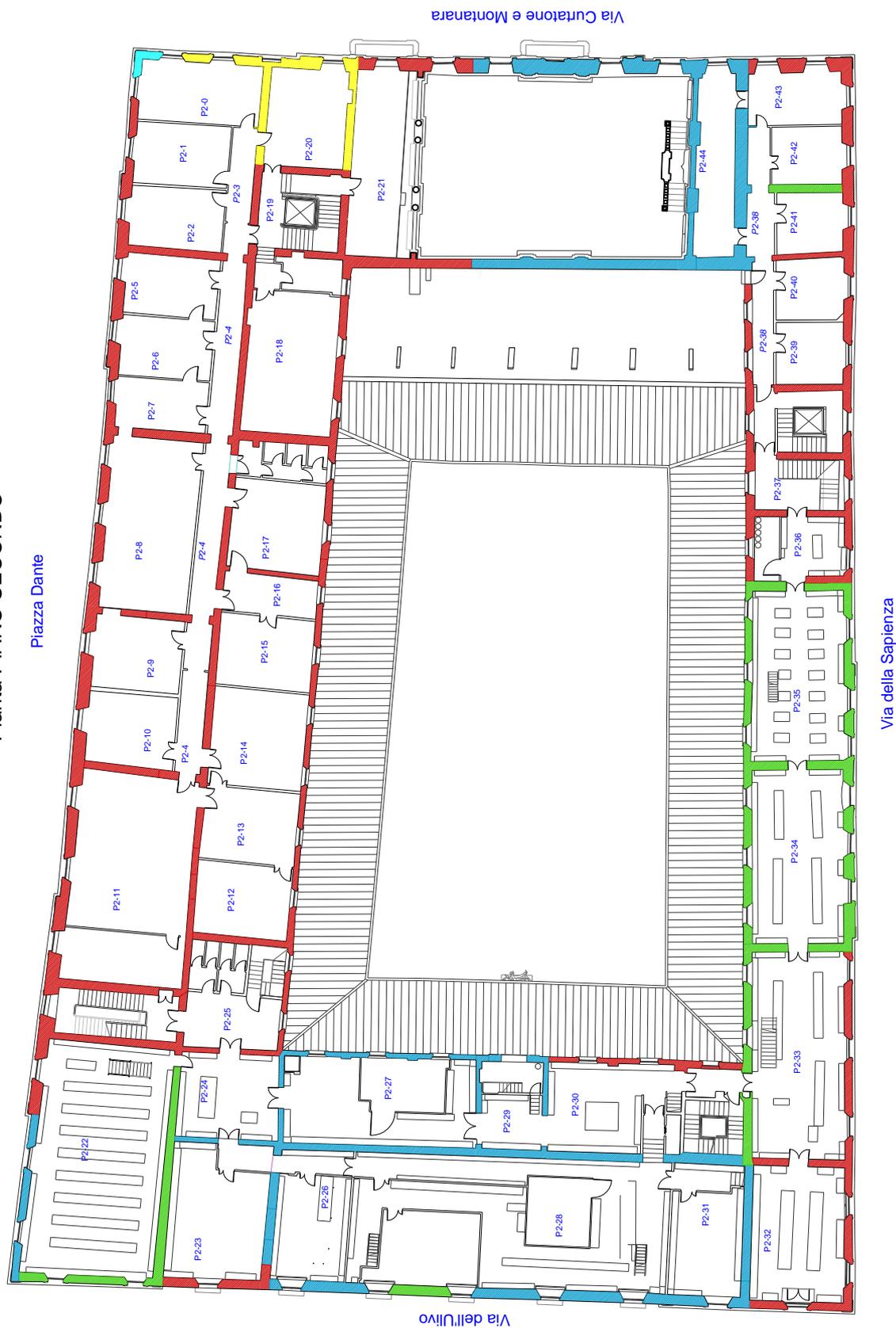


Figura 6.25: Ipotesi della distribuzione delle tessiture murarie al piano secondo, in funzione delle indagini e dell'analisi storico-evolutiva.

6.2. Strutture Orizzontali

Il rilievo architettonico ha evidenziato la presenza di orizzontamenti di diverso tipo in corrispondenza dei vari piani del fabbricato. Al piano terra dell'edificio sono presenti locali caratterizzati da volte di vario genere, solitamente a crociera o a padiglione, e locali caratterizzati da solai piani a semplice o doppia orditura, come schematicamente rappresentato in figura 6.26. Al piano primo ed al piano secondo invece sono prevalentemente presenti solai piani, fatta eccezione per alcuni locali (figure 6.27 e 6.28), tra cui l'Aula Magna nuova caratterizzata dalla presenza di un doppio volume voltato.

La mancanza di approfondite informazioni relative alle strutture orizzontali ha richiesto l'esecuzione di indagini approfondite sia sui solai piani sia sulle volte, di seguito ampiamente descritte.

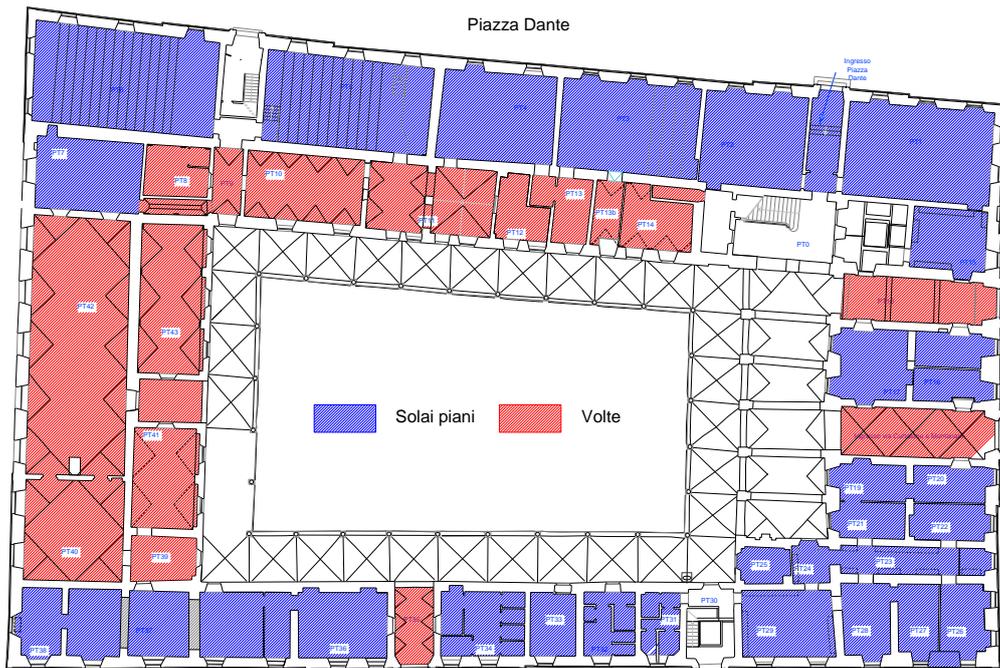


Figura 6.26: Pianta del piano terra con indicazione degli orizzontamenti piani e di quelli voltati.



Figura 6.27: Pianta del piano primo con indicazione degli orizzontamenti piani e di quelli voltati.

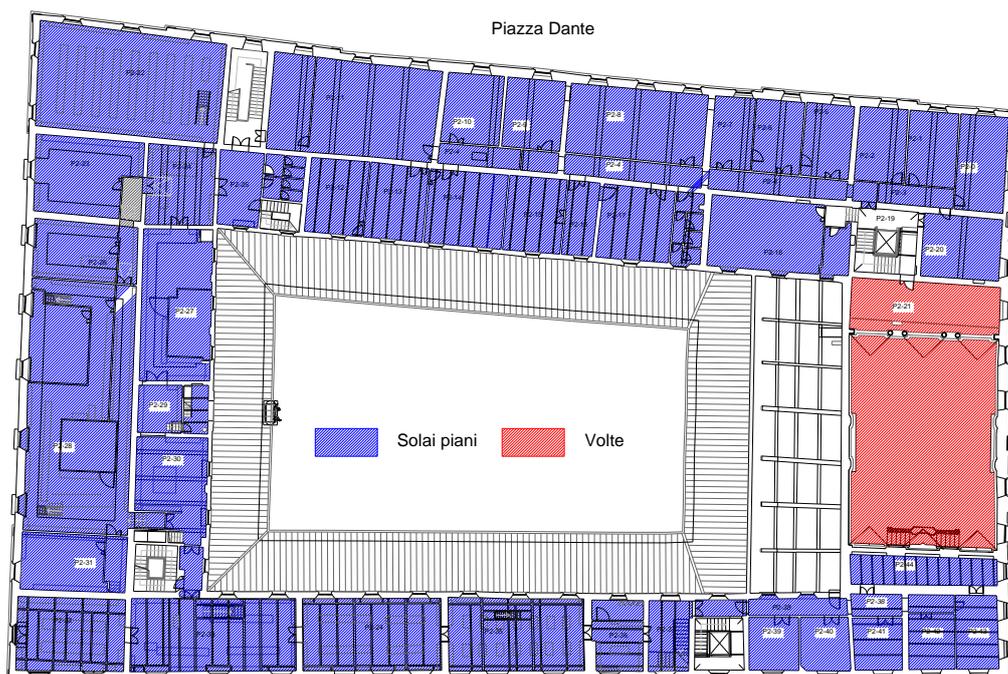


Figura 6.28: Pianta del piano secondo con indicazione degli orizzontamenti piani e di quelli voltati.

6.2.1 Rilievo dei solai piani

a cura di *Silvia Caprili*

Sono stati eseguiti saggi diffusi per indagare l'effettiva tipologia dei solai ai vari piani del fabbricato; in particolare le indagini sono state finalizzate alla individuazione di:

- ✓ dimensione dei profili metallici delle orditure principali e secondarie;
- ✓ interasse tra i profili;
- ✓ tipologia degli elementi di alleggerimento (dove possibile);
- ✓ spessore degli strati di riempimento, soletta o massetto, pavimentazione.

Le figure 6.29, 6.30 e 6.31 riportano l'indicazione degli orizzontamenti su cui sono state effettuate le indagini. In particolare, i saggi sui solai piani sono indicati dalla lettera S seguita da un numero progressivo e da una sigla che indica il piano a cui si sono eseguiti (PT per i solai tra piano terra e piano primo, P1 per gli orizzontamenti tra piano primo e piano secondo e P2 per i solai del sottotetto). Tutte le indagini sono state eseguite, laddove possibile, sia in corrispondenza dell'estradosso sia in corrispondenza dell'intradosso del solaio.

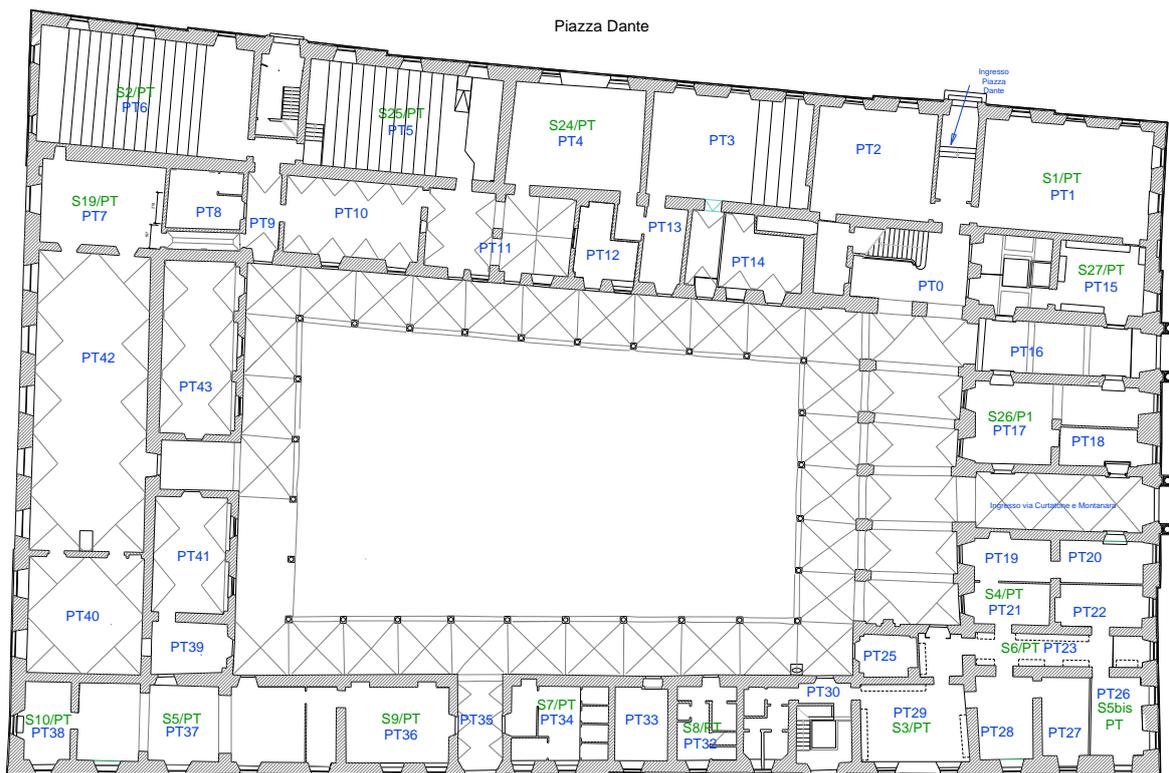


Figura 6.29: Indicazione dei solai e delle volte indagate al piano terra.

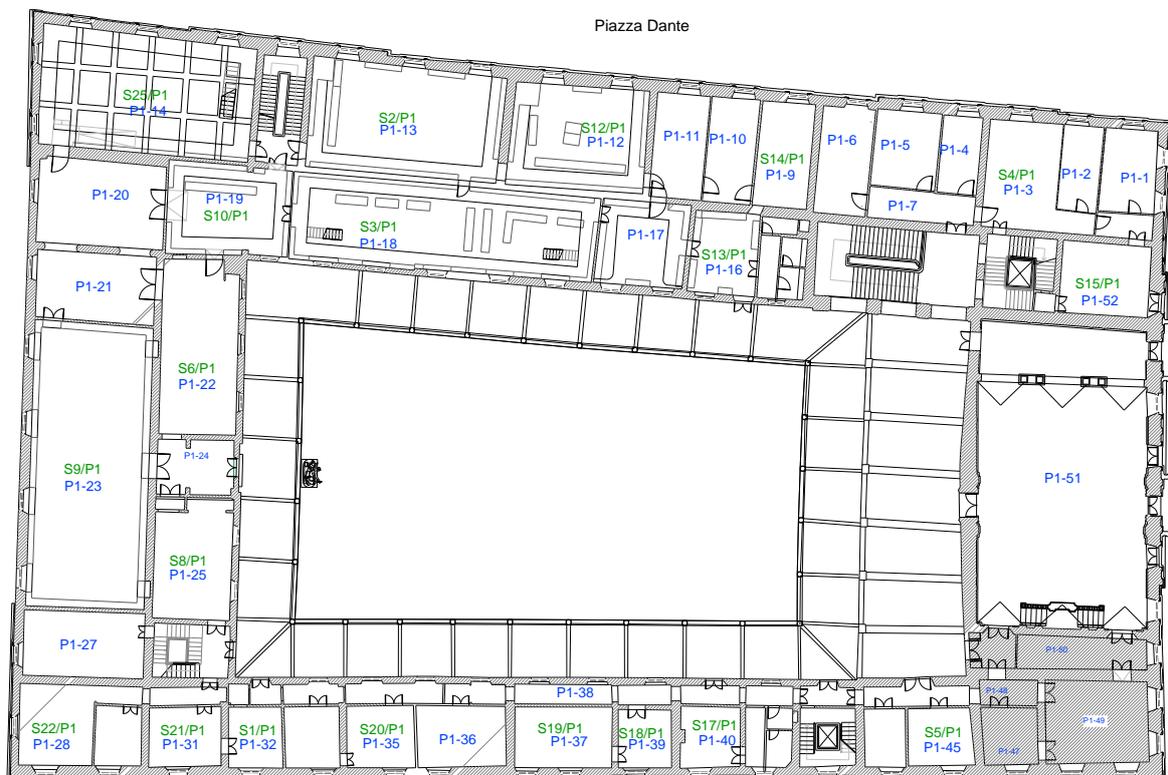


Figura 6.30: Indicazione dei solai e delle volte indagate al piano primo.

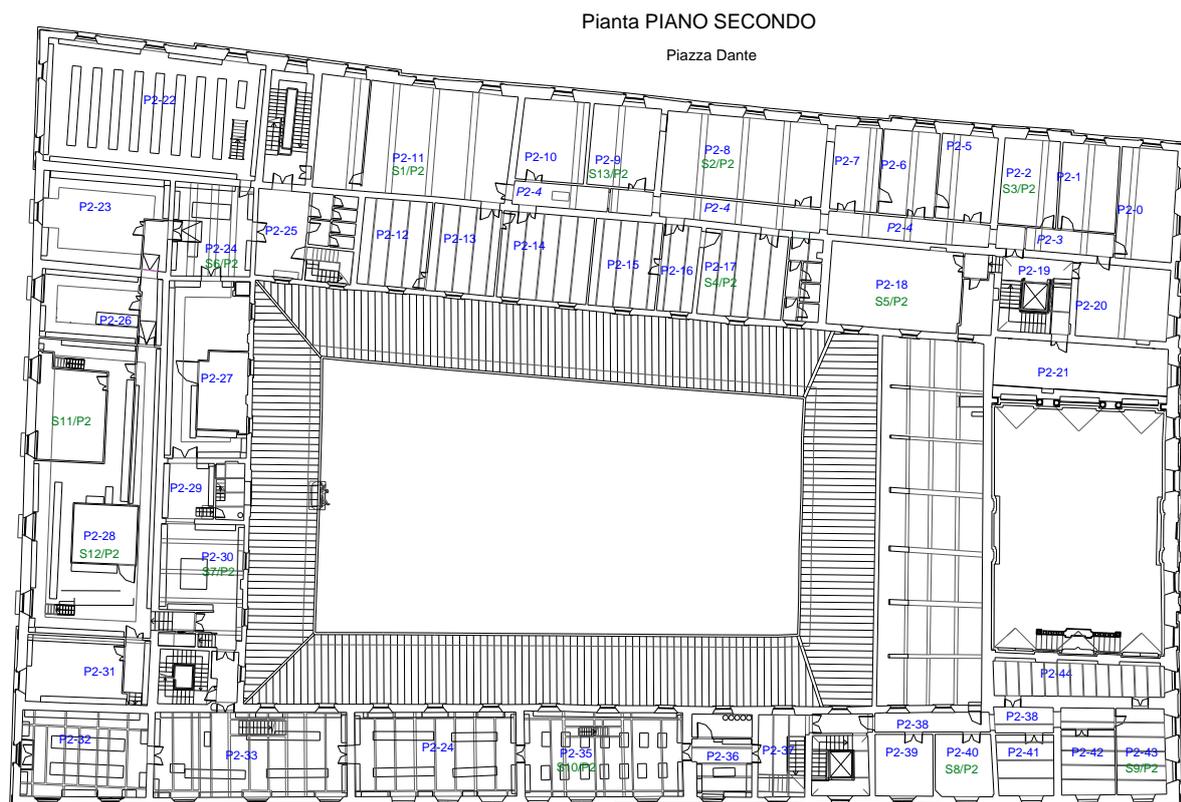


Figura 6.31: Indicazione dei solai volte indagati al piano secondo.

Le indagini eseguite in corrispondenza degli orizzontamenti indicati nelle Figure 6.29÷6.31 hanno evidenziato la presenza di due tipologie prevalenti di solaio piano:

1. Solai in acciaio ed elementi di alleggerimento in laterizio a semplice orditura (figure 6.32 e 6.33).
2. Solai in acciaio ed elementi di alleggerimento in laterizio a doppia orditura: le travi dell'orditura principale sono costituite solitamente da due profili in acciaio accoppiati (figure 6.34 e 6.35).

I profili costituenti i solai sono solitamente profili tipo IPN con dimensioni variabili in relazione alla luce dell'orizzontamento in cui sono impiegati e alla destinazione funzionale dei locali sovrastanti.

Nel caso dei solai a semplice orditura, sono stati rilevati profili con dimensioni variabili da IPN140 a IPN280 ed interasse compreso tra 85 e 90 cm, sia al piano terra sia al piano primo; in alcuni locali (PT-37 e P1-28, P1-29 e P1-30) la maggiore dimensione del profilo IPN si associa ad un interasse maggiore tra i travetti, variabile tra 105 e 110 cm.

Nel caso di solai a doppia orditura, le travi principali sono costituite da due profili affiancati tipo IPN400 o IPN450 mentre per l'orditura secondaria sono impiegate travi tipo IPN140 o IPN160 a passo variabile tra 85 e 90 cm (ad esempio nei vari locali sul lato di Piazza Dante). In corrispondenza di alcuni locali del piano terra (PT-29 e PT-21 e limitrofe) i profili accoppiati della trave principale sono costituiti da 2IPN320 e 2IPN280 rispettivamente, probabilmente in seguito alla presenza di minori carichi gravanti in fase di progetto.

Nelle figure 6.32÷6.35 si riportano alcune immagini relative ai saggi eseguiti all'intradosso dei solai del piano terra e piano primo, per le due tipologie di orizzontamento a semplice e doppia orditura; le indagini hanno permesso di individuare dimensioni del profilo, interasse e posizionamento degli elementi portanti.

Le indagini sono state eseguite anche all'estradosso dei solai, al fine di individuare gli spessori degli strati di riempimento sovrastanti necessari alla stima dei carichi gravanti sul solaio. A tal fine, come visibile nelle figure 6.36÷6.39, sono state rimosse porzioni di pavimentazione; tale operazione ha permesso in alcuni casi il riconoscimento della tipologia di elemento di alleggerimento in laterizio presente (pignatta o volterrana).



Figura 6.32: Solaio a semplice orditura (saggio S9/PT), profili tipo IPN200 a passo 85 cm (stanza PT-36).



Figura 6.33: Solaio a semplice orditura (saggio S20/P1), profili tipo IPN220 a passo 85 cm (stanza P1-35).

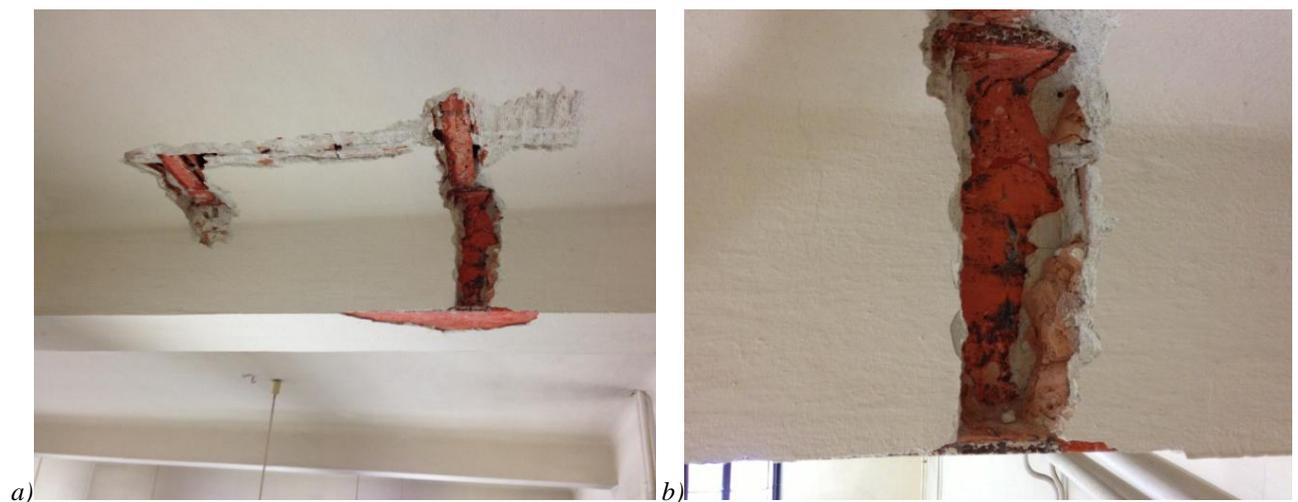


Figura 6.34: Solaio a doppia orditura (saggio S1/PT), profili trave principale 2IPN400, profili orditura secondaria IPN160 interasse 90 cm (stanza PT-1).



Figura 6.35: Solaio a doppia orditura (saggio S4/P1), profili trave principale 2IPN400, profili orditura secondaria IPN160 interasse 85 cm (stanza P1-3).



Figura 6.36: Saggio solaio S9/PT dal piano primo, individuazione degli strati di riempimento.



Figura 6.37: Saggio solaio S20/P1 dal piano secondo, individuazione degli strati di riempimento.

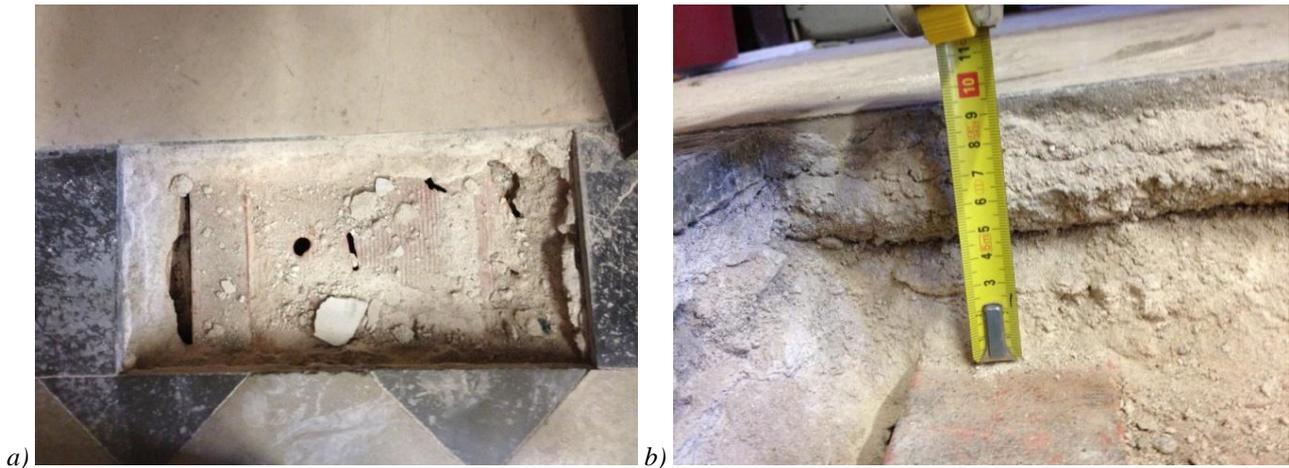


Figura 6.38: Saggio solaio S1/PT dal piano primo, individuazione degli strati di riempimento.



Figura 6.39: Saggio solaio S4/P1 dal piano secondo, individuazione degli strati di riempimento.

Nelle Figure 6.40÷6.42 si riportano alcuni schemi delle diverse tipologie di solaio rilevate. Per ciascuna delle indagini eseguite è stata elaborata una scheda con indicato il tipo di profilo impiegato, la tipologia di elemento di alleggerimento (se rilevabile), l'interasse tra i profili e lo spessore degli strati di riempimento e pavimentazione sovrastanti: le schede sono riportate in allegato alla presente relazione.

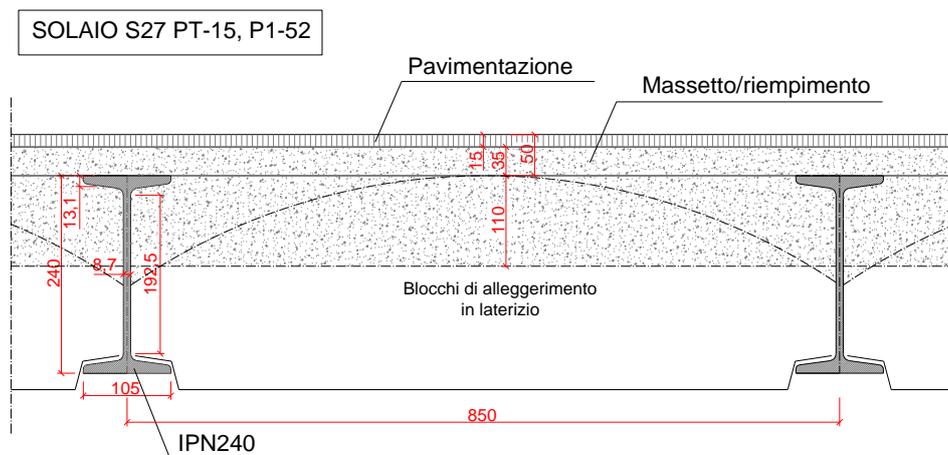


Figura 6.40: Esempio di solaio a semplice orditura con profili tipo IPN240 ad interasse 85 cm e volterrane di alleggerimento (solaio S27/PT, locali PT-15 e P1-52).

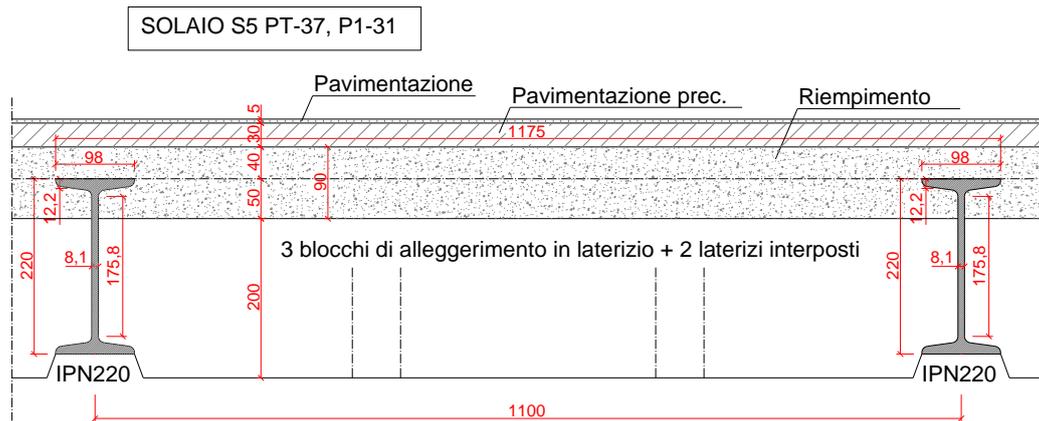


Figura 6.41: Esempio di solaio a semplice orditura con profili tipo IPN220 a interasse 110 cm e tre pignatte e due mattoni interposti come elementi di alleggerimento (solaio S5/PT, locali PT-37 e P1-31).

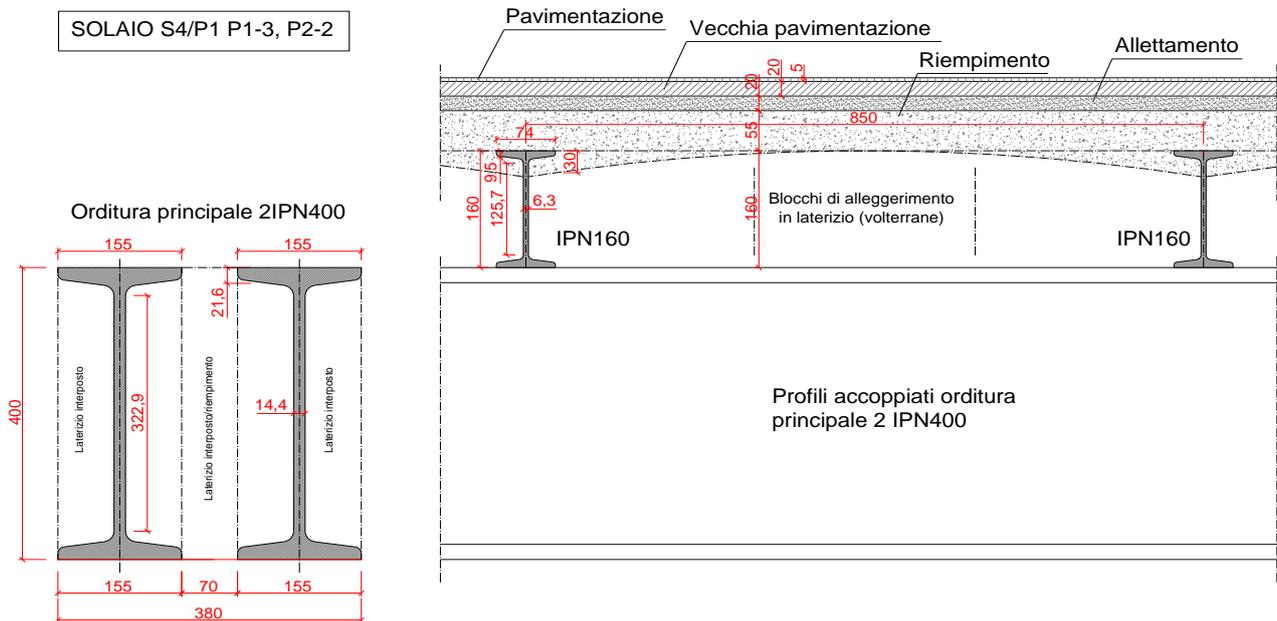


Figura 6.42: Esempio di solaio a doppia orditura con profili principali 2IPN400 e orditura secondaria costituita da profili tipo IPN160 a interasse 85 cm con tre pignatte in laterizio come elemento di alleggerimento (solaio S4/P1, locali P1-3 e P2-2).

Le figure 6.43÷6.44 riportano le piante del piano terra, primo e secondo con indicazione dell'orditura dei solai piani; in particolare, in rosso si riportano gli orizzontamenti direttamente rilevati, in verde quelli che sono stati estesi in relazione alle informazioni reperite dalle indagini eseguite.



Figura 6.43: Pianta del piano terra con indicazione dell'orditura e della tipologia dei solai.

6.2.2 Rilievo delle volte

a cura di Riccardo Barsotti, Stefano Bennati, Federico Mangini, Silvia Caprili

Il rilievo architettonico eseguito nel Palazzo della Sapienza di Pisa ha evidenziato la presenza di alcuni locali caratterizzati da copertura a volta di varia tipologia, come visibile in figura 6.45; le tipologie di volte riscontrate sono:

1. volte a botte con lunette;
2. volte a padiglione con o senza lunette;
3. volte a crociera.

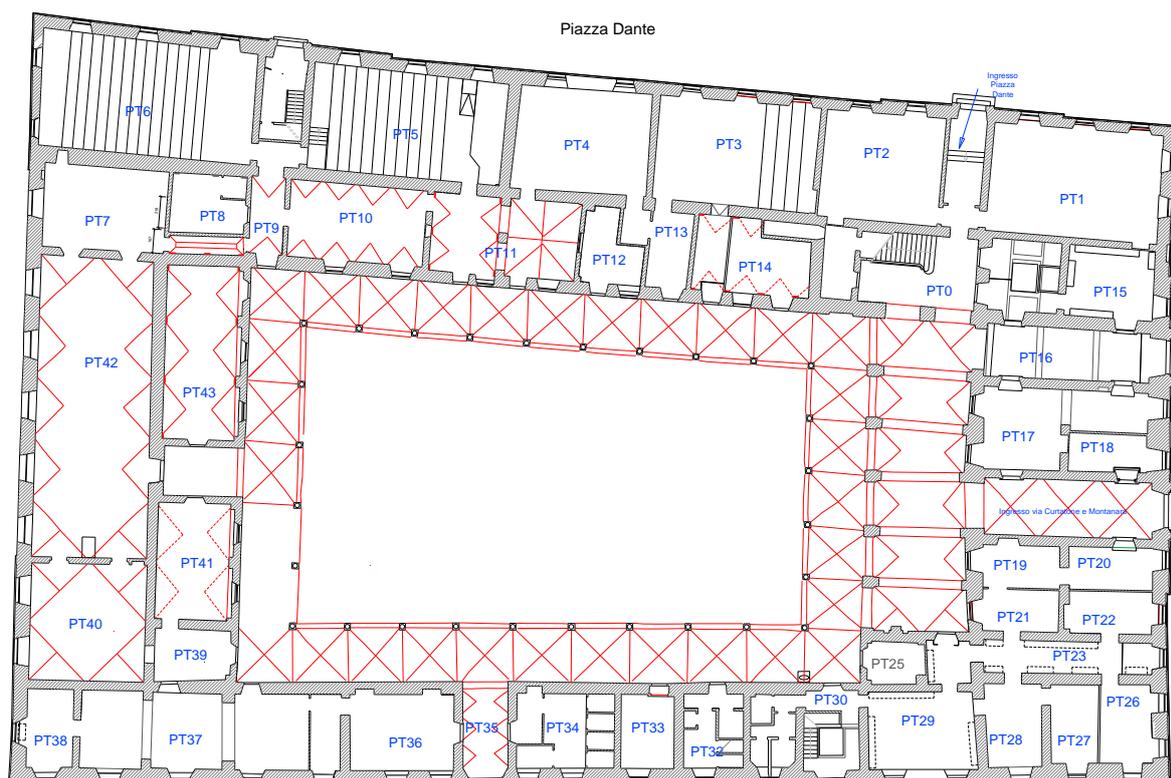


Figura 6.45: Rilievo architettonico e individuazione delle volte presenti al piano terra.

Data l'assenza di adeguate informazioni riguardanti la tipologia strutturale delle volte, sono state eseguite indagini finalizzate alla caratterizzazione della tipologia di elemento costituente (laterizi disposti in foglio, in coltello, eventuali volte in pietra) e alla definizione dell'esatto spessore del pacchetto di riempimento e pavimentazione sovrastante.

Le volte indagate con la localizzazione dei saggi eseguiti sulle volte sono riportate in figura 6.46. Le indagini sono state condotte sia all'intradosso (dal piano terra) sia all'estradosso delle volte (dal pavimento del piano primo), come visibile nelle immagini di seguito riportate. In particolare, le indagini sono state rivolte alla corretta individuazione della forma e dello spessore delle volte, necessarie per l'esecuzione delle verifiche di sicurezza. Le indagini sono state organizzate in tre fasi distinte:

- ✓ *I Fase:* all'intradosso delle volte selezionate sono stati eseguiti saggi finalizzati all'individuazione della tipologia degli elementi costituenti e della loro disposizione, mediante rimozione di intonaco in porzioni di dimensioni approssimativamente di 50x50 cm, come visibile in figura 6.47, posizionati all'incirca in corrispondenza delle rendi delle volte. Analogamente a quanto già detto per l'esecuzione dei saggi in corrispondenza delle pareti verticali, si è resa necessaria l'effettuazione di una stratigrafia ad opera di una ditta di restauro prima della rimozione di intonaco, per individuare eventuali cornici o affreschi di pregio storico-artistico da preservare.

- ✓ *II Fase:* si sono eseguite indagini finalizzate alla determinazione e quantificazione della stratigrafia del pacchetto di riempimento e pavimentazione soprastante la volta; a tal fine, all'estradosso delle volte e solitamente in corrispondenza della chiave, è stata rimossa la pavimentazione, determinato lo spessore dei vari strati di riempimento.
- ✓ *III Fase:* sono state effettuate, a conferma di quanto osservato durante la seconda fase, indagini endoscopiche secondo la metodologia già descritta per le pareti verticali. Tali indagini, oltre a permettere l'effettiva individuazione dello spessore degli strati di riempimento, hanno permesso di ricavare l'effettivo spessore della volta in diversi punti e di ridisegnarne con precisione la geometria.

Analogamente a quanto effettuato nel caso delle indagini sulle pareti verticali, al fine di permettere una rapida individuazione e catalogazione delle indagini sulle volte, ad ognuna di esse è stato attribuito un codice, definito come di seguito riportato.

I saggi all'intradosso per l'individuazione della tipologia, eseguiti nella I fase (riportati in blu nelle piante) sono indicati come:

VT/01/PT

in cui:

VT *Indica l'indagine eseguita all'intradosso della volta;*
01 *Indica il numero della volta considerata;*
PT *Indica il piano in cui è stata eseguita l'indagine.*

I saggi all'estradosso per l'individuazione dello spessore del pacchetto di riempimento, svolti nella II campagna (indicati con cerchi blu nella pianta) sono codificati come segue:

P/01/PT

in cui:

P *Perforazioni del riempimento;*
01 *Indica il numero della volta considerata;*
PT *Indica il piano in cui è stata eseguita l'indagine.*

Le endoscopie eseguite all'intradosso per l'individuazione dello spessore effettivo della volta, svolti nella III campagna (indicati con cerchi magenta nella pianta) sono codificate come segue:

End.01/01PT

in cui:

End. *Endoscopie eseguite all'intradosso delle volte*
01 *Indica il numero progressivo dell'endoscopia eseguita;*
01PT *Indica la volta ed il piano su cui è stata eseguita l'indagine.*

Pianta PIANO TERRA

Piazza Dante



Figura 6.46: Individuazione dei saggi agli intradossi e estradossi delle volte al piano terra.

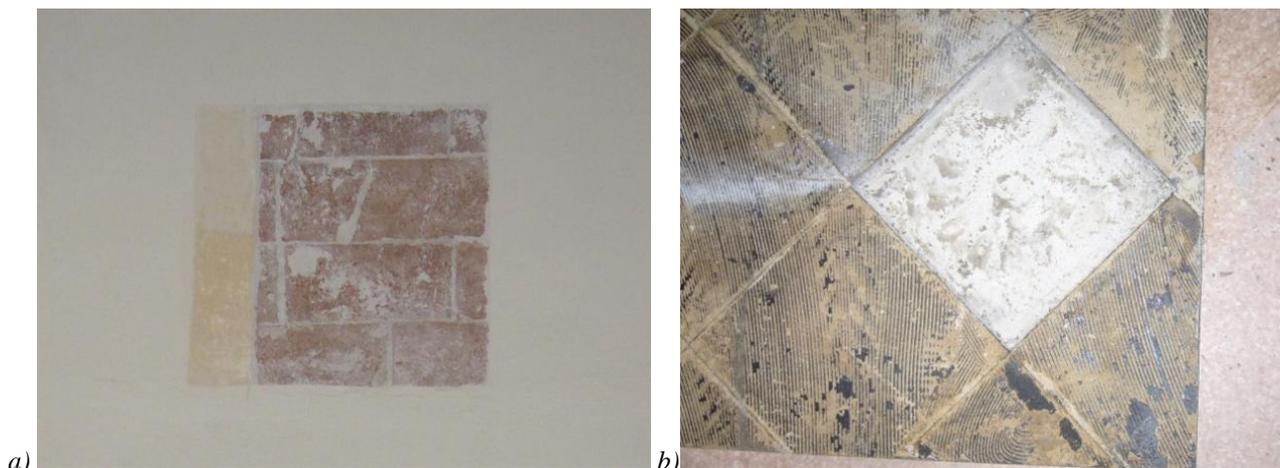


Figura 6.47: a) Individuazione in pianta dei saggi, Volta 08 PT; b) Esecuzione del saggio dal pavimento sovrastante.

L'esecuzione delle indagini sopra descritte ha permesso la determinazione stratigrafica e tipologica e lo spessore effettivo delle volte; in particolare i saggi all'intradosso sono stati necessari per la determinazione degli elementi costituenti la volta strutturale e la loro disposizione, mentre i saggi all'estradosso sono stati necessari per poter determinare la stratigrafia e spessore dei vari strati costituenti la finitura sopra la volta strutturale. Attraverso l'esecuzione di endoscopie diffuse in vari punti delle volte, è stato possibile determinarne lo spessore. In generale, le volte analizzate sono realizzate mediante elementi in laterizio disposti secondo due principali schemi: uno caratterizzato da elementi disposti per coltello e l'altro con elementi disposti in foglio. Lo schema della tipologia delle volte è riportato in figura 6.48.

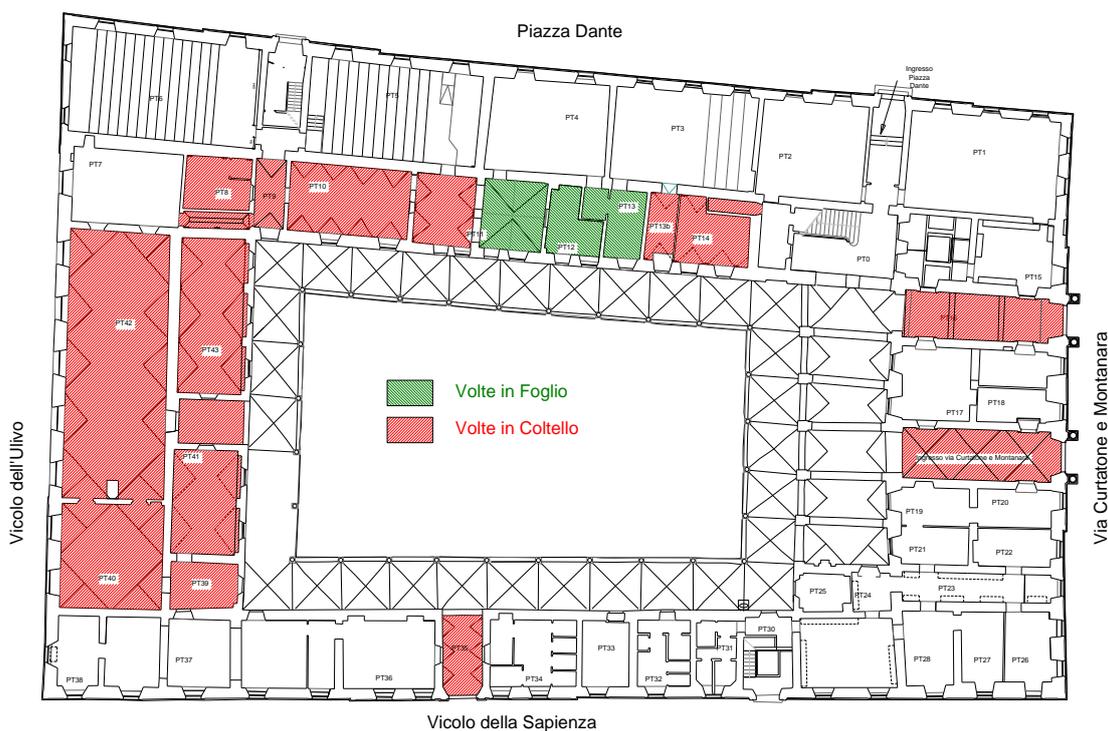


Figura 6.48: Schema delle volte interne al piano terra: distinzione tra volte in foglio e volte in coltello.

A titolo esemplificativo, di seguito sono riportati alcuni esempi di volte individuate; analogamente a quanto effettuato per i solai, in allegato sono riportate le schede tecniche di tutte le volte rilevate.

Stanza PT-11B Volta 08 PT – Volta in foglio

Nella stanza PT-11B (figura 6.49.a) è presente una volta a padiglione ribassato (figura 6.49c), la cui geometria è riportata in Figura 6.49.b. In figura 6.50 è riportato lo schema con la localizzazione dei saggi, le immagini dei saggi e la stratigrafia della volta ricavata mediante l'esecuzione dell'endoscopia.

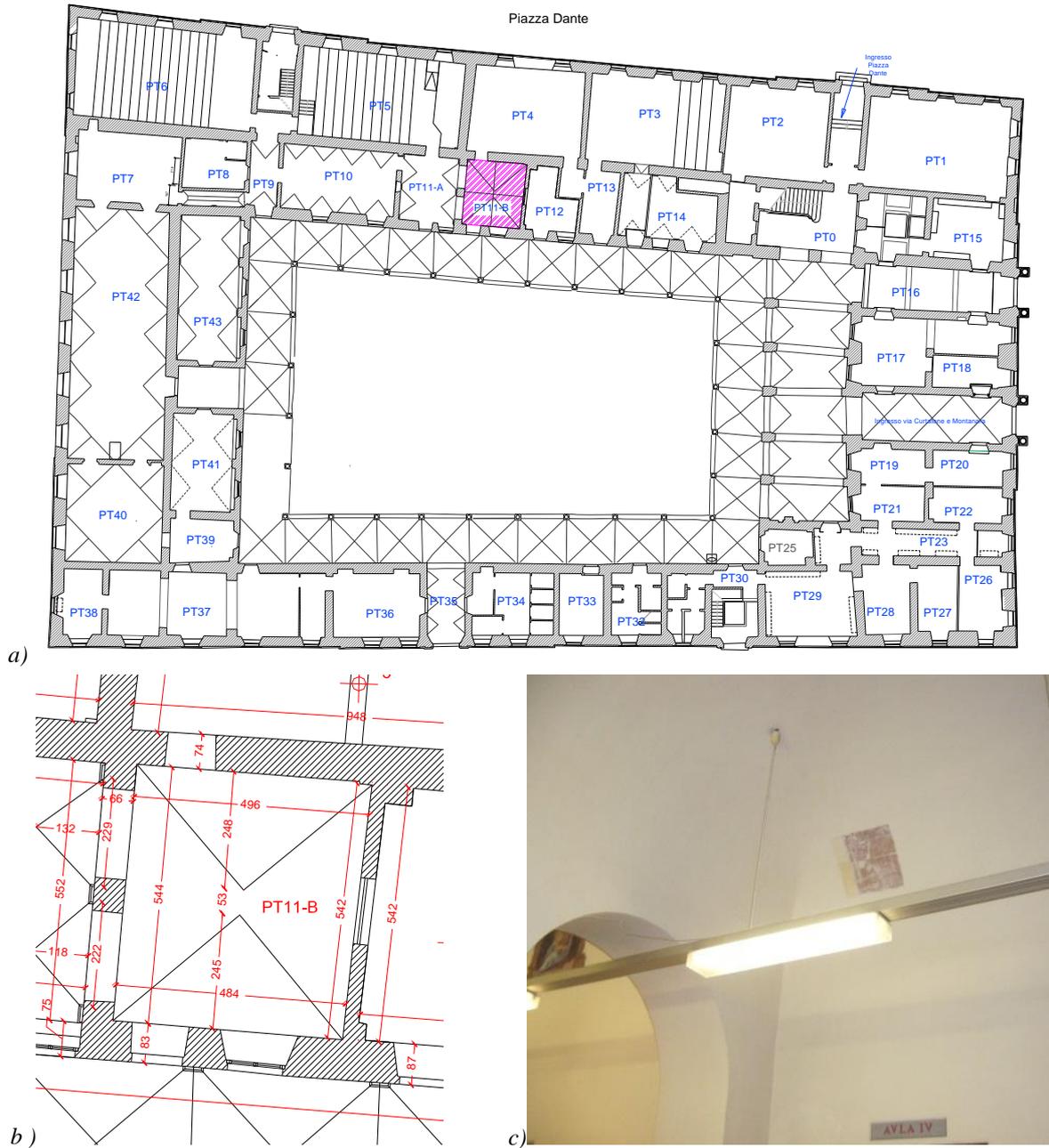


Figura 6.49: a) Individuazione in pianta del locale considerato, b) proiezione in pianta con relative quote della volta 08 PT, c) immagine della Volta 08 PT.

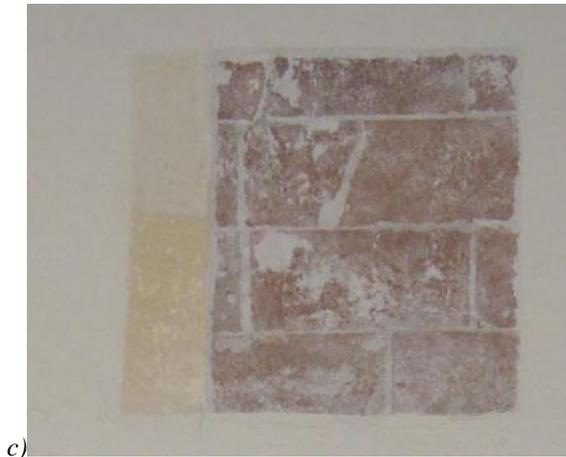
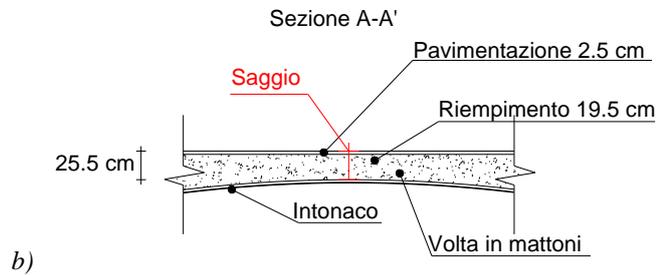
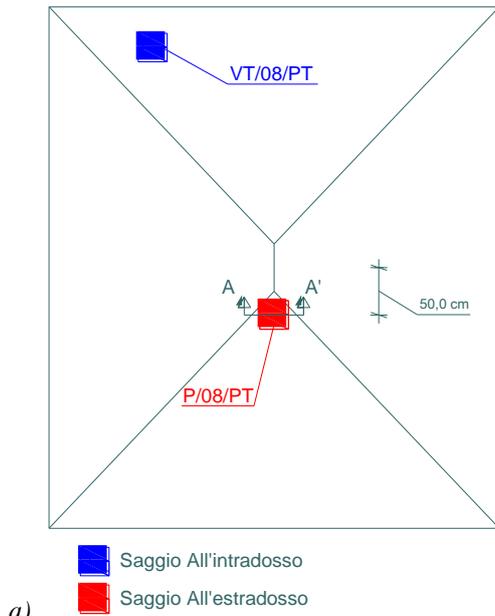


Figura 6.50: a) Individuazione in pianta dei saggi, Volta 08 PT; b) Schema della sezione dell'orizzontamento, Volta 08 PT; c) Saggio all'intradosso, Volta 08 PT; d) Saggio all'estradosso, Volta 08 PT.

Osservando il saggio eseguito all'intradosso è possibile affermare che la volta V/08/PT sovrastante la stanza PT-11B è realizzata con elementi in laterizio disposti in foglio. Vista la stratigrafia risultante dalle indagini svolte all'estradosso e considerando uno strato di intonaco pari a 0,5cm, lo spessore effettivo della volta è di circa 3,0 cm.

Stanza PT-10 Volta 10/PT – Volta in foglio

Nella stanza PT-10 è presente una volta a botte con lunette, come visibile in figura 6.51. Il profilo della volta segue un andamento ribassato, le lunette sono caratterizzate da un andamento in mezzeria crescente e si estendono solo per una porzione della volta principale (figura 6.51.c). In figura 6.52 è riportato lo schema con la localizzazione dei saggi, le immagini dei saggi e la stratigrafia della volta ricavata mediante l'esecuzione dell'endoscopia.

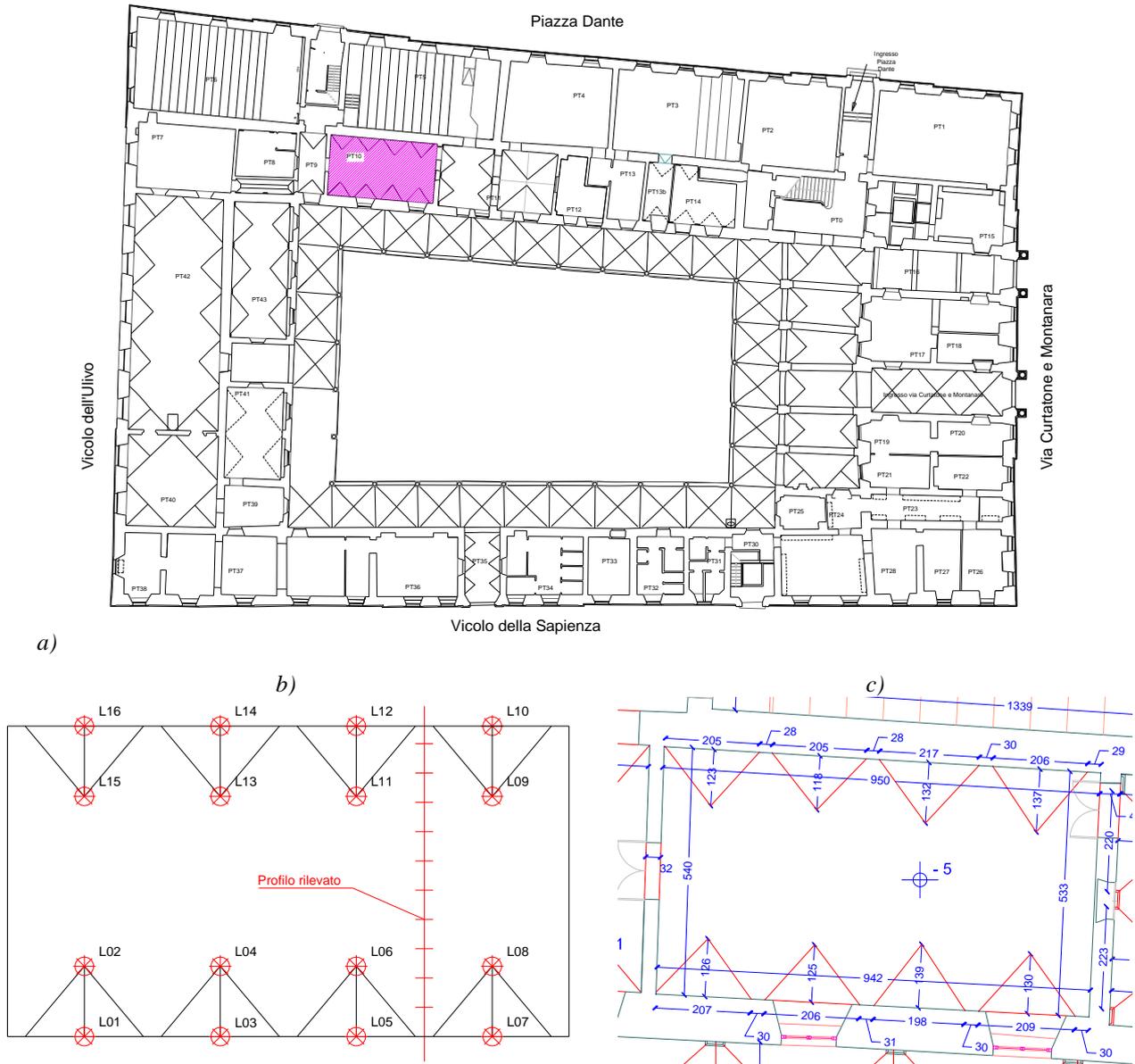


Figura 6.51: a) Individuazione della Volta 10PT; b) Proiezione in pianta della volta 10 PT; c) Pianta della volta considerata con relative quote.

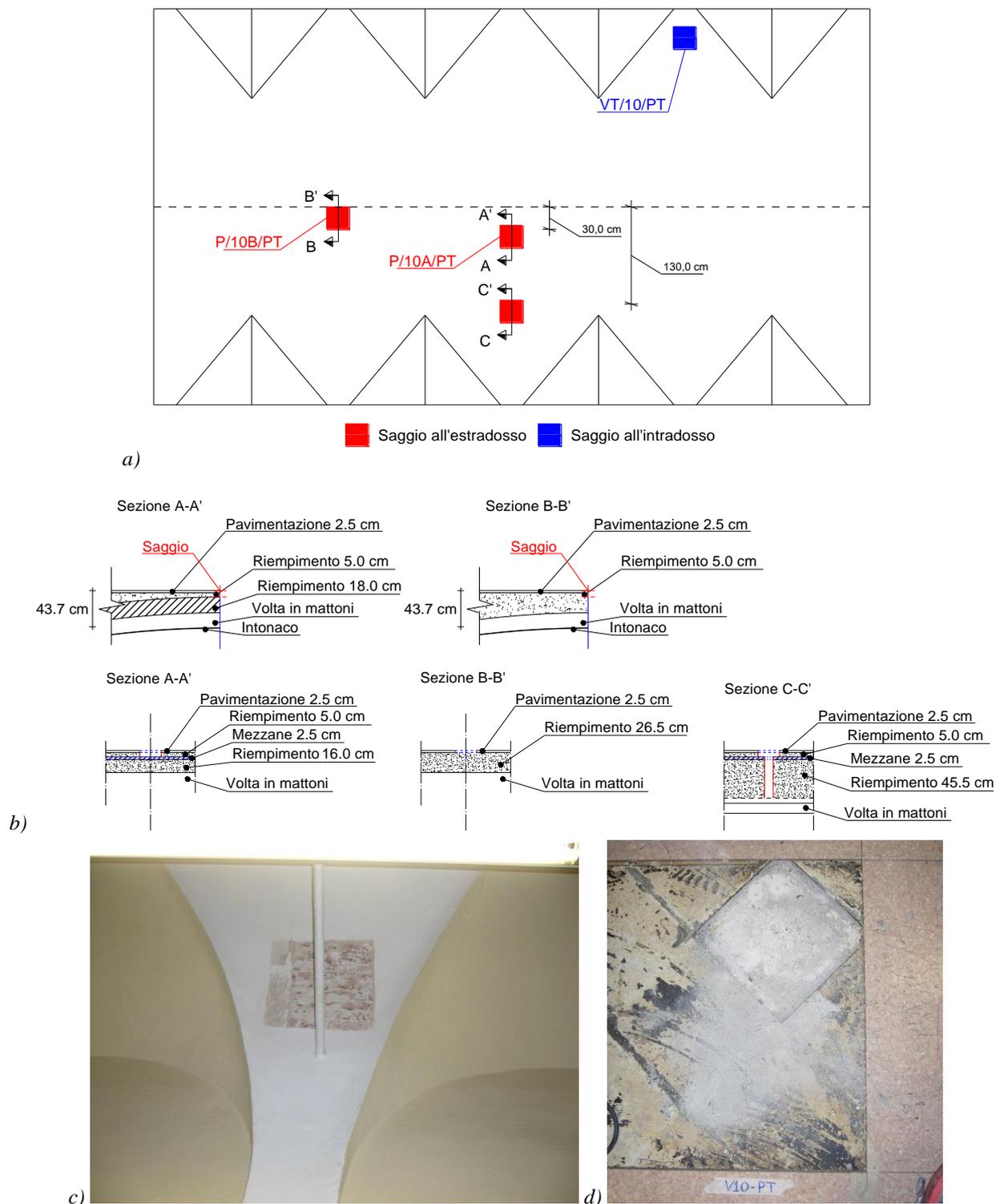


Figura 6.52: a) Individuazione in pianta dei saggi, Volta 10 PT; b) Schemi delle sezioni dell'orizzontamento, Volta 10PT; c) Saggio all'intradosso, Volta 10 PT; d) Saggio all'estradosso, Volta 10 PT.

Osservando il saggio eseguito all'intradosso è possibile affermare che la volta a copertura della stanza PT-10 è realizzata con elementi in laterizio disposti per coltello. Vista la stratigrafia risultante dalle indagini svolte all'estradosso e considerando uno strato di intonaco pari a 0,5 cm, lo spessore effettivo della volta è di circa 10 cm.

6.2.3 Le strutture di copertura

a cura di Silvia Caprili

La struttura di copertura del Palazzo della Sapienza di Pisa è costituita da capriate di differente tipologia e materiale.

La porzione di copertura lato Piazza Dante, divisa in due parti dalla parete centrale di spina (figura 6.53), presenta capriate in acciaio nella zona direttamente rivolta verso la piazza (figura 6.54.a) e capriate in legno nella zona rivolte verso il porticato interno al Palazzo (figura 6.54.b). Sulle capriate in acciaio, analogamente a quanto avviene per quelle adiacenti in legno, appoggiano direttamente gli elementi secondari che sorreggono il manto di copertura (travi longitudinali in legno ed arcarecci in direzione ortogonale ad esse, figura 6.54).

Le capriate in acciaio sono poste ad un interasse medio di circa 280 cm, con valori minimi di 260 cm e valori massimi di 330 cm in funzione delle pareti di divisione dei locali sottostanti e che proseguono nel sottotetto.

Le capriate in legno sono poste ad una distanza media di circa 400 cm, con un massimo di 600 cm. Sono presenti muretti in mattoni pieni su cui appoggiano le travi longitudinali in legno (figura 6.58).

Per quanto riguarda la copertura lato Vicolo dell'Ulivo, anch'essa separata in due zone di cui una direttamente rivolta verso la suddetta via e l'altra verso il porticato interno dalla parete di spina centrale (figura 6.55), essa è costituita da capriate in legno di differente forma e tipologia (figura 6.56).

La distanza tra le capriate è variabile tra 400 cm (valore frequente) e 300 cm (una sola campata in prossimità della parete di separazione con l'osservatorio).

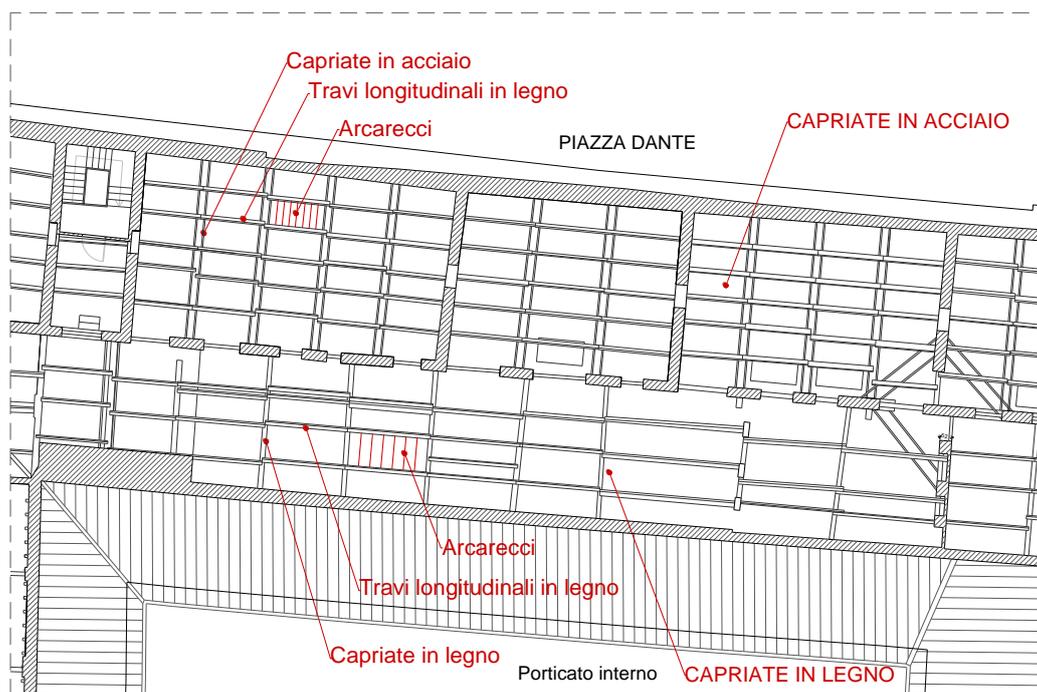


Figura 6.53: Dettaglio della copertura del Palazzo La Sapienza lato Piazza Dante.



a)

b)

Figura 6.54: a) Capriate in acciaio lato Piazza Dante, b) capriate in legno lato Piazza Dante (verso porticato interno).

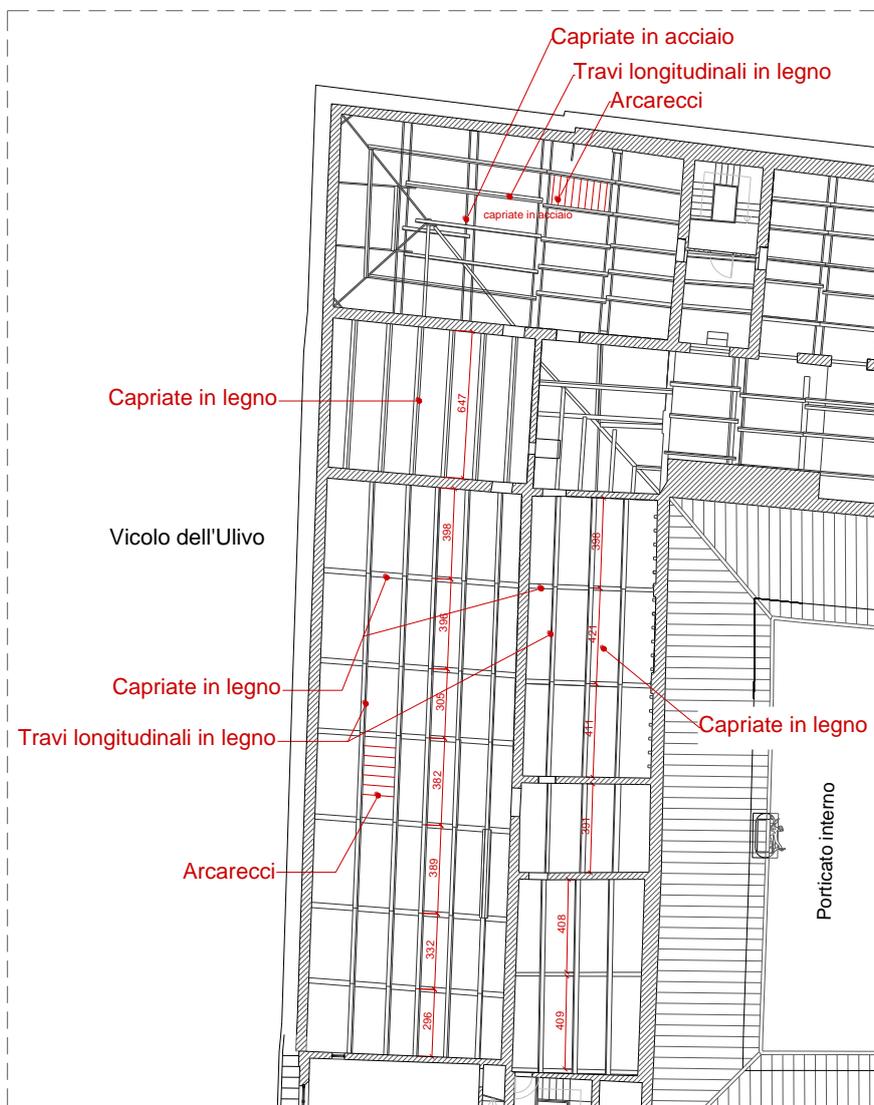


Figura 6.55: Dettaglio della copertura del Palazzo La Sapienza lato Vicolo dell'Ulivo.



Figura 6.56: Capriate in legno nella copertura lato Vicolo dell'Ulivo.

La copertura del Palazzo lato Via della Sapienza è costituita da capriate in legno, travi longitudinali e arcarecci (figura 6.57). Le travi longitudinali appoggiano su muretti in mattoni posti in corrispondenza delle pareti sottostanti a separazione dei vari locali (figura 6.58).

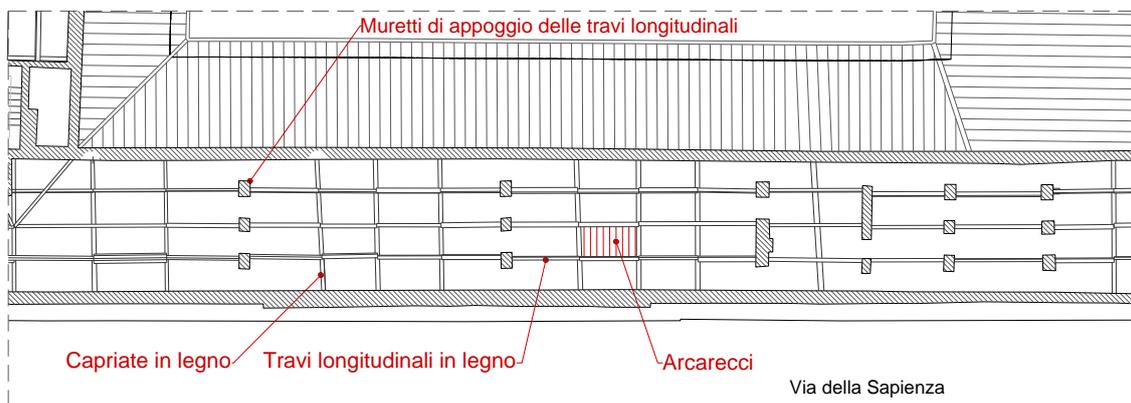


Figura 6.57: Dettaglio della copertura del Palazzo La Sapienza lato Via della Sapienza.



Figura 6.58: a) Capriate in legno lato Via della Sapienza, b) appoggio travi longitudinali su muretti in mattoni pieni.

Descrizione a parte deve essere effettuata per la copertura dell'Aula Magna Nuova: la volta affrescata a padiglione del doppio volume è sorretta da 14 capriate metalliche rivestite da elementi in laterizio e la sovrastante copertura è costituita da 4 capriate metalliche analoghe a quelle presenti in corrispondenza del sottotetto lato Piazza Dante (figure 6.59 e 6.60). Sopra le capriate metalliche sono presenti travi longitudinali

in legno e arcarecci in direzione ortogonale, analogamente alla copertura lato Piazza Dante. Situazioni più complicate per quanto riguarda la geometria, la disposizione e la tipologia stessa degli elementi strutturali si riscontrano in corrispondenza dei quattro angoli della copertura, come sinteticamente mostrato dalle figure 6.61 e 6.62: sono presenti elementi in legno ed elementi in acciaio, spesso derivanti da interventi successivi, muretti in mattoni pieni e zeppe in corrispondenza degli appoggi inserite in conseguenza di cedimenti o modifiche della copertura.

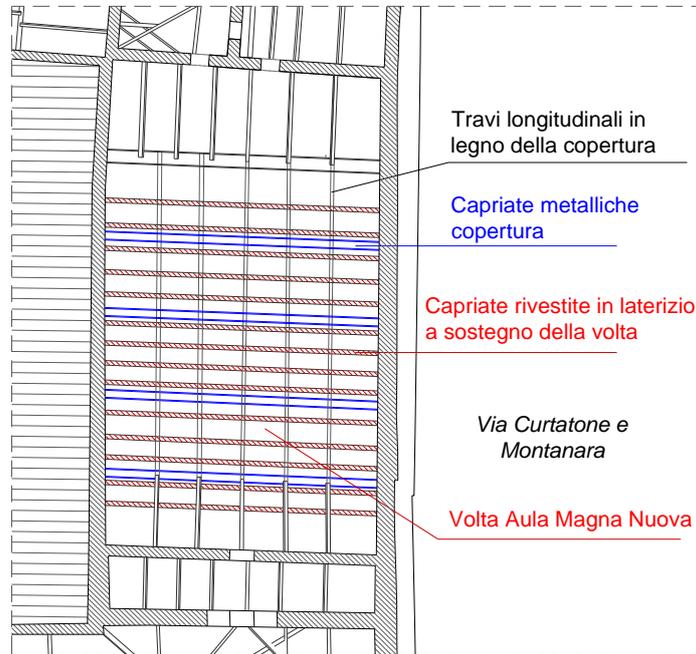


Figura 6.59: Dettaglio della copertura del Palazzo La Sapienza sopra l'Aula Magna Nuova.



Figura 6.60: a) Copertura Aula Magna Nuova, b-c) dettagli copertura, d) rivestimento del tirante inferiore della capriata a sostegno della volta.



Figura 6.61: Dettagli della copertura in corrispondenza dell'angolo tra Piazza Dante e Via Curtatone e Montanara.



Figura 6.62: a-b) Dettagli degli appoggi delle capriate (lato Piazza Dante interno portico, angolo con Vicolo dell'Ulivo), c) muretti in mattoni pieni sopra il corrente superiore, d) dettaglio aggancio profili metallici.

Sono state riscontrate alcune criticità in corrispondenza della copertura; in particolare, esse sono legate alla realizzazione degli appoggi delle travi costituenti le capriate (figura 6.63), alla presenza di alcune lesioni nelle travi medesime, ad ammaloramenti diffusi soprattutto in corrispondenza degli arcarecci (figure 6.64 e 6.65), alla presenza di muretti in mattoni pieni a sostegno degli elementi portanti (figura 6.66) nonché alla presenza di accumuli di materiale di risulta e altri elementi da rimuovere (figure 6.67 e 6.68).



Figura 6.63: Alcuni dettagli degli appoggi delle travi in legno sulle capriate in acciaio (lato Piazza Dante).



Figura 6.64: a) lesioni in corrispondenza della trave in legno (copertura lato Piazza Dante), b) ammaloramento della trave in legno (copertura lato Piazza Dante, interno porticato).



a)



b)

Figura 6.65: Copertura in legno (lato Vicolo dell'Ulivo): a) dettagli dei travicelli ammalorati e b) lesioni sulle tavelle.



a)



b)

Figura 6.66: Muretti in laterizio a sostegno della copertura: a) lato Piazza Dante (interno porticato), b) lato Vicolo della Sapienza.



a)



b)

Figura 6.67: a) Lucernai e b) serbatoio appoggiato in corrispondenza del sottotetto lato Piazza Dante.



Figura 6.68: Dettagli sottotetto lato Vicolo dell'Ulivo (capriate in legno), elementi da rimuovere.

Sono state inoltre individuate alcuni elementi strutturali su cui sono stati eseguiti interventi di recupero negli anni passati (figure 6.69 e 6.70) e alcune capriate della copertura lato Piazza Dante che probabilmente hanno subito esposizione al fuoco in occasione di incendi verificatisi in precedenza (Figura 6.71). Infine, in corrispondenza della copertura lato Vicolo dell'Ulivo sono state riscontrate alcune lesioni sulla parete centrale di spina e lo sfilamento dei travicelli del solaio del sottotetto (figura 6.72).



Figura 6.69: a) Dettaglio intervento su trave in legno, b) inserimento montante in legno in corrispondenza della capriata in acciaio (lato Piazza Dante).



Figura 6.70: Capriate in legno nel sottotetto lato Vicolo dell'Ulivo: in intervento eseguito su una trave in legno.



Figura 6.71: Alcuni dettagli delle capriate in legno della copertura (lato Piazza Dante, interno lato porticato).



Figura 6.72: a) Lesione nella parete di separazione tra le due parti del tetto lato Vicolo dell'Ulivo, b) dettaglio sfilamento dei travicelli del solaio del sottotetto.

Nella figura 6.73 è riportata la planimetria del sottotetto con l'indicazione delle varie criticità individuate.

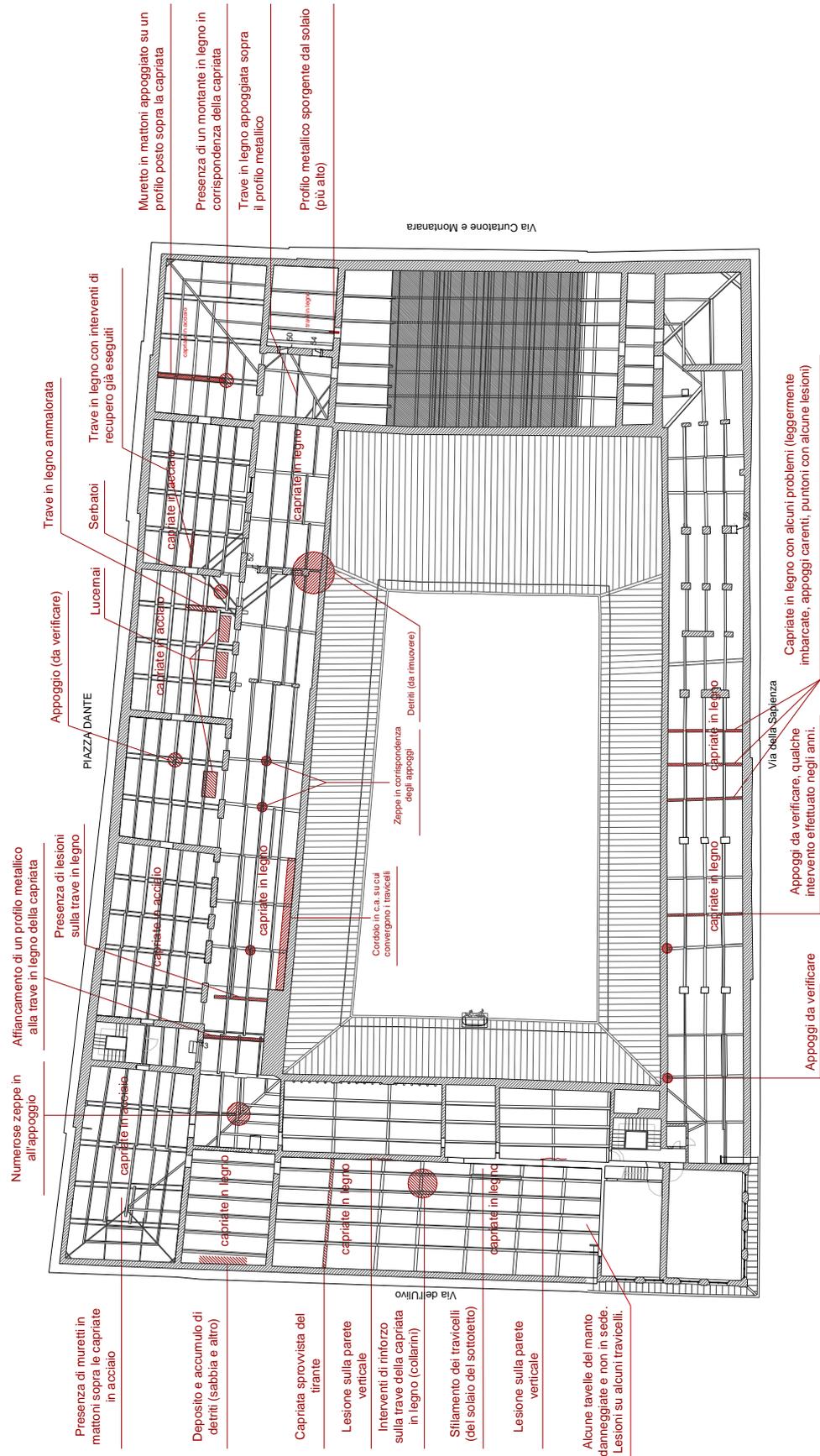


Figura 6.73: Planimetria generale del sottotetto con indicazione delle criticità riscontrate.

6.2.4 Rilievo dei soppalchi

a cura di Silvia Caprili e Francesco V. Lippi

All'interno della Biblioteca della Sapienza sono stati realizzati, nel corso di diversi decenni, numerosi soppalchi metallici.

Il rilievo ha consentito di identificare numerose tipologie di soppalchi che realizzano una superficie aggiuntiva di circa 600 mq in stanze di superficie totale pari a circa 1000 mq (+60%). Le soluzioni strutturali adottate comprendono:

- soppalchi a mensola, ottenuti mediante l'inserimento di travi in acciaio nello spessore dei maschi murari ed il loro fissaggio con malte cementizie,
- soppalchi a telaio, con montanti poggiati direttamente sull'estradosso dei solai di piano e travi di sostegno del piano soppalcato,
- piani soppalcati su travi, ovvero la realizzazione di un piano aggiuntivo della stessa dimensione del solaio di piano mediante graticci di travi variamente collegate tra loro, alloggiato nello spessore murario e fissate mediante malta cementizia.

Il rilievo è stato eseguito mediante spessimetro e distanziometro laser. Nelle piante di figura 6.74 e 6.75 sono riportate le tipologie di soppalchi metallici identificate al piano primo e secondo della Biblioteca.

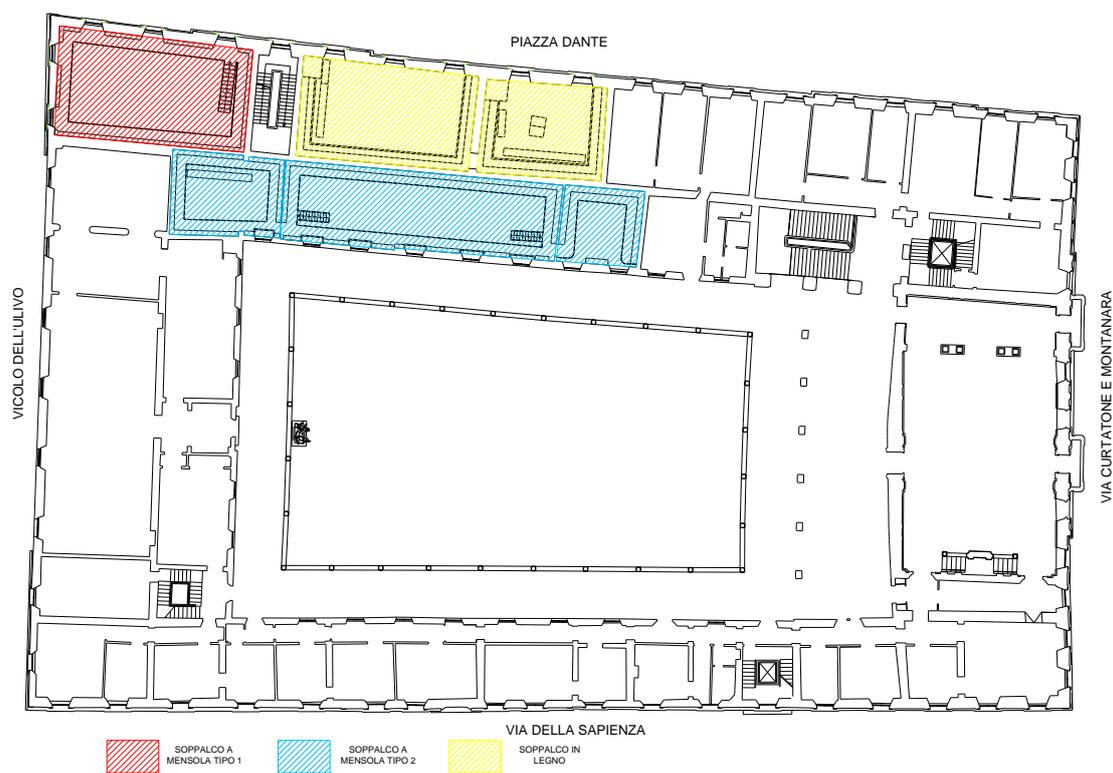


Figura 6.74: Piano primo - pianta delle tipologie di soppalco.

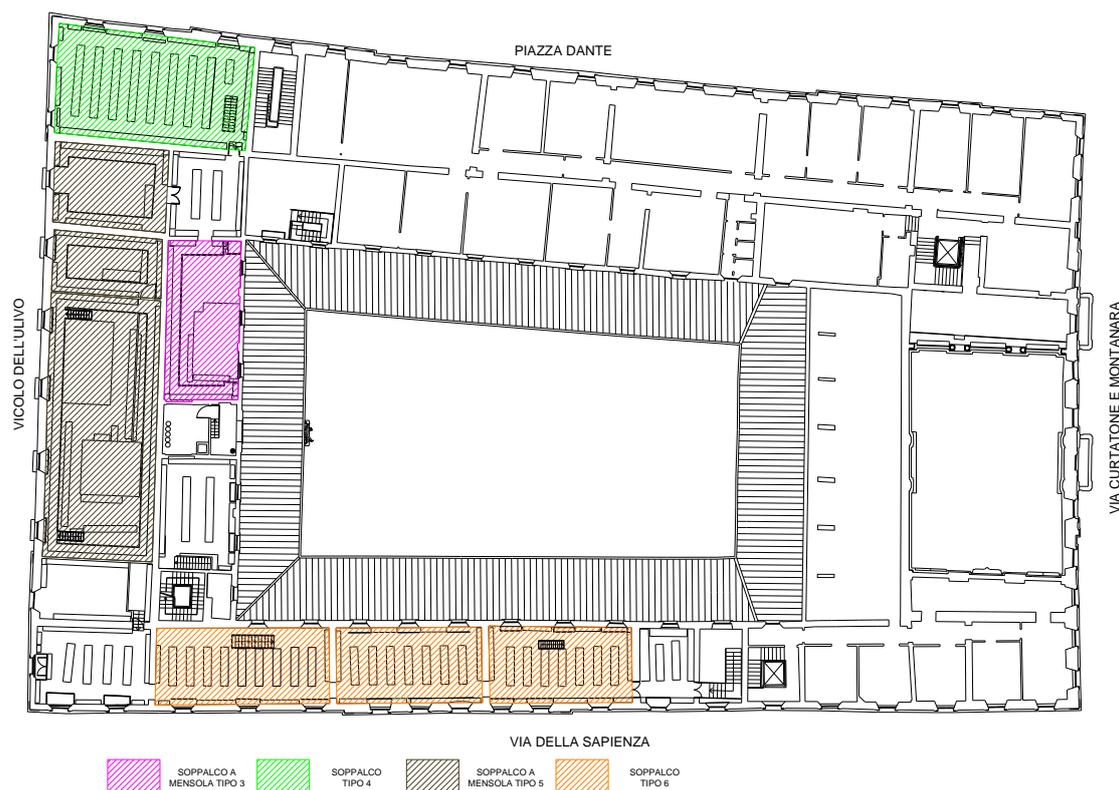


Figura 6.75: Piano secondo - pianta delle tipologie di soppalco.

Le tipologie presenti sono le seguenti.

- Soppalco a mensola tipo 1 (figura 6.76): il soppalco è stato ottenuto mediante una soluzione a mensola di luce pari a 110 cm circa. La carpenteria metallica è costituita da profili piegati a freddo C100-C140 e da una piastra nervata di calpestio di altezza totale pari a 40 mm. I profili sono ammortati direttamente all'interno della muratura. Le giunzioni sono realizzate mediante soluzioni bullonate e saldate. Sono presenti alcune connessioni in evidente stato di degrado e/o realizzate secondo schemi probabilmente difformi rispetto alle indicazioni progettuali, probabilmente allo scopo di sopperire ad un montaggio improprio o comunque non rispettoso delle tolleranze costruttive necessarie alla carpenteria metallica.
- Soppalco a mensola tipo 2 (figura 6.77): il soppalco a mensola, di luce pari a circa 110 cm, è costituito da profili IPE100-UPN100 e da un piastra nervata di calpestio di altezza 50 mm. Gli elementi di carpenteria sono collegati mediante giunzioni bullonate e saldate. Gli elementi principali sono ammortati direttamente all'interno della muratura, così come alcuni tratti della piastra di calpestio.
- Soppalco a mensola tipo 3 (figura 6.78): il soppalco a mensola, di luce pari a circa 110 cm, è costituito da profili IPN100 e da profili piegati a freddo C100x40 e da un piastra nervata di calpestio di altezza 35 mm. Gli elementi di carpenteria sono collegati mediante giunzioni bullonate e saldate. Gli elementi principali sono ammortati direttamente all'interno della muratura.
- Soppalco tipo 4 (figure 6.79, 6.80 e 6.81): il piano soppalcato è stato ottenuto mediante due soluzioni differenti: i) nella prima soluzione (dettaglio "A" - figure 6.79), il piano di calpestio è costituito da un lamiera nervata di luce pari a 100 cm ed altezza 50 mm semplicemente appoggiata su profili correnti ad L 60x30. Tali profili sono collegati mediante bullonatura alle scaffalature esistenti sia lungo le pareti che nel centro della stanza. Alle estremità, i profili ad L sono connessi direttamente alla muratura mediante degli ancoranti meccanici (dettaglio "B" - figura 6.80). ii) nella seconda soluzione (dettaglio "C" - figure 6.81) le lamiere nervate del piano di calpestio sono sostenute, lato muratura, da mensole di luce 44 cm circa. Le mensole sono costituite da profili UPN100 ammortati direttamente nella muratura e da 2 profili L 150x100 accoppiati in modo da costituire un corrente di

appoggio per il piano di calpestio. Dal lato opposto alla muratura, le lamiere sono sostenute direttamente dalla scaffalatura in modo analogo al dettaglio "A".

- Soppalco a mensola tipo 5 (figura 6.82): il soppalco a mensola, di luce pari a 110 cm circa, è costituito da profili piegati a freddo C100x40 accoppiati e singoli si sostegno alla piastra nervata di calpestio di altezza totale pari a 35 mm. I profili sono ammorsati direttamente all'interno della muratura o collegati ai montanti degli scaffali inferiori (dettaglio "A" - figura 6.83). Le giunzioni sono realizzate mediante soluzioni bullonate e saldate.

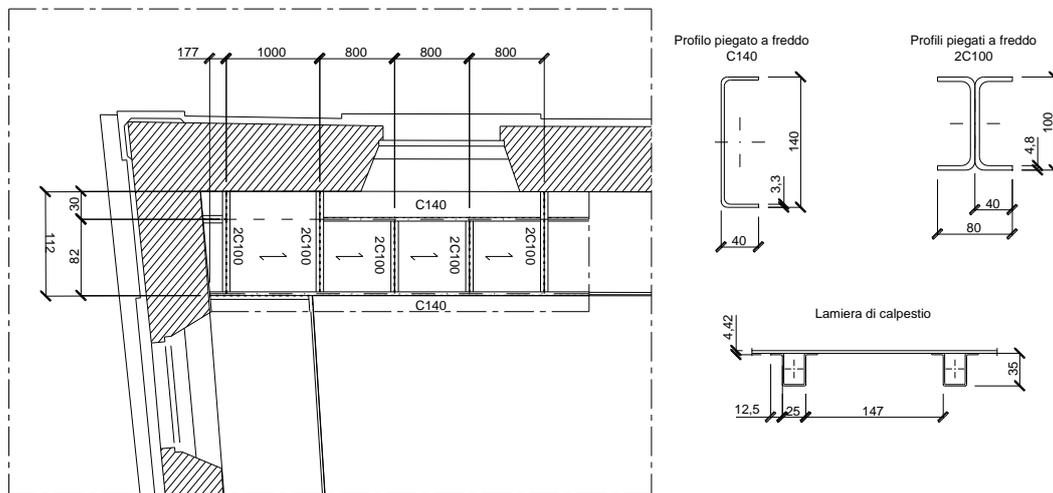


Figura 6.76: Piano Primo - Soppalco a mensola Tipo 1

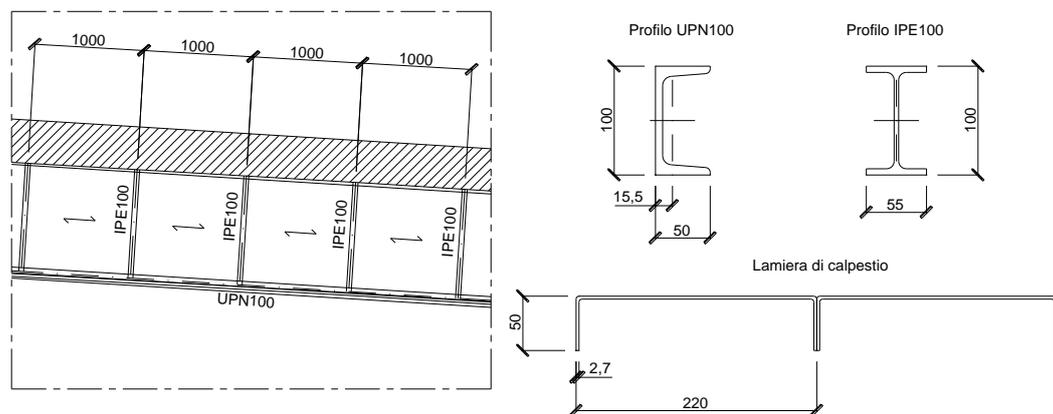


Figura 6.77: Piano Primo - Soppalco a mensola Tipo 2

- Soppalco tipo 6 (figura 6.84): in questo caso il soppalco è costituito da un intero nuovo piano di calpestio, delle stesse dimensioni della superficie di piano originaria, ottenuto mediante travi IPN220 e UPN220 ammorsate nella muratura esistente. Le connessioni tra gli elementi di carpenteria metallica sono bullonate. Sono inoltre presenti profili UPN220 vincolati alla muratura mediante ancoranti meccanici a supporto del piano di calpestio, costituito da una piastra nervata di altezza 70 mm.
- Soppalchi in legno: nella sala Professori del primo piano sono presenti delle scaffalature lignee con soppalchi non rilevabili mediante un'ispezione visiva in quanto dotate di una pannellatura di rivestimento non smontabile che ne impedisce l'esame.

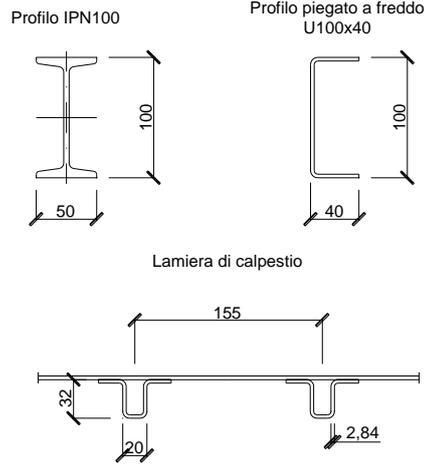
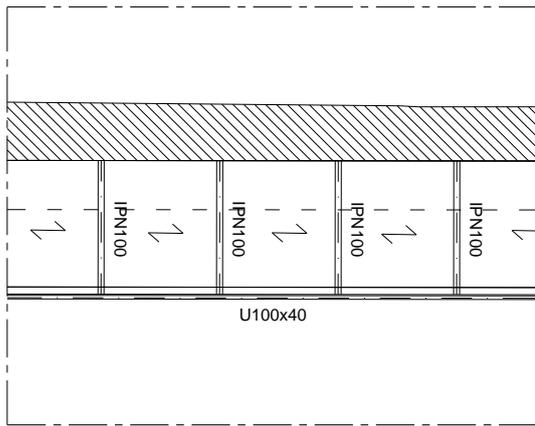


Figura 6.78: Piano Secondo - Soppalco a mensola Tipo 3

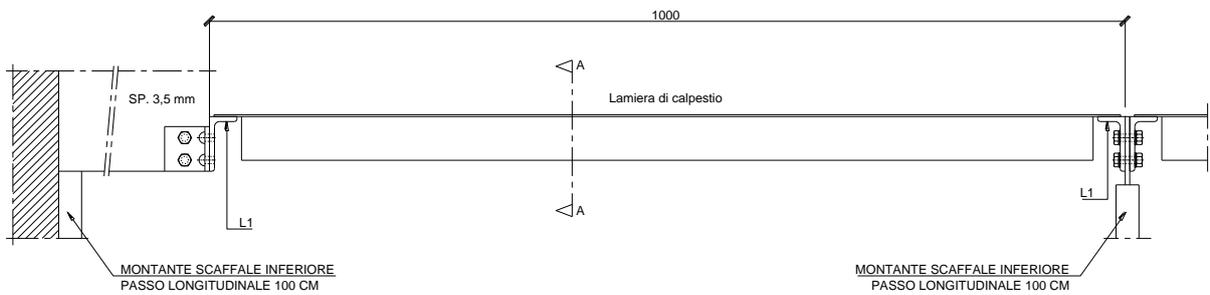
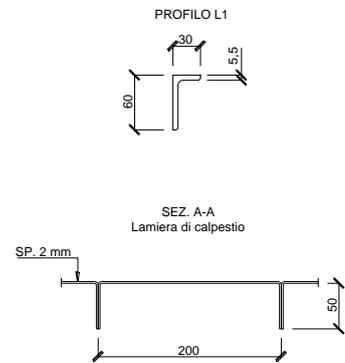
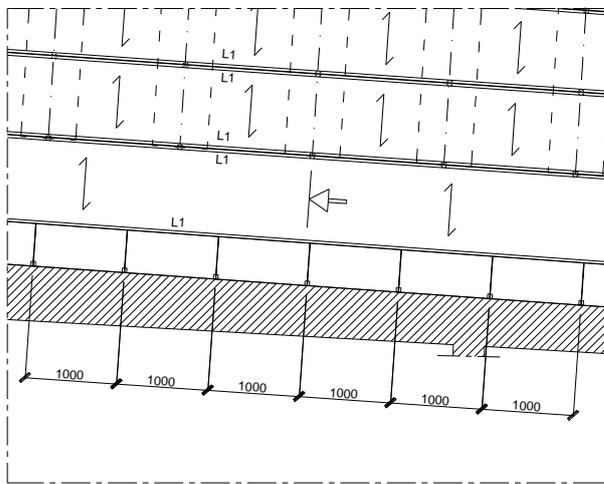


Figura 6.79: Piano Secondo - Soppalco a mensola Tipo 4, dettaglio "A"

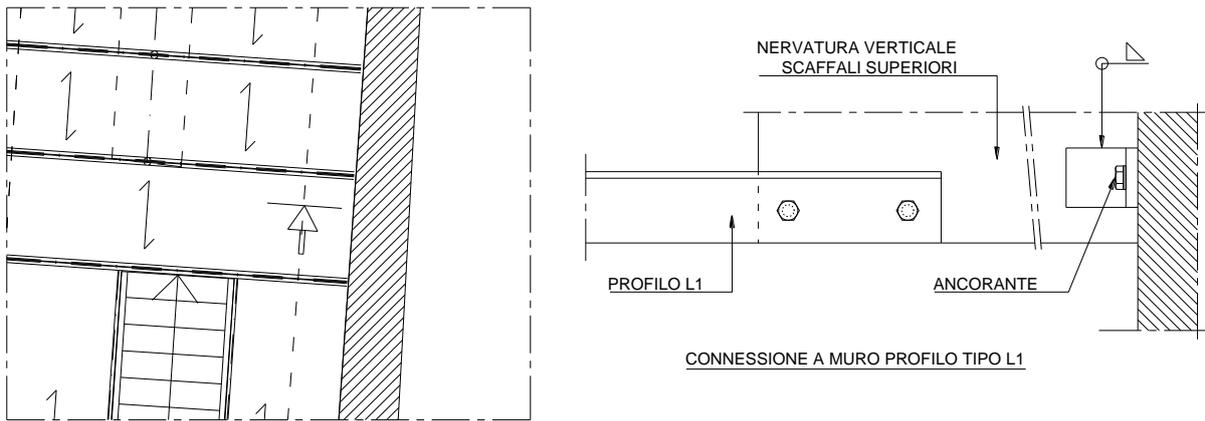


Figura 6.80: Piano Secondo - Soppalco a mensola Tipo 4, dettaglio "B"

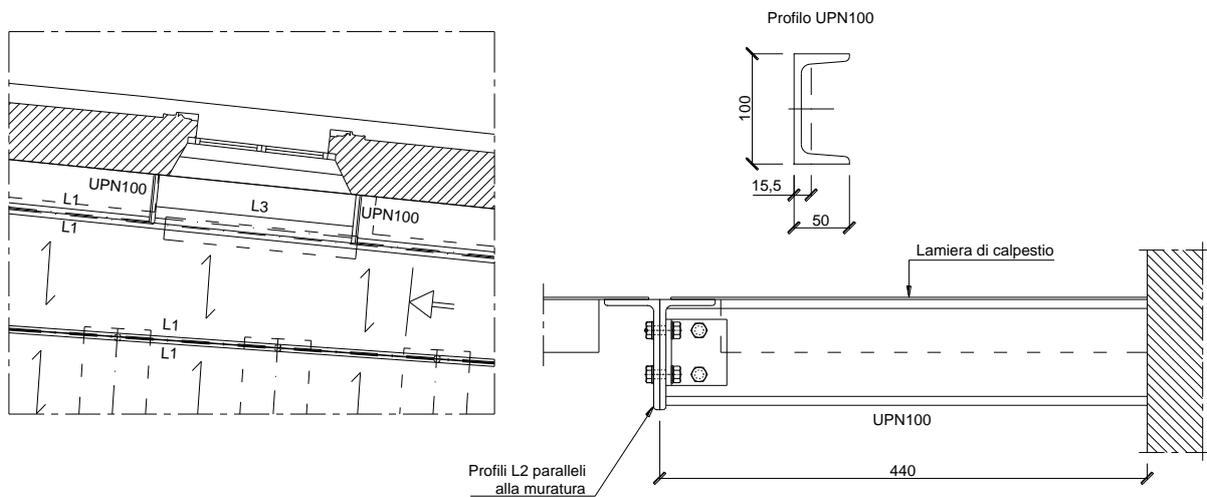


Figura 6.81: Piano Secondo - Soppalco Tipo 4, dettaglio "C"

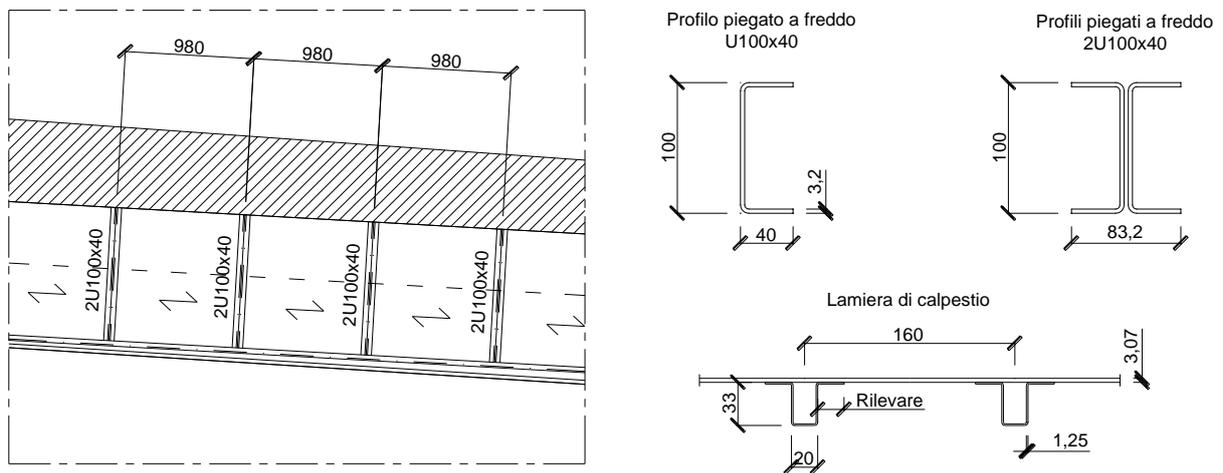


Figura 6.82: Piano Secondo - Soppalco a mensola Tipo 5

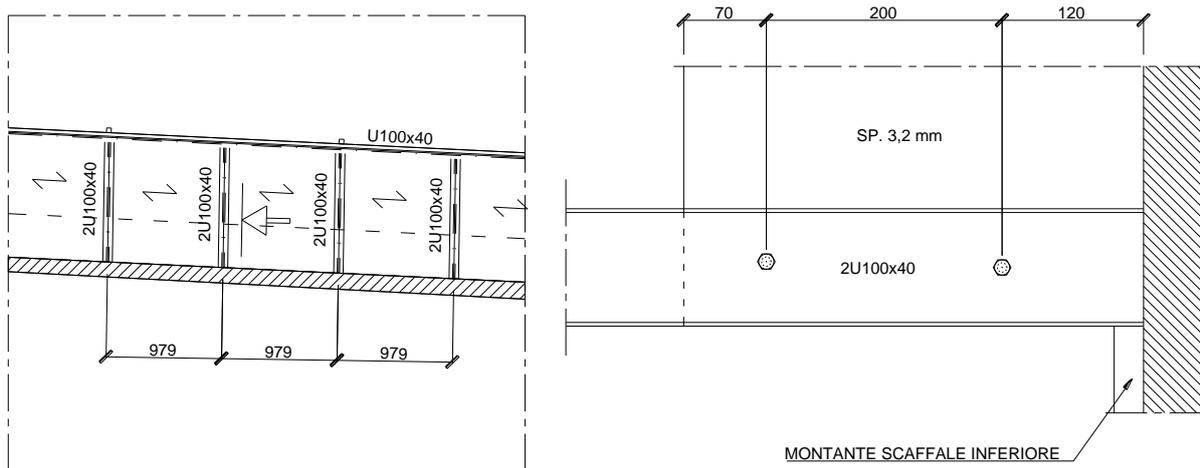


Figura 6.83: Piano Secondo - Soppalco a mensola Tipo 5, dettaglio "A"

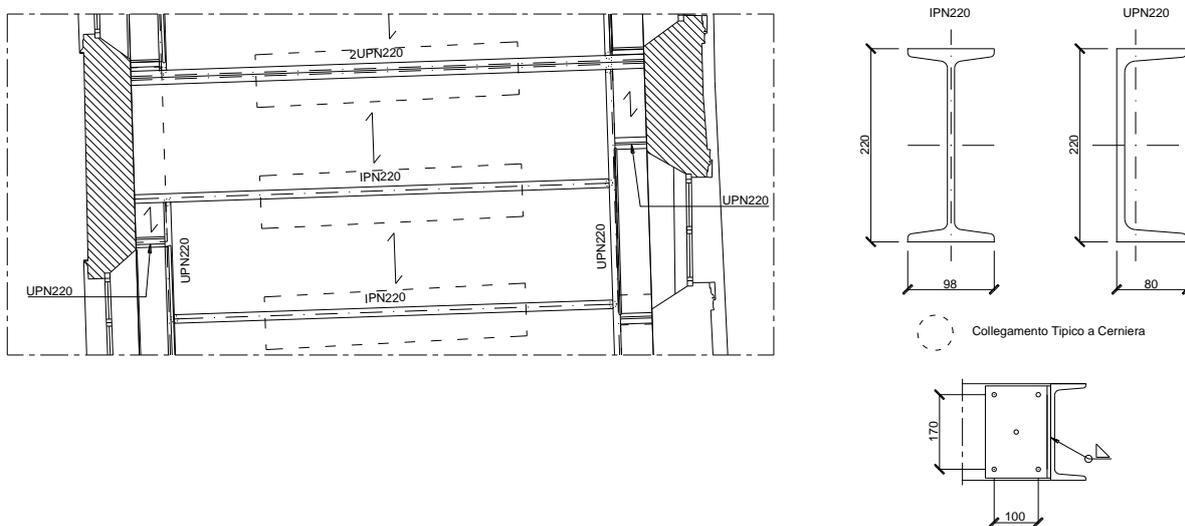


Figura 6.84: Piano Secondo - Soppalco a mensola Tipo 6

6.3 Rilievo dei carichi

a cura di Silvia Caprili e Francesco V. Lippi

I diversi piani del Palazzo della Sapienza di Pisa ospitano diverse destinazioni funzionali: aule didattiche, dipartimenti, locali di servizio a uso sia di studenti che di docenti, biblioteca Universitaria e, nell'ambito dei dipartimenti, singole biblioteche di settore, come sinteticamente riportato nelle figure 6.85, 6.86 e 6.87.

La valutazione degli effettivi carichi gravanti sul fabbricato si rende pertanto necessaria per l'analisi delle condizioni statiche di solai piani e orizzontamenti voltati, per il calcolo delle tensioni risultanti sulle pareti murarie e conseguentemente a livello di fondazione e per una globale verifica di vulnerabilità statica e sismica.

A tal fine, è stato condotto un accurato rilievo dei pesi gravanti sulla struttura: particolare attenzione è stata posta ai locali attualmente occupati dalla Biblioteca Universitaria (figure 6.86 e 6.87), caratterizzati dalla presenza di numerosi volumi, scaffalature di vario genere e soppalchi sia a livello del piano primo sia a livello del piano secondo (figure 6.88 e 6.89). Le biblioteche dipartimentali dell'Università di Pisa sono state invece sgomberate subito dopo l'Ordinanza del Sindaco di Pisa.



Figura 6.85: Destinazione locali piano terra.

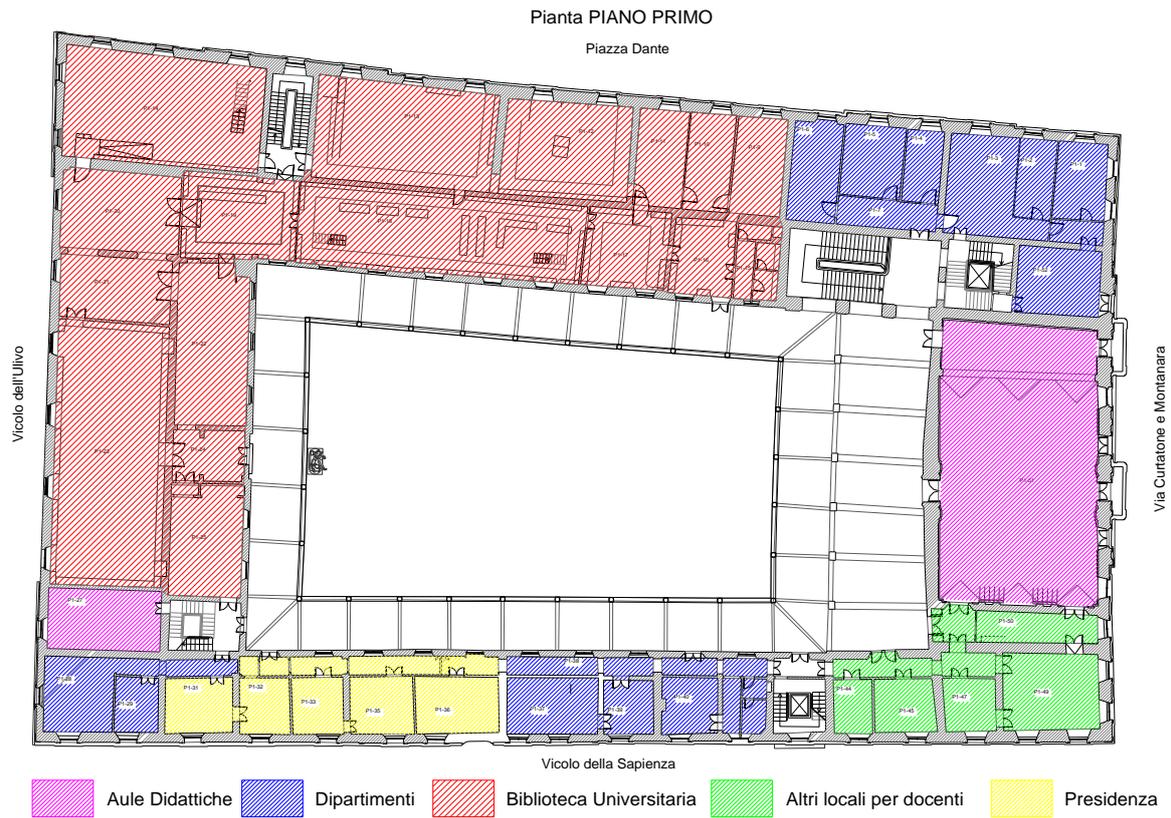


Figura 6.86: Destinazione locali piano primo.

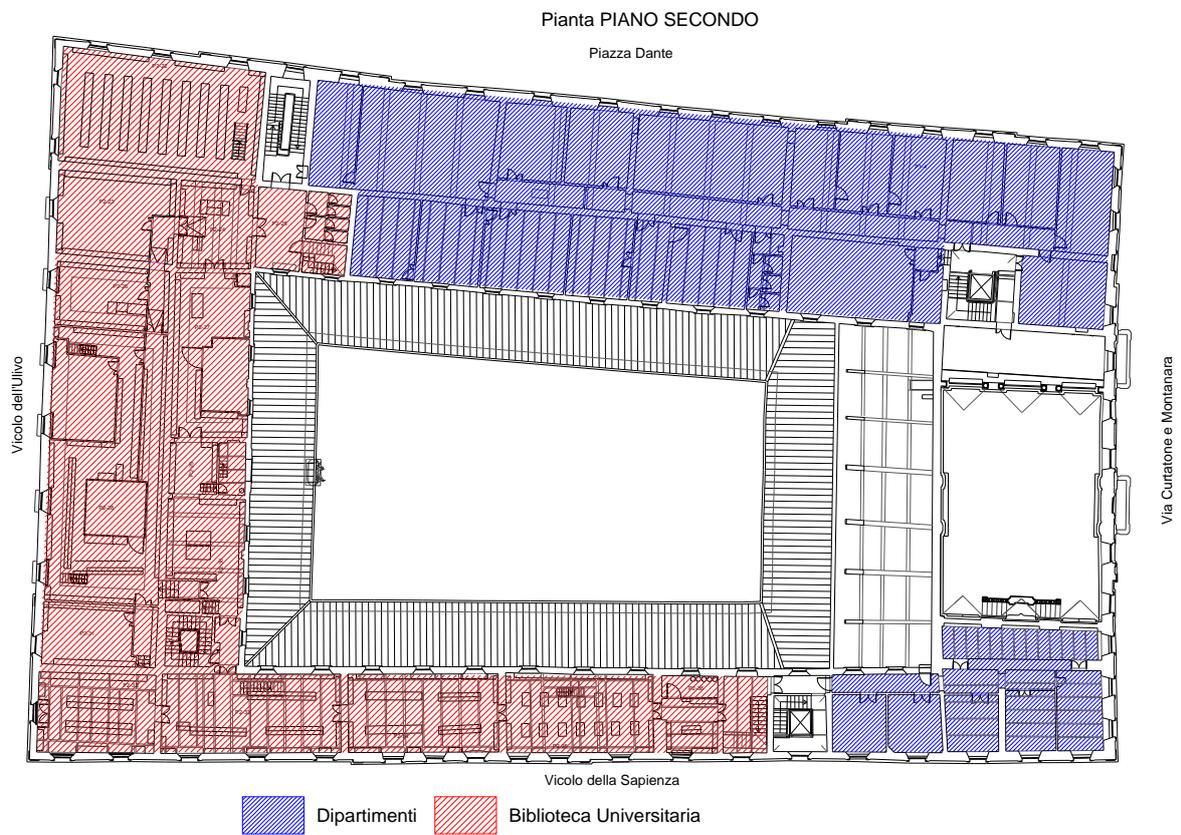


Figura 6.87: Destinazione locali piano secondo.



Figura 6.88: Alcune immagini dei locali della Biblioteca Universitaria: a) locale P1-23, b) locale P1-18.



Figura 6.89: Alcune immagini dei locali della Biblioteca Universitaria: a) locale P2-30, b) locale P2-24, c) dettaglio di un soppalco.

Data la grande varietà dei volumi presenti, diversi tra loro dimensioni, epoca di origine, tipologia di carta e rilegatura ed altro ancora, il rilievo degli effettivi carichi dovuti ai libri è stato effettuato per ciascun locale della Biblioteca Universitaria pesando direttamente, a mezzo di una bilancia di precisione (figura 6.90), i volumi presenti all'interno delle varie scaffalature, opportunamente divise per tipologia di libri contenuti, preliminarmente eseguita mediante una indagine visiva.

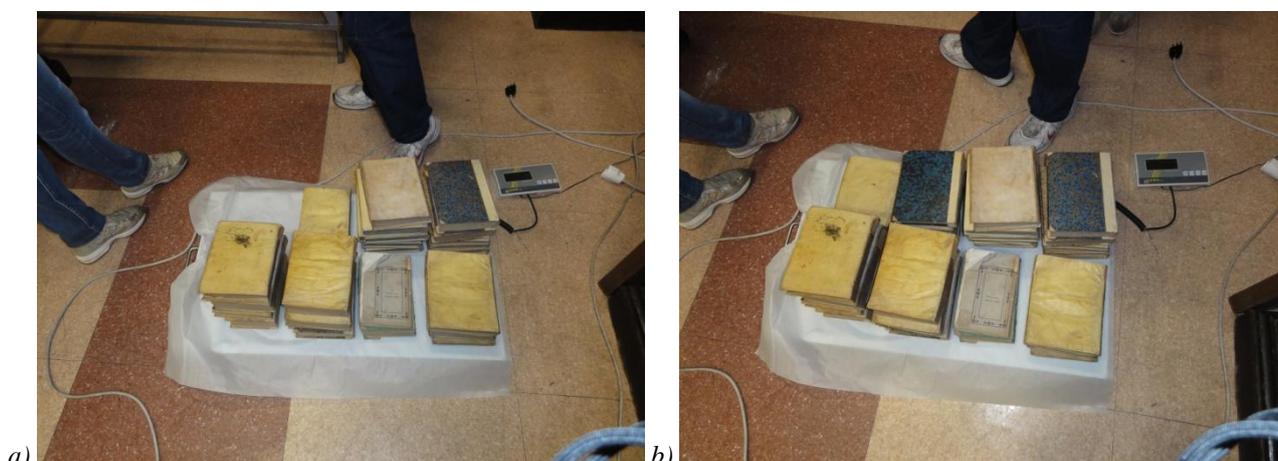


Figura 6.90: Alcune immagini delle fasi di pesatura dei libri della Biblioteca Universitaria.

Per ciascun locale, e all'interno di esso, per ciascuno degli scaffali oggetto di rilievo, è stata redatta una apposita scheda recante il numero dei ripiani presenti, la larghezza e la profondità del singolo ripiano, l'altezza media dei libri in esso presenti, l'indicazione del livello di riempimento dello scaffale e infine il peso per ciascun ripiano. A titolo esemplificativo, si riporta nella figura 6.91 un esempio di una scheda per il rilievo del peso delle scaffalature (locale P1-14 a piano primo).

I dati ottenuti sono stati quindi raggruppati per ciascun locale, ricavando il carico a metro lineare per ciascuna tipologia di scaffalatura e volumi in essa contenuti. Ad esempio, in figura 6.91 è riportata la pianta del locale P1-14 al piano primo, con indicazione di tutti gli scaffali oggetto di pesatura (in rosso, con il corrispondente peso espresso in kg); come visibile in figura 6.91, sono state effettuate sei diverse pesature, in relazione alla varietà dei libri contenuti nei diversi scaffali. La stessa procedura è stata ripetuta per i soppalchi, laddove presenti.

E' stato inoltre effettuato il rilievo delle varie tipologie di scaffalature presenti all'interno della biblioteca: questa operazione ha permesso di individuare la modalità di scarico a terra del peso della scaffalatura considerata, il numero di appoggi presenti e la loro esatta posizione.

Si sono individuate quattro tipologie prevalenti di scaffalature, a cui devono essere sommati i vari scaffali isolati di forma, dimensione e materiale di volta in volta differente. Le tipologie sono state indicate dalla sigla TS (Tipologia Scaffalatura) seguite da un numero progressivo. In particolare:

1. Tipologia Scaffalatura 1 (TS1): caratterizzata da 4 appoggi a terra per ciascun scaffale (2 montanti verticali per parte, Figura 6.94), il ripiano più in basso scarica però direttamente a terra.
2. Tipologia Scaffalatura 2 (TS2): caratterizzata da 4 appoggi a terra per ciascun scaffale (2 montanti verticali per parte, Figura 6.95).
3. Tipologia Scaffalatura 3 (TS3): caratterizzata da 3 appoggi anteriori e 2 appoggi posteriori (Figura 6.96).
4. Tipologia Scaffalatura 4 (TS4): caratterizzata da due appoggi (uno per parte della scaffalatura), con ripiani generalmente a mensola rispetto al telaio di sostegno (Figura 6.96).

Il rilievo delle varie tipologie di scaffalature presenti all'interno della Biblioteca Universitaria ha permesso di redigere due piante con l'indicazione dei punti in cui il peso dei volumi grava sul solaio sottostante. Le figure 6.97 e 6.98 si riferiscono rispettivamente ai locali della biblioteca al primo e secondo piano del Palazzo della Sapienza; in particolare, nelle planimetrie sono riportati:

- in blu le scaffalature presenti all'interno del locale considerato, associando a ciascuno scaffale un numero progressivo;
- in rosso gli scaffali il cui peso è stato direttamente rilevato secondo le modalità precedentemente descritte;
- in nero, mediante cerchi con croce interna, i punti di appoggio a terra delle varie scaffalature, con le corrispondenti distanze.

Si precisa inoltre che i solai riportati nelle piante sono quelli relativi al piano di calpestio del locale corrispondente, al fine di permettere la sovrapposizione tra scaffalature, punti di appoggio e orditura degli orizzontamenti o delle volte, se presenti: ad esempio, nella pianta del piano primo (figura 6.97) sono riportate le orditure dei solai tra piano terra e piano primo, nella pianta del piano secondo (figura 6.98) sono rappresentati i solai tra piano primo e piano secondo.

Biblioteca Sapienza

Schede Rilievo Peso Scaffalature

Data: 16/05/2013

Rilievo Effettuato da:

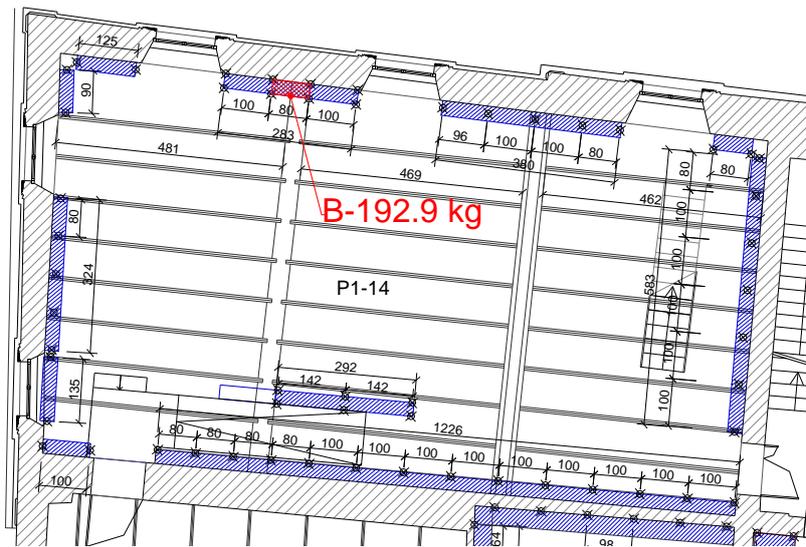
Piano: I

Stanza: P1-14

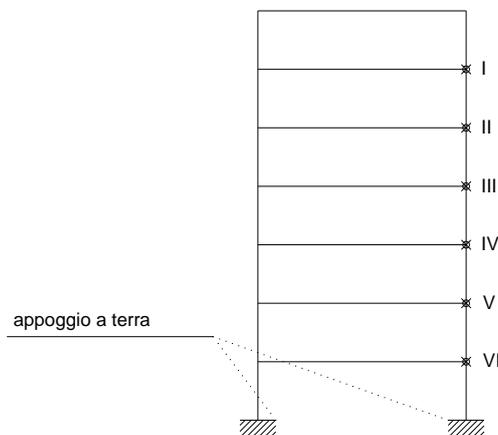
Identificativo Scaffalatura:

P1-14-B

POSIZIONE SCAFFALATURA NELLA STANZA



SCHEMA FISSAGGIO A TERRA/PARETE SCAFFALATURA:



PESATE

N	Ripiano	Larghezza Ripiano (cm)	Altezza Libri (cm)	Profondità Libri (cm)	Ripiano Pieno (sì/no)	kg	note
1	I	76	30	20,5	SI	35,2	
2	II	76	30	20,5	SI	36,8	
3	III	76	30	20,5	SI	30,8	
4	IV	76	28,5	21	SI	33,2	
5	V	76	28,5	21	SI	34,6	
6	VI	76	28,5	21	NO (7/11)	22,3	

Figura 6.91: Esempio scheda pesatura scaffalature..

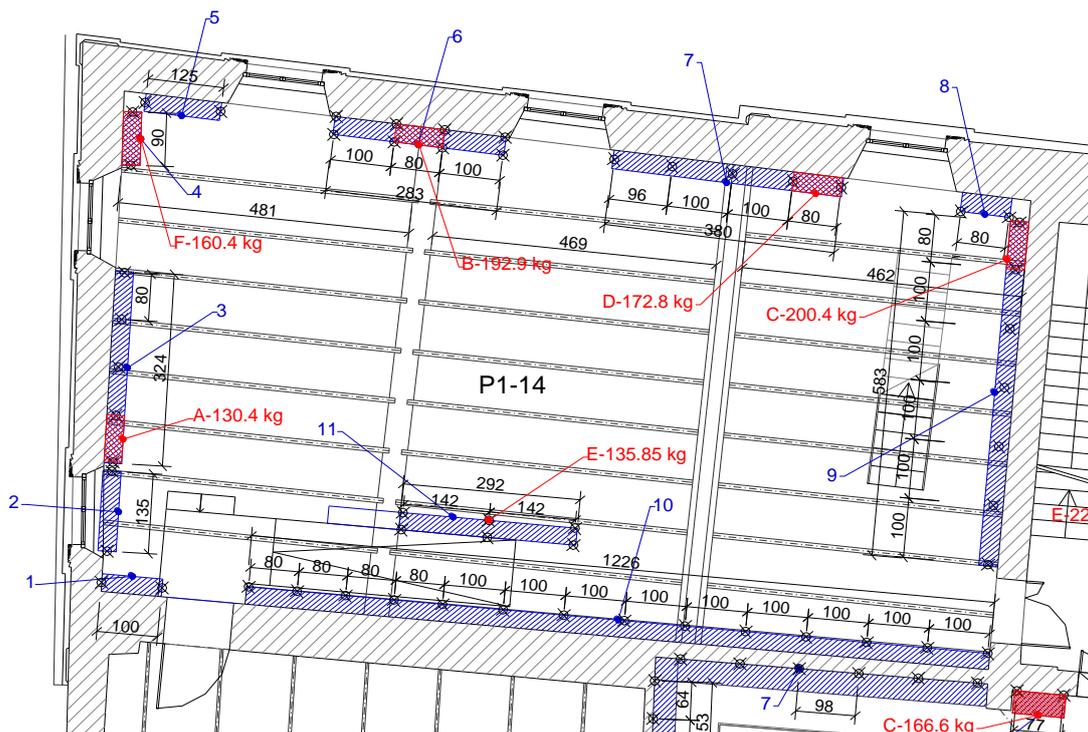


Figura 6.92: Locale P1-14: indicazione degli scaffali presenti (in blu) e di quelli direttamente pesati (in rosso).

Tabella 6.1: Dimensioni e pesi delle scaffalature direttamente pesate nel locale P1-14.

Stanza	Scaffale	Livello	Tipo	Peso Totale	Larghezza	Carico
				[kg]	[cm]	[kg/m]
P1-14	A	piano	tipo unico	130,40	76	171,6
P1-14	B	piano	tipo unico	192,90	76	253,8
P1-14	C	piano	tipo unico	200,40	76	263,7
P1-14	D	piano	tipo unico	172,83	76	227,4
P1-14	E	piano	scaffale isolato	135,85	133	102,1
P1-14	F	piano	tipo unico	160,43	76	211,1



Figura 6.93: Esempi di scaffalature di tipologia TSI.



Figura 6.94: Esempi di scaffalature di tipologia TS2.



Figura 6.95: Esempio di scaffalatura di tipologia TS3.

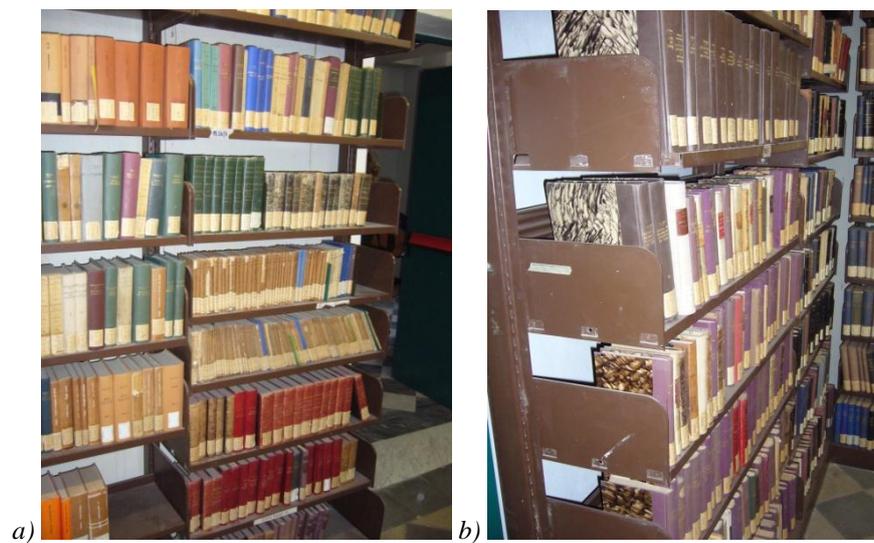


Figura 6.96: Esempio di scaffalatura di tipologia TS4.

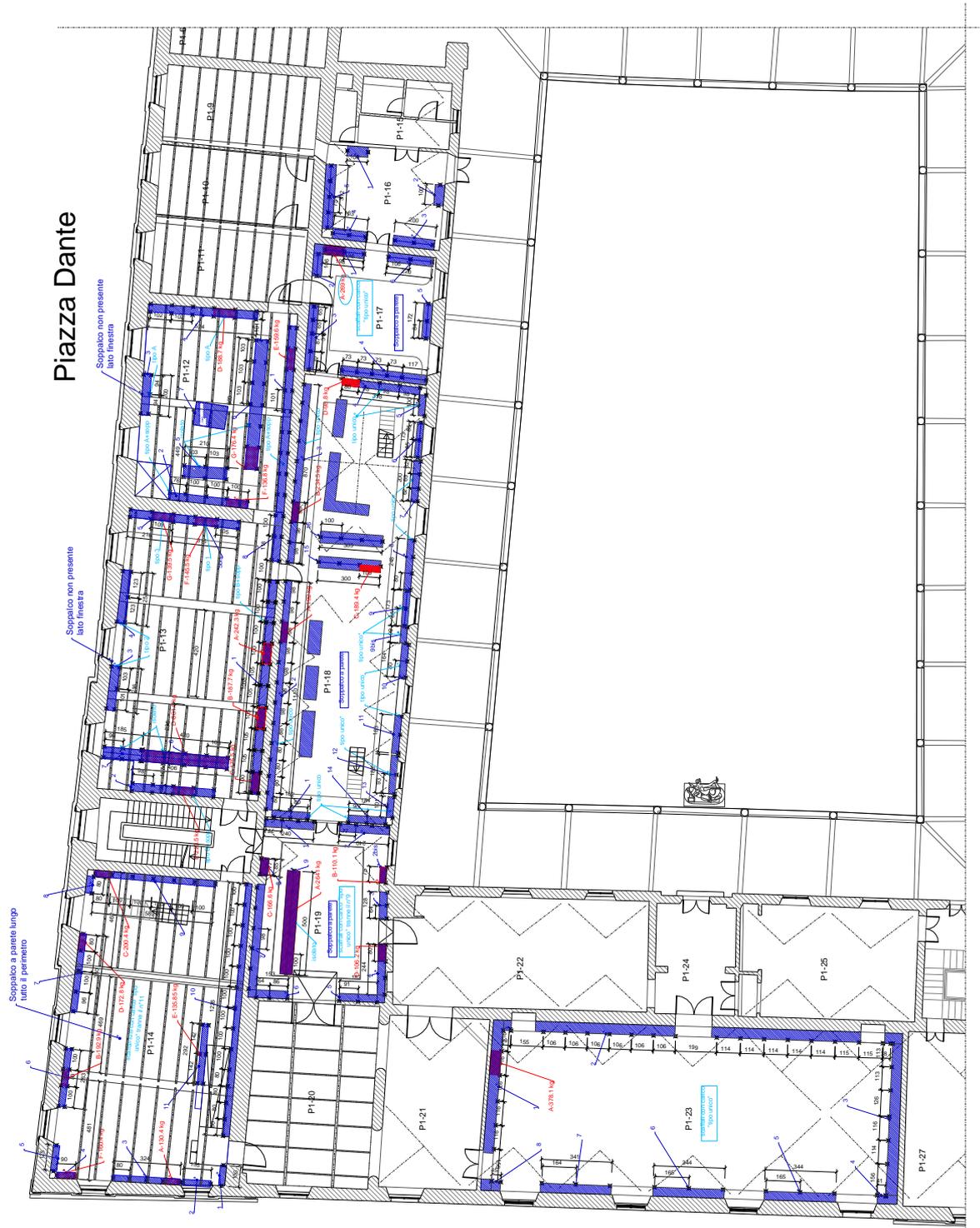


Figura 6.97: Estratto della pianta del piano primo (locali Biblioteca Universitaria); pesi scaffalature, posizione appoggi sui solai tra piano terra e piano primo.



Figura 6.98: Estratto della pianta del piano secondo (locali Biblioteca Universitaria); pesi scaffalature, posizione appoggi sui solai tra piano primo e piano secondo.

6.4 Strutture di fondazione

a cura di Giuseppe Scarpelli e Nunziante Squeglia

6.4.1 Indagini eseguite sulla muratura in fondazione

L'analisi storica ha messo in evidenza l'estrema eterogeneità della struttura in elevazione, ciononostante non sono emersi studi o informazioni riguardanti le fondazioni, è stato pertanto necessario programmare apposite indagini al fine di acquisire le informazioni necessarie alla valutazione del relativo livello di sicurezza.

A causa della presunta eterogeneità delle strutture di fondazione, della presenza della falda in prossimità del piano campagna e della presumibile presenza di macerie nei primi strati di terreno intorno alle fondazioni, si è optato per l'uso di indagini dirette in grado di garantire una maggiore affidabilità dei risultati.

Con riferimento alla ricostruzione storica dell'evoluzione della struttura dell'edificio sono state prescelte le zone in cui concentrare le indagini effettuate operando una serie di carotaggi a diversa inclinazione (Squeglia, 2013) sì da attraversare il terreno e la struttura di fondazione, ricavandone campioni significativi. Lo schema dell'indagine è riportato in figura 6.99.

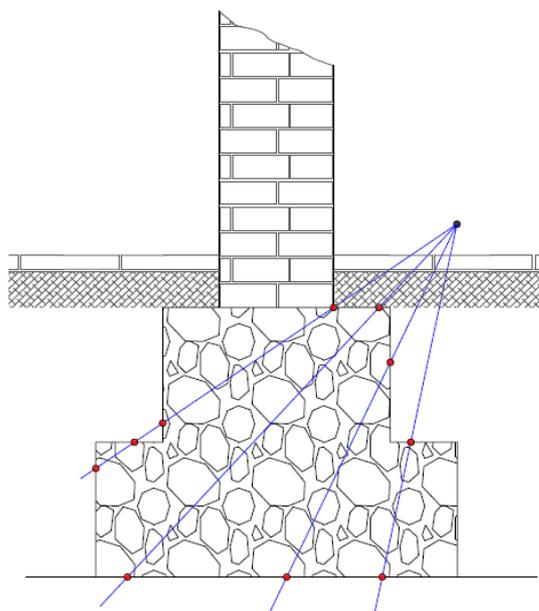


Figura 6.99: Schema delle indagini sulle fondazioni.

Le perforazioni sono state effettuate mediante una carotatrice Hilti DD200 con aste di perforazione di diametro esterno 35 mm e lunghezza massima esplorabile di 4.5 metri, utilizzando circolazione di acqua a bassa pressione per il raffreddamento.

Oltre al recupero ed alla descrizione del materiale carotato sono state osservate e registrate le seguenti grandezze:

- velocità di avanzamento;
- presenza del ricircolo dell'acqua di raffreddamento;
- colore dell'acqua di raffreddamento;
- anomalie nel funzionamento dell'apparecchiatura.

Le sezioni investigate sono indicate nella figura 6.100, in cui la numerazione indica anche la sequenza temporale dei lavori. Le sezioni indagate sono state 11, mentre le perforazioni sono state 42 con una lunghezza massima di 4.5 metri.

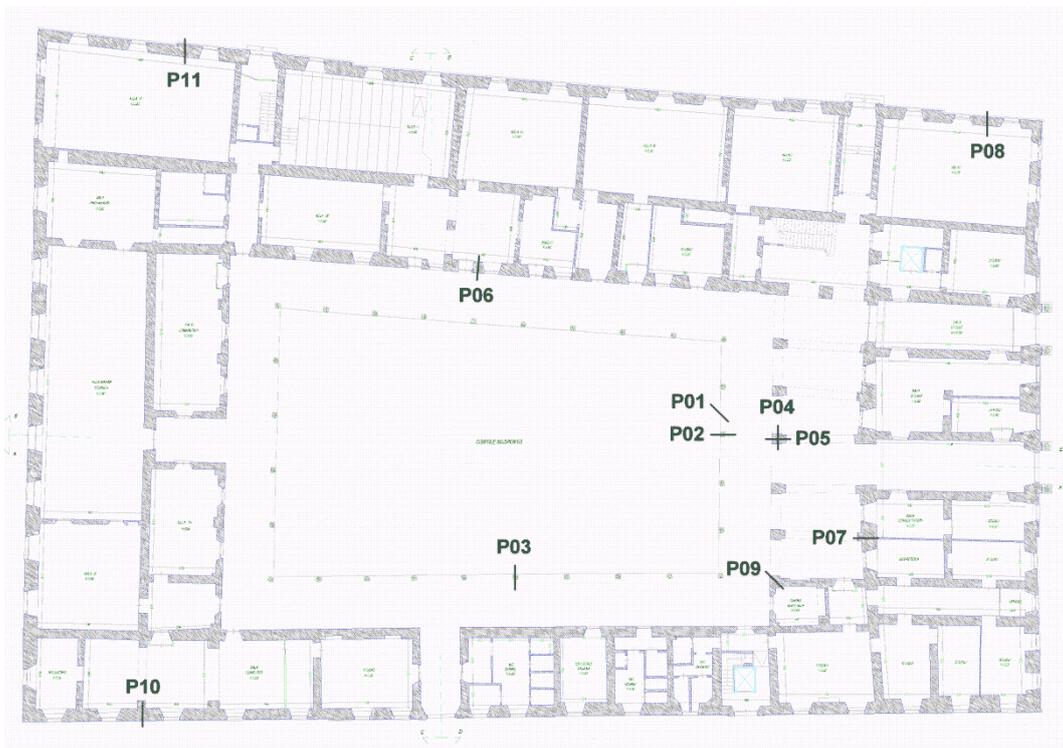


Figura 6.100: Disposizione planimetrica delle indagini sulle fondazioni.

Fin dalle prime perforazioni è emersa l'importanza della misura della velocità di avanzamento come parametro discriminante per l'interpretazione delle misure. Infatti il materiale che costituisce il masso di fondazione si è rivelato sin da subito molto povero in termini di resistenza, portando a percentuali di recupero piuttosto basse. Allo scopo di migliorare la misura dell'avanzamento in fase di perforazione, si è passati dalla misura manuale ad una misura mediante distanziometro laser (Leica Disto D2). L'uso del distanziometro ha consentito di aumentare la frequenza delle misure, ottenendo così una maggiore facilità di interpretazione dei dati.

Con questa procedura di registrazione dei dati di avanzamento sono state eseguite le perforazioni fino alla posizione P08. Il materiale recuperato, insieme ai dati di avanzamento e di osservazione del ricircolo, ha consentito di ricostruire le stratigrafie dei singoli carotaggi, così come riportato nell'esempio di figura 6.101. Per l'esecuzione delle ultime tre sezioni, allo scopo di migliorare ulteriormente il dettaglio delle informazioni, è stato utilizzato un distanziometro laser (Leica Disto D8) in grado di registrare i dati direttamente su di un computer con una frequenza di campionamento fino a venti misure per minuto.

L'incrementata capacità del rilievo della velocità di avanzamento ha imposto all'operatore della macchina di mantenere per quanto possibile costante lo sforzo assiale durante l'avanzamento.

I risultati delle misure in termini di velocità di avanzamento hanno consentito una maggiore precisione nell'individuazione delle parti più resistenti della muratura in modo complementare al recupero del materiale stesso attraverso il carotaggio. Un esempio di elaborazione dei dati in termini di velocità di avanzamento è riportato in figura 6.102, in cui sono evidenti le variazioni di velocità tra ciò che è classificabile come muratura e ciò che è risultato meno resistente.

Una certa difficoltà nell'interpretazione dei dati registrati è stata causata dalla presenza di elementi non collegabili alla muratura di fondazione, ma che esprimevano una certa resistenza all'avanzamento della carotatrice. I risultati dei carotaggi in fondazione sono riportati in una apposita relazione, allegata al presente documento, cui si rimanda per i dettagli.

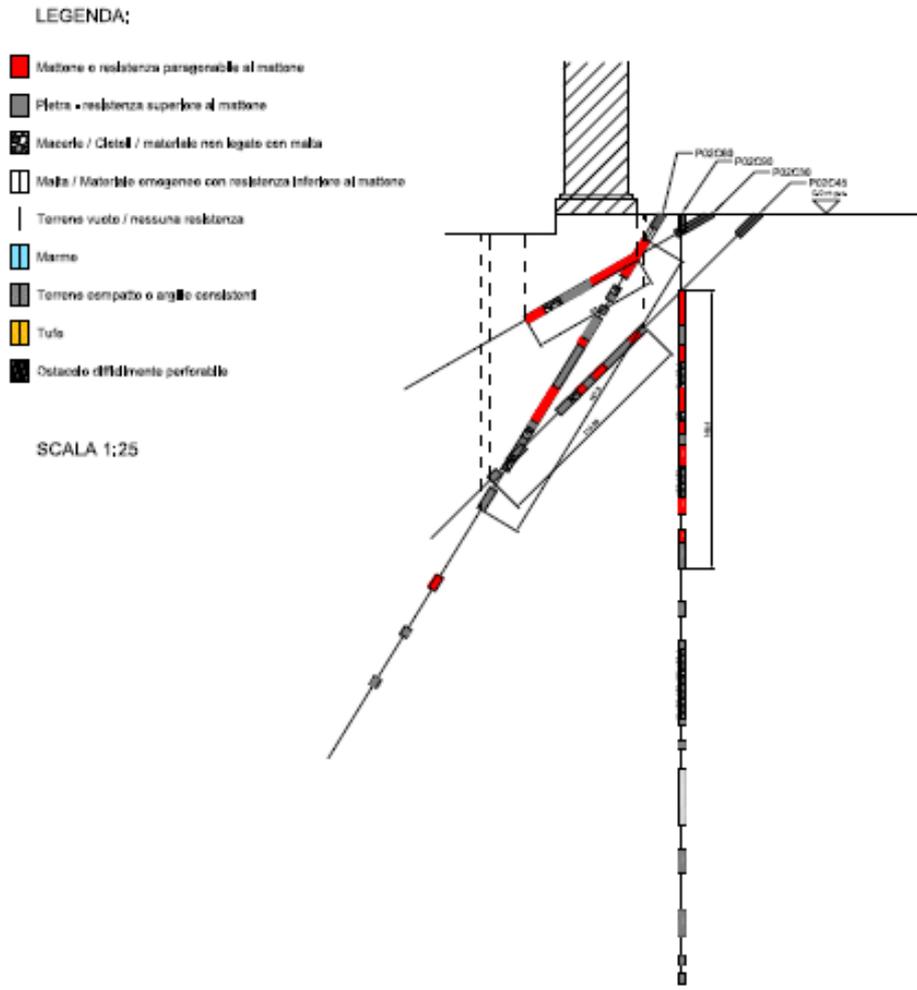


Figura 6.101: Esempio delle informazioni ottenute attraverso i carotaggi.

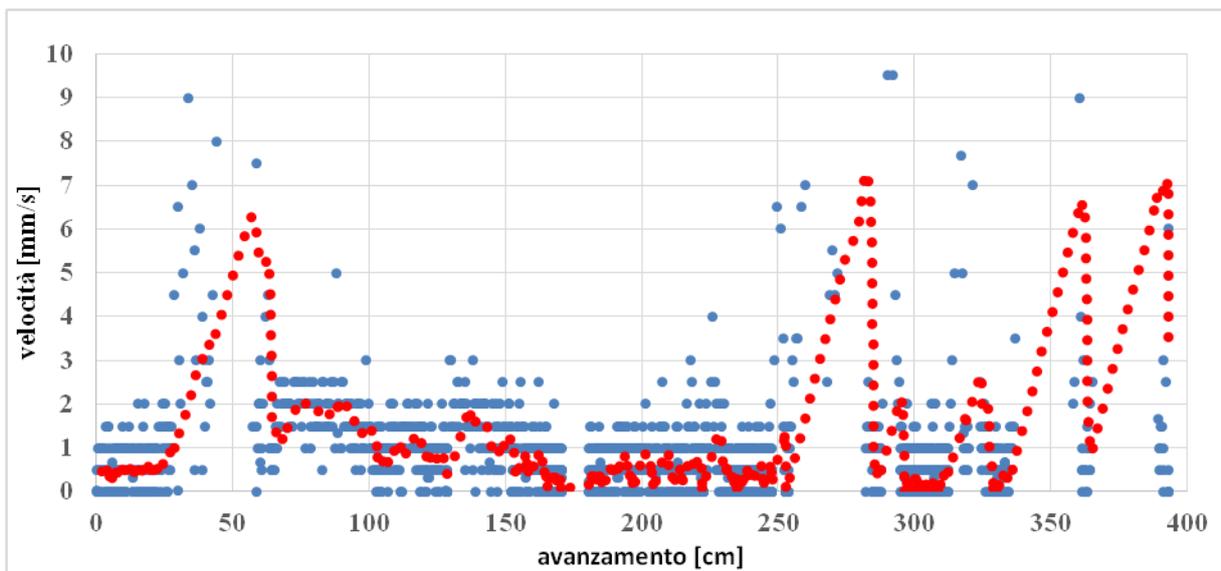


Figura 6.102: Esempio di elaborazione dei dati di avanzamento. In rosso è riportata la media mobile.

6.4.2 Interpretazione delle indagini e geometria delle fondazioni

Le indagini effettuate hanno permesso la definizione della geometria della fondazione dell'edificio, pur permanendo, data la complessità della storia dell'edificio, alcune incertezze.

Nel seguito saranno indicate le configurazioni dedotte dai carotaggi per ogni zona considerata come omogenea.

Le prime indagini, le sezioni P01, P02 e P03, hanno riguardato le colonne del loggiato interno. La sezione P01 aveva lo scopo di indagare l'eventuale presenza di un collegamento tra le fondazioni delle diverse colonne, mentre le sezioni P02 e P03 avevano l'obiettivo di valutare l'omogeneità delle fondazioni. Per ciò che riguarda il collegamento tra le fondazioni delle colonne, i carotaggi effettuati hanno mostrato l'assenza di tale collegamento per cui si deve ritenere che ogni colonna abbia una fondazione isolata.

Per quanto riguarda la fondazione della colonna, i carotaggi delle sezioni P02 e P03 hanno consentito l'individuazione del piano di fondazione a circa 1.9 m dal piano di campagna mentre l'impronta di base può essere supposta di forma quadrata con lato pari a 1.1 metri. La muratura è risultata priva di una regolarità costruttiva, nel senso che è stata riscontrata la presenza sia di mattoni pieni sia di bozze calcaree legati da una malta poco resistente, in quanto facilmente dilavata dall'acqua di raffreddamento della carotatrice.

Le sezioni P04 e P05 hanno indagato la fondazione di uno dei pilastri posti ad est della corte interna. Le sezioni si incrociano ad angolo retto in prossimità del centro del pilastro. La muratura della fondazione sembra essere costituita prevalentemente da mattoni pieni legati da una malta poco resistente, in quanto facilmente dilavata dall'acqua di raffreddamento della carotatrice. La presenza di vuoti nella parte più superficiale è piuttosto scarsa; sono stati rinvenuti materiali di consistenza lapidea alternati a zone di bassissima resistenza anche a profondità elevata, fino al termine della perforazione. Quest'ultima informazione riguarda in particolare la direzione ortogonale all'allineamento dei pilastri, ma la presenza di numerose ed ampie zone a bassissima resistenza impedisce di inferire la continuità strutturale della fondazione. Per questo motivo si suppone che i pilastri abbiano una fondazione isolata con piano di fondazione posto alla profondità di 1.75 m ed una impronta rettangolare di lati 1.00 m e 1.80 m, con il lato lungo nella direzione dell'allineamento dei pilastri.

La sezione P06 ha riguardato il muro adiacente al loggiato, posto a nord della corte interna. Le perforazioni hanno messo in evidenza una scarsa presenza di mattoni pieni ed una maggiore presenza di materiale lapideo. La geometria dedotta dai carotaggi mostra una fondazione che si può ragionevolmente ritenere continua con piano di fondazione posto chiaramente a circa un metro di profondità, mentre la larghezza può essere fissata in 1.50 metri.

La fondazione del muro posto ad est dell'allineamento dei pilastri è stata indagata con le perforazioni della sezione P07. Come già evidenziato nel caso dei pilastri, nella muratura in fondazione sono presenti mattoni pieni insieme a materiali di difficile perforabilità fino alla massima profondità esplorabile. In questo caso è stato utile far riferimento alla velocità di avanzamento della perforazione che ha messo in evidenza la presenza di zone a bassissima resistenza intervallate da zone a maggiore resistenza all'avanzamento. Ciò ha permesso di individuare il piano di fondazione a 1.50 m dal piano di campagna, mentre la larghezza risulta di ben 2.40 metri. La fondazione è stata supposta di forma rettangolare allungata.

La sezione P08 è relativa ad una delle zone più recenti dell'edificio ed è stata realizzata dall'interno. Ciò ha limitato la profondità di indagine in quanto vi è una differenza di quota tra l'interno e l'esterno dell'edificio (Piazza Dante) pari a circa un metro. Ciononostante le informazioni sono sufficienti a definirne la geometria e la consistenza. Riguardo quest'ultima, come in altri casi, si rileva la presenza di mattoni pieni fino alle massime profondità indagate intervallati da elementi calcarei. La continuità della muratura risulta buona in quanto non si rilevano vuoti. La profondità del piano di fondazione è indicabile in 1.50 metri dal piano campagna esterno, mentre la presumibile larghezza dell'impronta della fondazione è di 0.90 metri. Quest'ultimo dato, decisamente minore rispetto a quanto visto finora, unitamente alla presenza di legno rinvenuto alla profondità di imposta del piano di fondazione, lascia ritenere che il muro sia fondato su pali lignei, di cui tuttavia non si ha conferma.

Osservando la pianta dell'edificio si nota che la continuità del loggiato inferiore è interrotta dalla presenza di un vano che è attualmente occupato dalla cabina Enel. La fondazione del vano è stata indagata mediante le perforazioni della sezione P09. La muratura, così come restituita dalle carote, mostra la quasi totale assenza di mattoni pieni ed una maggiore presenza di elementi lapidei. Gli elementi lapidei sono spesso intervallati da zone di bassa resistenza che inducono a ritenere che vi siano molte discontinuità. Il quadro non risulta chiaro in particolare per la presenza delle discontinuità all'interno dell'area di impronta del muro in

elevazione. Il piano di fondazione è individuabile a circa 2 metri di profondità tramite la perforazione verticale, mentre la larghezza della fondazione, sia pure con molte incertezze, è fissabile in due metri. Bisogna sottolineare che tali dimensioni sono relative ad un piano verticale che passa per la bisettrice dello spigolo, pertanto la larghezza della fondazione sarà minore e dell'ordine di 1.50 metri.

Le sezioni P10 e P11 riguardano il muro perimetrale e sono rispettivamente poste a sud ed a nord. In entrambi i casi si osserva una discreta compattezza della muratura e soprattutto la scarsa presenza di vuoti, così come evidenziato dai diagrammi di velocità di avanzamento. Nel caso della sezione P10 (sud) la larghezza della fondazione può essere posta pari a 1.75 metri, mentre la profondità del piano di fondazione è pari a 2.75 metri. Valori simili per quanto riguarda la larghezza in fondazione si ha per la sezione P11, per la quale la larghezza risulta di 1.60 metri. La profondità rispetto al piano di campagna sembra invece molto minore e pari a 2.10 m. In realtà la differenza di quota tra i due piani di fondazione risulta molto minore in virtù del fatto che Piazza Dante si trova ad una quota molto minore rispetto a via della Sapienza, pertanto i piani di fondazione si trovano praticamente alla stessa quota e la differenza di 65 cm in profondità può essere ascritta principalmente alla differenza di quota del piano di campagna. Tuttavia la differenza di profondità rispetto al piano di campagna comporta delle differenze nel comportamento della fondazione dal punto di vista geotecnico da tenere in debito conto nella verifica della fondazione stessa.

7. RILIEVO DELLO STATO FESSURATIVO

a cura di Silvia Caprili

Al fine di individuare eventuali movimenti e cedimenti in atto o in evoluzione, è stato eseguito un accurato rilievo del quadro fessurativo presente nel Palazzo della Sapienza. Si sono pertanto condotti indagini e sopralluoghi finalizzati ad una classificazione qualitativa delle lesioni presenti nell'edificio, distinguendo lesioni "gravi", lesioni "intermedie" e lesioni "lievi" in funzione dell'entità e della posizione all'interno del fabbricato.

In particolare, nelle figure 7.1, 7.2 e 7.3 sono riportate rispettivamente le piante del piano terra, piano primo e piano secondo con l'indicazione delle lesioni rilevate. Le lesioni presenti in corrispondenza delle pareti verticali sono indicate mediante cerchio pieno in corrispondenza del punto di inizio o fine della fessura rilevata, mentre per quelle presenti in corrispondenza del solaio o delle volte ne è stato direttamente rappresentato l'andamento.

A ciascuna lesione significativa è stato associato un codice di riferimento, costituito da una soglia indicante il livello (piano terra – PT, piano primo – P1 o piano secondo – P2), il numero del locale corrispondente, la lettera "L" per le lesioni sulle pareti verticali e "S" per le lesioni in corrispondenza degli orizzontamenti e delle volte e un numero progressivo. Ad esempio:

PT-30-L1

In cui:

PT-30 *indica il numero del locale che si sta considerando (stanza 30 a piano terra)*
L1 *Lesione in corrispondenza della parete verticale, n°1.*

A ciascuna lesione è stato poi attribuito un colore rappresentativo dell'importanza della lesione, verde per le lesioni lievi, blu per le lesioni intermedie e rosso per quelle gravi (tabella 7.1).

Tabella 7. 1: Legenda impiegata per la classificazione delle lesioni.

		Lesioni Lievi
		Lesioni Intermedie
		Lesioni gravi

Per ciascun locale è stato elaborato un rapporto recante l'estratto della pianta della porzione considerata con l'indicazione delle lesioni e le immagini delle fessure individuate, opportunamente rimate se necessario. Si sottolinea inoltre che nelle piante globali del fabbricato sono riportate tutte le lesioni individuate durante i sopralluoghi eseguiti in situ, mentre nei report fotografici sono presenti solamente quelle significative: in alcuni casi infatti le lesioni di modesta entità non sono facilmente rilevabili dalle immagini e pertanto non riportate.

I rapporti fotografici con il dettaglio delle lesioni per ciascun locale sono riportati in allegato.

A titolo esemplificativo, nelle pagine seguenti si riportano alcuni dettagli dei locali in cui sono stati individuate alcune delle lesioni più significative e le corrispondenti immagini.

Pianta PIANO TERRA
Piazza Dante



Figura 7.1: Pianta del piano terra con indicazione delle lesioni.

Pianta PIANO PRIMO

Piazza Dante



Figura 7.2: Pianta del piano primo con indicazione delle lesioni.

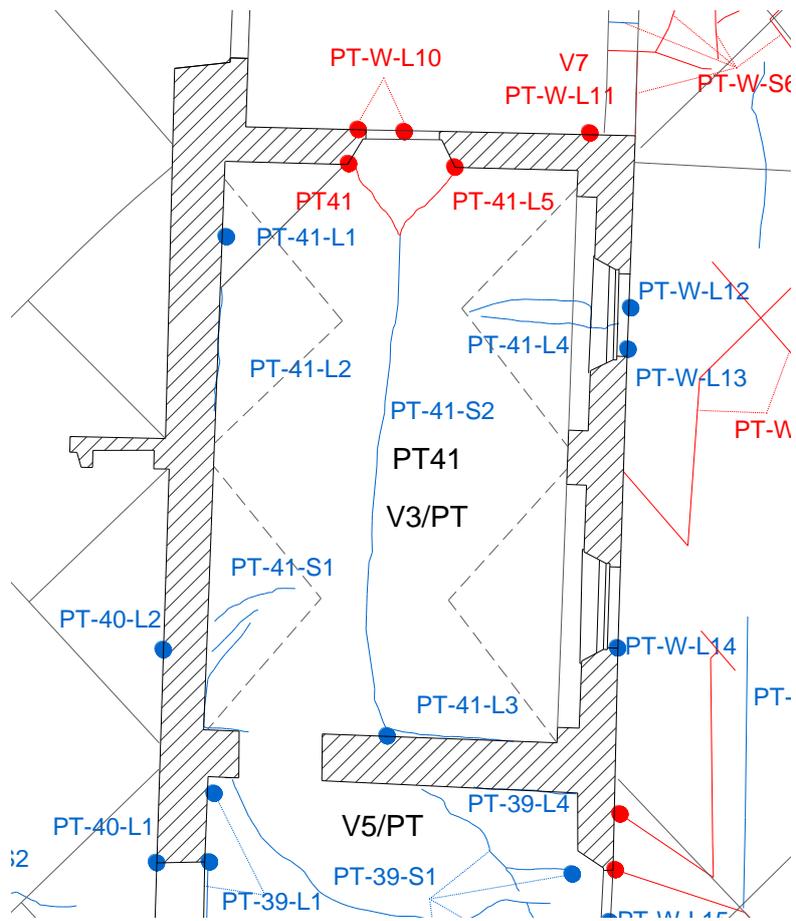
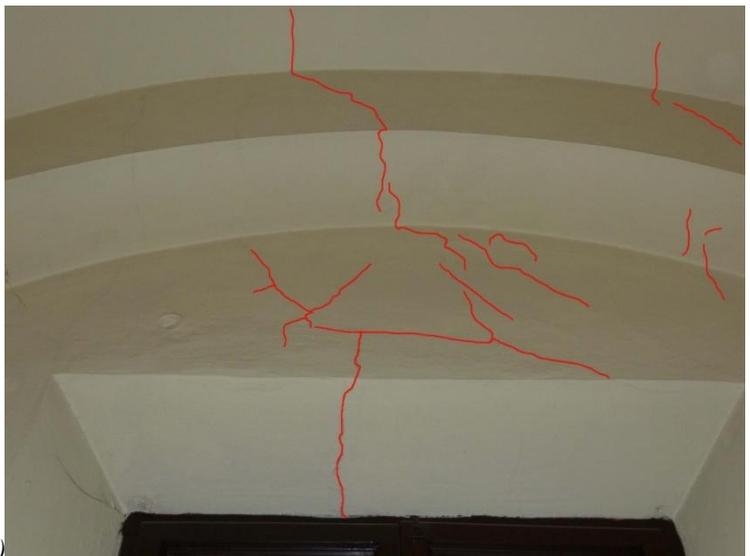


Figura 7.3: Locale PT-41, localizzazione delle lesioni (piano terra).



a)



b)

Figura 7.4: Dettagli delle lesioni: a) PT-41-L5 (lesione grave), b) PT-41-L4 (lesione intermedia).

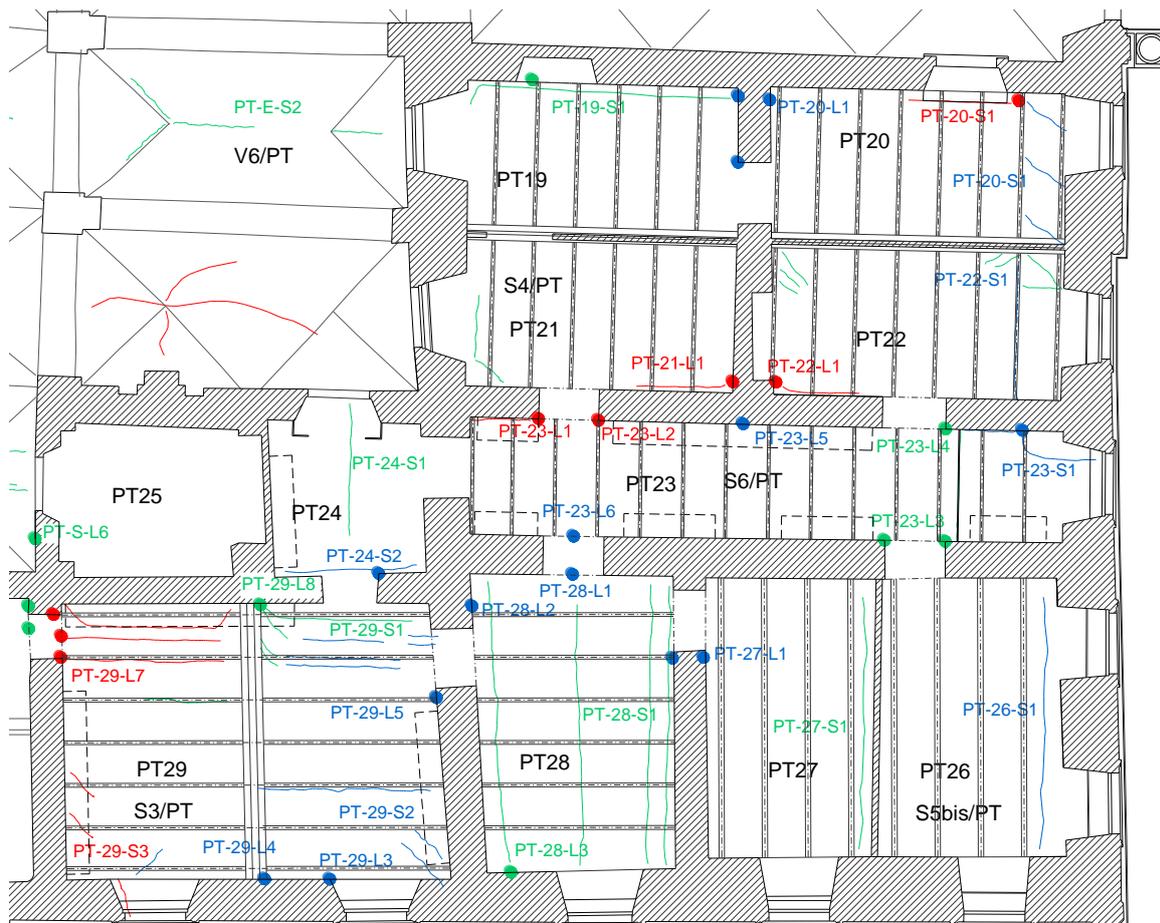


Figura 7.5: Locali da PT-19 a PT-29, localizzazione delle lesioni (piano terra).

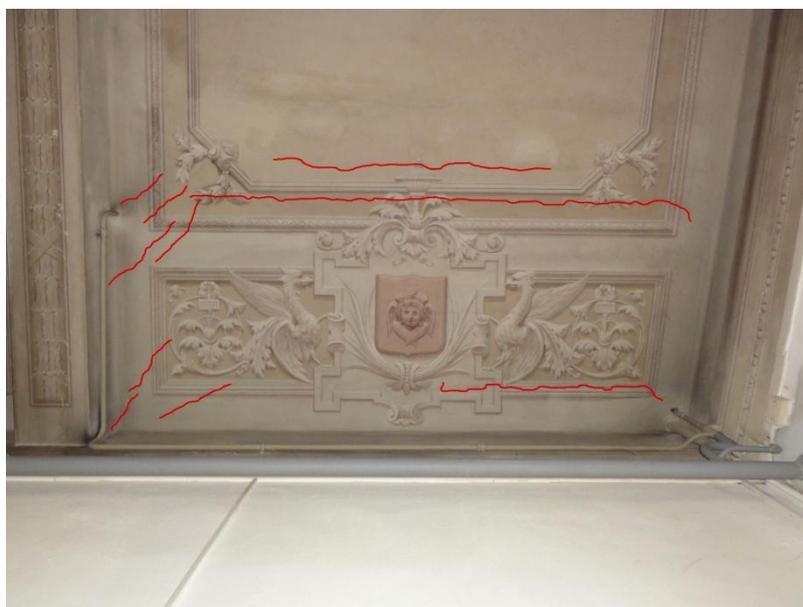


Figura 7.6: Locale PT-29, dettaglio lesione in corrispondenza del solaio PT-29-L7.

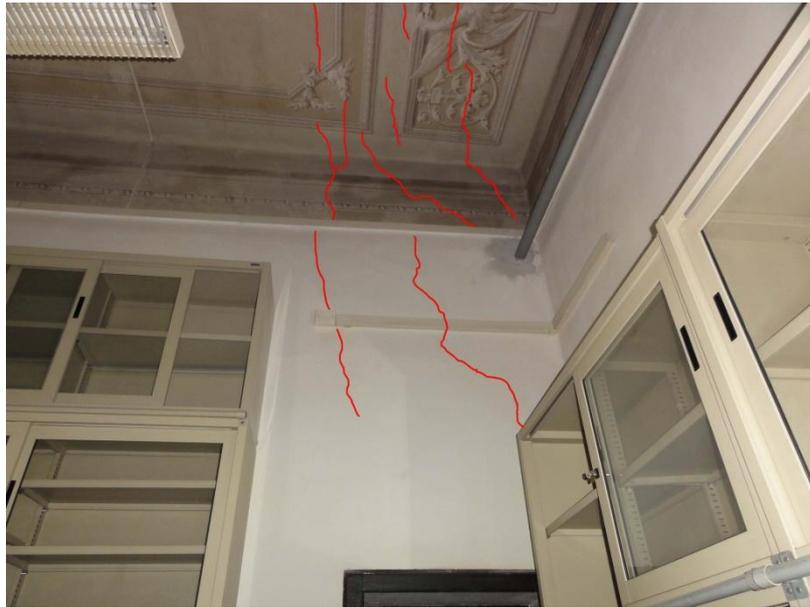


Figura 7.7: Locale PT-29, dettaglio lesione in corrispondenza del solaio e delle pareti verticali PT-29-L7.



a)



b)

Figura 7.8: a) Locale PT-21, dettaglio lesione PT-21-L1, b) Locale PT-17, dettaglio PT-17-L2.

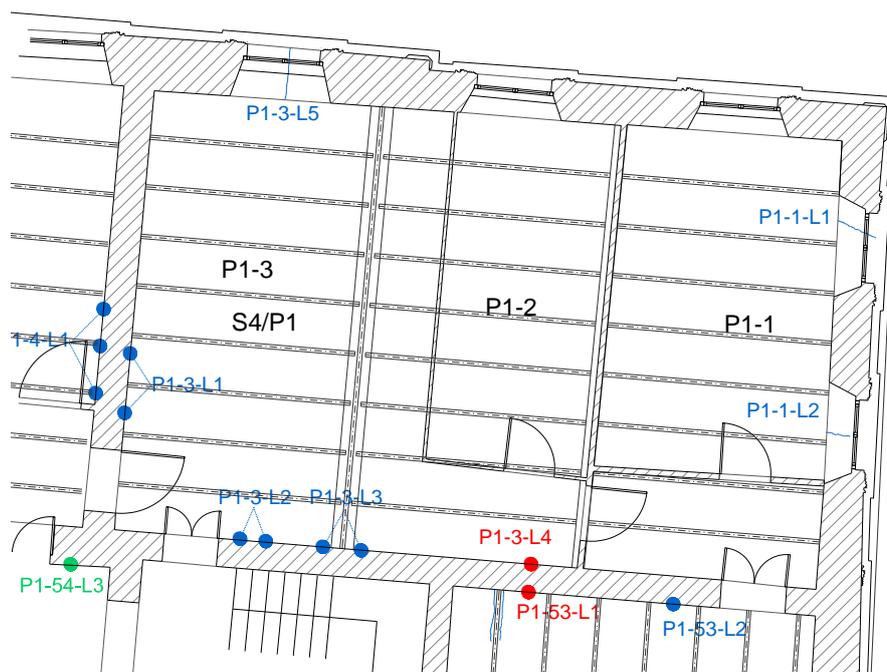


Figura 7.9: Locali P1-1, P1-2 e P1-3, dettaglio lesioni (piano primo).



Figura 7.10: a) Lesione P1-3-L4 (lesione grave), b) P1-3-L3 (lesione intermedia).

8. CARATTERIZZAZIONE DEI MATERIALI E DELLE STRUTTURE

a cura di Silvia Caprili, Giuseppe Chellini, Federico Mangini

8.1 Caratterizzazione delle strutture murarie

8.1.1 Organizzazione delle prove

Le prove con martinetti piatti sono state effettuate con lo scopo di valutare sia l'attuale livello tensionale delle strutture di muratura sia le loro caratteristiche meccaniche. Nella figura 8.1 sono mostrate le posizioni individuate per l'esecuzione delle prove. Per ciascuna di esse è stata eseguita la seguente procedura:

- la preliminare valutazione del livello di carico mediante una prova con *martinetti piatti singoli*, eseguita in accordo a quanto indicato dalle raccomandazioni tecniche Rilem MDT.D.4 “*In-situ stress tests based on the flat jack*”;
- la successiva valutazione delle caratteristiche meccaniche della muratura mediante una prova con *martinetti piatti doppi*, effettuata in accordo a quanto indicato dalle raccomandazioni tecniche Rilem MDT.D.5 “*In-situ stress-strain behaviour tests based on the flat jack*”.

Nelle zone selezionate per l'esecuzione delle prove sono stati preventivamente rimossi gli strati di intonaco in modo da evidenziare completamente la sottostante tessitura muraria. Sono state successivamente individuate le posizioni per l'installazione dei riferimenti per le misure di spostamento relativo e l'esecuzione dei tagli della muratura.

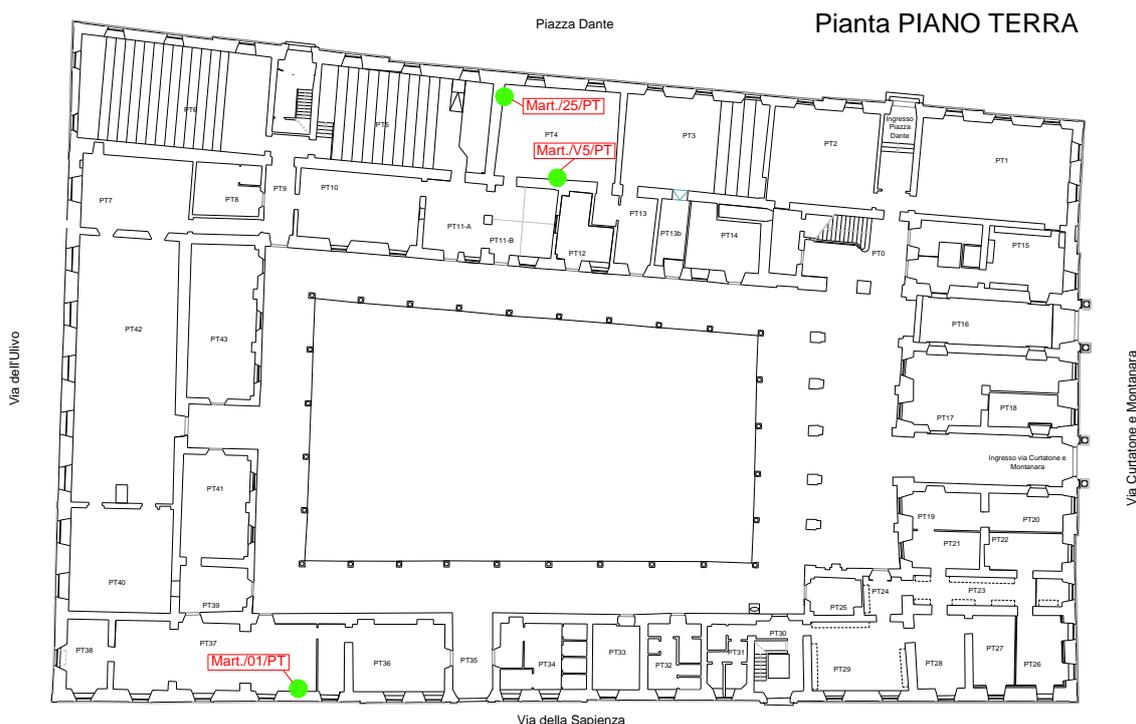


Figura 8.1: Posizione delle murature oggetto delle prove con martinetti piatti.

In figura 8.2.a sono mostrate le dimensioni geometriche in pianta del sistema di taglio e quelle del martinetto piatto, mentre in figura 8.2.b sono mostrate le posizioni tipiche dei punti per la misura della deformazione sia nella prova con i martinetti piatti singoli che doppi. In particolare:

- la prova con i martinetti piatti singoli è stata effettuata realizzando il taglio sull'allineamento A-A ed utilizzando i riferimenti 1-1', 2-2', 3-3', 4-4';
- la prova con i martinetti piatti doppi è stata realizzata completando il taglio della muratura sull'allineamento B-B ed utilizzando i riferimenti 1-1'', 2-2'', 3-3'', 4-4'' e 5-5''.

L'area effettiva di taglio A_{slot} risulta pari a circa 906 cm^2 , mentre il martinetto piatto ha un'area A_{je} pari a $761,5 \text{ cm}^2$, dichiarata della ditta costruttrice.

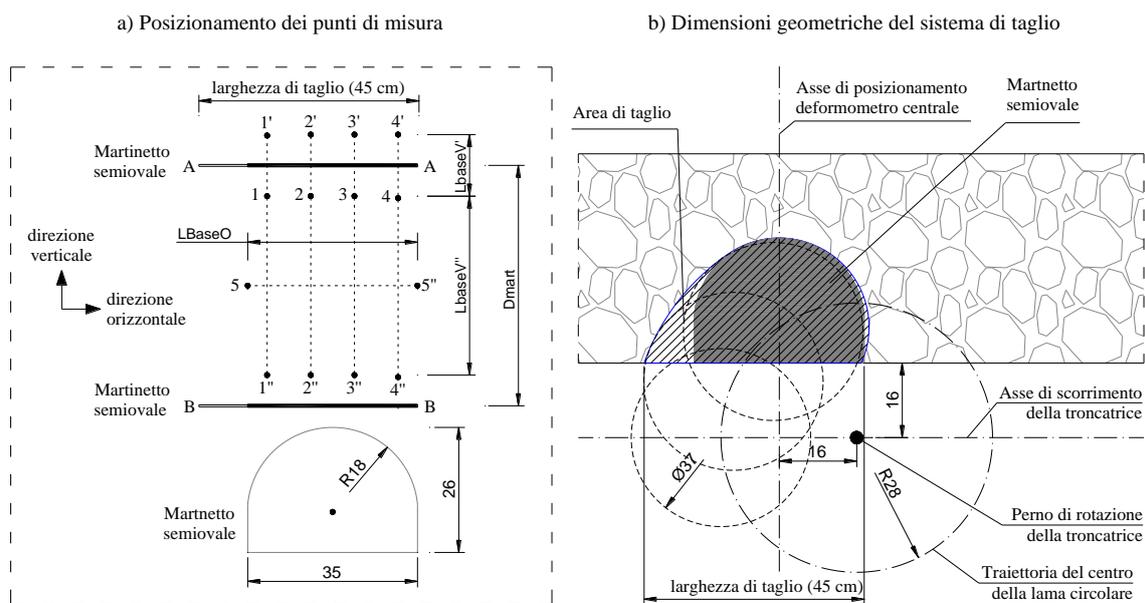


Figura 8.2: principali dimensioni geometriche del sistema di prova e dei punti di misura (misure in centimetri).

8.1.2 Strumentazione utilizzata

Il sistema utilizzato per la realizzazione dei tagli nella muratura è costituito da una moto-troncatrice Husqvarna K3600 dotata di 2 guide Husqvarna WA20.

Il sistema per la realizzazione del carico è costituito da una pompa idraulica manuale M2H16 Glötzl, dotata di due manometri \varnothing 160 mm con classe precisione 0,6% e campi misura 0÷16 bar e 0÷60 bar, alla quale sono collegati due martinetti piatti Boviari ad alta deformabilità. La misura dello spostamento tra i punti di riferimento è effettuata mediante due deformometri Graü con comparatore meccanico centesimale, con basi di misura rispettivamente 200 mm e 403 mm.

8.1.3 Modalità di esecuzione delle prove ed elaborazione dei risultati

La distanza tra le coppie di riferimenti è stata misurata prima dell'esecuzione dei tagli A-A e B-B. Successivamente è stato eseguito il primo taglio (A-A) ed è stata eseguita la prova con martinetto piatto singolo. Infine è stato eseguito il secondo taglio e la prova con i martinetti piatti doppi.

Il calcolo della tensione f_m nella muratura è effettuato, sulla base delle misure di pressione ottenute durante la prova, in accordo a quanto indicato al punto 8 delle citate Raccomandazioni Tecniche Rilem MDT.D.4 e Rilem MDT.D.5, mediante la seguente relazione:

$$f_m = K_e \cdot p \cdot A_{je} / A_{slot} \quad (8.1)$$

dove K_e è il coefficiente di efficienza del martinetto (valutato sulla base dei certificati di calibrazione forniti dalla casa costruttrice pari a 0,86) e p la pressione misurata mediante i manometri.

Nella prova con martinetti piatti singoli, il calcolo della deformazione verticale ε_V è effettuato sulla base delle letture di spostamento rilevate tra le posizioni di misura secondo la seguente relazione:

$$\varepsilon_V(p) = - \frac{MLV(p) - MLV(0)}{L_{baseV'}} \cdot 10^{-6} \quad (8.2)$$

essendo:

- $MLV(p)$ la media delle letture di spostamento verticali delle coppie 1-1', 2-2', 3-3' e 4-4' in corrispondenza della pressione p ,
- $MLV(0)$ la media delle letture di spostamento verticali delle coppie 1-1', 2-2', 3-3' e 4-4' in corrispondenza della pressione iniziale 0 N/mm²,
- $L_{baseV'}$ la lunghezza della base di misura verticale (200 mm) (figura 8.2.b).

Nella prova con martinetti piatti doppi, il calcolo delle deformazioni verticale ε_v ed orizzontale ε_0 è effettuato sulla base delle letture di spostamento rilevate tra le posizioni di misura secondo le seguenti relazioni:

$$\varepsilon_v(p) = -\frac{MLV(p) - MLV(0)}{L_{baseV}} \cdot 10^{-6} \quad (8.3)$$

$$\varepsilon_0(p) = -\frac{LO(p) - LO(0)}{L_{base0}} \cdot 10^{-6} \quad (8.4)$$

essendo:

- MLV(p) la media delle letture di spostamento verticali delle coppie 1-1", 2-2", 3-3" e 4-4" in corrispondenza della pressione p,
- MLV(0) la media delle letture di spostamento verticali delle coppie 1-1", 2-2", 3-3" e 4-4" in corrispondenza della pressione iniziale 0 N/mm²,
- LO(p) la lettura di spostamento orizzontale della coppia 5-5" in corrispondenza del valore di pressione p,
- LO(0) la lettura di spostamento orizzontale della coppia 5-5" in corrispondenza del valore di pressione iniziale 0 N/mm²,
- L_{baseV}" e L_{base0} le lunghezze delle basi di misura verticali ed orizzontali (figura 8.2.b), pari entrambe a 403 mm.

8.1.4 Risultati delle prove

I risultati delle misure effettuate rispettivamente nella prova con martinetti piatti singoli e doppi sono riportati rispettivamente nelle tabelle 8.1 e 8.2 per la prova Mart/01/PT, nelle tabelle 8.3 e 8.4 per la prova Prova Mart/25/PT e nelle tabelle 8.5 e 8.6 per la prova Prova Mart/V5/PT. Nelle tabelle sono indicate sia le letture di pressione effettuate mediante i manometri che le corrispondenti letture effettuate mediante il deformometro. Sono riportate inoltre le elaborazioni in termini di deformazione verticale ε_v ed orizzontale ε_0 e di tensione nella muratura f_m . Per le stesse prove sono riportati i diagrammi tensione – deformazione ottenuti per le prove con martinetti piatti singoli e doppi nelle figure 8.3 e 8.4 per la prova Mart/01/PT, nelle figure 8.6 e 8.7 per la prova Mart/25/PT e nelle figure 8.9 e 8.10 per la prova Mart/V5/PT.

Tabella 8.1: Letture e delle elaborazioni della prova con martinetti piatti singoli – Mart/01/PT

Pressione [bar]	Letture nei punti di misura [mm/100]				Media letture [mm/100]	Deformazione [x 10 ⁻⁶]	Tensione compressione	
	1-1'	2-2'	3-3'	4-4'			[bar]	[N/mm ²]
<i>Prima del taglio</i>								
---	1424	1424	1415	1412	1418,8	---	---	---
<i>Dopo il taglio</i>								
0,00	1431	1437	1425	1418	1427,8	0	0,00	0,00
0,50	1430	1436	1425	1418	1427,3	25	0,34	0,03
1,00	1431	1436	1425	1418	1427,5	13	0,67	0,07
1,50	1430	1436	1423	1417	1426,5	63	1,01	0,10
2,00	1430	1435	1423	1417	1426,3	75	1,34	0,13
2,50	1430	1435	1422	1417	1426,0	88	1,68	0,17
3,00	1430	1434	1422	1416	1425,5	113	2,02	0,20
4,00	1429	1432	1420	1415	1424,0	188	2,69	0,27
5,00	1428	1431	1419	1414	1423,0	238	3,36	0,34
6,00	1427	1429	1416	1413	1421,3	325	4,03	0,40
7,00	1426	1426	1414	1410	1419,0	438	4,71	0,47
8,00	1425	1425	1412	1409	1417,8	500	5,38	0,54
9,00	1423	1422	1409	1406	1415,0	638	6,05	0,60
0,00	1433	1439	1427	1420	1429,8	-100	0,00	0,00

Tabella 8.2: Letture e delle elaborazioni della prova con martinetti piatti doppi – Mart/01/PT

Pressione [bar]	Letture nei punti di misura					Media verticali [mm/100]	Deformazione		Tensione compressione		
	[mm/100]						[x 10 ⁻⁶]	Verticale	Orizzontale	[bar]	[N/mm ²]
	Verticali				Orizz.						
	1-1"	2-2"	3-3"	4-4"	5-5"						
<i>Prima del taglio</i>											
---	1391	1386	1385	1383	1395	1386,3	---	---	---	---	
<i>Dopo il taglio</i>											
0,00	1386	1376	1376	1380	1394	1379,5	0	0	0,00	0,00	
1,00	1387	1376	1376	1380	1394	1379,8	-6	0	0,67	0,07	
2,00	1387	1377	1377	1380	1394	1380,3	-19	0	1,34	0,13	
3,00	1387	1377	1378	1381	1394	1380,8	-31	0	2,02	0,20	
4,00	1387	1377	1378	1381	1393	1380,8	-31	25	2,69	0,27	
5,00	1387	1379	1379	1381	1393	1381,5	-50	25	3,36	0,34	
3,00	1387	1378	1378	1380	1393	1380,8	-31	25	2,02	0,20	
1,00	1386	1376	1376	1380	1393	1379,5	0	25	0,67	0,07	
5,00	1388	1379	1379	1381	1393	1381,8	-56	25	3,36	0,34	
6,00	1387	1380	1379	1382	1393	1382,0	-62	25	4,03	0,40	
7,00	1388	1381	1380	1382	1393	1382,8	-81	25	4,70	0,47	
8,00	1388	1381	1381	1382	1392	1383,0	-87	50	5,38	0,54	
9,00	1388	1382	1382	1382	1392	1383,5	-99	50	6,05	0,60	
10,00	1388	1383	1382	1383	1392	1384,0	-112	50	6,72	0,67	
6,00	1387	1381	1380	1382	1392	1382,5	-74	50	4,03	0,40	
2,00	1386	1377	1376	1380	1394	1379,8	-6	0	1,34	0,13	
10,00	1388	1383	1382	1383	1392	1384,0	-112	50	6,72	0,67	
11,00	1389	1384	1383	1384	1392	1385,0	-136	50	7,39	0,74	
12,00	1389	1385	1384	1384	1391	1385,5	-149	74	8,06	0,81	
13,00	1389	1386	1385	1384	1391	1386,0	-161	74	8,74	0,87	
14,00	1389	1387	1386	1385	1391	1386,8	-180	74	9,41	0,94	
15,00	1390	1388	1387	1386	1390	1387,8	-205	99	10,08	1,01	
8,00	1387	1383	1382	1383	1391	1383,8	-105	74	5,38	0,54	
1,00	1386	1377	1376	1380	1393	1379,8	-6	25	0,67	0,07	

segue Tabella 8.2

Pressione [bar]	Letture nei punti di misura [mm/100]					Media verticali [mm/100]	Deformazione [x 10 ⁻⁶]		Tensione compressione	
	Verticali				Orizz. 5-5"		Verticale	Orizzontale	[bar]	[N/mm ²]
	1-1"	2-2"	3-3"	4-4"						
15,00	1390	1388	1388	1386	1390	1388,0	-211	99	10,08	1,01
16,00	1391	1390	1389	1386	1390	1389,0	-236	99	10,75	1,08
17,00	1391	1390	1390	1387	1389	1389,5	-248	124	11,42	1,14
18,00	1391	1392	1392	1388	1389	1390,8	-279	124	12,10	1,21
19,00	1392	1394	1393	1389	1388	1392,0	-310	149	12,77	1,28
20,00	1392	1396	1395	1389	1387	1393,0	-335	174	13,44	1,34
15,00	1391	1393	1392	1388	1388	1391,0	-285	149	10,08	1,01
10,00	1389	1389	1388	1386	1389	1388,0	-211	124	6,72	0,67
20,00	1393	1397	1397	1390	1387	1394,3	-366	174	13,44	1,34
21,00	1393	1398	1398	1391	1387	1395,0	-385	174	14,11	1,41
22,00	1394	1400	1399	1392	1386	1396,3	-416	199	14,78	1,48
23,00	1394	1402	1401	1393	1385	1397,5	-447	223	15,46	1,55
24,00	1395	1406	1404	1394	1383	1399,8	-502	273	16,13	1,61
25,00	1396	1408	1406	1395	1382	1401,3	-540	298	16,80	1,68
18,00	1395	1403	1401	1393	1383	1398,0	-459	273	12,10	1,21
10,00	1391	1397	1394	1389	1386	1392,8	-329	199	6,72	0,67
25,00	1397	1409	1407	1396	1381	1402,3	-565	323	16,80	1,68
26,00	1397	1411	1408	1396	1380	1403,0	-583	347	17,47	1,75
27,00	1398	1413	1410	1397	1379	1404,5	-620	372	18,14	1,81
28,00	1399	1415	1412	1398	1377	1406,0	-658	422	18,82	1,88
29,00	1399	1417	1414	1398	1375	1407,0	-682	471	19,49	1,95
30,00	1400	1420	1416	1399	1373	1408,8	-726	521	20,16	2,02
20,00	1397	1415	1410	1394	1375	1404,0	-608	471	13,44	1,34
10,00	1394	1406	1401	1391	1378	1398,0	-459	397	6,72	0,67
30,00	1401	1423	1418	1399	1372	1410,3	-763	546	20,16	2,02
31,00	1402	1423	1419	1400	1370	1411,0	-782	596	20,83	2,08
32,00	1403	1427	1422	1401	1368	1413,3	-837	645	21,50	2,15
33,00	1404	1430	1424	1402	1367	1415,0	-881	670	22,18	2,22
34,00	1404	1432	1427	1403	1365	1416,5	-918	720	22,85	2,28
35,00	1406	1436	1429	1404	1363	1418,8	-974	769	23,52	2,35
25,00	1403	1432	1424	1400	1363	1414,8	-875	769	16,80	1,68
10,00	1397	1418	1410	1394	1370	1404,8	-627	596	6,72	0,67
35,00	1406	1439	1432	1404	1359	1420,3	-1011	868	23,52	2,35
36,00	1406	1441	1433	1405	1358	1421,3	-1036	893	24,19	2,42
37,00	1407	1445	1435	1405	1355	1423,0	-1079	968	24,86	2,49
38,00	1407	1447	1437	1406	1352	1424,3	-1110	1042	25,54	2,55
39,00	1408	1450	1439	1406	1349	1425,8	-1148	1117	26,21	2,62
40,00	1408	1450	1440	1405	1342	1425,8	-1148	1290	26,88	2,69
30,00	1405	1448	1436	1401	1342	1422,5	-1067	1290	20,16	2,02
15,00	1400	1435	1423	1396	1350	1413,5	-844	1092	10,08	1,01
0,00	1394	1401	1398	1390	1375	1395,8	-403	471	0,00	0,00
0,00	1393	1400	1397	1389	1376	1394,8	-378	447	0,00	0,00
10,00	1399	1425	1414	1393	1360	1407,8	-701	844	6,72	0,67
20,00	1403	1436	1425	1397	1350	1415,3	-887	1092	13,44	1,34
30,00	1405	1445	1434	1401	1343	1421,3	-1036	1266	20,16	2,02
40,00	1407	1455	1443	1403	1333	1427,0	-1179	1514	26,88	2,69
41,00	1407	1456	1445	1404	1331	1428,0	-1203	1563	27,55	2,76
42,00	1408	1458	1446	1405	1330	1429,3	-1234	1588	28,22	2,82
43,00	1408	1459	1447	1405	1328	1429,8	-1247	1638	28,90	2,89
44,00	1408	1459	1447	1405	1325	1429,8	-1247	1712	29,57	2,96
45,00	1408	1462	1448	1404	1322	1430,5	-1266	1787	30,24	3,02

segue Tabella 8.2

Pressione [bar]	Letture nei punti di misura [mm/100]					Media verticali [mm/100]	Deformazione [x 10 ⁻⁶]		Tensione compressione	
	Verticali				Orizz. 5-5"		Verticale	Orizzontale	[bar]	[N/mm ²]
	1-1"	2-2"	3-3"	4-4"						
30,00	1404	1453	1439	1399	1326	1423,8	-1098	1687	20,16	2,02
20,00	1400	1445	1433	1396	1332	1418,5	-968	1538	13,44	1,34
10,00	1399	1435	1423	1393	1341	1412,5	-819	1315	6,72	0,67
45,00	1408	1464	1450	1404	1317	1431,5	-1290	1911	30,24	3,02
46,00	1409	1465	1450	1404	1315	1432,0	-1303	1960	30,91	3,09
47,00	1409	1467	1452	1404	1312	1433,0	-1328	2035	31,58	3,16
48,00	1408	1468	1453	1404	1306	1433,3	-1334	2184	32,26	3,23
49,00	1409	1473	1455	1403	1302	1435,0	-1377	2283	32,93	3,29
50,00	1409	1475	1456	1403	1298	1435,8	-1396	2382	33,60	3,36
35,00	1405	1469	1449	1397	1300	1430,0	-1253	2333	23,52	2,35
20,00	1400	1456	1437	1393	1310	1421,5	-1042	2084	13,44	1,34
10,00	1400	1446	1428	1390	1321	1416,0	-906	1811	6,72	0,67
50,00	1408	1480	1459	1402	1289	1437,3	-1433	2605	33,60	3,36
51,00	1409	1482	1460	1402	1287	1438,3	-1458	2655	34,27	3,43
52,00	1409	1483	1461	1401	1283	1438,5	-1464	2754	34,94	3,49
53,00	1408	1485	1462	1401	1278	1439,0	-1476	2878	35,62	3,56
54,00	1408	1488	1464	1401	1274	1440,3	-1507	2978	36,29	3,63
55,00	1408	1491	1466	1401	1269	1441,5	-1538	3102	36,96	3,70
40,00	1404	1483	1458	1396	1275	1435,3	-1383	2953	26,88	2,69
25,00	1400	1472	1447	1392	1284	1427,8	-1197	2730	16,80	1,68
10,00	1399	1457	1434	1390	1301	1420,0	-1005	2308	6,72	0,67
55,00	1407	1495	1465	1400	1260	1441,8	-1545	3325	36,96	3,70
56,00	1406	1497	1467	1400	1256	1442,5	-1563	3424	37,63	3,76
57,00	1405	1497	1467	1400	1250	1442,3	-1557	3573	38,30	3,83
58,00	1405	1499	1468	1399	1245	1442,8	-1569	3697	38,98	3,90
59,00	1403	1502	1469	1398	1237	1443,0	-1576	3896	39,65	3,96
60,00	1402	1504	1470	1397	1227	1443,3	-1582	4144	40,32	4,03
40,00	1396	1494	1459	1392	1233	1435,3	-1383	3995	26,88	2,69
25,00	1394	1483	1449	1388	1245	1428,5	-1216	3697	16,80	1,68
10,00	1394	1470	1437	1389	1267	1422,5	-1067	3151	6,72	0,67
0,00	1395	1442	1424	1392	1308	1413,3	-837	2134	0,00	0,00

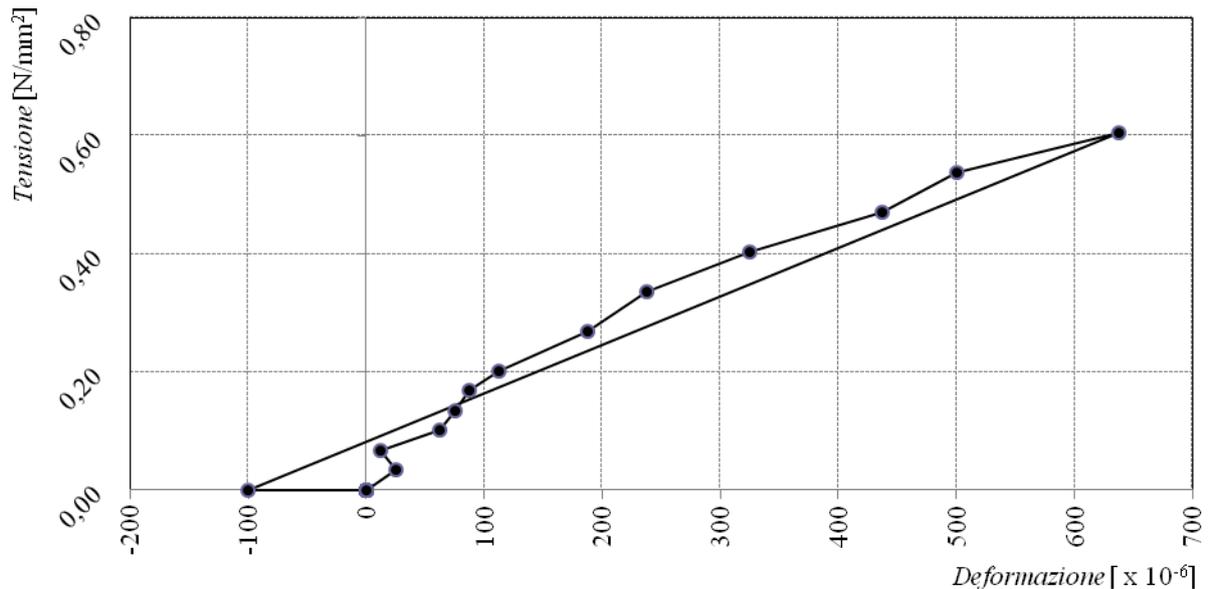


Figura 8.3: Diagrammi tensione – deformazione ottenuti per la prova con martinetti piatti singoli Mart/01/PT

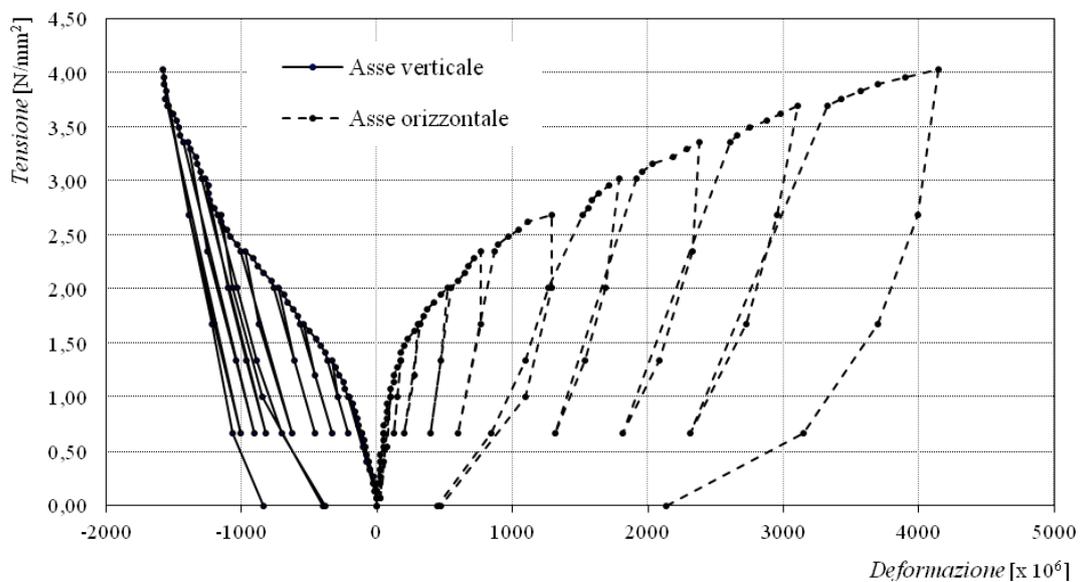


Figura 8.4: Diagrammi tensione – deformazione ottenuti per la prova con martinetti piatti doppi Mart/01/PT



Prova con martinetti piatti singoli.



Prova con martinetti piatti doppi.

Figura 8.5: Immagini della muratura analizzata e dell'esecuzione delle prove Mart/01/PT.

Tabella 8.3: Tabella delle letture e delle elaborazioni della prova con martinetti piatti singoli – Mart/25/PT

Pressione [bar]	Letture nei punti di misura [mm/100]				Media letture [mm/100]	Deformazione [x 10 ⁻⁶]	Tensione compressione	
	1-1'	2-2'	3-3'	4-4'			[bar]	[N/mm ²]
<i>Prima del taglio</i>								
---	1411	1418	1413	1420	1415,5	---	---	---
<i>Dopo il taglio</i>								
0,00	1424	1433	1430	1424	1427,8	0	0,00	0,00
0,50	1423	1433	1429	1424	1427,3	25	0,34	0,03
1,00	1422	1432	1428	1423	1426,3	75	0,67	0,07
1,50	1421	1431	1426	1423	1425,3	125	1,01	0,10
2,00	1421	1430	1425	1423	1424,8	150	1,34	0,13
2,50	1420	1428	1425	1423	1424,0	188	1,68	0,17
3,00	1420	1428	1423	1422	1423,3	225	2,02	0,20
4,00	1420	1426	1421	1422	1422,3	275	2,69	0,27
5,00	1417	1424	1419	1421	1420,3	375	3,36	0,34
6,00	1416	1422	1417	1421	1419,0	438	4,03	0,40
7,00	1415	1420	1414	1421	1417,5	513	4,71	0,47
8,00	1414	1419	1412	1420	1416,3	575	5,38	0,54
9,00	1413	1416	1409	1419	1414,3	675	6,05	0,60
10,00	1411	1415	1406	1418	1412,5	763	6,72	0,67
11,00	1410	1412	1402	1416	1410,0	888	7,39	0,74
0,00	1424	1433	1428	1424	1427,3	25	0,00	0,00

Tabella 8.4: Tabella delle letture e delle elaborazioni della prova con martinetti piatti doppi – Mart/25/PT

Pressione [bar]	Letture nei punti di misura [mm/100]					Media verticali [mm/100]	Deformazione [x 10 ⁻⁶]		Tensione compressione	
	Verticale				Orizz. 5-5		Verticale	Orizzontale	[bar]	[N/mm ²]
	1-1	2-2	3-3	4-4						
<i>Prima del taglio</i>										
---	1392	1406	1383	1374	1380	1388,8	---	---	---	---
<i>Dopo il taglio</i>										
0,00	1382	1396	1375	1375	1377	1382,0	0	0	0,00	0,00
1,00	1382	1396	1376	1375	1378	1382,3	-6	-25	0,67	0,07
2,00	1383	1399	1378	1377	1377	1384,3	-56	0	1,34	0,13
3,00	1384	1401	1380	1376	1377	1385,3	-81	0	2,02	0,20
4,00	1386	1403	1380	1375	1378	1386,0	-99	-25	2,69	0,27
5,00	1386	1404	1381	1374	1377	1386,3	-105	0	3,36	0,34
3,00	1385	1401	1379	1374	1378	1384,8	-68	-25	2,02	0,20
1,00	1384	1398	1376	1375	1377	1383,3	-31	0	0,67	0,07
5,00	1386	1404	1381	1374	1378	1386,3	-105	-25	3,36	0,34
6,00	1387	1405	1382	1374	1378	1387,0	-124	-25	4,03	0,40
7,00	1387	1406	1382	1376	1378	1387,8	-143	-25	4,70	0,47
8,00	1387	1406	1383	1374	1378	1387,5	-136	-25	5,38	0,54
9,00	1388	1407	1384	1374	1377	1388,3	-155	0	6,05	0,60
10,00	1388	1408	1385	1374	1377	1388,8	-167	0	6,72	0,67
6,00	1387	1405	1382	1374	1377	1387,0	-124	0	4,03	0,40
2,00	1384	1400	1379	1374	1378	1384,3	-56	-25	1,34	0,13
10,00	1389	1407	1384	1373	1377	1388,3	-155	0	6,72	0,67
11,00	1389	1408	1386	1373	1377	1389,0	-174	0	7,39	0,74
12,00	1390	1409	1387	1373	1376	1387,0	-124	25	8,06	0,81
13,00	1390	1409	1388	1373	1375	1390,0	-199	50	8,74	0,87
14,00	1391	1411	1390	1373	1375	1391,3	-230	50	9,41	0,94
15,00	1391	1412	1392	1373	1374	1392,0	-248	74	10,08	1,01

segue Tabella 8.4

Pressione [bar]	Letture nei punti di misura [mm/100]					Media verticali [mm/100]	Deformazione [x 10 ⁻⁶]		Tensione compressione	
	Verticale				Orizz.		Verticale	Orizzontale	[bar]	[N/mm ²]
	1-1	2-2	3-3	4-4						
8,00	1389	1408	1388	1373	1375	1389,5	-186	50	5,38	0,54
1,00	1384	1399	1379	1374	1377	1384,0	-50	0	0,67	0,07
15,00	1391	1412	1393	1373	1373	1392,3	-254	99	10,08	1,01
16,00	1392	1414	1396	1374	1372	1394,0	-298	124	10,75	1,08
17,00	1394	1416	1398	1374	1371	1395,5	-335	149	11,42	1,14
18,00	1395	1417	1401	1375	1369	1397,0	-372	199	12,10	1,21
19,00	1396	1420	1404	1377	1368	1399,3	-428	223	12,77	1,28
20,00	1397	1422	1408	1377	1366	1401,0	-471	273	13,44	1,34
15,00	1395	1420	1407	1376	1367	1399,5	-434	248	10,08	1,01
10,00	1394	1418	1403	1375	1368	1397,5	-385	223	6,72	0,67
20,00	1397	1422	1409	1378	1365	1401,5	-484	298	13,44	1,34
21,00	1398	1424	1411	1378	1364	1402,8	-515	323	14,11	1,41
22,00	1399	1425	1416	1379	1362	1404,8	-565	372	14,78	1,48
23,00	1400	1428	1420	1380	1360	1407,0	-620	422	15,46	1,55
24,00	1402	1430	1424	1382	1357	1409,5	-682	496	16,13	1,61
25,00	1404	1433	1430	1383	1354	1412,5	-757	571	16,80	1,68
18,00	1402	1430	1430	1382	1353	1411,0	-720	596	12,10	1,21
10,00	1399	1428	1425	1380	1357	1408,0	-645	496	6,72	0,67
25,00	1404	1434	1436	1384	1351	1414,5	-806	645	16,80	1,68
26,00	1405	1436	1438	1384	1350	1415,8	-837	670	17,47	1,75
27,00	1406	1438	1442	1387	1347	1418,3	-900	744	18,14	1,81
28,00	1407	1441	1448	1388	1344	1421,0	-968	819	18,82	1,88
29,00	1410	1445	1457	1390	1339	1425,5	-1079	943	19,49	1,95
30,00	1410	1446	1462	1391	1336	1427,3	-1123	1017	20,16	2,02
20,00	1408	1445	1460	1390	1337	1425,8	-1086	993	13,44	1,34
10,00	1404	1440	1451	1387	1342	1420,5	-955	868	6,72	0,67
30,00	1411	1449	1469	1392	1333	1430,3	-1197	1092	20,16	2,02
31,00	1412	1449	1472	1393	1330	1431,5	-1228	1166	20,83	2,08
32,00	1413	1451	1476	1394	1329	1433,5	-1278	1191	21,50	2,15
33,00	1414	1453	1482	1396	1325	1436,3	-1346	1290	22,18	2,22
34,00	1416	1456	1489	1397	1320	1439,5	-1427	1414	22,85	2,28
35,00	1418	1459	1497	1399	1315	1443,3	-1520	1538	23,52	2,35
20,00	1414	1454	1491	1395	1320	1438,5	-1402	1414	13,44	1,34
0,00	1395	1426	1434	1381	1346	1409,0	-670	769	0,00	0,00
0,00	1395	1426	1433	1380	1345	1408,5	-658	794	0,00	0,00
10,00	1405	1446	1470	1387	1333	1427,0	-1117	1092	6,72	0,67
25,00	1413	1455	1493	1393	1319	1438,5	-1402	1439	16,80	1,68
35,00	1418	1461	1512	1398	1307	1447,3	-1619	1737	23,52	2,35
36,00	1418	1462	1517	1399	1305	1449,0	-1663	1787	24,19	2,42
37,00	1419	1463	1520	1400	1303	1450,5	-1700	1836	24,86	2,49
38,00	1420	1465	1527	1401	1299	1453,3	-1768	1935	25,54	2,55
39,00	1422	1467	1532	1403	1296	1456,0	-1836	2010	26,21	2,62
40,00	1423	1470	1541	1404	1292	1459,5	-1923	2109	26,88	2,69
25,00	1420	1467	1536	1400	1296	1455,8	-1830	2010	16,80	1,68
10,00	1414	1458	1518	1395	1306	1446,3	-1594	1762	6,72	0,67
40,00	1425	1473	1552	1406	1286	1464,0	-2035	2258	26,88	2,69
41,00	1427	1475	1557	1407	1283	1466,5	-2097	2333	27,55	2,76
42,00	1430	1478	1565	1408	1279	1470,3	-2190	2432	28,22	2,82
34,00	1427	1476	1565	1407	1279	1468,8	-2153	2432	22,85	2,28
36,00	1428	1477	1566	1407	1279	1469,5	-2171	2432	24,19	2,42
0,00	1405	1443	1488	1387	1320	1430,8	-1210	1414	0,00	0,00

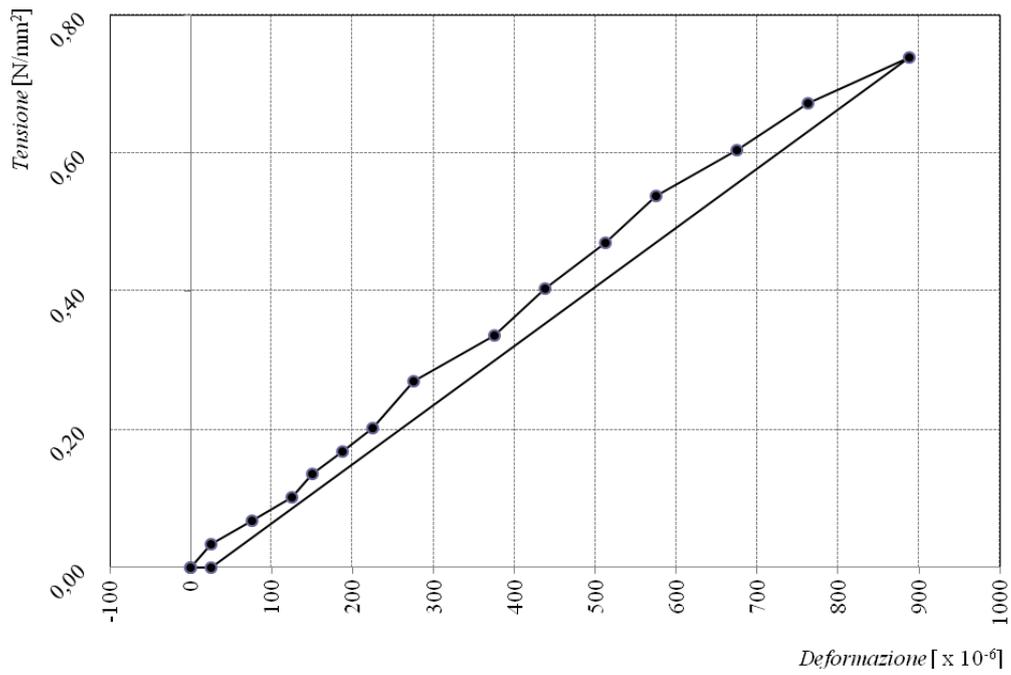


Figura 8.6: Diagrammi tensione – deformazione ottenuti per la prova con martinetti piatti singoli Mart/25/PT

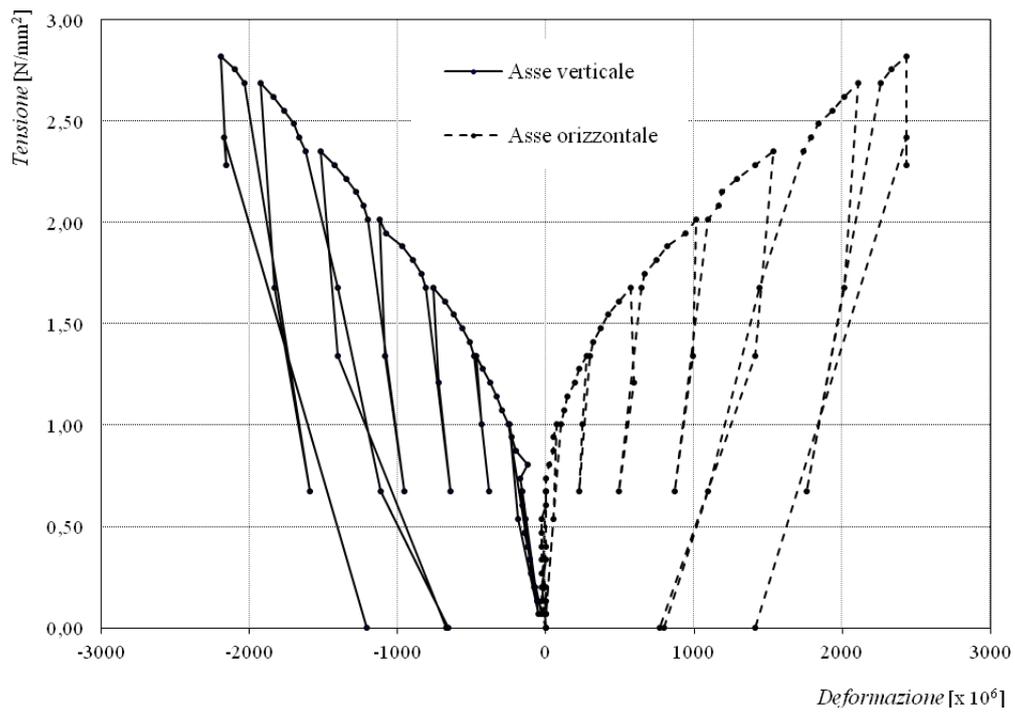
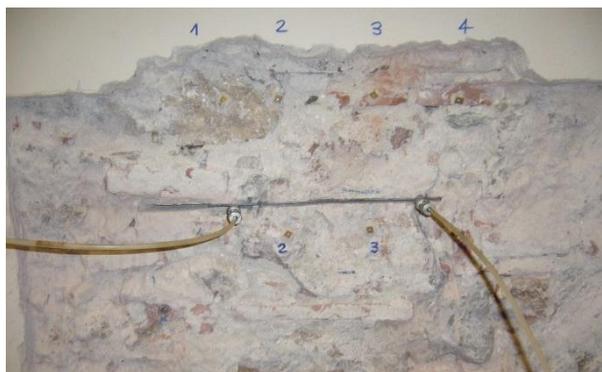


Figura 8.7: Diagrammi tensione – deformazione ottenuti per la prova con martinetti piatti doppi Mart/25/PT



Prova con martinetti piatti singoli.

Prova con martinetti piatti doppi.

Figura 8.8: Immagini della muratura analizzata e dell'esecuzione delle prove Mart/25/PT.

Tabella 8.5: Tabella delle letture e delle elaborazioni della prova con martinetti piatti singoli – Mart/V5/PT

Pressione [bar]	Letture nei punti di misura [mm/100]				Media letture [mm/100]	Deformazione [x 10 ⁻⁶]	Tensione compressione	
	1-1'	2-2'	3-3'	4-4'			[bar]	[N/mm ²]
<i>Prima del taglio</i>								
---	1408	1415	1401	1410	1408,5	---	---	---
<i>Dopo il taglio</i>								
0,00	1422	1437	1418	1420	1424,3	0	0,00	0,00
0,50	1421	1437	1421	1419	1424,5	-13	0,34	0,03
1,00	1421	1436	1420	1419	1424,0	13	0,67	0,07
1,50	1421	1435	1419	1419	1423,5	38	1,01	0,10
2,00	1420	1434	1418	1418	1422,5	88	1,34	0,13
2,50	1419	1433	1417	1418	1421,8	125	1,68	0,17
3,00	1419	1433	1416	1418	1421,5	138	2,02	0,20
4,00	1419	1430	1414	1417	1420,0	213	2,69	0,27
5,00	1417	1429	1412	1416	1418,5	288	3,36	0,34
6,00	1416	1426	1409	1415	1416,5	388	4,03	0,40
7,00	1414	1424	1408	1413	1414,8	475	4,71	0,47
8,00	1414	1423	1406	1412	1413,8	525	5,38	0,54
9,00	1413	1421	1404	1411	1412,3	600	6,05	0,60
10,00	1412	1419	1402	1411	1411,0	663	6,72	0,67
11,00	1411	1417	1400	1409	1409,3	750	7,39	0,74
12,00	1410	1415	1398	1408	1407,8	825	8,07	0,81
13,00	1409	1413	1395	1407	1406,0	913	8,74	0,87
14,00	1407	1410	1391	1406	1403,5	1038	9,41	0,94
0,00	1421	1437	1422	1421	1425,3	-50	0,00	0,00

Tabella 8.6: Tabella delle letture e delle elaborazioni della prova con martinetti piatti doppi- Mart/V5/PT

Pressione [bar]	Letture nei punti di misura [mm/100]					Media verticali [mm/100]	Deformazione [x 10 ⁻⁶]		Tensione compressione	
	Verticale				Orizz.		Verticale	Orizzontale	[bar]	[N/mm ²]
	1-1	2-2	3-3	4-4						
<i>Prima del taglio</i>										
---	1393	1382	1365	1399	1386	1384,8	---	---	---	---
<i>Dopo il taglio</i>										
0,00	1382	1366	1354	1397	1388	1374,8	0	0	0,00	0,00
1,00	1382	1367	1355	1396	1388	1375,0	-6	0	0,67	0,07
2,00	1383	1369	1357	1397	1388	1376,5	-43	0	1,34	0,13
3,00	1382	1370	1359	1397	1387	1377,0	-56	25	2,02	0,20
4,00	1384	1371	1360	1397	1387	1378,0	-81	25	2,69	0,27
5,00	1383	1372	1362	1398	1387	1378,8	-99	25	3,36	0,34
3,00	1384	1370	1360	1397	1387	1377,8	-74	25	2,02	0,20
1,00	1382	1367	1357	1396	1388	1375,5	-19	0	0,67	0,07
5,00	1382	1372	1363	1397	1387	1378,5	-93	25	3,36	0,34
6,00	1382	1373	1364	1399	1385	1379,5	-118	74	4,03	0,40
7,00	1384	1374	1366	1399	1386	1380,8	-149	50	4,70	0,47
8,00	1384	1376	1367	1401	1385	1382,0	-180	74	5,38	0,54
9,00	1385	1377	1369	1402	1385	1383,3	-211	74	6,05	0,60
10,00	1385	1377	1370	1402	1384	1383,5	-217	99	6,72	0,67
6,00	1382	1373	1366	1399	1384	1380,0	-130	99	4,03	0,40
2,00	1381	1369	1360	1398	1387	1377,0	-56	25	1,34	0,13
10,00	1384	1378	1370	1403	1384	1383,8	-223	99	6,72	0,67
11,00	1385	1379	1372	1404	1383	1385,0	-254	124	7,39	0,74
12,00	1385	1380	1374	1405	1383	1385,4	-264	124	8,06	0,81
13,00	1385	1381	1376	1406	1382	1387,0	-304	149	8,74	0,87
14,00	1386	1383	1379	1408	1380	1389,0	-354	199	9,41	0,94
15,00	1386	1384	1381	1409	1379	1390,0	-378	223	10,08	1,01
8,00	1382	1377	1374	1405	1381	1384,5	-242	174	5,38	0,54
1,00	1382	1368	1360	1399	1385	1377,3	-62	74	0,67	0,07
15,00	1384	1384	1382	1410	1378	1390,0	-378	248	10,08	1,01
16,00	1385	1386	1385	1412	1377	1392,0	-428	273	10,75	1,08
17,00	1385	1388	1387	1415	1376	1393,8	-471	298	11,42	1,14
18,00	1386	1390	1391	1417	1374	1396,0	-527	347	12,10	1,21
19,00	1386	1392	1394	1420	1373	1398,0	-577	372	12,77	1,28
20,00	1387	1394	1399	1423	1371	1400,8	-645	422	13,44	1,34
15,00	1383	1391	1395	1420	1372	1397,3	-558	397	10,08	1,01
10,00	1381	1386	1390	1416	1374	1393,3	-459	347	6,72	0,67
20,00	1385	1396	1401	1423	1370	1401,3	-658	447	13,44	1,34
21,00	1385	1397	1404	1426	1369	1403,0	-701	471	14,11	1,41
22,00	1386	1400	1408	1430	1366	1406,0	-775	546	14,78	1,48
23,00	1387	1402	1412	1432	1365	1408,3	-831	571	15,46	1,55
24,00	1386	1405	1416	1437	1362	1411,0	-900	645	16,13	1,61
25,00	1386	1409	1421	1442	1359	1414,5	-986	720	16,80	1,68
18,00	1383	1405	1416	1439	1361	1410,8	-893	670	12,10	1,21
10,00	1381	1396	1407	1433	1366	1404,3	-732	546	6,72	0,67
25,00	1386	1412	1425	1446	1358	1417,3	-1055	744	16,80	1,68
26,00	1387	1413	1428	1449	1357	1419,3	-1104	769	17,47	1,75
27,00	1387	1416	1432	1453	1354	1422,0	-1172	844	18,14	1,81
28,00	1387	1419	1437	1458	1352	1425,3	-1253	893	18,82	1,88
29,00	1388	1422	1442	1464	1349	1429,0	-1346	968	19,49	1,95
30,00	1389	1426	1447	1468	1346	1432,5	-1433	1042	20,16	2,02
20,00	1384	1419	1441	1464	1349	1427,0	-1297	968	13,44	1,34
10,00	1381	1409	1430	1456	1355	1419,0	-1098	819	6,72	0,67

segue Tabella 8.6

Pressione [bar]	Letture nei punti di misura [mm/100]					Media verticali [mm/100]	Deformazione [x 10 ⁻⁶]		Tensione compressione	
	Verticale				Orizz.		Verticale	Orizzontale	[bar]	[N/mm ²]
	1-1	2-2	3-3	4-4						
30,00	1389	1429	1454	1473	1343	1436,3	-1526	1117	20,16	2,02
31,00	1389	1431	1456	1475	1342	1437,8	-1563	1141	20,83	2,08
32,00	1389	1433	1460	1478	1339	1440,0	-1619	1216	21,50	2,15
33,00	1389	1436	1464	---	1335	1429,7	-1363	1315	22,18	2,22
34,00	1389	1440	1470	---	1332	1433,0	-1445	1390	22,85	2,28
35,00	1390	1442	1474	---	1329	1435,3	-1503	1464	23,52	2,35
20,00	1382	1429	1460	---	1336	1423,7	-1214	1290	13,44	1,34
0,00	1376	1386	1401	---	1368	1387,7	-321	496	0,00	0,00

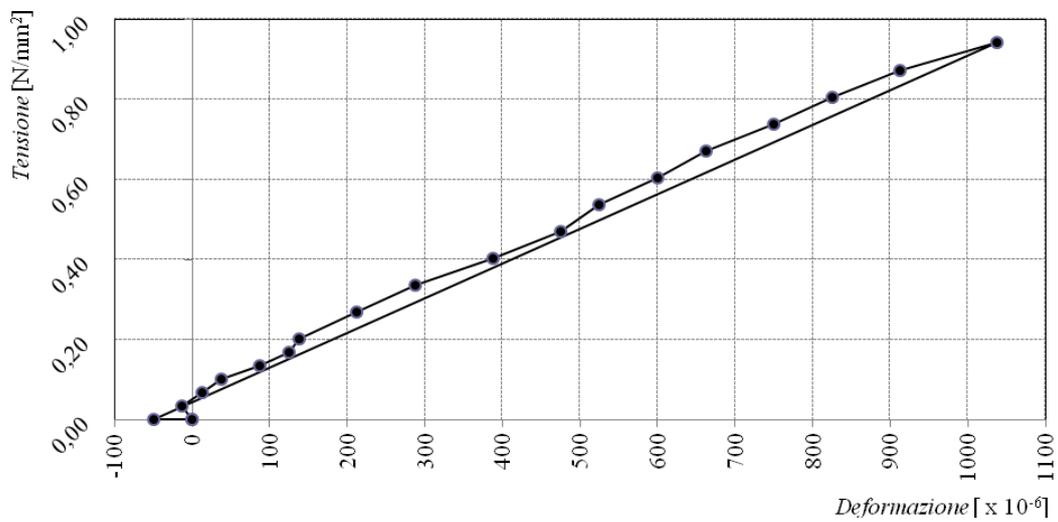


Figura 8.9: Diagrammi tensione – deformazione ottenuti per la prova con martinetti piatti singoli Mart/V5/PT

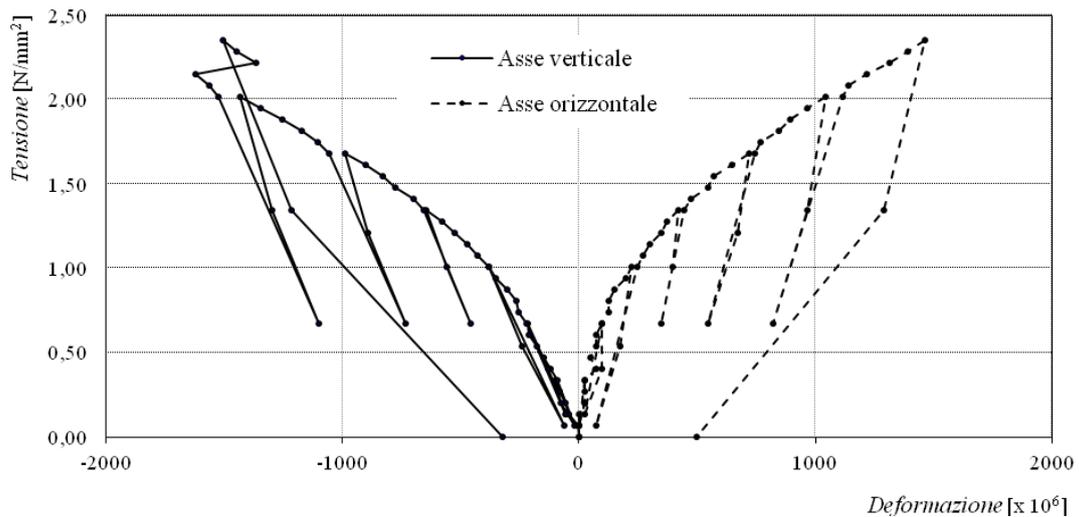


Figura 8.10: Diagrammi tensione – deformazione ottenuti per la prova con martinetti piatti doppi Mart/V5/PT



Figura 8.11: Esecuzione della prova Mart/25/PT.

8.2 Caratterizzazione meccanica dell'acciaio da carpenteria

In corrispondenza di uno dei due profili accoppiati che costituiscono le travi principali del solaio S1/PT del piano terra (figura 8.12) è stato effettuato il prelievo di un campione di acciaio di dimensioni 50 mm x 300 mm e spessore pari allo spessore della flangia del profilo considerato (IPN400 - spessore medio della flangia 21.6 mm). In figura 8.13 è riportato lo schema del solaio da cui è stato effettuato il prelievo del provino per l'esecuzione di una prova sperimentale di trazione.

La rimozione del campione di prova (figura 8.14) ha richiesto la realizzazione di un saggio di dimensioni sufficienti sul solaio S1/PT di calpestio dei locali P1-1, P1-2 e P1-3.

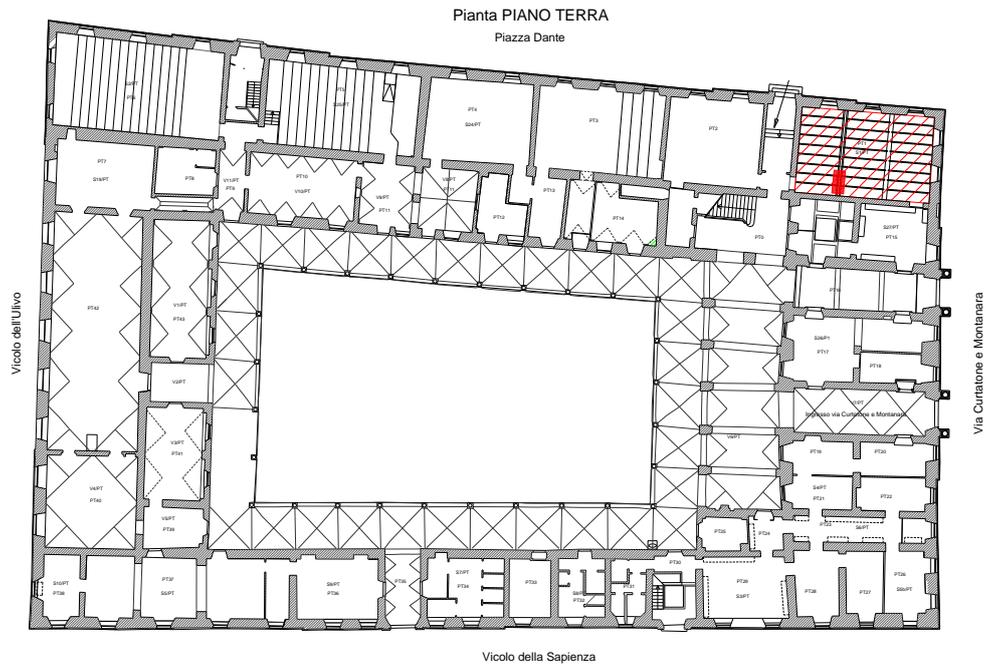


Figura 8.12: Pianta del piano terra con indicazione del solaio da cui è stato prelevato il campione.

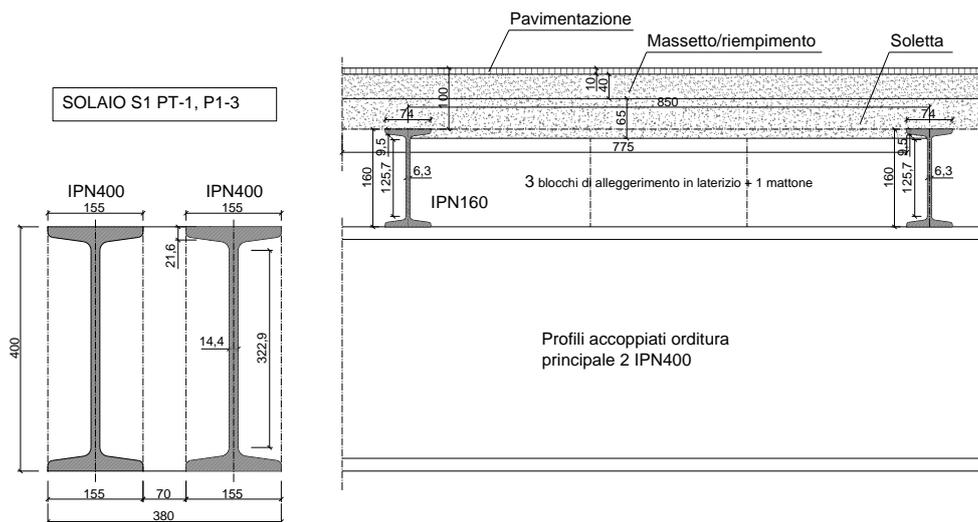


Figura 8.13: Schema solaio S1/PT.



Figura 8.14: Individuazione del campione di acciaio da prelevare dalla flangia superiore di uno dei due profili IPN400 che costituiscono la trave dell'orditura principale.

In seguito all'estrazione del provino dalla flangia superiore di uno dei due profili IPN400 (figura 8.14), si è reso necessario il ripristino delle condizioni originarie della trave secondo le modalità rappresentate in figura 8.15. Per il ripristino sono state impiegate due piastre di spessore pari a 24 mm e di dimensioni 50x300x24 mm (piastra 1) e 70x500x24 mm (piastra 2), da saldare rispettivamente in linea con la parte rimanente della flangia del profilo ed al di sotto di essa. Le modalità di saldatura sono dettagliatamente riportate in figura 8.15; per le piastre è stato impiegato in acciaio di tipo S235.

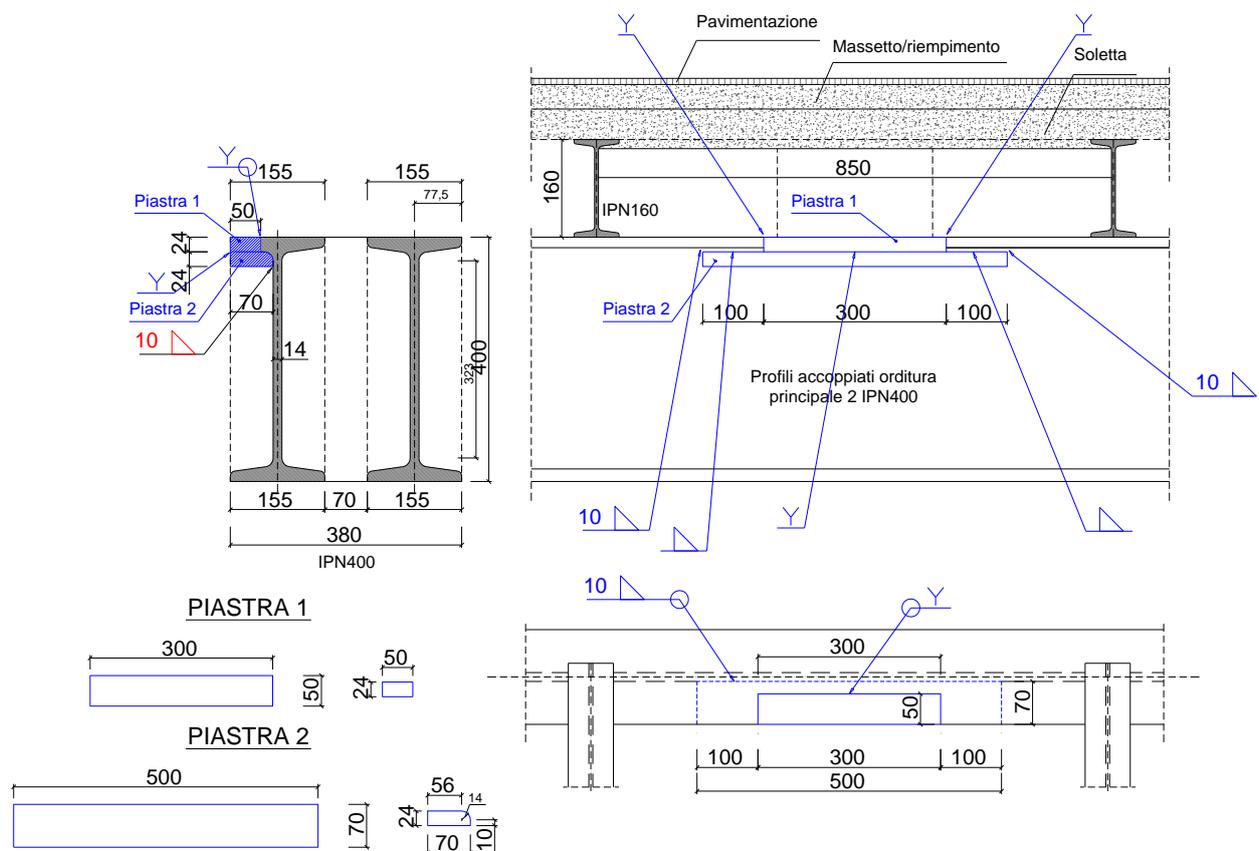


Figura 8.15: Dettaglio dell'intervento di ripristino sulla trave da cui è stato prelevato il campione per la prova di trazione.

Nelle figure 8.16 e 8.17 sono riportate alcune immagini dell'intervento di ripristino, eseguito immediatamente dopo l'estrazione del provino, al fine di limitare al minimo i rischi connessi all'operazione.



Figura 8.16: Dettagli del prelievo del campione dal profilo IPN400 dell'orditura principale.



Figura 8.17: Dettagli dell'intervento di ripristino mediante saldatura di due piastre in corrispondenza della trave da cui è stato prelevato il campione per la prova di trazione.

Sul campione prelevato è stata quindi eseguita una prova di trazione secondo le modalità previste dalle norme vigenti. Sono stati posizionati due estensimetri al fine di ricavare l'esatto andamento del diagramma tensione-deformazione (o carico-allungamento), come mostrato nella figura 8.18.

Come visibile dal grafico riportato in figura 8.19 è stato ottenuto un valore della tensione di snervamento pari a circa 235 MPa, una tensione di rottura uguale a 338 MPa ed un valore dell'allungamento a rottura di circa il 40%. In figura 8.20 è riportata un'immagine del provino dopo la rottura.



Figura 8.18: Esecuzione della prova di trazione sul campione prelevato dal profilo IPN400 e dettaglio del posizionamento degli estensimetri sul provino preparato.

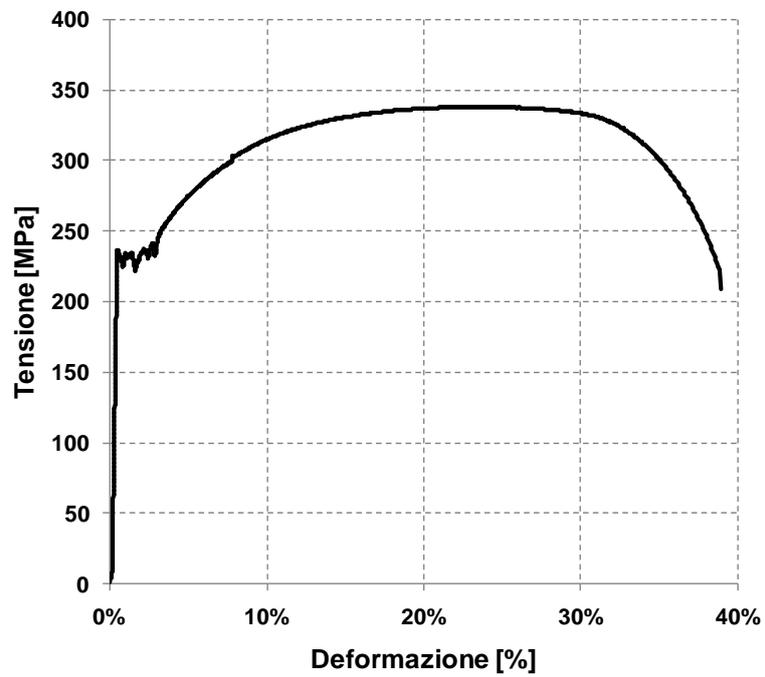


Figura 8.19: Diagramma tensione-deformazione ottenuto dalla prova di trazione.



Figura 8.20: Provino post rottura.

8.3 Prove di carico su solai

Sono state eseguite, da parte del personale del Laboratorio Ufficiale per le Esperienze sui Materiali da Costruzione, due prove di carico sui solai del primo piano dell'edificio della Sapienza. In figura 8.21 sono mostrate le posizioni dei solai sottoposti a prova di carico all'interno del fabbricato.

I solai sono stati sottoposti a prova di carico disponendo sul loro piano di calpestio dei sacchi di sabbia del peso di 20 daN, preventivamente verificato mediante una bilancia digitale con la precisione di $\pm 0,1$ daN.

Il carico è stato applicato e successivamente rimosso gradualmente secondo fasi le cui composizioni sono indicate nella tabella 8.7. La fase con carico massimo è stata mantenuta per almeno 30 minuti, effettuando la misura degli abbassamenti in condizioni di stazionarietà dell'azione.

Per la misura degli abbassamenti sono stati impiegati dei comparatori centesimali, posizionati in postazione indiretta e comandati mediante filo di acciaio armonico e zavorra.

Nelle figure 8.22 e 8.23 sono mostrati gli schemi con le disposizioni dei comparatori e del carico per il posizionamento dei sacchi di sabbia relativi alle due prove.

Nelle tabelle 8.8 e 8.9 sono riportate le letture effettuate in corrispondenza delle diverse fasi di carico, di attesa e di scarico. In particolare sono indicati, per ciascuna configurazione di carico:

- il numero di sacchi disposti sul solaio, insieme al valore del peso del carico totale applicato (in daN);
- i valori delle letture sui sei comparatori, in mm/100;
- i valori degli abbassamenti δ in mm/100, valutati per differenza a partire dalla condizione iniziale di carico zero;
- l'orario di esecuzione della lettura insieme al relativo valore misurato della temperatura.

Nelle figure 8.24 e 8.25 sono mostrati i grafici relativi all'andamento degli abbassamenti durante la prova in funzione del carico totale distribuito sul solaio.

Nelle figure 8.26 e 8.27 sono riportate alcune immagini relative all'esecuzione delle due prove.

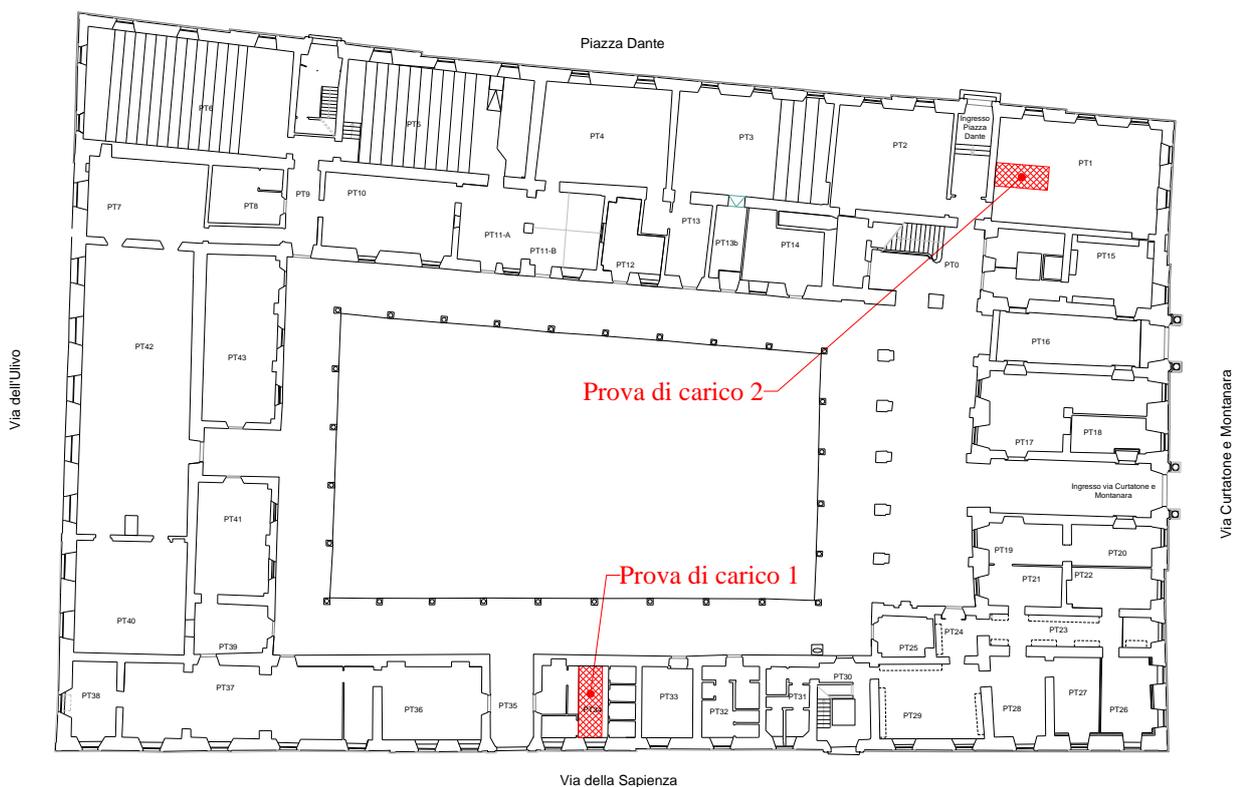
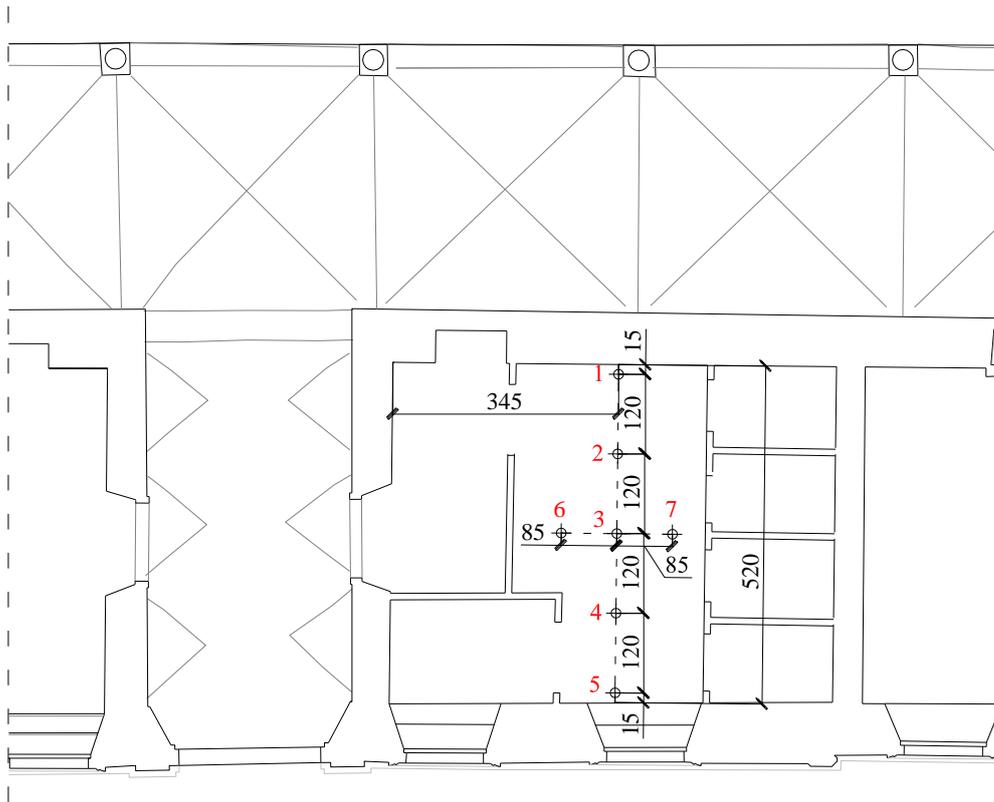


Figura 8.21: Posizione dei solai sottoposti a prova di carico – Piano Terra.

Tabella 8.7: definizione delle condizioni di carico realizzate nelle due prove.

<i>Prova</i>	<i>Condizione di carico</i>	<i>Descrizione</i>
1	0	Scarico
	1	5 sacchi per metro lineare, per un totale di 30 sacchi (carico tot. 600 daN)
	2	10 sacchi per metro lineare, per un totale di 60 sacchi (carico tot. 1200 daN)
	3	15 sacchi per metro lineare, per un totale di 90 sacchi (carico tot. 1800 daN)
	4	20 sacchi per metro lineare, per un totale di 120 sacchi (carico tot. 2400 daN)
	5	25 sacchi per metro lineare, per un totale di 150 sacchi (carico tot. 3000 daN)
	6	30 sacchi per metro lineare, per un totale di 180 sacchi (carico tot. 3600 daN)
	7	34 sacchi per metro lineare, per un totale di 204 sacchi (carico tot. 4080 daN)
	8	17 sacchi per metro lineare, per un totale di 102 sacchi (carico tot. 2040 daN))
2	0	Scarico
	1	10 sacchi per metro lineare, per un totale di 40 sacchi (carico tot. 800 daN)
	2	15 sacchi per metro lineare, per un totale di 60 sacchi (carico tot. 1200 daN)
	3	20 sacchi per metro lineare, per un totale di 80 sacchi (carico tot. 1600 daN)
	4	25 sacchi per metro lineare, per un totale di 100 sacchi (carico tot. 2000 daN)
	5	30 sacchi per metro lineare, per un totale di 120 sacchi (carico tot. 2400 daN)
	6	34 sacchi per metro lineare, per un totale di 136 sacchi (carico tot. 2720 daN)
	7	17 sacchi per metro lineare, per un totale di 68 sacchi (carico tot. 1360 daN))

Piano Terra: schema di posizionamento dei comparatori



Piano Primo: schema dell'area di carico

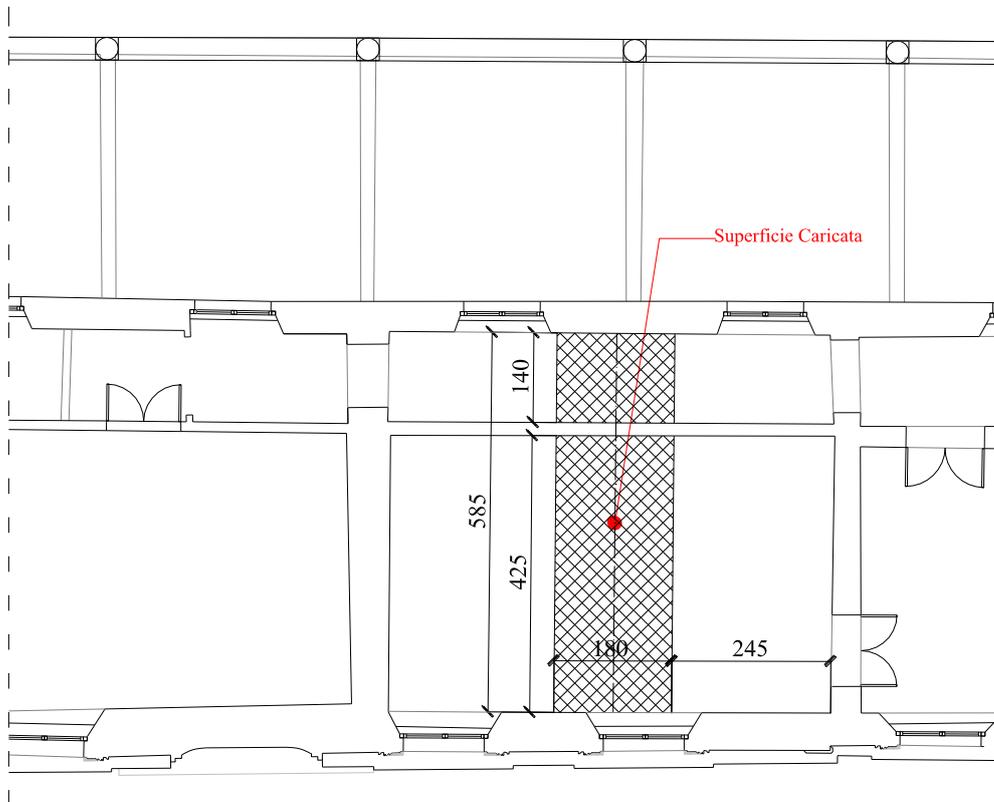


Figura 8.22: Posizionamento del carico e dei comparatori nella Prova di Carico I

Piano Terra: schema di posizionamento dei comparatori



Piano Primo: schema dell'area di carico

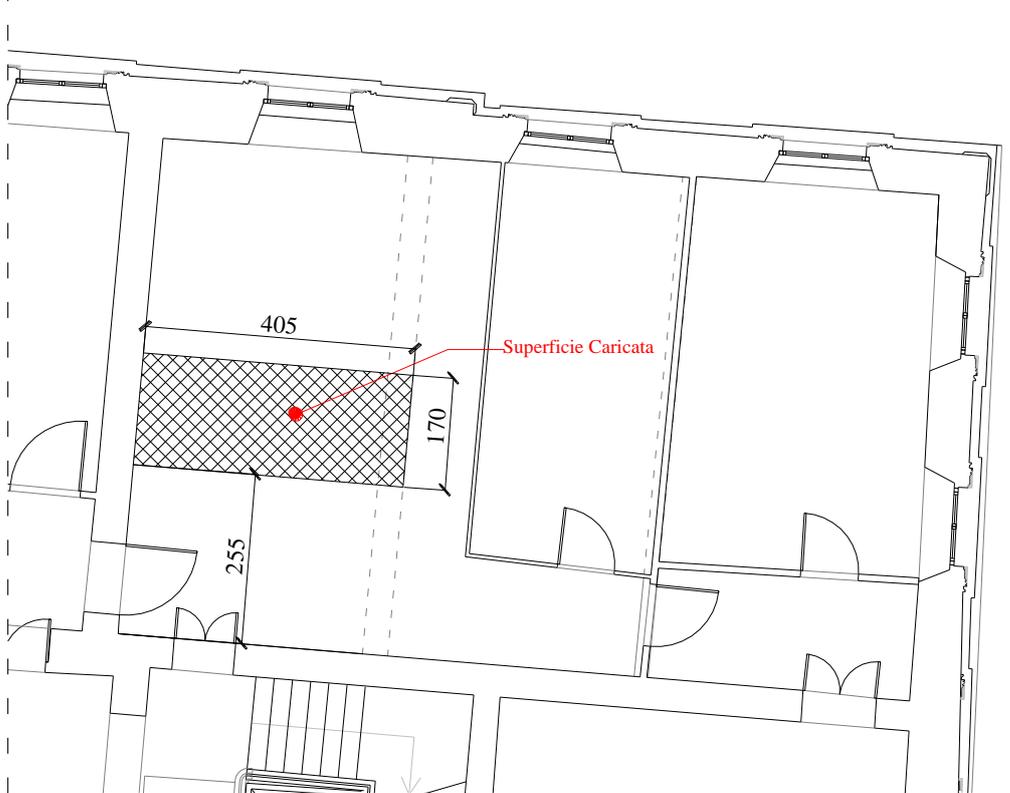


Figura 8.23: Posizionamento del carico e dei comparatori nella Prova di Carico 2

Tabella 8.8: letture effettuate nella Prova di carico 1.

Cond. di carico	0	1	2	3	4	5	6	7							
N° sacchi	0	30	60	90	120	150	180	204							
Carico Tot. [daN]	0	600	1200	1800	2400	3000	3600	4080							
Punto di misura	Letture [mm/100]														
	Valore	Valore	δ	Valore	δ	Valore	δ	Valore	δ	Valore	δ	Valore	δ	Valore	δ
1	1068	1068	0	1071	3	1073	5	1074	6	1077	9	1079	11	1081	13
2	534	538	4	545	11	554	20	560	26	572	38	582	48	588	54
3	1449	1458	9	1474	25	1482	33	1494	45	1510	61	1525	76	1538	89
4	583	592	9	602	19	612	29	624	41	637	54	649	66	658	75
5	993	993	0	1001	8	1002	9	1005	12	1008	15	1012	19	1014	21
6	1065	1071	6	1080	15	1089	24	1098	33	1110	45	1122	57	1128	63
7	1632	1640	8	1646	14	1654	22	1663	31	1672	40	1682	50	1691	59
Ora	10:22	10:52		11:15		11:35		11:50		12:05		12:24		12:40	
Temperatura	12	12		12		12		12		12		12		12	

segue

Cond. di carico	0	7	8	0	0	---	---	---							
N° sacchi	0	204	102	0	0	---	---	---							
Carico Tot. [daN]	0	4080	2040	0	0	---	---	---							
Punto di misura	Letture [mm/100]														
	Valore	Valore	δ	Valore	δ	Valore	δ	Valore	δ	Valore	δ	Valore	δ	Valore	δ
1	1068	1083	15	1078	10	1074	6	1074	6	---	---	---	---	---	---
2	534	590	56	570	36	545	11	545	11	---	---	---	---	---	---
3	1449	1539	90	1503	54	1467	18	1465	16	---	---	---	---	---	---
4	583	659	76	631	48	596	13	594	11	---	---	---	---	---	---
5	993	1015	22	1009	16	1000	7	1000	7	---	---	---	---	---	---
6	1065	1128	63	1103	38	1075	10	1076	11	---	---	---	---	---	---
7	1632	1692	60	1667	35	1642	10	1641	9	---	---	---	---	---	---
Ora	10:22	13:45		14:10		14:53		15:20		---		---		---	
Temperatura	12	12		12		12		12		---		---		---	

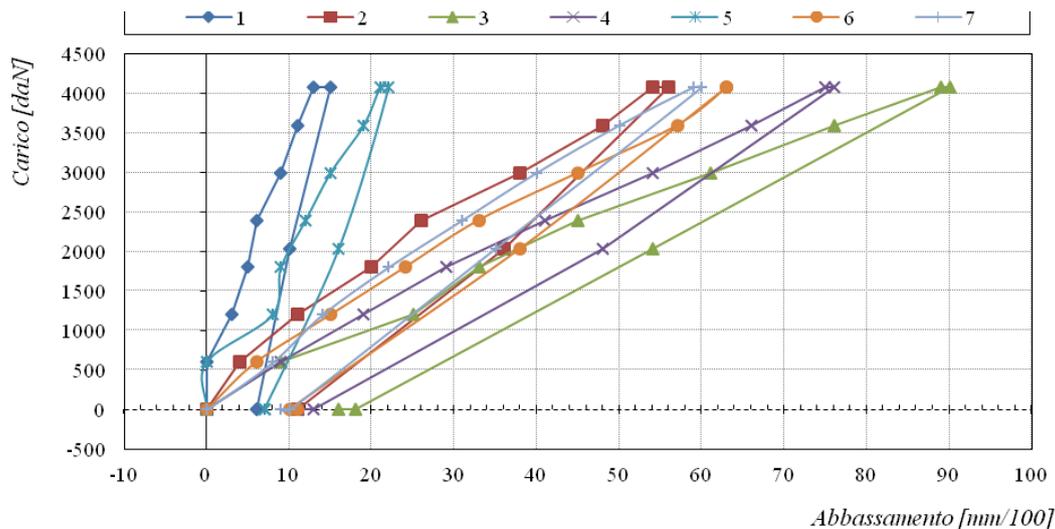


Figura 8.24: Andamento degli abbassamenti durante la prova in funzione del carico totale distribuito sul solaio.

Tabella 8.9: letture effettuate nella Prova di carico 2.

Cond. di carico	0	1	2	3	4	5	6	6							
N° sacchi	0	40	60	80	100	120	136	136							
Carico Tot. [daN]	0	800	1200	1600	2000	2400	2720	2720							
Punto di misura	Letture [mm/100]														
	Valore	Valore	δ	Valore	δ	Valore	δ	Valore	δ	Valore	δ	Valore	δ	Valore	δ
1	975	980	5	981	6	985	10	987	12	990	15	990	15	991	16
2	504	519	15	530	26	539	35	549	45	557	53	567	63	567	63
3	2006	2033	27	2049	43	2063	57	2076	70	2089	83	2101	95	2102	96
4	520	545	25	559	39	574	54	586	66	598	78	609	89	610	90
5	535	551	16	558	23	567	32	575	40	582	47	589	54	589	54
6	2036	2057	21	2068	32	2081	45	2091	55	2103	67	2113	77	2114	78
7	1975	1995	20	2006	31	2018	43	2027	52	2038	63	2047	72	2047	72
8	502	513	11	519	17	525	23	530	28	535	33	541	39	541	39
9	1511	1523	12	1527	16	1535	24	1540	29	1545	34	1550	39	1550	39
Ora	10:30	10:45	10:55	11:05	11:10	11:20	11:30	12:00							
Temperatura [°C]	11	11	11	11	11	11	11	11							

segue

Cond. di carico	0	7	0	0	---	---	---	---							
N° sacchi	0	68	0	0	---	---	---	---							
Carico Tot. [daN]	0	1360	0	0	---	---	---	---							
Punto di misura	Letture [mm/100]														
	Valore	Valore	δ	Valore	δ	Valore	δ	Valore	δ	Valore	δ	Valore	δ	Valore	δ
1	975	985	10	977	2	977	2	---	---	---	---	---	---	---	---
2	504	542	38	510	6	509	5	---	---	---	---	---	---	---	---
3	2006	2064	58	2016	10	2015	9	---	---	---	---	---	---	---	---
4	520	574	54	528	8	527	7	---	---	---	---	---	---	---	---
5	535	567	32	541	6	540	5	---	---	---	---	---	---	---	---
6	2036	2083	47	2043	7	2043	7	---	---	---	---	---	---	---	---
7	1975	2018	43	1983	8	1983	8	---	---	---	---	---	---	---	---
8	502	525	23	511	9	510	8	---	---	---	---	---	---	---	---
9	1511	1534	23	1515	4	1515	4	---	---	---	---	---	---	---	---
Ora	10:30	12:10	12:20	12:50	---	---	---	---							
Temperatura [°C]	11	11	11	11	---	---	---	---							

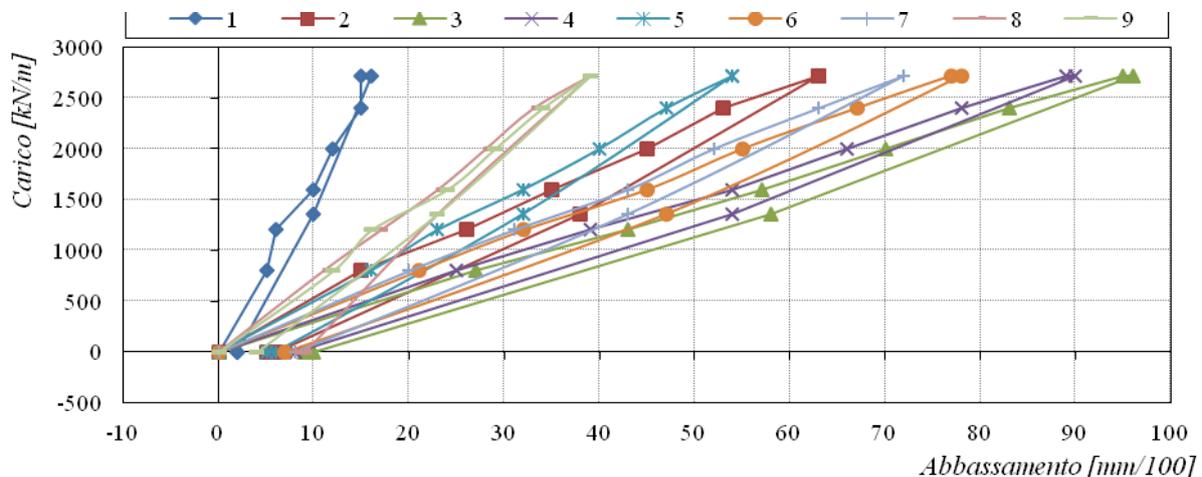


Figura 8.25: Andamento degli abbassamenti durante la prova in funzione del carico totale distribuito sul solaio.



Posizionamento dei comparatori.



Posizionamento dei comparatori.



Solaio in assenza di carico



Solaio a pieno carico

Figura 8.26: Immagini relative all'esecuzione della prova di carico 1.



Posizionamento dei comparatori.



Posizionamento dei comparatori.



Solaio in assenza di carico



Solaio a pieno carico

Figura 8.27: Immagini relative all'esecuzione della prova di carico 2.

9. MONITORAGGIO DELLE STRUTTURE

a cura di Silvia Caprili, Gabriella Caroti, Giuseppe Chellini

9.1. Organizzazione dei sistemi di monitoraggio

Sulla base dei risultati delle analisi del quadro fessurativo e dei rilievi del fabbricato sono state individuate le posizioni più significative da sottoporre ad un controllo dell'evoluzione delle ampiezze delle lesioni e dei movimenti del fabbricato. Il monitoraggio è stato condotto con le seguenti modalità:

- un *sistema di monitoraggio periodico* che ha permesso la rilevazione dell'ampiezza delle lesioni ad intervalli di tempo di circa 2 mesi;
- un *sistema di monitoraggio continuo* che permette una rilevazione praticamente continua dei fenomeni e la gestione delle operazioni di misura e trasmissione dei risultati a distanza;
- un *sistema di monitoraggio di tipo topografico* da installarsi a partire dal 2014 che consentirà la misura dei movimenti relativi delle diverse porzioni del fabbricato.

Nel seguito sono descritte le caratteristiche dei sistemi installati, le posizioni della strumentazione e le misure ottenute.

9.2 Monitoraggio periodico del quadro fessurativo

Il monitoraggio periodico del quadro fessurativo consiste nel misurare, ad intervalli di tempo più o meno lunghi, la distanza relativa fra i bordi delle lesioni: questo permette di rilevare le variazioni di ampiezza delle lesioni stesse e le direzioni del movimento reciproco delle due parti del solido murario. Questo secondo dato è utile per l'interpretazione del quadro fessurativo, ovvero per comprendere il tipo di movimento, o dissesto, che lo ha generato, mentre i dati relativi alla variazione di ampiezza nel tempo servono ad indicare se il dissesto è ancora in atto e se è caratterizzato da una progressione più o meno rapida.

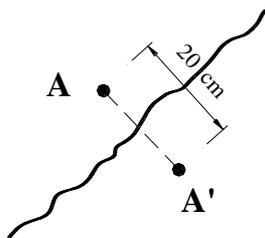
Il monitoraggio periodico è effettuato con strumenti meccanici. A tale scopo vengono applicati, a cavallo della fessura, due riferimenti metallici nella direzione in cui si vuole monitorare lo spostamento relativo dei bordi (vedi figura 9.1). Si misura e si annota la distanza fra i due riferimenti. Successivamente, a distanza di tempo, si ripete la misura. La differenza fra ciascuna delle misure successive e la lettura iniziale fornisce la variazione di ampiezza della lesione, intercorsa nell'intervallo di tempo considerato, nella direzione dei due riferimenti.

Nello stesso punto di misura possono essere applicati fino a 3 riferimenti metallici (vedi figura 9.1) che consentono di effettuare misure in due diverse direzioni. Di solito, si applicano i riferimenti in modo da poter registrare movimenti in due direzioni pressoché ortogonali: l'ampiezza del movimento in qualsiasi altra direzione può essere ricavata attraverso relazioni matematiche.

La misura della distanza fra i riferimenti viene eseguita con un calibro estensimetrico removibile che permette di effettuare misure con la precisione del mm/100.

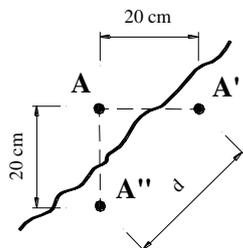
Per il monitoraggio con lo strumento meccanico, restano applicati in posto i soli riferimenti metallici – piastrine di ottone di lato 4-5 mm, incollate sulla superficie muraria. Tali riferimenti sono di basso impatto visivo; possono quindi essere lasciati per tempi molto lunghi. Questo consente di eseguire nuove misure anche successivamente al periodo stabilito del monitoraggio, e a distanze di tempo anche di anni.

Nelle figure 9.2, 9.3 e 9.4 sono mostrate le posizioni di installazione dei punti di misura del sistema di monitoraggio periodico rispettivamente al piano terra, primo e secondo.



Installazione tipo (A)

I riferimenti sono applicati alla distanza di 20 cm, a cavallo della lesione, in direzione circa ortogonale alla direttrice fessurativa.



Installazione tipo (B)

I riferimenti sono applicati a cavallo della lesione in modo tale che le direzioni AA', AA'' formino con la normale alla direttrice fessurativa angoli il più possibile prossimi a 45°. Le distanze AA', AA'' sono di 20 cm. La distanza A'A'' (d) è indicata per ciascuna posizione di misura nella figura rappresentativa.

Figura 9.1: Modalità di installazione dei punti nel sistema di monitoraggio periodico.

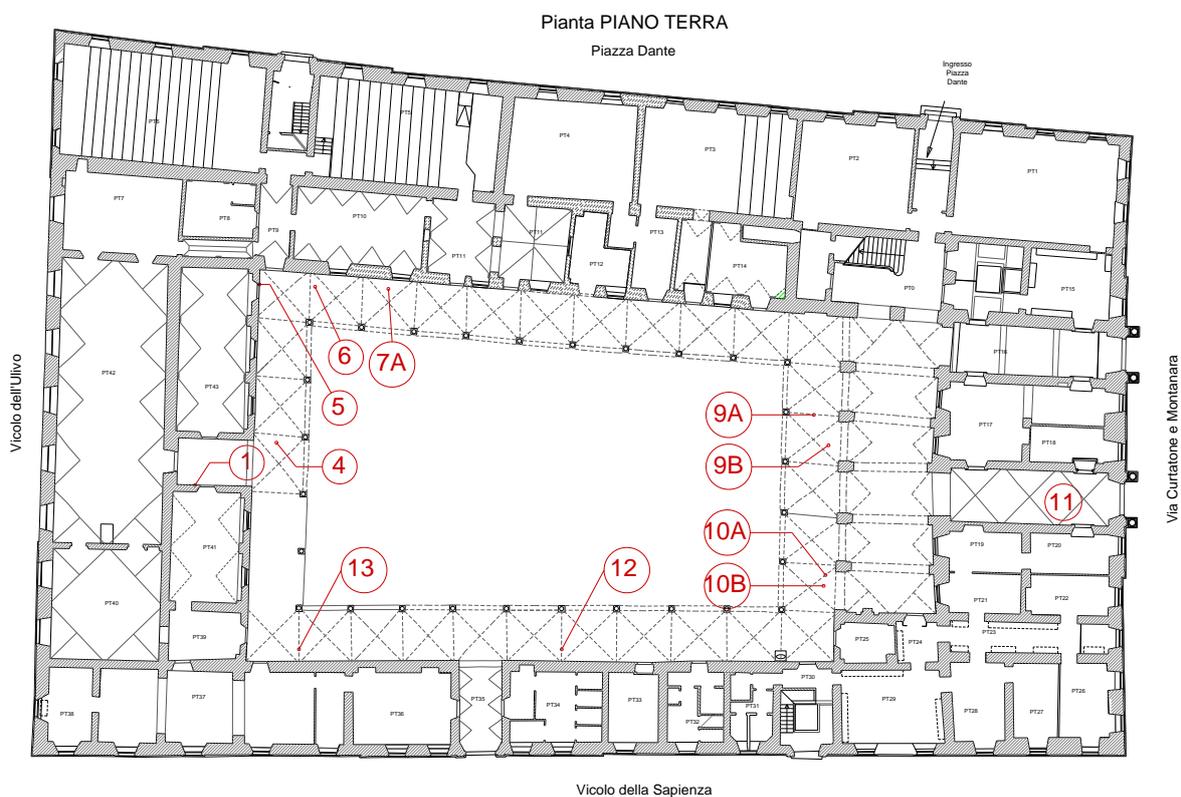


Figura 9.2: Pianta del piano terra con indicazione dei punti di misura.

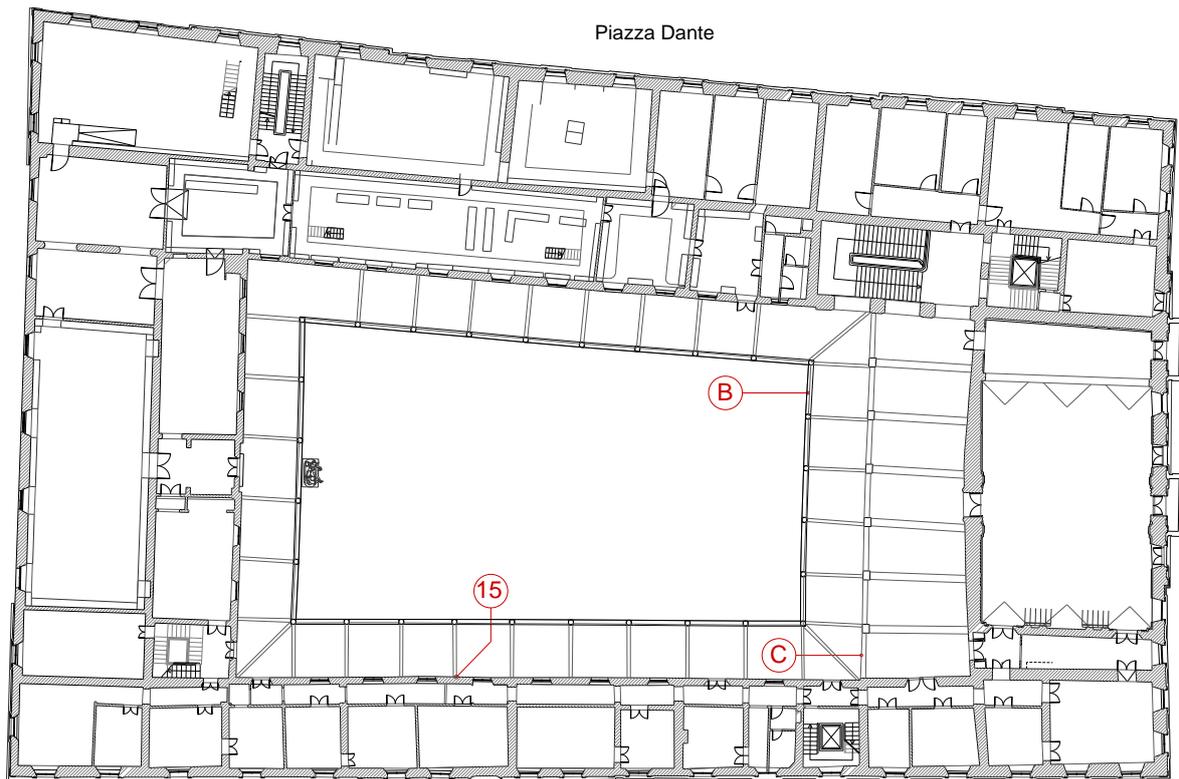


Figura 9.3: Pianta del piano primo con indicazione dei punti di misura.

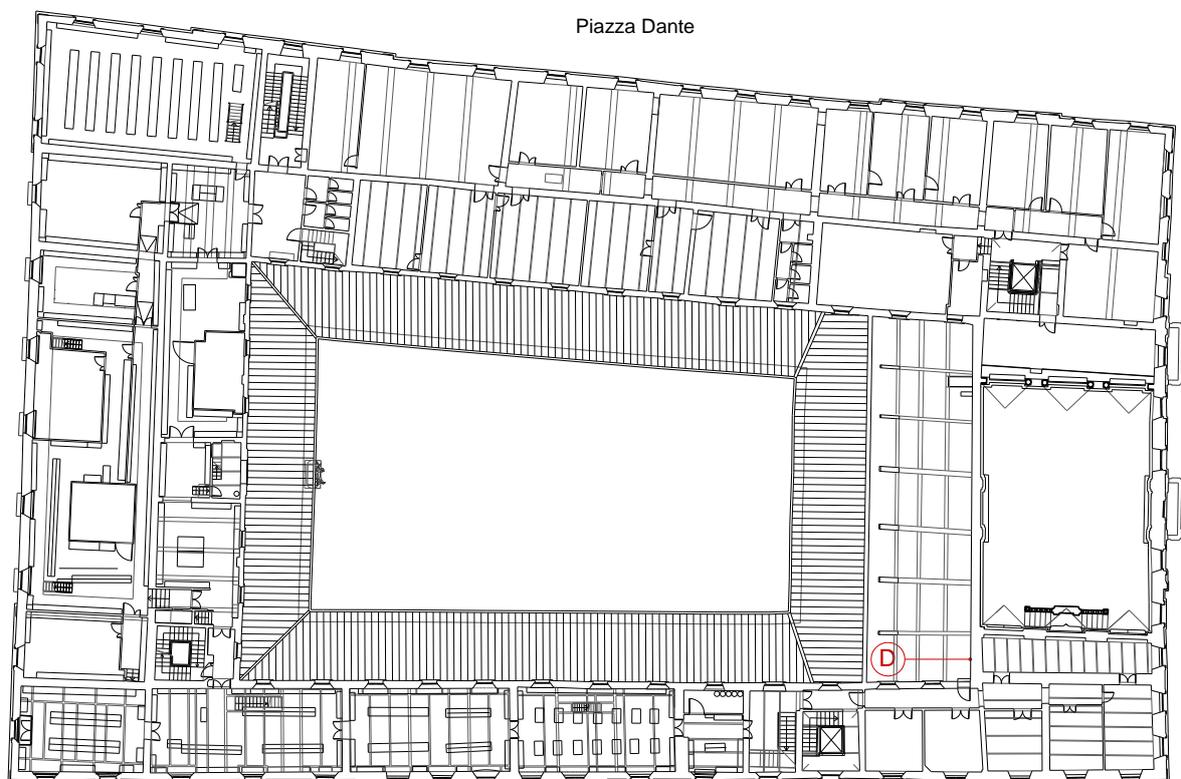


Figura 9.4: Pianta del piano secondo con indicazione dei punti di misura (nel sottotetto).

9.2.1. Localizzazione dei punti di misura al piano terra e misurazioni

Al piano terra sono stati installati 9 punti di misura, come di seguito specificato:

- Punto di misura n°1 (1-1', 1-1'' installazione di tipo B) posizionato sopra il fregio in corrispondenza della porta esterna dell'Aula VIII.
- Punto di misura n°4 (4-4', 4-4'' installazione di tipo B) posizionato in corrispondenza di una delle volte a crociera del porticato.
- Punto di misura n°5 (5-5', 5-5'' installazione di tipo B) posizionato in corrispondenza della parete esterna lato cortile dell'aula del seminario giuridico.
- Punto di misura n°6 (6-6' installazione di tipo A) posizionato in corrispondenza di una volta a crociera del porticato nei pressi dell'aula VII.
- Punto di misura n°7 (7A-7A', 7A-7A'' installazione di tipo B) posizionato in corrispondenza di una volta a crociera del porticato nei pressi dell'aula VII.
- Punto di misura n°9 (9A-9A', 9B-9B', 9B-9B'' installazione rispettivamente di tipo A e B) posizionato in corrispondenza di una volta a crociera del porticato sul lato corto verso Via Curtatone e Montanara.
- Punto di misura n°10 (10A-10A', 10A-10A'', 10B-10B' applicazione rispettivamente di tipo B e A) posizionato in corrispondenza di una volta a crociera del porticato sul lato corto verso Via Curtatone e Montanara.
- Punto di misura n°11 (11-11', 11-11'' applicazione di tipo B) posizionato in corrispondenza dell'ingresso lato Via Curtatone e Montanara.
- Punto di misura n°12 (12-12' applicazione di tipo A) posizionato in corrispondenza di una volta a crociera del porticato sul lato lungo verso Vicolo della Sapienza.
- Punto di misura n°13 (13-13' applicazione di tipo A) posizionato in corrispondenza di una volta a crociera del porticato sul lato lungo verso Vicolo della Sapienza.

Nelle figure 9.5÷9.10 sono riportate le immagini dei vari punti di misura installati; la tabella 9.1 presenta i valori delle letture effettuate nei vari giorni e i grafici 9.11÷9.14 mostrano il corrispondente andamento delle lesioni.



Figura 9.5: a) Indicazione punto di misura n°1 e b) Indicazione del punto di misura n°4 al piano terra.

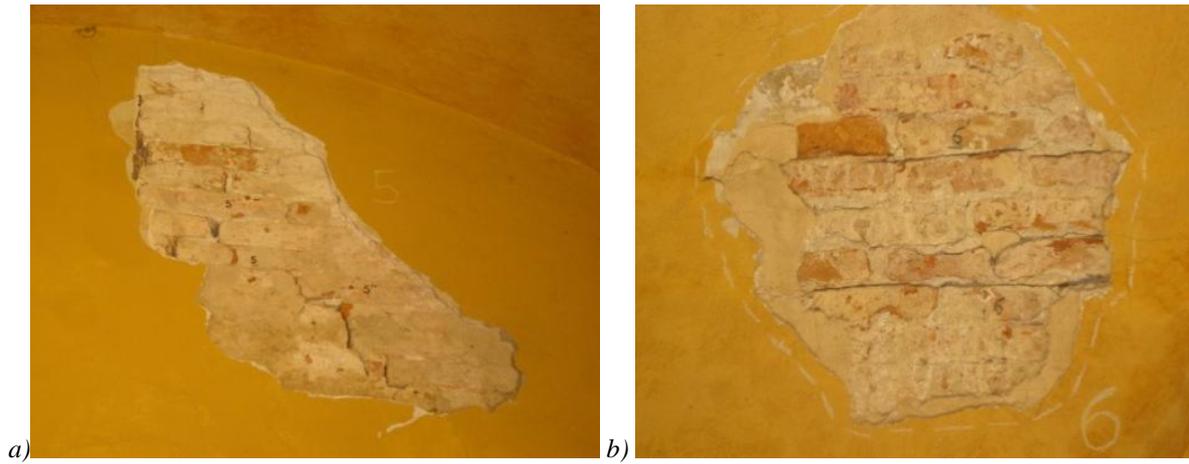


Figura 9.6: a) Indicazione del punto di misura n° 5 e b) indicazione del punto di misura n°6 al piano terra.

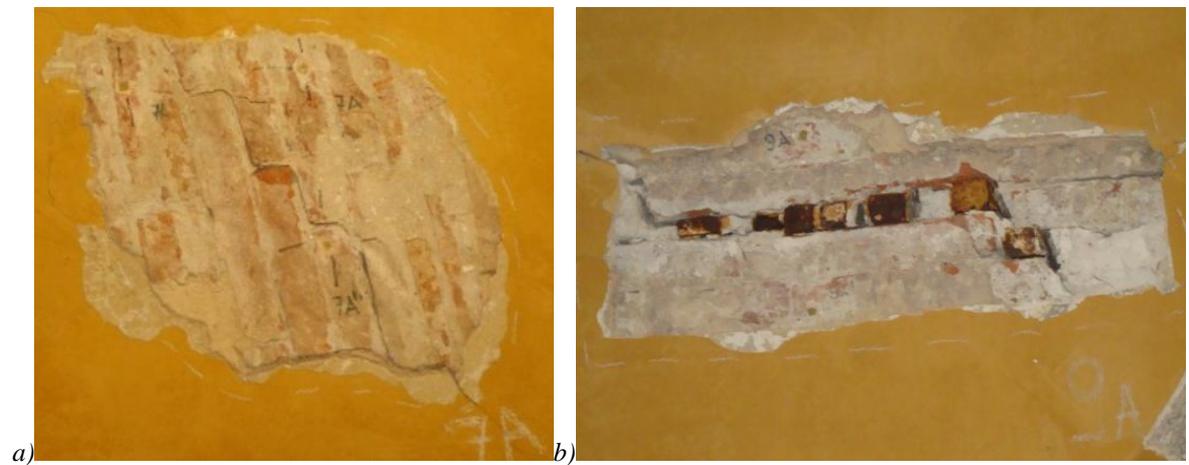


Figura 9.7: a) Indicazione del punto di misura n°7A e b) indicazione del punto di misura n°9A al piano terra.

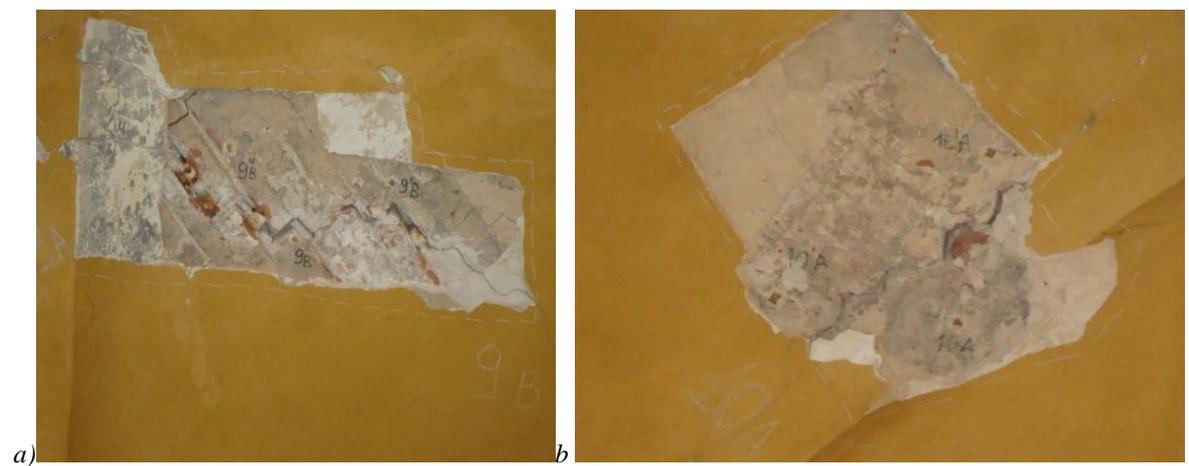


Figura 9.8: a) Indicazione del punto di misura n°9B e b) indicazione del punto di misura n°10A al piano terra.

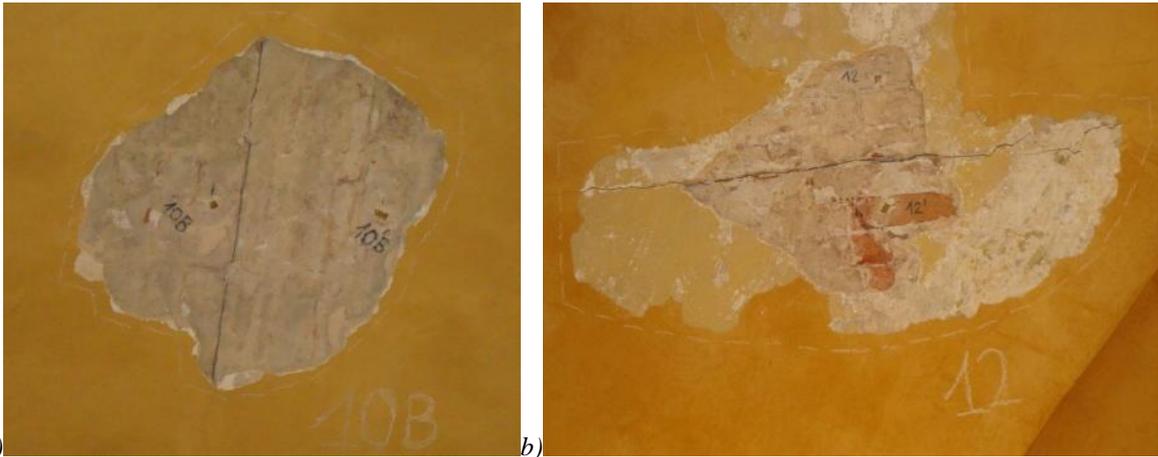


Figura 9.9: a) Indicazione del punto di misura n°10B e b) indicazione del punto di misura n°12 al piano terra.



Figura 9.10: Indicazione del punto di misura n°13 al piano terra.

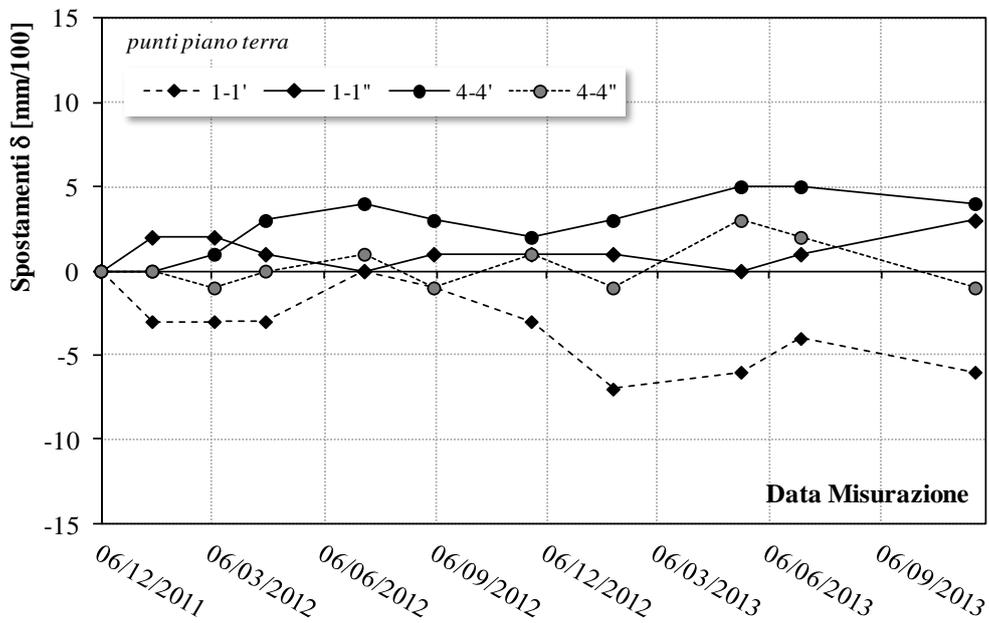


Figura 9.11: Andamento delle lesioni al piano terra (punti n°1 e n°4).

Tabella 9.1: Letture estensimetriche e spostamenti relativi δ in mm/100 (piano terra, dicembre 2011 - novembre 2012).

Data	06/12/2011	17/01/2012	08/03/2012	19/04/2012	09/07/2012	04/09/2012					
Base di misura	Lettura	[mm/100]									
		Lettura	δ	Lettura	δ	Lettura	δ	Lettura	δ	Lettura	δ
1-1'	1412	1415	-3	1415	-3	1415	-3	1412	0	1413	-1
1-1"	1414	1412	2	1412	2	1413	1	1414	0	1413	1
4-4'	1384	1384	0	1383	1	1381	3	1380	4	1381	3
4-4"	1404	1404	0	1405	-1	1404	0	1403	1	1405	-1
5-5'	1429	1430	-1	1429	0	1431	-2	1426	3	1426	3
5-5"	1426	1410	16	1420	6	1422	4	1442	-16	1439	-13
6-6'	1423	1418	5	1417	6	1423	0	1418	5	1418	5
7A-7A'	1425	1421	4	1423	2	1425	0	1431	-6	1430	-5
7A-7A"	1412	1409	3	1408	4	1408	4	1408	4	1406	6
9A-9A'	1437	1437	0	1434	3	1431	6	1423	14	1418	19
9B-9B'	1422	1421	1	1420	2	1420	2	1415	7	1413	9
9B-9B"	1442	1442	0	1441	1	1438	4	1433	9	1432	10
10A-10A'	1442	1442	0	1442	0	1443	-1	1462	-20	1451	-9
10A-10A"	1441	1441	0	1440	1	1439	2	1432	9	1438	3
10B-10B'	1420	1414	6	1422	-2	1426	-6	1433	-13	1433	-13
11-11'	-	-	-	-	-	1457	0	1469	-12	1460	-3
11-11"	-	-	-	-	-	1219	0	1223	-4	1219	0
12-12'	1429	1426	3	1426	3	1427	2	1427	2	1427	2
13-13'	1428	1430	-2	1420	8	1409	19	1387	41	1396	32
Dima	1425	1425		1425		1425		1425		1425	

segue tabella

Data	06/12/2011	23/11/2012	29/01/2013	14/05/2013	02/07/2013	22/11/2013					
Base di misura	Lettura	[mm/100]									
		Lettura	δ	Lettura	δ	Lettura	δ	Lettura	δ	Lettura	δ
1-1'	1412	1415	-3	1419	-7	1418	-6	1416	-4	1418	-6
1-1"	1414	1413	1	1413	1	1414	0	1413	1	1411	3
4-4'	1384	1382	2	1381	3	1379	5	1379	5	1380	4
4-4"	1404	1403	1	1405	-1	1401	3	1402	2	1405	-1
5-5'	1429	1431	-2	1434	-5	1430	-1	1428	1	1432	-3
5-5"	1426	1415	11	1403	23	1430	-4	1438	-12	1418	8
6-6'	1423	1422	1	1418	5	1414	9	1410	13	1422	1
7A-7A'	1425	1424	1	1420	5	1428	-3	1429	-4	1423	2
7A-7A"	1412	1401	11	1396	16	1395	17	1397	15	1391	21
9A-9A'	1437	1412	25	1409	28	1406	31	1402	35	1393	44
9B-9B'	1422	1408	14	1407	15	1406	16	1404	18	1392	30
9B-9B"	1442	1430	12	1430	12	1426	16	1425	17	1422	20
10A-10A'	1442	1444	-2	1442	0	1449	-7	1456	-14	1447	-5
10A-10A"	1441	1441	0	1445	-4	1439	2	1437	4	1442	-1
10B-10B'	1420	1424	-4	1428	-8	1433	-13	1435	-15	1429	-9
11-11'	-	1454	3	1452	5	1461	-4	1450	7	1446	11
11-11"	-	1219	0	1219	0	1222	-3	1220	-1	1226	-7
12-12'	1429	1425	4	1423	6	1421	8	1423	6	-	-
13-13'	1428	1407	21	1410	18	1376	52	1375	53	1419	9
Dima	1425	1425		1425		1425		1425		1426	

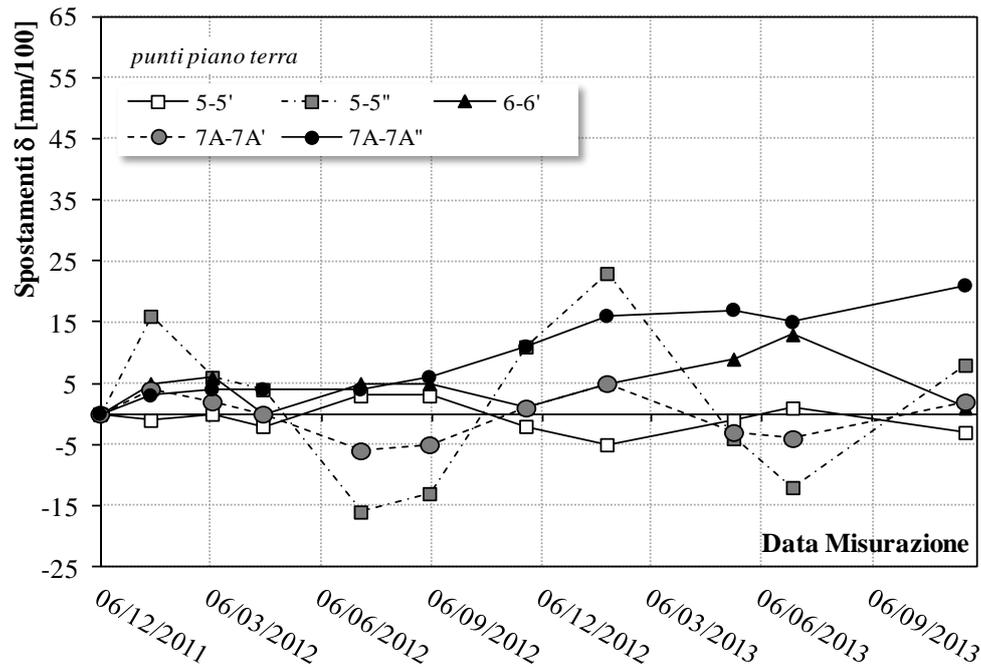


Figura 9. 12: Andamento delle lesioni al piano terra (punti n°5, 6 e n°7).

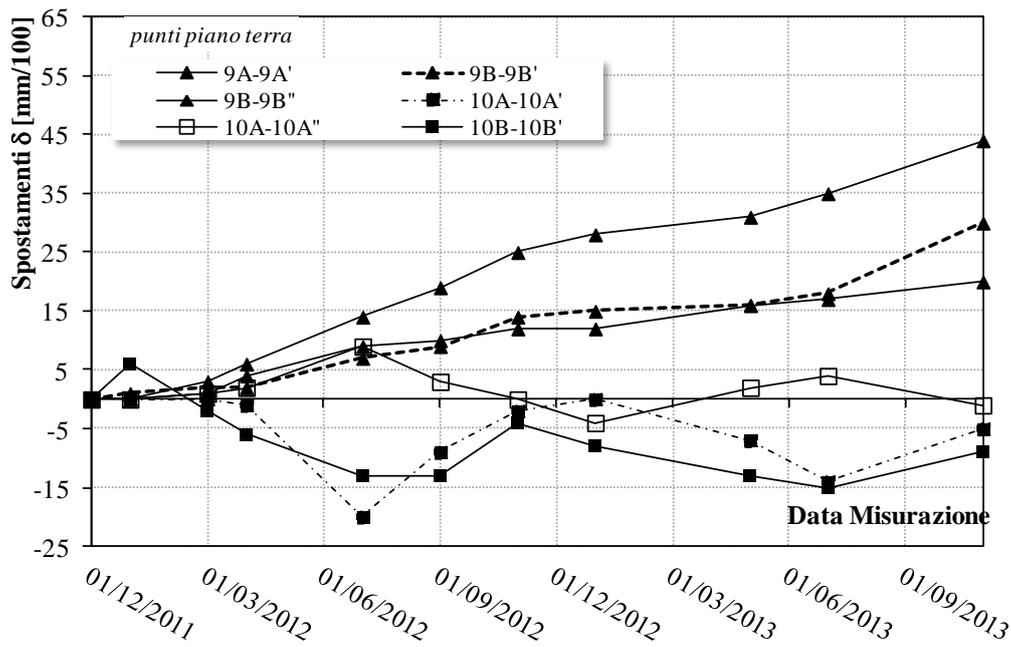


Figura 9. 13: Andamento delle lesioni al piano terra (punti n°9 e n°10).

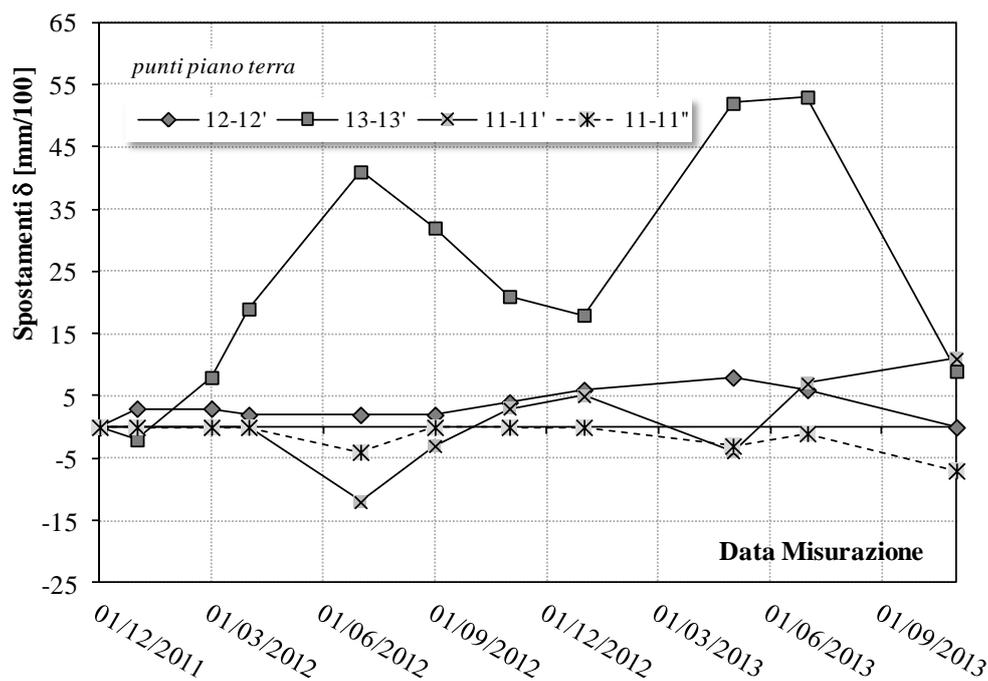


Figura 9.14: Andamento delle lesioni al piano terra (punti n°11,12 e n°13).

9.2.2. Localizzazione dei punti di misura a primo piano e misurazioni

Al piano primo sono stati installati 3 punti di misura, al piano secondo ne è stato installato uno in corrispondenza dei locali del sottotetto, come di seguito specificato:

- Punto di misura n°15 (15A-15A', installazione di tipo A), posizionato in corrispondenza della parete esterna lato porticato in prossimità del Dipartimento di Filosofia del diritto;
- Punto di misura B (B-B', B-B'', installazione tipo B) posizionato in corrispondenza dell'arco a pieno centro del porticato in posizione "intermedia" tra piano terra e piano primo, in corrispondenza del lato corto del cortile verso vicolo della Sapienza;
- Punto di misura C (C-C', C-C'', CIII-CIV installazione rispettivamente di tipo B e di tipo A) posizionati in corrispondenza di un arco del colonnato al piano primo;
- Punto di misura D (D-D', D-D'', D'-D''') posizionato in corrispondenza del sottotetto.

Nelle figure 9.15 e 9.16 sono riportate le immagini dei vari punti di misura installati; le tabelle 9.2÷9.5 presentano i valori delle letture effettuate nei vari giorni e i grafici 9.17÷9.19 mostrano il corrispondente andamento delle lesioni.



Figura 9.15: a) Indicazione punto di misura n°15 al piano primo, dettaglio; b) indicazione punto di misura B al piano primo (arco del porticato interno).



Figura 9.16: a) Indicazione del punto di misura C al piano primo (arco in corrispondenza della copertura del porticato), b) indicazione punto di misura D al piano secondo.

Tabella 9.2: Letture estensimetriche e spostamenti relativi δ in mm/100 (piano primo: 12.2011 - 11.2012).

Data	06/12/2011	17/01/2012	08/03/2012	19/04/2012	09/07/2012	04/09/2012					
Base di misura	Lettura	[mm/100]									
		Lettura	δ	Lettura	δ	Lettura	δ	Lettura	δ	Lettura	δ
B-B'	1422	1398	24	1412	10	1421	1	1429	-7	1429	-7
B-B''	1426	1422	4	1421	5	1422	4	1420	6	1427	-1
C-C'	1425	1427	-2	1424	1	1426	-1	1435	-10	(*)	(*)
C-C''	1436	1427	9	1425	11	1424	12	1434	2	(*)	(*)
C ^{III} -C ^{IV}	1446	1423	23	1445	1	1452	-6	1470	-24	(*)	(*)
15A-15A'	-	-	-	-	-	-	-	1446	0	1445	1
15A-15A''	-	-	-	-	-	-	-	1422	0	1419	3
Dima	1425	1425		1425		1425		1425		1425	

Tabella 9.3: Letture estensimetriche e spostamenti relativi δ in mm/100 (piano primo: 11.2012 - 11.2013).

Data	06/12/2011	23/11/2012	29/01/2013	29/01/2013	02/07/2013	22/11/2013					
Base di misura	Lettura	[mm/100]									
		Lettura	δ	Lettura	δ	Lettura	δ	Lettura	δ	Lettura	δ
B-B'	1422	1417	5	1408	14	1426	-4	1430	-8	1424	-2
B-B''	1426	1425	1	1404	22	1407	19	1412	14	1405	21
C-C'	1425	1436	-11	1439	-14	1433	-8	1442	-17	1445	-20
C-C''	1436	1421	15	1418	18	1423	13	1427	9	1423	13
C ^{III} -C ^{IV}	1446	1450	-4	1443	3	1475	-29	1460	-14	1445	1
15A-15A'	-	1442	4	1437	9	1440	6	1441	5	1442	4
15A-15A''	-	1413	9	1404	18	1409	13	1410	12	1405	17
Dima	1425	1425		1425		1425		1425		1425	

Tabella 9.4: Letture estensimetriche e spostamenti relativi δ in mm/100 (piano secondo: 12.2011 - 11.2012).

Data	06/12/2011	17/01/2012	08/03/2012	19/04/2012	09/07/2012	04/09/2012					
Base di misura	Lettura	[mm/100]									
		Lettura	δ	Lettura	δ	Lettura	δ	Lettura	δ	Lettura	δ
D-D'	1431	1427	4	1426	5	1425	6	1427	4	1425	6
D-D''	1400	1401	-1	1399	1	1399	1	1396	4	1397	3
D-D'''	1425	1423	2	1424	1	1424	1	1426	-1	1425	0
Dima	1425	1425		1425		1425		1425		1425	

Tabella 9.5: Letture estensimetriche e spostamenti relativi δ in mm/100 (piano secondo: 11.2012 - 11.2013).

Data	06/12/2011	23/11/2012	29/01/2013	29/01/2013	02/07/2013	22/11/2013					
Base di misura	Lettura	[mm/100]									
		Lettura	δ	Lettura	δ	Lettura	δ	Lettura	δ	Lettura	δ
D-D'	1431	1424	7	1422	9	-	-	1421	10	1418	13
D-D''	1400	1398	2	1402	-2	-	-	1395	5	1398	2
D-D'''	1425	1423	2	1421	4	-	-	1426	-1	1423	2
Dima	1425	1425		1425		1425		1425		1425	

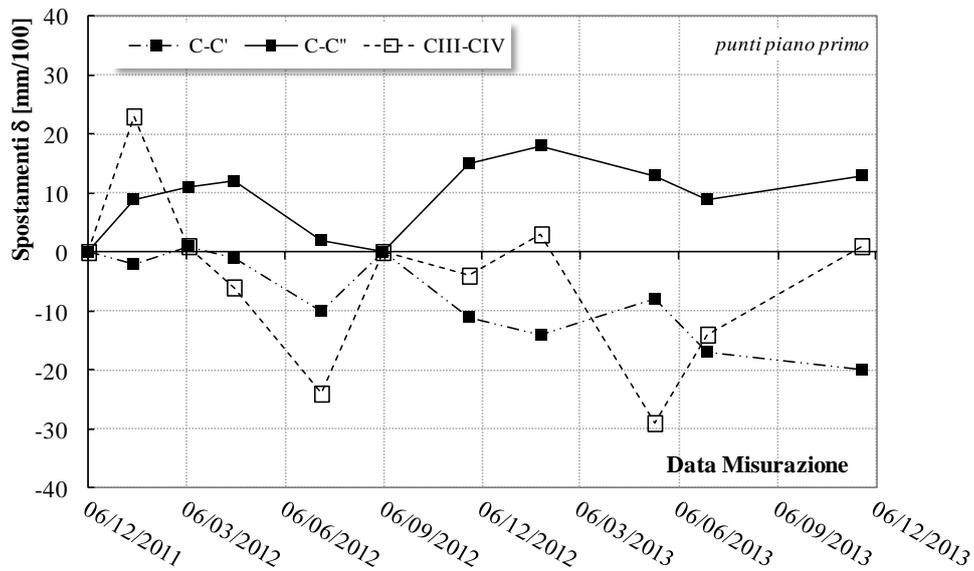


Figura 9.17: Andamento delle lesioni al piano primo (punto C).

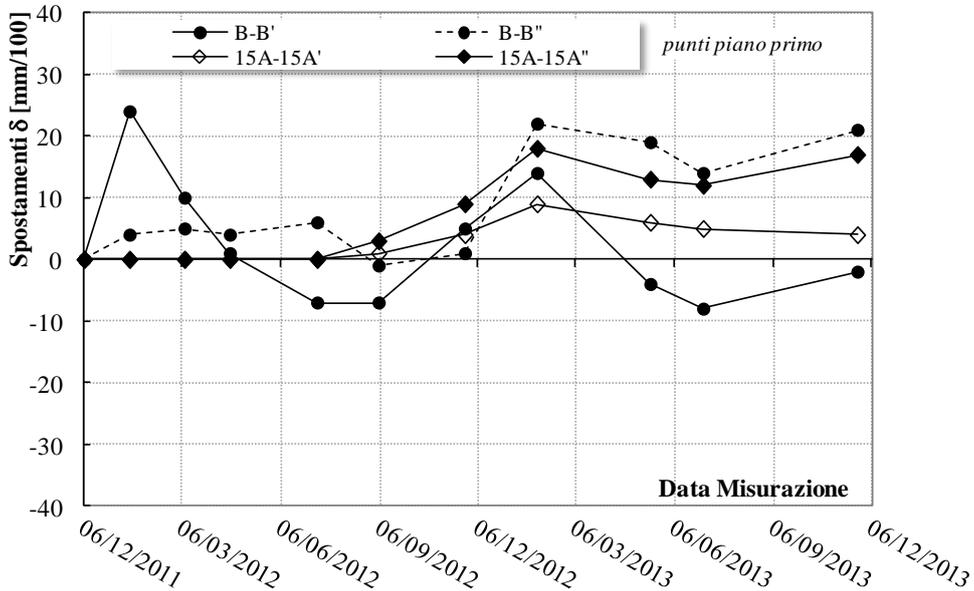


Figura 9.18: Andamento delle lesioni al piano primo (punto B e punto n°15).

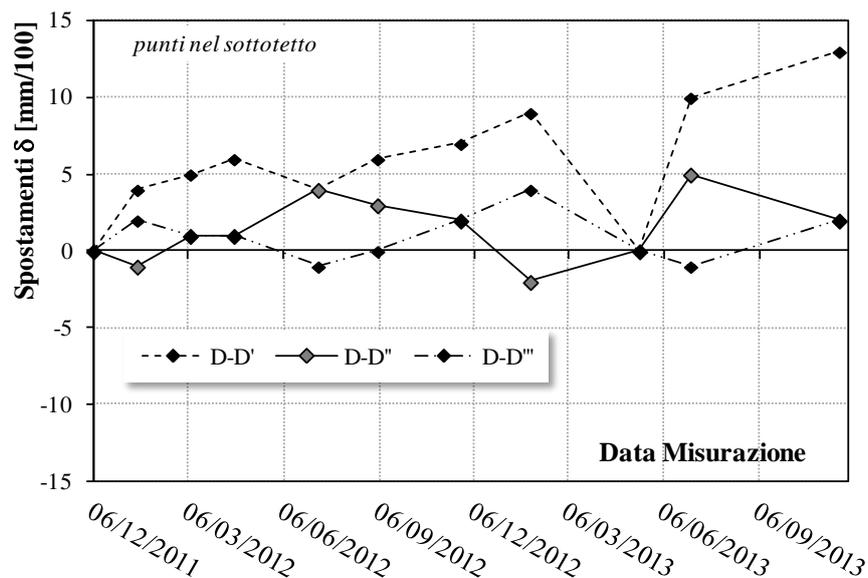


Figura 9.19: Andamento delle lesioni al piano secondo (punto D nel sottotetto).

9.3 Monitoraggio continuo del quadro fessurativo

9.3.1 Implementazione e realizzazione del sistema di misura

Nel sistema di monitoraggio continuo sono impiegati trasduttori di spostamento elettronici per la valutazione dell'evoluzione temporale delle ampiezze delle fessure. Nella fase iniziale di studio ed implementazione del sistema sono state individuate le seguenti proprietà che questo deve possedere:

- ridotta invasività degli elementi costitutivi all'interno dell'edificio, sia da un punto di vista estetico/architettonico che di connessione alle reti elettriche ed informatiche esistenti;
- elevata affidabilità e completa capacità di ripristino in caso di perdita dell'alimentazione o malfunzionamento da parte di uno o più dei suoi componenti;
- minima necessità di intervento da parte degli operatori per le operazioni di gestione e manutenzione dei dispositivi e dei sensori;
- possibilità di ottenere i risultati delle operazioni di misura da una posizione remota senza la necessità di accedere fisicamente al sistema di misura;
- capacità di misurare la temperatura in prossimità di ogni trasduttore.

La soluzione adottata per la realizzazione del sistema di monitoraggio si basa sull'impiego di una piattaforma NI WSN (*Wireless Sensor Network*) della *National Instruments* costituita da nodi di misura connessi tra loro mediante il protocollo di comunicazione wireless *Zigbee*[®].

La rete è composta dai seguenti componenti: i nodi di misura, il centro di raccolta e trasmissione delle informazioni (*gateway*) ed il software di gestione.

I nodi, localizzati nelle posizioni individuate per il controllo delle ampiezze delle fessure, sono collegati mediante cablaggio con i trasduttori e si occupano della trasmissione del dato in formato digitale al centro di raccolta (*gateway*). Alcuni speciali nodi, indicati come ripetitori (*router*), permettono di aumentare le distanze operative e l'affidabilità di un sistema WSN effettuando la ripetizione del segnale verso il *gateway* dei nodi ad essi collegati. Quest'ultimo, in particolare, funziona come coordinatore di rete per l'autenticazione dei nodi, come centro di raccolta delle informazioni e come mezzo di trasmissione all'esterno attraverso un *web server* integrato.

Il gateway ed i nodi, sia di tipo ripetitore (*router*) che terminale (*end node*), formano insieme una rete di tipo *mesh*. Il primo contiene un elenco di nodi (individuati mediante il loro numero di serie) che sono stati autorizzati per l'accesso alla rete. All'accensione, ciascun nodo ricerca la presenza nel suo raggio di azione di un dispositivo ripetitore (*router*) o del *gateway* per collegarsi ad esso. In caso di positivo esito della ricerca, il nodo aggiorna la sua configurazione secondo le indicazioni fornite dal *gateway* ed inizia la sua attività di misura sui trasduttori collegati e di trasmissione dei dati.

La modalità di realizzazione della rete *mesh* di trasduttori permette, nel caso di mancato funzionamento di uno dei nodi ripetitori, di individuare un eventuale percorso alternativo di comunicazione attraverso un altro ripetitore, garantendo quindi affidabilità della comunicazione anche in caso di malfunzionamenti locali. Nella figura 9.20 sono mostrati alcuni esempi di schemi di collegamento che si instaurano all'interno di una rete WSN (tratti dal sito www.ni.com). I nodi di misura, sia ripetitori che terminali, sono stati realizzati mediante dispositivi NI WSN 3226, dotati di quattro canali di input analogico configurabili per misure basate sulla resistenza con la possibilità di combinare misure di tensione e temperatura in un singolo dispositivo. Il gateway è stato realizzato mediante un dispositivo NI WSN 9792 che include un processore a 533 MHz, 2 GB di memorizzazione su scheda e operatività radio 2.4 GHz IEEE 802.15.4 per la comunicazione con un massimo di 36 nodi di misura NI WSN distribuiti in una configurazione *mesh*. Il gateway dispone inoltre di un server Web integrato per l'accesso remoto ai dati del sistema WSN. Nella figura 9.21 sono mostrate le immagini dei dispositivi insieme ad alcune viste delle dotazioni di protezione utilizzate per il loro collocamento all'esterno o in condizioni climatiche non controllate.

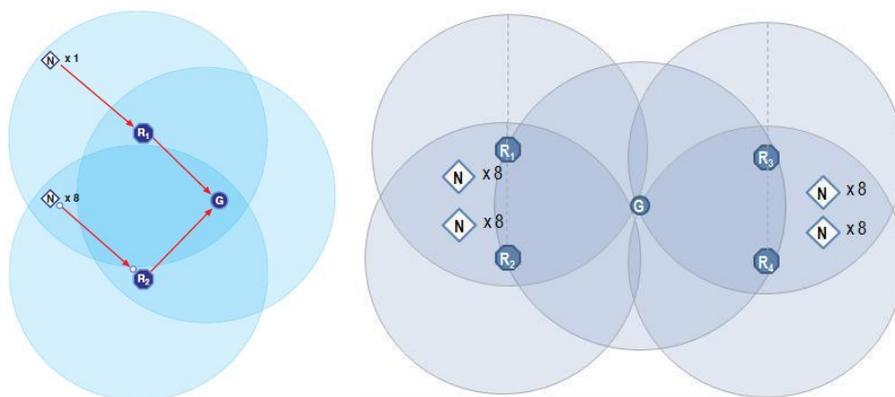


Figura 9.20: Esempi di schemi di comunicazione tra nodi terminali [N] e gateway [G] nella rete di sensori WSN, passando attraverso nodi ripetitori (router) [R] [www.ni.com].

Gateway NI WSN 9792

Nodo NI WSN 3226



Vista dei dispositivi



Protezione per l'uso esterno.

Figura 9.21: Dispositivi utilizzati per la realizzazione della rete di sensori WSN [www.ni.com].

9.3.2 Strumentazione utilizzata

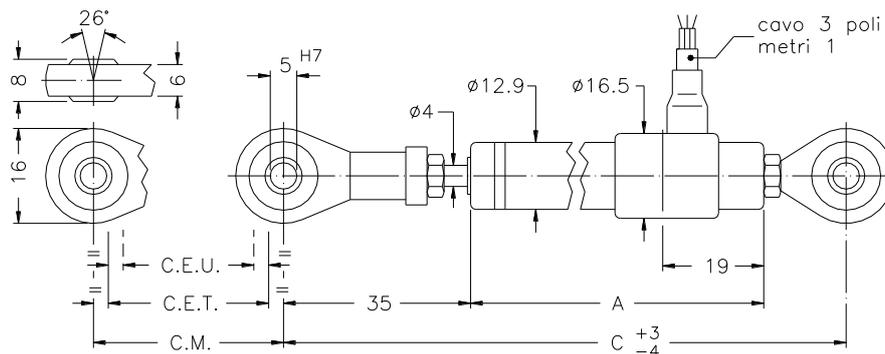
Per la misura dell'evoluzione temporale delle lesioni sono stati utilizzati trasduttori di spostamento di tipo potenziometrico GEFRAN modello PZ12-A-50 caratterizzati da un campo di misura di 50 mm. Tali trasduttori sono caratterizzati da resistenza sulla Corsa Elettrica Utile (C.E.U.) di 50 mm pari a 2000Ω , con una precisione pari a $\pm 2 \Omega$ ed una temperatura di impiego compresa tra $-30 \div 100^\circ\text{C}$.

In ogni punto di misura dell'ampiezza della lesione sono stati collocati almeno due trasduttori di spostamento, posizionati secondo criteri analoghi a quanto illustrato nel paragrafo 7.2 per il sistema di monitoraggio periodico. In questo caso, la distanza tra i punti di applicazione iniziale è stata misurata per ciascun trasduttore al momento dell'installazione. E' stata posizionata inoltre una termo-resistenza RTD PT 1000Ω per la misura della temperatura in concomitanza della misura di ampiezza.

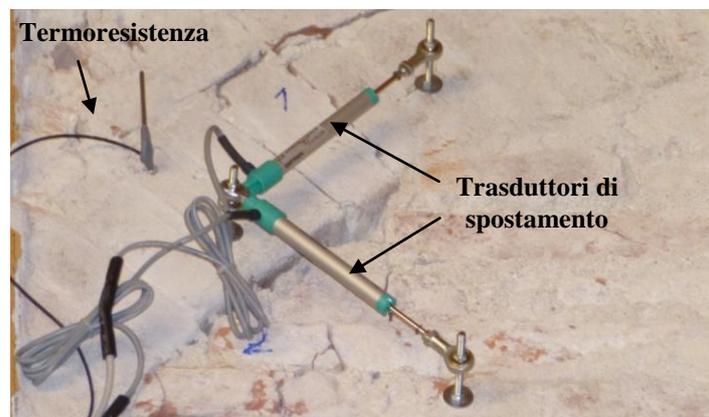
Nella figura 9.22 sono mostrate le dimensioni di un trasduttore di spostamento, insieme ad un esempio di installazione effettuato. Complessivamente sono stati strumentati 16 punti di misura, 13 dei quali con due trasduttori di spostamento e 3 con tre trasduttori, ed un sensore di temperatura ciascuno.

Nelle figure 9.23 e 9.24 sono mostrate le posizioni di installazione dei punti di misura con indicata la relativa sigla identificativa, corrispondente con il numero di serie del nodo, mentre nelle figure da 9.25 a 9.38 sono rappresentati:

- per ciascun punto di misura ubicato sugli orizzontamenti, la rappresentazione in pianta della linea fessurativa e della posizione dei diversi strumenti, la denominazione adottata e le dimensioni geometriche iniziali dei singoli trasduttori;
- per ciascun punto di misura ubicato sulle pareti verticali, il posizionamento degli strumenti è indicato su foto che permettono di individuare l'ubicazione del punto di misura, la denominazione e la geometria iniziale degli strumenti.



Caratteristiche geometriche dei trasduttori di spostamento (<http://www.gefran.com/it/it>)



Esempio di installazione della strumentazione

Figura 9.22: Trasduttori di spostamento e di temperatura utilizzati nel sistema di monitoraggio [www.ni.com].

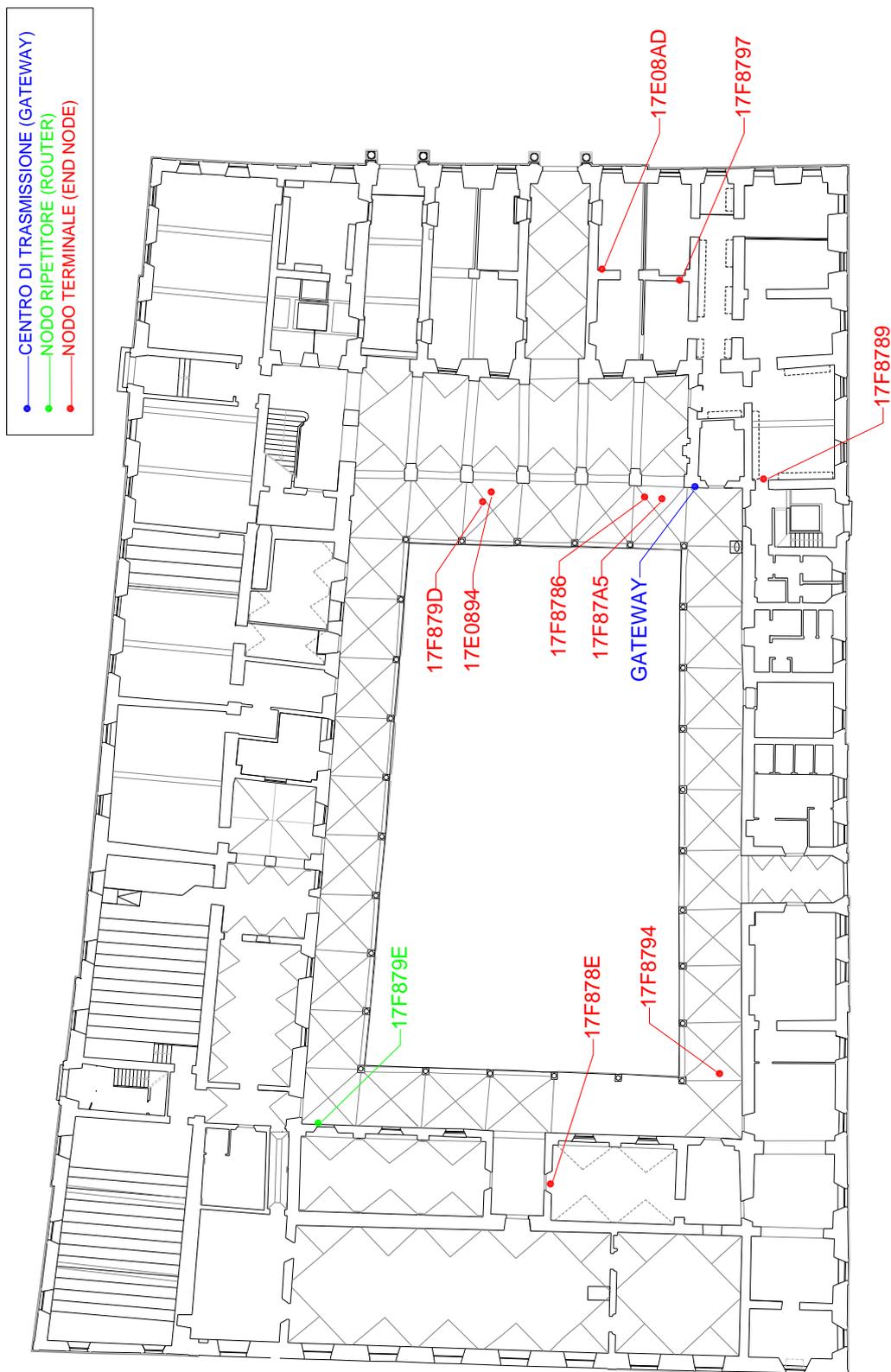


Figura 9.23: Posizione dei punti di misura del sistema per il monitoraggio continuo delle fessure – PIANO TERRA

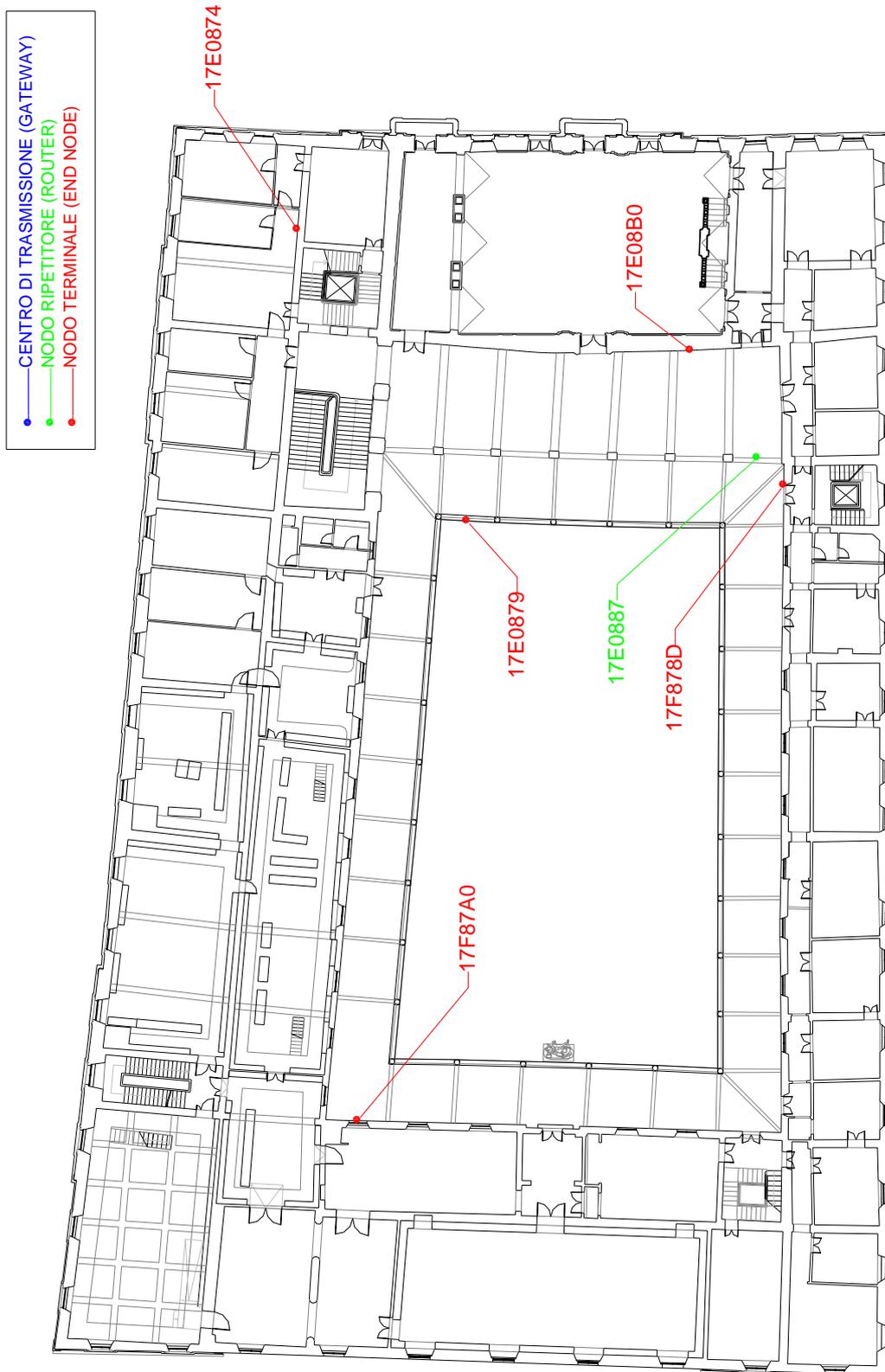
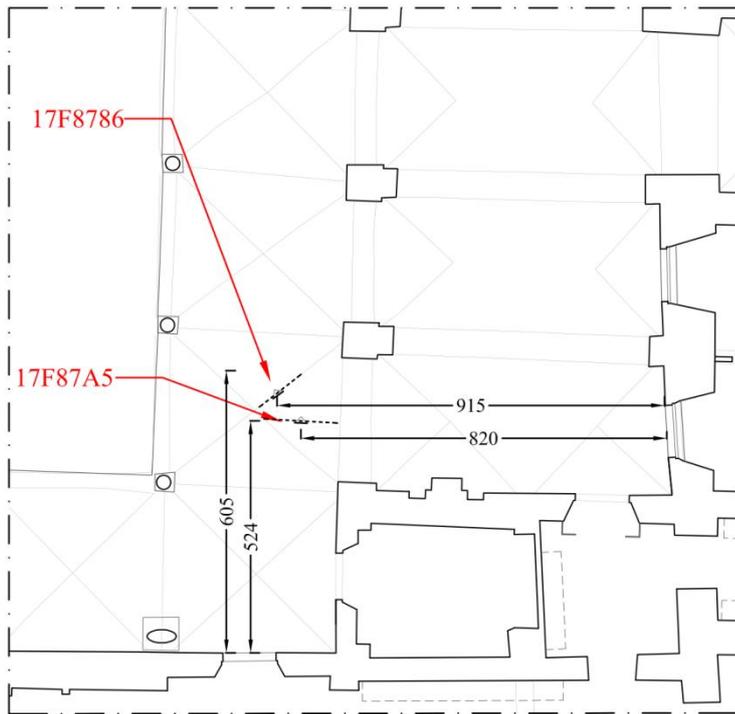


Figura 9.24: Posizione dei punti di misura del sistema per il monitoraggio continuo delle fessure – PIANO PRIMO

Vista generale con la posizione dei punti di misura



Vista generale



Schema di posizionamento dei trasduttori

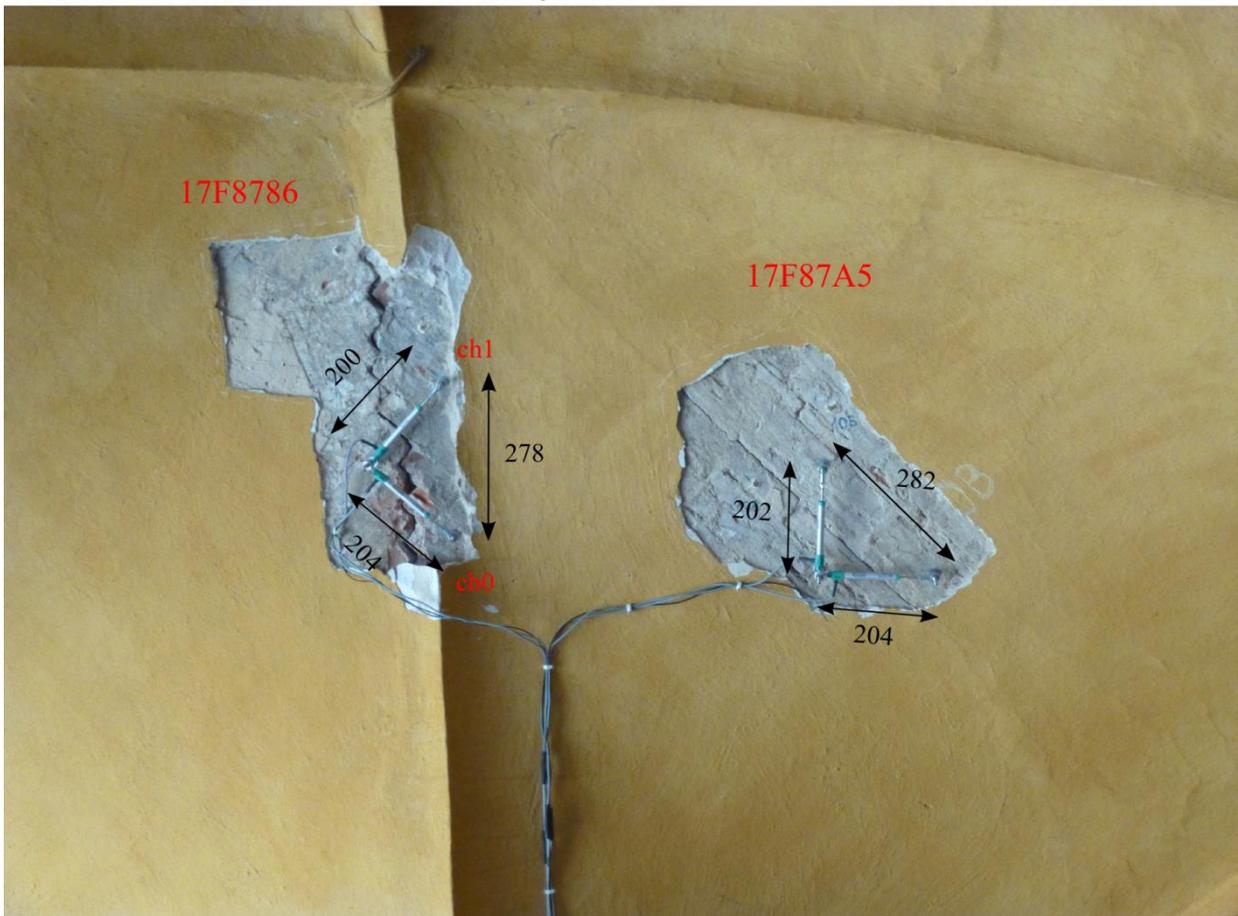
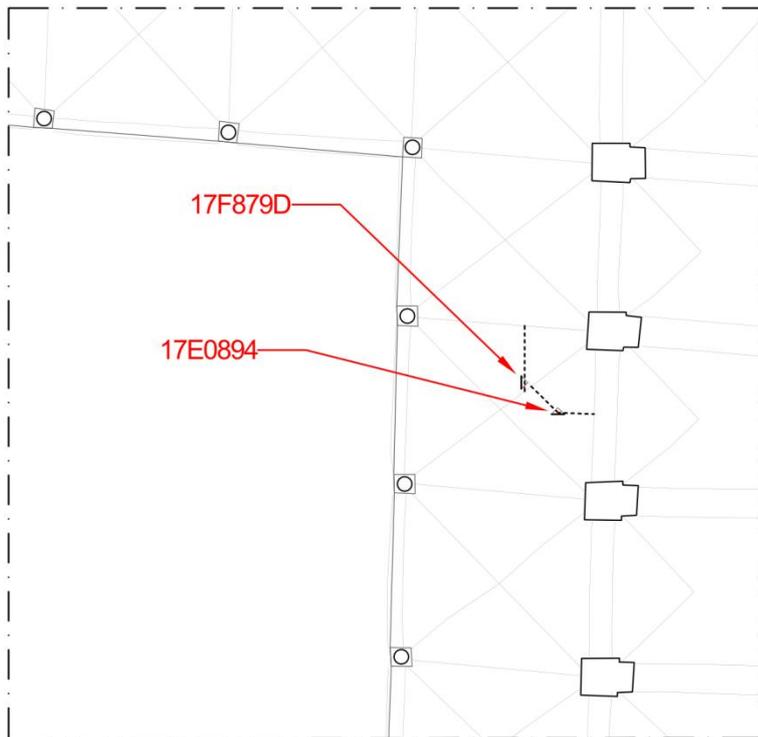


Figura 9.25: Sistema di misura per il monitoraggio continuo del quadro fessurativo – Punti 17F8786 - 17F87A5

Vista generale con la posizione dei punti di misura



Vista generale



Schema di posizionamento dei trasduttori

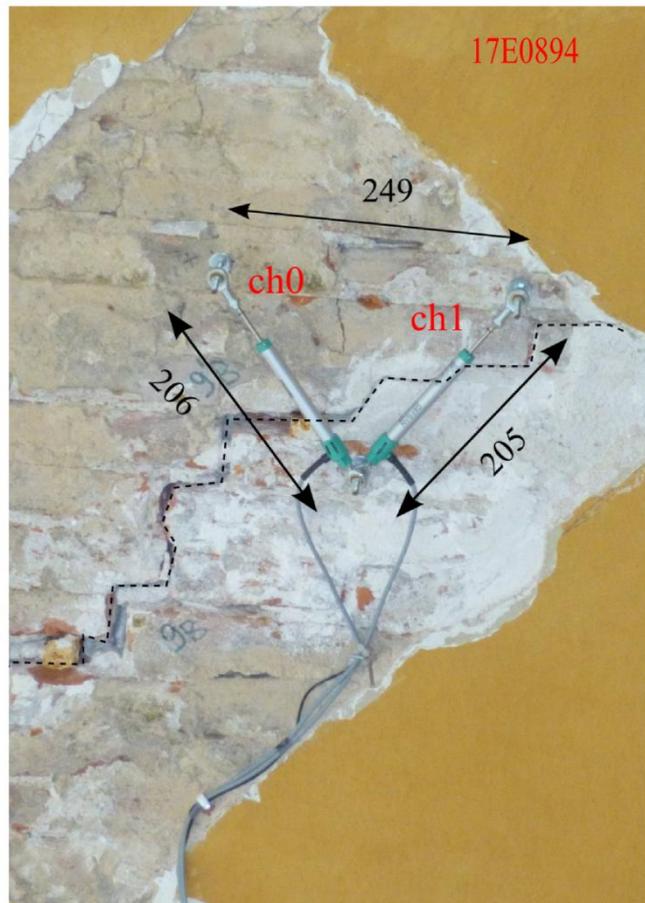
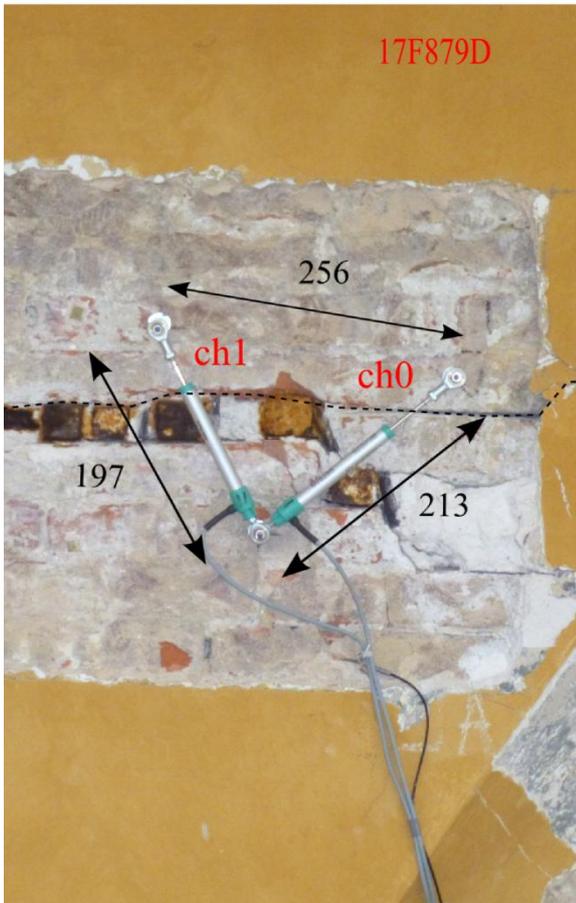
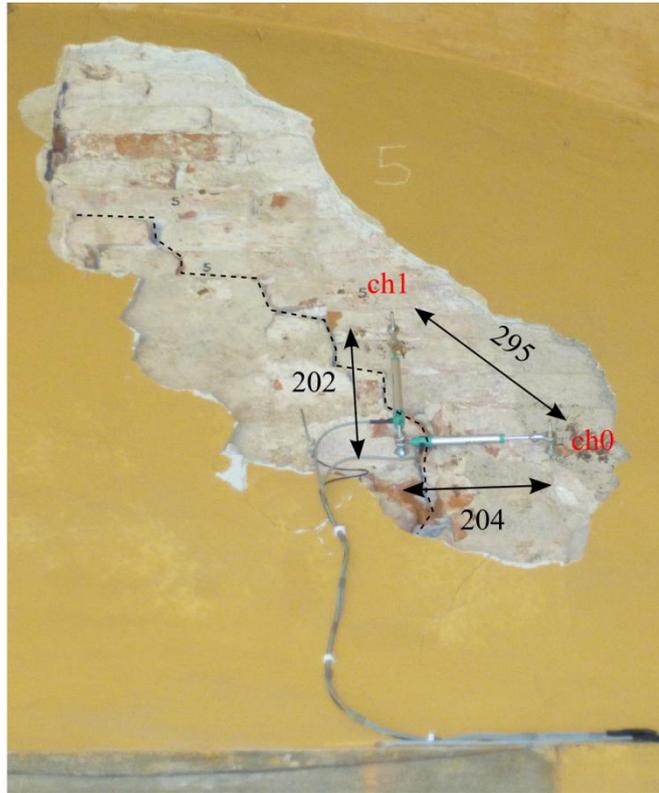


Figura 9.26: Sistema di misura per il monitoraggio continuo del quadro fessurativo – Punti 17F879D - 17E0894



Vista generale

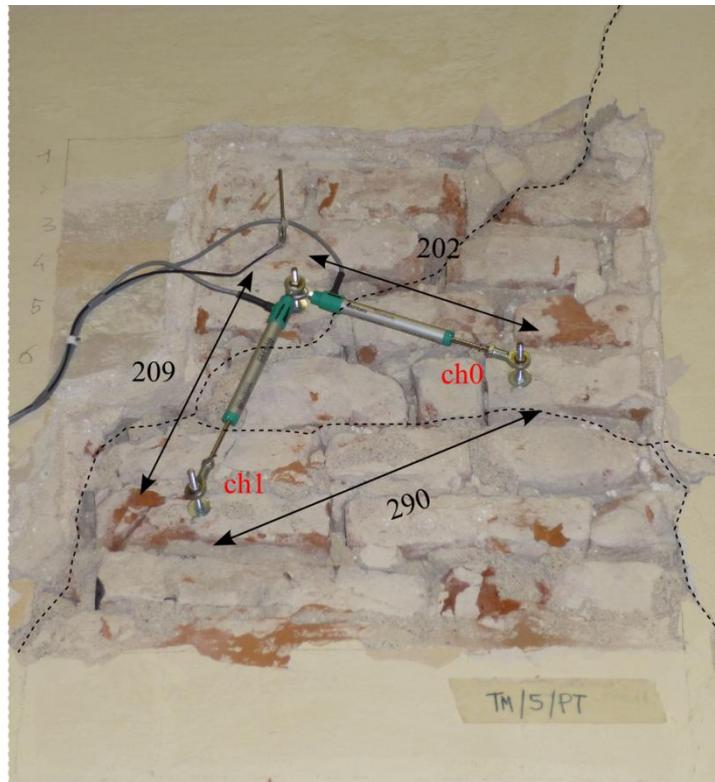


Schema di posizionamento dei trasduttori

Figura 9.27: Sistema di misura per il monitoraggio continuo del quadro fessurativo – Punto 17F879E



Vista generale

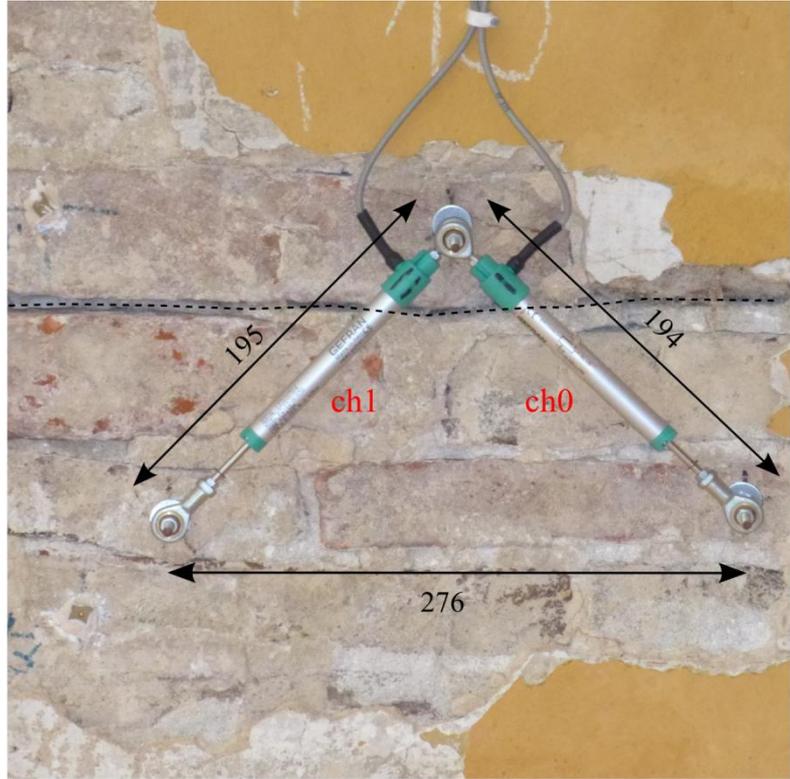


Schema di posizionamento dei trasduttori

Figura 9.28: Sistema di misura per il monitoraggio continuo del quadro fessurativo – Punto 17F878E



Vista generale

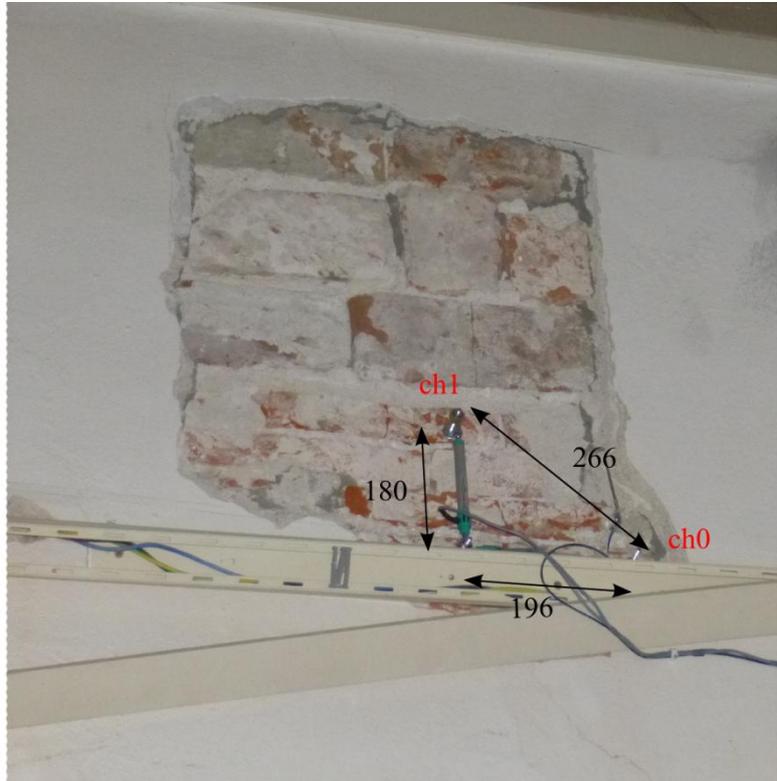


Schema di posizionamento dei trasduttori

Figura 9.29: Sistema di misura per il monitoraggio continuo del quadro fessurativo – Punto 17F8794



Vista generale

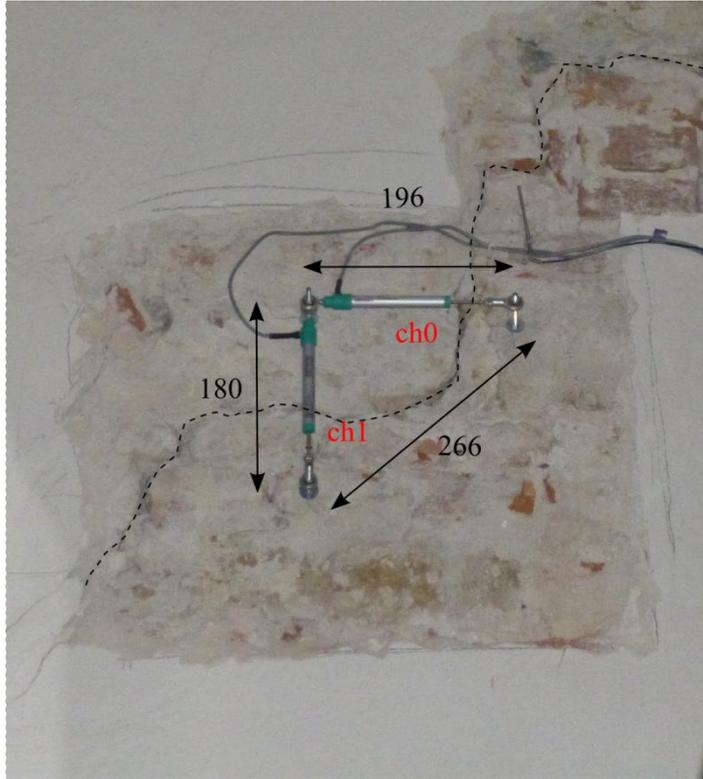


Schema di posizionamento dei trasduttori

Figura 9.30: Sistema di misura per il monitoraggio continuo del quadro fessurativo – Punto 17F8789



Vista generale

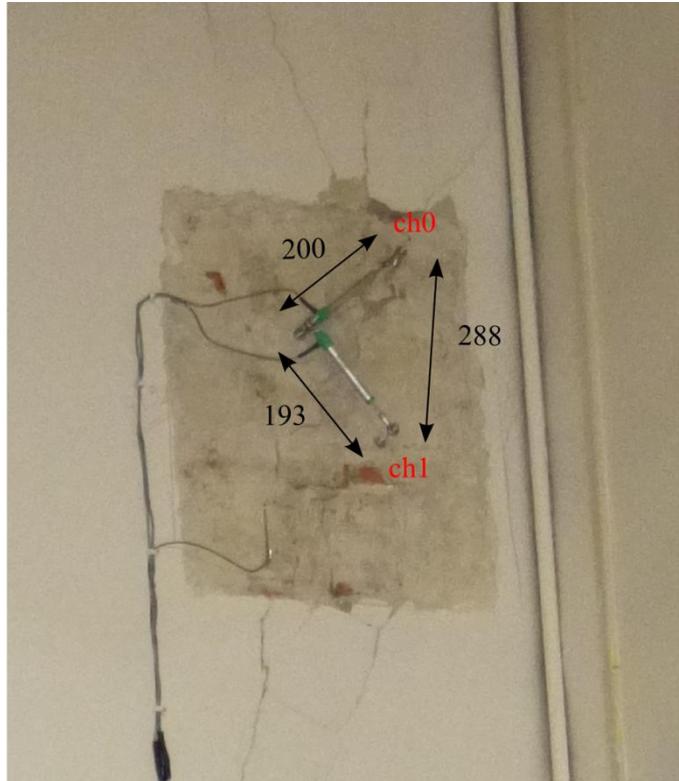


Schema di posizionamento dei trasduttori

Figura 9.31: Sistema di misura per il monitoraggio continuo del quadro fessurativo – Punto 17F8797



Vista generale

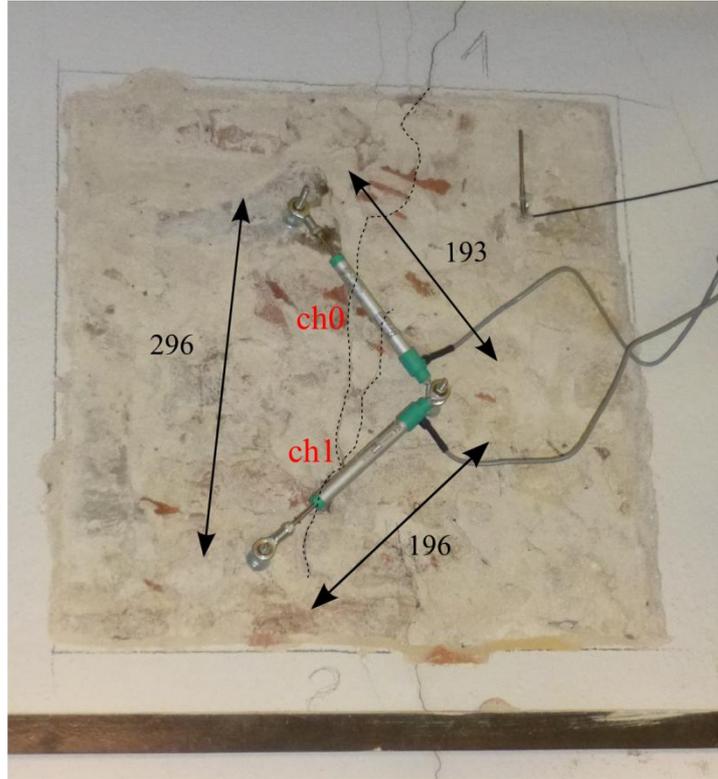


Schema di posizionamento dei trasduttori

Figura 9.32: Sistema di misura per il monitoraggio continuo del quadro fessurativo – Punto 17E08AD



Vista generale

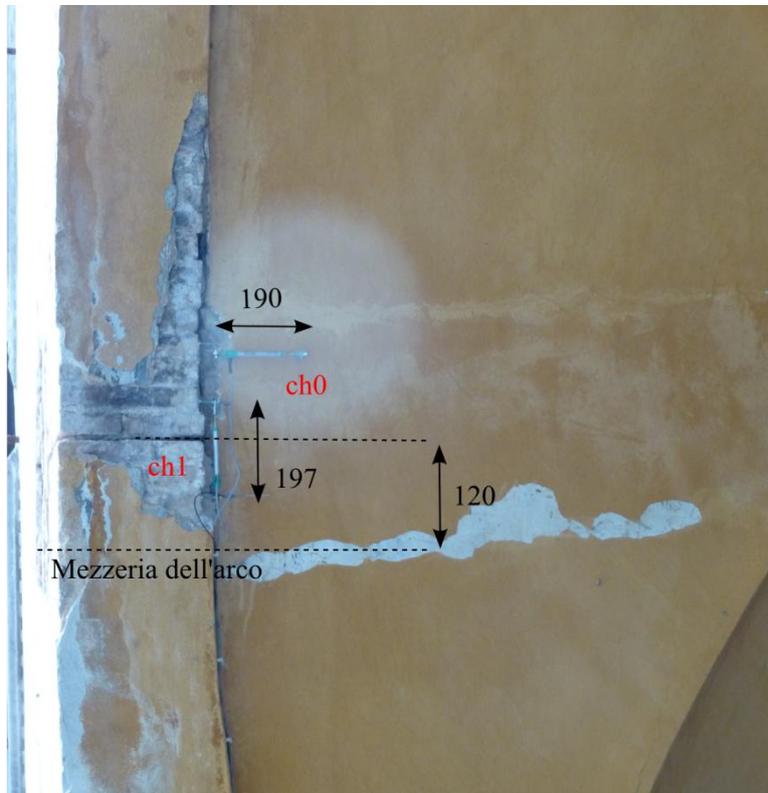


Schema di posizionamento dei trasduttori

Figura 9.33: Sistema di misura per il monitoraggio continuo del quadro fessurativo – Punto 17E0874



Vista generale

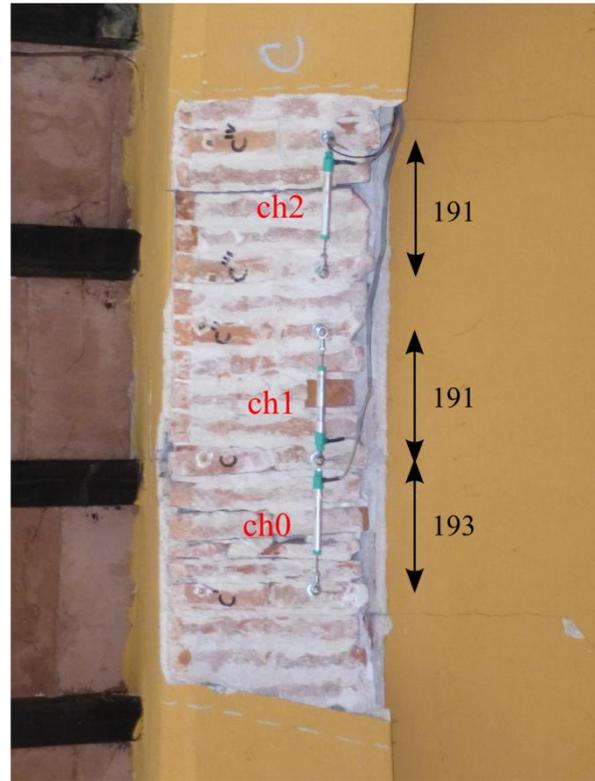


Schema di posizionamento dei trasduttori

Figura 9.34: Sistema di misura per il monitoraggio continuo del quadro fessurativo – Punto 17E0879



Vista generale

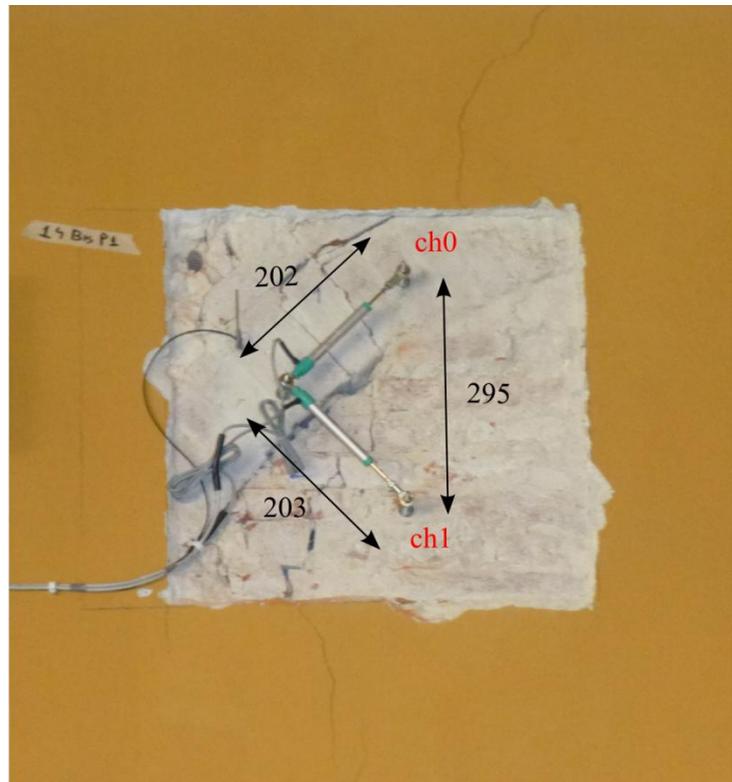


Schema di posizionamento dei trasduttori

Figura 9.35: Sistema di misura per il monitoraggio continuo del quadro fessurativo – Punto 17E0887



Vista generale



Schema di posizionamento dei trasduttori

Figura 9.36: Sistema di misura per il monitoraggio continuo del quadro fessurativo – Punto 17E08B0



Vista generale



Schema di posizionamento dei trasduttori

Figura 9.37: Sistema di misura per il monitoraggio continuo del quadro fessurativo – Punto 17F878D



Vista generale



Schema di posizionamento dei trasduttori

Figura 9.38: Sistema di misura per il monitoraggio continuo del quadro fessurativo – Punto 17F87A0

9.3.3 Gestione del sistema di monitoraggio continuo ed elaborazione dei dati

Il sistema di monitoraggio è stato configurato in modo tale da fornire, per ciascun punto indicato mediante il relativo numero di serie, una misura ogni 5 minuti. Le misure rappresentano le resistenze offerte dai potenziometri (in Ω), associate al relativo valore di temperatura (in $^{\circ}\text{C}$).

Le letture degli strumenti sono convertite in misure di ampiezza attraverso un coefficiente di conversione pari a 0.02511 mm/ Ω , ottenuto dalle prove di taratura eseguite preventivamente in laboratorio su 12 trasduttori selezionati a campione.

Ciascuna lettura, memorizzata con l'indicazione dell'orario di lettura (GMT+1), è annotata in un file in formato testo che viene trasmesso con cadenza giornaliera, mediante una connessione internet, ad un server FTP dedicato all'archiviazione delle letture. Il file contiene, dopo una parte introduttiva relativa alla composizione del sistema, le informazioni relative ad ogni singola lettura. Nella figura 9.39 è mostrato un estratto del generico file di testo.

Per ciascun trasduttore, la prima lettura effettuata al momento dell'installazione rappresenta la misura di riferimento (istante iniziale); le successive letture, depurate della lettura iniziale, rappresentano la variazione di ampiezza della lesione nel punto considerato rispetto all'istante iniziale.

I dati raccolti sono elaborati successivamente al fine della creazione di grafici adatti per il controllo dell'evoluzione temporale del quadro fessurativo. In particolare l'evoluzione dell'ampiezza della lesione viene rappresentata dal grafico dei valori medi orari delle letture depurate della lettura iniziale. Nella tabella 9.6 sono riportate, per ciascun punto, l'orario di inizio registrazione e le relative misure.

Tabella 9.6: Valori delle misure di riferimento effettuate all'installazione dei sensori.

Numero di Serie	Orario Inizio Letture [gg/mm/aaaa hh:mm]	Letture			Temperatura [$^{\circ}\text{C}$]
		ch0 [Ω]	ch1 [Ω]	ch2 [Ω]	
17E08AD	30/09/2013 13:00	847,7592	387,3235	---	22,5146
17E08B0	11/10/2013 12:00	1093,7742	983,2368	---	19,2192
17E0874	08/10/2013 14:00	694,4644	728,2271	---	22,9944
17E0879	25/10/2013 12:00	729,7873	435,4924	---	22,3011
17E0894	02/08/2013 13:00	973,889	1109,5891	---	33,0887
17E0887	18/10/2013 13:00	668,4873	614,4467	628,1268	19,1128
17F8786	02/08/2013 14:00	817,8588	797,8529	---	32,8672
17F8789	27/09/2013 13:00	802,6011	14,317	---	23,4719
17F878D	24/10/2013 12:00	793,4963	806,4619	827,8772	21,1554
17F878E	10/09/2013 12:00	948,2143	1215,6153	---	26,3414
17F8794	02/08/2013 14:00	584,7966	715,8414	---	32,9064
17F8797	27/09/2013 13:00	1133,6012	645,2725	---	23,7639
17F879D	02/08/2013 13:00	1313,9141	635,5544	---	33,2522
17F879E	02/08/2013 14:00	965,8653	762,9346	---	34,5475
17F87A0	24/10/2013 16:00	881,846	246,5882	913,9053	23,5509
17F87A5	02/08/2013 12:00	1021,1592	899,6103	---	31,8371

```

[Systema]
ID = AS_WSN
Versione = 1.0
[Node.17E0874]
ID = 16
Node Type = 356
Network Mode = End Device
[Node.17E0879]
ID = 13
...
[Data]
17E0874 2013-10-14T15:46:51 1 0 27 692.1141 728.3789 -0.9837 21.7700 1 0 0
17E0894 2013-10-14T15:46:51 1 5.6 62 988.3923 1125.3568 0.8357 18.6069 0 0 0
17E08AD 2013-10-14T15:46:51 1 0 51 849.8740 388.5282 -3.0915 20.7575 1 0 0
...

```

Figura 9.39: Estratto del file di testo con evidenziata la parte introduttiva e la parte contenente i dati misurati.

9.3.4 Risultati provvisori del monitoraggio continuo

Nelle figure da 9.40 a 9.55 sono mostrati i grafici delle letture effettuate nel periodo intercorso tra l'installazione di ciascun punto di misura ed il 30 /11/2013. In ciascuna figura sono riportate, oltre al numero di serie relativo al punto, il numero di trasduttori installati ed una descrizione della posizione. Le linee verticali presenti all'interno dei grafici delimitano gli istanti di interruzione o ripresa delle attività di misura, dovuta a locali perdite di alimentazione dei nodi terminali.

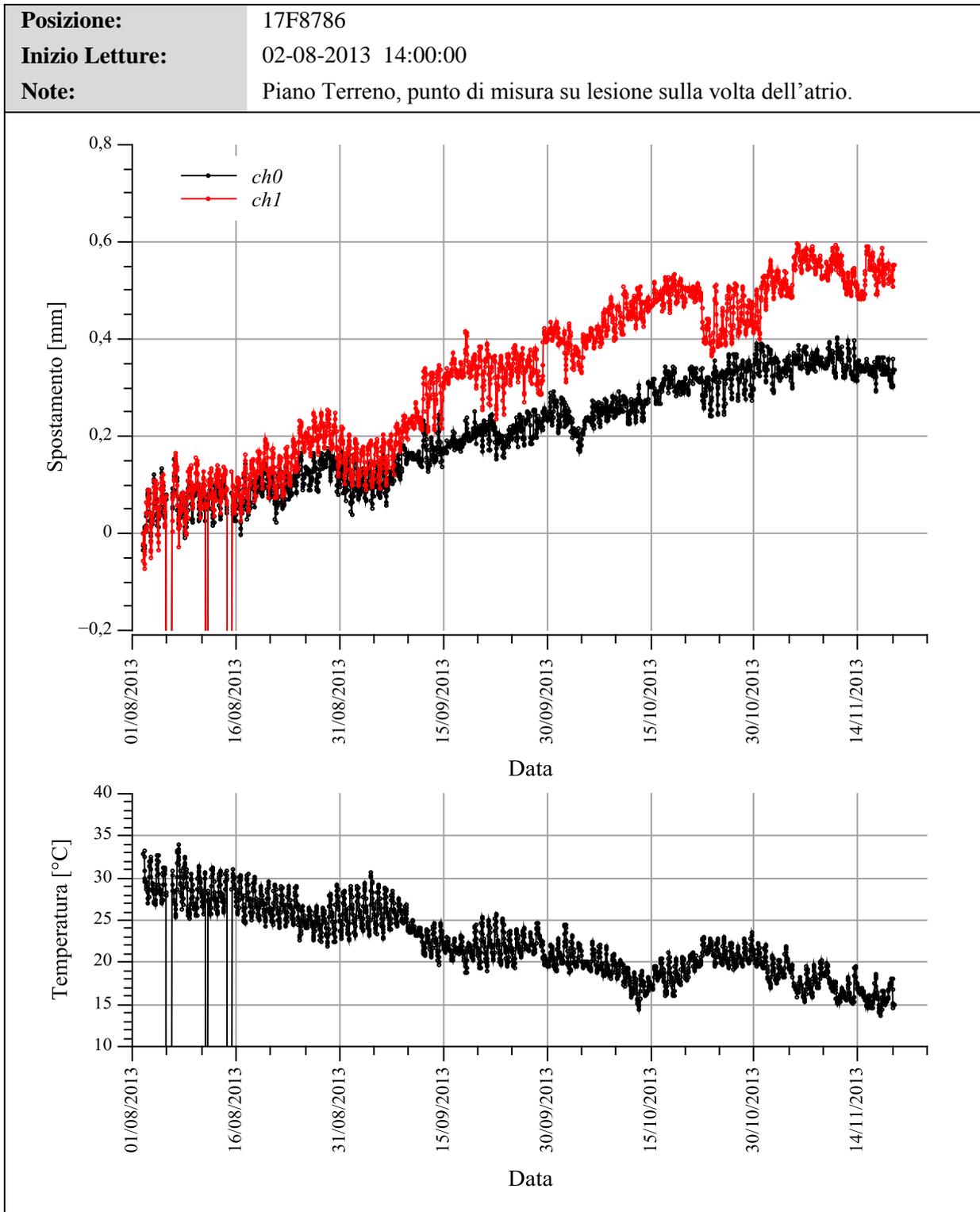


Figura 9.40: Sistema di misura per il monitoraggio continuo del quadro fessurativo – Punto 17F8786

Posizione:

17F87A5

Inizio Letture:

02-08-2013 12:00:00

Note:

Piano Terreno, punto di misura su lesione sulla volta dell'atrio.

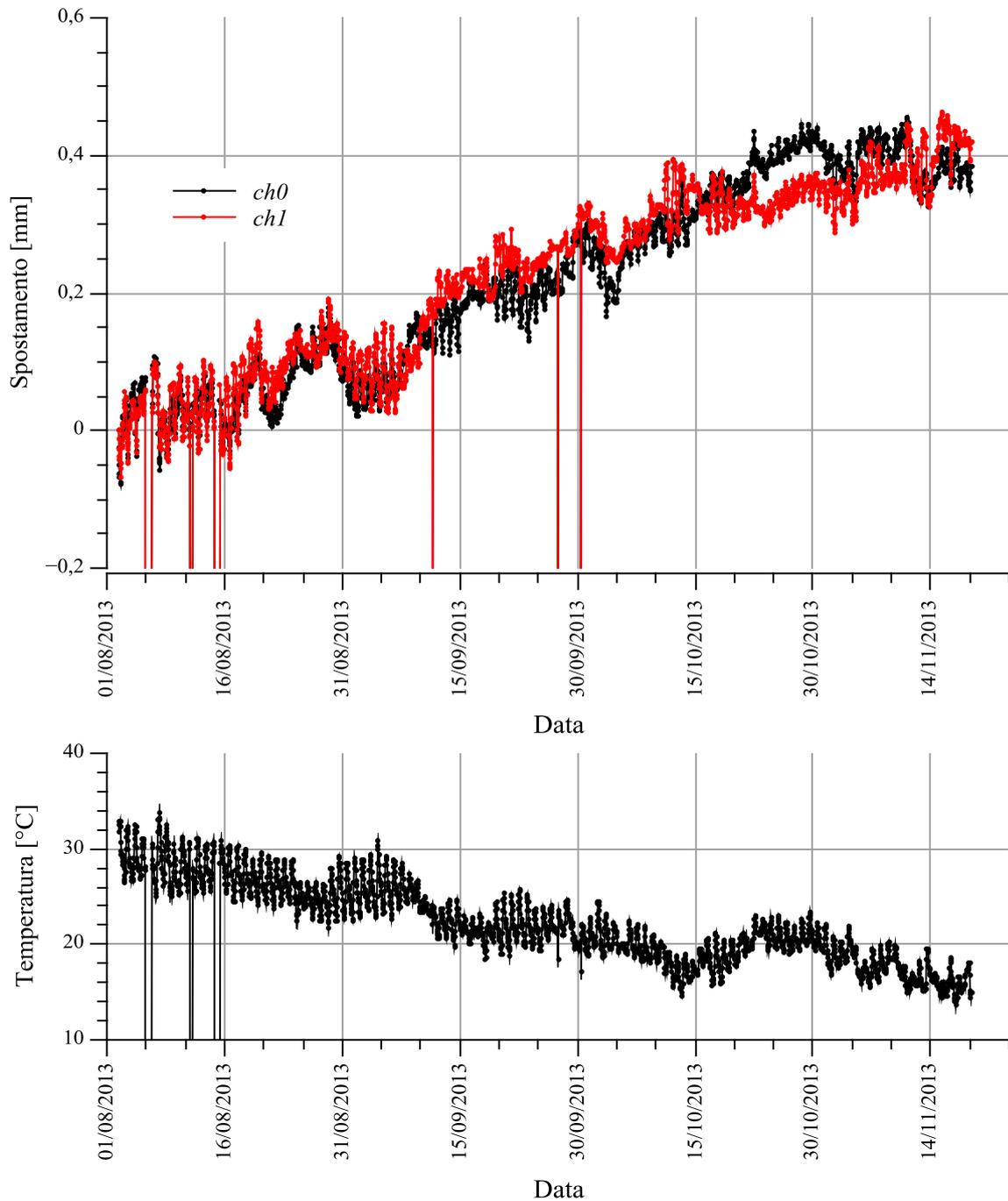


Figura 9.41: Sistema di misura per il monitoraggio continuo del quadro fessurativo – Punto 17F87A5

Posizione:

17F879D

Inizio Letture:

02-08-2013 13:00:00

Note:

Piano Terreno, punto di misura su lesione sulle volte del loggiato.

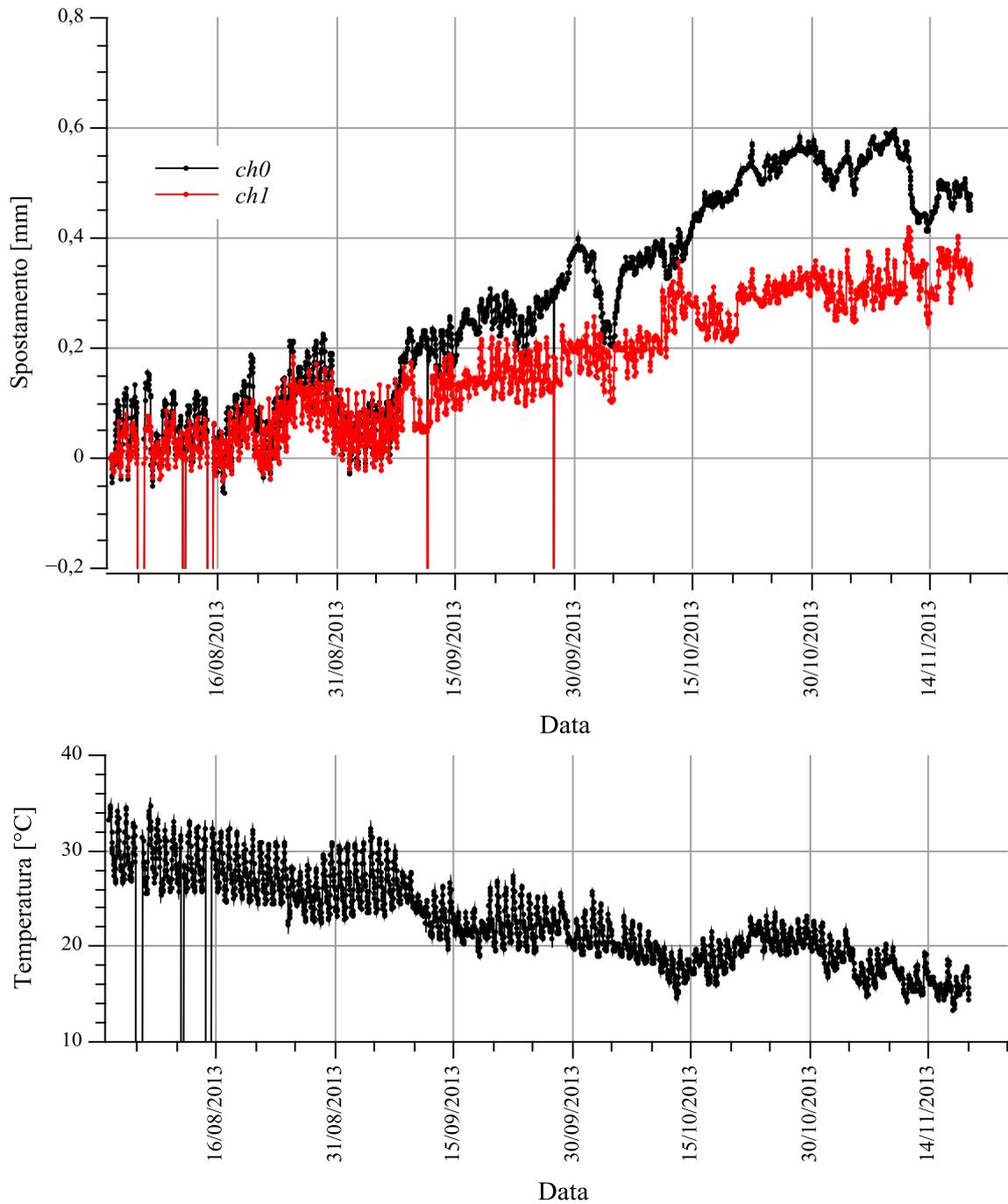


Figura 9.42: Sistema di misura per il monitoraggio continuo del quadro fessurativo – Punto 17F879D

Posizione:

17E0894

Inizio Letture:

02-08-2013 13:00:00

Note:

Piano Terreno, punto di misura su lesione sulle volte del loggiato.

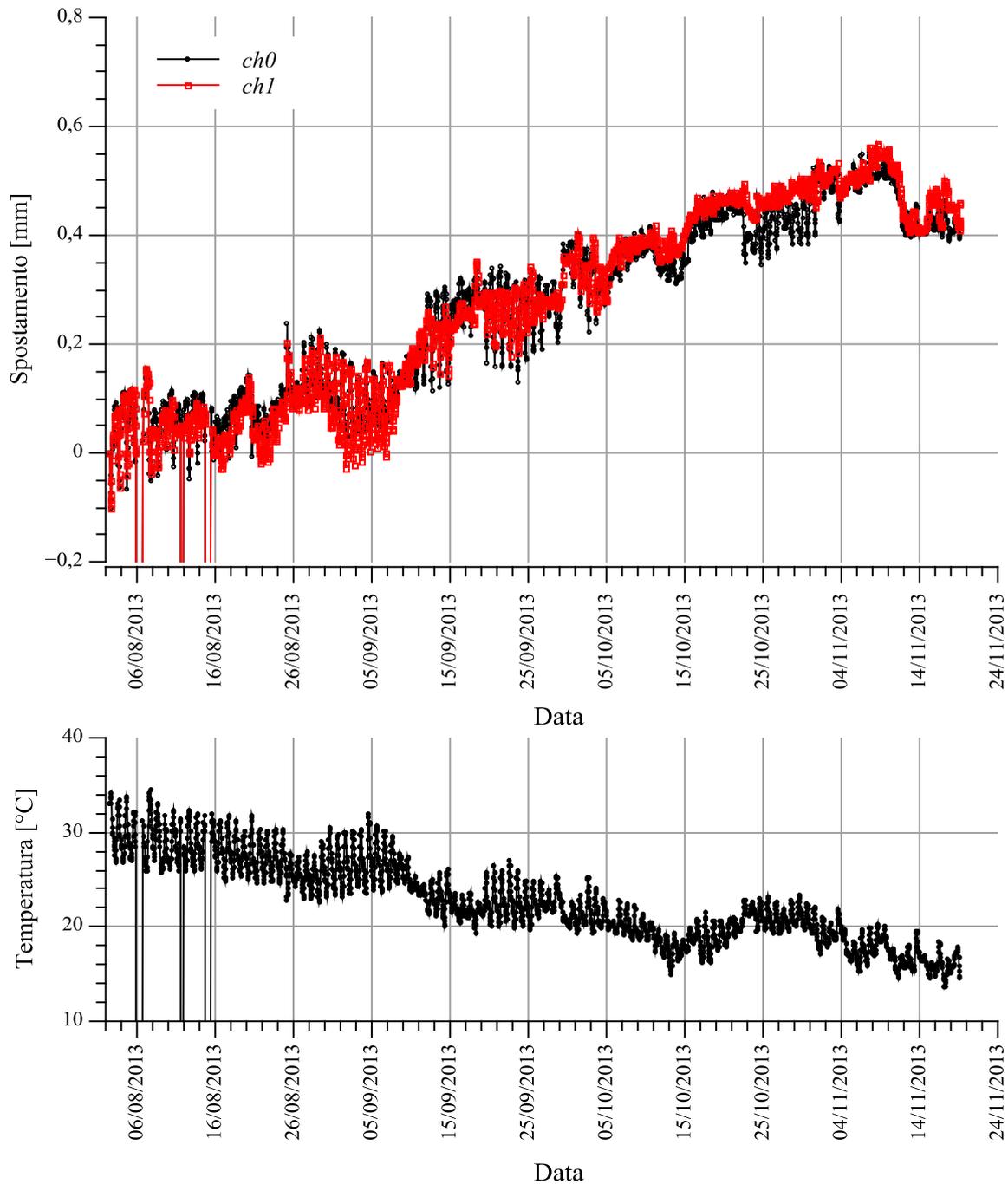


Figura 9.43: Sistema di misura per il monitoraggio continuo del quadro fessurativo – Punto 17E0894

Posizione:

17F879E

Inizio Letture:

02-08-2013 14:00:00

Note:

Piano Terreno, punto di misura su parete verticale verso la corte esterna.

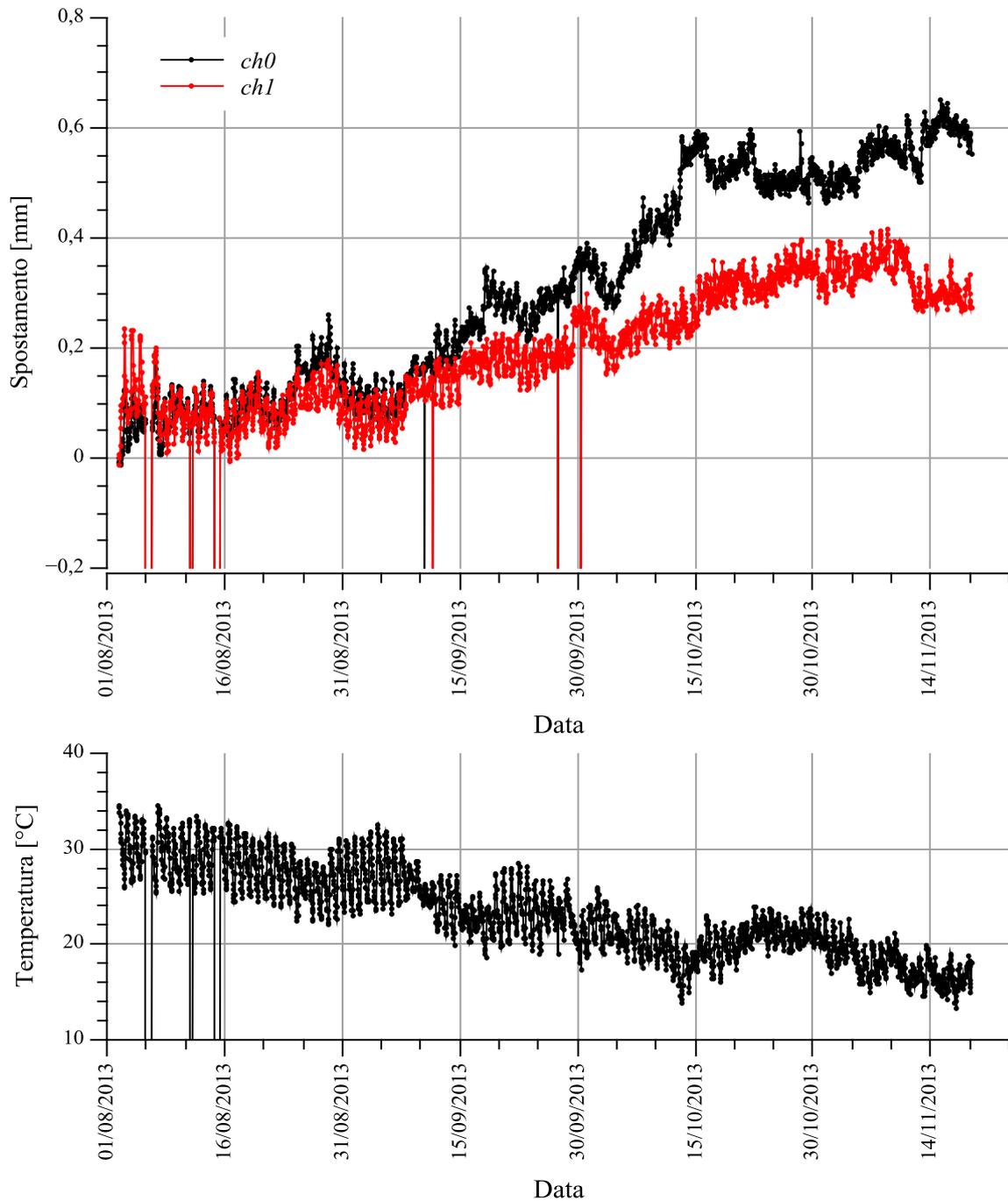


Figura 9.44: Sistema di misura per il monitoraggio continuo del quadro fessurativo – Punto 17F879E

Posizione:	17F878E
Inizio Letture:	10-09-2013 12:00:00
Note:	Piano Terreno, punto di misura all'interno del locale sottostante alla Biblioteca.

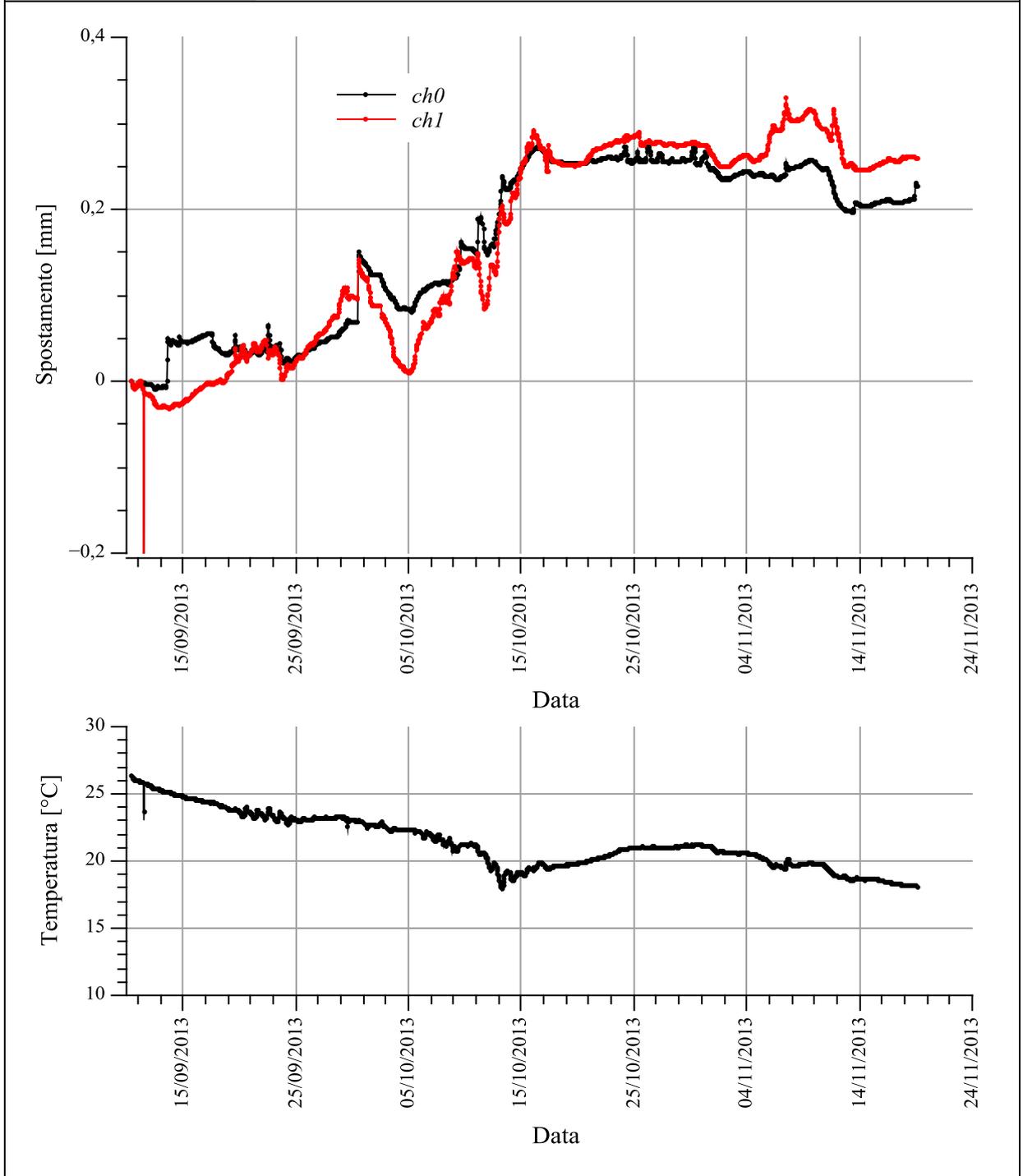


Figura 9.45: Sistema di misura per il monitoraggio continuo del quadro fessurativo – Punto 17F878E

Posizione:	17F8794
Inizio Letture:	02-08-2013 14:00:00
Note:	Piano Terreno, punto di misura sulla volta del loggiato parallelo al Vicolo della Sapienza.

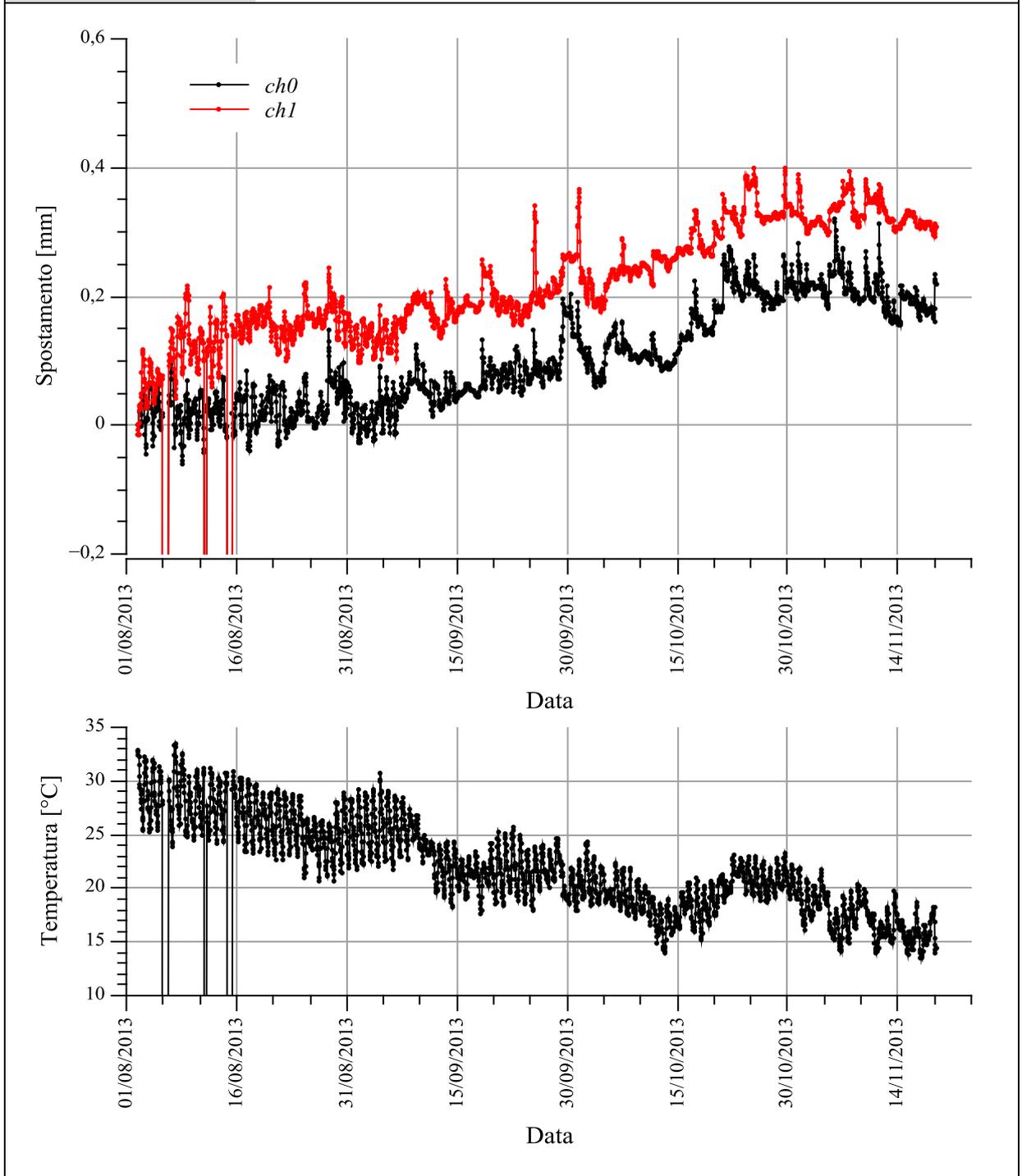


Figura 9.46: Sistema di misura per il monitoraggio continuo del quadro fessurativo – Punto 17F8794

Posizione:	17F8789
Inizio Letture:	27-09-2013 13:00:00
Note:	Piano Terreno, punto di misura nei locali interni adiacenti al Vicolo della Sapienza.

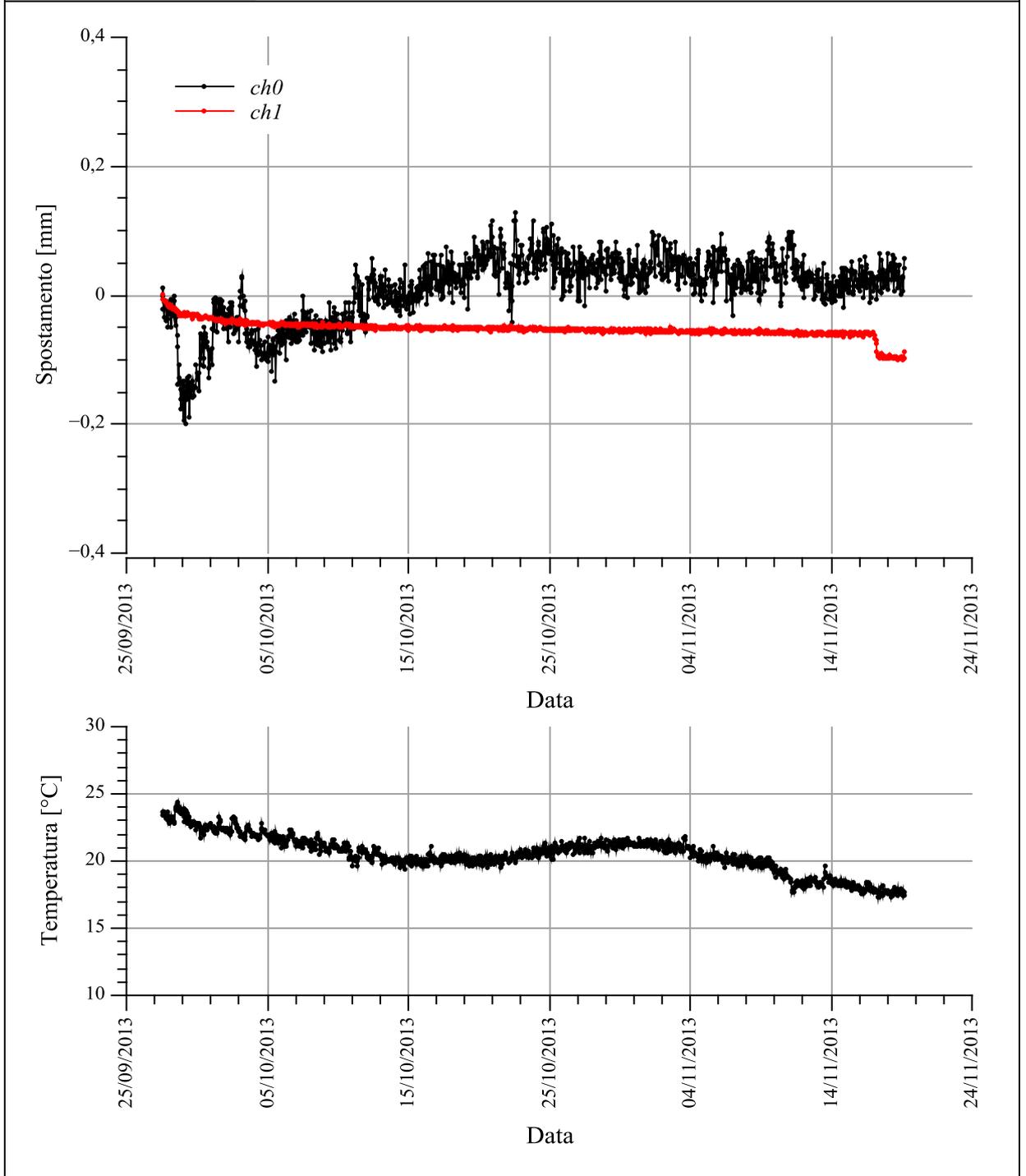


Figura 9.47: Sistema di misura per il monitoraggio continuo del quadro fessurativo – Punto 17F8789

Posizione:	17F8797
Inizio Letture:	27-09-2013 13:00:00
Note:	Piano Terreno, punto di misura nei locali interni vicini all'ingresso di via Curtatone e Montanara.

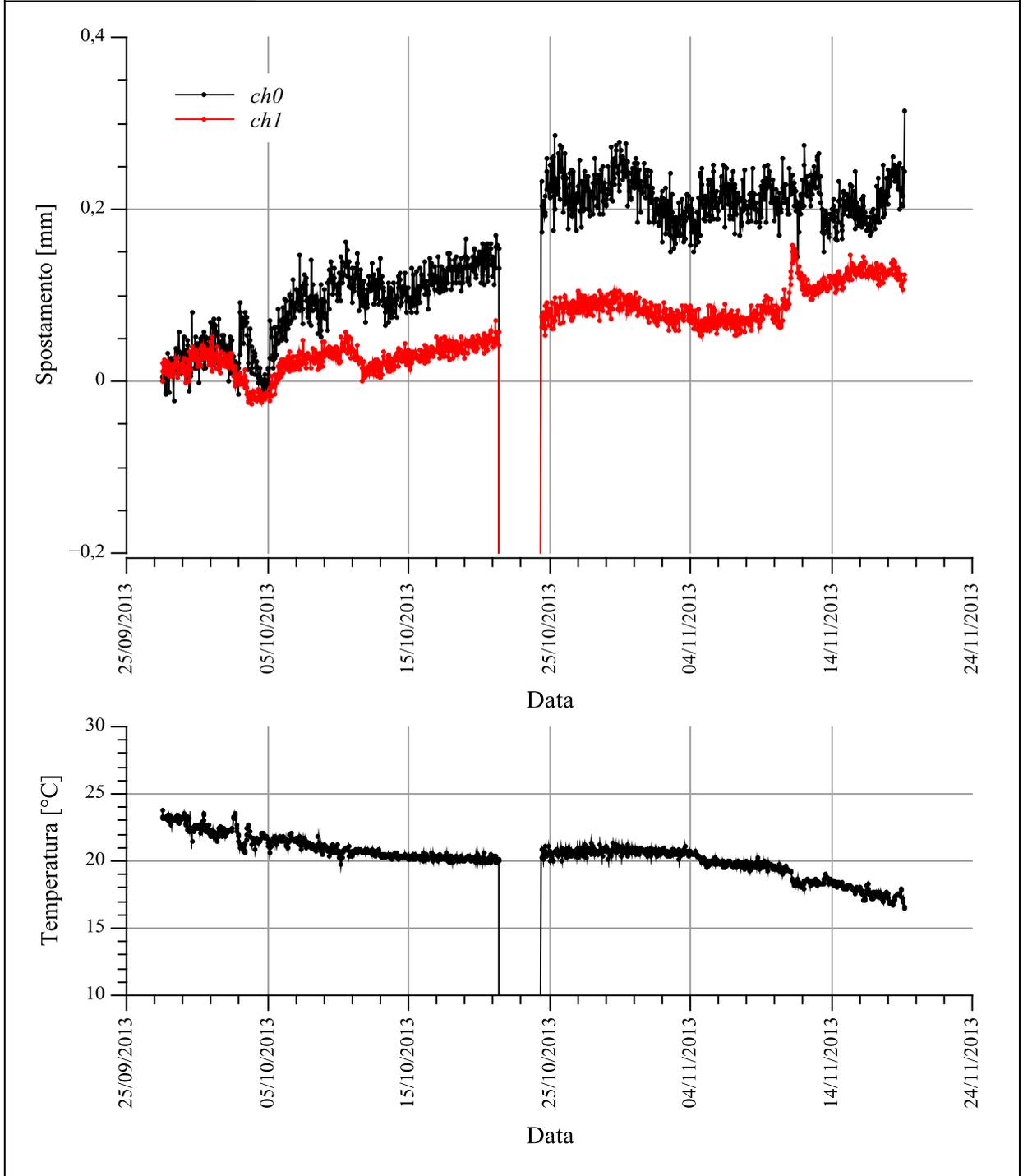


Figura 9.48: Sistema di misura per il monitoraggio continuo del quadro fessurativo – Punto 17F8797

Posizione:	17E08AD
Inizio Letture:	30-09-2013 13:00:00
Note:	Piano Terreno, punto di misura nei locali interni vicini all'ingresso di via Curtatone e Montanara.

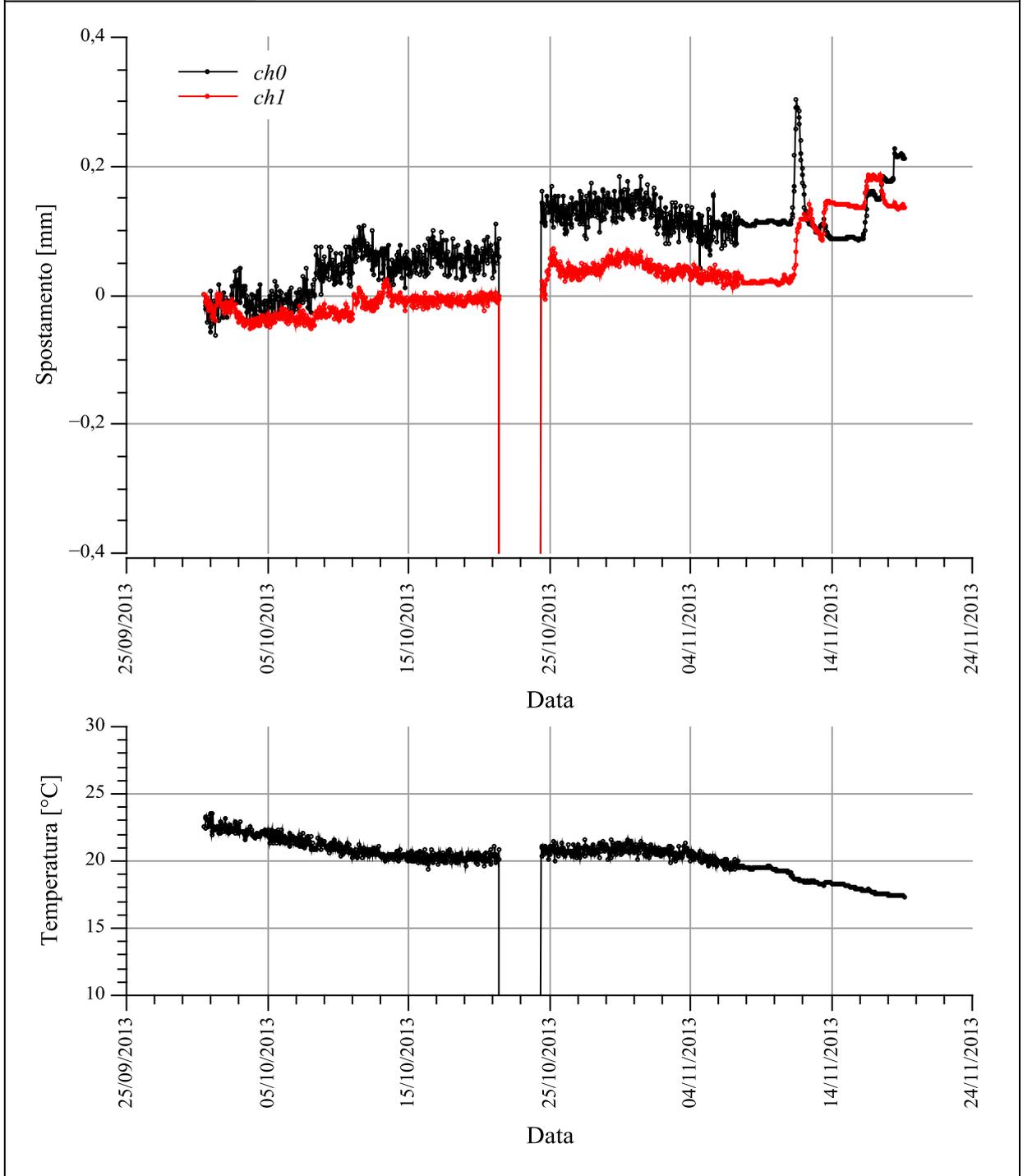


Figura 9.49: Sistema di misura per il monitoraggio continuo del quadro fessurativo – Punto 17E08AD

Posizione:

17E0874

Inizio Letture:

25-10-2013 12:00:00

Note:

Piano Primo, punti di misura in corrispondenza della ex biblioteca del Dipartimento di Diritto Romano.

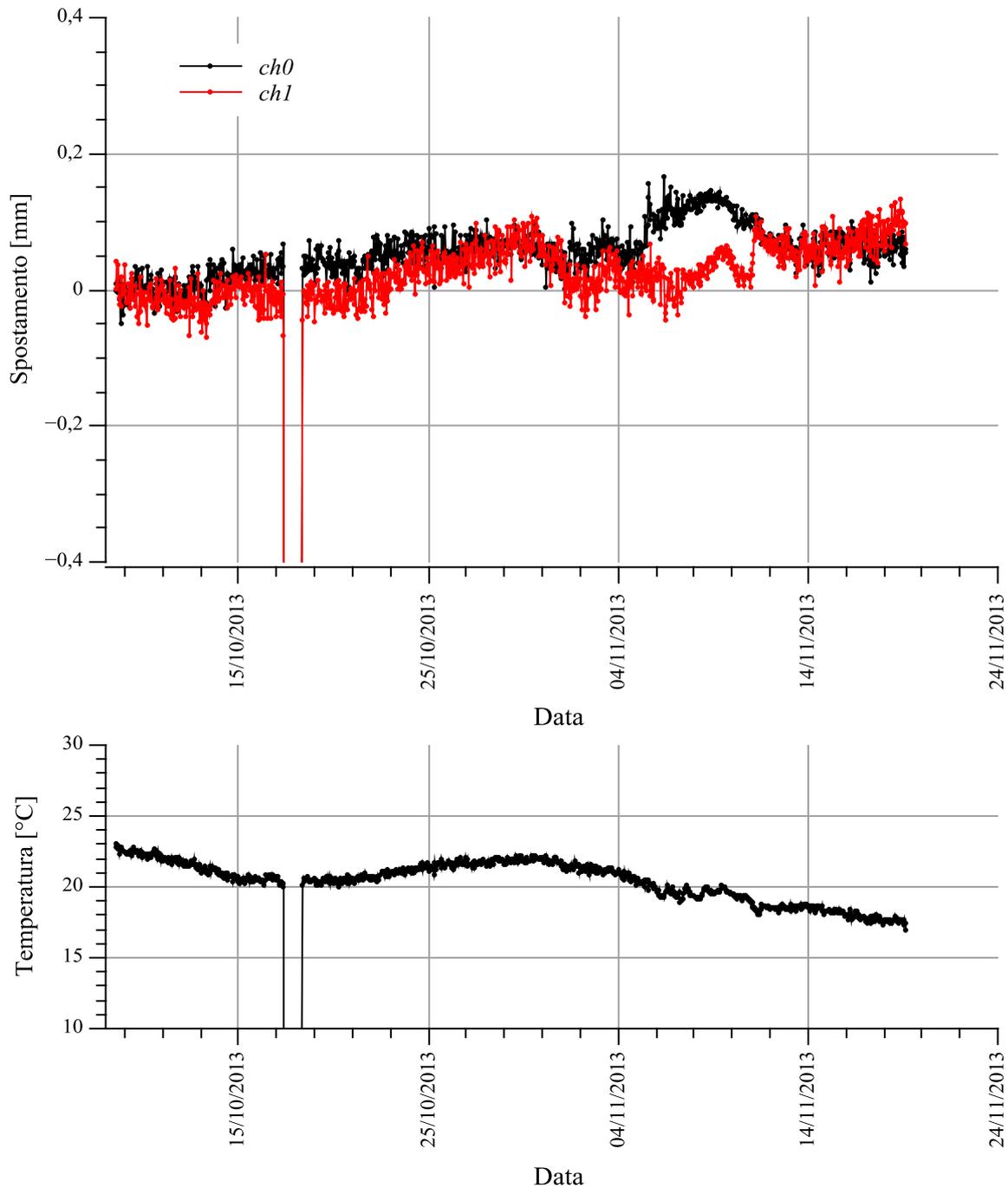


Figura 9.50: Sistema di misura per il monitoraggio continuo del quadro fessurativo – Punto 17E0874

Posizione: 17E0879

Inizio Letture: 25-10-2013 12:00:00

Note: Piano Primo, punti di misura in corrispondenza dell'arco esterno del loggiato.

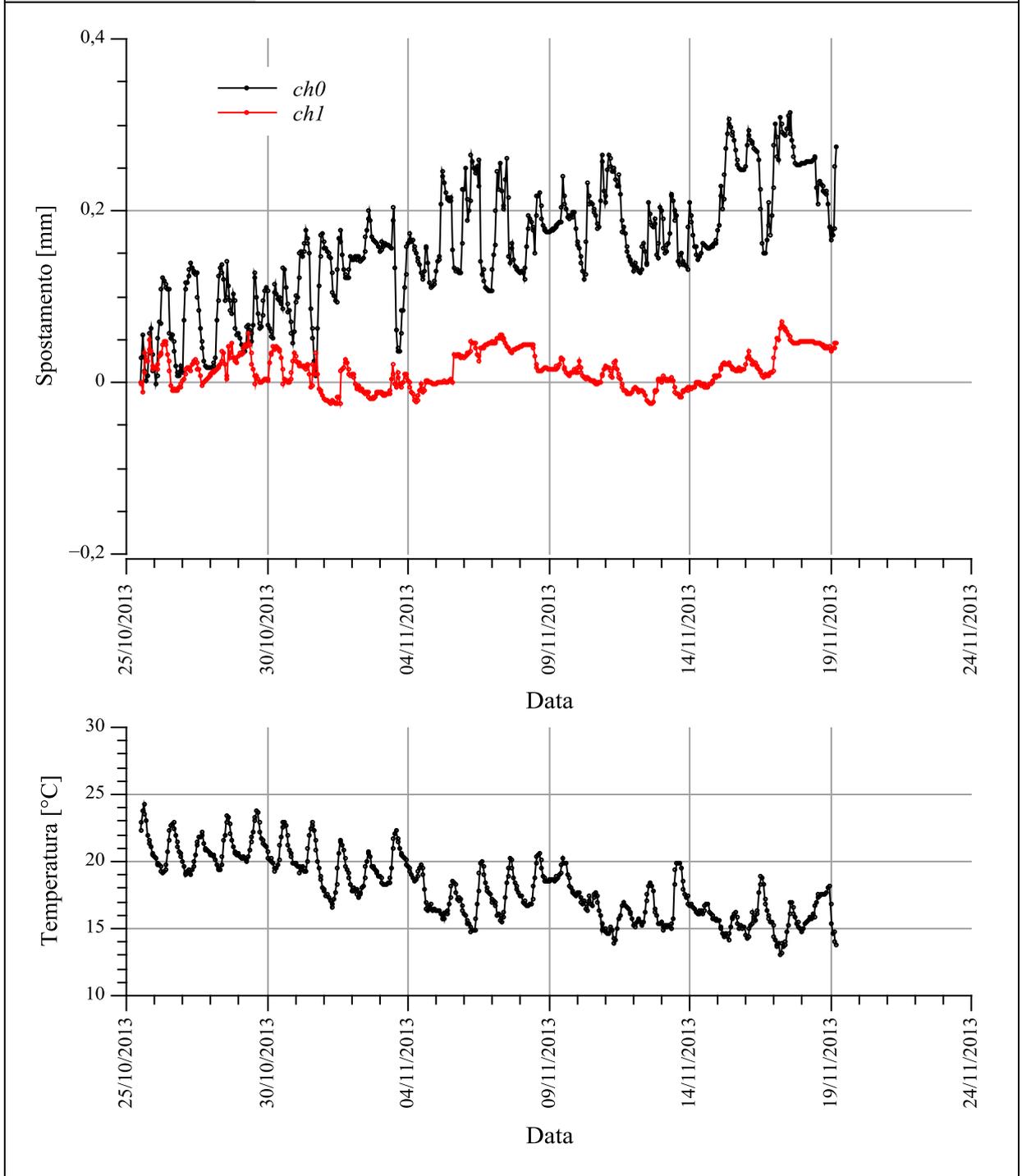


Figura 9.51: Sistema di misura per il monitoraggio continuo del quadro fessurativo – Punto 17E0879

Posizione:

17E0887

Inizio Letture:

18-10-2013 13:00:00

Note:

Piano Primo, punti di misura in corrispondenza dell'arco nel loggiato antistante all'Aula Magna.

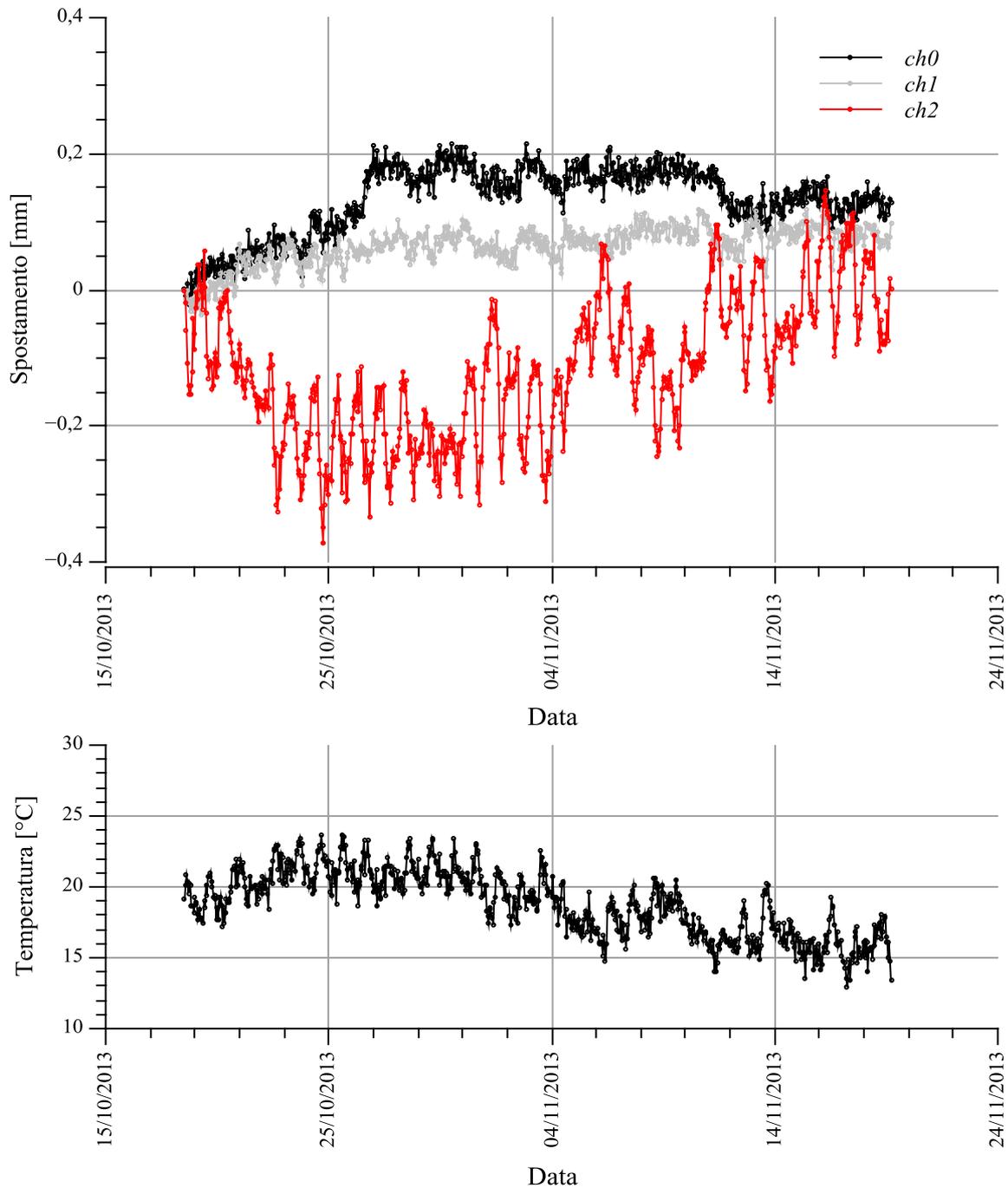


Figura 9.52: Sistema di misura per il monitoraggio continuo del quadro fessurativo – Punto 17E0887

Posizione:

17E08B0

Inizio Letture:

11-10-2013 12:00:00

Note:

Piano Primo, punto di misura in corrispondenza della parete esterna dell'Aula Magna.

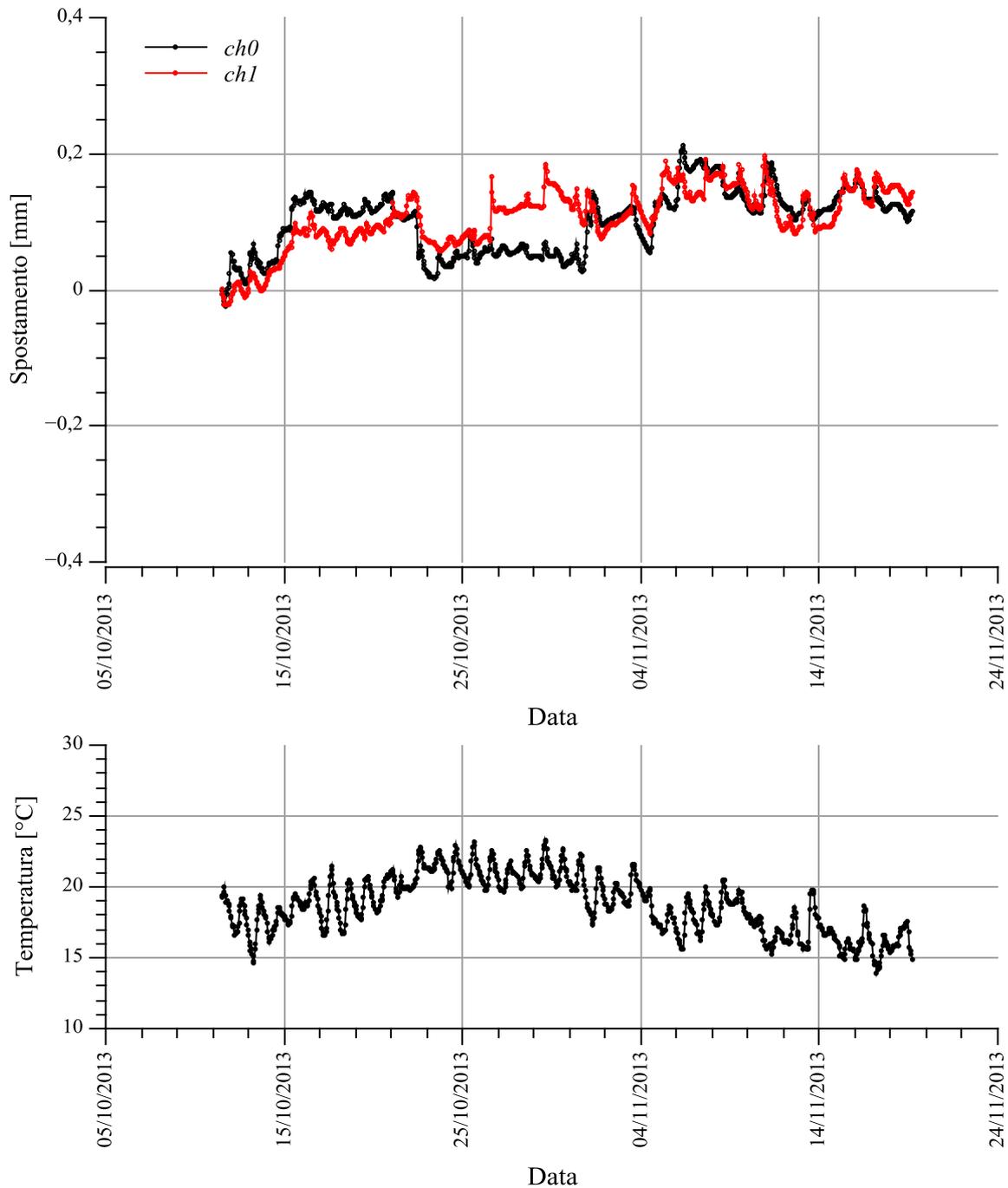


Figura 9.53: Sistema di misura per il monitoraggio continuo del quadro fessurativo – Punto 17E08B0

Posizione:

17F878D

Inizio Letture:

24-10-2013 12:00:00

Note:

Piano Primo, punto di misura in corrispondenza dei travicelli vicini all'Aula Magna.

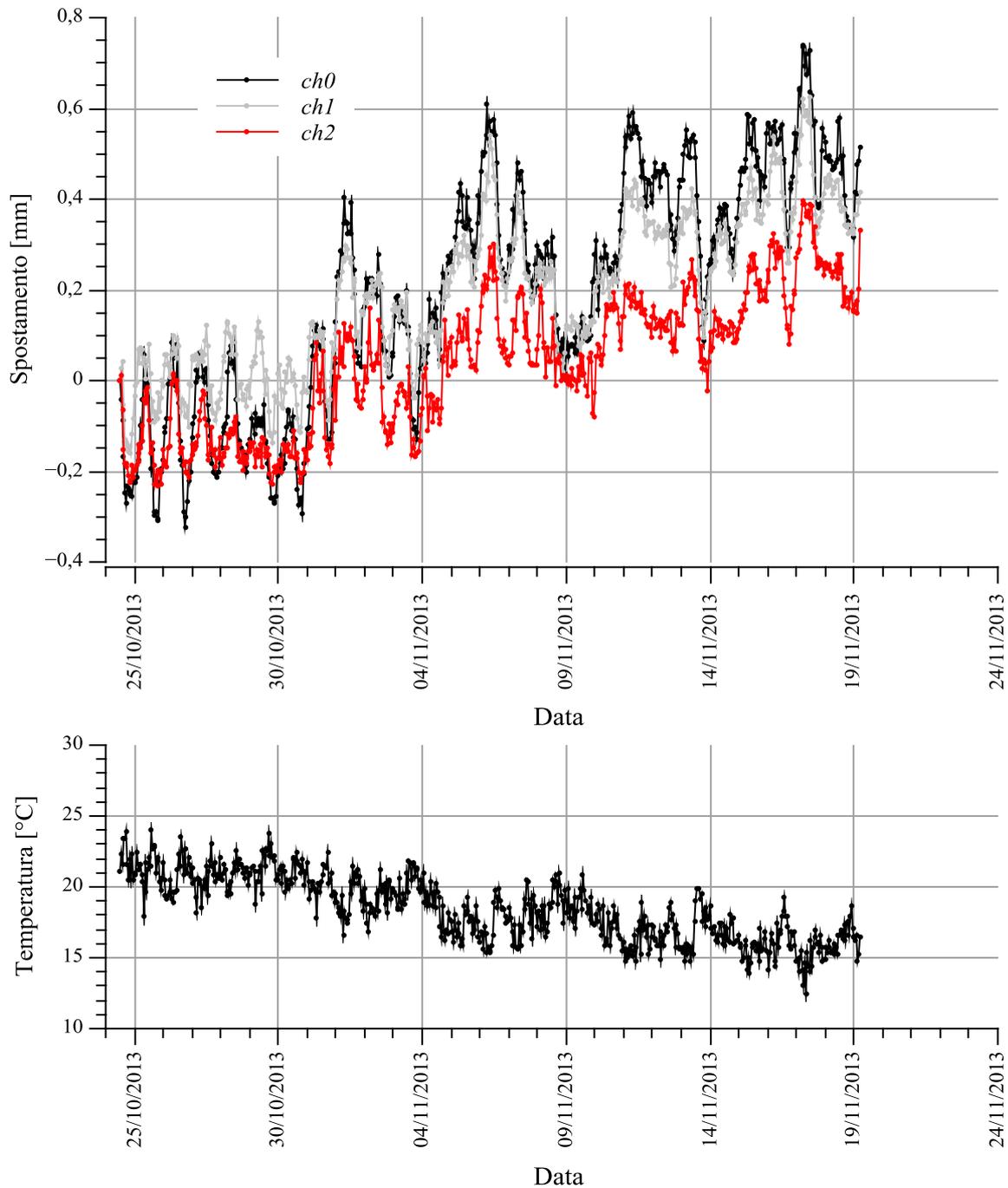


Figura 9.54: Sistema di misura per il monitoraggio continuo del quadro fessurativo – Punto 17F878D

Posizione:

17F87A0

Inizio Letture:

24-10-2013 16:00:00

Note:

Piano Primo, punto di misura in corrispondenza dei travicelli vicini alla Biblioteca.

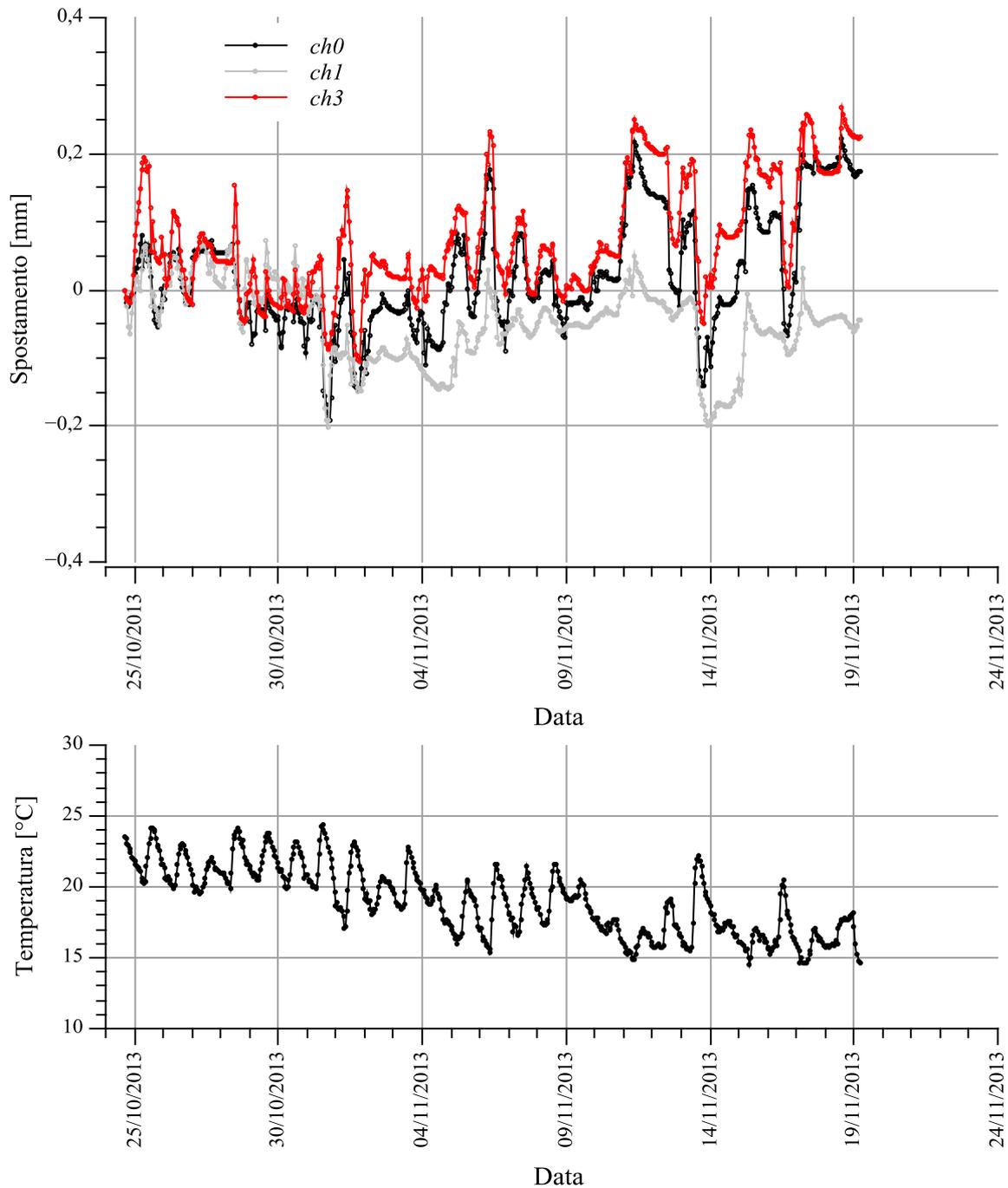


Figura 9.55: Sistema di misura per il monitoraggio continuo del quadro fessurativo – Punto 17F87A0

9.4 Monitoraggio topografico

9.4.1 Introduzione

Si prevede di integrare il sistema di monitoraggio strutturale periodico e continuo con uno di tipo topografico che rilevi nel tempo i movimenti verticali di alcuni punti della struttura.

La metodologia topografica idonea per questo tipo di monitoraggio è la livellazione geometrica di precisione che permette di misurare direttamente la differenza di quota ortometrica (*dislivello*) tra punti caratteristici della struttura (*capisaldi di controllo*) con errore medio pari a circa 0.3 mm/km (errore medio sulla misura del dislivello tra capisaldi posti ad una distanza media di 1 km) e di calcolarne la quota rispetto ad altri punti ritenuti stabili nel tempo (*capisaldi di riferimento*).

L'insieme di tutti i capisaldi forma la rete di controllo o di monitoraggio altimetrico: la sua misura in epoche differenti permette di confrontare i valori di quota che i capisaldi di controllo (riferiti al caposaldo di riferimento) hanno assunto nel tempo e di dedurne i relativi movimenti verticali.

Per questo tipo di indagine è importante che il caposaldo di riferimento rimanga stabile nel tempo e venga materializzato in modo da non subire spostamenti per effetto di perturbazioni locali e superficiali. Per un tale caposaldo devono essere previste, solitamente, delle fondazioni profonde (*caposaldo profondo di riferimento*).

Frequentemente le strutture sono caratterizzate anche da movimenti stagionali e periodici, che coinvolgono nello stesso modo non solo l'intera struttura ma un'area più ampia attorno ad essa.

Per poter isolare movimenti di questo tipo da quelli che eventualmente interessano la sola struttura monitorata, è opportuno realizzare anche un *caposaldo superficiale di riferimento*.

Per inquadrare la rete di monitoraggio in unico sistema di riferimento, si è previsto di rilevare tutti i capisaldi di controllo con stazione totale e di collegarli planoaltimetricamente ai capisaldi di riferimento.

9.4.2 Fasi del monitoraggio topografico

Il monitoraggio topografico prevede le seguenti fasi:

- A. Definizione della strumentazione da utilizzare.
- B. Progettazione e materializzazione della rete di monitoraggio altimetrico.
 1. Definizione della posizione:
 - a. dei capisaldi di monitoraggio sulla struttura;
 - b. del caposaldo profondo da realizzare o nel cortile interno della Sapienza o nell'adiacente Piazza Dante;
 - c. del caposaldo di superficie da predisporre in Piazza Dante.
 2. Definizione dello schema della rete di livellazione e delle stazioni di misura.
 3. Materializzazione dei capisaldi e delle stazioni di misura, e loro monografie.
- C. Esecuzione delle misure di livellazione.
- D. Controllo sulla bontà delle misure effettuate durante la fase di rilievo.
- E. Calcolo finale della rete.

Strumentazione utilizzata

La strumentazione utilizzata per le operazioni di misura dei dislivelli è composta da un livello digitale Leica DNA03 (in allegato 1 sono riportate le caratteristiche), da una coppia di stadie in invar da 2 m con codice a barre, da una coppia di stadie in invar da 60 cm con codice a barre e da una coppia di sostegni telescopici per stadia. Lo strumento è in grado di fornire un errore medio chilometrico pari a 0.3 mm/km.

L'inquadramento piano altimetrico della rete di controllo verrà eseguito con stazione totale Leica TPS1200.

Progettazione e materializzazione della rete di monitoraggio altimetrico

1. Definizione della posizione dei capisaldi di monitoraggio sulla struttura, del “caposaldo profondo di riferimento” e del “caposaldo superficiale di riferimento”

Questo studio preliminare si basa sulla richiesta prodotta dai responsabili delle indagini strutturali e geotecniche di monitorare gli eventuali spostamenti verticali di punti prossimi alla fondazione dell'edificio. Per soddisfare questo requisito, si è previsto di ancorare i punti di monitoraggio in profondità nel paramento murario interno ed esterno nonché in corrispondenza dei colonnati e ad una altezza di alcuni centimetri dal piano di campagna (circa 10 cm).

Il loro numero (50) e la loro posizione planimetrica sono stati stabiliti in base all'ipotesi formulata dai responsabili delle sopraccitate indagini e ad oggi sono entrambi soggetti a possibili variazioni che terranno conto dei risultati finali delle rispettive indagini (figura 9.56).

Per la corretta materializzazione del caposaldo profondo di riferimento ci si è basati sui risultati dell'indagine geologica.

Questa ha messo in evidenza che a 40 m di profondità è presente uno strato di sabbie che non risente delle condizioni del regime idraulico e della subsidenza dell'area.

Il caposaldo profondo di riferimento quindi verrà materializzato sulla testa di un micropalo di diametro 100 mm valvolato tra i 35 m e i 45 m e verrà protetto da un pozzetto con chiusino possibilmente in ghisa.

Per quanto riguarda la sua posizione planimetrica rimangono aperte due ipotesi.

La prima prevede la sua istituzione nel cortile interno della Sapienza. Ciò garantisce la sua protezione nel tempo nei confronti di manomissioni o danneggiamenti ma può causare qualche difficoltà durante la fase di messa in opera.

La seconda ipotizza la sua materializzazione nell'adiacente Piazza Dante. In questo caso l'ampio spazio a disposizione elimina le problematiche connesse alla sua fase di impianto ma richiede una maggiore accortezza per salvaguardarlo intatto nel tempo.

Si rimanda la decisione finale su questo aspetto all'esito dei colloqui con i responsabili dell'Università.

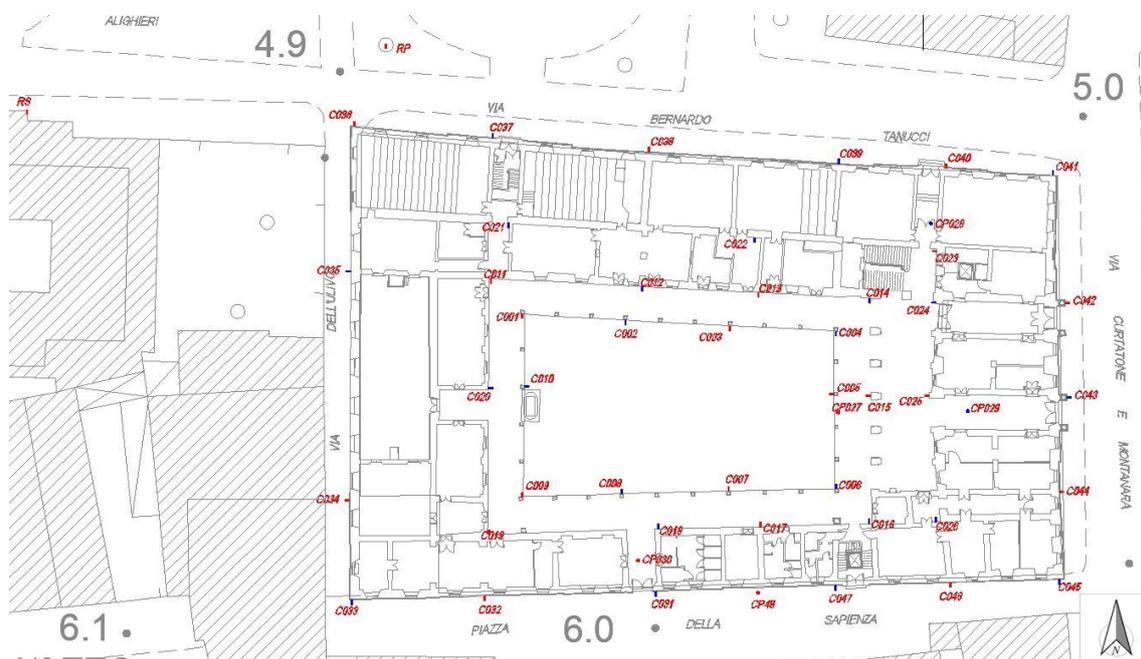


Figura 9.56: Posizione planimetrica dei capisaldi di monitoraggio

Il caposaldo superficiale di riferimento ha lo scopo di mettere in evidenza eventuali movimenti verticali comuni sia all'area su cui sorge il Palazzo della Sapienza sia alle zone immediatamente limitrofe.

Da un sopralluogo eseguito nei mesi scorsi sia all'interno della Sapienza che nelle aree ad essa vicine si è visto che una sua valida collocazione potrebbe essere in prossimità della sede centrale della Cassa di Risparmio di Lucca Pisa e Livorno, posta in piazza Dante 1. Questo edificio è posto nelle immediate vicinanze della Sapienza, è strutturalmente indipendente da questo e non presenta evidenti problemi di

stabilità. Il caposaldo superficiale di riferimento verrà realizzato con un chiodo da livellazione fissato nel suo alloggiamento con resina epossidica

2. *Definizione dello schema della rete di livellazione e della posizione delle stazioni di misura*

La geometria dello schema di rilievo altimetrico è stata progettata collegando i punti di monitoraggio con linee di livellazione geometrica che si chiudono ad anello a formare una rete.

La rete è strutturata in quattro anelli principali di cui tre interni ed uno esterno collegati tra loro e connessi ai riferimenti esterni.

Questo tipo di organizzazione geometrica della rete rende indipendenti le misure dei singoli anelli e risulta vantaggiosa sia durante la fase di pre-elaborazione dei dati rilevati per evidenziare eventuali errori, sia nel caso si renda necessario un monitoraggio parziale della rete.

Gli anelli della rete sono così costituiti (figura 9.57):

- *Anello interno blu*: collega i 10 capisaldi posti sul colonnato interno (C001, C002, C003, C004, C005, C006, C007, C008, C009, C010) con 12 misure di dislivello. L'anello presenta una divisione interna al fine di aumentare la controllabilità statistica delle misure. A questo anello sono connesse le misure di dislivello al caposaldo C021 posto a nord sulla struttura muraria più interna.
- *Anello interno magenta*: collega i 10 capisaldi posti sulla struttura muraria principale interna lato sud, lato ovest e nord e sul colonnato più interno lato est (C011, C012, C013, C014, C015, C016, C017, C018, C019, C020) con 12 misure di dislivello. Anch'esso presenta una suddivisione interna e connette le misure di dislivello al caposaldo C022 posto a nord sulla struttura muraria più interna.
- *Linea di livellazione interna ciano*: collega mediante un caposaldo di passaggio (CP027) i 4 capisaldi posti sulla struttura interna lato est (C023, C024, C025, C026) con i 2 capisaldi (C014 E C016) dell'anello magenta a formare un nuovo anello. Le misure di dislivello sono 6.
- *Anello esterno verde*: collega i 17 capisaldi posti sul paramento murario esterno della struttura (C031, C032, C033, C034, C035, C036, C037, C038, C039, C040, C041, C042, C043, C044, C045, C047) e un caposaldo di passaggio (CP048) con 18 misure di dislivello.

Gli anelli interni ed esterni risultano collegati tra loro mediante le seguenti linee (figura 9.58):

- Collegamento anello blu - anello magenta: viene realizzato misurando 4 dislivelli ($\Delta_{C003 C012}$, $\Delta_{C005 C014}$, $\Delta_{C008 C017}$, $\Delta_{C010 C019}$)
- Collegamento anello blu - anello verde: viene realizzato mediante una linea di livellazione costituita dai capisaldi C005-C023-CP028-C040.
- Collegamento anello magenta - anello ciano - anello verde: viene realizzato mediante 3 linee di livellazione costituite rispettivamente dai seguenti capisaldi C014-C025-CP029-C044, C014-C023-CP028-C040, C017-C018-CP030-C031 e per ognuna di queste vengono misurati 3 dislivelli. Complessivamente vengono misurati 9 dislivelli.
- Collegamento della rete ai capisaldi di riferimento: ipotizzando che il riferimento profondo (RP) sia posto in Piazza Dante nell'aiuola prospiciente l'edificio e il caposaldo superficiale (RS) sia posto lateralmente alla scala di ingresso alla Cassa di Risparmio il collegamento della rete a questi riferimenti avviene mediante l'anello costituito dai capisaldi C038-RP-RS.

La rete risulta costituita da 50 vertici di monitoraggio collegati da 65 misure di dislivello.

La presenza di numerosi elementi architettonici e strutturali e la complessità della distribuzione interna degli spazi che caratterizzano la pianta del piano terra del Palazzo ha reso necessario verificare le modalità operative per la misura dello schema geometrico della rete di livellazione.

Questo tipo di analisi è necessaria per accertare che effettivamente esista l'intervisibilità tra strumento e caposaldo sul quale viene posta la stadia, per ottimizzare la rete in termini di produttività giornaliera durante la fase di misura e programmare l'attività di misura giornaliera.

In base alla posizione dei capisaldi e alla geometria della rete sono state stabilite 33 posizioni per le stazioni di misura (figura 9.59).

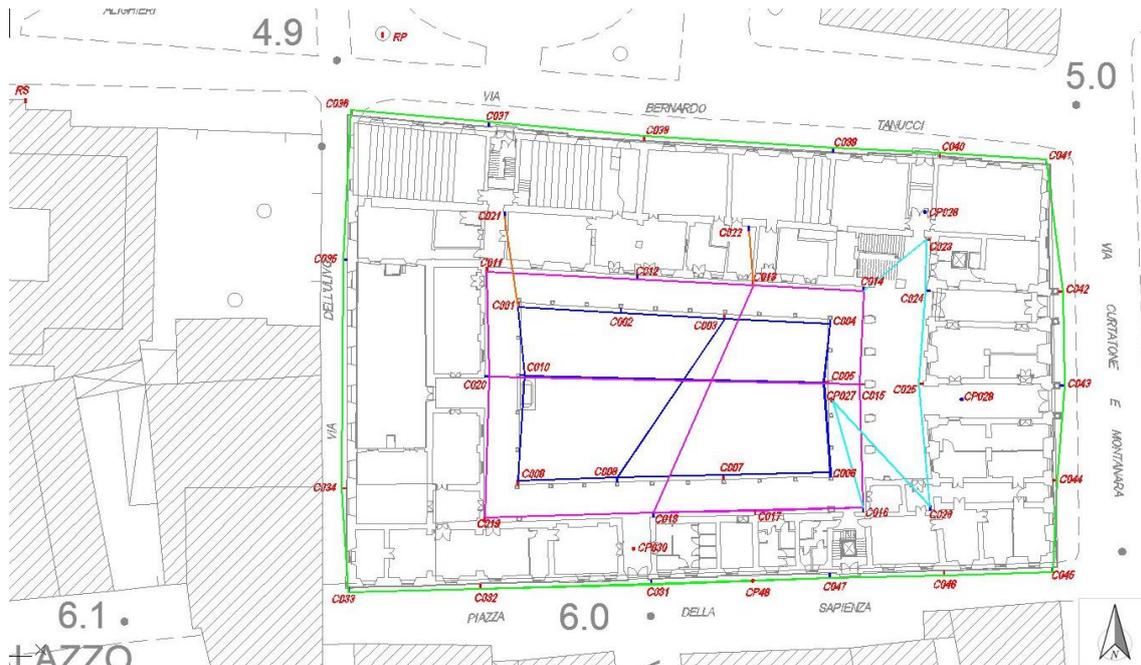


Figura 9.57: Anelli principali della rete di monitoraggio altimetrico

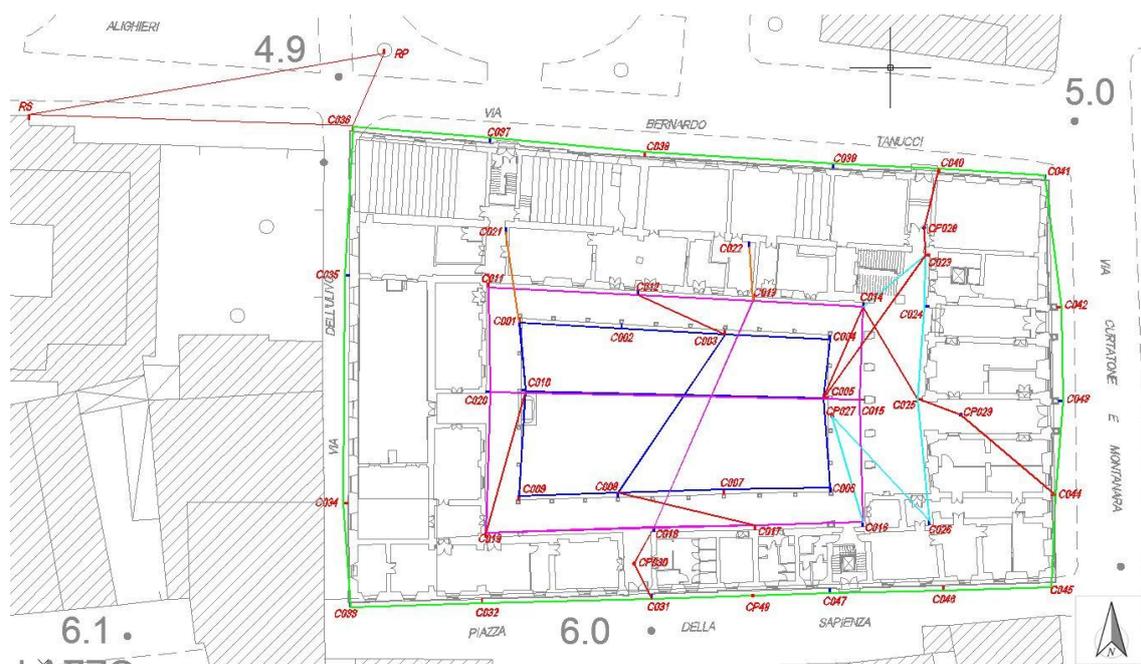


Figura 9.58: Collegamenti tra gli anelli della rete di monitoraggio altimetrico

3. Materializzazione dei capisaldi e delle stazioni di misura, e loro monografie

I capisaldi che materializzano la rete di livellazione saranno costruiti ad hoc in officina utilizzando una barra filettata piena in acciaio di diametro pari a 40 mm e lunghezza pari a circa 35 cm (in modo da raggiungere la parte interna significativa della struttura muraria) nella quale verrà fatto prigioniero un chiodo da livellazione.

Si prevede di poter installare i capisaldi di livellazione realizzando i fori nella struttura muraria con una punta a tazza o a croce di diametro pari a 45 mm e di utilizzare per il fissaggio una resina che garantisca idonee caratteristiche di resistenza anche nel tempo.

Dato il carattere di precisione del monitoraggio i capisaldi dovranno essere protetti da manomissione e danneggiamenti con una protezione rigida adeguata e facilmente rimovibile.

La posizione delle stazioni di misura verrà materializzata contestualmente al posizionamento dei capisaldi per garantire la corretta fase di misura. Di tutti i capisaldi verranno redatte delle monografie.

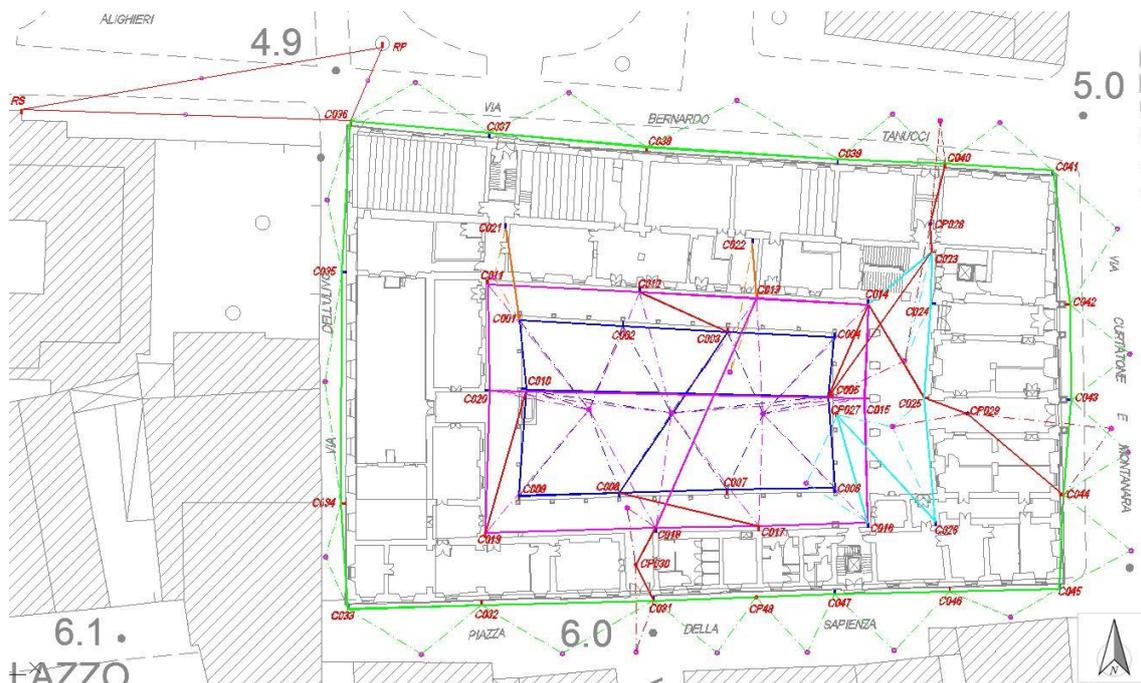


Figura 9.59: Posizione delle stazioni di misura

Esecuzione delle misure di livellazione

Le misure di livellazione geometrica vengono eseguite dal mezzo. La distanza massima tra lo strumento e la stadia non supera i 22 m.

Controllo sulla bontà delle misure effettuate durante la fase di rilievo

Lo schema ad anelli permette di verificare, durante le operazioni di misura, la loro corretta chiusura altimetrica e quindi la correttezza delle misure di dislivello eseguite durante la fase di rilievo.

Per quanto riguarda questo controllo sulle misure di dislivello acquisite si adottano norme tecniche e procedure operative tipiche della livellazione di precisione.

Tenuto conto però del particolare interesse per la conoscenza della stabilità dell'edificio monitorato, si ritiene opportuno ridurre la tolleranza degli scarti di chiusura su ciascuna anello e si farà riferimento a quanto previsto per livellazioni di alta precisione che stabiliscono come tolleranza massima $T_{Max} = \pm 2 \cdot \sqrt{L}$ [mm] dove L è la lunghezza di ogni circuito in km.

Calcolo finale della rete

I dati acquisiti verranno compensati con software specifici (che adottano il metodo rigoroso ai minimi quadrati) per valutare i dislivelli tra i vari capisaldi, le loro quote rispetto al punto di riferimento e le stime delle relative precisioni.

I risultati della compensazione saranno sottoposti a test statistici di verifica per confermarne l'affidabilità.

10. MODELLAZIONE E VERIFICA STRUTTURALE

10.1 Il quadro normativo

a cura di Silvia Caprili

Per la valutazione del comportamento statico e sismico del Palazzo La Sapienza di Pisa si è fatto riferimento alle prescrizioni delle Norme Tecniche per le Costruzioni (D.M.14/01/2008) unitamente a quanto riportato nelle *“Linee guida per la valutazione e la riduzione del rischio sismico del patrimonio culturale con riferimento alle Norme tecniche per le costruzioni di cui al decreto del Ministero delle Infrastrutture e dei trasporti del 14 gennaio 2008”* (2011), per quanto riguarda la trattazione di palazzi storici.

Le attuali Norme Tecniche per le Costruzioni (D.M. 14/01/2008) prevedono un’attenta valutazione del comportamento statico e sismico degli edifici esistenti, costituenti una parte rilevante delle costruzioni presenti sul territorio nazionale e spesso caratterizzati, come nel caso del Palazzo in esame, da una notevole importanza storico-architettonica-artistico-ambientale.

L’approccio adottato per l’analisi di fabbricati esistenti si differenzia da quello comunemente impiegato nel caso di nuove costruzioni prevalentemente a causa del livello di conoscenza che di tali costruzioni si riesce ad ottenere: le Norme Tecniche per le Costruzioni prevedono un approccio di tipo prestazionale caratterizzato da “l’adozione di poche regole di carattere generale ed alcune indicazioni importanti per la correttezza delle diverse fasi di analisi, progettazione, esecuzione”, come esplicitamente riportato nella circolare esplicativa n 617/2009. Sono introdotti i due concetti di “Livello di Conoscenza” (LC) e “Fattore di Confidenza” (FC), rispettivamente legati al grado di accuratezza con cui si conoscono le caratteristiche architettoniche, strutturali e le proprietà meccaniche dei materiali costituiscono il fabbricato e alla cautela con cui si eseguono, di conseguenza, le verifiche di sicurezza. Sono definiti tre diversi livelli di conoscenza (limitata – LC1, estesa – LC2 ed esaustiva – LC3) a cui si associano tre diversi fattori di confidenza (1.35, 1.20 e 1.00) da impiegarsi come fattori riduttivi della capacità dell’elemento in virtù dell’approfondimento raggiunto durante le fasi conoscitive. La fase conoscitiva del fabbricato comprende le attività legate all’analisi storico-critica, al rilievo geometrico e strutturale ed alla caratterizzazione meccanica del materiale, che possono essere eseguite con tre diversi livelli di approfondimento (limitate, estese ed esaustive), in funzione del numero di indagini effettuate e della tipologia (ispezioni visive, prove non distruttive, prove distruttive). La Tabella C8.A.1.1, riassunta in tabella 10.1, riporta schematicamente quanto sopra detto e la definizione del fattore di confidenza da associare al livello di conoscenza raggiunto.

Nel caso in esame del Palazzo La Sapienza di Pisa, data la notevole quantità di indagini eseguite su pareti verticali, solai, volte, copertura, fondazioni e le prove con martinetti piatti effettuate sulle tipologie più frequenti di tessiture murarie individuate, è stato possibile adottare un livello di conoscenza LC2, con conseguente fattore di confidenza $FC=1.20$, da adottare come fattore riduttivo delle resistenze in fase di verifica.

Le Linee Guida del Ministero sopra citate, in conformità con quanto appena presentato dalle Norme Tecniche per le Costruzioni, ribadiscono la necessità di una accurata indagine degli edifici storici in muratura, sottolineando sia l’elevata complessità di fabbricati realizzati non seguendo i criteri classici della meccanica dei materiali e delle strutture bensì per accrescimenti e modifiche successive, sia l’importanza di analizzarne l’effettivo comportamento strutturale e il grado di sicurezza nei confronti delle azioni statiche e dinamiche. In particolare, le Linee Guida individuano tre diversi *“Livelli di valutazione della sicurezza sismica”* (LV), a cui si associa un diverso livello di approfondimento della conoscenza del fabbricato e diverse metodologie di verifica dei fabbricati.

Il livello LV1 prevede valutazioni della sicurezza sismica condotte mediante metodi semplificati, in grado di stimare un indice di sicurezza sismica (I_s) generalmente definito come rapporto tra il periodo di ritorno dell’azione sismica che porta al raggiungimento di un determinato stato limite (i.e. capacità) e il corrispondente periodo di ritorno di riferimento (i.e. domanda), con riferimento alla vita nominale dell’edificio ed al sito su cui sorge la costruzione. Questa tipologia di valutazione su “larga scala” permette l’individuazione di priorità di intervento tra varie costruzioni, necessitando di analisi più approfondite (quali ad esempio LV2 o LV3) per lo studio di interventi di miglioramento o adeguamento.

Il livello LV2 si applica nei casi in cui si prevede l'attuazione di interventi di restauro di singole porzioni del fabbricato: la valutazione della sicurezza sismica può essere eseguita mediante modelli locali di parti strutturalmente autonome del complesso investigato (i.e. macroelementi), dal momento analisi complessive dell'intera costruzione risulterebbero eccessivamente gravose in previsione di interventi che non incidono sostanzialmente sul comportamento globale dell'edificio considerato. Unitamente quindi a valutazioni di livello 2 su porzioni di fabbricato, si possono eseguire valutazioni di livello 1 per la valutazione di massima dell'intero fabbricato. Inoltre, come specificato nelle Linee Guida “nella definizione dei macroelementi e dei meccanismi di collasso che possono interessare la zona oggetto di intervento è necessario considerare l'eventuale presenza di stati di danneggiamento pregressi (specie se di origine sismica) e le conoscenze sul comportamento di strutture simili (desunte dal rilievo sistematico dei danni post-terremoto)”, evidenziando nuovamente l'importanza di una accurata conoscenza del fabbricato.

Il livello LV3 analizza la sicurezza sismica della costruzione in modo globale, individuando il valore dell'accelerazione al suolo per cui si raggiunge lo stato limite ultimo dell'edificio nel suo complesso o di parti significative di esso. L'adozione di queste valutazioni risulta necessario qualora si debbano eseguire interventi che alterano in maniera significativa il funzionamento del fabbricato o la natura strategica del manufatto lo richieda. L'elaborazione di un modello globale non è comunque obbligatoria ed è possibile altresì procedere con la scomposizione della struttura in macroelementi, valutando la ripartizione effettiva dell'azione orizzontale tra i vari sistemi strutturali in relazione alla rigidità ed ai collegamenti ed analizzando, diversamente da quanto avviene in LV2, tutti i macroelementi ed i meccanismi di collasso conseguenti.

Tabella 10.1: Tabella C.8.A.1.1 circolare n°617/2009.

LC	Geometria	Dettagli costruttivi	Proprietà dei materiali	Metodi di analisi	FC
1	Rilievo	verifiche in situ limitate	Indagini in situ limitate Resistenza: valore minimo di Tabella C.8A.2.1. Modulo elastico: valore medio intervallo di Tabella C.8A.2.1.	Tutti	1,35
2	Rilievo muratura, volte, solai, scale. Individuazione carichi gravanti su ogni elemento di parete. Individuazione tipologia fondazioni.	verifiche in situ estese ed esaustive	Indagini in situ estese Resistenza: valore medio di Tabella C.8A.2.1. Modulo elastico: media delle prove o valore medio intervallo di Tabella C.8A.2.1.		1,20
3	Rilievo eventuale quadro fessurativo e deformativo.		Indagini in situ esaustive <i>caso a) disponibili 3 o più valori sperimentali di resistenza</i> Resistenza: media dei risultati delle prove. Modulo elastico: media delle prove o valore medio intervallo di Tabella C.8A.2.1. <i>caso b) disponibili 2 valori sperimentali di resistenza</i> Resistenza: se valore medio sperimentale compreso in intervallo di Tabella C8A.2.1, valore medio dell'intervallo di tabella C8A.2.1; se valore medio sperimentale maggiore di estremo superiore intervallo, quest'ultimo; se valore medio sperimentale inferiore al minimo dell'intervallo, valore medio sperimentale. Modulo elastico: come LC3 - caso a) <i>caso c) disponibile 1 valore sperimentale di resistenza</i> Resistenza: se valore sperimentale compreso in intervallo di Tabella C8A.2.1, oppure superiore, valore medio dell'intervallo; se valore sperimentale inferiore al minimo dell'intervallo, valore sperimentale. Modulo elastico: come LC3 - caso a)		1,00

10.2. Livelli di modellazione e livelli di verifica

a cura di Silvia Caprili

Le indagini eseguite sulle pareti verticali, sui solai, sulle volte, sulla copertura e sulle fondazioni del Palazzo La Sapienza di Pisa hanno permesso l'elaborazione di un modello numerico ad elementi finiti (FEM) della struttura in grado di rappresentare con buona approssimazione l'effettivo comportamento statico del fabbricato e utile, conformemente a quanto riportato sia nelle Norme Tecniche per le Costruzioni (2008) che nelle Linee Guida Ministeriali (2011), per la valutazione dell'efficacia di eventuali interventi di miglioramento statico e sismico.

D'altra parte, la complessità intrinseca dell'edificio, costruito in epoche differenti e frutto di successivi interventi di ampliamento e ristrutturazione, richiede una attenta valutazione del comportamento dinamico e sismico del fabbricato anche mediante lo studio di meccanismi locali di collasso che non possono essere direttamente analizzati mediante un modello numerico, nel quale condizioni quali il mancato ammorsamento

tra pareti ortogonali, la presenza di pareti costituite da paramenti accostati, di intercapedini, di aperture successivamente tamponate non possono necessariamente essere rappresentate.

A tal fine, ad un modello numerico FEM globale del Palazzo della Sapienza impiegato per la valutazione dello stato tensionale delle pareti verticali e per l'esecuzione delle verifiche di sicurezza conformemente a quanto previsto dalle attuali normative (D.M.14/01/2008 "Norme Tecniche per le Costruzioni") è stata affiancata la valutazione dei più probabili meccanismi di collasso, individuati a seguito del rilievo architettonico e strutturale e delle indagini riportate nei capitoli precedenti (ribaltamento delle facciate dovuta all'assenza di adeguati ritegni trasversali, spinta delle strutture voltate data l'assenza di catene o cordoli, ecc...).

Questo approccio risulta d'altronde conforme sia a quanto specificato nella circolare n°617/2009, esplicativa del D.M.14/01/2008 attualmente in vigore, che sottolinea la peculiarità delle costruzioni esistenti in muratura, rispetto a quelle in cemento armato e in acciaio, per le quali "si distingue fra meccanismi di collasso locali e meccanismi d'insieme, stabilendo che la sicurezza della costruzione deve essere valutata nei confronti di entrambi", sia a quanto riportato nelle Linee Guida del Ministero in cui ad una valutazione di livello 2 (LV2) mediante valutazione di macroelementi e meccanismi locali che interessano singole porzioni del fabbricato si affianca una analisi globale dell'edificio secondo quanto previsto da una valutazione di livello 2 (LV3).

Pertanto, riassumendo quanto sopra detto, per la valutazione della sicurezza del Palazzo La Sapienza si è proceduto mediante:

1. Modellazione ed analisi globale sul fabbricato: modello numerico FEM, verifiche di sicurezza nei confronti di azioni statiche e sismiche secondo D.M.14/01/200 (verifiche a pressoflessione nel piano e fuori piano, verifiche a taglio dei pannelli murari);
2. Individuazione, analisi e valutazione dei meccanismi locali di collasso.

10.3. Analisi strutturale globale

a cura di Silvia Caprili e Federico Mangini

10.3.1 Modellazione e analisi della risposta globale statica e sismica

Criteria generali di modellazione

Il modello numerico tridimensionale lineare FEM del Palazzo La Sapienza di Pisa è stato realizzato mediante il software di calcolo SAP2000 v.16 (figura 10.1).

Per la modellazione delle pareti verticali sono stati impiegati elementi bidimensionali tipo "shell" di spessore pari a quello ricavato dal rilievo architettonico e strutturale depurato degli eventuali strati di intonaco e aventi modulo elastico E definito in relazione alle caratteristiche meccaniche delle murature, ricavate dalle indagini sperimentali in situ (rimozione di intonaco e prove con i martinetti piatti doppi) e dalla tabella C.8.A.2.1 della circolare n°617/2009 in funzione della tipologia di muratura. I valori assunti per i moduli elastici e le resistenze adottate per le varie tipologie di muratura sono riportati in tabella 10.2.

Al fine di tenere conto degli eventuali fenomeni di fessurazione, conformemente a quanto riportato nel D.M.14/01/2008, è stato adottato un valore ridotto della rigidezza delle pareti in muratura, pari rispettivamente all'80% ed al 60% della condizione non fessurata al piano terra e ai piani primo e secondo; in questi ultimi infatti, il contributo dello sforzo assiale di compressione dovuto ai carichi permanenti sovrastanti risulta minore, pertanto maggiori si possono considerare gli effetti della fessurazione.

Per quanto riguarda gli orizzontamenti piani in putrelle e blocchi di alleggerimento in laterizio sono stati modellati i soli elementi in acciaio, impiegando elementi monodimensionali tipo "frame" appoggiati alle due estremità, come visibile in figura 10.2.a. A ciascun elemento è stata attribuita la corrispondente sezione rilevata durante le indagini (ad esempio IPN140, IPN160 ecc...) e materiale acciaio caratterizzato da una tensione di snervamento pari a 235 MPa (da prova di trazione) e modulo elastico $E=206000$ MPa.

Per la modellazione delle volte presenti al piano terra (volte a botte, a crociera, con lunette) sono stati impiegati elementi piani equivalenti in rigidezza, come suggerito dalle Linee Guida del Ministero per la categoria "palazzi e ville" e ricavati come specificato in Lagomarsino et al. (2009). Si sono impiegati elementi bidimensionali caratterizzati dalle dimensioni geometriche della volta (in termini di area e spessore) e moduli elastici (E_{eq} , G_{eq}) stimati al fine di riprodurre l'effettivo contributo irrigidente delle volte.

Si noti che il comportamento delle volte a botte è sostanzialmente diverso da quello delle volte a crociera, soprattutto per quanto riguarda la differenza di rigidità nei due piani, significativo nel caso delle volte a botte e trascurabile in quelle a crociera; tale differenza porta alla modellazione degli elementi equivalenti mediante piastre isotrope nel caso di crociere ed ortotrope nel caso di volte a botte.

Analizzando tuttavia la situazione presente nel Palazzo della Sapienza, essendo le volte a botte caratterizzate da lunette di notevole dimensione con conseguente riduzione della rigidità in tale direzione, in via semplificativa per tutte le superfici voltate è stata assunta una modellazione mediante elementi bidimensionali isotropi, con analoga rigidità in entrambe le direzioni principali. In Figura 10.2b è riportato, a titolo di esempio, un estratto della modellazione delle volte del piano terra.

Per quanto riguarda la copertura ed il sottotetto, come visibile dalla Figura 10.1, quest'ultimo è stato direttamente modellato impiegando elementi monodimensionali di adeguate dimensioni, analogamente a quanto effettuato ai piani sottostanti; le capriate costituenti la copertura non sono state inserite nel modello in termini di rigidità ma solamente in termini di massa, applicando i corrispondenti carichi permanenti valutati in sede di rilievo.

Tabella 10.2: Valori di resistenza e moduli elastici adottati per le varie tipologie di tessitura muraria.

Tipologia muratura	Resistenza [MPa]	Modulo Elastico [MPa]	Note
1 Mattoni Pieni	2.25 (*)	1500	* media prove con martinetti piatti
2 Pietra a spacco irregolare	1,40	870	
3 Mattoni pieni e pietre a spacco sbozzate	2.20 (*)	1500	* da prova con martinetti piatti
4 Mattoni pieni e pietre a spacco irregolari	2.20 (*)	1500	* tipologia simile alla (3)
5 Mattoni pieni e pietre squadrate	2.20 (*)	2150	* tipologia simile alla (3)
6 Mattoni pieni e pietre squadrate con ricorsi	2,64	1500	simile alla (3) ma migliorata dai ricorsi

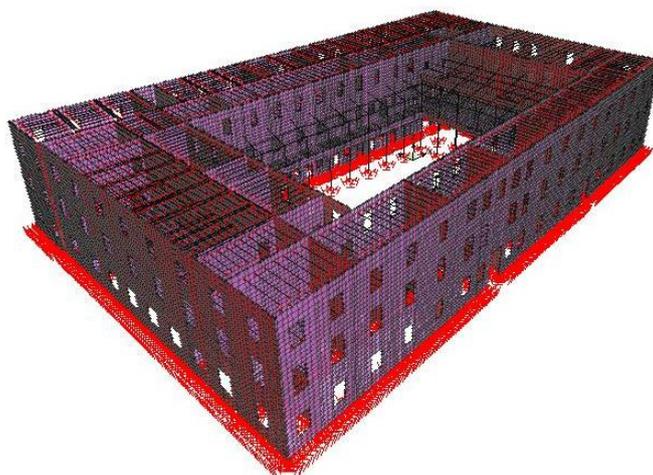


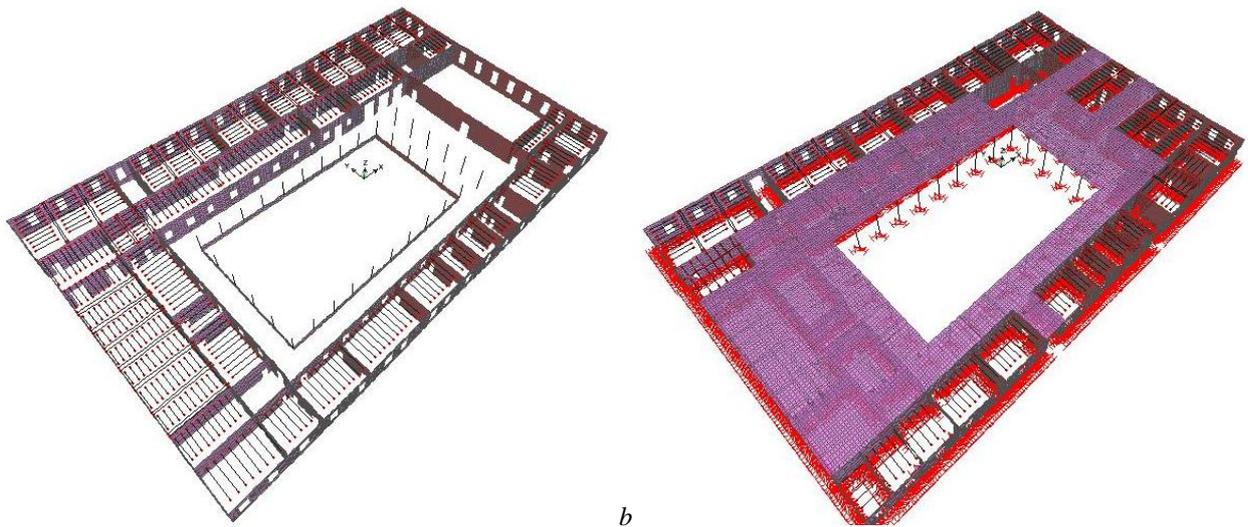
Figura 10.1: Modello numerico FEM del Palazzo della Sapienza di Pisa.

Per quanto riguarda la modellazione del porticato al piano terra e al piano primo, sono stati impiegati anche in questo caso elementi monodimensionali tipo "frame" con sezione circolare diametro 30 cm per le colonne in pietra e sezioni in legno di dimensioni 30x45 cm (travi principali) o 30x30 cm (travi secondarie), come schematicamente rappresentato in figura 10.4.a. Analogamente, elementi monodimensionali sono stati impiegati per la modellazione dei pilastri in muratura presenti in corrispondenza dell'atrio del piano terra.

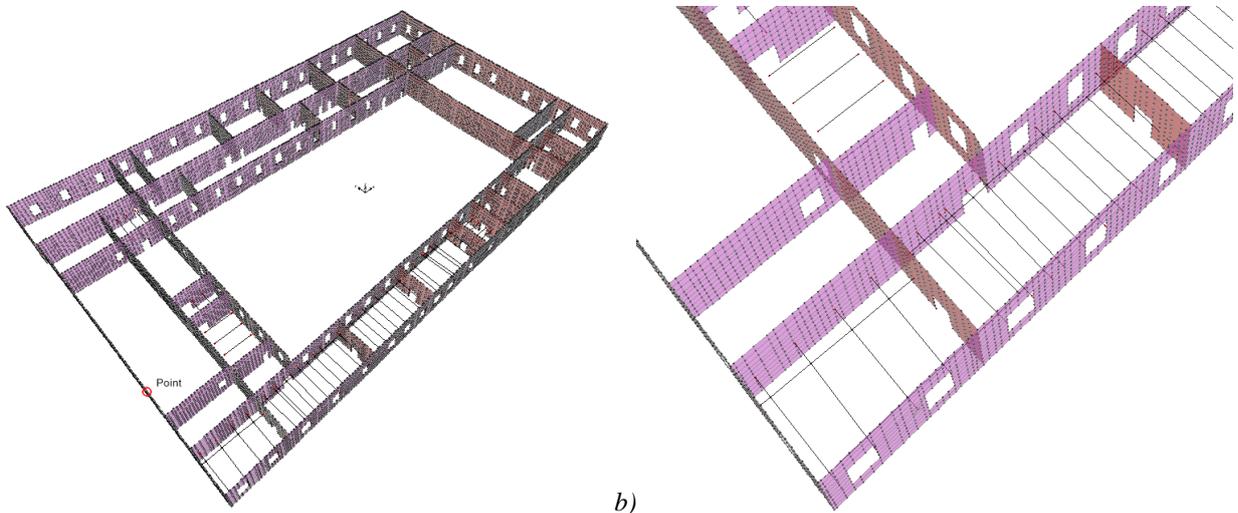
Per quanto riguarda i sopralchi presenti nel fabbricato (sia al piano primo sia al piano secondo in corrispondenza dei locali attualmente occupati dalla Biblioteca Universitaria) è stata effettuata una distinzione tra i sopralchi che si appoggiano direttamente sulle pareti murarie e quelli che invece scaricano sui solai sottostanti. La prima tipologia, presente al secondo piano della Biblioteca Universitaria, è stata inserita all'interno del modello globale del fabbricato mediante elementi monodimensionali tipo "frame"

posti ad un'altezza dal piano di campagna di 13,0 m e di adeguate dimensioni, ricavate in sede di rilievo (Figura 10.3). I soppalchi della seconda tipologia non sono stati modellati in termini di rigidità e sono stati invece applicati, in corrispondenza degli orizzontamenti su cui gravano, i carichi permanenti opportunamente valutati.

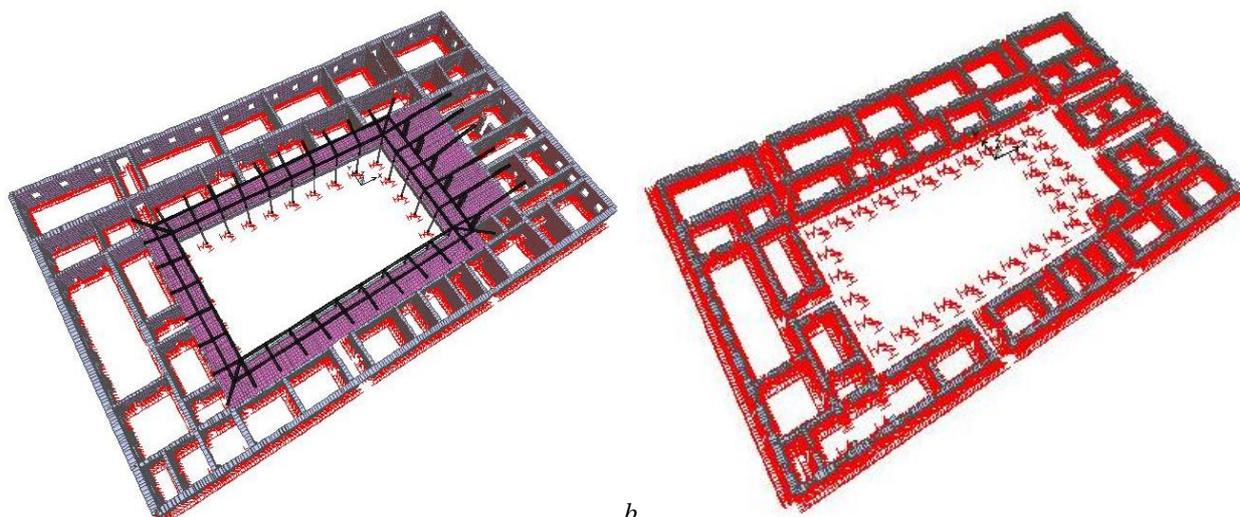
La modellazione dell'interazione terreno-struttura è stata effettuata sulla base dei risultati delle indagini geotecniche condotte in situ; in particolare, è stata eseguita una modellazione elastica del suolo alla Winkler mediante molle disposte nelle tre direzioni e di adeguata rigidità (figura 10.4.b), considerando la rigidità in direzione orizzontale cautelativamente pari ad un quarto di quella calcolata in direzione verticale mediante opportuna stima dei cedimenti.



a) *Figura 10.2: a) Esempio di modellazione degli elementi in acciaio dei solai tra piano primo e piano secondo, b) esempio di modellazione delle volte tra piano terra e piano primo.*



a) *Figura 10.3: Esempio di modellazione dei soppalchi del piano secondo lato Biblioteca Universitaria (quota 13.0 m).*



a)

b)

Figura 10.4: Modellazione del porticato con elementi monodimensionali per colonne e travi ed elementi bidimensionali per le volte a crociera, b) schema del posizionamento delle molle per la modellazione dell'interazione terreno-struttura.

Come da indagini eseguite, la larghezza della fondazione è stata direttamente valutata in corrispondenza di 7 diverse posizioni, coincidenti con i punti in cui si sono eseguite le indagini. La rigidezza da applicare alle molle è stata stimata considerando pertanto l'effettiva larghezza dell'impronta della fondazione ed un interasse di circa 50 cm. Sono stati individuati 5 diversi valori di rigidezza necessari per modellazione l'interazione terreno struttura, uno da applicare in corrispondenza del colonnato del portico, uno da applicare in corrispondenza dei pilastri in muratura del piano terra, uno (tipo 2) da applicare in corrispondenza della porzione est del fabbricato lato Via Curtatone e Montanara fatta eccezione la zona d'angolo con Piazza Dante, uno (tipo 3) da applicare in corrispondenza del lato rivolto verso Piazza Dante fatta eccezione la zona d'angolo con Via dell'Ulivo ed una (tipo 1), la più diffusa, in tutto il resto del fabbricato. Lo schema del posizionamento delle varie molle è riportato in figura 10.5.

I valori applicati sono riportati in tabella 10.3, in cui K indica la rigidezza in kPa/m, i l'interasse a cui sono posizionate le molle nel caso di fondazione continua, B è la larghezza dell'impronta di fondazione media, A è l'area della fondazione nel caso di colonne e pilastri e k è la rigidezza delle molle in direzione verticale.



Figura 10.5: Schematizzazione tipologia di fondazione e applicazione al modello.

Tabella 10.3: Valori delle rigidzze delle molle di interazione terreno-struttura.

Tipologia fondazione	K [kPa/m]	i [m]	B [m]	A [m ²]	k [N/mm]
Fond. COLONNATO	32560			1,21	39397,6
Fond. PILASTRI	25300			1,8	45540
Fond. Tipo 1	4500	0,5	1,6		3600
Fond. Tipo 2	3200	0,5	2,4		3840
Fond. Tipo 3	7600	0,5	0,9		3420

A conclusione di quanto sin qui presentato, è necessario sottolineare che il modello numerico realizzato, per quanto rappresentativo delle effettive dimensioni e tipologia degli elementi resistenti (pareti in muratura, volte, solai, fondazione) e delle proprietà meccaniche del materiale, non è ovviamente in grado di riprodurre le reali condizioni del fabbricato per quanto riguarda il grado di ammorsamento tra pareti ortogonali, la continuità tra pareti adiacenti con diverse tessiture murarie, la presenza di aperture ed archi successivamente tamponati e le numerose intercapedini rilevate tra i diversi paramenti di un elemento murario. Pertanto, il modello FEM così realizzato può considerarsi rappresentativo di una condizione “migliorata” del fabbricato, in cui è stato opportunamente ricreato il corretto grado di connessione tra pareti ortogonali, la perfetta continuità tra pareti adiacenti e la solidarizzazione tra i diversi paramenti che costituiscono una stessa parete.

Valutazione delle azioni agenti sulla struttura e combinazioni

Per quanto riguarda le azioni impiegate per l’effettuazione delle verifiche, esse sono state valutate conformemente alle prescrizioni riportate nel D.M. 14/01/2008; in tabella 10.4 sono riassunti i valori medi più comuni dei carichi applicati espressi in kN/m². Si precisa che l’analisi è stata eseguita considerando i carichi attualmente effettivamente gravanti sulla struttura (inclusi gli effettivi carichi legati ai libri presenti nei locali della Biblioteca Universitaria) e un carico accidentale previsto non superiore ai 3,00 kN/mq (conformemente alla destinazione di categoria B2/C1 dalla attuale normativa), salvo negli spazi comuni (corridoi e porticato) in cui è previsto cautelativamente un maggiore affollamento ed un carico pertanto pari a 4,00 kN/mq. Il peso dei libri, laddove valutato con esattezza (locali Biblioteca Universitaria), è stato considerato un carico permanente portato.

Tabella 10.4: Carichi permanenti e accidentali impiegati per la valutazione della sicurezza statica e sismica.

Permanenti copertura	Note		
Q _{Travicelli}	0,065	[kN/mq]	Passo 0,30
Q _{Mezzane}	0,450	[kN/mq]	Spessore 2,5 cm
Q _{imper.}	0,100	[kN/mq]	
Q _{manto cop}	0,800	[kN/mq]	
Q _{TOT (G1+G2)}	1,415	[kN/mq]	
Permanenti solai piani			
Q _{medio}	3,100	[kN/mq]	Da valutare caso per caso
Q _{libri}	-	[kN/mq]	Valutati locale per locale
Permanenti orizzontamenti voltati			
Q _{medio}	9÷15	[kN/mq]	Da valutare caso per caso
Q _{libri}	-	[kN/mq]	Valutati locale per locale
Accidentali (copertura)			
Q _{neve}	0,480	[kN/mq]	Angolo della falda 20°
Q _{acc.ispezione}	0,500	[kN/mq]	
Accidentali (piani intermedi)			
Q _{esercizio}	3,000	[kN/mq]	Locali cat. B2/C1
Q _{esercizio}	4,00	[kN/mq]	Spazi comuni

In figura 10.6 è riportato lo spettro di risposta dell'azione sismica impiegato per l'analisi dinamica modale e valutato in funzione del sito su cui sorge la costruzione ($T_R=712$ anni, vita nominale V_N della costruzione pari a 50 anni e coefficiente d'uso $C_u=1.50$, da cui vita di riferimento $V_R=75$ anni). Il valore del fattore di struttura da impiegare è stato cautelativamente calcolato conformemente a quanto specificato nella circolare applicativa n 617/2009 come $q=1.50 \cdot \frac{\alpha_u}{\alpha_1}$, in cui il rapporto $\frac{\alpha_u}{\alpha_1}$ in assenza di valutazioni specifiche è

assunto pari a 1.50, con un risultante fattore di struttura pari a 2.25. Si ricorda a tale proposito che il valore 2.25 risulta cautelativo rispetto a quanto riportato all'interno delle Linee Guida del Ministero, in cui è specificato che "il fattore di struttura che, a meno di più accurate valutazioni, può essere assunto, in analogia a quanto fatto per gli edifici, pari a 3.6, nel caso di strutture regolari in elevazione, o ridotto fino a 2.8, in presenza di bruschi cambiamenti di rigidezza lungo l'altezza o di strutture adiacenti a contatto".

La combinazione delle azioni finalizzata alla individuazione dei valori delle sollecitazioni da impiegare in fase di verifica è stata effettuata conformemente a quanto riportato in normativa, sia per quanto riguarda gli stati limite ultimi (SLU - combinazione fondamentale per carico gravitazionale) sia per quanto riguarda le combinazioni sismiche (SLV - combinazione sismica per stato limite di salvaguardia della vita).

Le combinazioni di carico considerate per l'effettuazione delle verifiche di sicurezza sono pertanto le seguenti:

- Combinazione a SLU per carichi verticali (eqn. 2.5.1 D.M.14/01/2008):

$$\gamma_{G1} \cdot G_1 + \gamma_{G2} \cdot G_2 + \gamma_P \cdot P + \gamma_{Q1} \cdot Q_{k1} + \gamma_{Q2} \cdot \psi_{02} \cdot Q_{k2} + \gamma_{Q3} \cdot \psi_{03} \cdot Q_{k3} + \dots$$

- Combinazione a SLV per azioni sismiche (eqn. 2.5.5 D.M.14/01/2008):

$$E + G_1 + G_2 + P + \psi_{21} \cdot Q_{k1} + \psi_{22} \cdot Q_{k2} + \dots$$

In cui i valori dei coefficienti γ_i , ψ_i sono definiti dalla tabella 2.5.I delle Norme Tecniche per le Costruzioni (D.M. 14/01/2008).

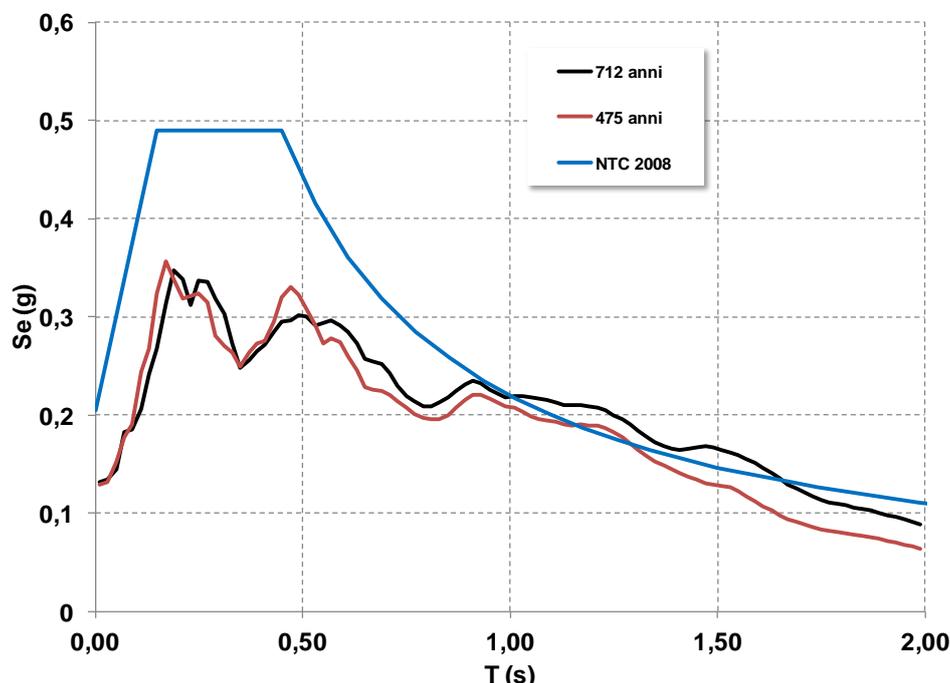


Figura 10.6: Spettro di risposta elastico per il sito in esame e confronto con lo spettro di norma per suolo C.

Analisi Strutturale

È stata eseguita una analisi dinamica lineare con spettro di risposta, conformemente a quanto previsto dalle attuali Norme Tecniche per le Costruzioni. A tal fine, gli effetti dell'azione sismica sono stati valutati tenendo conto delle masse associate ai carichi gravitazionali (permanentemente e di esercizio), in cui i valori dei coefficienti ψ_{2j} sono riportati in tabella 2.5.I (D.M. 14/01/2008):

$$G_1 + G_2 + \sum_j \psi_{2j} \cdot Q_{kj}$$

Nella valutazione delle masse sopra riportate, il carico effettivo dovuto ai libri attualmente presenti all'interno della Biblioteca Universitaria, accuratamente stimato come presentato nel Capitolo 6, è stato considerato un peso permanente portato (G_2). I risultati dell'analisi modale sono sinteticamente riportati in tabella 10.5, mentre nelle Figure 10.7-10.8 sono riportate le forme modali associate ai modi significativi. Si ricorda per precisione che sono stati considerati tutti i modi aventi massa partecipante superiore al 5% e tali da garantire il raggiungimento di una massa partecipante in ciascuna direzione considerata superiore all'85% della massa totale. I modi significativi individuati sono stati combinati impiegando la combinazione quadratica completa (CQC) conformemente a quanto riportato in normativa.

Tabella 10.5: Periodi e masse modali partecipanti (M_x , M_y) di alcuni dei modi significativi.

Modo	Periodo	M_x	M_y	M_{xtot}	M_{ytot}
-	Sec	[%]	[%]	[%]	[%]
5	0,951885	0%	60%	0%	60%
6	0,864892	59%	1%	59%	61%
9	0,807917	3%	18%	64%	79%
15	0,695563	20%	1%	88%	81%
17	0,662635	1%	11%	88%	92%
23	0,550406	4%	0%	95%	93%
25	0,543141	2%	0%	97%	93%

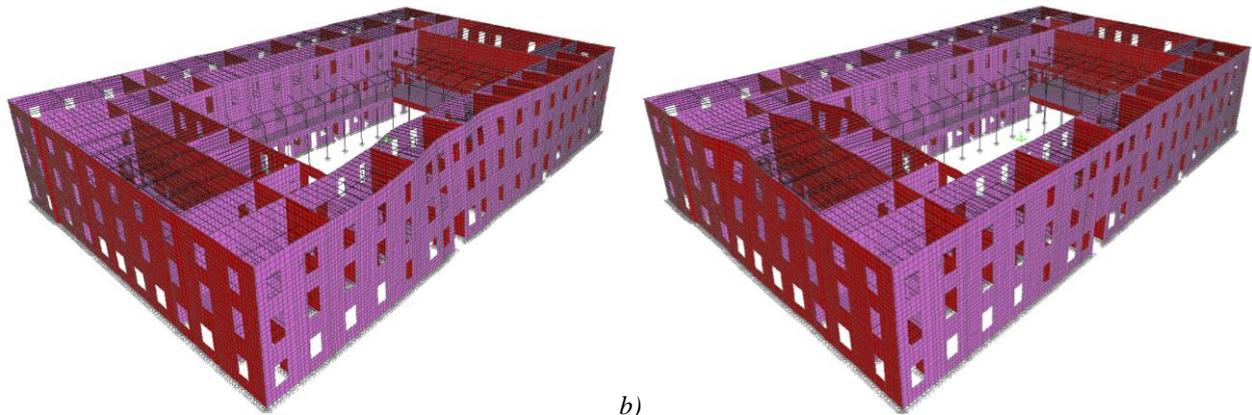


Figura 10.7: a) forma modale n°5 (flessionale Y), b) forma modale n°6 (flessionale X).

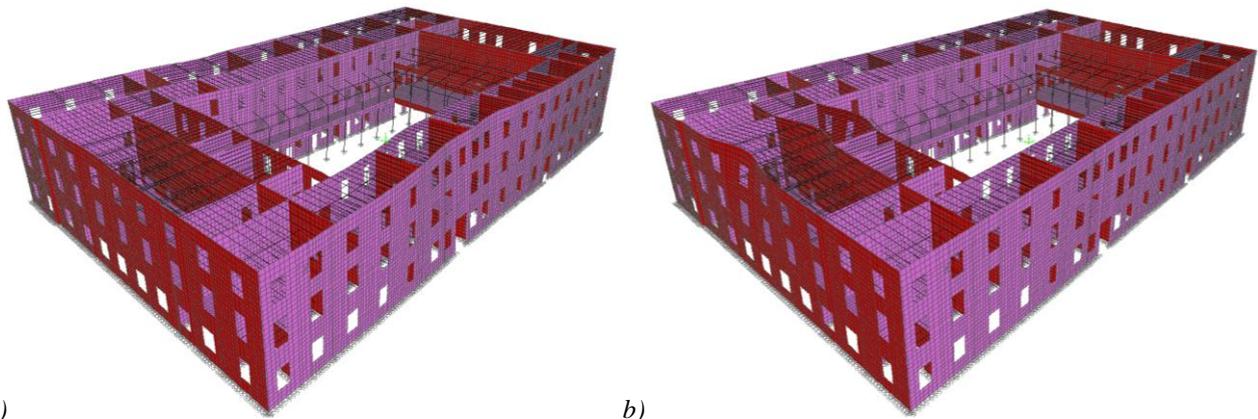


Figura 10.8: a) forma modale n°9 (flessionale Y), b) forma modale n°15 (flessionale X).

10.3.2 Verifiche di sicurezza

Criteria generali di verifica

Conformemente a quanto riportato nelle Norme Tecniche per le Costruzioni (§8.3) "La valutazione della sicurezza e la progettazione degli interventi sulle costruzioni esistenti potranno essere eseguiti con riferimento ai soli SLU... Le Verifiche agli SLU possono essere eseguite rispetto alla condizione di salvaguardia della vita umana (SLV) o, in alternativa, alla condizione di collasso (SLC)"; inoltre, nella Circolare n°617/2009 (§C8.7) è precisato che "che nel caso di combinazione di carico che includa l'azione sismica, ai fini della determinazione dell'entità massima delle azioni sismiche sopportabili dalla struttura, si considereranno i carichi permanenti effettivamente riscontrati, e quelli variabili previsti dalla norma... In particolare si assume che il soddisfacimento della verifica allo Stato limite di salvaguardia della vita implichi anche il soddisfacimento della verifica dello Stato limite di collasso".

Al fine dell'esecuzione delle verifiche di sicurezza, sono state individuate le pareti resistenti nelle due direzioni principali ortogonali da sottoporre a verifica ai vari piani del fabbricato; a ciascuna di esse si sono attribuiti i corrispondenti valori di resistenza a compressione e taglio in relazione alla tipologia di tessitura muraria individuata mediante le operazioni di rilievo strutturale.

Nel caso di analisi dinamica lineare con spettro di progetto, le verifiche devono essere eseguite in termini di resistenza per tutti gli elementi strutturali confrontando il valore della sollecitazione derivante dall'analisi con il corrispondente valore di resistenza. I valori di calcolo delle resistenze del materiale sono ottenuti dividendo i valori medi (ricavati dalle prove o dalla tabella C.8A.2.1) per i rispettivi fattori di confidenza e per il coefficiente parziale di sicurezza dei materiali, assunto pari a 2 ($\gamma_M=2.0$).

In relazione a quanto riportato in normativa, gli stati limite ultimi da verificare sono i seguenti:

- Taglio per azioni nel piano della parete.
- Presso flessione nel piano della parete.
- Presso flessione per carichi laterali (resistenza e stabilità fuori dal piano).

Verifica a taglio

Per gli edifici esistenti in muratura, conformemente a quanto specificato nella Circolare n°617/2009 la resistenza a taglio di calcolo per azioni nel piano di un pannello in muratura si può valutare adottando un criterio di rottura per fessurazione diagonale o un criterio di scorrimento. Le formule adottate per il calcolo del valore ultimo della resistenza a taglio da impiegare nelle verifiche di sicurezza sono le seguenti:

- Fessurazione diagonale (eqn. 8.7.1.1 circolare 617/2009):

$$V_t = l \cdot t \cdot \frac{1.5 \cdot \tau_{0d}}{b} \sqrt{1 + \frac{\sigma_0}{1.5 \cdot \tau_{0d}}} = l \cdot t \cdot \frac{f_{td}}{b} \sqrt{1 + \frac{\sigma_0}{1.5 \cdot \tau_{0d}}}$$

essendo

- l: lunghezza del pannello;
- t: spessore del pannello;
- σ_0 : tensione normale media, riferita all'area totale della sezione (= P/lt, con P forza assiale positiva se di compressione);
- f_{td} e τ_{0d} : valori di calcolo della resistenza a trazione per fessurazione diagonale e della corrispondente resistenza a taglio di riferimento della muratura ($f_t = 1.5 \tau_0$);
- b: coefficiente correttivo legato alla distribuzione degli sforzi sulla sezione, dipendente dalla snellezza della parete. Si può assumere $b = h/l$, comunque non superiore a 1,5 e non inferiore a 1, dove h è l'altezza del pannello.

- Taglio scorrimento (eqn. 7.8.3 D.M.14/01/2008):

$$V_t = l \cdot t \cdot f_{vd}$$

essendo

- l : lunghezza della parte compressa del pannello;
- t : spessore del pannello;
- $f_{vd} = f_{km}/\gamma_M$: resistenza di progetto da impiegare nelle verifiche calcolata con riferimento a quanto riportato al §4.5.6.1 (D.M. 14/01/2008), in cui la tensione normale media σ_n è valutata con riferimento alla porzione compressa della parete medesima ($\sigma_n = P/(l \cdot t)$).

Le verifiche devono essere effettuate considerando per ciascuna parete il valore minimo del taglio resistente fra i due sopra calcolati.

Verifica a pressoflessione nel piano della parete

La verifica a pressoflessione di una sezione si effettua confrontando il valore del momento agente di calcolo derivante dall'analisi con il momento ultimo resistente; quest'ultimo è calcolato assumendo la muratura non reagente a trazione ed una opportuna distribuzione lineare delle compressioni. Nel caso di sezione rettangolare il momento ultimo può essere calcolato con la seguente espressione (7.8.2 D.M. 14/01/2008):

$$M_u = \left(l^2 t \cdot \frac{\sigma_0}{2} \right) \cdot \left(1 - \frac{\sigma_0}{0.85 \cdot f_d} \right)$$

essendo

- M_u : momento corrispondente al collasso per pressoflessione;
- l : lunghezza complessiva della parete (compresa la zona tesa);
- t : spessore della zona compressa della parete;
- σ_0 : tensione normale media, riferita all'area totale della sezione ($= P/(lt)$, con P forza assiale agente positiva se di compressione). Se P è di trazione, $M_u = 0$;
- $f_d = f_m/\gamma_M$: resistenza a compressione di calcolo della muratura.

Verifica a pressoflessione fuori dal piano

Il valore del momento di collasso per azioni perpendicolari al piano della parete è calcolato assumendo un diagramma delle compressioni rettangolare, un valore della resistenza pari a $0,85f_d$ e trascurando la resistenza a trazione della muratura, secondo lo schema sotto presentato. Conformemente a quanto riportato in letteratura, il momento ultimo può essere calcolato da considerazioni di equilibrio come:

$$M_u = N \left(\frac{t-a}{2} \right) = \frac{N \cdot t}{2} \cdot \left(1 - \frac{N}{k f_d \cdot lt} \right)$$

essendo

- M_u : momento corrispondente al collasso per pressoflessione fuori dal piano;
- l : lunghezza complessiva della parete (compresa la zona tesa);
- t : spessore della zona compressa della parete;
- σ_0 : tensione normale media, riferita all'area totale della sezione ($= P/(lt)$, con P forza assiale agente positiva se di compressione). Se P è di trazione, $M_u = 0$;
- $f_d = f_m/\gamma_M$: resistenza a compressione di calcolo della muratura;
- a : larghezza della zona a compressione uniforme.

Secondo quanto riportato al §7.8.5.1.2 del D.M. 14/01/2008, le verifiche fuori piano dei pannelli murari si possono effettuare adottando le forze equivalenti impiegate per gli elementi non strutturali (§ 7.2.3) e assumendo un fattore q_a pari a 3. Più precisamente, l'azione sismica ortogonale alla parete può essere rappresentata da una forza orizzontale distribuita, pari a $S_a \gamma_i / q_a$ volte il peso della parete nonché da forze orizzontali concentrate pari a $S_a \gamma_i / q_a$ volte il peso trasmesso dagli orizzontamenti che si appoggiano sulla parete, qualora queste forze non siano efficacemente trasmesse a muri trasversali disposti parallelamente alla direzione del sisma. Per le pareti resistenti al sisma, che rispettano i limiti di Tab. 7.8.II, si può assumere che il periodo T_a indicato al § 7.2.3 sia pari a 0. Per pareti con caratteristiche diverse, la verifica fuori piano va comunque condotta valutando, anche in forma approssimata, il valore di T_a . Il valore di S_a si può calcolare secondo l'espressione (7.2.2 del D.M. 14/01/2008):

$$S_a = \alpha \cdot S \cdot \left[\frac{3 \cdot (1 + Z/H)}{1 + (1 - T_a/T_1)^2} - 0.5 \right] \geq \alpha \cdot S$$

essendo:

α : rapporto tra l'accelerazione massima del terreno a_g su sottosuolo tipo A da considerare nello stato limite in esame e l'accelerazione di gravità g ;

S: coefficiente che tiene conto della categoria di sottosuolo e delle condizioni topografiche;

T_a : periodo fondamentale di vibrazione dell'elemento non strutturale;

T_1 : periodo fondamentale di vibrazione della costruzione nella direzione considerata;

Z: quota del baricentro dell'elemento non strutturale misurata a partire dal piano di fondazione;

H: altezza della costruzione misurata a partire dal piano di fondazione

Sintesi dei risultati delle verifiche

Le verifiche di sicurezza nei confronti delle azioni statiche (combinazione SLU) e sismiche (combinazione SLV) sono state eseguite su tutte le pareti verticali inserite nel modello numerico FEM sopra descritto secondo le modalità presentate nel paragrafo precedente.

I valori delle sollecitazioni di progetto impiegate per l'effettuazione delle verifiche sono state ricavate dal modello numerico globale che, come già mostrato, non è in grado di cogliere condizioni quali il mancato ammorsamento tra pareti ortogonali, la discontinuità tra pareti adiacenti e tra pareti e volte sovrastanti, la presenza di intercapedini e di aperture successivamente tamponate ed altro ancora. I risultati delle verifiche di sicurezza sul fabbricato devono quindi essere considerati relativi ad una condizione "migliorata" del fabbricato, in cui è stato correttamente ripristinato il collegamento tra pareti ortogonali e tra pareti adiacenti e la connessione tra i vari paramenti che costituiscono una stessa parete, condizione di cui il modello impiegato è effettivamente rappresentativa.

Le verifiche di sicurezza sono state eseguite considerando i valori delle azioni (permanenti, accidentali e sismiche) descritti al paragrafo precedente: i carichi previsti nei vari locali si riferiscono ad una condizione "di progetto", che prevede un sovraccarico non superiore all'attuale peso dei libri nelle zone destinate a Biblioteca Universitaria e comunque non maggiore di 3.0 kN/m² in tutti gli altri locali, fatta eccezione per le zone in cui può essere previsto un significativo grado di affollamento (aula magna, corridoi, ballatoi e simili). Conseguentemente a quanto detto, la condizione verificata risulta pertanto migliorativa rispetto a quella realmente presente nel fabbricato prima della sua temporanea chiusura, e quindi rappresentativa di una proposta di progetto.

Su tutte le pareti in muratura sono stati preliminarmente effettuati controlli relativi al soddisfacimento delle limitazioni geometriche e dimensionali inserite nelle vigenti Norme Tecniche per le Costruzioni (D.M.14/01/2008), riguardanti la lunghezza minima della parete (l) ed il fattore adimensionale di snellezza (λ). Le limitazioni fornite, per quanto non direttamente riferite agli edifici esistenti e pertanto inserite nei capitoli riferiti alle nuove costruzioni, forniscono una significativa indicazione sulla capacità delle pareti murarie considerate di svolgere funzione portante nei confronti di azioni orizzontali (i.e. combinazione sismica) e devono pertanto essere tenute in considerazione.

In particolare, nel paragrafo 4.5.4, è precisato che *"i pannelli murari sono considerati resistenti anche alle azioni orizzontali quando hanno una lunghezza non inferiore a 0,3 volte l'altezza di interpiano ... Ai fini di un adeguato comportamento statico e dinamico dell'edificio, tutti le pareti devono assolvere, per quanto possibile, sia la funzione portante sia la funzione di controventamento"*. La funzione di controvento risulta infatti essenziale nei confronti di azioni orizzontali e pertanto in presenza di azioni sismiche.

Per quanto riguarda le limitazioni sulla snellezza, in via semplificativa definita come rapporto tra altezza e spessore e comprensiva di un fattore di vincolo dovuto alla presenza di ritegni trasversali (i.e. pareti ortogonali), essa non deve superare in generale il valore di 20, con limitazioni più restrittive per quanto riguarda le pareti in muratura in zona sismica di diversa tipologia e spessore (il valore scende ad esempio a 12 nel caso di murature in pietre sbozzate), come precisato nella tabella 7.8.II del D.M. 14/01/2008.

Per quanto riguarda il Palazzo della Sapienza, a tutti i piani dell'edificio sono state individuate pareti caratterizzate da una lunghezza inferiore a 0.3 volte l'altezza di interpiano. Tale condizione si riscontra generalmente in corrispondenza delle aperture interne e in presenza di "pilastrini" in muratura, come ad esempio quelli posti in prossimità dell'ingresso lato Piazza Dante in adiacenza alla scala principale sia al piano terra sia al piano primo e nell'atrio situato davanti agli attuali locali portineria al piano terra.

Alcune pareti esterne, quali quelle presenti all'angolo tra Via Curtatone e Montanara e Vicolo della Sapienza, quelle all'angolo tra Piazza Dante e Via Curtatone e Montanara a piano terra e quelle del porticato interno parallelamente a Via Curtatone e Montanara avendo dimensioni eccessivamente ridotte rispetto all'altezza di interpiano (il cui valore medio è di circa 540 cm) non soddisfano il medesimo requisito.

Il dettaglio di tutti gli elementi caratterizzati da $l \leq H/3$ è riportato in allegato alla presente relazione.

Per quanto riguarda inoltre il soddisfacimento dei requisiti di snellezza, a tutti i piani del fabbricato sono presenti pareti con spessori relativamente modesti (compresi tra 15 e 45 cm) per i quali non risultano soddisfatti i requisiti minimi di snellezza.

E' evidente che in presenza di elementi caratterizzati dal mancato soddisfacimento dei requisiti geometrici e dimensionali sopra riportati, le condizioni di sicurezza degli elementi murari nei confronti di azioni orizzontali devono essere accuratamente valutate.

Per quanto riguarda le verifiche statiche (combinazione SLU), solitamente i valori delle tensioni medie dovute alle azioni gravanti sul fabbricato risultano compatibili con i limiti di resistenza delle varie pareti murarie, fatta eccezione per alcuni elementi, da ritenersi comunque non critici per la sicurezza globale statica, talvolta caratterizzati da spessori piuttosto ridotti, lunghezza inferiore al 30% dell'altezza di interpiano e con elevati valori della snellezza.

E' necessario sottolineare che a causa della evidente eterogeneità delle tessiture murarie, della presenza di vuoti e di intercapedini, di paramenti accostati e mal collegati, di aperture successivamente tamponate e di carichi concentrati, i valori delle tensioni possono raggiungere localmente valori più elevati: questa condizione è stata confermata dalle prove sperimentali con martinetti piatti e dalla presenza di quadri fessurativi significativi in corrispondenza dell'appoggio di alcune travi del solaio. Le prove con martinetti piatti hanno inoltre rivelato una grande variabilità dei valori della resistenza della muratura con valori molto elevati in alcuni casi e valori modesti in altri.

Per quanto riguarda le verifiche in combinazione sismica (SLV), la situazione più gravosa è stata riscontrata nei confronti delle sollecitazioni di *taglio*. Considerando il piano terra del fabbricato, le pareti che presentano valori del taglio resistente ultimo minori delle sollecitazioni derivanti dall'analisi sono prevalentemente localizzate nella porzione di edificio prospiciente Via Curtatone e Montanara: le pareti nella direzione del lato maggiore del complesso in corrispondenza dell'ingresso e quelle ad essa parallele non soddisfano le verifiche di sicurezza, analogamente a quanto accade per alcuni degli elementi che si affacciano sul porticato interno, caratterizzati anche dal mancato rispetto del requisito $l \leq H/3$.

Una condizione analoga si riscontra in corrispondenza dei locali della centrale termica e in prossimità della scala lato Vicolo della Sapienza: a conferma di questo risultato è stato infatti rilevato un significativo quadro fessurativo. Sempre nei confronti delle azioni sismiche, una situazione piuttosto critica è stata individuata anche in prossimità delle pareti corte dell'Aula Magna Storica (parallele al lato maggiore dell'edificio), nelle due pareti di ingresso delle aule ad essa adiacenti (che mostrano un significativo quadro fessurativo), in corrispondenza della parete della scala principale verso Piazza Dante, in corrispondenza delle pareti di ingresso ai locali PT-7, PT-8 e PT-10 e parallelamente all'ingresso di Vicolo della Sapienza (dalla parte opposta alla scala).

Analizzando i risultati delle verifiche a taglio eseguite al piano primo del fabbricato, le condizioni più gravose si riscontrano in corrispondenza delle pareti parallele al lato corto dell'edificio nella zona della Biblioteca Universitaria sovrastante l'Aula Magna Storica e delle aule ad essa adiacenti, in analogia con quanto si verifica anche al piano terra. Analogamente, le pareti interne del locale P1-14 non rispettano i requisiti di sicurezza della normativa.

In corrispondenza della parete dell'Aula Magna Nuova dove è posizionato lo scranno e in alcune pareti interne rivolte verso il porticato e parallele a Vicolo della Sapienza, di spessore relativamente modesto (tra 45 e 55 cm), non risultano soddisfatti i requisiti di sicurezza. Particolare attenzione deve essere posta alla parete in falso a separazione tra i locali P1-23 e P1-27 direttamente appoggiata sulla volta sottostante e che non soddisfa i requisiti di sicurezza nei confronti delle sollecitazioni di taglio. Sono infine presenti alcune pareti di modesta lunghezza in corrispondenza del lato rivolto verso Vicolo della Sapienza, sia in direzione x che in direzione y che non rispettano i requisiti di sicurezza.

Relativamente alle verifiche a taglio eseguite al piano secondo del fabbricato, i risultati mostrano un comportamento piuttosto simile a quanto descritto per il piano primo. I dettagli di tutte le verifiche di sicurezza sono riportati in allegato alla presente relazione.

Per quanto riguarda le verifiche di sicurezza nei confronti della sollecitazione di *pressoflessione nel piano* in combinazione sismica (SLV), il numero di elementi che non soddisfa i requisiti di sicurezza è inferiore rispetto a quanto riscontrato per la sollecitazione di taglio; anche in questo caso tuttavia, la dimensione degli elementi resistenti influisce significativamente sul risultato dei calcoli, estesamente riportati in allegato.

Considerando il piano terra del fabbricato, alcune delle pareti murarie che non risultano conformi a quanto richiesto da normativa sono quelle di ingresso alle aule adiacenti all'Aula Magna Storica, la parete corta della medesima aula rivolta verso Vicolo della Sapienza e le pareti parallele al lato corto del fabbricato di accesso ai locali PT-10 e PT-8. Al piano primo, analogamente a quanto avveniva per la sollecitazione di taglio, gli elementi che vanno in crisi per pressoflessione nel piano sono concentrati nella zona d'angolo tra Via dell'Ulivo e Vicolo della Sapienza.

Per quanto riguarda le verifiche di *pressoflessione per azioni fuori dal piano* devono essere effettuate alcune precisazioni: secondo quanto riportato in normativa, le pareti murarie possono essere verificate nei confronti di tale sollecitazione "separatamente" dal resto del fabbricato, assumendo lo schema adottato per l'esecuzione di verifiche su elementi non strutturali. Tale schema prevede di considerare l'elemento, in via semplificativa, incernierato in corrispondenza dei due solai (inferiore e superiore) e svincolata lateralmente dalle pareti adiacenti. Nel caso specifico del Palazzo della Sapienza, suddetto schema deve essere accuratamente valutato caso per caso, essendo presenti orizzontamenti (piani in acciaio e laterizio – volte in mattoni) che potrebbero non essere in grado di fornire un adeguato vincolo richiedendo pertanto l'analisi dell'attivazione di eventuali meccanismi locali di collasso e pareti ortogonali che costituiscono, se adeguatamente ammortate, un efficace vincolo nei confronti dell'azione ribaltante orizzontale.

A tal fine, oltre a considerare il valore sollecitante derivante dallo schema indicato in normativa (§7.8.1.5.2) per il momento sollecitante fuori dal piano è stato valutato anche quello derivante dall'analisi in corrispondenza delle sezioni significative.

Per quanto riguarda i risultati delle verifiche nei confronti della sollecitazione di pressoflessione fuori piano la condizione più critica si riscontra in corrispondenza dell'ultimo piano del fabbricato, caratterizzato da valori minori dello sforzo assiale (con funzione di stabilizzazione), in corrispondenza della parete rivolta verso l'interno del porticato parallela a Piazza Dante e caratterizzata dall'assenza di pareti in direzione ortogonale, e in corrispondenza delle pareti dell'Aula Magna Nuova, costituita da un doppio volume.

Il dettaglio delle verifiche è riportato per esteso in allegato alla presente relazione.

10.4. Analisi e verifica dei meccanismi locali di collasso

a cura di Silvia Caprili e Federico Mangini

Le attuali Norme Tecniche per le Costruzioni (D.M. 14/01/2008) e la relativa circolare applicativa (n°617/2009) evidenziano la necessità, nel caso di edifici esistenti in muratura, di valutare la sicurezza sismica con riferimento sia al comportamento strutturale globale del fabbricato sia al comportamento locale e all'attivazione di possibili meccanismi di collasso. In presenza di condizioni quali l'assenza di ammortamento tra pareti ortogonali, l'assenza di cordoli e catene che possano limitare le spinte orizzontali, la presenza di paramenti murari accostati e di murature di scarsa qualità ed altro ancora, il modello globale del fabbricato potrebbe infatti non essere del tutto rappresentativo dell'effettiva risposta dinamica della struttura.

Questa tipologia di approccio globale/locale, come già evidenziato, risulta concorde a quanto riportato all'interno delle Linee Guida del Ministero delle Infrastrutture e Trasporti per i beni di carattere storico-monumentale del 2011.

Per la valutazione dei meccanismi locali risulta di fondamentale importanza l'esecuzione di un accurato rilievo geometrico - strutturale e l'individuazione delle carenze intrinseche al fabbricato, che permettono localizzare i macroelementi suscettibili a fenomeni di instabilità locale quali il ribaltamento fuori piano, il meccanismo di flessione verticale o orizzontale, il ribaltamento delle zone d'angolo ed altri ancora. L'attivazione dei suddetti meccanismi locali è funzione del grado di vincolo tra la parete considerata ed eventuali elementi ortogonali, cordoli o catene che possano costituire un efficace ritegno nei confronti delle azioni orizzontali. La valutazione analitica dei meccanismi locali di collasso è generalmente eseguita mediante un approccio di tipo cinematico, finalizzato al calcolo del moltiplicatore orizzontale dei carichi agenti sugli elementi strutturali che conduce all'attivazione del cinematicismo considerato e del corrispondente

valore dell'accelerazione di picco al suolo (PGA), da confrontare con quella prevista per il soddisfacimento delle verifiche per lo stato limite considerato.

Nel caso in esame del Palazzo La Sapienza di Pisa, il rilievo architettonico e geometrico - strutturale ha permesso l'individuazione dei seguenti macroelementi, il cui comportamento nei confronti delle azioni orizzontali deve essere opportunamente analizzato:

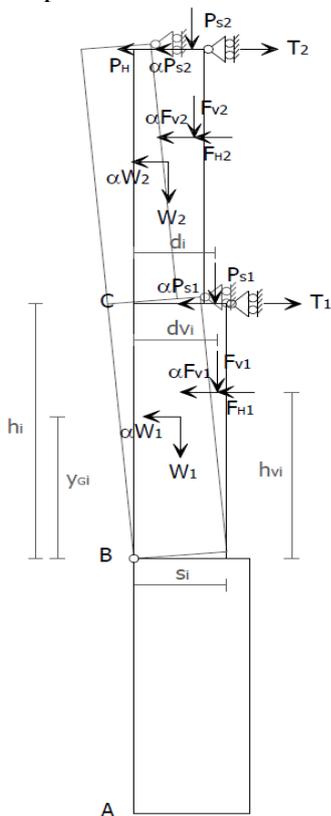
1. Effetto di "punzonamento" e spinta delle travi dei soppalchi sulle murature nei locali della Biblioteca Universitaria.
2. Ribaltamento semplice della parete interna verso il porticato (lato Piazza Dante) ai piani primo e secondo.
3. Ribaltamento semplice della parete esterna dell'Aula Magna Nuova lato Via Curtatone e Montanara.

L'effetto dovuto alla presenza di soppalchi con sovraccarico distribuito sull'intero ambiente al secondo piano della Biblioteca Universitaria sulle pareti del fabbricato è stato accuratamente analizzato, effettuando verifiche mirate in corrispondenza delle zone di appoggio delle travi dei soppalchi sulla muratura, dettagliatamente riportate in allegato.

Il meccanismo di *ribaltamento semplice* consiste nella rotazione rigida di un'intera facciata o di porzioni di essa rispetto ad assi orizzontali (Figura 10.9) ed è generalmente associato all'assenza di ammorsamento tra la parete considerata e quelle ad essa ortogonali ed alla mancanza di un adeguato vincolo in sommità. La presenza di orizzontamenti deformabili e mal collegati alla parete, di spinte orizzontali non sufficientemente contrastate e di una cattiva qualità del sistema murario resistente (pareti a sacco, formate da paramenti accostati) favoriscono inoltre l'attivazione del cinematismo.

Il calcolo viene effettuato assumendo lo schema di corpo rigido riportato in Figura 10.10 confrontando il valore del momento stabilizzante (M_S), dovuto essenzialmente ai carichi verticali ed alle reazioni esercitate in corrispondenza dei ritegni orizzontali con quello ribaltante dovuto alle azioni orizzontali (M_R). La verifica è stata eseguita mediante l'applicativo C.I.N.E. (Milano, Beolchini, Mannella 2009).

Le verifiche sono state effettuate considerando i valori di a_g , F_0 e T_c^* caratteristici di uno spettro di risposta che costituisce l'involuppo di quello ricavato precisamente per il sito considerato. Il risultato delle verifiche è schematicamente riportato nelle tabelle sottostanti; per il dettaglio delle verifiche si fa riferimento all'allegato alla presente relazione.



$$M_S = \sum_{i=1}^n W_i \cdot \frac{s_i}{2} + \sum_{i=1}^n F_{Vi} \cdot d_{Vi} + \sum_{i=1}^n P_{Si} \cdot d_i + \sum_{i=1}^n T_i \cdot h_i$$

$$M_R = \alpha \cdot \left[\sum_{i=1}^n W_i \cdot y_{Gi} + \sum_{i=1}^n F_{Vi} \cdot h_{Vi} + \sum_{i=1}^n P_{Si} \cdot h_i \right] + \sum_{i=1}^n F_{Hi} \cdot h_{Vi} + P_H \cdot h_i$$

$$\alpha = \frac{\sum_{i=1}^n W_i \cdot \frac{s_i}{2} + \sum_{i=1}^n F_{Vi} \cdot d_{Vi} + \sum_{i=1}^n P_{Si} \cdot d_i + \sum_{i=1}^n T_i \cdot h_i - \sum_{i=1}^n F_{Hi} \cdot h_{Vi} + P_H \cdot h_i}{\left[\sum_{i=1}^n W_i \cdot y_{Gi} + \sum_{i=1}^n F_{Vi} \cdot h_{Vi} + \sum_{i=1}^n P_{Si} \cdot h_i \right]}$$

Figura 10.9: Meccanismo di collasso per ribaltamento semplice

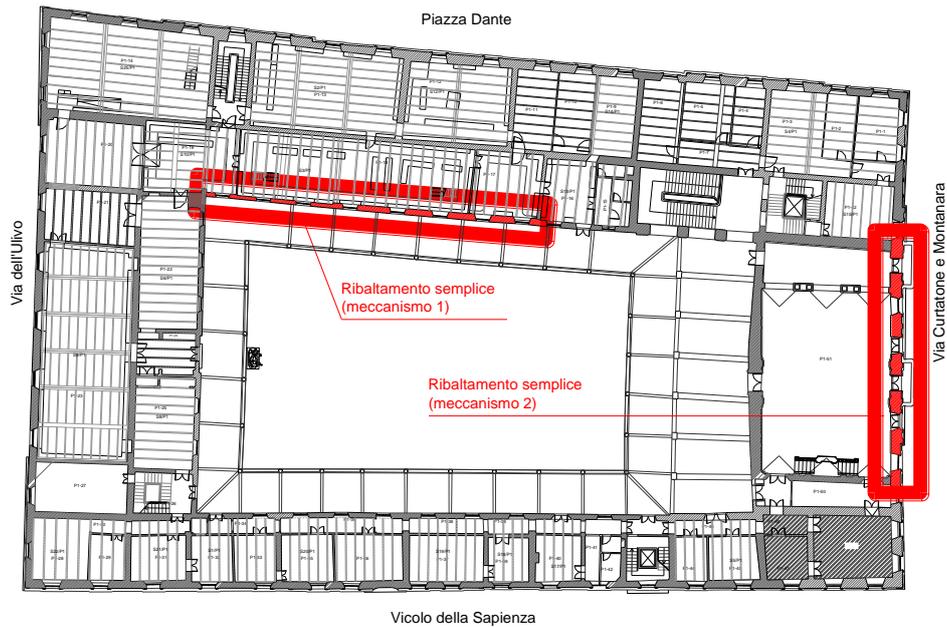


Figura 10.10: Indicazione dei meccanismi di collasso significativi analizzati.

Meccanismo 1: Parete lato interno porticato parallela a Piazza Dante

E' stato analizzato il meccanismo di ribaltamento semplice della facciata rivolta verso il porticato e parallela a Piazza Dante, al piano primo (locali della Biblioteca Universitaria) ed al piano secondo (locali di pertinenza dell'Università di Pisa). Come visibile dalla Figura 10.10, la parete considerata non presenta ritegni in direzione ortogonale, non sono presenti setti murari che possano costituire un adeguato ritegno nei confronti del meccanismo considerato. La situazione è analoga sia al piano primo sia al piano secondo, mentre non è stato valutato il ribaltamento della porzione di facciata corrispondente al piano terra essendo presenti pareti ortogonali a quella considerata ed essendo la spinta delle volte al piano terra contrastata da quella esercitata dal porticato. Le caratteristiche geometriche della parete sono riportate per esteso nell'Allegato, analogamente al calcolo delle azioni ribaltanti e stabilizzanti impiegate nelle verifiche.

Il valore della PGA che porta all'attivazione del meccanismo di collasso di ribaltamento è pari a 0.060g e 0.079g rispettivamente per il piano primo e per il piano secondo; il valore di riferimento della PGA per lo stato limite considerato (SLV) è di 0.118g. La verifica risulta pertanto non soddisfatta.

Meccanismo 2: Parete Aula Magna lato Via Curtatone e Montanara

E' stato analizzato il meccanismo di ribaltamento semplice della facciata esterna dell'Aula Magna Nuova, costituita da un doppio volume voltato. Come visibile dalla Figura 10.10, la parete considerata non presenta ritegni in direzione ortogonale, non sono presenti setti murari che possano costituire un adeguato ritegno nei confronti del meccanismo considerato. Le caratteristiche geometriche della parete sono riportate per esteso nell'Allegato, analogamente al calcolo delle azioni ribaltanti e stabilizzanti impiegate nelle verifiche.

Il valore della PGA che porta all'attivazione del meccanismo di collasso di ribaltamento è pari a 0.112g per il piano primo; il valore di riferimento della PGA per lo stato limite considerato (SLV) è di 0.118g. La verifica risulta pertanto non soddisfatta.

10.5. Analisi e verifica degli orizzontamenti

a cura di Riccardo Barsotti e Stefano Bennati (volte), Silvia Caprili (solai)

10.5.1 Solai Piani

Come descritto nel capitolo 6 relativo al rilievo strutturale, gli orizzontamenti piani del Palazzo La Sapienza di Pisa sono costituiti da profili metallici ed elementi di alleggerimento in laterizio, a semplice o doppia orditura. I profili costituenti le travi dell'orditura principale e secondaria, conformemente alla prassi dell'epoca, presentano sezione a doppio T ad ali stondate (profili tipo IPN) con dimensione variabile da IPN120 ad IPN450. Gli elementi di alleggerimento sono solitamente costituiti da volterrane in laterizio, come è stato possibile rilevare direttamente in situ in occasione dell'effettuazione di alcuni saggi.

Nel modello globale ad elementi finiti del fabbricato, il contributo degli orizzontamenti è stato riprodotto mediante l'inserimento di elementi monodimensionali di adeguata sezione appoggiati in corrispondenza delle estremità, al fine di riprodurre in maniera cautelativa il grado di vincolo presente in corrispondenza dell'appoggio sulla parete in muratura (orditura principale) o sul profilo principale (orditura secondaria). La modellazione degli elementi del solaio ha permesso la corretta valutazione del comportamento globale del fabbricato. Le verifiche di sicurezza dei solai piani è stata eseguita separatamente, mediante l'impiego di schemi di comprovata validità.

La verifica degli orizzontamenti a semplice orditura è stata eseguita secondo lo schema di trave in semplice appoggio, caricata in maniera distribuita dal peso permanente dell'effettivo pacchetto del solaio (blocchi di alleggerimento, riempimento, solette, massetto e allettamento, pavimentazione, intonaco) e dal carico d'esercizio, funzione della destinazione d'uso del locale considerato.

Nel caso di solai a doppia orditura, la verifica è stata eseguita analogamente a quanto sopra specificato per gli elementi costituenti l'orditura secondaria; per le travi principali, solitamente costituite da due profili di analoghe dimensioni accoppiati, è stato assunto ancora lo schema di trave in semplice appoggio caricata dalla risultante della forza di taglio presente all'appoggio di ciascuno degli elementi dell'orditura secondaria. Le verifiche di sicurezza sono state eseguite in maniera sistematica in tutti i locali del fabbricato in termini di resistenza, considerando la combinazione statica per carichi gravitazionali agli stati limite ultimi (SLU) prevista da normativa, e in termini di deformabilità, considerando la combinazione agli stati limite di esercizio (SLE).

Sono state inoltre condotte verifiche "singolari" in corrispondenza di alcuni elementi trave sui cui è stata rilevata la presenza di carichi concentrati significativi, dovuti a scaffalature isolate (come ad esempio nei locali P2-24, P2-30 ed altri) o a tramezzi distribuiti sulla lunghezza dell'elemento in acciaio o su parte di esso (ad esempio tra i locali P1-35 e P1-36, P1-32 e P1-33, P1-28 e P1-29, P2-13 e P2-14, P2-15 e P2-16).

Al fine dell'esecuzione delle verifiche di sicurezza, per quanto riguarda i carichi permanenti propri e portati sono stati assunti i seguenti valori come ricavato dal rilievo strutturale, da applicare in relazione allo spessore effettivo degli strati di riempimento/pavimentazione e degli elementi considerati (Figura 10.11).

- Peso dei profili: *secondo tipologia di profilo*
- Blocchi di alleggerimento: $0,60 \text{ kN/m}^2$
- Riempimento: 18 kN/m^3 (*riempimenti leggeri e sciolti*)
- Massetto: 20 kN/m^3
- Pavimentazione: 25 kN/m^3 (*mattonelle in graniglia o simili*)
- Intonaco: $0,20 \text{ kN/m}^2$

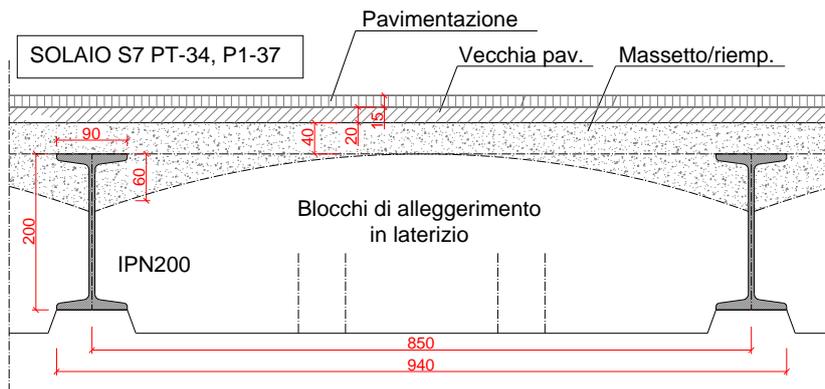


Figura 10.11: Schema tipo di un solaio a semplice orditura, disposizione dei vari strati di riempimento.

La tensione di snervamento dell'acciaio è stata assunta pari a 235 N/mm^2 , conformemente a quanto ricavato dalla prova di trazione eseguita sul provino estratto da uno dei profili principali di un solaio (solaio S1/PT). E' stato assunto un fattore di confidenza pari a 1.20, associato ad un livello di conoscenza LC2, assunto in conseguenza a quanto specificato nel paragrafo precedente.

Il valore conseguente della tensione resistente da impiegare in fase di verifica è pari a: $f_d = \frac{f_{ym}}{\gamma_{M0} \cdot FC}$.

Le combinazioni di carico considerate sono:

- Combinazione a SLU per carichi verticali (eqn. 2.5.1 D.M.14/01/2008):

$$\gamma_{G1} \cdot G_1 + \gamma_{G2} \cdot G_2 + \gamma_P \cdot P + \gamma_{Q1} \cdot Q_{k1} + \gamma_{Q2} \cdot \psi_{02} \cdot Q_{k2} + \gamma_{Q3} \cdot \psi_{03} \cdot Q_{k3} + \dots$$

- Combinazione a SLE per carichi verticali (frequente e a lungo termine, eqn. 2.5.3 e 2.5.4 D.M.14/01/2008):

$$G_1 + G_2 + P + \psi_{11} \cdot Q_{k1} + \psi_{22} \cdot Q_{k2} + \psi_{23} \cdot Q_{k3} + \dots$$

$$G_1 + G_2 + P + \psi_{21} \cdot Q_{k1} + \psi_{22} \cdot Q_{k2} + \psi_{23} \cdot Q_{k3} + \dots$$

In cui i valori dei coefficienti γ_i , ψ_i sono definiti dalla tabella 2.5.I delle Norme Tecniche per le Costruzioni (D.M. 14/01/2008).

Avendo assunto lo schema di trave in semplice appoggio per le travi dell'orditura secondaria dei solai a doppia orditura e per le travi dei solai a semplice orditura, la verifica si esegue confrontando il valore del momento sollecitante con il momento resistente e sarà soddisfatta nel caso in cui $M_s < M_{Rd}$.

Per quanto riguarda le verifiche a taglio, analogamente deve essere confrontata la sollecitazione derivante dai carichi a SLU con la resistenza della sezione stessa.

Le verifiche in termini di deformabilità sono state cautelativamente eseguite assumendo lo schema di trave in semplice appoggio, in cui la deformazione massima ammissibile è stata assunta pari a 1/250 della luce (tabella 4.2.X D.M. 14/01/2008).

A tale proposito, si ricorda che le prove di carico effettuate sui due solai indagati hanno fornito risultati delle deformazioni minori di quanto numericamente calcolato mediante quanto sopra riportato, evidenziando in grado di vincolo maggiore rispetto a quello di semplice appoggio alle estremità.

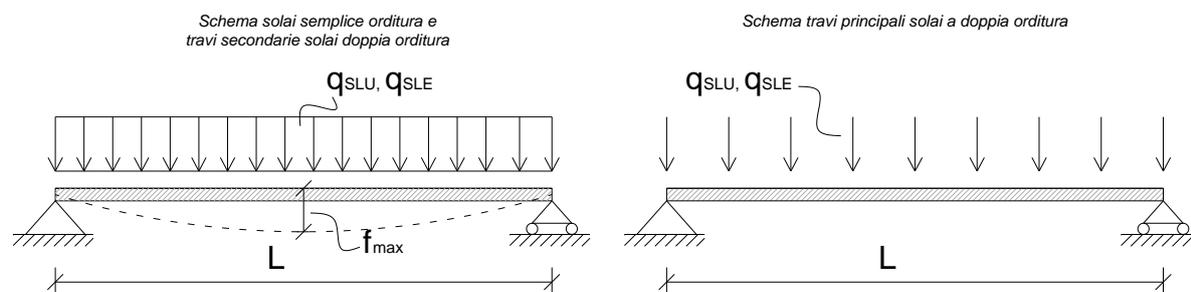


Figura 10.12: Schemi assunti per le verifiche delle travi dei solai.

Per quanto invece riguarda le verifiche sulle travi dell'orditura principale, lo schema deve essere valutato di volta in volta considerando il numero di travi secondarie che su di esse appoggiano, ricavando pertanto i valori di momento flettente, taglio e freccia corrispondenti.

I risultati completi delle verifiche eseguite sui solai tra piano terra e piano primo e tra piano primo e piano secondo sono riportati in allegato; di seguito è presentata, a titolo esemplificativo, la scheda di verifica di un solaio a doppia orditura (solaio S2/P1 tra piano primo e piano secondo).

Esempio di verifica solaio S2/P1 a doppia orditura

Il solaio in oggetto è costituito da travi secondarie IPN180 disposti ad interasse di 80 cm e travi principali realizzate mediante due profili affiancati tipo IPN400 (Figura 10.13). Lo spessore degli strati di riempimento costituenti il pacchetto del solaio è riportato in Figura 10.13.

Le tabelle sottostanti riportano i dati essenziali per l'esecuzione delle verifiche di sicurezza.

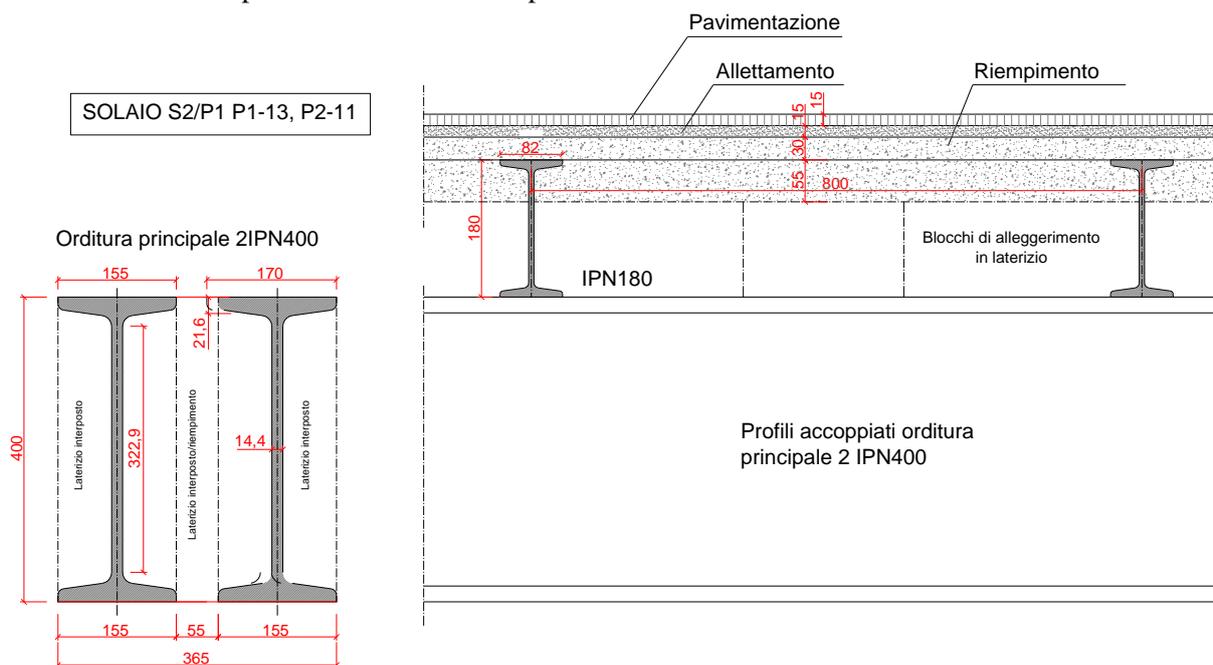
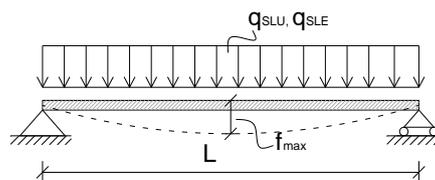
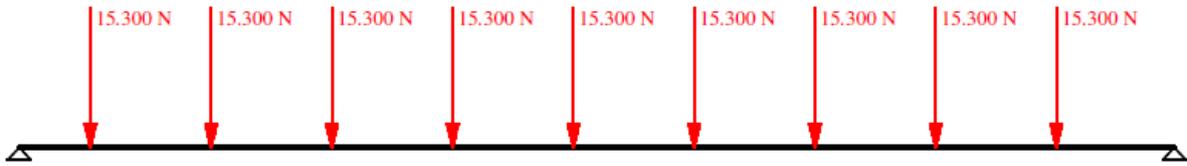


Figura 10.13: Solaio S2/P1 tra piano primo e piano secondo a doppia orditura.

Tabella 10.6: verifica del solaio S2/P1 a doppia orditura.

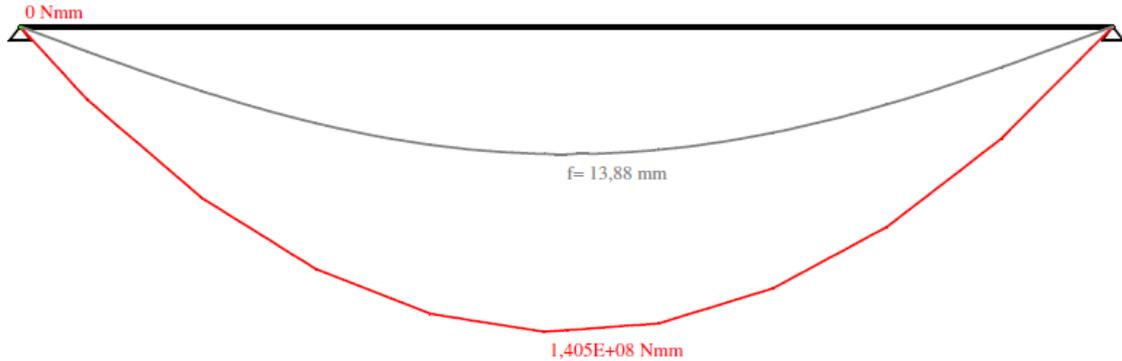
ID SAGGIO	S2/P1						
Stanza	P1-13	(biblioteca)					
	P2-11	(dipartimento)					
Tipologia solaio	Solaio in potrelle e laterizi interposti con tre elementi di alleggerimento						
Orditura	Doppia						
Profilo orditura principale	IPN400	(affiancati)					
Profilo orditura secondaria	IPN180						
Interasse profili principali	4730	mm	(asse dei due profili affiancati)				
Interasse profili secondari	800	mm					
h laterizio	150	mm	(ricavato: 180+20-50=150 mm)				
Luce (principale)	7650	mm					
Luce (secondaria)	4350	mm					
Caratteristiche profilo	IPN400		IPN180				
h	400	mm	180	mm			
b	155	mm	82	mm			
d	322,9	mm	142,4	mm			
t _w	14,4	mm	6,9	mm			
t _f	21,6	mm	10,4	mm			
r ₁	14,4	mm	6,9	mm			
r ₂	8,6	mm	4,1	mm			
A	11800	mm ²	2790	mm ²			
I _y	292100000	mm ⁴	14500000	mm ⁴			
W _{el,y}	1460000	mm ³	161000	mm ³			
A _{vz}	6169	mm ²	1335	mm ²			
G	92,4	kg/m	21,9	kg/m			
Calcolo dei carichi gravanti sul solaio							
riempimento (laterizio-prof)	55,0	mm	kN/m ²				
Riempimento	30,0	mm	kN/m ²				
Allettamento	15,0	mm	kN/m ²				
Pavimentazione	15,0	mm	kN/m ²				
Laterizio	150,0	mm	kN/m ²				
Longherine			kN/m ²				
Intonaco			kN/m ²				
G₁+G₂			kN/m²				
Q	uffici (pubblico)	B3	kN/m²				
Verifica orditura secondaria (IPN180)							
Carico SLU (mq)	Q _{SLU}	0,00876	N/mm ²	Carico SLE (mq)	Q _{SLE}	0,00628	N/mm ²
Carico SLU (ml)	q _{SLU}	7,01	N/mm	Carico SLE (ml)	q _{SLE}	5,02	N/mm
Momento max	M _{max}	16580604	Nmm	freccia max	f _{max}	7,84	mm
Taglio max	V _{max}	15247	N	freccia adm	f _{adm}	17,4	mm
Fattore di confidenza	FC	1,20					
Resistenza acciaio	f _y	186,51	N/mm ²				
Momento resistente	M _{res}	30027778	Nmm				
Taglio resistente	V _{res}	143753	N				
M _{MAX} /M _{res}	R	0.55					





Schema di carico di ciascun profilo IPN400 dell'orditura principale.

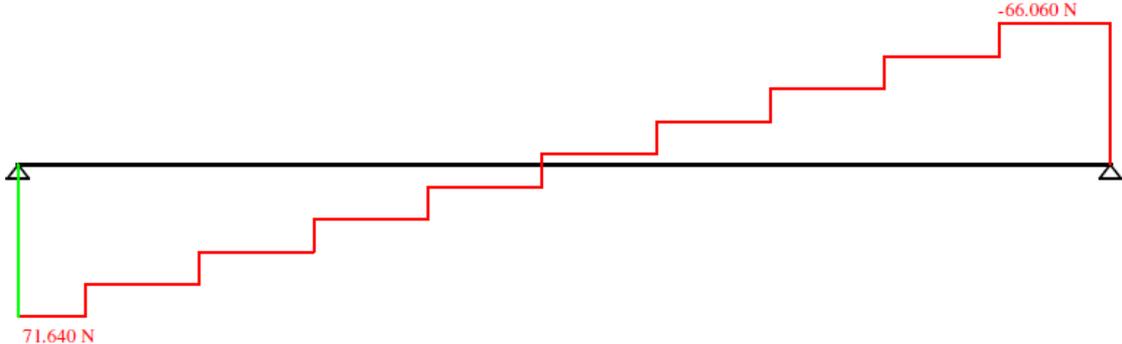
Luce = 7.650 mm ; E = 210.000 MPa ; J = 2,921E+08 mm⁴



Andamento del momento flettente per lo schema di carico sopra considerato (trave orditura principale).

Momento resistente profilo IPN400: 272301587 Nmm = 2.728x10⁸ Nmm

Freccia massima ammissibile: 30,6 mm



Andamento dello sforzo di taglio per lo schema di carico sopra considerato (trave orditura principale).

Taglio resistente profilo IPN400: 664280 N = 664,28 kN

Come visibile dai dati sopra riportati, la verifica del solaio S2/P1 risulta soddisfatta.

Sintesi dei risultati delle verifiche

Le verifiche eseguite sugli orizzontamenti piani del Palazzo La Sapienza di Pisa hanno fornito risultati soddisfacenti con capacità degli elementi portanti superiore rispetto alla domanda calcolata a SLU (in termini di resistenza) e ad SLE (in termini di deformabilità) considerando i carichi effettivamente gravanti sui solai laddove specificamente valutati (locali della Biblioteca Universitaria per quanto riguarda i pesi permanenti dovuti ai libri) e un carico di esercizio pari a 3,00 kN/m² in tutti gli altri locali.

Si evidenzia tuttavia che, effettuando una verifica degli orizzontamenti dei locali destinati a biblioteca impiegando i carichi accidentali attualmente previsti da normativa (≥ 6.00 kN/m²), il rapporto tra domanda e capacità (M_{\max}/M_{res}) cresce arrivando in alcuni casi a valori pari a 0.85-1.10 (locali P2-27, P2-22, P2-33, P2-34, P2-35, P2-36, P2-30), con un tasso di sfruttamento dell'orizzontamento comunque elevato anche in relazione al carattere storico della costruzione.

Nella zona di pertinenza dell'Università di Pisa sono state riscontrate criticità riguardo le verifiche statiche del solaio del piano di calpestio della stanza P2-20: il solaio a semplice orditura è costituito da profili tipo IPN140 disposti a interasse pari a 85 cm e di lunghezza pari a presenta un momento resistente pari a 15,28 kNm ed un momento sollecitante pari a 23,31 kNm dovuto ad un carico permanente pari a 3,3 kN/m² ed un carico di esercizio assunto pari a 3,00 kN/m², con rapporto M_{max}/M_{res} pari a 1,52.

Si ricorda inoltre la presenza, in corrispondenza del solaio di copertura della "sala rossa" (solaio di copertura del locale P1-49) di un tramezzo in mattoni in corrispondenza del sottostante travetto: in tale caso, la verifica di sicurezza condotta in precedenza dalla società AICE Consulting nell'Ottobre 2007 ha mostrato un esito negativo della verifica di resistenza. Una situazione analoga, che deve essere adeguatamente verificata, si riscontra anche in corrispondenza di alcuni solai nella zona di pertinenza dell'Università di Pisa caratterizzati da un elevato carico concentrato in mezzeria dovuto alla presenza di tramezzi in mattoni tra le stanze P1-35 e P1-36, P1-32 e P1-33, P1-28 e P1-29, P2-13 e P2-14 e P2-15 e P2-16.

10.5.2 Volte in muratura

L'esatta valutazione della capacità portante delle volte storiche in muratura è sicuramente un obiettivo difficilmente perseguibile a causa delle numerose incertezze riguardo la loro geometria e le caratteristiche del materiale nonché della difficoltà di modellazione ed analisi.

Al fine di ottenere sufficienti informazioni per l'esecuzione di verifiche di sicurezza, sono state eseguite numerose indagini in situ sia all'intradosso sia all'estradosso delle volte al fine di individuare precisamente la disposizione degli elementi resistenti, la tipologia di volta, lo spessore della volta e degli strati di riempimento presenti nei diversi punti (in chiave, alle reni, all'imposta della parete).

L'analisi della capacità portante delle volte è stata eseguita in maniera cautelativa considerando l'azione di carichi verticali. I dettagli relativi all'esecuzione di suddette analisi ed i relativi risultati sono riportate in allegato alla presente relazione.

10.6. Analisi e verifica delle fondazioni

a cura di Giuseppe Scarpelli e Nunziante Squeglia

Le indagini eseguite sulle murature al di sotto del piano campagna, descritte nel Capitolo 6, hanno evidenziato una notevole disomogeneità geometrica, sia come larghezza della base di appoggio sia come profondità del piano di fondazione. La prima conseguenza di questa variabilità geometrica è la disomogeneità del comportamento meccanico dell'elemento strutturale fondazione. Infatti, pur invocando l'ipotesi di sottosuolo omogeneo, la differente geometria delle sezioni indagate comporta una differente rigidità del complesso fondazione-terreno ed un differente valore del carico limite.

Nel presente paragrafo si cercherà di ricostruire, sulla base delle informazioni disponibili, le principali caratteristiche del comportamento meccanico del complesso fondazione – terreno in modo da ottenere uno strumento di analisi utile a comprendere le conseguenze delle variazioni di carico sull'edificio, sia nello spazio sia nel tempo.

La curva carico – cedimento è stata ipotizzata di forma iperbolica, in accordo con le indicazioni date da Butterfield (1980). Questa ipotesi è particolarmente appropriata in considerazione della presenza di terreni a granulometria prevalentemente sabbiosa/limosa nei primi metri dal piano campagna, il che permette di ipotizzare una deformazione in condizioni drenate fino alla rottura. La relazione proposta ha la forma seguente

$$q(w) = q_{lim} \cdot \left[1 - \exp\left(-\frac{K_{ini} \cdot w}{q_{lim}}\right) \right]$$

in cui q_{lim} è il carico limite del complesso fondazione – terreno [FL⁻²] e K_{ini} è la rigidità iniziale del complesso fondazione – terreno sotto carichi verticali uniformemente distribuiti [FL⁻³].

Il carico limite è stato determinato attraverso un approccio classico, applicando alle varie sezioni la formula di Brinch-Hansen. Nella tabella 10.7 sono riportati i valori del carico limite calcolato facendo riferimento ad

un terreno omogeneo avente un angolo di resistenza al taglio di 36° ed un peso saturo dell'unità di volume di 19.35 kN/m^3 .

Tabella 10.7: Carico limite calcolato mediante la formula di Brinch-Hansen.

Sezione	q_{lim} [kPa]
Colonnato (P02, P03)	2728
Pilastrini (P04, P05)	2253
Muro interno lato est (P07)	1925
Muro interno lato nord (P06)	1266
Muro esterno nord lato ovest (P11)	2362
Muro esterno sud lato ovest (P10)	3050
Muro esterno nord lato est (P08)	1658

La rigidezza iniziale a piccoli livelli di deformazione è stata ricavata mediante l'uso di soluzioni della teoria dell'elasticità. In particolare è stata utilizzata la soluzione di Groth & Chapman (1969) riportata in Poulos & Davis (1980). Per la determinazione delle proprietà elastiche del terreno sono stati utilizzati i risultati delle prove down hole, fissando la velocità delle onde di taglio in 100 m/s per i primi metri del sottosuolo. Il valore indicato della velocità delle onde di taglio è associabile ad un valore di G pari a 19725 kPa e quindi, ipotizzando un valore del coefficiente di Poisson di 0.2 , ad un valore di E' pari a 47340 kPa .

A causa della diversa geometria, sia in termini di profondità del piano di fondazione sia di forma e dimensioni in pianta, si ottengono valori della rigidezza iniziale K_{ini} molto diversi nelle varie sezioni considerate anche in presenza di proprietà elastiche costanti. Come mostrato nella tabella 10.8, i valori minori sono associati alle fondazioni assimilabili ad un carico nastriforme, mentre le fondazioni con un fattore di forma prossimo all'unità esibiscono valori più elevati.

I risultati in termini di carico unitario-cedimento del complesso fondazione – terreno sono riportati nella figura 10.14 per tutte le sezioni considerate. Nella figura è evidente la diversa risposta dei vari elementi di fondazione in funzione della geometria rilevata. E' inoltre il caso di rilevare che l'approccio utilizzato non consente di considerare l'interazione tra le varie porzioni della fondazione e l'influenza dell'eventuale compressione degli strati di argilla compresi tra i 14 ed i 40 metri di profondità. Riguardo quest'ultimo fenomeno, esso influenza certamente il valore del cedimento medio, mentre sembra essere meno importante per ciò che riguarda i cedimenti differenziali in virtù della sostanziale omogeneità dei terreni più profondi.

La figura 10.14 mostra una eterogeneità di comportamento del complesso fondazione – terreno. Le differenze più evidenti riguardano le rigidezze secanti nella porzione iniziale del diagramma (fino a 1 MPa) che sono comprese in un ordine di grandezza.

Per poter esprimere un giudizio sul probabile comportamento del complesso - fondazione terreno è necessario fare riferimento ai carichi applicati sul piano di fondazione. L'analisi strutturale ha consentito di stimare i carichi unitari trasmessi in fondazione, suddividendo la struttura in varie zone (figura 10.15) in funzione delle caratteristiche di rigidezza della fondazione. L'analisi è stata condotta simulando le varie condizioni di carico sia in condizioni di esercizio sia di stato limite ultimo.

Tabella 10.8: Rigidezze iniziali ricavate mediante la teoria dell'elasticità.

Sezione	K_{ini} [kPa/m]
Colonnato (P02, P03)	32'560
Pilastrini (P04, P05)	25'273
Muro interno lato est (P07)	3'167
Muro interno lato nord (P06)	4'658
Muro esterno nord lato ovest (P11)	4'664
Muro esterno sud lato ovest (P10)	4'417
Muro esterno nord lato est (P08)	7'622

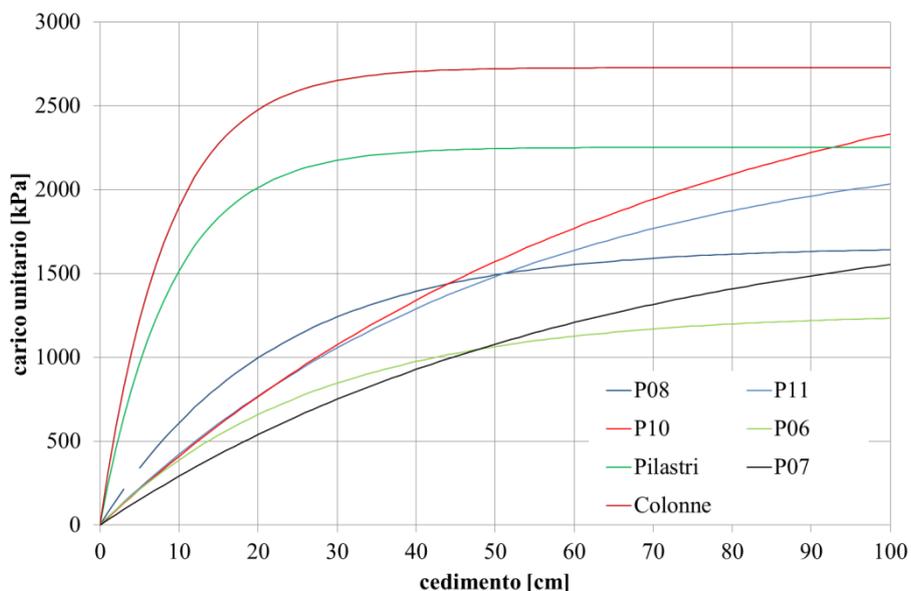


Figura 10.14: Curve Carico unitario – Cedimento per le differenti sezioni indagate.

La tabella 10.9 riporta i carichi unitari per le varie zone per la combinazione di carico che prevede i soli pesi propri (valore minimo) e per la combinazione di carico che comprende anche il carico previsto in esercizio (valore massimo).

Il confronto tra i dati riportati nelle tabelle 10.7 ed 10.9 consente di affermare che i fattori di mobilitazione della resistenza del complesso fondazione terreno sono piuttosto bassi, con un massimo di 0.21. A fronte di un basso impegno della resistenza delle fondazioni, l'eterogeneità dei carichi combinata alla eterogeneità di rigidezza delle fondazioni mette in evidenza una problematica relativa ai cedimenti differenziali della struttura ed ai possibili danneggiamenti legati agli incrementi di carico subiti nel corso della vita.



Figura 10.15: Suddivisione in pianta della struttura in funzione delle caratteristiche del complesso fondazione - terreno.

Tabella 10.9: Carichi unitari in fondazione suddivisi secondo le zone indicate in Figura 10.23.

Zona	Tensione minima [kPa]	Tensione massima [kPa]	Note
Colonnato	176	340	
Pilastrì	133	469	
Tipo 1	86	139	P6 – P10 – P11
Tipo 2	49	95	P7 – P9
Tipo 3	140	211	P8

La figura 10.16 riporta la sintesi delle informazioni riguardanti i carichi applicati e le prestazioni del complesso fondazione terreno. Come si può notare vi è una sostanziale differenza di comportamento tra la porzione perimetrale dell'edificio e la parte più interna, rappresentata dal colonnato e dai pilastri presenti nella parte est del cortile interno. Queste differenze di comportamento espongono l'edificio a danneggiamenti nelle zone di maggiore contrasto tra le rigidità in fondazione o di maggiore disomogeneità dei carichi. Per ciò che riguarda la risposta alle azioni sismiche, possono essere sostanzialmente ripetuti i concetti appena esposti. Infatti le sollecitazioni in fondazione derivanti dall'applicazione dell'azione sismica di progetto non sono significativamente differenti da quelle riportate nella tabella 10.9 a causa della combinazione delle diverse azioni. Per tale ragione, anche in questo caso si può supporre che l'effetto dell'azione sismica possa determinare un danneggiamento in corrispondenza delle variazioni di rigidità in fondazione.

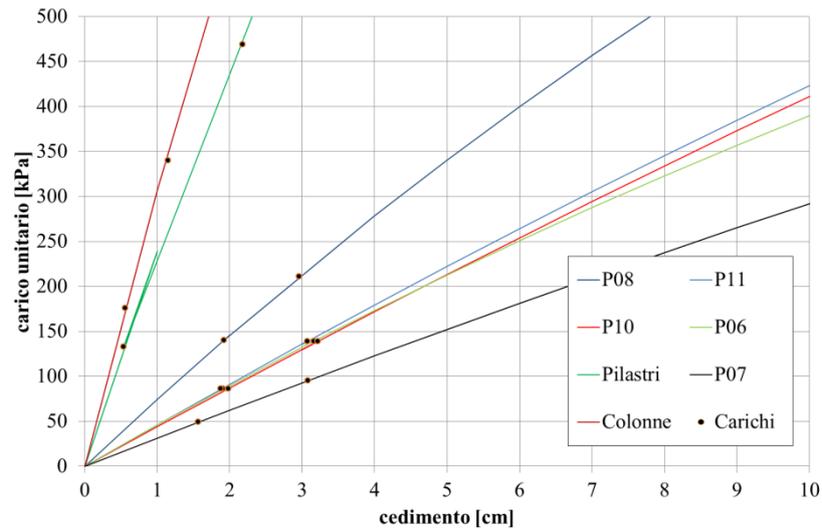


Figura 10.16: Stima dei cedimenti delle diverse zone dell'edificio in relazione ai carichi applicati.

11. CONCLUSIONI E CRITERI DI INTERVENTO

a cura di Walter Salvatore e Paolo Iannelli

L'analisi dei risultati degli studi e delle indagini conoscitive condotti sull'edificio della Sapienza di Pisa hanno anzitutto evidenziato come esso debba essere considerato non come una singola unità strutturale bensì come un aggregato di unità ovvero di parti variamente interconnesse fra di loro, realizzate in epoche diverse e con differenti tecniche costruttive.

Tale varietà di tipi strutturali si traduce in una molteplicità di tipologie di elementi resistenti e di materiali impiegati. Gli orizzontamenti sono costituiti da volte in laterizio di tipologie diverse o solai in acciaio e laterizio a singola o doppia orditura, la struttura di copertura è costituita da capriate in legno e da capriate in acciaio, le pareti verticali presentano diverse tipologie di materiale (pietra e laterizio) e diverse tessiture murarie in cui sono chiaramente riconoscibili gli interventi strutturali e funzionali succedutisi nel tempo, le fondazioni sono di vario genere, superficiali e profonde, di differenti materiali e con differenti piani di posa.

Tali complessità ed eterogeneità strutturali comportano chiaramente una risposta poco uniforme nei confronti delle azioni esterne (sovraccarichi, azioni dinamiche, variazioni termiche e del livello di falda ...) e quindi un quadro fessurativo **quasi fisiologico della struttura** che comunque, sempre per le stesse ragioni, soffre di **un'intrinseca fragilità**, come testimoniato dai numerosi dissesti e problemi strutturali che hanno necessitato, nel tempo, di interventi anche importanti. Dall'attuale quadro fessurativo della struttura, del resto, sono riconoscibili fessure "fisiologiche", connesse cioè alla conformazione stessa dell'immobile (disomogeneità strutturale, cedimenti dovuti alle variazioni stagionali della falda idrica, disomogeneità del piano di fondazione), fessure derivanti da carenze manutentive (regimentazione carente delle acque piovane, infiltrazioni, ...) e fessure connesse a locali sofferenze strutturali.

Le citate complessità e disomogeneità strutturali si traducono infatti in una diversità di risposte e prestazioni strutturali che impongono una dettagliata analisi di ciascuna porzione dell'edificio e delle relative condizioni d'uso, nonché un attento controllo degli aspetti gestionali e funzionali.

L'eterogeneità della rigidità delle diverse fondazioni esistenti nell'edificio, come evidente dai grafici in figura 11.1, comporta cedimenti differenziali, cosicché incrementi di carico possono tradursi nella nascita di danneggiamenti sulle strutture murarie sovrastanti o in un incremento dei dissesti già presenti.

Sulla base di tali considerazioni risulta evidente come le condizioni di sicurezza statica siano quindi strettamente connesse, oltre che alle prescrizioni imposte dalle norme vigenti, alle destinazioni funzionali ed ai carichi ad esse relativi. Più complessa risulta la valutazione della vulnerabilità sismica per la quale occorre riferirsi alle norme e linee guida vigenti, quali il D.M. 14.01.2008, Norme Tecniche per le Costruzioni e la Direttiva del Presidente del Consiglio dei Ministri 9 febbraio 2011 "*Linee guida per la valutazione e riduzione del rischio sismico del patrimonio culturale con riferimento alle nuove Norme tecniche per le costruzioni ...*" secondo le quali, per i beni culturali tutelati, è necessario attenersi ad interventi di miglioramento, a riparazioni o ad interventi locali (punto 8.4 delle Norme Tecniche), intendendo con:

- a. *miglioramento*, l'esecuzione di opere in grado di far conseguire all'edificio un maggior grado di sicurezza rispetto alle condizioni attuali, con un livello di protezione sismica non necessariamente uguale a quello previsto per l'adeguamento delle costruzioni;
- b. *riparazioni o interventi locali*, gli interventi che interessano invece porzioni limitate della costruzione, e devono essere soggetti a verifiche locali.

Un ultimo importante riferimento è infine costituito dall'Ordinanza del Sindaco del Comune di Pisa, DN-20/56 del 29/05/2012, che richiedeva di riferirsi alle **originarie condizioni di sicurezza dell'immobile**.

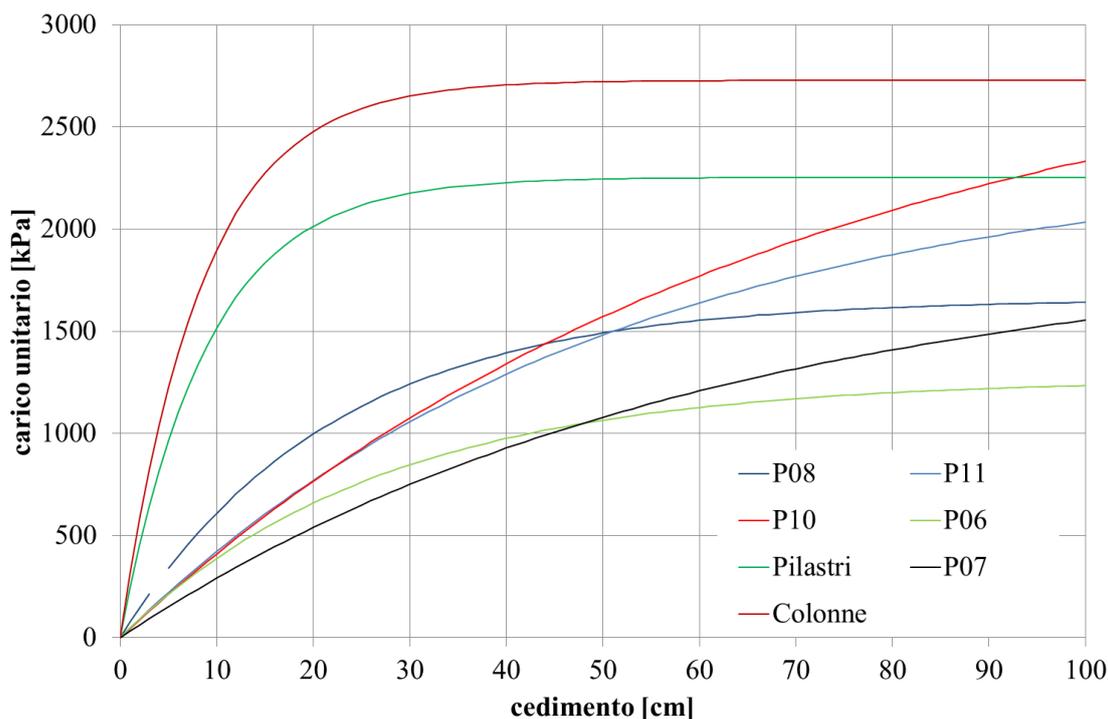


Figura 11.1: Curve Carico unitario – Cedimento per le differenti sezioni indagate.

Nel seguito sono dettagliate anzitutto le principali criticità emerse dalla verifica di sicurezza statica e dall'analisi della vulnerabilità sismica del Palazzo La Sapienza di Pisa, nonché dai rilievi effettuati. Tali criticità sono distinte, anche per consentire una più efficace programmazione degli interventi, fra quelle la cui risoluzione è da ritenersi urgente, in quanto più strettamente connesse alla pubblica incolumità, e quelle riconducibili ad ulteriori interventi di miglioramento sismico, da inserirsi in un'adeguata programmazione. Si ricorda infatti che, secondo quanto riportato al punto 8.3 Circolare 2 febbraio 2009 sulle Norme Tecniche per le Costruzioni di cui al DM 14 gennaio 2008, la situazione che si determina nel momento in cui si manifesta l'inadeguatezza di un'opera rispetto alle azioni ambientali (non controllabili dall'uomo e soggette ad ampia variabilità nel tempo ed incertezza nella loro determinazione), risulta certamente più complessa. La stessa Circolare infatti recita:

"Per le problematiche connesse, non si può pensare di imporre l'obbligatorietà dell'intervento o del cambiamento di destinazione d'uso o, addirittura, la messa fuori servizio dell'opera, non appena se ne riscontri l'inadeguatezza. Le decisioni da adottare dovranno necessariamente essere calibrate sulle singole situazioni (in relazione alla gravità dell'inadeguatezza, alle conseguenze, alle disponibilità economiche e alle implicazioni in termini di pubblica incolumità). Saranno i proprietari o i gestori delle singole opere, siano essi enti pubblici o privati o singoli cittadini, a definire il provvedimento più idoneo, eventualmente individuando uno o più livelli delle azioni, commisurati alla vita nominale restante e alla classe d'uso, rispetto ai quali si rende necessario effettuare l'intervento di incremento della sicurezza entro un tempo prestabilito.

Per i beni tutelati gli interventi di miglioramento sono in linea di principio in grado di conciliare le esigenze di conservazione con quelle di sicurezza, ferma restando la necessità di valutare quest'ultima. Tuttavia, per la stessa ragione, su tali beni devono essere evitati interventi che insieme li alterino in modo evidente e richiedano l'esecuzione di opere invasive, come può avvenire nel caso di ampliamenti o sopraelevazioni, o l'attribuzione di destinazioni d'uso particolarmente gravose."

La valutazione della sicurezza ed una chiara comprensione della struttura hanno costituito la base fondamentale per la successiva individuazione degli interventi necessari, proporzionati agli obiettivi di sicurezza e durabilità e tali, al tempo stesso, da produrre il minimo impatto sul manufatto storico.

Considerata la peculiarità dell'immobile, si è privilegiata la strategia di intervenire nei punti in cui è emersa una riduzione della capacità resistente e/o deformativa della struttura o di alcune sue parti ovvero in cui si è

accertato un significativo degrado e decadimento delle caratteristiche meccaniche dei materiali; limitandosi pertanto agli elementi interessati ai suddetti fenomeni ed a quelli con essi interagenti, tenendo presente la loro funzione nel complesso strutturale. Inoltre, laddove l'intervento di miglioramento risultasse troppo invasivo rispetto alle esigenze di conservazione e tutela dell'immobile, sono state privilegiate misure compensative, organizzative o gestionali, che garantissero comunque una riduzione del rischio.

La valutazione della sicurezza ha quindi consentito di individuare:

- le porzioni di immobile la cui destinazione d'uso debba essere modificata o limitata in quanto non compatibile con i livelli di sicurezza richiesti;
- le strutture o gli elementi strutturali per cui sia necessario procedere ad aumentare o ripristinare la capacità portante.

Gli interventi proposti pertanto sono in genere rivolti a singole porzioni del manufatto, contenendone il più possibile l'estensione ed il numero, e comunque evitando di alterare in modo significativo o cercando di ripristinare l'originale distribuzione delle rigidità negli elementi. L'esecuzione di interventi su porzioni limitate dell'edificio è stata comunque valutata nel quadro di un'indispensabile visione d'insieme, tenendo conto degli effetti della variazione di rigidità e resistenza degli elementi.

In sede di progettazione, la scelta delle tecniche d'intervento dovrà essere valutata caso per caso, dando la preferenza a quelle che soddisfano i criteri di sicurezza e durabilità e che risultano, al tempo stesso, meno invasive, possibilmente reversibili, compatibili con i criteri della conservazione e rispettose della concezione e delle tecniche costruttive originarie della struttura, nonché delle trasformazioni significative avvenute nel corso della storia del manufatto.

Da questo punto di vista, gli elementi strutturali danneggiati, quando possibile, dovranno essere riparati piuttosto che sostituiti e le deformazioni ed alterazioni, costituendo una testimonianza del passato, dovrebbero, per quanto possibile, essere mantenute, adottando eventualmente misure atte a limitarne gli effetti negativi sulle condizioni di sicurezza.

Particolare attenzione dovrà essere posta anche alla fase esecutiva degli interventi, al fine di assicurare la reale efficacia degli stessi ed evitare dissesti che comportino il peggioramento delle caratteristiche della muratura o del funzionamento degli elementi costruttivi.

11.1. Analisi delle criticità rilevate

11.1.1. Criticità riconducibili ad interventi con caratteristiche di urgenza.

Solai e soppalchi

- Nella zona di pertinenza dell'Università di Pisa sono state riscontrate criticità riguardo le verifiche statiche del solaio del piano di calpestio della stanza P2-20 (figura 11.2.a).
- Nella zona di pertinenza dell'Università di Pisa il solaio di copertura della cosiddetta "sala rossa" (solaio di copertura della stanza P1-49) è caratterizzato da un esteso quadro fessurativo e da un elevato carico concentrato in mezzeria per la presenza di un tramezzo in mattoni (si veda anche la perizia eseguita in precedenza da AICE Consulting nell'Ottobre 2007).

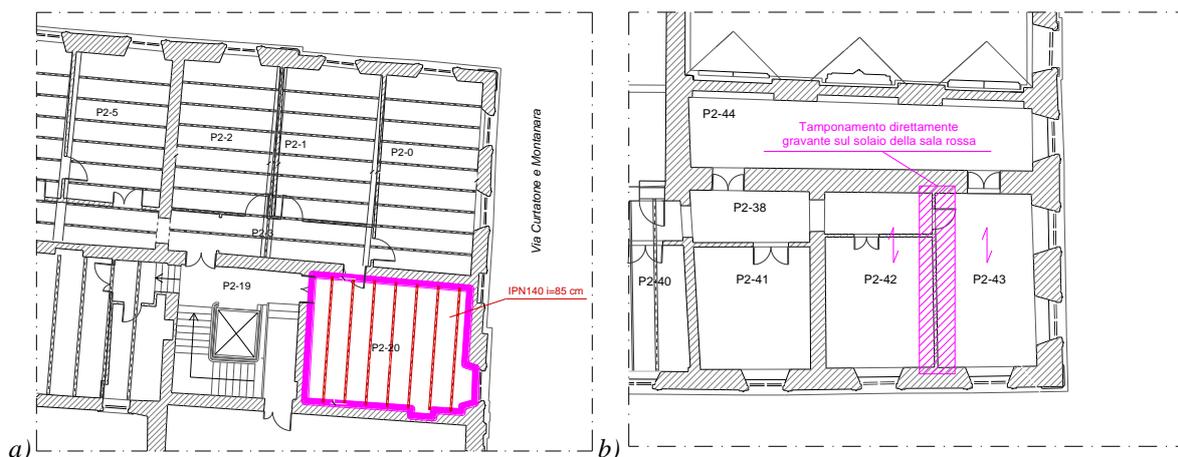


Figura 11.2: a) Posizionamento solaio sala P2-20, b) tamponamento gravante direttamente sul solaio della sala rossa.

- Nella zona di pertinenza dell'Università di Pisa alcuni solai sono caratterizzati da un elevato carico concentrato in mezzeria per la presenza di tramezzi in mattoni forati tra le stanze P1-35 e P1-36, P1-32 e P1-33, P1-28 e P1-29 (Figura 11.3.a), P2-13 e P2-14, P2-14 e P2-15, P2-15 e P2-16 (figura 11.3.b).
- Nella zona di pertinenza della Biblioteca Universitaria, le scaffalature appoggiano sulla pavimentazione in maniera puntuale, scaricando il peso in modo concentrato su solai e volte (figura 11.4).
- In corrispondenza delle zone di appoggio delle travi principali e secondarie, in numerose stanze (in corrispondenza dei solai di copertura dei locali PT-6, PT-5, PT-4, P1-14, P1-12, P1-18, P1-29, P1-23), è presente un quadro fessurativo che denota una concentrazione di tensioni (figura 11.5).
- Nella zona di pertinenza della Biblioteca Universitaria, l'introduzione dei soppalchi con sovraccarico distribuito sull'intero ambiente (locali P2-22, P2-24, P2-29, P2-30, P2-32, P2-33, P2-34, P2-35, P2-36) ha alterato in modo significativo l'originaria risposta locale della struttura ai carichi dinamici, generando una notevole vulnerabilità nei confronti dell'instabilità fuori piano in corrispondenza delle pareti cui sono vincolate le travi; tale criticità è amplificata dalla mancanza di adeguato ammortamento di molte delle pareti ortogonali.
- In corrispondenza del piano di calpestio del sottotetto è stata riscontrata la presenza di una grande quantità di materiale di risulta proveniente da precedenti interventi.

Volte e copertura del porticato

- Nella zona di pertinenza dell'Università di Pisa, in corrispondenza dell'angolo tra via Curtatone e Montanara e Vicolo della Sapienza, è presente un quadro fessurativo diffuso che denota la presenza di criticità locali per il sistema strutturale (figura 11.6).
- Nella zona di pertinenza della Biblioteca Universitaria, a separazione tra le sale P1-23 e P1-27 è presente un muro in mattoni direttamente poggiante sulla volta sottostante (figura 11.6.b).

- Nella zona di pertinenza della Biblioteca Universitaria, nelle sale P1-18 e P1-19, è stata riscontrata la presenza di scaffalature e schedari appoggiati sulle volte in corrispondenza della zona centrale (figura 11.7).



Figura 11.3: Tamponamenti direttamente gravanti sui solai sottostanti: a) piano primo (tamponamenti sui solai tra piano terra e piano primo), b) piano secondo (tamponamenti gravanti sui solai tra piano primo e piano secondo).

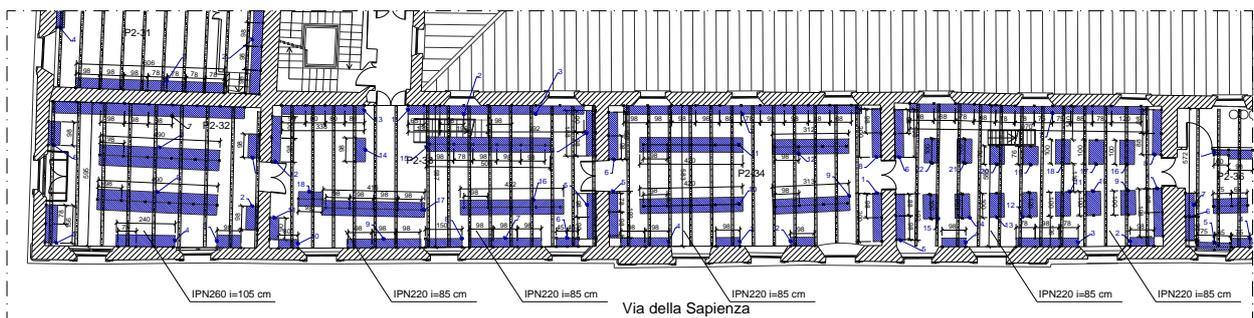


Figura 11.4: Scaffalature presenti al piano secondo (Biblioteca Universitaria) che scaricano puntualmente sui solai.

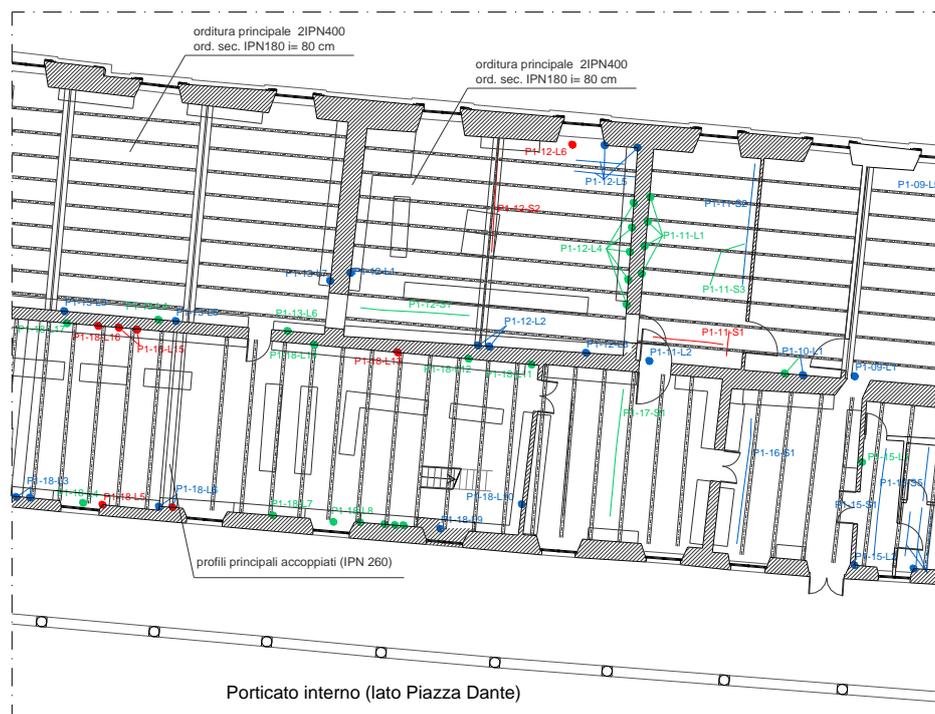


Figura 11.5: Dettaglio lesioni in corrispondenza delle travi principali (estratto del piano primo lato Piazza Dante).

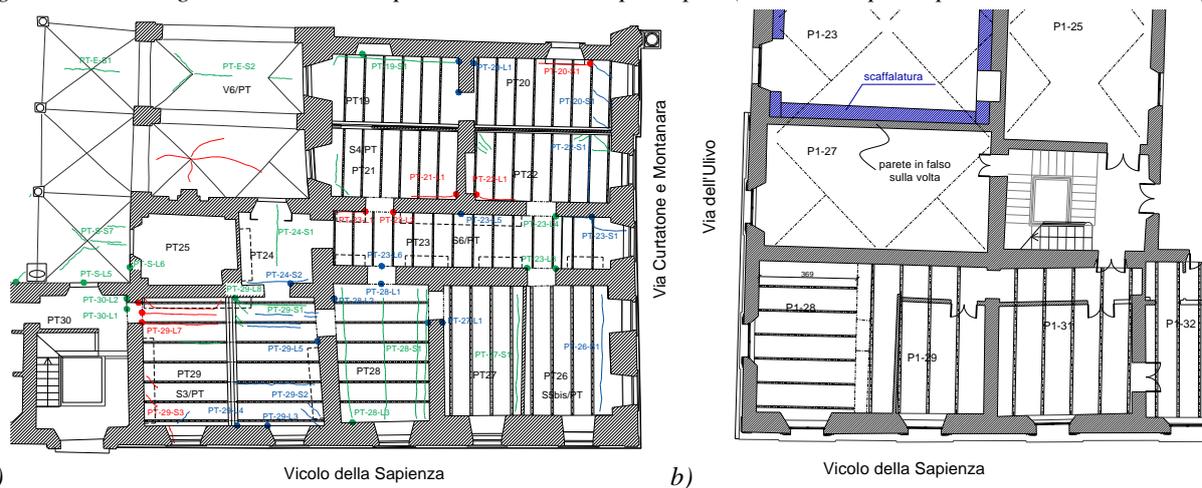


Figura 11.6: a) Locali da PT-19 a PT-29, dettaglio quadro fessurativo (piano terra, angolo tra Via della Sapienza e Via Curtatone e Montanara), b) parete in falso appoggiata sulla volta, tra le sale P1-23 e P1-27 (piano primo).

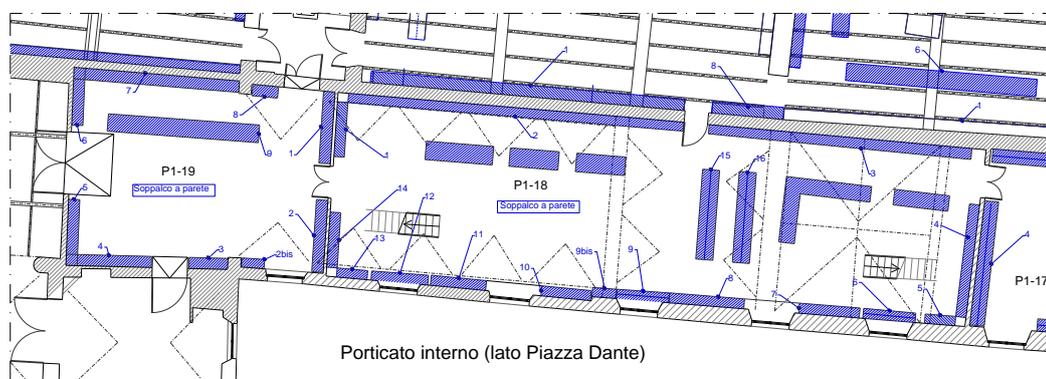


Figura 11.7: Scaffalature presenti al piano primo (Biblioteca Universitaria) che scaricano puntualmente sulle volte.

- Nella zona di pertinenza dell'Università di Pisa, in corrispondenza delle stanze voltate lato Aula Magna Storica (locali PT-41 e PT-43) e del relativo porticato, è stata riscontrata la presenza di evidenti segnali di cedimenti differenziali (figura 11.8.a).
- In corrispondenza della volta di copertura dell'Aula Magna Nuova è stata riscontrata la presenza di cedimenti significativi (figura 11.8.b).
- In corrispondenza del porticato circostante il cortile interno è stata riscontrata la presenza di evidenti cedimenti differenziali.
- In corrispondenza degli appoggi dei travicelli in legno della copertura del porticato a I piano è stata riscontrata la presenza di spostamenti significativi (figura 11.9).

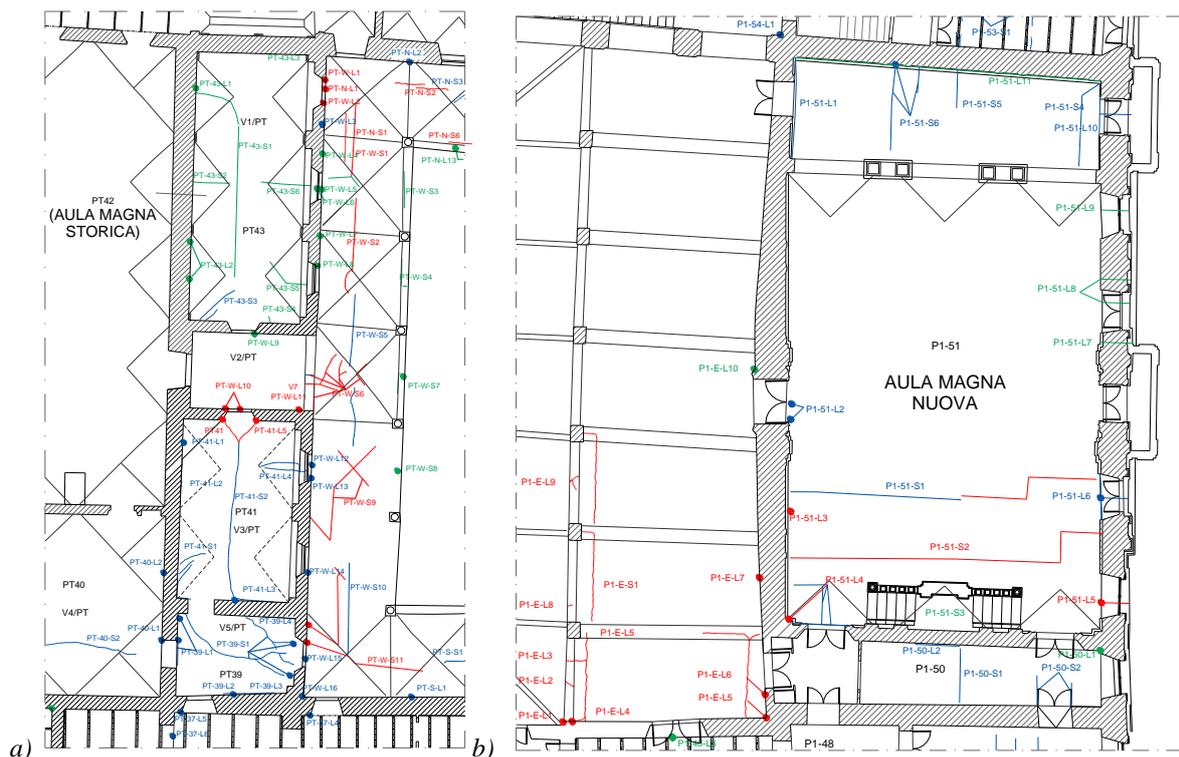


Figura 11.8: Quadro fessurativo riscontrato in corrispondenza a) delle sale di fronte all'Aula Magna Storica (piano terra, sale PT-41 e PT-43), b) dell'Aula Magna Nuova (piano primo).

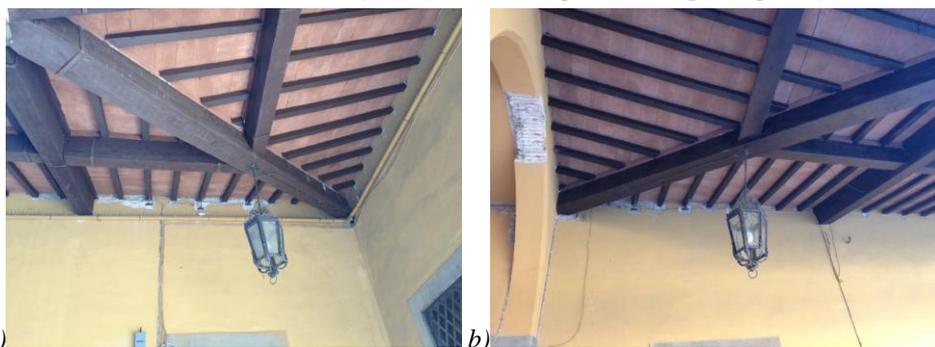


Figura 11.9: Sfilamento dei travicelli della copertura del porticato al piano primo: a) angolo tra Via della Sapienza e Via Curtatone e Montanara, b) angolo tra Piazza Dante e Via dell'Ulivo.

Strutture di copertura

- E' stata riscontrata la presenza di elementi di capriata in legno ammalorati, degradati o danneggiati e quindi non più efficaci (figura 11.10.a).
- Il manto di copertura è localmente ammalorato (figura 11.10.b).



Figura 11.10: a) Esempio di elemento di capriata in legno ammalorato, b) ammaloramento del manto di copertura.

Strutture verticali

- La natura peculiare delle strutture verticali murarie non consente una valutazione esaustiva del margine di sicurezza. Le pareti verticali presentano infatti discontinuità geometriche, di materiale e di vincolo diffuse sì da favorire concentrazioni di tensioni che localmente possono raggiungere valori elevati, talvolta molto al di sopra di quelli medi. Tale evenienza è favorita dalla presenza di numerosi vuoti nella muratura, spesso nascosti da tamponamenti, e dalla natura stessa di molte pareti, costituite da 2 paramenti separati di spessore talvolta molto diverso la cui collaborazione è difficilmente valutabile (figura 11.11). Le concentrazioni locali di tensioni sono confermate dalle prove sperimentali con martinetti piatti, nonché dalla presenza di quadri fessurativi in corrispondenza dell'appoggio di alcune travi. Le prove con martinetti piatti hanno inoltre rivelato una grande eterogeneità dei valori della resistenza della muratura la quale, in alcuni casi, localmente raggiunge valori sufficientemente elevati, mentre in altri si attesta su valori modesti. La grande eterogeneità delle situazioni possibili comporta quantomeno una elevata dispersione statistica dei valori di resistenza.
- Tra i pilastri del loggiato del piano terra e quelli del primo piano in corrispondenza dell'Aula Magna Nuova è stata riscontrata la presenza di disallineamenti (figura 11.12).
- In corrispondenza delle pareti della zona d'angolo tra via Curtatone e Montanara e vicolo della Sapienza è stata riscontrata la presenza di quadri fessurativi significativi connessi a cedimenti differenziali (già riportato in figura 11.6.a).
- E' stata riscontrata la presenza di pluviali in cattivo stato di manutenzione con conseguente ammaloramento locale della muratura.



Figura 11.11: a) Discontinuità nella tessitura muraria, b-c) esempio di paramenti accostati (piano terra).



Figura 11.12: Disallineamento tra i pilastri del porticato al piano terra e quelli del piano primo.

Fondazioni e terreni di fondazione

- E' stata riscontrata un'elevata disomogeneità della qualità e della tipologia delle strutture di fondazione e dei piani di posa delle fondazioni stesse.
- E' stata in particolare riscontrata una ridotta qualità della struttura di fondazione in corrispondenza delle muratura più antiche (come ad esempio nella zona d'angolo tra via della Sapienza e Via Curtatone e Montanara e nella muratura più interna lato Piazza Dante), con frequente presenza di vuoti.
- E' stata riscontrata un'elevata disomogeneità della rigidezza del sistema fondazione-terreno con elevata probabilità di cedimenti differenziali anche importanti.
- E' stata riscontrata la presenza di un cattivo sistema di regimentazione dell'acqua piovana con dilavamento del terreno di fondazione delle strutture limitrofe al cortile interno.

11.1.2. Criticità riconducibili ad ulteriori interventi di miglioramento sismico.

Scaffalature

- Le scaffalature delle Biblioteca Universitaria, in moltissimi casi, risultano non sicure nei confronti delle azioni orizzontali dinamiche.

Volte

- E' stata riscontrata la presenza di effetti spingenti provenienti dalle volte del porticato esterno del piano terra che devono essere opportunamente eliminati nei casi in cui si renda necessario, verificando anche l'efficacia delle catene e dei tiranti attualmente esistenti.

Sottotetto

- E' stata riscontrata la presenza di muretti di appoggio delle travi di copertura (figura 11.13.a)
- E' stata riscontrata la presenza di connessioni non efficaci tra gli elementi costituenti alcune capriate in legno (figura 11.13.b).
- E' stata riscontrata la presenza di appoggi non adeguati delle capriate in legno sulla muratura (Figura 11.13.c).

Strutture verticali

- E' stata riscontrata la mancanza di ammorsamenti efficaci tra le pareti ortogonali.

- E' stata riscontrata l'assenza di elementi di ritegno o di contrasto efficaci nei confronti delle azioni dinamiche fuori piano per la parete longitudinale del porticato parallelo a Piazza Dante, sia al primo sia al secondo piano (figura 11.14.a).
- E' stata riscontrata l'assenza di elementi di ritegno o contrasto efficaci nei confronti delle azioni dinamiche fuori piano per le pareti longitudinali dell'Aula Magna Nuova (figura 11.14.b).



- Figura 11.13: Alcuni dettagli delle capriate in legno: a) appoggio in corrispondenza del colmo della capriata, b) appoggio della capriata sulla muratura, c) muretti di sostegno presenti nel sottotetto.



Figura 11.14: Assenza di elementi di ritegno verso le azioni dinamiche fuori piano per la parete longitudinale del porticato parallelo a Piazza Dante (piano primo).

11.2. Criteri di intervento e misure prescrittive

11.2.1. Interventi con caratteristiche di urgenza.

Sulla base delle criticità emerse, si raccomandano le seguenti misure e interventi.

1. Nei locali in uso all'Università di Pisa, sale P1-52 e P1-49, è necessario effettuare il consolidamento dei corrispondenti solai di copertura (solai di calpestio dei locali P2-20 e P2-42/P2-43) prima del loro utilizzo, in funzione della destinazione d'uso che si vorrà assegnare.
2. Nei locali in uso all'Università di Pisa è necessario effettuare il consolidamento del solaio in corrispondenza dei tramezzi presenti tra le sale P1-35 e P1-36, P1-32 e P1-33, P1-28 e P1-29 al piano primo, P2-13 e P2-14, P2-14 e P2-15, P2-15 e P2-16 al piano secondo.
3. Rimozione nella Biblioteca Universitaria, del materiale librario posto negli scaffali posizionati al secondo livello dei soppalchi metallici in corrispondenza delle sale P2-22, P2-24, P2-29, P2-30, P2-32, P2-33, P2-34, P2-35 e P2-36 e divieto di apporre alcun nuovo carico.
4. Rimozione del materiale librario posizionato nella Biblioteca Universitaria in corrispondenza della parete di separazione tra la sala individuata come P1-23 (sala lettura) e P1-27 al primo piano.
5. Rimozione nella Biblioteca Universitaria, del materiale librario posto negli scaffali e negli schedari posizionati nella zona centrale delle sale P1-18 e P1-19 e divieto di apporre elevati carichi (scaffalature/schedari) nelle zone centrali di sale su strutture voltate.
6. Suddette rimozioni di materiale librario nei locali della Biblioteca Universitaria rappresentano oltre il 30% del totale (il totale ammonta a circa 10000 ml. di scaffali attualmente presenti).
7. Nella Biblioteca Universitaria, nelle sale destinate a deposito librario, i carichi, dopo la suddetta rimozione del materiale librario, non potranno essere in alcun modo incrementati nel futuro; nel resto delle sale (ad es. sala lettura/ingresso, uffici, ...) il sovraccarico complessivo massimo non deve in ogni caso superare i 300 kg/m².
8. Nei locali in uso all'Università di Pisa, incluse le biblioteche o i depositi, il sovraccarico complessivo massimo non deve in ogni caso superare i 300 kg/m² con il divieto di apporre elevati carichi (scaffalature/schedari) nelle zone centrali di sale su strutture voltate.
9. Realizzazione di basette di ripartizione in corrispondenza degli piedini d'appoggio delle scaffalature metalliche posizionate nelle sale della Biblioteca Universitaria.
10. E' necessario il completamento della rimozione del materiale di risulta nel sottotetto ed effettuare una attenta vigilanza affinché non venga in alcun modo accumulato nuovo materiale.
11. Nella zona d'angolo via Curtatone e Montanara - Vicolo della Sapienza (sale da PT-19 a PT-29 al piano terra, P1-44, P1-45, P1-47, P1-49 e P1-50 al piano primo) e nella relativa porzione dell'Aula Magna Nuova (sala P1-51) è necessario effettuare il consolidamento delle strutture, incluso il sistema di copertura voltato dell'Aula Magna Nuova.
12. E' necessario eseguire il consolidamento del porticato e delle volte del loggiato.
13. E' necessario il consolidamento della struttura di copertura in legno del loggiato a I piano.
14. E' necessaria l'integrazione/sostituzione (ove necessario) dei tiranti e delle catene delle volte e del porticato.
15. E' necessaria l'installazione di un sistema di monitoraggio topografico per la misura dei movimenti delle diverse porzioni del corpo di fabbrica e il mantenimento del sistema di monitoraggio continuo del quadro fessurativo.
16. E' necessaria la predisposizione di un sistema di regimentazione e smaltimento delle acque piovane dal cortile.
17. E' necessaria una manutenzione straordinaria del manto di copertura e del sistema di raccolta delle acque piovane (pluviali e discendenti).
18. E' necessaria l'integrazione/sostituzione (ove necessario) degli elementi di capriata in legno ammalorati o degradati/danneggiati.

11.2.2. Ulteriori interventi di miglioramento sismico.

Sulla base delle criticità emerse, si raccomandano le seguenti misure e interventi.

1. Stabilizzazione delle scaffalature nei confronti dei carichi orizzontali dinamici.
2. Interventi finalizzati all'eliminazione delle spinte dalle volte del porticato anche attraverso il ripristino dell'efficacia delle catene e tiranti attualmente esistenti.
3. Sostituzione dei muretti di appoggio delle travi di copertura con idonei elementi.
4. Consolidamento della struttura portante di copertura attraverso la giunzione efficace, ove necessario, dei nodi delle capriate in legno, la sostituzione/integrazione degli elementi di allettamento delle capriate sulla struttura muraria e la sostituzione degli spezzoni utilizzati per livellare o per appoggiare i vari elementi tra di loro.
5. Interventi volti a garantire il miglioramento della collaborazione delle pareti ortogonali laddove necessario.
6. Interventi volti a garantire una maggiore stabilità nei confronti delle azioni dinamiche fuori piano per la pareti longitudinali del porticato parallelo a Piazza Dante, sia al primo sia al secondo piano, e dell'Aula Magna Nuova.

BIBLIOGRAFIA

- Capitolo 3.

- P.Tronci, *Descrizione delle chiese, monasteri et oratori della città di Pisa*, 1643
- G.Cambiagi, *Il forestiero erudito o sieno compendiose notizie spettanti alla città di Pisa*, Pisa, Pompeo Polloni, 1773
- Descrizione delle feste state fatte nella città di Pisa nella primavera dell'anno MDCCLXXXV*, in Pisa MDCCLXXXV per Francesco Pieraccini
- A.Fabroni, *Historia Academiae Pisane*, I, 1791
- A. Da Morrona, *Pisa illustrata nelle arti del disegno* vol III, Pisa, 1793
- G. Anguillesi, *Notizie storiche dei palazzi e ville appartenenti alla I e R. Corona di Toscana*, Pisa, Presso Niccolò Capurro, 1815
- A. Da Morrona, *Pisa antica e moderna*, Pisa, Prospero, 1821
- Ranieri Grassi, *Descrizione storica e artistica di Pisa e de' suoi contorni*, Pisa, presso Ranieri Prospero tip dell'I. e R. Università, 1837
- Atti della prima riunione degli scienziati Italiani*, Pisa, Nistri-Lischi, 1839
- G. Rosini, *Per l'inaugurazione della statua di Galileo*, Pisa, Nistri, 1839
- P. Tronci, *Annali di Pisa*, II, Guidotti, 1843
- L. Tanfani-Centofanti, *Notizie di artisti tratte dai documenti pisani*, Bologna 1897
- Ranieri Sardo, *Cronaca-Supino*, Arte Pisana, 1904
- I.B. Supino, *Arte pisana*, Firenze, Alinari, 1904
- C. Fedeli, *I documenti pontifici riguardanti l'università di Pisa*, Pisa, Mariotti, 1908
- C. Fedeli, *Documenti e pagine di storia universitaria: 1427-1800*, Pisa, Stabilimento tipografico toscano, 1912
- Bellini Pietri, *Guida di Pisa*, Pontredera Pisa, Bemporad, 1913
- Autori vari N.N., *L'ateneo di Pisa*, Pisa, Pacini-Mariotti, 1929
- M. Torrini, *I collegi Universitari di Pisa*, in «*Bollettino Storico Pisano*» 1933, II, 2
- F. Hermanin, *L'aula Magna dell'Università di Pisa*, Pisa, Lischi, 1939
- C. Lombardo, *Di un'antica planimetria dello Studio pisano e del Collegio*, in «*Bollettino Storico Pisano*» 1942, pp.61-65.
- C. Lombardo, *Di un'antica planimetria dello studio pisano e del collegio di Sapienza* in *VI Centenario di fondazione della R. Università di Pisa*, 1943
- M. Luzzatto, B. Casini (a cura di), *Catalogo della mostra storica dell'Università di Pisa*, Pisa, Giardini, 1946
- L.B Alberti, *L'architettura* [traduzione di G. Orlandi], Milano, Il Polifilo, 1966
- G. Del Guerra, *Pisa attraverso i secoli*, Pisa 1967
- E. Tolaini, *Forma Pisarum*, Pisa, Nistri-Lischi, 1967
- E. Repetti, *Dizionario geografico fisico storico della Toscana*, Pisa, Cassa di Risparmio di Pisa, 1972
- L. Tanfani Centofanti, *Notizie di artisti tratte dai documenti pisani*, Bologna, Forni, 1972
- L. Dania, A. Valentini, *Adolfo De Carolis*, Fermo, Cassa di Risparmio di Fermo, 1975
- Adolfo De Carolis a Pisa: studi e disegni per l'aula Magna*, catalogo della mostra (Pisa 1977), a cura di R. Monti, Pisa, Grafica Zannini, 1977
- C. Cresti, L. Zangheri, *Architetti e ingegneri nella toscana dell'Ottocento*, Firenze, Uniedit, 1978
- E. Tolaini, *Forma Pisarum*, Pisa, 1979
- L. Zdeukauer (a cura di), *Il taccuino senese di Giuliano da Sangallo*, Bologna 1979.
- L. Nuti, *I lungarni di Pisa*, Pisa, Pacini, 1981
- F. Redi, *1824 L'anno della Meloria*, Pisa, ETS, 1984

- S. Burgalassi , *Il palazzo della Sapienza e dintorni*, Pisa, Tipografi a Artigiana di Pisa, 1986
- L. Nuti, *Pisa progetto e città 1814/1865*, Pisa, Pacini,1981
- S. Borsi, *Giuliano da Sangallo. I disegni di architettura e dell'antico*, Roma, Officina, 1985
- R. Volponi , *La Sapienza*, in «*Il rintocco del campano* » 1987, III
- R.P. Ciardi, C. Casini, L.Tongiorgi Tommasi, *Scultura a Pisa tra Quattro e Seicento*, Firenze, Cantini,1987
- R.P Ciardi (a cura di), *Il Settecento pisano. Pittura e Scultura a Pisa nel Secolo XVIII*, Pisa, Pacini,1990
- G. Garzella, *Pisa come era: topografia e insediamento dall'impianto tardoantico alla città murata del secolo XII*, Napoli 1990
- F. Redi, *Pisa com'era: archeologia, urbanistica e strutture materiali (secoli V-XIV)*, Napoli, Liguori,1991
- M. Fanucci Lovitch, *Artisti attivi a Pisa fra XIII e XVIII secolo*, Pisa, Pacini, 1991
- “*L'università di Siena – 750 Anni di Storia*”, Siena, Monte dei Paschi di Siena, Pizzi, 1991
- G.Morolli, C. Acidini Luchinat, L.Marchetti (a cura di) , *L'architettura di Lorenzo il Magnifico*, Cinisello Balsamo, Silvana, 1992
- M. Tangheroni (a cura di) *L'università di Pisa: docenti e studenti nella sua storia*, Pisa, Associazione Laureati Ateneo pisano, 1994
- Studi sulla storia dell'università di Pisa nel 150° anniversario di Curtatone e Montanara*, Pisa, Pacini Editore, 1994 (riproduzione anastatica del «*Bollettino Storico Pisano*», 1949,XVIII)
- C. Caciagli, *Pisa: città e architetture del Settecento*, Pisa, Pacini, 1994
- F.P Fiore, M. Tafuri (a cura di), *Francesco di Giorgio architetto*, Milano, Electa, 1994
- R.P. Ciardi, L.Tongiorgi Tommasi, A.Tosi, *Pisa Romantica*, Pisa, Pacini Editore, 1995
- R. Del Gratta, *L'età della dominazione fiorentina*, in *Storia dell'Università di Pisa*, 2000,I, pp. 35 e sgg.
- L. Tongiorgi Tomasi, *L'Università e gli artisti*, in *Storia dell'Università di Pisa*, Pisa , Plus 2000, II, p.664 e sgg.
- A.Tosi (a cura di), *Memoria del Novecento. Arti a Pisa nella prima metà del XX secolo*, Pisa, Pacini, 2001
- A.A. Amadio, S. Papetti, *Adolfo de Carolis. Con gli occhi del mito*, Ascoli Piceno, Fast Edit, 2002
- U. Tramonti, S. Martellucci, *Vincenzo Pilotti (1872-1956): città immaginata, città costruita*, Firenze, Alinea, 2003
- L. Blasucci, *Viaggiatori Stranieri a Pisa dal 500 al 900*, Pisa, Nistri-Lischi,2003
- R.P. Coppini, A.Tosi (a cura di), *La Sapienza di Pisa*, Pisa, Plus, 2004
- A.Panajia (a cura di) , *I palazzi di Pisa nel manoscritto di Girolamo Roncioni*, Pisa, ETS,2004
- P. Corsini, *Il patrimonio edilizio dell'università di Pisa*, Pisa, Plus, 2008
- B. Azzaro (a cura di), *L'università di Roma La Sapienza e le università italiane*, Roma, Gangemi, 2008
- E. Karwacka, *Il palazzo della Sapienza a Pisa: della sua edificazione rinascimentale*, in B. Azzaro (a cura di), *L'università di Roma La Sapienza e le università italiane*, Roma, Gangemi, 2008
- L. Zampieri, *Gli acconcimi e gli eventi delle fabbriche universitarie pisane in epoca lorenese*, ETS, Pisa 2008
- E. Karwacka , *Architettura a Pisa nel primo periodo mediceo*, Roma 2010
- R.P. Coppini, A. Breccia, *Per una storia dell' Università di Pisa*, estratto da *Annali di storia delle Università italiane Anno 14*, 2010, Bologna, CLUEB, 2010
- E. Daniele (a cura di) *Le dimore di Pisa: L'Arte di abitare i palazzi un un'antica repubblica marinara dal medioevo all'unità d'Italia*, Firenze, Alinea, 2010

- Capitolo 5.

Iervolino, I., Galasso, C., Cosenza, E. Rexel: computer aided record selection for code-based seismic structural analysis. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 8:339-362, 2010 DOI10.1007/s10518-009-9146-1.

K Yokota, T Imai, M Konno. (1981). Dynamic Deformation Characteristics of Soil Determinated by laboratory tests. *OYO Tec. Rep.* 3, pp. 13-37

Luzi, L., S. Hailemikael, D. Bindi D, F. Pacor, F. Mele, and F. Sabetta (2008), ITACA (ITalian ACcelerometric Archive): A Web Portal for the Dissemination of Italian Strong-motion Data, *Seismological Research Letters*, 79(5), 716–722. Doi: 10.1785/gssrl.79.5.716

Pacor, F., R. Paolucci, L. Luzi, F. Sabetta, A. Spinelli, A. Gorini, M. Nicoletti, S. Marcucci, L. Filippi, and M. Dolce (2011), Overview of the Italian strong motion database ITACA 1.0, *Bulletin of Earthquake Engineering*, 9(6), 1723–1739. Doi: 10.1007/s10518-011-9327-6

Chiara Smerzini & Roberto Paolucci, (2011), *SIMBAD: a database with selected input motions for displacement-based assessment and design*. Research Project DPC - RELUIS 2010-2013

Ambraseys, N., Smit, P., Douglas, J., Margaris, B., Sigbjornsson, R., Olafsson, S., Suhadolc, P. and Costa, G. (2004), Internet-Site for European Strong-Motion Data, *Bollettino di Geofisica Teorica ed Applicata*, vol. 45, no. 3, pp. 113-129.

MIBAC (2005) La Torre Restituata, Edited by Settis, Roma, Poligrafico dello Stato.

Seed, H. B., Idriss, I. M. (1970), Soil moduli and damping factors for dynamic response analyses, *Report No. EERC 70-10*, Earthquake Engineering Research Center, Univ. of California, Berkeley, Calif.

Lai C, (2012), *Definizione di input sismo-compatibile e spettro compatibili per i comuni della Regione Toscana*. Rapporto Scientifico. Dipartimento di Ingegneria Civile ed Architettura, Università di Pavia

- Capitolo 6.

Squeglia, N., 2013, The Rebuilding of San Piero a Grado Bell Tower, *Proc. Conf. Geotechnical Engineering for the Preservation of Monuments and Historic Sites*, Bilotta et Al. Eds, CRC Press, 709 - 716

- Capitolo 10.

Cattari S., Resemini S. and Lagomarsino S. (2008). Modelling of vaults as equivalent diaphragms in 3D seismic analysis of masonry buildings. *Proceedings of Structural Analysis of Historic Construction (SAHC)*. 517-524