

ALMA MATER STUDIORUM – UNIVERSITA' DI BOLOGNA

**FACOLTA' DI INGEGNERIA
CORSO DI LAUREA MAGISTRALE IN INGEGNERIA CIVILE
CURRICULUM "COSTRUZIONI PER L'EDILIZIA"
DIPARTIMENTO di Ingegneria Civile, Chimica, Ambientale e dei Materiali**

**TESI DI LAUREA
in
Chimica e Tecnologia del Restauro e della Conservazione dei Materiali**

**LA "SALA D'ARME" NELLA ROCCA RANGONI DI SPILAMBERTO (MO),
XV SECOLO : ANALISI DEI MATERIALI E RESTAURO**

Candidato: Martina Ferrari

Relatore: Ing. Elisa Franzoni
Correlatori: Ing. Gabriela Graziani
Arch. Alessandro Mordini

**Anno Accademico 2011/2012
Sessione III**

Indice

Introduzione.....	1
Cap. 1 Indagini storico-archivistiche sulla Rocca Rangoni di Spilamberto.....	2
1.1. Storia di Spilamberto e della Famiglia Rangoni.....	2
1.2. Il Castello.....	6
1.3. La Rocca Fortificata.....	9
1.4. Residenza dei Feudatari.....	13
1.5. L' Edificio seicentesco.....	15
1.6. Nascita e storia della Rocca come civile abitazione.....	16
1.7. La Rocca all'interno del tessuto urbano.....	17
1.8. Datazioni.....	18
1.9. Le fasi costruttive e la riqualificazione.....	19
1.9.1 Preesistenze.....	19
1.9.1.1 Corpo di fabbrica settentrionale.....	20
Torre nord-est.....	21
1.9.2 La corte.....	22
1.9.3 Il "vago palazzo".....	23
Corpo di fabbrica meridionale.....	23
1.9.4 Interventi novecenteschi.....	24
Cap. 2 Studi precedenti eseguiti sulla Rocca Rangoni.....	28
2.1. Indagini del Politecnico di Milano.....	28
2.1.1 Le strutture.....	28
Osservazione macroscopica.....	28
Strutture verticali.....	29
Strutture orizzontali.....	29
Cap. 3 Oggetto della tesi: la "Sala d'Arme".....	37
3.1 Identificazione dei vani.....	37
3.2 La Sala d'Arme.....	37
3.2.1 Pareti.....	41
3.2.1.2 Parete A.....	42
3.2.1.3 Parete B.....	43
3.2.1.4 Parete C.....	45
3.2.1.5 Parete D.....	47
3.2.2 Pavimento.....	48
3.2.3 Solaio.....	51
3.3 Composizione e diagnostica del solaio della Sala d'Arme.....	53
3.3.1 Travi.....	53
3.3.1.1 Trave n° 1.....	54
3.3.1.2. Trave n° 2.....	56
3.3.1.3 Decorazioni.....	57
3.4 Analisi dei solaio delle stanze adiacenti alla Sala d'Arme.....	58
3.4.1 Composizione e diagnostica del solaio della stanza n° 112.....	58
3.4.1.1 Travi.....	59
3.4.1.1.1 Trave n°1.....	59
3.4.1.1.2 Trave n° 2.....	59
3.4.1.1.3 Puntello in legno.....	60

3.4.2	Composizione e diagnostica del solaio della stanza n° 108	60
3.5	Diagnostica termo igrometrica nella Rocca Rangoni.....	62
3.5.1	Monitoraggio microclimatico.....	62
3.5.2	Rilievo termografico.....	63
3.5.3	Risultati delle indagini.....	64
Cap. 4 :	Sopralluogo e campionamenti.....	67
4.1	Individuazione dei campioni.....	67
4.2	Analisi di laboratorio effettuate sui campioni.....	73
4.2.1	Calcimetria.....	74
4.2.2	Cromatografia ionica.....	76
4.2.3.	Analisi termogravimetrica o TGA.....	79
4.2.4	Diffrazione a raggi X.....	79
4.3	Risultati delle analisi condotte sul Campione n° 1.....	81
4.3.1	Cromatografia ionica	81
4.3.2	Calcimetria.....	83
4.4	Risultati delle analisi condotte sul Campione n° 2.....	84
4.4.1	Cromatografia ionica.....	84
4.5	Risultati delle analisi condotte sul Campione n° 3.....	85
4.5.1	Campione n° 3A.....	86
4.5.1.1	Termogravimetria.....	86
4.5.1.2	Diffrazione ai Raggi X.....	88
4.5.2	Campione n° 3B.....	88
4.5.2.1	Termogravimetria.....	88
4.5.2.2	Diffrazione ai Raggi X.....	90
4.6	Risultati delle analisi condotte sul Campione n° 4.....	90
4.6.1	Termogravimetria.....	90
4.6.2	Osservazione al microscopio ottico.....	91
4.6.3	Diffrazione ai raggi X.....	92
4.7	Risultati delle analisi condotte sul Campione n° 5.....	92
4.7.1	Termogravimetria.....	92
4.7.2	Diffrazione ai raggi X.....	94
4.8	Risultati delle analisi condotte sul Campione n° 6.....	94
4.8.1	Cromatografia ionica.....	96
4.8.2	Separazione manuale e setacciatura.....	97
4.8.3	Campione 6a -tinta con supporto-.....	97
4.8.3.1	Analisi granulometrica.....	97
4.8.3.2	Diffrazione ai Raggi X.....	98
4.8.3.3	Termogravimetria.....	99
4.8.4	Campione 6b - supporto-.....	100
4.8.4.1	Analisi granulometrica.....	100
4.8.4.2	Diffrazione ai Raggi X.....	101
4.8.4.3.	Termogravimetria.....	103
4.9	Risultati delle analisi condotte sul Campione n° 7.....	104
4.9.1	Diffrazione ai Raggi X.....	105
4.9.2	Termogravimetria.....	106

Cap. 5	Microprogettazione degli interventi di Restauro dei Materiali della Sala d'Arme	108
5.1	Intervento sulla pavimentazione	108
5.2	Interventi sulla parete A	110
5.3	Interventi sulla Parete B	113
5.4	Interventi sulla parete C	116
5.5	Interventi sulla Parete D	120
5.6	Conclusioni della microprogettazione degli interventi di restauro dei materiali	124
Cap. 6	Riqualificazione della Sala d'Arme come accesso principale del Museo dell'Aceto Balsamico di Modena	125
6.1	Il progetto architettonico	125
6.2	La progettazione del soppalco	128
6.2.1	Progettazione dei travetti in legno	130
6.2.2	Progettazione della prima trave	138
6.2.3	Progettazione della seconda trave	143
6.2.4	Progettazione del profilo UPN	148
6.2.5	Progettazione del parapetto in vetro	152
6.2.5.1	Predimensionamento	158
6.2.5.2	Progettazione e verifica allo SLU	159
6.2.5.3	Progetto e verifica allo Stato Limite d'Esercizio	160
6.2.5.4	Verifica all'azione sismica	161
6.3	Analisi Statica Lineare	164
6.4	Collegamenti	172
6.5	Protezione degli elementi in acciaio	179
6.6	Protezione degli elementi lignei	180
	Conclusioni	181
	Bibliografia	183

Introduzione

Rocca Rangoni è un'antica residenza nobiliare, di epoca medioevale, oggi proprietà del Comune di Spilamberto, il quale ha intrapreso il progetto di realizzazione, al suo interno, del nuovo Museo dell' Aceto Balsamico di Modena, prodotto locale famoso in tutto il mondo.

Essendo la Rocca una costruzione molto grande e articolata, in quanto nacque nel 1200 come fortificazione a difesa del territorio modenese, non esiste un completo progetto di restauro e riqualificazione, ma solamente un indirizzo generale, supportato da studi di fattibilità, da seguire, nel riqualificare singole parti per volta della rocca stessa.

La tesi riguarda il restauro dell'antica “Sala d'Arme”, stanza situata nell'ala nord-est; questo vano, oggi si presenta come un doppio volume, di altezza pari a 6,50m, a seguito del crollo del solaio intermedio. In passato, il locale inferiore era adibito a stalla, mentre il locale superiore era la sala di rappresentanza dell'”appartamento d'inverno”, alloggio quattrocentesco dei marchesi, di notevole pregio artistico, anche per il soffitto a cassettoni lignei decorati.

Nella prima parte della tesi si è effettuata la diagnostica dei materiali presenti all'interno della stanza mediante diversi campionamenti e sulla base dei risultati ottenuti dalle analisi di laboratorio, si è elaborato un progetto di restauro dei materiali.

Nella seconda parte, seguendo le indicazioni presenti all'interno dello studio di fattibilità redatto dall'Università di Ferrara, secondo le quali il vano sarebbe destinato ad accesso principale del museo, si è creato un progetto architettonico e strutturale della stanza, nel quale si è pensato di collocare un soppalco in legno e acciaio, utilizzabile come ulteriore spazio per il bookshop allestito nel vano attiguo alla stanza. La scelta dei materiali è stata studiata per creare una soluzione fortemente tecnologica, tale da allontanarsi completamente dal carattere storico dell'edificio, evitando in questo modo possibili imitazioni dell'antico solaio crollato, del quale non si hanno informazioni materiche e tecnologiche precise.

Cap. 1 Indagini storico-archivistiche sulla Rocca Rangoni di Spilamberto

1.1. Storia di Spilamberto e della Famiglia Rangoni

Spilamberto è un Comune situato in provincia di Modena, di origini romane; scritture antiche raccontano come nel 1210, Spilamberto si trasformò da Giurisdizione in Castello fortificato, fisionomia che poi manterrà fino agli inizi del XX secolo. La fortificazione venne adottata dal Comune di Modena per presidiare il confine con i territori bolognesi, viste le continue “lotte di potere” tra comuni, signori e famiglie. Infatti, per il territorio modenese, tutto il XIII secolo fu un susseguirsi di scontri tra le famiglie guelfe e ghibelline; per dieci anni i bolognesi dettennero la supremazia sul territorio, dopo di che la guerra si riaccese fino alla definitiva sconfitta dei ghibellini.

Nel 1264, anno in cui gli Estensi assunsero il controllo della podesteria cittadina, il potere finora detenuto dalla ristretta oligarchia comunale, venne trasferito alla famiglia del signore e alla sua corte. Gli organi collegiali persero rilevanza, divenendo organi puramente esecutivi, a vantaggio del Consiglio di Corte, a cui spettavano le decisioni più importanti.^[3]

Nel corso del Duecento si fecero sempre più comuni le podesterie interne, coperte da famiglie che accrescevano sempre più il loro potere e prestigio, grazie alla chiamata dei loro discendenti alla guida dei Comuni vicini; nei territori emiliani, si ricordano i Pico, i Rangoni e i Roberti a Modena, gli Este e i Torelli a Ferrara, i Bentivoglio a Bologna.

L'origine dei Rangoni si fonda su due diverse ipotesi: la prima narra di un certo Theodoro Rangoni, bizantino, giunto in Italia per combattere i Goti nell'anno 500, mentre la seconda, propone un'origine germanica della famiglia stessa; infatti, nel 1167, era imperatore Federico Barbarossa ed è ragionevole pensare che i suoi collaboratori fossero anch'essi tedeschi.

Ponendo l'attenzione sul territorio modenese, alla fine del XIII secolo, emersero due gruppi familiari, quali i Boschetti, sostenuti dall'ambiente ecclesiastico locale, e i Rangoni, che godevano di forti appoggi esterni.^[2]

Furono proprio i Rangoni, nel 1289, a proclamare Obizzo II d'Este, già Marchese di Ferrara, come proprio signore, per far fronte ad una forte crisi economico-finanziaria che stava sconvolgendo il Comune. Il Marchese non esitò ad assumere i pieni poteri sul

territorio in essere, rallentando se non bloccando il progresso democratico già vigorosamente in atto sul territorio.

Obizzo intraprese anche una campagna di riappacificazione tra i guelfi e le fazioni ghibelline, precedentemente esiliate, combinando il matrimonio tra suo figlio Aldobrandino e Alda, figlia di Tobia Rangoni, esponente della nobiltà modenese.

Ben presto, anche il Comune di Reggio elesse Obizzo come proprio signore; così facendo, gli Este si affermarono definitivamente come potenza sul territorio italiano, ottenendo nel 1452 il titolo ducale per Modena e Reggio da parte dell'Imperatore Federico III e per Ferrara da parte del Papa, nel 1471.

La dinastia estense si trovò, in seguito all'ampliamento territoriale, a doversi confrontare con abitudini e usi estremamente diversi tra loro; questa situazione venne gestita al meglio dalla famiglia feudale, che inizialmente si preoccupava di approvare, almeno in parte, i capitoli e le richieste presentate dalla comunità appena entrate a far parte dei loro domini, e successivamente, a distribuir loro, a titolo di feudo, i loro immensi possedimenti fondiari, guadagnando così facendo, in termini di consenso, ciò che si perdeva in termini di omogeneità amministrativa.

I feudi ferraresi però, non avevano gran valore agli occhi dei sudditi, in quanto abitanti di terre lontane dalla capitale; in cambio della propria fedeltà, desideravano essere premiati con segni tangibili e spendibili a livello locale; perciò, i duchi dovettero beneficiarli con regalie e prestigio connessi all'esercizio della supremazia del territorio, ma anche del proprio patrimonio di rapporti con gli altri Stati italiani, messi a disposizione dei nobili locali.^[3]

Nel 1468, il conte Niccolò Rangoni entrò nel castello di Spilamberto con un gran seguito di persone armate e cacciò il cugino Ugo Rangoni, il quale si salvò calandosi dalle mura e attraversando la fossa che le circondava.

L'investitura feudale non significò necessariamente il trasferimento dei Rangoni presso Spilamberto: infatti, i Rangoni erano tra i massimi esponenti della borghesia modenese, città presso la quale avevano molteplici interessi da seguire; inoltre, molti componenti della famiglia erano uomini d'arme, impegnati politicamente su tutto il territorio italiano, cosa che li allontanava spesso da casa. In ogni caso, l'assegnazione di un feudo ne comportava solamente la sua amministrazione e non la sua proprietà; quindi,

Spilamberto venne vista dai Rangoni, almeno all'inizio, come una mera rendita, semmai curata da un collaboratore di fiducia. Molto probabilmente durante le visite presso il borgo, questa persona all'inizio, soggiornava presso Palazzo del Bargello, abitazione considerata talmente modesta, che in tempi seguenti, ne venne edificata una nuova, nota col nome di Comuna Vecchia; anche perché allora la Rocca aveva ancora le sembianze di una caserma, presso la quale i Rangoni mantenevano solamente i loro uffici.

In seguito, fino al 1500, la Rocca subì importanti interventi di ristrutturazione da parte di Niccolò Rangoni, il quale apportò il primo grande contributo nel trasformare il castello in residenza feudale.

Niccolò prese in moglie Bianca Bentivoglio, figlia dei potenti signori di Bologna, e dal matrimonio nacquero dieci figli, di cui il primogenito, Guido, fu sicuramente l'esponente della famiglia che raggiunse il più alto incarico a livello politico.^[3]

Nel 1510 il castello venne occupato, e in seguito devastato dalle milizie di papa Giulio II della Rovere; negli anni seguenti, la rocca diede ospitalità a molte cariche illustri, da Guido II Rangoni, a papa Paolo III Farnese, a Carlo Borromeo, sino a Baldassarre Rangoni e Giulia Orsini.

Infatti alla morte di Guido, avvenuta nel 1539, la podesteria passò nelle mani di suo figlio Baldassarre, talmente impegnato nei suoi affari che delegò il governo di Spilamberto a suo cugino Pallavicino Rangoni e sua moglie Giulia Orsini; dopo numerose peripezie nelle quali Baldassarre fu visto prigioniero, mandato in Dalmazia quale Governatore Generale delle Milizie Venete, vi morì nel 1581. Alla sua morte, il comando del feudo venne preso direttamente dal Duca Alfonso II (1533-1597) fino al 1594, quando Bianca Rangoni, figlia di Baldassarre, sposando il cugino Lodovico Rangoni, ripristinò la linea dinastica, riottenendo il controllo del feudo.^[2]

Nella seconda metà del XVI secolo, il feudo di Spilamberto era governato direttamente dagli Este, i quali trascinarono l'edificio in uno stato di degrado avanzato; questo perché il Commissario di nomina ducale viveva all'interno di un unico ambiente, ridenominato "Sala", da cui usciva solamente al suono della campanella di emergenza.

Agli inizi del XVII secolo, il castello tornò di proprietà dei Rangoni e venne da subito abitato dalla Marchesa Bianca, la quale trasformò la rocca in un edificio sontuoso e confortevole.

La Signoria dei Rangoni diede un forte impulso economico alla vita sociale del paese, anche grazie alla realizzazione, nel 1610, della prima filanda per la lavorazione dei bozzoli, al fine di ottenere, con l'ausilio dell'acqua dei due canali, la seta.

La filanda, primo insediamento industriale degli stati estensi continuò la propria attività fino ai primi del '900, anni in cui la Rocca venne usata come magazzino per i bozzoli.^[14]

In questi anni la rocca divenne un ambiente così gioiale e allegro, che fu scelta come meta di vacanze da parte di molti nobili, ma anche come luogo in cui organizzare feste, matrimoni ed eventi importanti; purtroppo tra il 1643 e il 1644 venne occupata dalle truppe papaline nel corso della Guerra del Castro e proprio in occasione di questi eventi bellici, la comunità fece murare la porta orientale della Rocca e le finestre.

Questo non fu l'unico episodio nel quale la Rocca ospitò in maniera forzata dei soldati: infatti, venne occupata da quartieri di combattenti dell'imperatore Leopoldo I d'Asburgo verso la fine del XVII secolo.

Durante il XVIII secolo, la Rocca subì interventi di riqualificazione, quali il riempimento della "fossa" perimetrale a tutto l'edificio, e, se rimase meta estiva prediletta dai marchesi del tempo, smise però il ruolo di residenza abituale della famiglia Rangoni; il castello venne successivamente rioccupato dalle truppe cesaree, circa ottocento soldati tedeschi, nel conflitto relativo alla guerra di secessione spagnola.

[3]

Nel 1796 i francesi arrivarono a Modena e vennero aboliti i feudi, quindi il marchesato dei Rangoni venne soppresso e il territorio di Spilamberto, nel periodo napoleonico, venne ridotto al capoluogo e alla sola villa di San Vito; con la restaurazione, al Comune vennero aggregate le antiche comunità di Castelnuovo e Castelvetro, che ne divennero sezioni. Nel 1850 la sezione di Castelvetro passò al Comune di Vignola e solamente San Vito rimase frazione di Spilamberto; la Rocca tornò nuovamente ad essere proprietà della famiglia Rangoni, quando i cugini Gherardo e Luigi Rangoni contestarono la natura feudale del bene, dichiarandone l'allodialità e chiedendone la restituzione.

Nel 1860 si presume che la Rocca fosse sede di un "Istituto degli adolescenti", di cui però non si conoscono altre notizie.

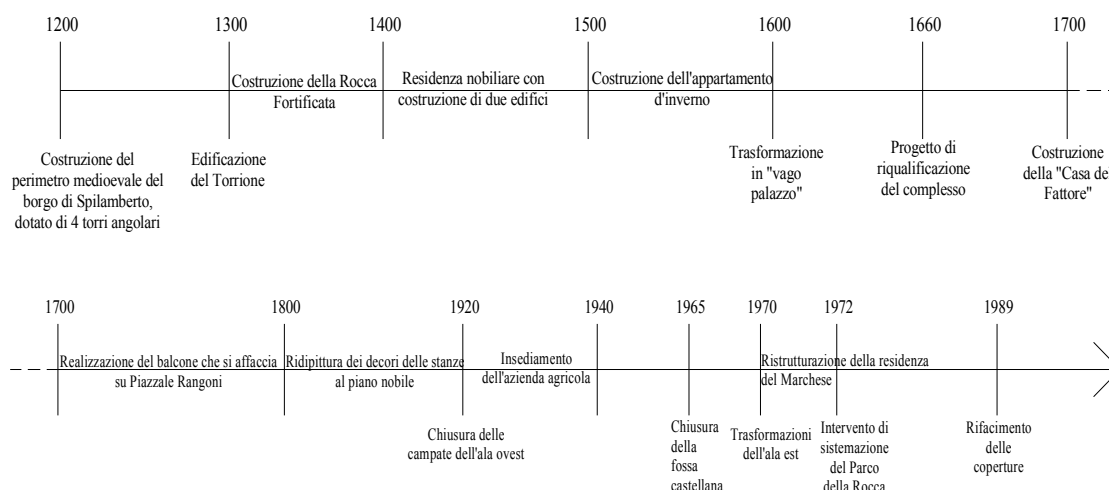


Figura 1 : Cronologia dei principali interventi realizzati sulla Rocca

1.2 Il Castello

Oltre ad essere situato su un confine di natura politica, il nuovo castello si trovava al confine tra la sfera di influenza della Diocesi di Modena e quella dell'Abbazia di Nonantola, enti ecclesiastici fortemente rivali nell'epoca medioevale.^[14]

Il borgo di Spilamberto, formato al suo interno da lunghe schiere di edifici parallele, intersecate da strade ortogonali, venne dotato di una triplice cinta muraria perimetrale di forma rettangolare; la più esterna era caratterizzata da merlatura e terrapieno esterno ed interno, e circondata su tutto il perimetro da un fossato (Fig. 2).

Il recinto era dotato di quattro torri angolari quadrilatere (Fig.2), caratterizzate da una base a scarpa e merlature a coda di rondine, e di quattro porte d'accesso sugli orientamenti principali.

L'ingresso principale era ad ovest, dove nel Trecento venne eretto il "Torrione" (Fig.3), in seguito alla cacciata degli Estensi da parte dei Modenesi; dovendo difendere maggiormente il territorio, decisero di rafforzare maggiormente il castello, mediante una torre dotata di merlature a coda di rondine.



Figura 2 : Territorio di Spilamberto nella metà del XVIII secolo^[8]



Figura 3: Torrione di Spilamberto ^[7]

In corrispondenza di essa, era presente un ingresso pedonale e uno carrabile, dotato di ponte levatoio, come testimoniano le aperture ancor oggi presenti, in cui scorrevano le catene per abbassare e sollevare il ponte. La porta sormontata da una “bertesca” in muratura, con merli a coda di rondine, è fiancheggiata da una piccola torre (Fig.4), coronata da merli, oggi tamponati.



Figura 4 : *Il Torrione con ingresso pedonale*^[7]

Le porte erano attraversate da due assi stradali principali, ortogonali tra loro: la via che da Spilamberto portava a Vignola, l'attuale Via S. Maria, e la “via di Modena”, l'attuale Corso Umberto I (Fig.5), il quale, oggi come allora congiunge l'ingresso occidentale del borgo alla Rocca Rangoni.^[1]



Figura 5 : *Corso Umberto I, asse principale del borgo*^[7]

1.3. La Rocca Fortificata

La rocca è tutt'oggi situata ad est del territorio comunale, sulla riva sinistra del fiume Panaro, dove una volta sorgeva il muro di cinta dell'antico borgo; costruita molto probabilmente attorno al XIV secolo, si presentava come una struttura fortificata, protetta da un fossato pieno d'acqua, avente tutte le caratteristiche del presidio politico e militare del territorio (Fig. 6).

La rocca fu costruita riutilizzando strutture preesistenti, delle quali rimangono tracce nell'ala nord, come murature di grosso spessore, che vengono ricondotte ad una torre alla quale poggiavano le strutture adiacenti, e in prossimità del fronte sud, dove il muro conduce al punto in cui è rimasta un'antica torre d'avvistamento.

La posizione della prima torre, eretta proprio sull'asse principale est-ovest del centro abitato, porta a pensare che fosse un primo presidio dell'ingresso alla città verso il Panaro. La linea della cortina a settentrione oggi prosegue con un basso muro edificato

di recente lungo il tracciato storico del recinto, a segnare il confine tra spazio pubblico e privato.

Di pertinenza della rocca è anche il cosiddetto “Prato della Rocca”, situato ad est dell’edificio, e Piazzale Rangoni, situato sul fronte ovest, d’affaccio sul paese.^[1]



Figura 6: *Individuazione del perimetro dell'antico castello fortificato (tratteggio), della Rocca (blu) e della viabilità storica principale (rosso)*

Ancora oggi, l’impianto fortificato della rocca appare di forma quadrilatera di tipo simmetrico (Fig. 6), con torri angolari collegate al corpo centrale, a descrivere una corte interna; lungo i fronti est ed ovest invece, si trovano in posizione mediana due torri di dimensioni maggiori (Fig. 7), attraverso le quali è possibile accedere alla corte interna sopra citata (Fig.8).



Figura 7 : *Fronte ovest della Rocca prospiciente Piazzale Rangoni^[9]*



Figura 8 : *Corte interna della Rocca^[10]*

Le quattro torri sono quadrilatere, il loro profilo in pianta sporge rispetto all'allineamento dei corpi centrali e la loro altezza è maggiore rispetto ad essi (Fig.9);

le due torri mediane hanno caratteristiche simili, se non un'altezza maggiore rispetto alle prime.^[1]



Figura 9 : Fronte est della Rocca ^[11]

Il recinto murario era stato creato in modo da difendere la residenza; infatti, ancor oggi è visibile la base costituita da un elemento a scarpa con un apparato composto da caditoie e beccatelli in sommità, il quale creava un camminamento di ronda attorno alla Rocca, protetto da un parapetto merlato, oggi purtroppo non più visibile, in quanto tamponato.

Nonostante, negli anni, il circuito difensivo sia stato più volte rivisto per cambiare e adattare gli spazi interni, è possibile ancora riconoscere il perimetro della struttura fortificata; i segni più evidenti si ritrovano sul fronte nord, dove alcuni merli sono stati capitozzati, ad eccezione di quelli posti sulle torri, mentre la struttura a sbalzo è libera, in quanto sono stati tamponati solo i fori delle caditoie.

Nel lato sud è stato demolito il sistema a sbalzo del muro di cinta e i merli risultano tamponati; sul fronte ovest, invece, i merli sono ancora presenti, anche se capitozzati;

alcuni lacerti d'intonaco decorato nascondono ancora esigue porzioni di struttura fortificata. (Fig. 10)

Il fronte est ha mantenuto tracce del sistema di difesa piombante sulle torri, che vede i beccatelli tamponati, a differenza delle caditoie.^[1]



Figura 10 : *Lacerti d'intonaco decorato sul prospetto ovest*

1.4. Residenza dei Feudatari

Nei secoli, la rocca fortificata ha subito numerosi interventi edilizi per essere trasformata in residenza feudale, soprattutto a partire dalla seconda metà del XIV secolo, quando il castello venne donato ai Rangoni, i quali furono soggetti ad investitura feudale. Le nuove costruzioni sono state erette all'interno del recinto medioevale, a ridosso del perimetro murario esistente, anche se la loro altezza si manteneva decisamente più ridotta. Il corpo settentrionale di nuova costruzione, presentava la peculiarità di essere un doppio volume, attraversato in mezzeria da un'imponente scalinata che collegava gli ambienti interni della residenza.

Ai lati est ed ovest vennero costruiti due corpi di fabbrica a sviluppo lineare, su due livelli, pressoché speculari e provvisti di portici, ognuno dei quali presenta quattro campate, oggi tamponate verso corte; una struttura simile si trova anche sul lato meridionale.

Al piano terra è presente un porticato a quattro campate con volte a crociera, archi a sesto ribassato marcati da ghiere in cotto, colonne in mattoni con il fusto sagramato e capitelli in pietra arenaria dipinti; al piano superiore invece, c'è una serie di finestre a tutto sesto con cornice in cotto. Le facciate erano rivestite da uno strato d'intonaco con inciso un motivo a simulare i letti di posa dei laterizi.^[1]

In seguito, le parti porticate vennero sopraelevate di un piano e, in occasione di questo intervento, le facciate furono ridisegnate, tamponando le finestre a tutto sesto del primo piano per realizzarne altre di forma rettangolare, in asse con quelle realizzate per il nuovo livello.

L'intervento di sopralzo non è stato rinvenuto in alcuna fonte, però si pensa sia stato realizzato nel periodo in cui Giulia Orsini e Bianca Rangoni furono Signore di Spilamberto, in occasione di eventi sociali di notevole pregio ed importanza.

Quando Guido III ereditò la rocca, avviò da subito importanti interventi di riqualificazione, soprattutto per omogeneizzare l'aspetto della struttura, conferendogli l'aspetto di palazzo; la parte sommitale dell'edificio, corrispondente all'ultimo piano fu quindi interessato da un intervento volto a portare tutti i corpi di fabbrica alla medesima quota, aprendo contestualmente nuove aperture per regolarizzare i prospetti esistenti. Per collegare a questa nuova quota le parti di levante e ponente venne realizzato a sud un corpo di fabbrica molto stretto, comprendente "la galleria".^[1]

La residenza venne inoltre ampliata verso sud, oltre il recinto medioevale, grazie alla costruzione della "Casa del Fattore", alla quale si accede sia da Piazzale Rangoni, sia dalla corte d'onore, alla quale è collegata. Non si sa se questo restauro venne finanziato con soldi pubblici o meno, essendo la Rocca ancora un bene pubblico, in quanto non compare nei censimenti catastali di epoca ducale come bene allodiale della famiglia Rangoni. Infatti l'erede del Libero Comune di Modena era il Duca, il quale aveva la tendenza a considerare di sua proprietà i beni feudali, stando attento a che nessuno se ne

impossessasse; questa tendenza si estese anche ai Marchesi, i quali iniziarono ad utilizzare la Rocca per propri fini personali, fino al 1800 circa.^[15]

Oltre l'ala sud si estende il terrapieno che si sviluppava nell'intorno della cinta muraria, dove oggi è stato ricreato un giardino pensile, sopraelevato di un'altezza variabile tra i 3 metri e i 5.50 metri dal fondo stradale, costituito da diverse specie arboree.

Dal giardino pensile, grazie ad alcuni gradini collocati a fianco del terrapieno, è possibile raggiungere il parco della Rocca, il quale è raggiungibile anche dalla torre est, ingresso per chi arriva dal paese; il parco, ridenominato "Prato della Rocca", si estende a sud fino alla sponda del Panaro e a nord fino alla strada provinciale per Bologna, ed è ovunque recintato da mura o recinzione metallica.

Ai primi del Novecento, i marchesi Rangoni Machiavelli si trasferirono a "Villa Ida", fatta costruire in un terreno a nord-est del parco, in stile liberty.^[1]

1.5. L' Edificio seicentesco

I locali dell'antica abitazione sono collegati alla "Casa del Fattore", ultima residenza dei Marchesi, grazie ad un corridoio presente al piano ammezzato del corpo sud, o tramite un terrazzino, che collega la galleria del piano nobile con le stanze del secondo piano, poste alla medesima quota.

La residenza si sviluppa su tre livelli, con un' ulteriore cantina e un sottotetto non praticabile.

L'ambiente cantinato si trova a sud, ed ha un'altezza tale da raggiungere la quota del primo piano; al piano terra sono presenti un ambiente destinato ad autorimessa, percorrendo il quale ci si affaccia sul parco, un locale caldaia accessibile solo dall'esterno e gli ingressi alle diverse residenze sopra descritte; gli ultimi due piani invece, sono sede dell'abitazione vera e propria: al primo piano troviamo la zona giorno, articolata in dieci stanze collegate da un corridoio, mentre al secondo piano troviamo la zona notte.

Dalle sale del primo piano è possibile accedere direttamente al Parco della Rocca, attraversando il giardino pensile.^[1]

Per tutta l'età moderna, la vita di Spilamberto ruota attorno alla Rocca, elemento di forte stimolo per l'intera comunità, viste le continue feste ed eventi che vedono protagonisti

la classe nobiliare del periodo. Forse per questa visione della rocca come “casa di campagna”, i Rangoni si stabilirono per lo più in città, in quanto il prestigio della Modena cinquecentesca era sicuramente più attraente.

La Rocca però, non fu solo luogo di cerimonie, ma anche di eventi cruenti, scaturiti dalla continua litigiosità tra i diversi rami consanguinei.^[14]

1.6. Nascita e storia della Rocca come civile abitazione

La Rocca, edificio di elevatissimo valore storico-culturale situato all'interno del comune di Spilamberto, sorge su un complesso più antico, articolato attorno ad una grossa torre, che rappresentò il nucleo difensivo del castello edificato nel XIII secolo dal Comune di Modena per contrastare i continui attacchi da parte dei Bolognesi.

Originariamente orientata verso il fiume, dalla cui parte era l'ingresso principale, conserva ancora oggi le tracce dell'antico ponte levatoio, in corrispondenza delle torri, e delle mura perimetrali.

Nel 1353, la Rocca di Spilamberto venne donata alla famiglia Rangoni, la quale divenne feudataria a partire dal 1454, di Spilamberto, San Vito, Collecchio, Castelvetro, Castelnuovo, Levizzano, Campiglio e Rosola; si ipotizza che, contestualmente a questa nomina, la Rocca assunse forma di quadrilatero fortificato a pianta regolare, con torri, merlature e caditoie, a rappresentare presidio politico e militare del territorio.

Nella seconda metà del Quattrocento, la Rocca subì un importante intervento di trasformazione ad opera di Niccolò Rangoni, condottiero e Signore di Spilamberto dal 1468 al 1500, proprio per via del suo matrimonio, nel 1481, con Bianca Bentivoglio, figlia di Giovanni, Signore di Bologna. Proprio a questo periodo risale la realizzazione dell' “appartamento d'inverno”, dimora dei novelli Signori, ricavato in corrispondenza del piano ammezzato del corpo settentrionale dell'edificio e con vista sul parco.^[1]

Tra la fine del XV e l'inizio del XVI secolo, la Rocca subirà ulteriori interventi, trasformandosi sempre più in residenza nobiliare, fino a prendere la denominazione di “vago palazzo”, nel Seicento, proprio grazie alla ricchezza di arredi e pitture che vantava.

Nel XVIII secolo venne costruita la “Casa del Fattore” su parte del fossato sud della Rocca e venne aggiunto un elegante balcone sulla facciata prospiciente la piazza, oltre alla decorazione di finte finestre sulla stessa facciata, per far assumere al castello sempre più l’aspetto di “palazzo urbano”; in seguito al trasferimento della famiglia Rangoni nella nuova residenza, Villa Ida, agli inizi del Novecento, la Rocca ospitò inizialmente la sede dell’azienda agricola di famiglia, per poi essere totalmente abbandonata alla chiusura della stessa.^[1]

Solo la “Casa del Fattore” venne ristrutturata per divenire abitazione del Marchese Rangoni fino al 2004, anno della sua scomparsa.

Il Novecento è il secolo nel quale, grazie ad una notifica di vincolo, Palazzo Rangoni venne inserito all’interno degli edifici di carattere storico-artistico contemplati dalla legge n.364 del 20 giugno 1909.^[15]

Nell’agosto 1913, la Cassa depositi e prestiti accordò il mutuo per la demolizione delle mure castellane, realizzata con una vasta opera di abbattimento dei bastioni dei tratti murari che cingevano il paese; il mutuo, però, non servì solamente alla creazione di nuove aree edificabili, ma anche per il risanamento della Rocca Rangoni, di proprietà del nobile casato spilambertese. Il Marchese Giuseppe Rangoni Machiavelli, pur ricoprendo importanti cariche pubbliche, non esitò ad accettare l’indiretto finanziamento per il suo immobile.^[15]

Dal 19 aprile 2005, la Rocca, assieme al parco, è divenuta proprietà comunale, a seguito della vendita ad opera della famiglia Rangoni Machiavelli; in seguito all’acquisizione, il Comune ha iniziato opere di riqualificazione di parti della Rocca stessa, per creare luoghi di aggregazione culturale e sociale per la cittadinanza.

1.7. La Rocca all’interno del tessuto urbano

Il tessuto urbano di Spilamberto sembra disporsi attorno ad un asse principale, denominato “via di mezzo”, che parte dalla torre d’ingresso al castello, verso Modena, ed entra nel corpo della rocca, al centro del fronte occidentale.

Questo asse nevralgico del borgo prendeva il nome di “via di Modena”, oggi corrispondente a Corso Umberto I, il quale, oggi come allora, è la direttrice centrale del

centro storico di Spilamberto, un vero e proprio elemento coordinatore degli spazi urbani.

Una particolarità di Corso Umberto è che, trascurando la porzione meridionale, l'asse attraversa esattamente la mezzeria della rocca, sfociando sul Fiume Panaro.

L'antica residenza del feudatario continua ad essere il traguardo visivo di un percorso suggestivo e punto di fuga di una prospettiva che si percepisce attraversando la porta castellana che guarda verso Modena.^[16]

1.8. Datazioni

Un'attenta analisi ha permesso di definire ben tredici diverse fasi costruttive, che si sono succedute tra il XIV secolo e il XX secolo.^[1]

All'interno dell'edificio, come testimonianza storica e strumento di datazione abbastanza certo, si può far riferimento alle pitture presenti sul solaio della "camera degli sposi" situata nel corpo a settentrione: si tratta di affreschi e decori che rimandano all'unione matrimoniale tra Bianca Bentivoglio e Niccolò Rangoni, attribuiti alla Bottega di Agnolo e Bartolomeo degli Erri. Anche i capitelli presenti nei portici sono stati confrontati con altri dello stesso stile, situati nel territorio parmense, precedentemente datati e fatti risalire ai primi del Cinquecento; questo ha permesso di datare l'intera costruzione del manufatto porticato, di cui essi fanno parte.

Le trasformazioni messe in opera durante il restauro del 1660 riguardarono prevalentemente interventi come l'abbassamento dei solai utilizzando materiale di risulta, apertura di nuovi affacci sia sulla corte che verso il parco, tamponando alcune finestre preesistenti o variandone la forma, e spostamento dei camini e delle relative canne fumarie.^[1]

La "camera degli sposi" di cui si è sopra accennato si trasformò in "camera del Belvedere", grazie all'apertura di tre nuove aperture, una per ciascun lato, di forma arcuata e rettangolare; le preesistenti finestre vennero tamponate e successivamente tagliate per creare accessi al ballatoio esterno che correva lungo tutto il perimetro della torre.

Visto le evidenti testimonianze, è giusto pensare che in passato la stanza fosse dotata di un balcone, oggi andato perso per via di un crollo; a seguito della riqualificazione, il

locale cambiò anche dimensioni, in quanto venne realizzato un vano scala per collegare il piano nobile alla sala di rappresentanza quattrocentesca; anche questo negli anni subì ulteriori modifiche, mostrandosi oggi come un corridoio di servizio.

Nel XVIII secolo il basamento della torre di levante venne rivestito da un paramento murario “d’attesa”^[1] in laterizio, fino al livello del sistema di difesa piombante; nella parte superiore, venne realizzato un disegno di un guscio, uguale a quello presente in facciata.

Nel corso dell’Ottocento vennero ridisegnati dei decori floreali nelle stanze del piano nobile, mentre tra la fine del XIX secolo e l’inizio del XX secolo, vennero chiuse le aperture secondarie della “camera del Belvedere”.

Arrivando all’ultimo intervento, realizzato attorno al 1989, la traccia più significativa è sicuramente lasciata dal rifacimento del manto di copertura, che ha portato alla demolizione di porzioni di muratura del sopralzo cinque-seicentesco.

1.9. Le fasi costruttive e la riqualificazione

1.9.1 Preesistenze

Le mura fortificate della Rocca furono costruite lungo il margine orientale del castello, di cui ancora oggi è possibile ammirare alcuni resti, tra cui una torre posta a sorveglianza dell’ingresso di levante al castello, simmetrica al Torrione trecentesco, e alcune porzioni di strutture in ciottoli situate alla base del fronte meridionale dell’edificio; proprio su queste strutture si ergono due paramenti murari differenti, le cui superfici hanno un’estensione limitata rispetto a quella dell’intero prospetto.

Questi paramenti delimitavano i primi corpi di fabbrica ad uso residenziale, costruiti all’interno del perimetro difensivo.

I molteplici vani presenti all’interno della Rocca sono distribuiti su quattro livelli differenti che si presentano disomogenei all’interno dei quattro corpi di fabbrica principali.^[1]

1.9.1.1 Corpo di fabbrica settentrionale

Nell'edificio posto a nord, si individua una scala principale, ad ovest della quale si trovano un piano seminterrato e uno ammezzato, i cui ambienti raggiungono altezze diverse, mentre ad est viene a mancare il seminterrato; sopra al piano ammezzato si trova il piano nobile, la cui quota è omogenea in tutto il complesso, e sopra il quale c'è un piano sottotetto non praticabile.

In funzione delle diverse destinazioni d'uso, l'edificio può essere trattato come se fosse diviso in due zone, la prima posta a nord-ovest e la seconda a nord-est: di conseguenza, la porzione ad ovest possedeva un doppio affaccio, dato dalle finestre sulla corte, di forma pressoché quadrata, incorniciate da elementi in cotto dipinti, e da una finestra aperta sul cortile, avente le stesse caratteristiche delle prime. A seguito di saggi, si è ipotizzato che l'edificio dovesse avere la stessa estensione della grande sala che si trova al piano rialzato, e vi si accedeva mediante un portale, prospiciente la corte, anch'esso rifinito in cotto, ma oggi tamponato.^[1]

La porzione situata a nord-est, invece, doveva estendersi fino ad una quota oggi corrispondente alla copertura, così come si può evincere dai segni presenti sulle murature; gli spazi interni fanno pensare che appartenesse al cosiddetto “appartamento d'inverno”, costruito in occasione del matrimonio tra Niccolò Rangoni e Bianca Bentivoglio, residenza su due livelli dove si trovavano i locali di servizio a piano terra e l'abitazione vera e propria al piano superiore. La presenza delle insegne dei due sposi, così come alcune porzioni di decorazioni che rivestivano il solaio del doppio volume, permettono una datazione certa della sala, riferita al '400, la quale doveva avere funzione di rappresentanza. All'interno dell'appartamento sono presenti stanze aventi il soffitto a cassettoni, ridenominate “l'alcova” e lo “studiolo”, dotate di affaccio verso il parco; l'ingresso avveniva probabilmente in corrispondenza della torre, dal quale si apriva un corridoio che portava alla sala di rappresentanza e allo studiolo, mentre la “camera degli sposi” si raggiungeva mediante un vano scala situato a margine della residenza.^[1]

Tornando alla disposizione planimetrica generale dei vani, al piano seminterrato si trova un vasto ambiente cantinato (stanza 001) raggiungibile per mezzo di un'unica rampa di

scale; paralleli ad esso ci sono dei vani posti a diverse quote e ciechi (stanze 102 e 104), a seguito del tamponamento di tutte le aperture rivolte verso il parco.

Queste stanze erano inaccessibili per via di murature costruite recentemente, le quali sono state abbattute per effettuare i rilevamenti; si è scoperto che i vani sono privi di solaio e raggiungono così il piano nobile. Questi locali hanno assunto l'attuale configurazione in seguito all'utilizzo della Rocca come azienda agricola da parte della famiglia Rangoni.

L'accesso alle stanze del piano terra che si affacciano sul parco e del piano seminterrato avviene esclusivamente attraverso un basso corridoio aperto sul cortile d'onore, situato a fianco della scala principale^[3]; mediante una rampa interna, si raggiunge poi il piano inferiore. Inoltre, c'è una scala che si sviluppa a partire dal cortile e consente l'accesso ai locali del piano ammezzato e del piano nobile.

Dal giardino è possibile accedere ad un vano a doppio volume, configurazione assunta in seguito al crollo del solaio, presente nel corpo settentrionale. L'evento non è riportato in alcuna fonte storica, però guardando la stanza, ci si può accorgere di alcuni elementi in quota, quali due aperture tamponate, un camino, un disegno di una zoccolatura, ma soprattutto, di una risega situata alla medesima quota del solaio del vano contiguo. La risega, infatti, consiste in un cambio di sezione della struttura muraria, che consente di realizzare un appoggio funzionale per le travi del solaio.^[1]

Questo vano è stato ridenominato “vano n° 111”, in seguito alla nomenclatura istituita dal Politecnico di Milano, e sarà quello che si andrà a studiare per eseguirne il restauro dei materiali e il rifacimento del solaio.

Torre nord-est

Per quanto riguarda la torre nord-est, in essa sono presenti, a partire dal piano terra, quattro ambienti, situati a quote diverse e raggiungibili grazie a diverse rampe di scale; rispetto al progetto originale, è nato un vano all'interno della presunta torre castellana, le cui strutture sono state comprese all'interno del corpo settentrionale. Al suo interno è presente un'attrezzatura di sollevamento usata durante le attività agricole dell'azienda.

1.9.2 La corte

Fra la fine del XV secolo e l'inizio del XVI secolo, il complesso si trasformò sempre più in residenza nobiliare, grazie alla costruzione di due nuovi corpi di fabbrica, a oriente ed occidente, che poggiavano sugli edifici già esistenti; questi corpi possedevano due livelli, di cui il primo porticato, nel quale la ritmica sequenza di aperture, cioè quattro campate rette da colonne sulle quali si impostano archi a tutto sesto, gli diede il classico aspetto del "cortile d'onore". Oggi il portico ovest risulta completamente tamponato, ad eccezione della campata in prossimità della torre d'ingresso, mentre il portico est è solo parzialmente tamponato, ma comunque interamente nascosto da una tettoia di recente costruzione. All'interno dei portici sono stati ricavati degli ambienti, grazie alle aperture realizzate nei tamponamenti prospicienti la corte d'onore. Il piano superiore invece, doveva apparire rivestito da un sottile strato d'intonaco ed aveva le aperture ad arco a tutto sesto, orientate verso il cortile. Nel secolo seguente, la coppia di ali porticate venne innalzata di un piano, molto probabilmente per abbellire la residenza, meta estiva di molti nobili, che trovano refrigerio proprio a Spilamberto.^[1]

Le stanze situate al piano ammezzato sono state ristrutturare negli anni Settanta del Novecento, per trasformarle in residenza; a tutt'oggi, nell'ala ovest risiede la famiglia dell'ex maggiordomo dei Rangoni. Quest'appartamento ha un affaccio sia verso il parco, sia verso la corte interna, ed è costituito da otto stanze collegate tra loro mediante un corridoio posto ad est; vi si accede sia dal parco, grazie ad un ingresso indipendente, sia dall'abitazione principale, mediante un'apertura di servizio.

L'appartamento ad occidente, invece, è costituito da undici stanze collegate da un corridoio posto ad ovest e l'accesso è garantito da un ingresso principale posto nel cortile dell'ex "Casa del Fattore", e da un secondo ingresso di servizio, collegato alla residenza dei Marchesi.

L'appartamento ad ovest è collegato con quello posto ad est, grazie ad un corridoio situato nel corpo sud, testimonianza dell'antico camminamento di ronda.

1.9.3 Il “vago palazzo”

Dopo i lavori del '500, il complesso edilizio doveva apparire disomogeneo e discontinuo, proprio per il susseguirsi delle operazioni di trasformazione; il cantiere inaugurato da Guido III nel 1660, ebbe proprio lo scopo di riparare a queste difettosità, dando all'intero complesso un aspetto più armonico.^[1]

A seguito del matrimonio celebrato nel 1666 tra il marchese Filippo, figlio di Guido, e Anna Teresa Rangoni, il palazzo aveva assunto un aspetto particolarmente festoso, in quanto era stato ridipinto sia all'interno che all'esterno, arredato con sontuose tappezzerie di seta in oro e argento, ed era stato allestito un teatro per rappresentazioni musicali.

Il piano nobile fu realizzato innalzando alla stessa quota le diverse porzioni di edificio precedentemente costruite, mentre il piano inferiore assunse le caratteristiche di piano ammezzato.

In corrispondenza del piano nobile esistevano delle aperture “en enfilade” lungo i lati nord, est ed ovest, collegati da una galleria posta sul lato sud; oggi questo camminamento risulta in parte interrotto da un tamponamento eretto a sud-ovest, nello spazio compreso tra la torre centrale e quella nell'angolo a sud.

Le due torri d'ingresso hanno rispettivamente, un'unica stanza situata al piano nobile: la torre che affaccia su Piazzale Rangoni è caratterizzata da un balcone costruito proprio all'interno di questo intervento, mentre la torre che affaccia sul parco, conserva al suo interno la “Camera del Belvedere”, il cui nome deriva proprio dai suoi numerosi affacci sul parco, sempre realizzati nel 1660.

Alcune stanze di questo piano sono state dotate di passaggi assai stretti, che collegavano vani non contigui tra loro; questi passaggi venivano camuffati con singole armadiature all'interno della stanza stessa, mentre all'esterno risultavano strutture a sbalzo.^[1]

Corpo di fabbrica meridionale

Per collegare gli edifici ad est e ovest, venne realizzato un nuovo corpo di fabbrica, fatto appoggiare esternamente al lato meridionale della fortificazione, il cui vano principale

assunse l'appellativo di "galleria"; l'intervento venne completato intonacando i prospetti interni e la facciata principale.

Negli anni successivi, l'edificio subì modesti interventi di manutenzione, quali la ripittura di alcune stanze e di due volte collocate al piano nobile, per conferire ad esse l'effetto delle tappezzerie sottratte dal Comitato di Governo degli Stati di Modena, instaurato da Napoleone tra la fine del '700 e l'inizio del '800.^[1]

Nel XVIII secolo, invece, il profilo occidentale della Rocca venne allungato, in seguito alla costruzione della "Casa del Fattore", alta quanto il palazzo, residenza del personale di servizio; inizialmente si presentava come un edificio a se stante, ma in seguito venne collegata al palazzo, in corrispondenza del piano nobile.

1.9.4 Interventi novecenteschi

A seguito della costruzione di Villa Ida, nuova residenza della famiglia Rangoni, la Rocca divenne sede dell'azienda agricola di famiglia, per cui vennero tamponati alcuni archi dei portici, per dar vita a nuovi ambienti che vennero presto trasformati in accordo con la nuova destinazione d'uso: gli ambienti formatisi a seguito della chiusura delle campate nelle ali porticate furono soggetti una scialbatura uniforme, distesa sulle pareti un tempo decorate, i pavimenti vennero sostituiti da battuti in cemento, mentre i solai e le volte furono parzialmente demoliti per far posto ad impianti per la risalita delle granaglie: di quest'ultimo intervento rimane traccia nei vani 308, 209, 109, 202.^[1]

In quasi tutti i livelli sono presenti dei presidi, inseriti per rafforzare le strutture orizzontali e conferir loro una maggiore capacità portante, in vista della nuova destinazione.

Infine, ulteriori lavori furono eseguiti negli anni Settanta del Novecento, per ridistribuire l'assetto degli spazi, in conformità con i nuovi standard; al piano ammezzato delle ali porticate e nell'abitazione del fattore vennero spostate alcune tramezze e vennero completamente rifatte le finiture. Inoltre, il vecchio camminamento "en enfilade" del piano nobile fu sostituito da un corridoio realizzato a sbalzo e vennero demoliti i collegamenti verticali in prossimità dei portici; un ulteriore intervento di manutenzione straordinaria alla copertura venne eseguito nel 1989.^[1]

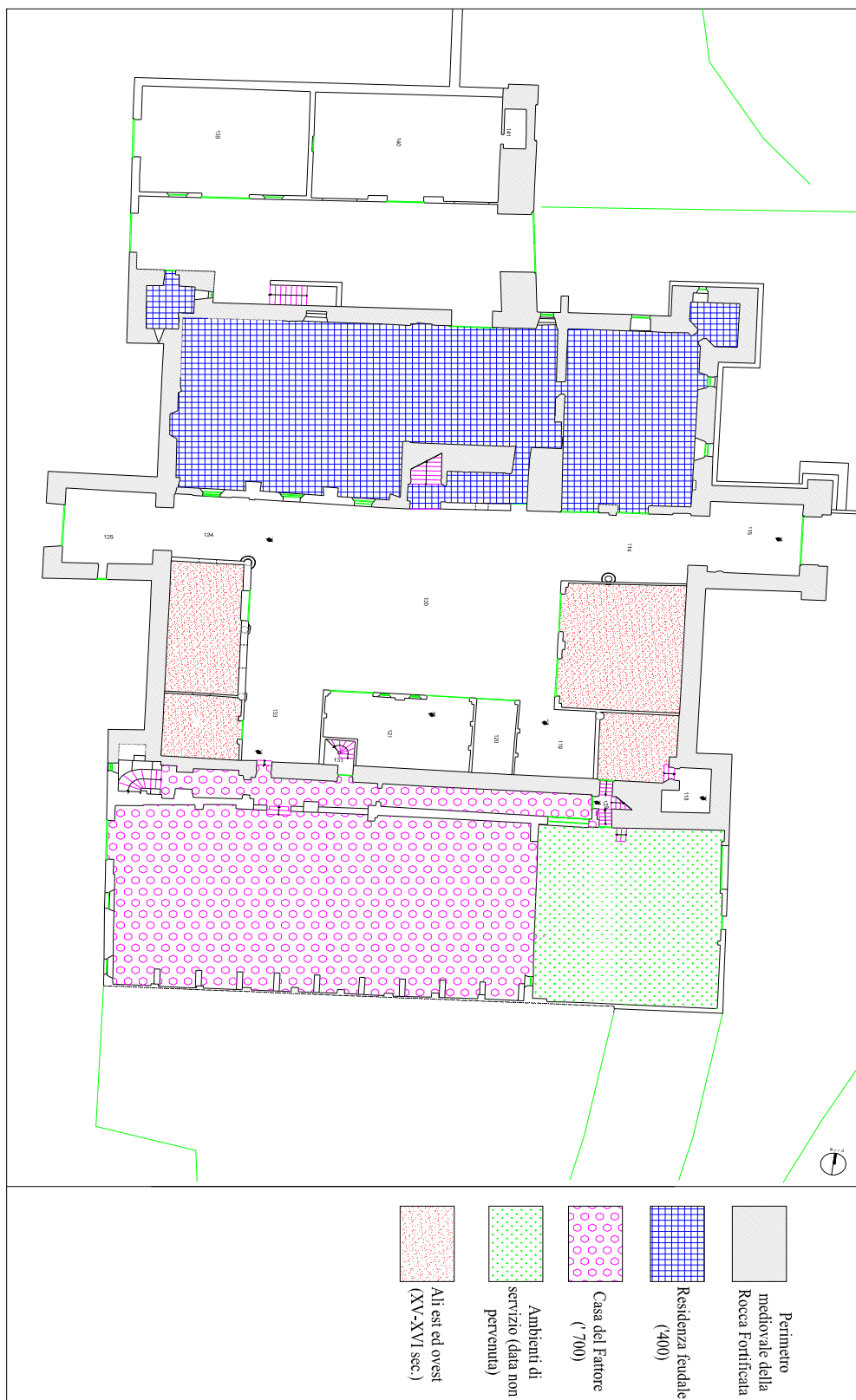


Figura 11 : *Planimetria delle fasi costruttive al piano terra*

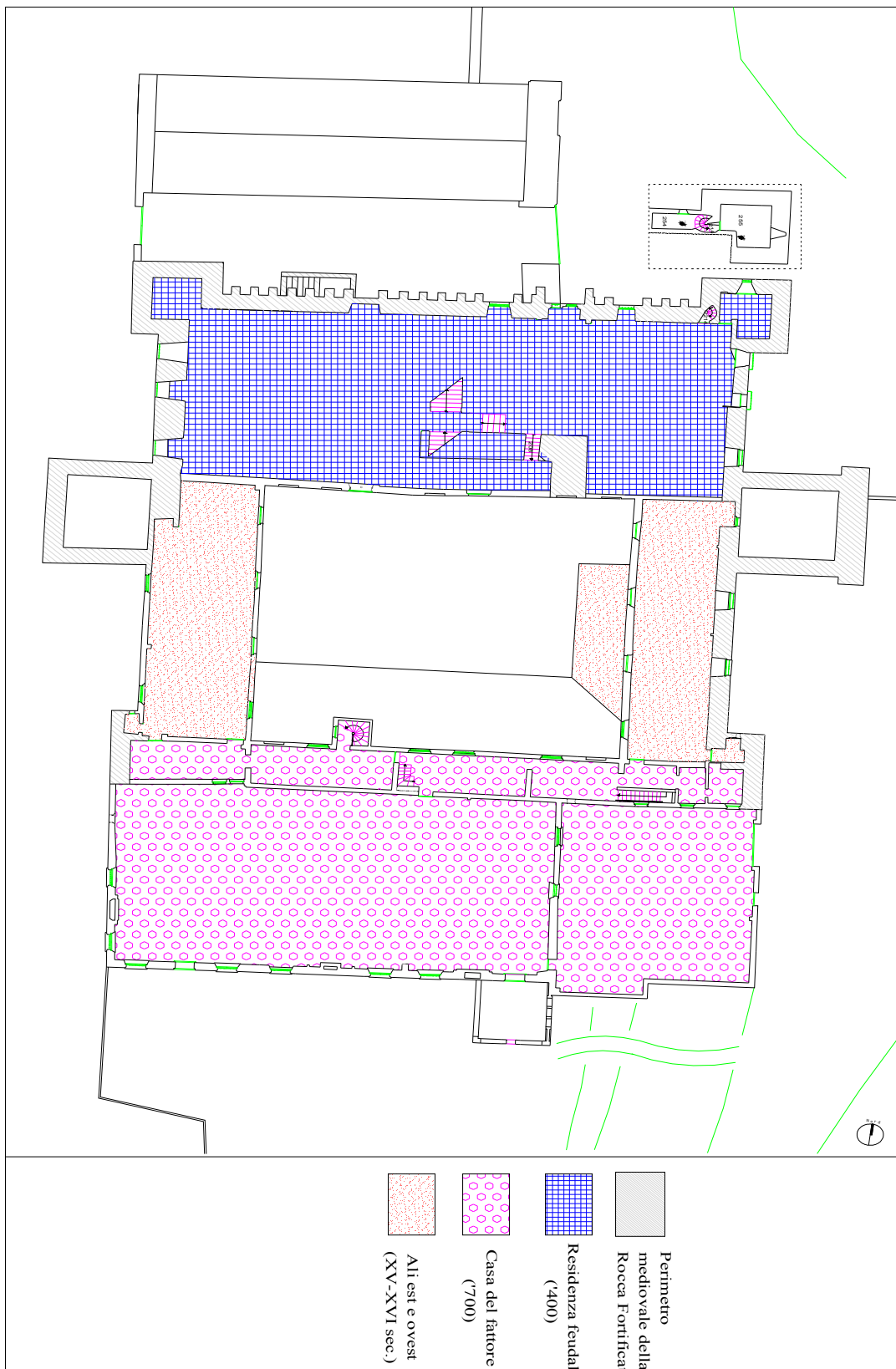


Figura 12: *Planimetria delle fasi costruite del piano ammezzato*

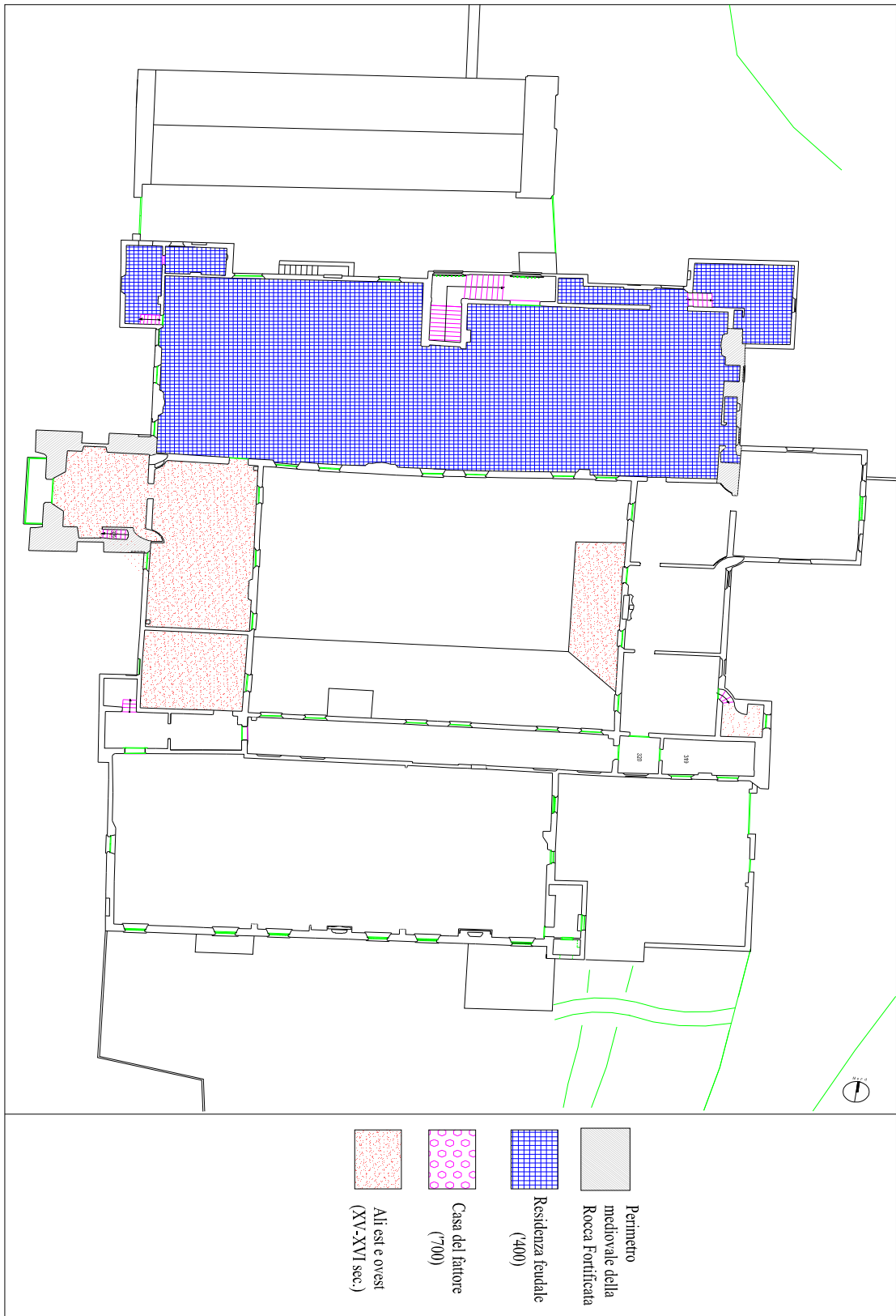


Figura 13: *Planimetria delle fasi costruttive del piano nobile*

Cap. 2 Studi precedenti eseguiti sulla Rocca Rangoni

2.1. Indagini del Politecnico di Milano

Negli anni appena trascorsi, la Rocca è stata oggetto di studio da parte del Politecnico di Milano, il quale ha strutturato le analisi da effettuare, grazie al reperimento di tre planimetrie tardo ottocentesche rappresentanti i tre livelli dell'edificio; già da un primo sopralluogo conoscitivo, sono emerse alcune discrepanze tra lo stato di fatto e quanto riportato nelle carte.

Quanto svolto dal Politecnico è stato il primo studio riguardante l'intero apparato costruttivo: infatti, la Rocca era completamente sconosciuta sia nelle caratteristiche geometriche, sia nell'evoluzione storica e materica, per via dell'inaccessibilità dell'edificio, in quanto proprietà dei Marchesi Rangoni Machiavelli, ma anche per la mancanza di fonti documentarie.

Dal momento che non erano disponibili molte fonti, l'indagine è stata condotta direttamente sull'edificio, partendo dal rilievo geometrico, che ha permesso di rilevare, oltre alle dimensioni delle stanze interne, anche le stratificazioni architettoniche che si sono succedute.

Un ulteriore scopo del lavoro effettuato consisteva nell'analizzare quanto restituito, per capire le logiche costruttive e le modifiche apportate negli anni.

2.1.1 Le strutture

Osservazione macroscopica

Lo studio della Rocca Rangoni ha messo in luce l'adozione di diverse tecnologie costruttive, cosa probabilmente dovuta agli innumerevoli interventi di riqualificazione ai quali è stata sottoposta nei secoli. Questo fatto è molto evidente già osservando le strutture verticali, le quali sono disomogenee sia nella composizione, sia nell'orditura degli elementi; inoltre, le irregolarità presenti in alzato, si ritrovano anche in pianta, a conferma dei risultati del rilievo geometrico eseguito dal Politecnico di Milano.

Gli interventi di riqualificazione eseguiti sulla Rocca, però, non hanno mai pregiudicato completamente l'assetto preesistente, ma hanno per lo più riguardato il riassetto della

distribuzione interna degli spazi, rendendoli maggiormente fruibili a seconda delle esigenze. Dall'esterno, queste osservazioni sono lampanti, in quanto la struttura è completamente a vista, mentre all'interno, dove le pareti sono intonacate, è stato necessario l'ausilio della termocamera, per effettuare un'indagine in prima battuta, non distruttiva, e laddove si sia reso necessario, procedere con campionamenti, semmai nei punti in cui l'intonaco era già distaccato.

È stata fatta una classificazione tra le stanze con solaio ligneo e quelle con solaio voltato, e tra le strutture portanti e quelle leggere, realizzate con incannicciato.^[1]

Strutture verticali

La cinta muraria è una struttura portante realizzata “a sacco” con paramenti esterni in mattoni; la struttura portante dell'edificio, invece, cambia già a seconda del prospetto analizzato, ma anche a seconda del livello del costruito. Approssimativamente, il piano terra situato a nord è costituito dalla fortificazione castellana, ad est e ovest da un muro di spina centrale; il tutto prosegue in altezza con una muratura in laterizio a due teste; lo stesso schema costruttivo si ritrova anche negli edifici porticati, dove le colonne sono in muratura, con basamento in laterizio e capitello in pietra.

Il piano nobile è un discorso se stante, in quanto può essere pensato come un unico progetto, realizzato in maniera omogenea: la struttura portante è costituita da muri in laterizio a due teste, oltre ai muri di spina che salgono fino a questa quota; inoltre, nella parte ovest, esiste una parete in falso, costituita da una leggera struttura in montanti e traversi in legno, rivestiti da malta.

L'abitazione del Fattore ha una struttura portante verticale costituita da ciottoli di varie dimensioni, ma intervallati da corsi orizzontali di mattoni, disposti di testa; queste strutture, nella seconda metà del Novecento, sono state oggetto di un intervento di restauro, il quale ha portato alla sostituzione di queste pareti, con murature di mattoni.^[1]

Strutture orizzontali

Anche in sezione la struttura ha subito modifiche notevoli: basti pensare che solamente all'interno della torre nord-est e nord-ovest sono sopravvissuti gli antichi solai; nelle

torri d'ingresso invece, si trova una volta in muratura a padiglione, per quanto riguarda il prospetto lato Panaro, e una volta a vela semplice, nel prospetto opposto.

Le coperture delle torri, invece, sono costituite da volte a crociera con sesto ribassato e profilo irregolare.

Nel manufatto ad ovest, il primo livello vede un ambiente voltato, con volte a crociera con sesto ribassato, mentre al piano superiore si ha un solaio ligneo a doppia orditura e cassettonato.

Nel corpo ad est, la distinzione tra ambienti destinati a civile abitazione e quelli destinati a deposito, è molto chiara: al primo livello si trova un solaio ligneo a doppia orditura, mentre al piano superiore, nell'“appartamento d'inverno”, la stanza situata al posto del volume doppio doveva avere funzioni di rappresentanza, visto il pregio e la qualità con cui è realizzato il solaio, il più complesso di tutta la Rocca.

Esso è costituito da travi foderate e rette da mensole che sostengono travetti disposti perpendicolarmente ad esse, sui quali sono sistemati dei cassettoni ottenuti con tavole di assito, giuntate con regoli modanati e controregoli ortogonali.

La finitura è composta da bussole collocate nell'interasse dei travetti a coprire l'appoggio alla parete e alla travatura principale; gli elementi sono ornati con pitture raffiguranti le insegne dei Rangoni e dei Bentivoglio, figure allegoriche e motti.^[3]

Un altro solaio di fattezze pregevole si trova nel vano adiacente allo scalone d'onore, il “secondo camerino della segreteria” (vano 205) (Fig. 16): si tratta di un solaio ligneo a lacunari con rosette centrali.

I restanti ambienti del fabbricato est, cioè i vani 206 e 207 (Fig. 16), hanno un solaio ligneo, a cui è ancorata una struttura in incanniccio a formare una volta a botte a sesto ribassato, rivestita da un intonaco dello stesso colore delle pareti.

A seguito dell'intervento di restauro del 1989, la copertura dell'edificio è stata realizzata con capriate lignee, terzere e travetti, secondo la tipologia di orditura alla lombarda.^[1]

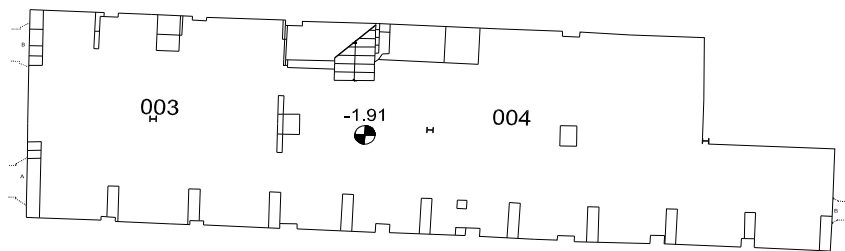
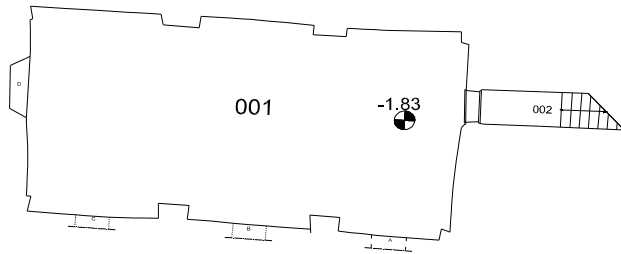
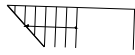


Figura 14: *Planimetria del piano seminterrato*

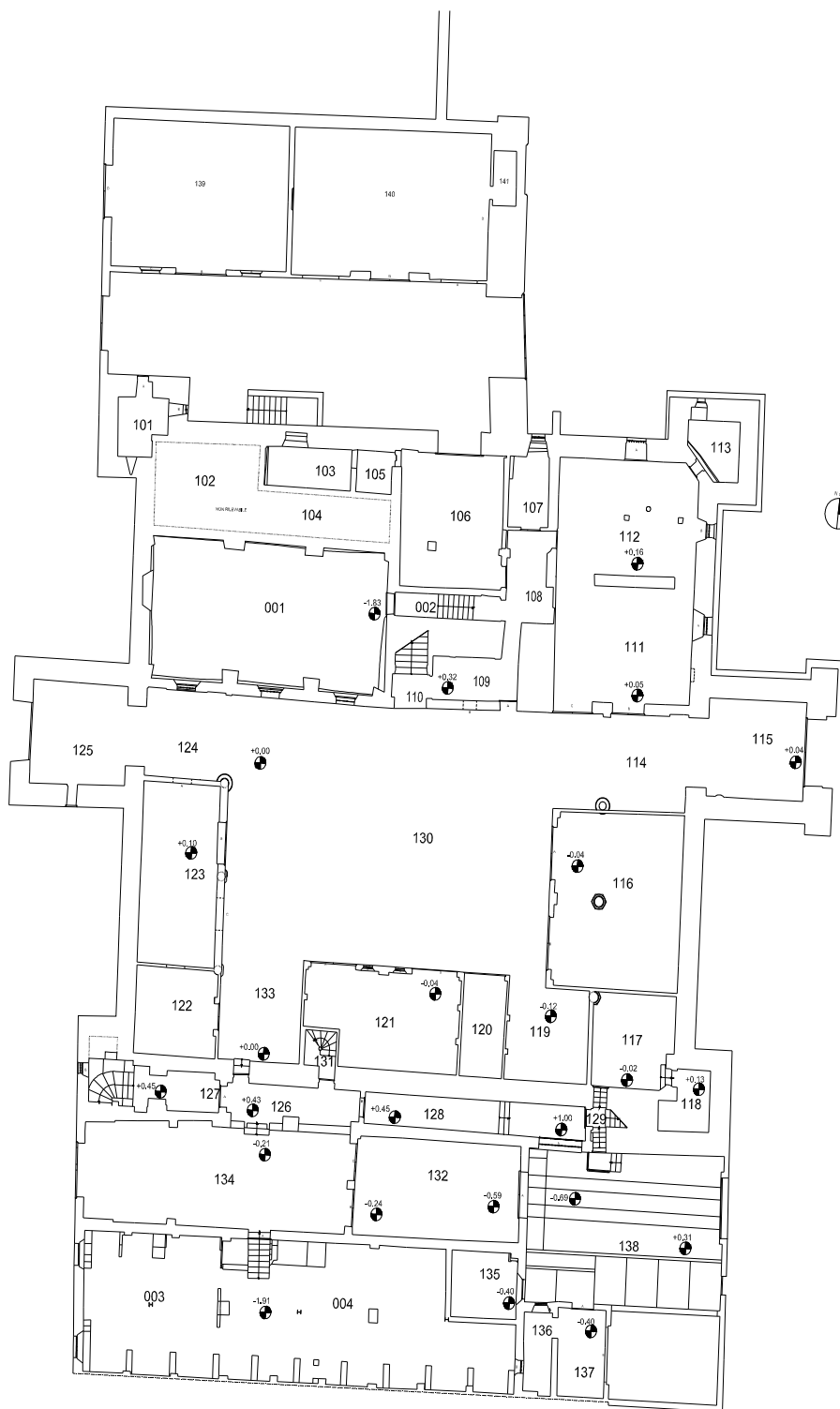


Figura 15: *Planimetria del Piano Terra*

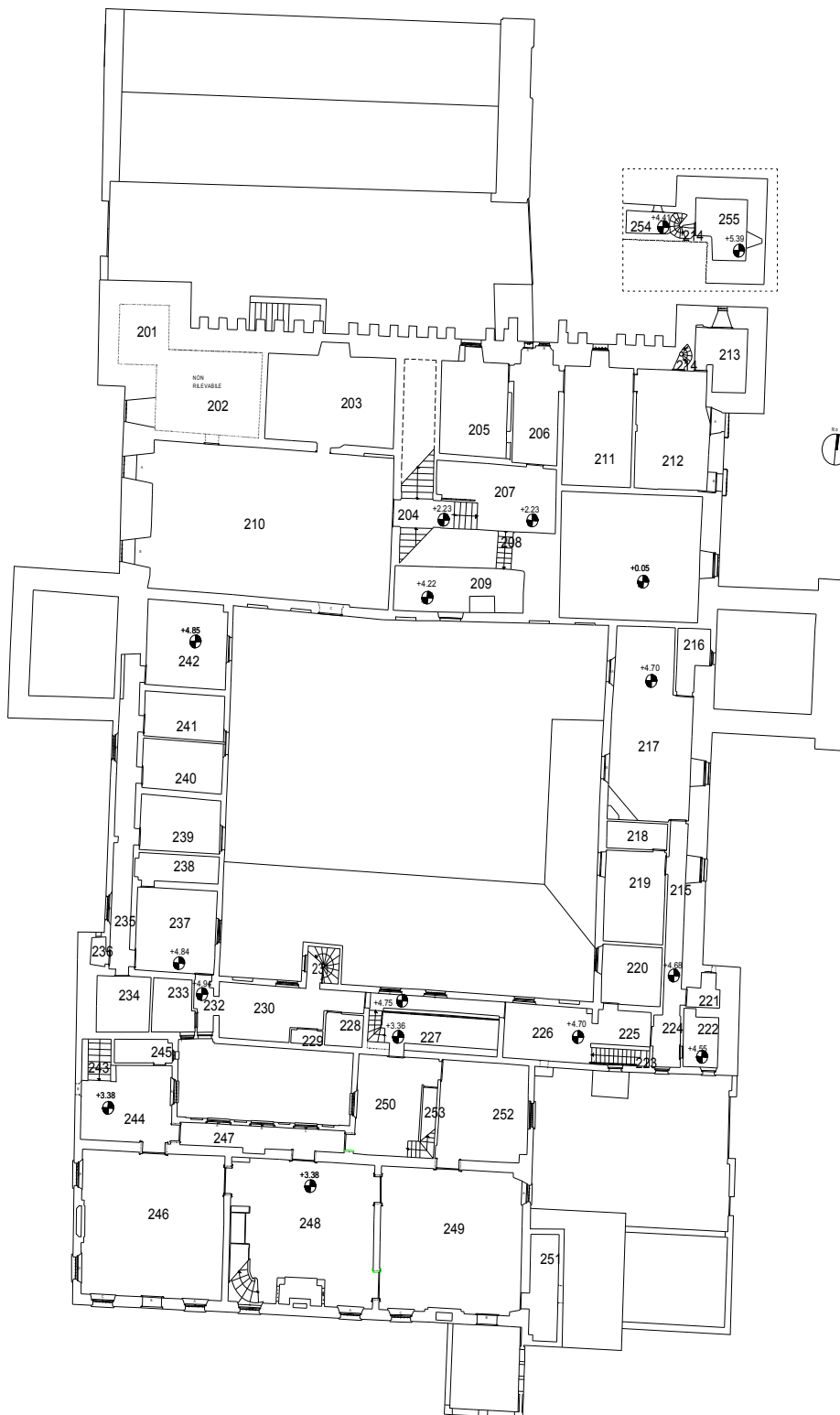


Figura 16: *Planimetria del Piano Ammezzato*

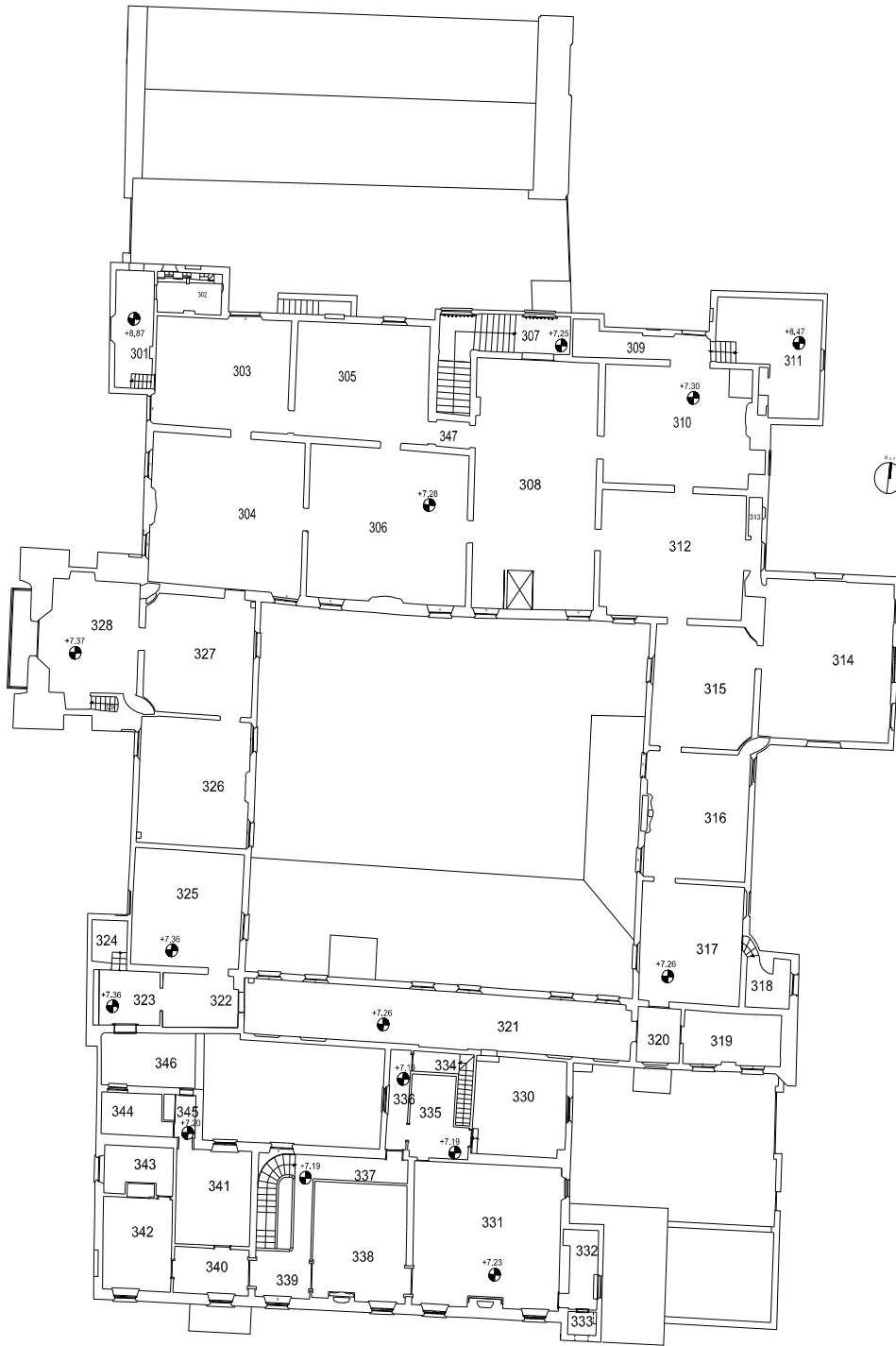


Figura 17 : *Planimetria del Piano Nobile*

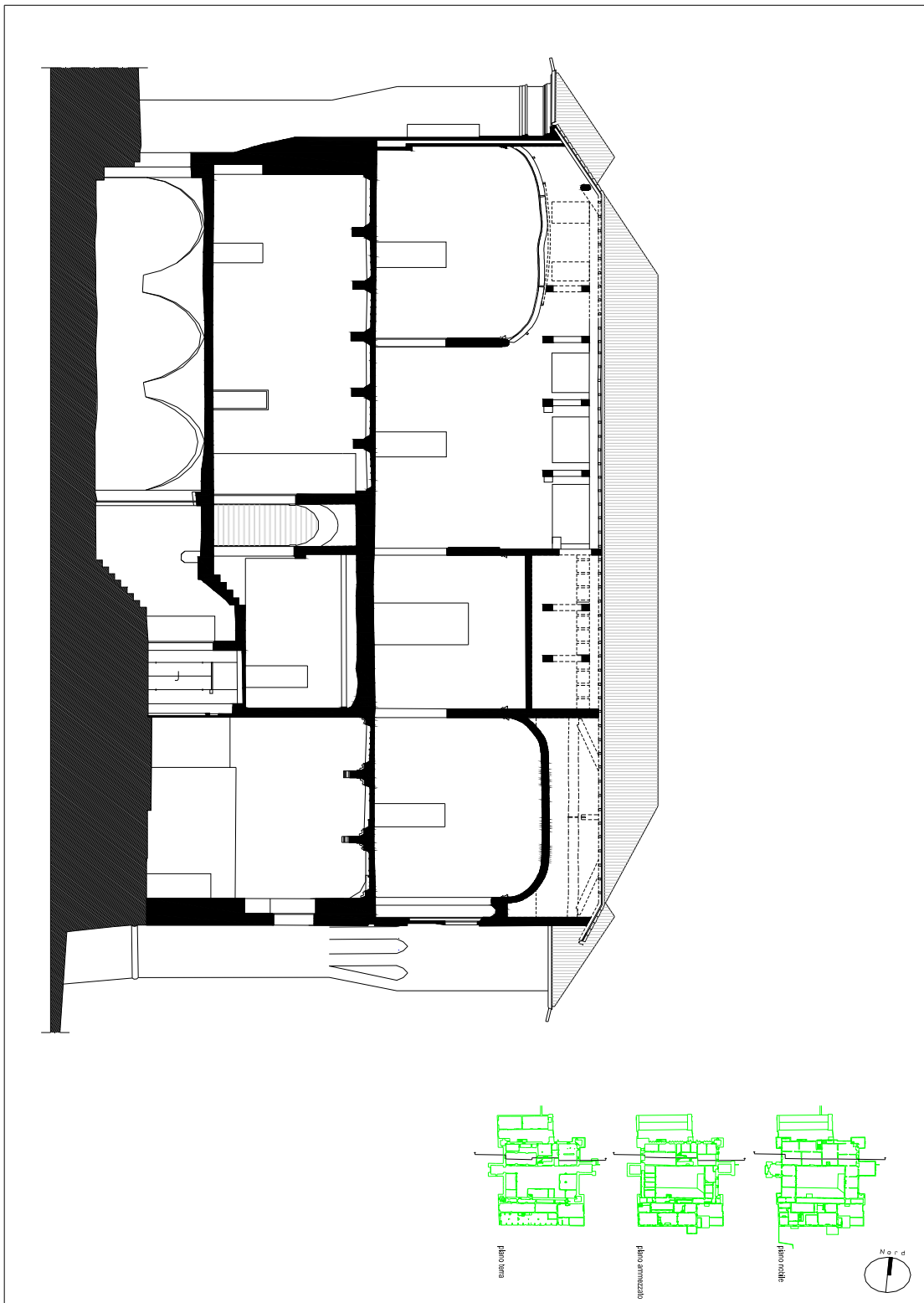


Figura 18 : Sezione A-A

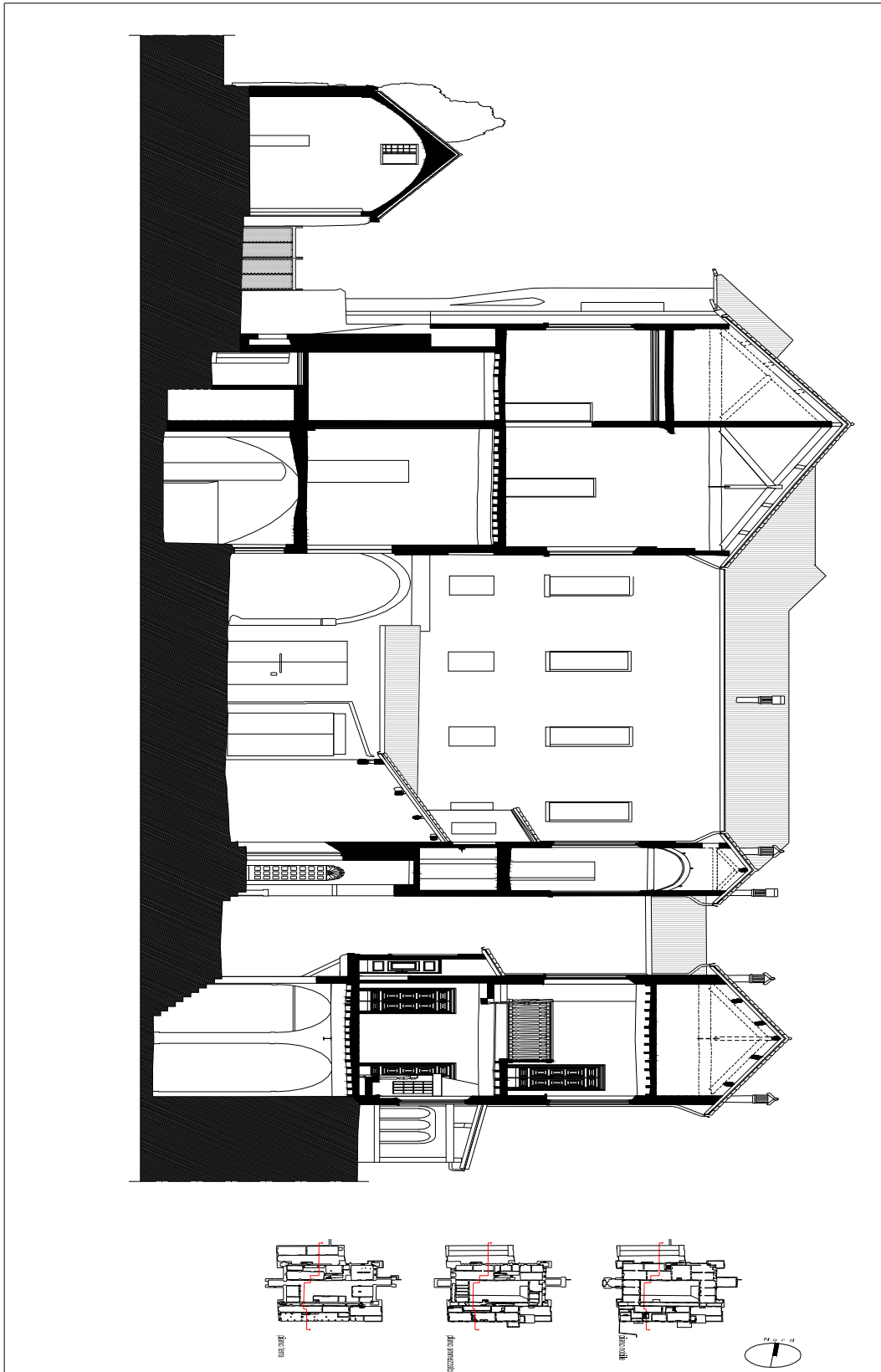


Figura 19 : Sezione B-B

Cap. 3 Oggetto della tesi: la "Sala d'Arme"

3.1 Identificazione dei vani

All'interno dell'analisi condotta dal Politecnico di Milano, preliminarmente alla stesura del "Libro delle Stanze", cioè la raccolta delle schede tecniche di ogni stanza della rocca, è stata assegnata una numerazione progressiva ai vani per ciascun piano, la quale ha permesso di individuare ogni vano mediante un numero relativo al piano d'interesse, seguito da un numero che ordina in modo progressivo gli ambienti appartenenti allo stesso livello.

Così facendo, i piani sono numerati da 0 a 4, a partire dal seminterrato, mentre le stanze sono numerate a partire da 01.

3.2 La Sala d'Arme

Al piano ammezzato si rileva un comparto di stanze, situate ad est del corpo settentrionale, che possono essere identificate come la dimora di Niccolò Rangoni e Bianca Bentivoglio; tra queste, si individua il vano d'interesse: in seguito alla numerazione precedentemente spiegata, il vano assume il numero 111, in quanto è posto al piano terra (n° 1), ed è stato conteggiato come l'undicesimo del piano in questione. (Fig. 15)

Il vano è già individuabile in una planimetria ottocentesca, nella quale viene denominato come "tinello a piano terra": si tratta di un doppio volume, il cui accesso avviene direttamente dal cortile, ad una quota di calpestio pari a +0,05 m; la sua attuale configurazione è determinata molto probabilmente dal crollo del solaio intermedio, fatto però non documentato in nessuna fonte. Anche in assenza di documentazione scritta, è possibile rendersi conto di quanto accaduto, grazie al ritrovamento di alcuni elementi in quota, quali due aperture tamponate, un camino, e una risega situata allo stesso livello del solaio mancante: quest'ultimo ritrovamento rende praticamente certa la presenza di un solaio, oggi crollato, in quanto le riseghe venivano usate per l'appoggio delle travi del solaio stesso.^[1]

A conferma del fatto che la stanza al pian terreno fosse stata un locale di servizio, si notano gli anelli infissi nella parete e una pavimentazione divisa in settori, con quote differenti a causa degli scoli per i liquami degli animali; questi ritrovamenti fanno pensare che la stanza fosse destinata ad essere una stalla, utilizzata, tra le altre cose, anche per riscaldare le stanze dell'appartamento d'inverno situate al piano superiore.

La stanza posta al piano ammezzato invece, si pensa fosse utilizzata molto probabilmente come aula di governo e rappresentanza nel quattrocento, quando venne costruita, per poi divenire "camera del tinello" nel Settecento.

Oggi il doppio volume individuato come il numero 111, presenta i seguenti parametri geometrici, quali una superficie netta pari a $43,23 \text{ m}^2$, una superficie illuminata pari ad

$11,609 \text{ m}^2$ e un rapporto illuminante pari a $\frac{11,609 \text{ m}^2}{43,23 \text{ m}^2} = 0,268$.

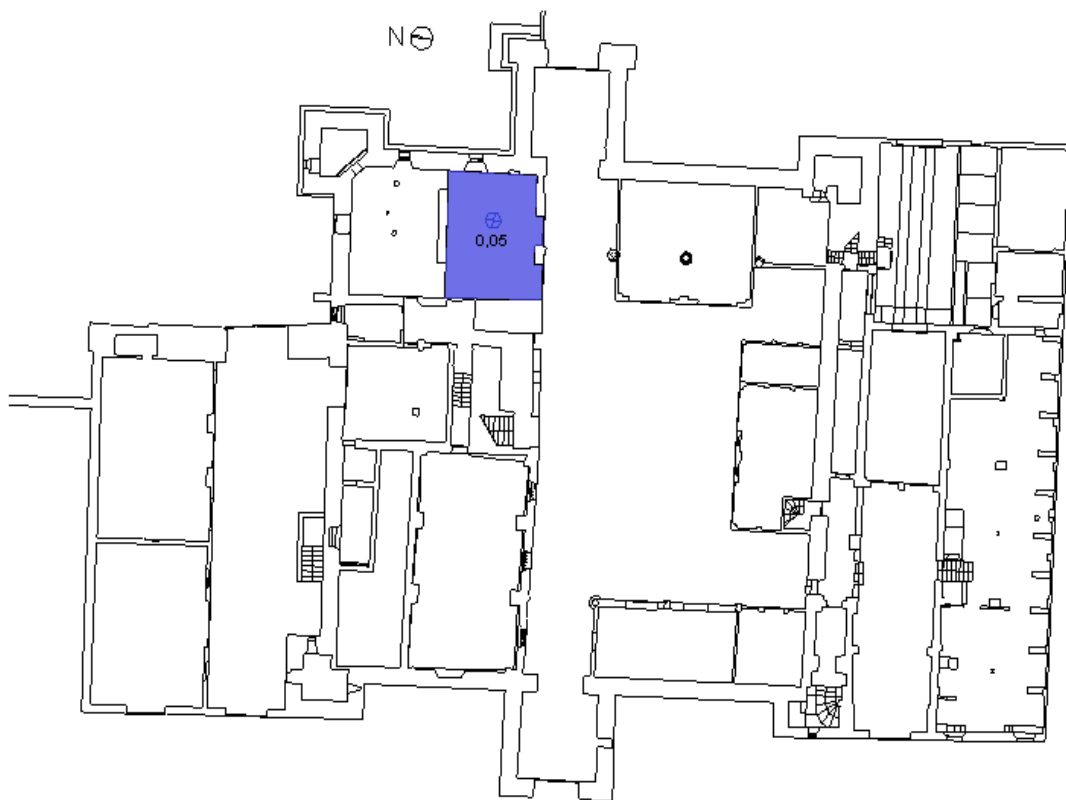


Figura 20 : Individuazione della Sala d'Arme all'interno della Rocca Rangoni

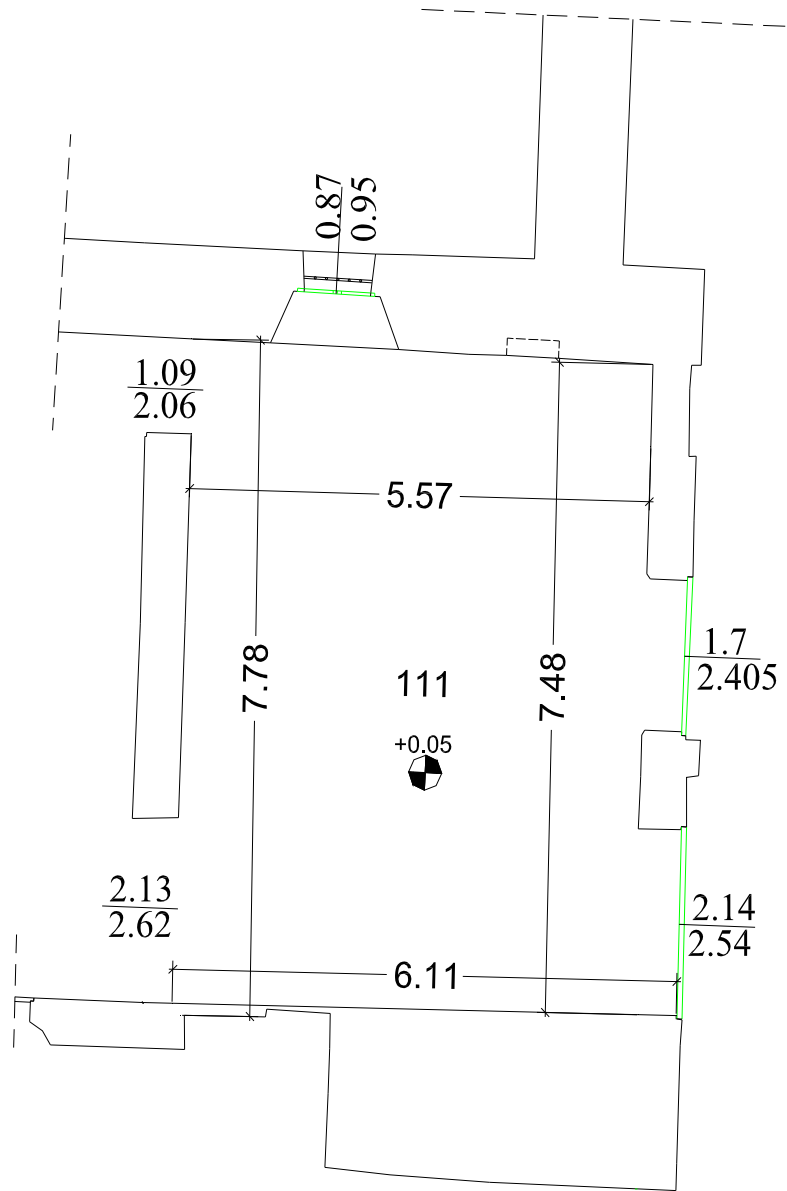


Figura 21 : Individuazione aperture nel vano 111 al piano terra

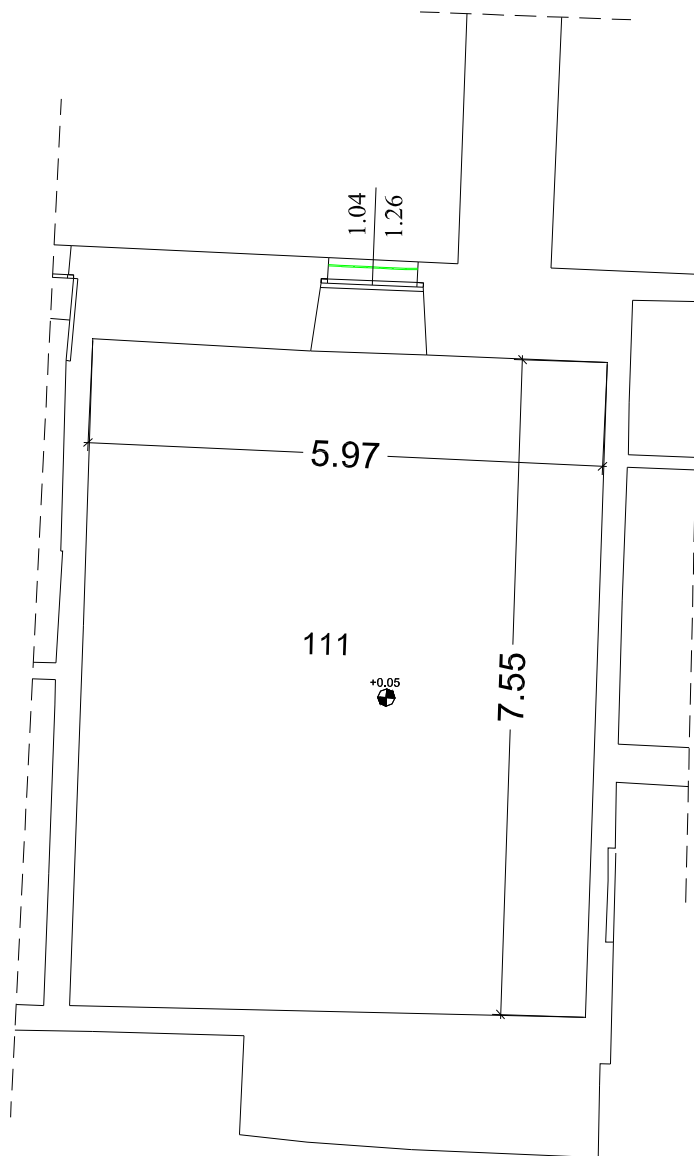


Figura 22: *Individuazione aperture nel vano 111 al piano ammezzato*

3.2.1 Pareti

Un importante ritrovamento è avvenuto sulla parete meridionale, ridenominata con la lettera “c” (Fig. 23), in cui sono state individuate ben tre differenti aperture: la prima consiste in un’apertura tamponata, posta ad un’altezza di poco superiore al livello della risega: si pensa che questo passaggio fosse un collegamento tra il corpo nord e il piano ammezzato, cosa testimoniata anche dall’esistenza di un passaggio tra il vano 216 e il vano 111, prima del crollo del solaio, all’interno della planimetria tardo ottocentesca; la seconda è una finestra in posizione centrale, anch’essa tamponata, caratterizzata da una decorazione molto frammentaria e degradata; infine la terza situata nella porzione sinistra della stessa parete, è caratterizzata da una decorazione su intonaco sovrapposta al tamponamento e da una decorazione precedente della cornice, e sembra riproporre gli stessi colori e motivi del solaio. In corrispondenza di queste aperture tamponate sono da segnalare alcune fessurazioni non recenti, dovute proprio al tamponamento delle finestre.^[1]

Sulla parete ovest della stanza sono state ritrovate delle scalpellature sulla superficie esterna dei mattoni, eseguite molto probabilmente per far meglio aderire il rivestimento alla muratura stessa.

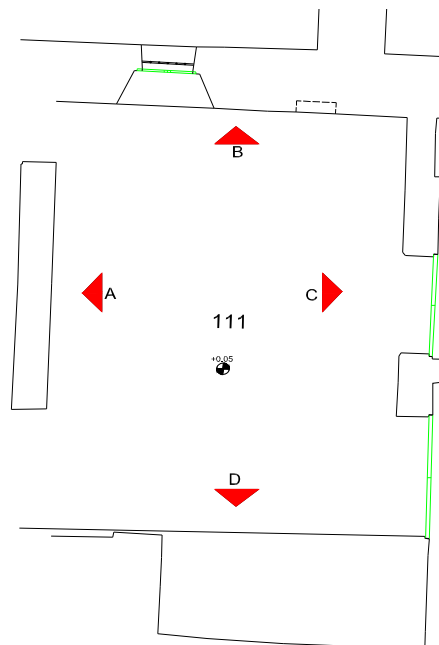


Figura 23 : Individuazione in pianta delle pareti

3.2.1.2 Parete A

Si tratta della parete posta a settentrione, a separare la “sala d’arme” con l’attigua stanza n° 112 (Fig. 24); dello spessore di 55 centimetri, è una parete a doppia altezza, in quanto visibilmente suddivisa in due parti orizzontali a causa del crollo del solaio intermedio. Le termografie eseguite dal Politecnico di Milano hanno portato alla luce che la muratura è formata da corsi alternati di laterizi e ciottoli, quest’ultimi accostati a sporadici laterizi disposti in diagonale, legati assieme da malta.



Figura 24 : *Parete A* ^[4]

Parte superiore

In corrispondenza della parte superiore, dalle fessurazioni presenti, gli studiosi del Politecnico di Milano hanno distinto due diversi intonaci sovrapposti: dello strato

sottostante è stata rilevata solo la tinta che lo ricopre, rappresentante motivi con toni del rosso, verde e marrone, mentre sullo strato esterno è stata rilevata una tinteggiatura arancione con basamento marrone, delimitato da una linea di demarcazione rossa e uno strato di bianco sottostante.

Sempre all'interno di questa porzione di muratura sono state rilevate due aperture tamponate, collocate in posizione centrale e nell'estremità occidentale.^[4]

Parte inferiore

Dalle fessurazioni presenti nella parte inferiore, sono state rilevati invece ben tre intonaci differenti: il primo, è un intonaco sovrapposto alla muratura, coperto da uno strato di tinteggiatura di color grigio scuro steso su fondo bianco. Il secondo, sovrapposto al primo, è uno strato d'intonaco, di colorazione grigia coperto da ben quattro strati di tinteggiatura, di color panna, grigio chiaro, beige, e lo strato esterno bianco.

Oltre a questi due intonaci, che possono definirsi i principali, se ne è individuato un terzo, utilizzato per rappezzì, caratterizzato da una colorazione rosata, sul quale non è presente alcun tipo di tinteggiatura.^[4]

3.2.1.3 Parete B

Si tratta della parete posta ad oriente, anch'essa come la prima, suddivisa in due parti orizzontali per via del crollo del solaio intermedio (Fig. 25).

Parte superiore

Dalle fessure presenti nella parte superiore, sono individuabili due tipologie di intonaco: quello interno, di color grigio, coperto da uno strato di tinteggiatura che descrive motivi con toni del rosso, verde e marrone; quello esterno invece, è di color grigio, e vi è sovrapposto uno strato di tinteggiatura arancione con basamento marrone, delimitato da una linea di demarcazione rossa e uno strato di bianco sottostante.^[4]



Figura 25 : Parete B ^[4]

Parte inferiore

La parte inferiore di muratura è riconducibile alla cinta muraria del quadrilatero fortificato, la cui sezione è formata da una muratura a sacco rivestita da due paramenti, dei quali risulta visibile in parte solo quello interno; purtroppo, non ne è rilevabile la tessitura, ma solamente le dimensioni dei mattoni, pari a 6 x 29 cm, e dei giunti di malta, di altezza variabile tra 1,5 e 1,8 cm. La malta utilizzata è di colorazione grigia, caratterizzata da aggregati di medie dimensioni.

In questa zona sono stati individuati ben quattro intonaci: il primo è un intonaco sovrapposto alla muratura, coperto da uno strato di tinteggiatura di color grigio scuro steso su fondo bianco. Il secondo, sovrapposto al primo, è uno strato d'intonaco, di colorazione grigia, coperto da ben tre strati di tinteggiatura, di color panna, oca con zoccolatura grigia, e lo strato esterno bianco.

Oltre a questi due intonaci, che possono definirsi i principali, se ne è individuato un terzo, utilizzato per rappezzì, caratterizzato da una colorazione rosata, e una superficie molto levigata priva di tinteggiatura; infine, attorno al vano finestra e al suo interno, posato sopra la muratura è individuabile un quarto tipo d'intonaco, di colorazione bianca.^[4]

3.2.1.4 Parete C

Si tratta della parete posta a meridione, dello spessore pari a 55 cm, anch'essa come le altre, divisa orizzontalmente in due parti (Fig. 26).

La muratura è ispezionabile dal prospetto esterno, dal quale si scorge una porzione di ciottoli legati con malta; si può anche notare la muratura di una struttura preesistente, inglobata nel corpo di fabbrica del XV secolo.

Parte superiore

Nella porzione superiore, i distacchi presenti e i saggi stratigrafici hanno evidenziato la presenza di due intonaci: quello interno è coperto da due strati di coloritura, di cui, il più esterno, in fase col solaio; l'intonaco esterno invece, è di color grigio ed ad esso è sovrapposto uno strato di tinteggiatura arancione con basamento marrone delimitato da una linea di demarcazione rossa, con uno strato bianco sottostante.^[4]

Parte inferiore

Nella porzione inferiore sono rilevabili due diversi intonaci: il primo, sovrapposto alla muratura, è coperto da una tinteggiatura di color bianco. L'intonaco esterno invece, utilizzato per rappezzì, è caratterizzato da una colorazione rosata, sulla quale non si rileva alcuna traccia di tinteggiatura.

Sempre nella parte inferiore, è rilevabile una finestra tamponata, assente nei prospetti di fine Ottocento, mentre nella parte superiore sono rilevabili quattro aperture, due delle quali, poste a sinistra, sono state indagate da saggi stratigrafici effettuati dal Politecnico di Milano.

Presente nei rilievi dell'Ottocento è invece l'apertura posta ad est nella porzione superiore, la quale permetteva un collegamento con il corpo di fabbrica orientale.

Sull'intonaco più esterno, tinteggiato di arancio, si notano anche le tracce di un camino; inoltre, sono presenti due aperture, una di costruzione recente e la seconda già presente nei rilievi ottocenteschi.^[4]



Figura 26 : Parete C ^[4]

3.2.1.5 Parete D

Si tratta della parete posta ad occidente, dello spessore pari a 180 cm, la quale ingloba preesistenze medioevali (Fig. 27); dai distacchi dell'intonaco è possibile scorgere delle graffiature che si manifestano con maglia irregolare ed orientamenti diversi. I laterizi hanno colorazione disomogenea, dimensioni variabili tra 26,5 e 28 cm di lunghezza per 6,5 cm di altezza, e sono legati con malta avente giunti verticali di 0,5-0,7 cm e letti di 1 cm.



Figura 27 : Parete D ^[4]

Parte superiore

Nella porzione superiore si evidenziano tre intonaci diversi: di quello più interno è rilevabile solo lo strato di coloritura ricoprente, analogo a quello presente nelle altre pareti, con colorazioni rosse, marroni e verdi. L'intonaco intermedio è caratterizzato da

uno strato di coloritura che descrive dei motivi con tondi di color giallo, riconoscibili al di sopra della porta tamponata, e un cornicione a fasce nei toni del grigio.

All'intonaco esterno invece, è sovrapposto uno strato di tinteggiatura di color arancione con basamento marrone e una linea di demarcazione rossa con strato bianco sottostante.

[4]

Parte inferiore

Nella parte inferiore si rileva uno strato di intonaco sovrastante la muratura, sul quale sono presenti tre strati di tinteggiatura di color rosa, grigio, e lo strato interno bianco.

Sono presenti due aperture tamponate, una per porzione; inoltre, sull'intonaco esterno, sono rilevabili le tracce di un camino.^[4]

3.2.2 Pavimento

Il pavimento è costituito da due fasce longitudinali di ammattonato di elementi in cotto, di dimensioni pari a 28 x 14 x 7 cm, disposti in file sfalsate tra loro, parallele alle pareti est ed ovest.

Dal momento in cui parte della pavimentazione è andata persa, per mancanza di manutenzione e assiduo cambio di destinazione d'uso dell'ambiente, è stata sostituita in ampie zone da due pavimentazioni differenti sulle quali sono presenti lacerti di trattamento superficiale con malta, colorata in pasta, che ha assunto una colorazione grigia nel tempo; inoltre si possono rilevare macchie dovute all'umidità di risalita, patine biologiche ed efflorescenze saline superficiali presenti soprattutto nella parte sinistra della pavimentazione.

Si rilevano alcuni rappezzi recenti, di cui uno costituito da elementi in cotto disposti in file parallele alle pareti B e D, legati con malta di probabile natura cementizia, eseguito parallelamente all'apertura del portone occidentale nella seconda metà del XIX secolo, e l'altro cementizio. In corrispondenza del portone orientale è presente una pavimentazione in ciottoli di pari dimensioni coi bordi arrotondati, disposti su sabbia.^[4]

(Fig. 28)



Figura 28 : Pavimento ^[4]

Alcune fotografie scattate al momento dei campionamenti mostrano che l'odierna pavimentazione poggia direttamente su terra, al di sotto della quale, potrebbe esistere una precedente pavimentazione che si presume possa risalire almeno al Quattrocento. (Fig. 29 e 30)



Figura 29 : *Sollevamento del laterizio della pavimentazione*



Figura 30 : *Sottofondo di terreno con probabile antica pavimentazione*

3.2.3 Solaio

Nell'edificio rivolto verso est, è possibile compiere facilmente una distinzione tra ambienti destinati ad abitazione e ambienti destinati a deposito, quali quelli situati al pian terreno; eccezione fa proprio il vano 111, il cui solaio è uno di quelli maggiormente decorati di tutta la Rocca, complesso nella struttura e prezioso nelle pitture.

È costituito da travi foderate e rette da mensole che sostengono travetti disposti perpendicolarmente ad esse, sui quali sono sistemati dei cassettoni ottenuti con tavole di assito, giuntate con regoli modanati e contoregoli ortogonali; la finitura è composta da bussole collocate nell'interasse dei travetti a coprire l'appoggio alla parete e alla travatura principale.^[3]

La modanatura a mezzo toro presente sugli spigoli inferiori degli elementi in legno di conifera è una caratteristica principale dell'orditura principale e secondaria della stanza 111, così come la si ritrova anche nei vani 211 e 212, al piano ammezzato. (Fig. 31)

Così come nella "camera del Belvedere", anche qui si trovano gli stemmi delle famiglie Rangoni-Bentivoglio, riprodotti sul solaio a cassettoni posto a chiusura della "sala d'arme" dell'appartamento d'inverno; purtroppo i decori sono molto degradati e le pitture frammentarie.

La causa di questo degrado si deve imputare soprattutto alla tecnica di realizzazione, la pittura in stile grafico, la quale prevedeva dapprima il disegno delle figure con un pennello su un supporto di carta colorata, e la successiva applicazione sul legno.

Le alterazioni non hanno comunque impedito il riconoscimento di una sequenza di immagini che propongono temi appartenenti al codice araldico e scritte, intese come motti encomiastici delle virtù che qualificavano i Rangoni. A queste, seguono le pitture che delineano ritratti commemorativi di alcuni condottieri illustri, dalle quali deriva l'appellativo attribuito alla stanza, in cui dovevano svolgersi funzioni di governo. Proprio guardando l'iconografia dell'ornato, sembra che la stanza abbia avuto un ruolo più pubblico che privato, o quanto meno rappresentativo, per gli ospiti illustri, dell'importanza del ruolo politico del padrone di casa.^[16]

Il deterioramento delle componenti legnose del solaio è peggiorato quando quest'ultime, a seguito d'infiltrazioni dalla copertura fortemente lesionata, sono entrate a contatto con

l'acqua, situazione che ha favorito il degrado causato da organismi xilofagi e funghi, e la perdita di planarità del pavimento; sono inoltre presenti macchie d'umidità e lacune nei decori su carta e legno.

Un ulteriore studio condotto dal Politecnico di Genova ha evidenziato anche deformazione del legno e distacchi delle cornici, per quel che concerne la parte strutturale, mentre rigonfiamenti, caduta dell'imprimitura e della pellicola pittorica, per quanto riguarda le decorazioni.^[6]

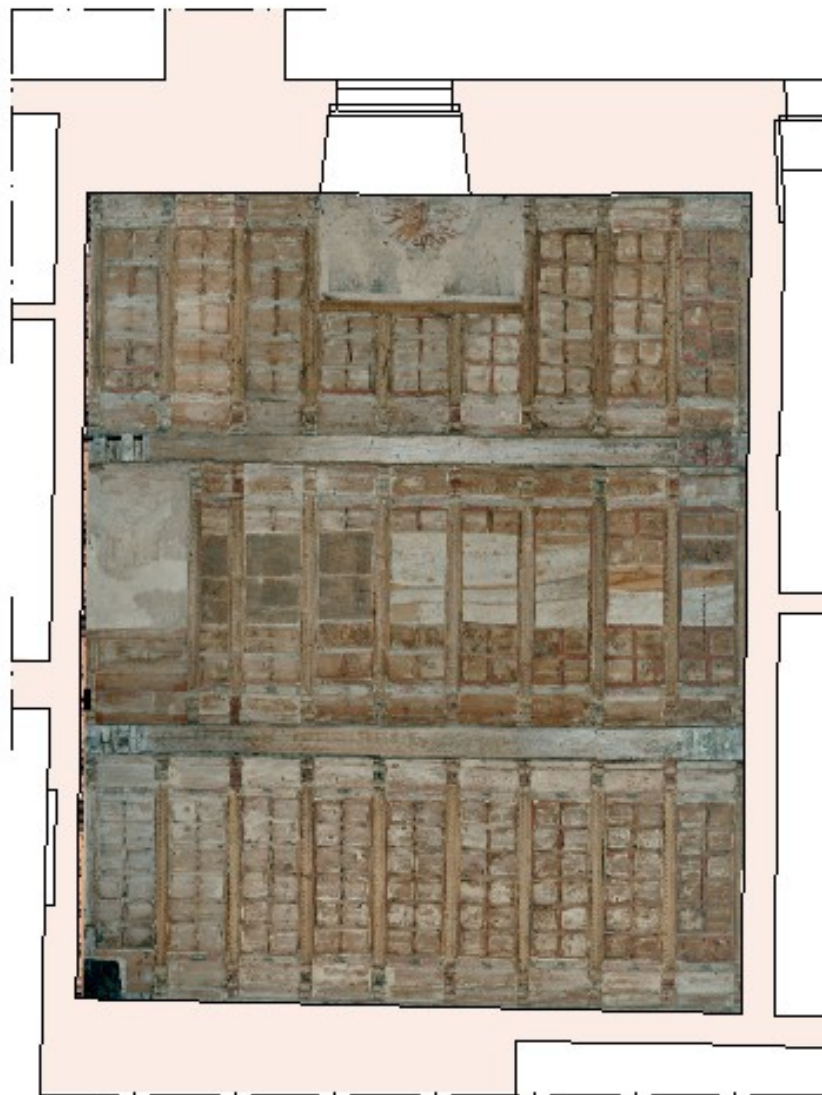


Figura 31: Solaio^[4]

3.3 Composizione e diagnostica del solaio della Sala d'Arme

Il solaio ligneo della “Sala d'Arme”, posto all'altezza di 6.50 m, si presenta come un solaio piano a regolo per convento con mensole, bussola e bastone; è costituito da una doppia orditura di travi e travetti, coperti da un tavolato ligneo. La superficie dell'intradosso si presenta interamente decorata, in parte direttamente sul legno, in parte su carta applicata; precedenti analisi hanno portato a decretare un scadente stato di conservazione per quanto riguarda gli elementi strutturali, ed un elevato tasso di degrado per quanto riguarda l'apparato decorativo.

L'orditura primaria è costituita da due travi lignee a sezione rettangolare di dimensioni pari a 28 x 35 cm, poste ad un interasse di 2.60 m, mentre l'orditura secondaria è costituita da 29 travetti su mensole lignee a sezione rettangolare di dimensioni pari a 10 x 12 cm, posti ad un interasse di 65 centimetri circa; entrambe le tipologie di elementi sono finiti con modanature a mezzo-toro sugli spigoli inferiori, decorazione che si riscontra anche su elementi di solai presenti in altre stanze della Rocca, quali la 211, 212, e da 215 a 220.

La struttura del solaio invece è caratterizzata da un pavimento di piastrelle in cotto di dimensioni pari a (3 x 14 x 28,5) cm, una caldana in malta di calce dello spessore di 5 cm, un sottofondo incoerente dello spessore di 6,5 cm e un tavolato di abete dello spessore di 2 cm.^[4]

3.3.1 Travi

Entrambe le travi costituenti l'orditura portante sono realizzate con abete bianco, di dimensioni pari a 28*35 cm e presentano un piallato a 4 fili con semi-toro sugli spigoli inferiori; mentre la prima non presenta difettosità, la seconda presenta: fibratura deviata, fessurazioni passanti da una faccia a quella contigua, nodi grossi. Inoltre, le teste di entrambe poggiano su mensole di abete.^[13] (Fig. 32)



Figura 32 : *Mensola in legno di abete delle travi* ^[13]

3.3.1.1 Trave n° 1



Figura 33: *Trave n° 1* ^[13]

In merito a questo elemento (Fig. 33) sono state condotte precedentemente delle analisi per valutarne lo stato di fatto, tra cui l'analisi dei carichi permanenti e la verifica delle condizioni interne della trave mediante un test resistografico.

Analisi dei carichi permanenti

Considerata un'area di influenza della trave pari a 2,78 m di lunghezza per 5,98 m di altezza, vengono valutati gli spessori dei singoli elementi costituenti il “pacchetto” del solaio:

- Pavimento in cotto: 3 cm
- Sottofondo di malta a base di calce: 5 cm
- Sottofondo incoerente: 6,5 cm
- Tavolato di abete: 2 cm
- Travetti in abete: 10 x 12 cm, interasse pari a 65 cm

Test resistografico

Anche se da una precedente analisi visiva e dalla battitura della trave non si sono riscontrati sintomi di degrado, visto l'elevato pregio del solaio, si è ritenuto opportuno effettuare questa prova in 5 punti, disposti nel seguente modo:

2 all'estremità nord; 2 all'estremità sud; 1 in mezzeria

per valutare la qualità del legname in opera ed escludere eventuali patologie non visibili a occhio nudo. La prova fornisce una valutazione della resistenza meccanica dell'elemento ligneo attraverso la resistenza opposta alla perforazione ottenuta con l'utilizzo di un trapano strumentato; essendo la resistenza alla perforazione correlata alla densità del legno indagato, lo strumento consente, indirettamente, di misurare le variazioni di densità nella sezione dell'elemento e fornire indicazioni sulle sue caratteristiche come difetti, anomalie ed alterazioni.

La successiva interpretazione dei dati acquisiti, seppur con valori di resistenza mediamente bassi, ha confermato l'assenza di patologie e fenomeni di degrado.

Inoltre, attraverso una misura della resistenza elettrica, è stato possibile risalire al valore di umidità ponderale del legno, pari al 10%; questo delinea una stato pressoché buono del materiale, in quanto l'umidità ponderale normale del legno si attesta attorno al valore del 12%.^[13]

3.3.1.2. Trave n° 2



Figura 34: Trave n° 2 e relativa mensola ^[13]

Anche per la seconda trave (Fig. 34) è stata condotta l'analisi dei carichi permanenti e un test resistografico per la valutazione dello stato di fatto e condizioni interne.

Analisi dei carichi permanenti

In merito all'analisi dei carichi si può far riferimento ai dati presentati per la prima trave, variando solamente l'area di influenza, pari a 2,55 m di lunghezza per 5,97 m di altezza.

Test resistografico

Il test resistografico è stato condotto utilizzando gli stessi criteri usati per la trave precedente e la successiva interpretazione dei dati acquisiti, seppur con valori di resistenza mediamente bassi, ha confermato l'assenza di patologie e fenomeni di degrado. Anche per questa trave è stata condotta una misurazione della resistenza elettrica, attraverso la quale è stato possibile valutare l'umidità ponderale del legno, pari al 10%. Confrontando i risultati ottenuti dal test resistografico delle due travi, realizzate con lo stesso materiale e provenienti dalla stessa fornitura, si evince come la tendenza dei valori bassi di resistenza sia imputabile alle caratteristiche del materiale utilizzato.^[13]

3.3.1.3 Decorazioni

Intraprendendo un attento esame visivo è possibile scorgere alcune particolarità in merito alle scelte intraprese nella decorazione del solaio; infatti, ad una ricchezza decorativa marcata per quell'epoca, che mostra dettagli decorativi di rara ed elegante perizia, si contrappongono alcune circostanze sospette, che potrebbero far pensare a lavori affrettati o ad una lavorazione poco curata col l'ausilio di materiale di ripiego.

Guardando infatti i disegni geometrici sui travetti, la decorazione colorata è eseguita a mascherina con mordenti, precedentemente preparata in bottega per poi essere montata in opera; su alcuni elementi il dipinto non neppure perfettamente centrato con la faccia dell'elemento architettonico.

La decorazione sul fianco dei travetti si interrompe bruscamente, senza alcun cenno di riquadratura o di accompagnamento all'attacco con la tavola della bussola. Queste ultime, d'altra parte, pur presentando una decorazione inserita entro riquadri, nell'inserimento tra un travetto e l'altro, talvolta, non risultano perfettamente centrate.^[6]

I motivi di tutto ciò possono essere tra i più svariati, includendo adattamenti in corso d'opera, uso di diversi materiali, realizzazione da parte di diversi operatori, e altro ancora; certo che un'analisi stratigrafica dei manufatti lignei, ad interrogazione delle diverse tracce di colla, colore e impronte lasciate dagli strumenti utilizzati per la lavorazione del legno, sarebbe utile per rispondere a questi interrogativi.

Cercando di ricostruire il tracciato storico del degrado, le analisi condotte dal Politecnico di Genova hanno riguardato i diversi componenti del solaio e il loro livello di degrado, soprattutto se di entità diversa; ad esempio, hanno cercato un nesso tra l'ossidazione dei chiodi che assicurano le cornici del cassettonato alle tavole e le paste adesive usate per le carte, mentre altri studi hanno riguardato la relazione carta-legno-colla, in quanto le carte dipinte, pur essendo state disposte su legno con grande maestria ed accuratezza, si sono poi distaccate, rilevando difettosità nella tenuta.

A seguito delle analisi, è anche emerso che parte del cassettonato è stato sostituito con assi lignei di diverse essenze, il ché può ritenersi una scelta abbastanza discutibile vista la volontà originaria di realizzare il solaio con un' unica essenza di conifera; una possibile spiegazione a tale operazione può essere ricercata nel cercare di rendere

continuo il tavolato ligneo dell'estradosso per la posa della pavimentazione in cotto, senza preoccuparsi di uniformare l'effetto all'intradosso.

Chiaramente, di fronte all'attacco di organismi xilofagi, le diverse essenze hanno risposto in maniera differente, tanto che oggi, alcuni assi sono seriamente infestati.^[6]

3.4 Analisi dei solaio delle stanze adiacenti alla Sala d'Arme

3.4.1 Composizione e diagnostica del solaio della stanza n° 112

La stanza presenta un solaio piano, all'altezza di 2,81 m, con doppia orditura di travi, travetti e tavolato ligneo; negli anni passati è stato realizzato un consolidamento del solaio stesso, mediante l'inserimento di due putrelle in acciaio, poggianti in mezzeria, su due pilastri in muratura, e mediante l'inserimento di un puntello in legno di sezione rotonda posto all'intradosso della trave T016, per limitarne l'inflessione. (Fig. 35)

A ridosso della parete est, la struttura lignea del solaio è stata tagliata per far passare il basamento in mattoni del caminetto posto al livello superiore.



Figura 35: Travi lignee e putrella in acciaio del solaio del vano 112 ^[13]

L'orditura primaria è costituita da 2 travi in legno di quercia, di sezione variabile, poste ad un interasse di 2,52 m circa, e da due putrelle in acciaio, mentre l'orditura secondaria è costituita da 24 travetti a sezione rettangolare, di dimensioni pari a 10 x 14 cm circa, posti ad un interasse di 73,5 cm circa. La struttura del solaio è caratterizzata da un

pavimento di piastrelle in cotto di dimensioni pari a (24,5 x 12,5 x 4) cm, da una caldana in malta di calce dello spessore di 4,5 cm, e da un tavolato in legno di abete, dello spessore di 2 cm.

Trattandosi di un vano ventilato, le strutture presentano un ottimo stato di conservazione.^[13]

3.4.1.1 Travi

3.4.1.1.1 Trave n°1

L'elemento in questione è di legno di quercia asciato, avente una sezione minima rettangolare pari ad 32 x 35 cm e una sezione massima rettangolare pari ad 34 x 40 cm; la trave presenta alcune difettosità, quali una fibratura ad andamento irregolare, ed in corrispondenza della testata nord, è evidente un attacco da parte di organismi xilofagi, limitatamente alla parte dell'alburno.^[13] (Fig. 36)



Figura 36: Trave n° 1 della stanza 112 ^[13]

3.4.1.1.2 Trave n° 2

L'elemento in questione è di legno di quercia, asciato a 4 fili, avente una sezione media pari a 26 x 30 cm (Fig. 37); la trave, oltre ad un angolo di deviazione pari a 7,16°, presenta numerose difettosità, quali: fibratura deviata, fessurazioni passanti da una faccia a quella contigua, nodi grossi. (Fig. 37B)

Oltre alle difettosità appena elencate, la trave presenta uno stato di degrado piuttosto avanzato, dovuto all'attacco da parte di organismi xilofagi, limitatamente alla parte di alburno, gallerie di circa 1-2 mm e costipate di rosime molto fine; dal momento che

l'elemento mostra un'inflexione in mezzeria, è stato inserito un rinforzo proprio per ovviare a questo dissesto.^[13] (Fig. 37C)



Figura 37: *Trave n° 2 della stanza 112* ^[13]

3.4.1.1.3 Puntello in legno

Si tratta di un elemento costruito in legno di latifolia asciato tondo, avente diametro medio pari a 25 cm, non soggetto ad alcun tipo di dissesto, degrado o difettosità. La base a sezione quadrata e alcune incisioni anulari lungo il fusto, fanno pensare che l'elemento possa aver avuto inizialmente un altro e diverso impiego.^[13] (Fig. 38)



Figura 38: *Puntello in legno della stanza 112* ^[13]

3.4.2 Composizione e diagnostica del solaio della stanza n° 108

Il vano presenta un solaio piano, posto ad un'altezza di 2,81 m, a semplice orditura su travi tinteggiate di bianco e tavolato ligneo; nel complesso mostra un buon stato di conservazione, anche se non è ancora del tutto chiara la funzione della grossa trave di quercia inserita sotto l'ultima trave nord.^[13] (Fig. 40)

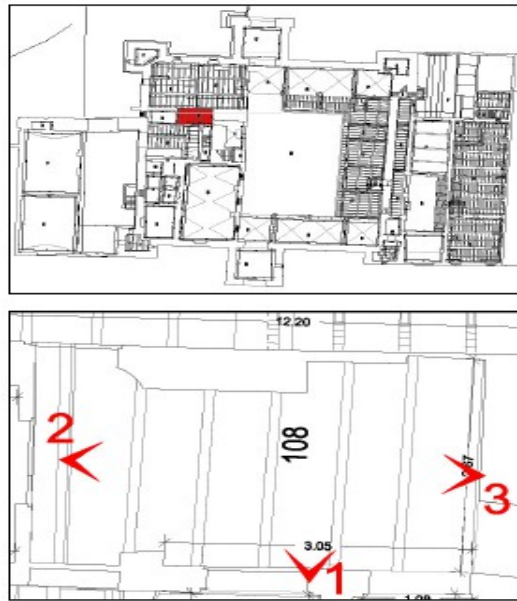


Figura 39: Individuazione in pianta della stanza ^[13]



Figura 40: Solaio della stanza 108 ^[13]

L'orditura primaria è costituita da 7 travi a sezione rettangolari, di dimensioni pari a 12 x 18 cm, poste ad un interasse di 66 cm, più una trave di sezione non rilevabile, collocata al di sotto dell'ultima travatura a nord; l'orditura secondaria non è invece

presente ed inoltre, la struttura del solaio, di spessore totale pari a 10 cm, non è risultata ispezionabile.

È da notare che la stanza in questione è interclusa tra gli altri ambienti adiacenti, non presentando alcun tipo di apertura verso l'esterno; risulta di conseguenza, un ambiente umido e poco ventilato.^[13]

3.5 Diagnostica termo igrometrica nella Rocca Rangoni

La analisi diagnostiche eseguite all'interno della Rocca Rangoni, hanno lo scopo di definire in prima battuta, le condizioni microclimatiche del complesso e le dinamiche di scambio termo-igrometrico tra gli ambienti e le strutture murarie; queste valutazioni servono per stabilire le condizioni di benessere ambientale e di conservazione dei materiali da costruzione e delle superfici decorate.

Il monitoraggio microclimatico all'interno della Rocca è avvenuto mediante l'ausilio di termoigrometri ambientali ad acquisizione automatica, rilevanti in continuo, ogni 2 ore in questo caso, le variazioni di temperatura e umidità relativa; inoltre, negli spazi maggiormente decorati o di importanza distributiva, sono state effettuate delle misurazioni psicrometriche per stabilire con precisione la distribuzione dei parametri microclimatici.

Infine, è stata eseguita una termovisione agli infrarossi, in modo da mappare le parti di muratura maggiormente imbibite, valutando anche le dinamiche di scambio termoigrometrico tra la muratura e lo spazio interno; la termografia è valsa anche per una celere prospezione non distruttiva delle murature intonacate, la lettura della tessitura muraria e delle discontinuità eventualmente presenti sotto di essa, a supporto dell'analisi stratigrafica.^[5]

3.5.1 Monitoraggio microclimatico

Basandosi sulla teoria per cui la velocità di evaporazione e cristallizzazione dei sali solubili è fortemente influenzata dalle condizioni termoigrometriche interne all'edificio, dalle variazioni ambientali esterne, dalle caratteristiche proprie dell'edificio e dalla destinazione d'uso dell'ambiente, per una corretta valutazione dei fenomeni di

condensazione, di gelo/disgelo e della cristallizzazione salina, è opportuno monitorare i parametri microclimatici sia all'esterno che all'interno dell'edificio, registrandone le variazioni giornaliere e stagionali.

Guardando alla distribuzione degli spazi all'interno della Rocca, troviamo forti discontinuità sia in pianta, per la presenta alternata di corpi singoli e corpi doppi, sia in sezione, visto la presenza disuniforme del piano interrato o del mezzanino; inoltre, ci sono ambienti abitati e conseguentemente riscaldati, altri non abitati ma dotati di serramenti efficaci, altri ancora invece, non riscaldati né tanto meno dotati di serramenti efficienti.

Sulla base di queste considerazioni, sono stati definiti 10 punti di monitoraggio, al fine di ottenere dati significativi per l'individuazione delle potenziali fonti di anomalie e squilibri.^[5]

3.5.2 Rilievo termografico

La termografia è un'analisi non distruttiva, in quanto non prevede il contatto con la superficie analizzata, utilizzabile nel campo dell'edilizia, poiché le diverse componenti di una muratura soggetta a sollecitazioni termiche, assumono temperature differenti, visto i diversi valori di conduttività termica e calore specifico.^[5]

Si basa sulla misura del flusso totale di energia "E" da parte dell'apparecchiatura, costituita da una camera ad infrarossi che trasforma le radiazioni termiche in segnali elettrici, successivamente convertiti in immagini digitali in falsi colori.

Lo scopo di un'indagine termografica è duplice: da un lato si possono indagare strati di 1-2 centimetri di profondità nella muratura per individuare eventuali aperture tamponate, canne fumarie, vecchie tracce d'impianti o altro ancora; dall'altro invece, è possibile rilevare la tessitura muraria ed eventuali lesioni e/o discontinuità presenti in essa, in quanto proprio quest'ultime possono costituire aree preferenziali per lo sviluppo di fenomeni di degrado, anche in relazione alle variazioni microclimatiche esterne ed interne.

Da ricordare inoltre, che la termografia viene applicata anche al rilievo dell'umidità, per definire l'altezza di risalita dell'acqua dal terreno e/o scoprire eventuali zone più interessate dal fenomeno, rispetto ad altre.^[5]

3.5.3 Risultati delle indagini

I dati di temperatura e umidità relativa rilevati nel semestre aprile-ottobre 2006, ad edificio disabitato, sono in completo accordo con l'etimologia dell'edificio, cioè una muratura di laterizio pieno in contesto padano; i valori oltrepassano solo occasionalmente il limite di condensa nelle ore più fredde della notte e in corrispondenza di zone sfavorite sotto un punto di vista morfologico ed espositivo.

Le rilevazioni confermano l'elevato gradiente a cui è sottoposta l'intera struttura, soprattutto nelle ore più calde delle giornate estive; in corrispondenza dell'ex appartamento del Marchese Rangoni, i serramenti a vetro semplice con cornice in legno riducono fortemente le escursioni termiche giornaliere, portando numerosi benefici agli ambienti, anche in termini di calo dell'umidità.

Le riprese termografie eseguite sulle facciate esterne della Rocca evidenziano importanti fenomeni evaporativi, in accordo con la stagione in cui sono avvenute le misurazioni, mentre le stesse analisi effettuate all'interno, mostrano gradienti complessivamente contenuti e una sostanziale uniformità di comportamento termico, salvo zone limitate corrispondenti a tamponamenti e/o aperture realizzate recentemente.

[5]

Le riprese, sia estive che autunnali, effettuate sulla facciata della Rocca in modalità passiva, cioè in mancanza della sollecitazione termica solare, mostrano un'evidente zona fredda al piede delle murature. A seguito di quest'analisi è stata redatta una mappatura delle temperature superficiali, grazie alla quale è stato possibile estendere i riscontri quantitativi, non solo all'intorno prossimo della zona di rilievo, ma anche ad una più ampia zona circostante, definita omogenea per caratteristiche di temperatura superficiale; questo ha permesso di ridurre il numero di campionamenti che, in linea di principio, vengono ridotti ad uno per ogni discontinuità termica rilevante. Dove è stato possibile, si è caratterizzata la distribuzione del gradiente igrometrico lungo la sezione della muratura, effettuando test gravimetrici per determinare il contenuto d'acqua nelle strutture.

In merito a quest'ultima indagine, sono stati individuati tre livelli di prelievo a quote crescenti rispetto al livello del terreno ed a diverse profondità del muro, col proposito di verificare l'esistenza di un nesso tra il contenuto di umidità nella muratura e le

differenze cromatiche visibili sulla fascia basamentale del paramento murario della facciata ovest in corrispondenza di tutte le fasi stagionali; infatti, già da un primo esame visivo, si può notare una fascia scura parallela al terreno (Fig. 41), che sale fino ad una quota di 2-2.5 m, solo in parte coincidente con la linea di risalita capillare, e ad essa attribuibile. La prima area d'indagine ha riguardato la zona nord del prospetto ovest della Rocca, dove sono stati effettuati tre prelievi alle quote di 0,50 m, 1,50 m, 2,70m; i risultati mostrano una maggiore differenza di imbibizione nella parte superficiale, in accordo con quanto rilevato dalla termografia, in cui appariva una fascia più scura tra i 50 cm e 1,50m.

La seconda area d'indagine ha riguardato invece, il fianco sud della torre d'ingresso alla Rocca, sulla quale sono stati effettuati quattro prelievi alle quote di 0,30 m, 1,50 m, 2,50 m, 0,30 m; i risultati mostrando una distribuzione omogenea nella fascia muraria indagata.^[5]



Figura 41: *Fascia scura parallela al terreno sull'ingresso del prospetto ovest*

Cap. 4 : Sopralluogo e campionamenti

4.1 Individuazione dei campioni

Sono stati condotti diversi sopralluoghi della Sala d'Arme all'interno di Rocca Rangoni, dove si è potuto ispezionare la stanza e, previa autorizzazione a procedere dalla Soprintendenza ai Beni Architettonici e Paesaggistici, si è campionato la sala in diversi punti di notevole interesse, precedentemente individuati, per poi farvi le analisi in laboratorio.

Di seguito si riporta l'individuazione dei punti di campionamento, con relative fotografie e descrizione di quanto campionato:

- Campione n° 1 = Mattone della pavimentazione;
- Campione n° 2 = Efflorescenze della pavimentazione;
- Campione n° 3 = Intonaco superficiale della parete;
- Campione n° 4 = Intonaco del secondo strato della parete;
- Campione n° 5 = Intonaco, probabilmente cementizio, dello spigolo murario;
- Campione n° 6 = Intonaco decorato della parte superiore della parete “c”;
- Campione n° 7 = Intonaco prelevato all'intradosso del portone, prospiciente la corte interna.



Figura 42: *Individuazione dei campioni 1 e 2 nel pavimento*



Figura 43: *Campione n° 1, laterizio della pavimentazione*



Figura 44: *Campione n° 2, Efflorescenze saline*

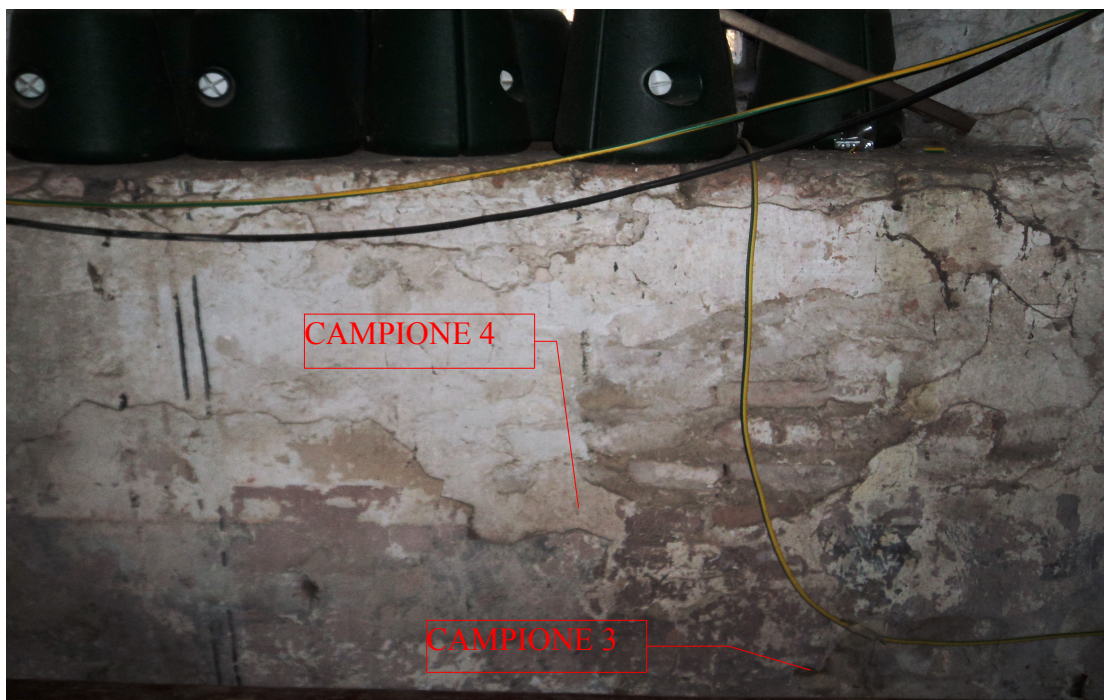


Figura 45: *Individuazione del campione n° 3 e 4, Intonaci della parete B*



CAMPIONE 5

Figura 46: *Individuazione del Campione 5, Intonaco dello spigolo murario*

Figura 47: *Campione 5*





Figura 48: Individuazione del campione n° 6, Intonaco decorato della parete C



Figura 49: Campione n° 6

CAMPIONE 7



Figura 50: Individuazione del campione n° 7



Figura 51: Campione n° 7, Intonaco dell'intradosso del portone

4.2 Analisi di laboratorio effettuate sui campioni

Di seguito si riporta una descrizione schematica dei campioni prelevati in Rocca e delle prove di laboratorio effettuate su di essi:

CAMPIONE	TIPOLOGIA	DESCRIZIONE	ANALISI
1	Frammenti di laterizio della pavimentazione	Dimensioni: 4 x 4 x 2 cm circa. Colore: Rosso chiaro Descrizione: sono presenti efflorescenze saline di colore bianco sulla superficie.	Analisi dei sali Calcimetria
2	Efflorescenze bianche	Efflorescenze di aspetto "lanuginoso" prelevate dalla pavimentazione in laterizi	Analisi dei sali
3	Intonaco della parete	Dimensioni: 3,5 x 3,2 cm circa. Spessore: 0,5 cm circa Descrizione: il campione è formato da due strati:	TGA Diffrazione a raggi X
		STRATO 3A: è lo strato, di color ocra, a contatto col supporto murario. Presenta aggregati a spigolo vivo, efflorescenze superficiali e uno strato di tinta rosata.	
		STRATO 3B: è lo strato più esterno, di color grigio scuro, sul quale sono presenti due tinte, una bianca e una rosso scuro.	
4	Intonaco della parete	Dimensioni: 2,8 x 2,5 cm circa Spessore: 0,6 cm circa. Colore: beige Consistenza: friabile	TGA Diffrazione a raggi X Microscopio Ottico
5	Intonaco dello spigolo dell'apertura	Dimensioni: 2,9 x 2 cm circa. Spessore: 0,2 cm circa. Colore: grigio scuro-beige Consistenza: frantumabile	TGA Diffrazione a raggi X

6	Intonaco della parete porzione superiore	Dimensioni: 7 x 4,5 cm circa. Spessore: 0,5 cm circa. Descrizione: si tratta di due strati d'intonaco sovrapposti:	Analisi dei sali Analisi granulometrica Diffrazione a raggi X (separatamente sulle frazioni legante e aggregato)
		STRATO 6A: è lo strato superficiale, di color grigio scuro, sul quale sono presenti due strati di tinta, il primo di color bianco, mentre il secondo di color arancione.	
		STRATO 6B: è lo strato a diretto contatto con il supporto murario; di color grigio chiaro, presenta qualche macroporosità.	
7	Intonaco dell'intradosso del portone	Dimensioni: 4,2 x 1,5 cm circa. Spessore: 0,2 cm Descrizione: supporto di color grigio chiaro il quale reca tracce di tinta bianca e di una successiva tinta rosata.	Diffrazione a Raggi X

4.2.1 Calcimetria

E' una tecnica con cui si determina la percentuale di carbonato di calcio presente all'interno dei materiali.

La prova si fonda sul principio di far reagire, in un volume chiuso, il calcare con l'acido cloridrico e misurare il volume di anidride carbonica sviluppata dalla reazione:



che consente di risalire al contenuto di carbonato di calcio presente nel materiale.

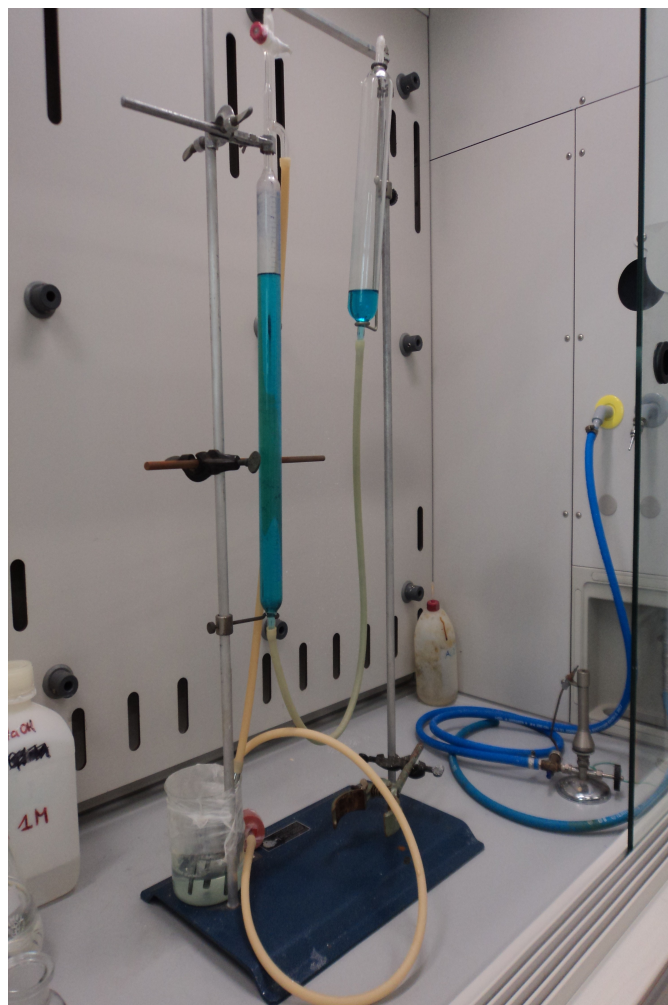


Figura 52: *Calcimetro Dietrich-Fruhling*

Dopo aver uguagliato a livello zero i contenitori in vetro graduati (Fig. 52), il campione precedentemente pesato, viene inserito all'interno di un becker con una fialetta di acido cloridrico; si chiude il sistema e controllando che non vi sia contatto tra la soluzione e l'aria esterna, si agita manualmente il becker facendo avvenire la reazione (Fig. 53); contemporaneamente a ciò, il livello della soluzione all'interno della buretta decresce in funzione del quantitativo di anidride carbonica sviluppatasi.

L'analisi è stata effettuata su un campione di circa 0,8 grammi.

Infine, a seguito della prova, si ripete la taratura con un campione di carbonato di calcio puro di peso circa pari a 0,4 grammi.



Figura 53: *Reazione tra acido cloridrico e campione, e conseguente abbassamento della soluzione all'interno della clessidra*

4.2.2 Cromatografia ionica

E' un'analisi volta a identificare e quantificare i sali solubili, in termini di anioni, presenti in un campione.

Preparazione del campione

A seguito della macinatura del campione mediante mortaio, esso viene introdotto in un becker con 100 grammi di acqua deionizzata bollente, in modo da favorire la solubilizzazione dei sali, e un agitatore magnetico, portando poi la soluzione, nei successivi 5 minuti, ad ebollizione (Fig. 54); in un secondo tempo, la sospensione viene filtrata, ottenendo una soluzione contenente i sali disciolti. (Fig. 55)



Figura 54: *Campione sulla piastra riscaldante durante l'ebollizione*



Figura 55: *Filtrazione della soluzione con il campione*

Colonna cromatografica

Sul campione del filtrato, eventualmente diluito se necessario, viene analizzato mediante cromatografia ionica.

L'analisi dei sali solubili presenti all'interno della soluzione viene effettuata mediante un cromatografo ionico (DIONEX, CS-1000) (Fig. 56A) all'interno del quale sono presenti una colonna cromatografica e una cella di misura. (Fig. 56B) All'interno della colonna sono presenti delle resine, il cui compito è quello di separare i sali, in ioni negativi e in ioni positivi; a seguito della separazione, le resine trattengono gli ioni positivi, mentre quelli negativi escono dalla colonna cromatografica a tempi differenziati, in funzione della loro conducibilità elettrica, misurata dalla cella di misura.

Per l'analisi, lo strumento è stato tarato alla concentrazione massima di 250 ppm, in quanto in presenza di un grosso quantitativo di sali, la cella di misura potrebbe danneggiarsi.



Figura 56: *Strumentazione DIONEX con individuazione della colonna cromatografica e cella di misura*

A seguito dell'analisi si ottiene un grafico chiamato **cromatogramma**, nel quale sono rappresentati gli ioni negativi presenti all'interno della soluzione, in funzione del tempo

d'uscita dalla colonna cromatografica e la conducibilità elettrica corrispondente; misurando l'area sottesa ad ogni picco, è possibile calcolare la quantità dei vari anioni.

4.2.3. *Analisi termogravimetrica o TGA*

E' un'analisi volta a misurare la perdita di peso del campione, all'aumentare della temperatura.

La perdita di peso può essere dovuta a degradazione delle sostanze organiche, decomposizione o disidratazione di composti inorganici; dal momento che, questi fenomeni avvengono in corrispondenza di range di temperatura determinati, dalla perdita di peso è indirettamente possibile risalire alla sostanza in oggetto.

Dopo aver macinato finemente il campione, questo viene inserito all'interno di uno strumento, il quale lo riscalda fino ad una temperatura stabilita dall'utente, variabile tra gli 800 e i 1000 °C, facendone contemporaneamente la pesatura: i materiali costituenti il campione, sensibili alle alte temperature, si degradano o decompongono, riducendo di conseguenza, il peso del campione.

Volendo riportare alcuni esempi:

- 150-170 °C = disidratazione del gesso
- 200-300 °C = decomposizione delle sostanze organiche
- 500-550 °C = disidratazione dei composti idraulici
- 600-800 °C = decomposizione del carbonato di calcio

4.2.4 *Diffrazione a raggi X*

E' un'analisi che permette di identificare i costituenti mineralogici dei materiali.

L'analisi si basa sulla rilevazione delle radiazioni X diffratte dai piani cristallini del materiale esaminato in accordo con la legge di Bragg, al variare dell'angolo 2θ della radiazione incidente:

$$n\lambda = 2d\sin\theta$$

dove

- n = numero intero che indica l'ordine della diffrazione (in questo caso, 1);
- λ = lunghezza d'onda della radiazione X incidente;
- θ = angolo d'incidenza della radiazione con i piani reticolari;
- d = distanza tra i piani reticolari.

Lo strumento utilizzato è un diffrattometro per polveri Philips 1840 con anodo di rame (Cu, $\lambda = 1,54\text{\AA}$), tensione 40 kV e corrente 20mA.

Per la preparazione del provino si procede come segue:

- si macinano 3-4 g di materiale in un mortaio di agata, fino ad ottenere una polvere finissima, per dare un orientamento statistico ai piani cristallini;
- la polvere viene compattata in un porta-campione di alluminio;
- l'analisi viene effettuata automaticamente in funzione dell'angolo 2θ tra 4 e 70°.

Lo spettro viene registrato attraverso un rivelatore di raggi X, riportando l'intensità della radiazione diffratta in funzione dell'angolo 2θ (**diffrattogramma**). La natura chimica del campione si determina per confronto con una banca dati.

La posizione e l'intensità dei picchi sono infatti caratteristici di ogni struttura cristallina: rapportando l'area dei picchi appartenenti a fasi diverse è possibile anche effettuare una determinazione quantitativa delle fasi presenti nel materiale.

La risoluzione dei picchi caratteristici delle sostanze all'interno del diffrattogramma può variare in altezza, fenomeno da ricondurre alla quantità di campione usato per l'analisi, ma soprattutto alla cura con cui esso è stato preparato, cioè dalla finezza con cui è stato macinato.

Purtroppo questa tecnica può essere utilizzata solo per materiali cristallini, cioè dotati di piani cristallini, in quanto se si provasse a sottoporre alla diffrattometria una sostanza amorfa, nella quale non esistono piani cristallini, all'interno del diffrattogramma non si otterrebbero dei picchi ben definiti, ma solo delle “spalle”; a volte può capitare che, a causa della bassa risoluzione, alcuni picchi caratteristici di una sostanza possano essere talmente piccoli, da non essere letti.

4.3 Risultati delle analisi condotte sul Campione n° 1

Il campione si presenta come una porzione di mattone prelevato dal pavimento della Sala d'Arme, di color arancio-ocra (Fig.57), di dimensioni pari a 4 cm x 4 cm x 2 cm.

Ad un primo esame visivo, si rilevano porosità e delle efflorescenze di natura lanuginosa di color bianco, depositate sulla superficie; inoltre, durante la preparazione del campione per le analisi, si è notato che il materiale non si sfalda facilmente.

4.3.1 Cromatografia ionica



Figura 57: *Campione n° 1 macinato all'interno del mortaio*

I risultati ottenuti al termine dell'analisi cromatografica sono:

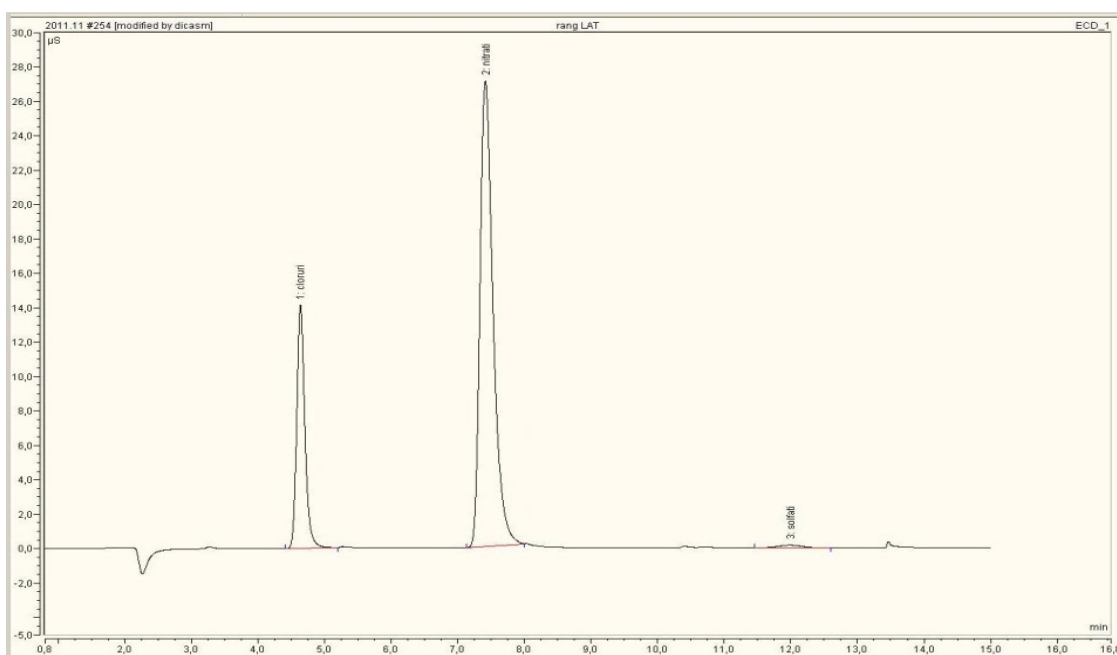


Figura 58: Cromatogramma

Cloruri	14,3368 ppm
Nitrati	56,0681 ppm
Solfati	1,0834 ppm

I valori devono essere moltiplicati per 10, in quanto il millilitro di soluzione è stato diluito 10 volte in acqua deionizzata.

Per valutare la quantità percentuale dei diversi ioni salini all'interno del campione, si utilizza la seguente relazione:

$$\frac{\text{ppm} \cdot \text{peso soluzione (litri)}}{\text{peso campione (mg)}} \cdot 100$$

Peso soluzione = Peso finale soluzione – Tara becker = 170,603 – 74,583 = 96,02 g = 0,09602 l

Peso campione = 1,748 g = 1748 mg

Cloruri (Cl^-) = 0,788 %

Nitrati (NO_3^-) = 3,08 %

Solfati (SO_4^-) = 0,06 %

In accordo con la destinazione d'uso quattrocentesca, per la quale la stanza era destinata a stalla, il laterizio costituente la pavimentazione presenta un elevato tasso di nitrati, sali generalmente presenti in edifici rurali, in quanto derivanti da sostanze organiche di origine animale, contenenti ammoniaca; nella maggior parte dei casi si tratta di sali igroscopici, cioè capaci di trattenere l'umidità presente nell'aria, creando quindi condizioni poco salubri negli ambienti interni. Da sottolineare anche il basso contenuto di solfati, sali solubili la cui presenza può essere ricondotta a tre diverse cause: la prima riguarda l'umidità di risalita dal terreno, la seconda riguarda la solubilizzazione di materiali contenenti gesso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), derivante per esempio dagli intonaci applicati alle pareti, assorbita poi all'interno dei pori dei laterizi; la terza invece, riguarda il fenomeno della solfaturia, cioè l'eliminazione urinaria di solfati da parte degli animali, come prodotti finali, inorganici, del metabolismo animale dello zolfo, compatibile con l'antica destinazione d'uso della stanza.^[12]

La presenza di solfati genera tipicamente lo sgretolamento superficiale del materiale in cui sono contenuti e la sua erosione, in quanto cristallizzando, aumentano notevolmente di volume; questi fenomeni sono stati riscontrati sulla pavimentazione di cui i laterizi esaminati fanno parte.

4.3.2 Calcimetria

Sono state eseguite tre tarature iniziali dello strumento, prima di eseguire la prova sul campione di laterizio precedentemente macinato; infine si è fatta la taratura finale. Di seguito si riporta il calcolo della costante “x” media:

$$x_m = \frac{x_1 + x_2}{2} = 0,4065 \text{ g/cc}$$

In seguito, si calcola la % CaCO_3 media presente nel laterizio:

$$\% \text{CaCO}_3 \text{ media} = \mathbf{12 \%}$$

La percentuale di carbonato di calcio presente all'interno del laterizio è molto elevata rispetto al valore fisiologico pari all' 1-2%, perciò si tratta di laterizi poco cotti, situazione inaspettata, in quanto nell'antichità, per le pavimentazioni venivano

generalmente utilizzati mattoni molto cotti, di colore scuro, per conferire una maggiore resistenza all'usura. In questo caso, è legittimo pensare che trattandosi di un locale di servizio, quale una stalla, si preferì usare materiali di qualità modesta e facile approvvigionamento, non trattandosi di una sala di rappresentanza.

4.4 Risultati delle analisi condotte sul Campione n° 2

Il campione si presenta come una massa lanuginosa di color bianco.

4.4.1 Cromatografia ionica

E' stato prelevato metà campione, il quale è stato solubilizzato in un quantitativo di acqua più grande di 10 volte, per evitare che la concentrazione dei sali fosse troppo elevata e danneggiasse la strumentazione.

I risultati ottenuti al termine dell'analisi cromatografica sono:

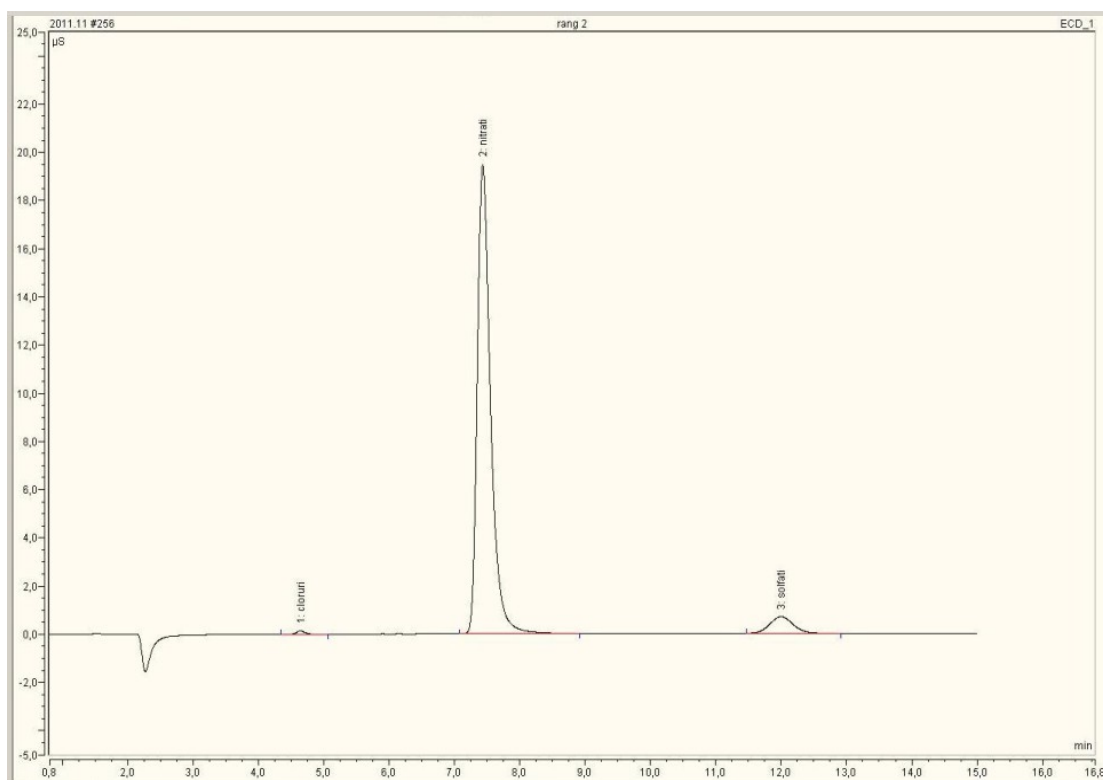


Figura 59: Cromatogramma

Cloruri	0,2672 ppm
Nitrati	42,6029 ppm
Solfati	4,6486 ppm

I valori devono essere moltiplicati per 20, in quanto il millilitro di soluzione è stato diluito 20 volte in acqua deionizzata.

Per valutare la quantità percentuale dei diversi ioni salini all'interno del campione, si utilizza la seguente relazione:

$$\frac{ppm \cdot \text{peso soluzione (litri)}}{\text{peso campione (mg)}} \cdot 100$$

$$\text{Peso soluzione} = \text{Peso finale soluzione} - \text{Tara becker} = 156,197 - 75,757 = 80,44 \text{ g} = 0,08044 \text{ l}$$

$$\text{Peso campione} = 0,14983 \text{ g} = 149,83 \text{ mg}$$

$$\text{Cloruri} = 0,287 \%$$

$$\text{Nitrati} = 45,745 \%$$

$$\text{Solfati} = 4,991 \%$$

L'efflorescenza salina è un deposito generalmente superficiale, di sali solubili, presenti sulle murature a seguito dell'evaporazione dell'acqua in cui essi sono disciolti, tipico dei locali soggetti a forte umidità; sicuramente, è un fenomeno legato all'umidità di risalita capillare dal terreno, fonte dell'acqua che in seguito evapora nell'atmosfera.

Analizzando i risultati si evince che l'efflorescenza salina campionata in prossimità della pavimentazione è costituita per la maggior parte da nitrati, risultato in accordo con quanto trovato per il laterizio del pavimento, in seguito alla destinazione di stalla a cui la stanza era adibita.

4.5 Risultati delle analisi condotte sul Campione n° 3

Il campione è uno strato d'intonaco prelevato in corrispondenza della parete della Sala d'Arme, avente dimensioni 3,5 cm x 3,2 cm x 0,5 cm; si presenta come una sovrapposizione di due intonaci differenti, i quali sono stati separati per poter svolgere le analisi. (Fig. 60)

Al momento della preparazione dei singoli campioni, l'intonaco superficiale, ridenominato “campione n° 3A” presenta una buona resistenza alla frantumazione, proprietà invece assente, nell'intonaco sottostante, ridenominato “campione n° 3B”.

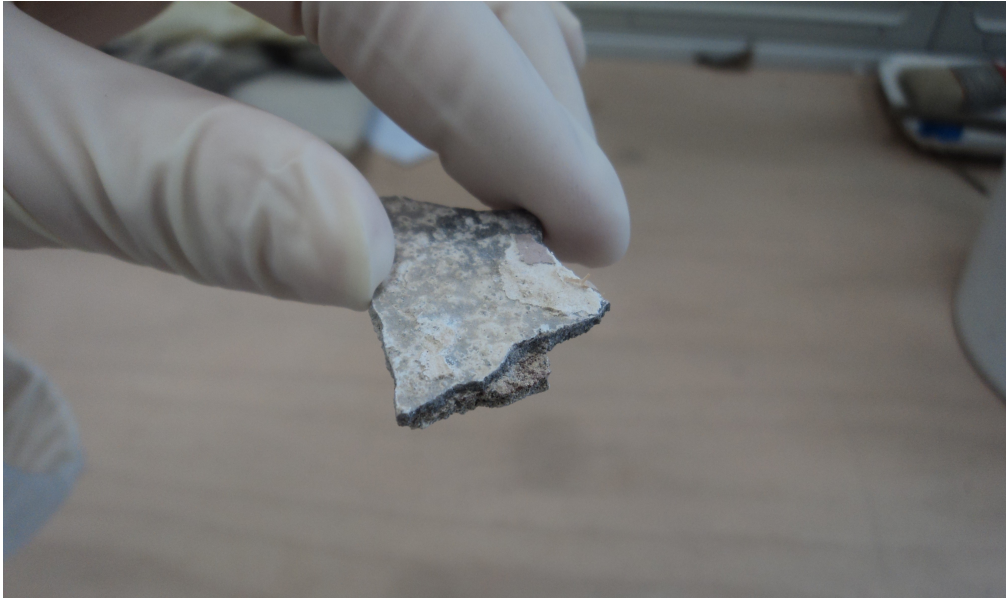


Figura 60: *Campione n° 3*

4.5.1 Campione n° 3A

4.5.1.1 Termogravimetria

L'analisi è stata condotta in l'azoto, fissando una temperatura di equilibratura a 40°C e procedendo con una velocità di riscaldamento di 20°C/minuto, fino al raggiungimento della temperatura di 850°C.

Di seguito si riportano i risultati ottenuti:

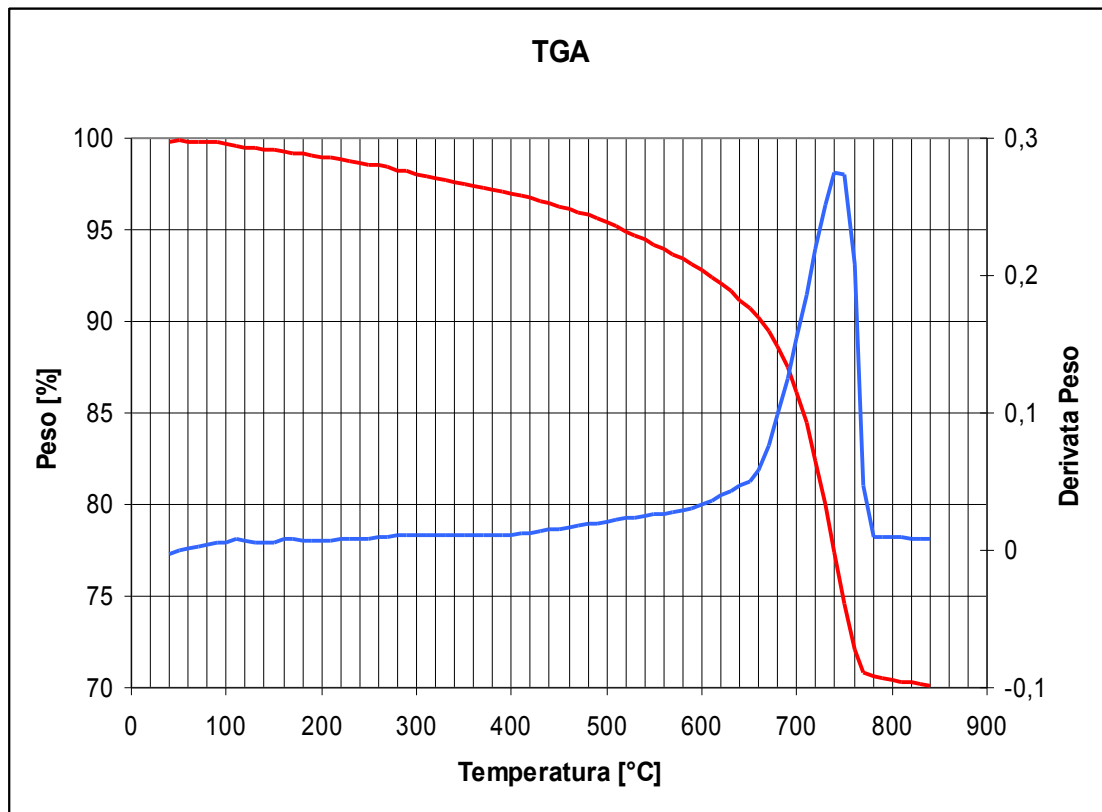


Figura 61: Risultati della termogravimetria

Il grafico è composto da due curve: la curva rossa rappresenta la progressiva perdita percentuale di peso all'aumentare della temperatura, mentre la curva blu rappresenta la derivata; in relazione alla temperatura corrispondente al picco si riesce a dedurre quale materiale è presente nel campione.

Analizzando la curva blu, il picco presente attorno ai 740°C è presumibilmente ascrivibile alla decomposizione del carbonato di calcio, e la “spalla” rilevabile attorno ai 500°C, fa pensare alla possibile disidratazione di qualche fase idrata.

4.5.1.2 Diffrazione ai Raggi X

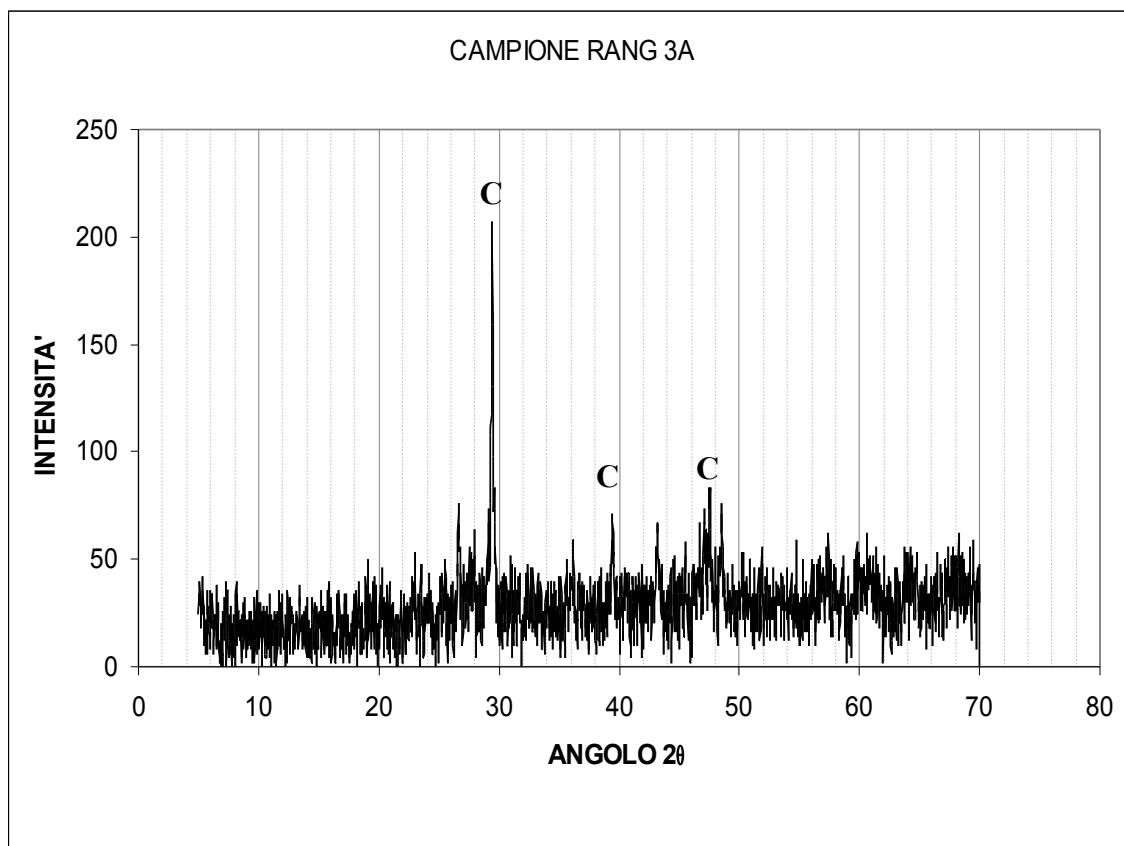


Figura 62: *Diffratogramma del campione 3A (C = calcite)*

I picchi del diffrattogramma corrispondono all'andamento della calcite, quindi, in accordo con quanto emerso dalla TGA, si tratta di un supporto originariamente costituito da calce, ormai del tutto carbonatata.

4.5.2 Campione n° 3B

4.5.2.1 Termogravimetria

L'analisi è stata condotta come descritto per il campione 3A.

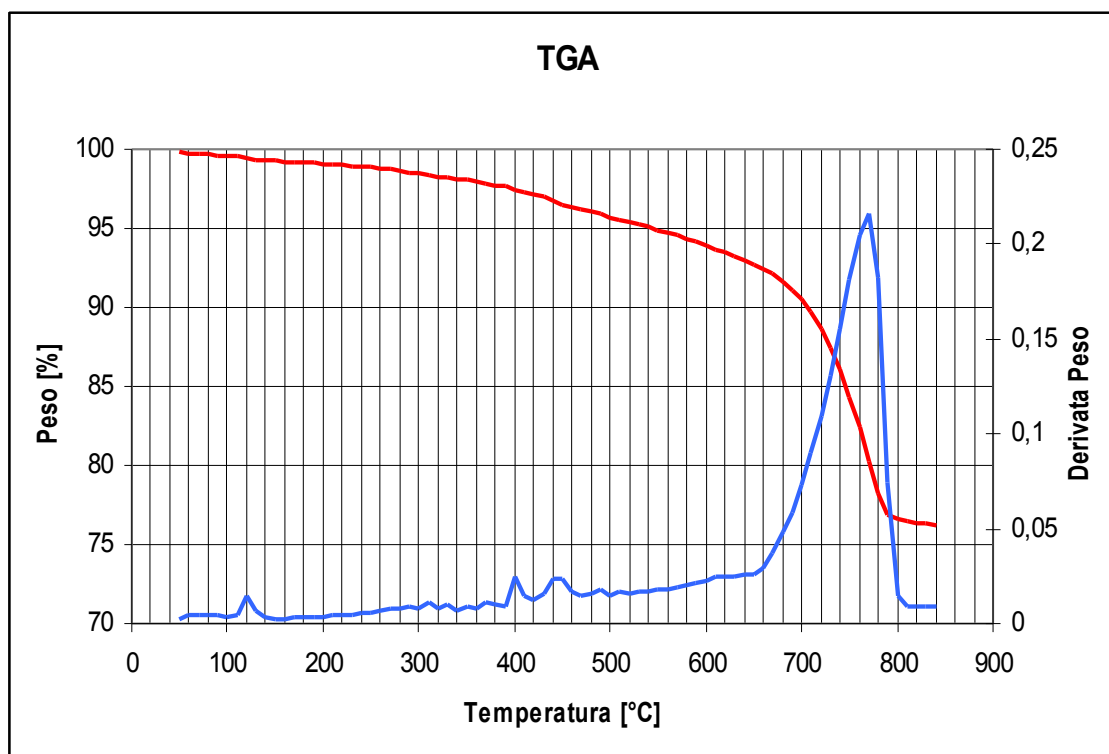


Figura 63: Risultati della termogravimetria

Di seguito si riportano i risultati ottenuti: il picco della curva blu presente a 750°C è ascrivibile alla decomposizione di carbonato di calcio, mentre le “cunette” presenti attorno ai 400°C sono dovute molto probabilmente alla disidratazione di composti idrati.

4.5.2.2 Diffrazione ai Raggi X

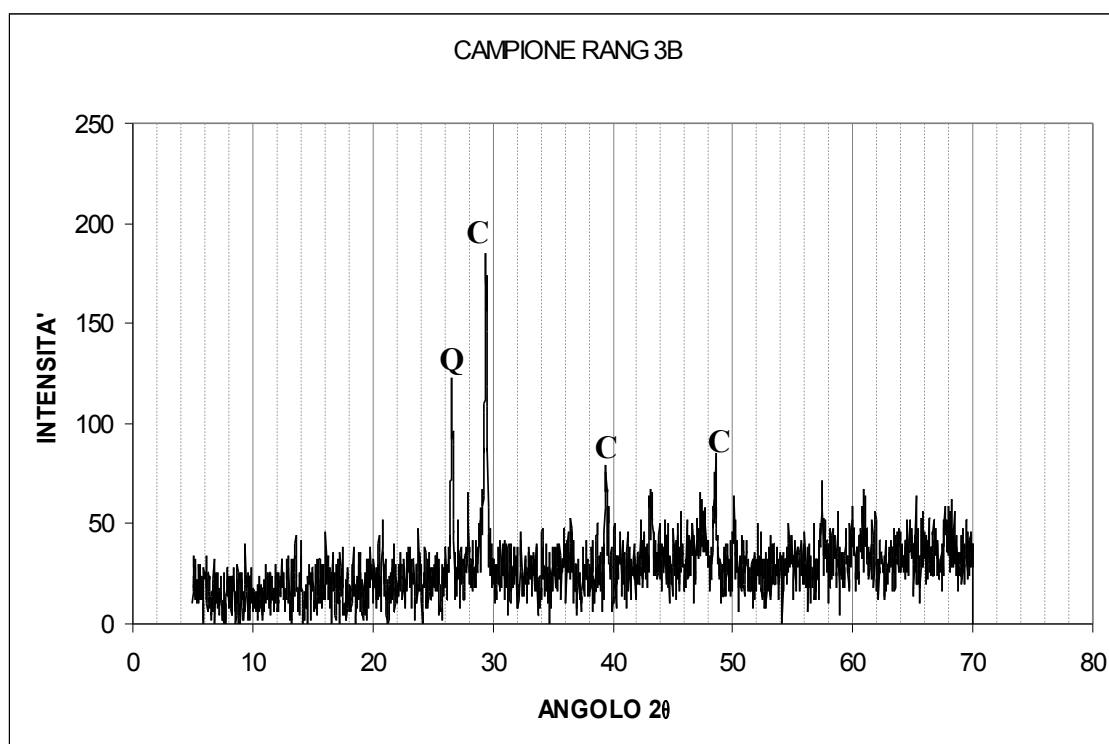


Figura 64: *Diffratogramma del campione 3B (C = calcite, Q = quarzo)*

Così come per il campione precedente e in accordo con la TGA, i picchi del diffratogramma combaciano con quello della calcite, quindi si tratta di uno strato costituito prevalentemente da calce, ormai carbonatata; la presenza di quarzo è probabilmente riconducibile alla presenza di sabbia presente nell'intonaco.

4.6 Risultati delle analisi condotte sul Campione n° 4

Durante la preparazione del campione per la successiva termogravimetria, si è constatata l'elevata friabilità dello stesso.

4.6.1 Termogravimetria

L'analisi è stata condotta come descritto per i campioni precedenti, e di seguito si riportano i risultati ottenuti:

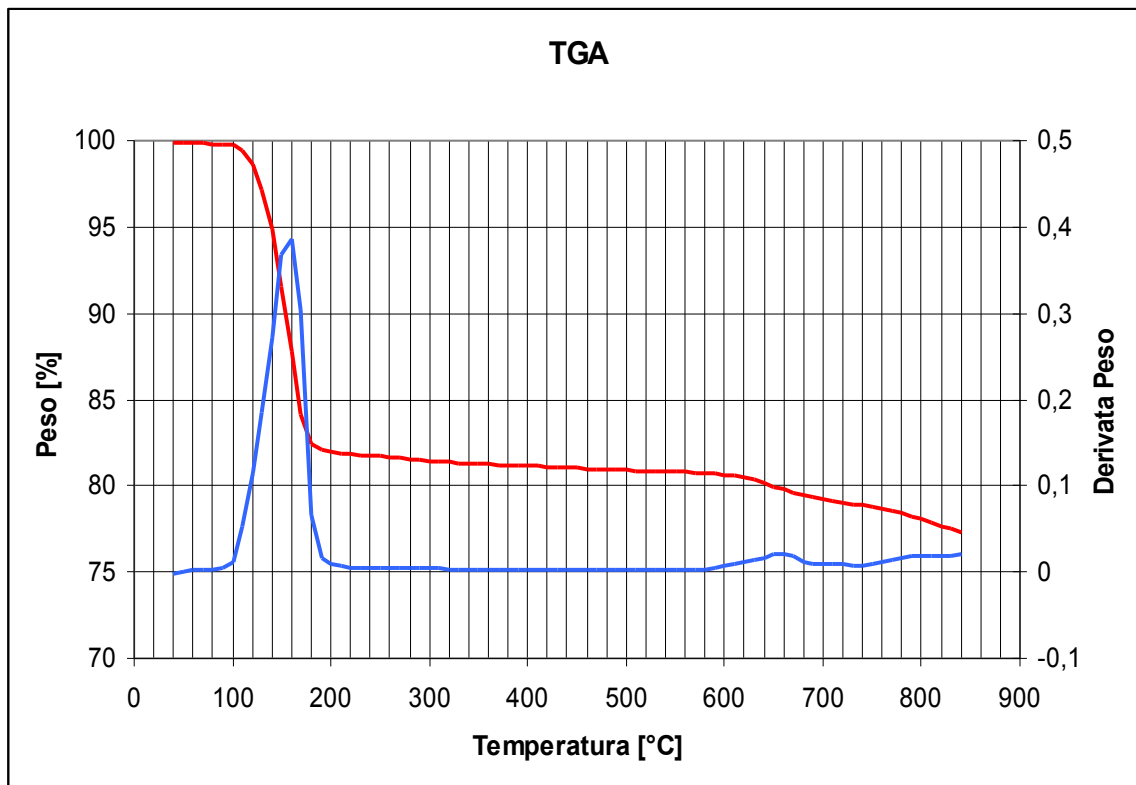


Figura 65: Risultati della termogravimetria

Il picco che si ottiene attorno ai 160°C corrisponde alla disidratazione del gesso, mentre il picco più piccolo presente attorno ai 660 °C è ascrivibile alla decomposizione di carbonato di calcio, in quantità comunque molto esigua, circa l'3%.

4.6.2 Osservazione al microscopio ottico

L'osservazione al microscopio ottico può avvenire solo per superfici piane, fino ad un massimo ingrandimento ottenibile di 1000x, effettuando in questo modo un'analisi mineralogico-petrografica.

Da un primo esame visivo, si è accertata la presenza di aggregati di vario genere, perciò si è resa interessante un'analisi al microscopio ottico, fattibile in quanto il campione presentava una superficie abbastanza liscia, dalla quale è emerso che gli aggregati potrebbero esseri frammenti di laterizio o di una pietra di colore rossastro.

4.6.3 Diffrazione ai raggi X

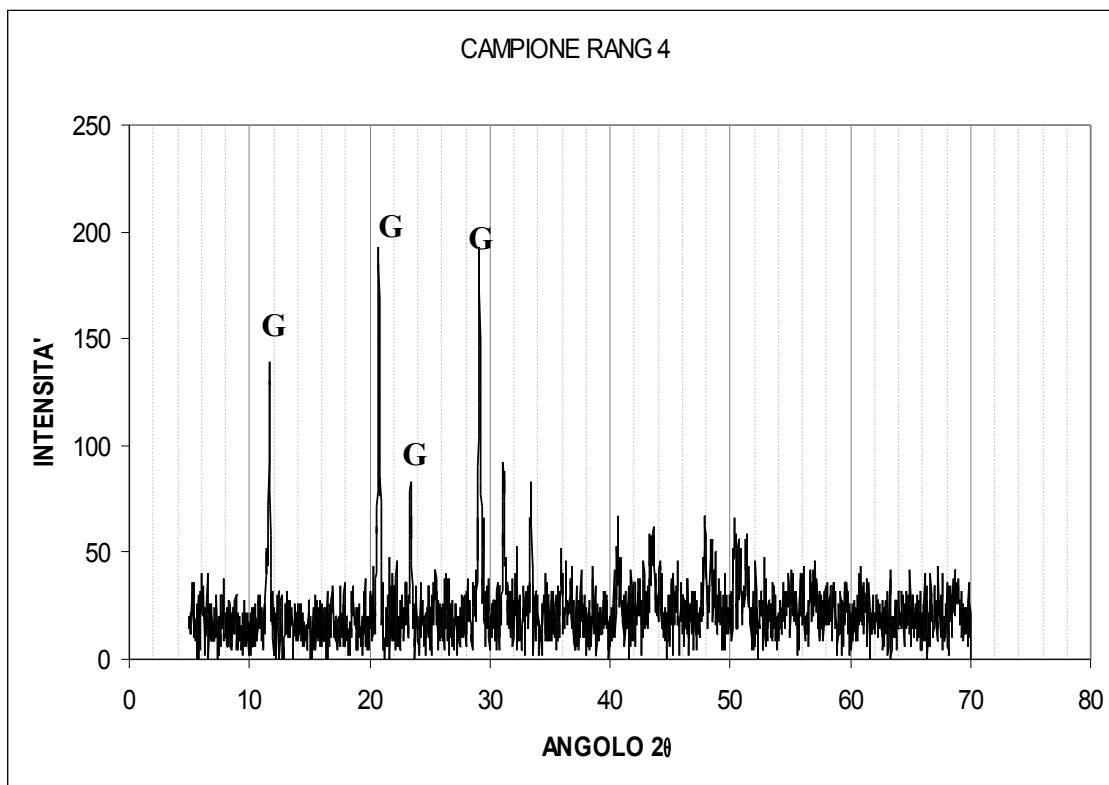


Figura 66: *Diffratogramma del campione 4 (G = gesso)*

I picchi del diffratogramma coincidono con l'andamento del gesso, il che conferma che si tratta di un intonaco a base di gesso.

Il picco massimo della calcite, che ci si aspetta visti i risultati della TGA è occultato da quello del gesso.

4.7 Risultati delle analisi condotte sul Campione n° 5

Il campione è un intonaco di probabile natura cementizia, prelevato in corrispondenza di uno spigolo murario della parete "c" della Sala d'Arme.

4.7.1 Termogravimetria

L'analisi è stata condotta come precedentemente indicato negli altri campioni.

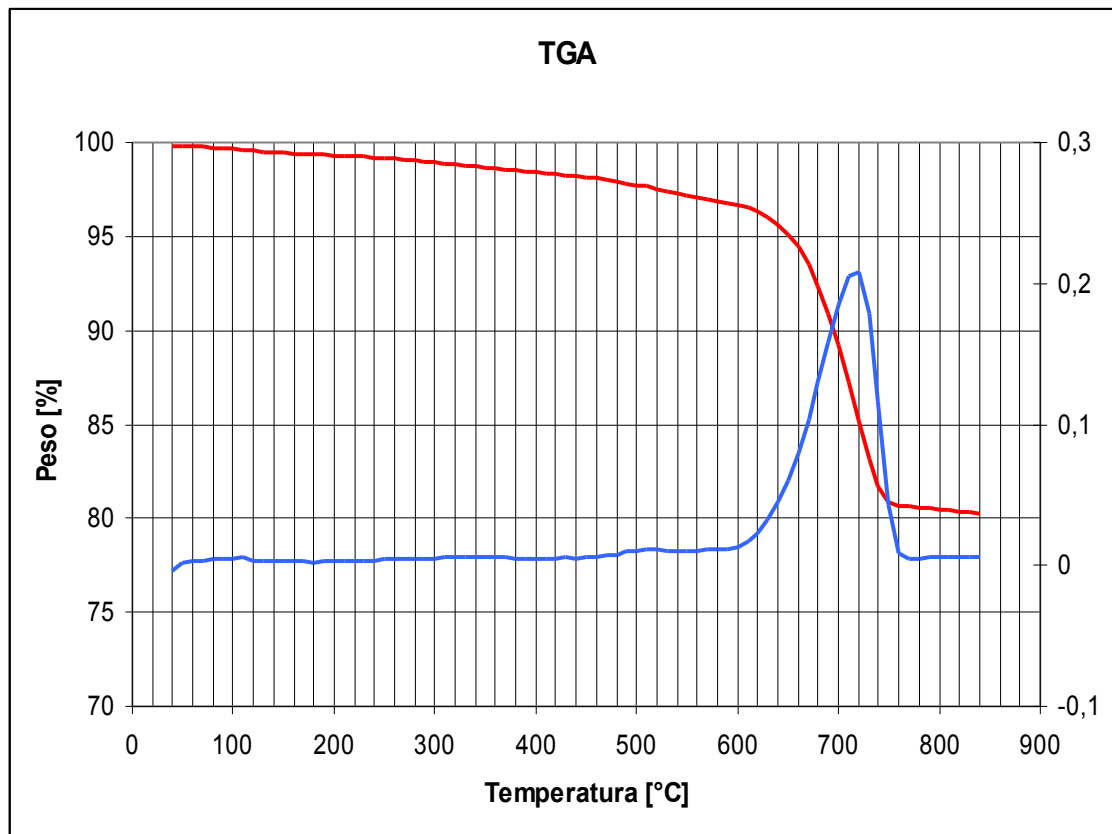


Figura 67: Risultati della termogravimetria

Il picco presente attorno ai 650°C è ascrivibile alla decomposizione del carbonato di calcio, mentre il picco presente attorno ai 430-450°C potrebbe indicare la possibile disidratazione di composti idraulici, in quanto, ad un primo esame ottico, il campione sembrava un intonaco di natura parzialmente idraulica.

4.7.2 Diffrazione ai raggi X

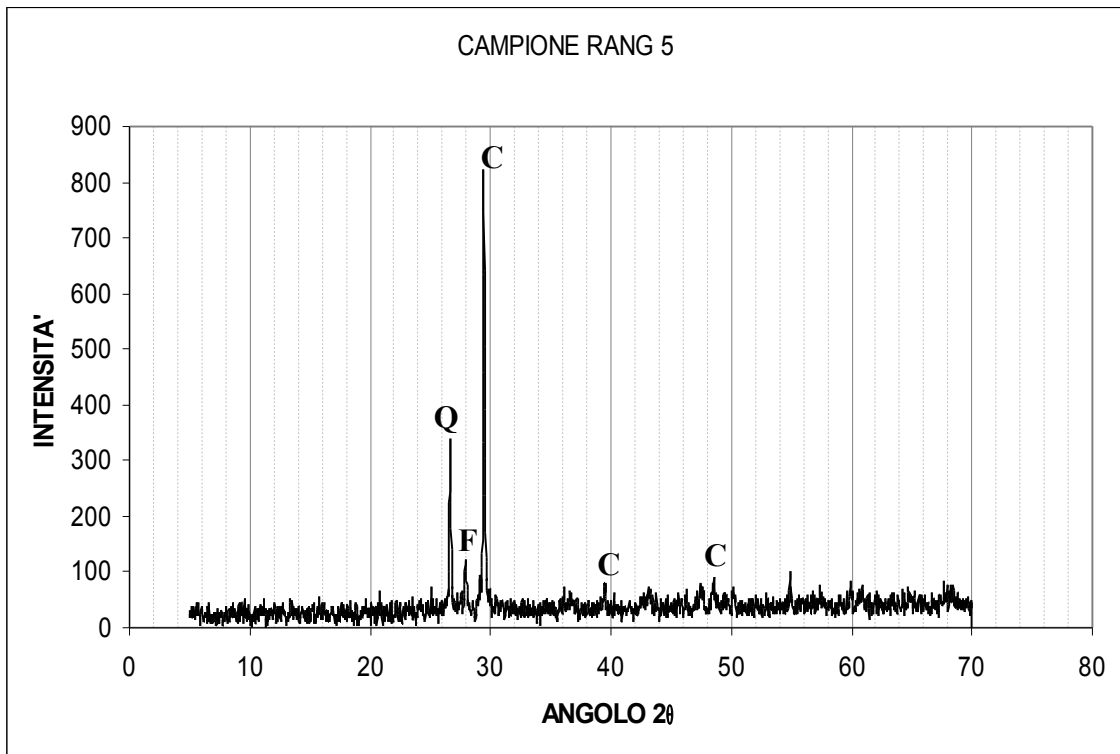


Figura 68: Diffrattogramma del campione 5 (*C* = calcite, *Q* = quarzo, *F* = feldspati)

All'interno del diffrattogramma sono individuabili picchi relativi alla calcite, al quarzo e ad altre sostanze riconducibili a feldspati, cioè minerali spesso associati al quarzo negli aggregati (sabbie) delle zone emiliane.

Il risultato ottenuto da questa prova, in accordo con quanto indicato dalla TGA, fa propendere per un intonaco a base di calce, con l'aggiunta di sabbia quarzoso-feldspatica come aggregato.

4.8 Risultati delle analisi condotte sul Campione n° 6

Il campione si presenta come la sovrapposizione di due diversi strati d'intonaco: il supporto sottostante presenta una colorazione grigio chiaro – beige, e sono visibili ad una prima analisi visiva, qualche macro-porosità e qualche aggregato rotondeggiante. Lo strato superiore invece, è caratterizzato da una superficie costituita da una tinta bianca sulla quale sono disegnate delle linee rosse realizzata molto probabilmente in una

prima fase, ed una seconda superficie realizzata più recentemente, caratterizzata da una tinta di color arancione. (Fig. 69 e 70)

Le dimensioni del campione più grande sono pari a 7 cm x 4,5 cm x 0,5 cm.

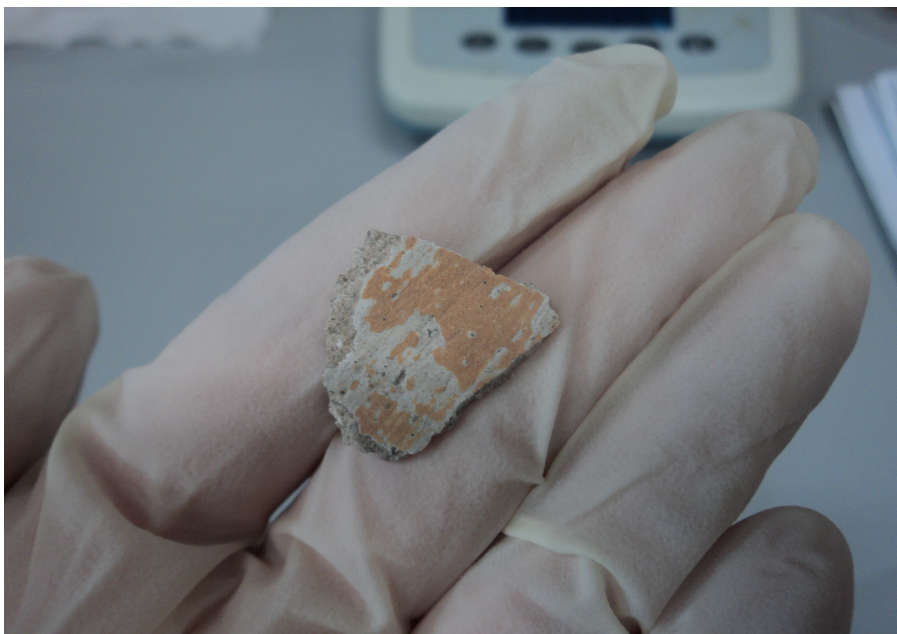


Figura 69: *Il campione 6*



Figura 70: *Ingrandimento sulle tinte del campione 6*

Durante la preparazione del campione per la diffrattometria a raggi X, si è notato come il supporto sottostante sia friabile, mentre le tinte siano soggette ad esfoliazione.

4.8.1 Cromatografia ionica

I risultati ottenuti al termine dell'analisi cromatografica sono:

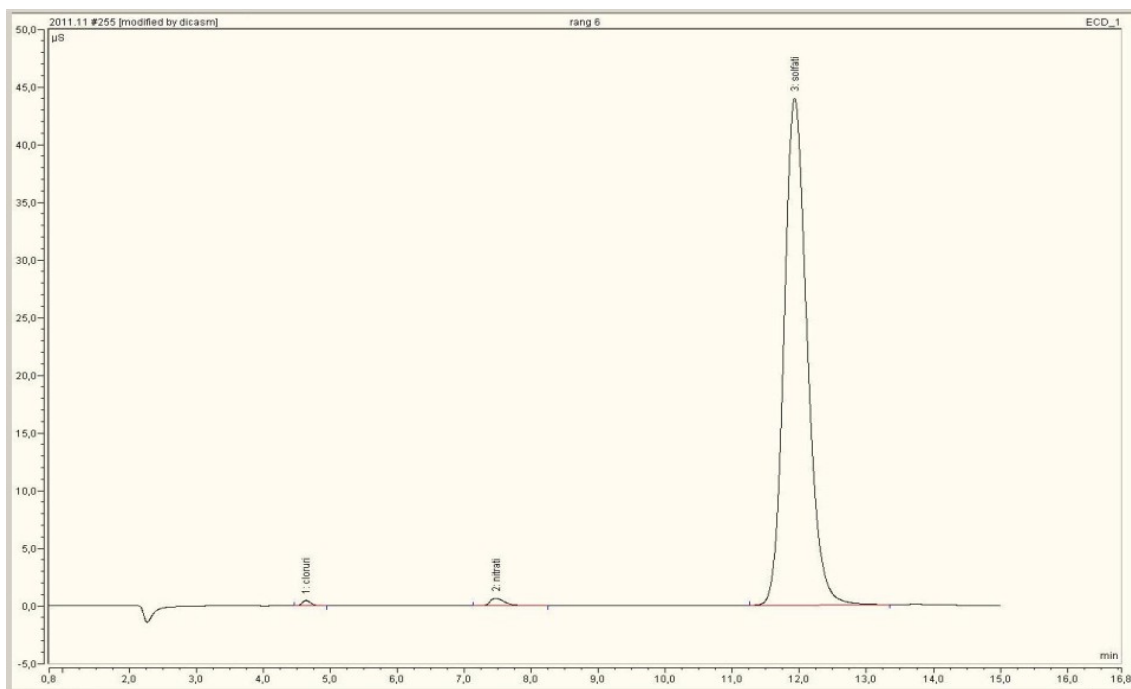


Figura 71: Cromatogramma

Cloruri	0,7090 ppm
Nitrati	1,6017 ppm
Solfati	221,7451 ppm

I valori devono essere moltiplicati per 10, in quanto il millilitro di soluzione è stato diluito 10 volte in acqua deionizzata. Per valutare la quantità percentuale dei diversi ioni salini all'interno del campione, si utilizza la seguente relazione:

$$\frac{\text{ppm} \cdot \text{peso soluzione (litri)}}{\text{peso campione (mg)}} \cdot 100$$

Peso soluzione = Peso finale soluzione – Tara becker = 153,022 – 74,583 = 78,439 g =
0,07844 l

Peso campione = 0,920 g = 920 mg

Cloruri = 0,06 %

Nitrati = 0,137 %

Solfati = 18,906 %

Analizzando i risultati si evince che l'intonaco è caratterizzato da un elevato quantitativo di solfati; come confermeranno le analisi seguenti, cioè la diffrazione a raggi X e la TGA, si tratta di solfati di gesso, presente all'interno dello strato di intonaco direttamente a contatto con la muratura; in questo caso, non si tratta di efflorescenze saline, in quanto il gesso è costituente del supporto.

4.8.2 Separazione manuale e setacciatura

Per una corretta preparazione del campione su cui eseguire successivamente la diffrazione a raggi X e la TGA, gli strati componenti il campione sono stati divisi manualmente e successivamente sbriciolati, per non alterare la granulometria originale del campione stesso.

4.8.3 Campione 6a -tinta con supporto-

4.8.3.1 Analisi granulometrica

La polvere ottenuta a seguito di una separazione manuale del campione 6a, è stata soggetta ad una setacciatura, a seguito della quale è possibile ricostruire la curva granulometrica.

La setacciatura meccanica è stata eseguita mediante l'ausilio di 6 setacci UNI, dei seguenti diametri:

2 mm; 1 mm; 0,5 mm; 0,25 mm; 0,125 mm; 0,075 mm

Una volta terminata la setacciatura meccanica, le frazioni di materiale presenti all'interno di ogni setaccio sono state pesate. Di seguito si riportano i valori dei pesi dei trattenuti ai vari setacci:

Setaccio	Trattenuto	Trattenuto Cumulativo	% Trattenuto Cumulativo	% Passante Cumulativo
2 mm	0	0	0	100
1 mm	0,04 g	0,04 g	0,89 g	99,11 g
0,5 mm	0,15 g	0,19 g	4,00 g	95,99 g
0,25 mm	0,25 g	0,44 g	9,29 g	90,71 g
0,125 mm	0,57 g	1,01 g	21,38 g	78,62 g
0,075 mm	1,18 g	2,19 g	46,36 g	53,64 g
< 0,075 mm	2,53 g	4,72 g	100,00 g	0,00 g

4.8.3.2 Diffrazione ai Raggi X

A seguito dell'analisi granulometrica, tutta la polvere setacciata è stata unita per preparare il porta-campione su cui fare l'analisi dei raggi X.

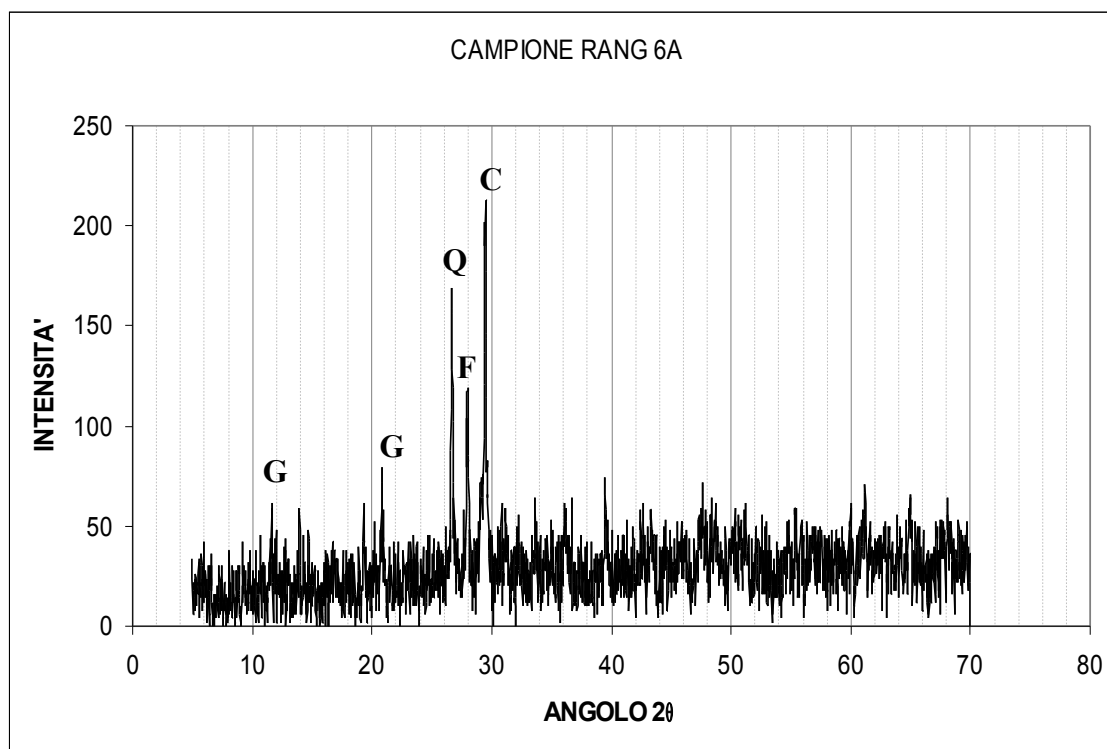


Figura 72: Diffratogramma del campione 6A (C = calcite; Q = quarzo; F = feldspati; G = gesso)

Analizzando il diffrattogramma, i picchi corrispondono a calcite, quarzo e feldspati, quindi è possibile ricondurre il campione 6A ad una malta a base di calce con aggregati quarzoso-feldspatici; sarà utile una successiva termogravimetria per indagare sulla presenza di gesso come costituente del supporto, in quanto individuato in piccole quantità visibili nel grafico, o come contaminazione dallo strato sottostante.

4.8.3.3 Termogravimetria

Di seguito si riportano i risultati ottenuti:

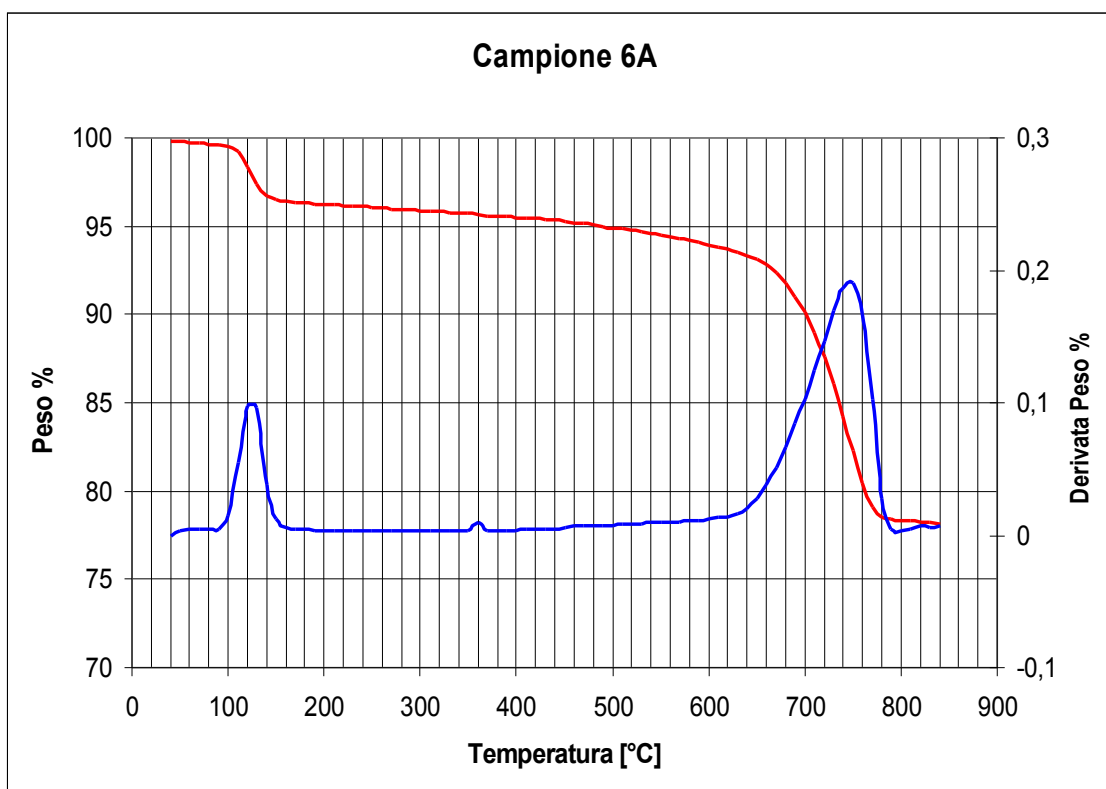


Figura 73: Risultati della termogravimetria

Analizzando la curva blu, si nota un primo picco attorno ai 130 °C circa, tipico della disidratazione del gesso, e un secondo picco più grande, attorno ai 750 °C, tipico della decomposizione del carbonato di calcio. Unendo i risultati della TGA con quelli della diffrattometria a raggi X, è possibile validare quanto detto precedentemente, anche in merito alla presenza di gesso come costituente del supporto e causa dell'elevato tasso di solfati.

4.8.4 Campione 6b - supporto-

4.8.4.1 Analisi granulometrica

La polvere ottenuta a seguito di una separazione manuale del campione 6b, è stata soggetta ad una setacciatura, con la quale è possibile ricostruire la curva granulometrica. La setacciatura meccanica è stata eseguita come per il campione 6A.

Prima di eseguire la setacciatura, si è pesato il campione posto all'interno di una scatola di alluminio:

Peso campione = 5,7 g

Di seguito si riportano i valori dei pesi dei trattenuti ai vari setacci:

Setaccio	Trattenuto	Trattenuto Cumulativo	% Trattenuto Cumulativo	% Passante Cumulativo
2 mm	0	0	0	100
1 mm	0,31 g	0,31 g	5,53 g	94,47 g
0,5 mm	0,50 g	0,81 g	14,38 g	85,62 g
0,25 mm	1,01 g	1,82 g	32,16 g	67,84 g
0,125 mm	1,83 g	3,65 g	64,54 g	35,46 g
0,075 mm	0,77 g	4,42 g	78,13 g	21,87 g
< 0,075 mm	1,24 g	5,66 g	100,00 g	0,00 g

Le curve granulometriche dei campioni 6A e 6B, ottenute a seguito della setacciatura, possono essere inserite all'interno di uno stesso riferimento grafico, essendo due strati differenti dello stesso campione.

Analizzando il grafico si può notare che i due campioni disegnano curve abbastanza diverse, indice del fatto che si tratta effettivamente di due strati d'intonaco differenti, eseguiti in tempi successivi; inoltre, il campione 6A è costituito da particelle più fini rispetto al campione 6B, e si terrà conto di questi risultati nella scelta dell'aggregato e del legante per l'esecuzione della malta di ripristino.

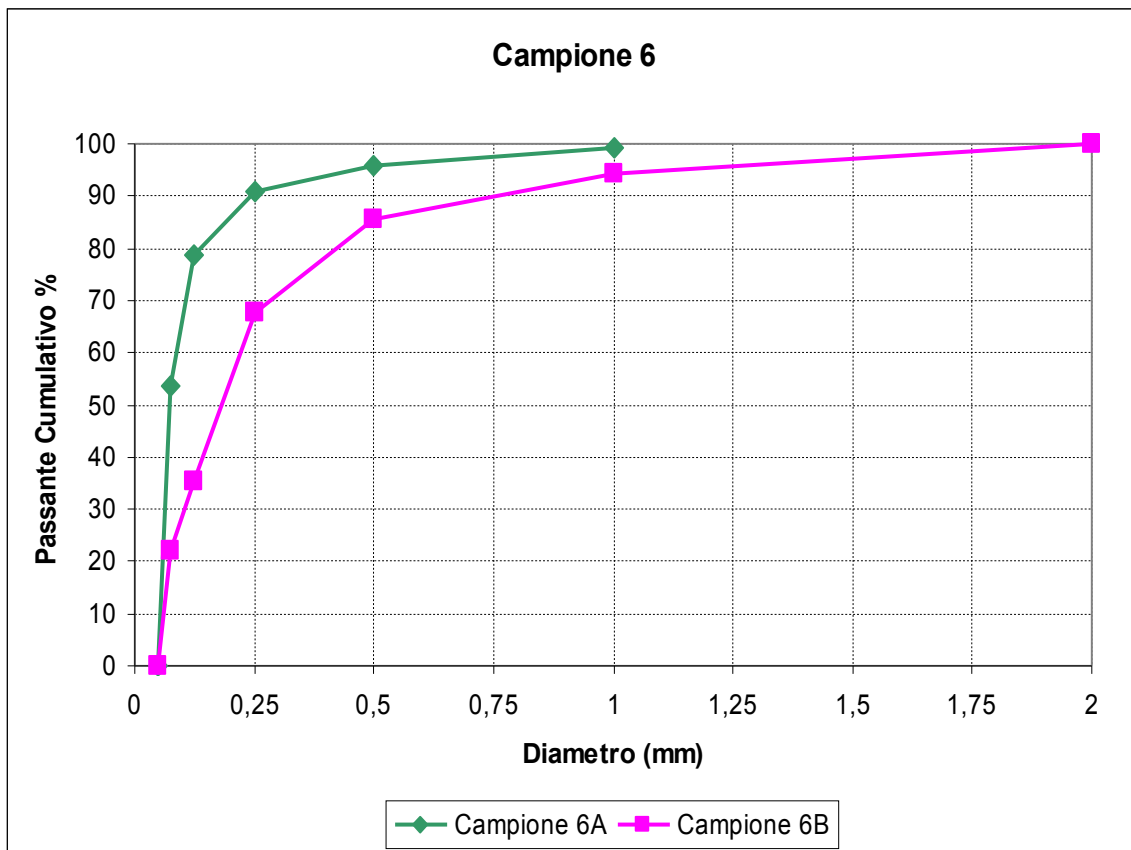


Figura 74: Curve granulometriche del campione 6

4.8.4.2 Diffrazione ai Raggi X

A seguito della setacciatura, è stato considerato come LEGANTE, la frazione di materiale passante al setaccio con diametro pari a 0,125 mm, mentre si considera costituito principalmente da AGGREGATO, la frazione di materiale con diametro maggiore a 0,5 mm.

Di conseguenza, sono state effettuate due differenti analisi:

- la prima, nella quale si è unito il trattenuto al setaccio con diametro pari a 1 mm, col trattenuto al setaccio con diametro pari a 0,5 mm. Questo materiale è stato ulteriormente macinato all'interno di un mortaio di agata, e successivamente posto all'interno del porta-campione.
- la seconda, nella quale si è utilizzato solo il passante al setaccio con diametro pari a 0,075 mm, in modo da rappresentare la porzione di legante.

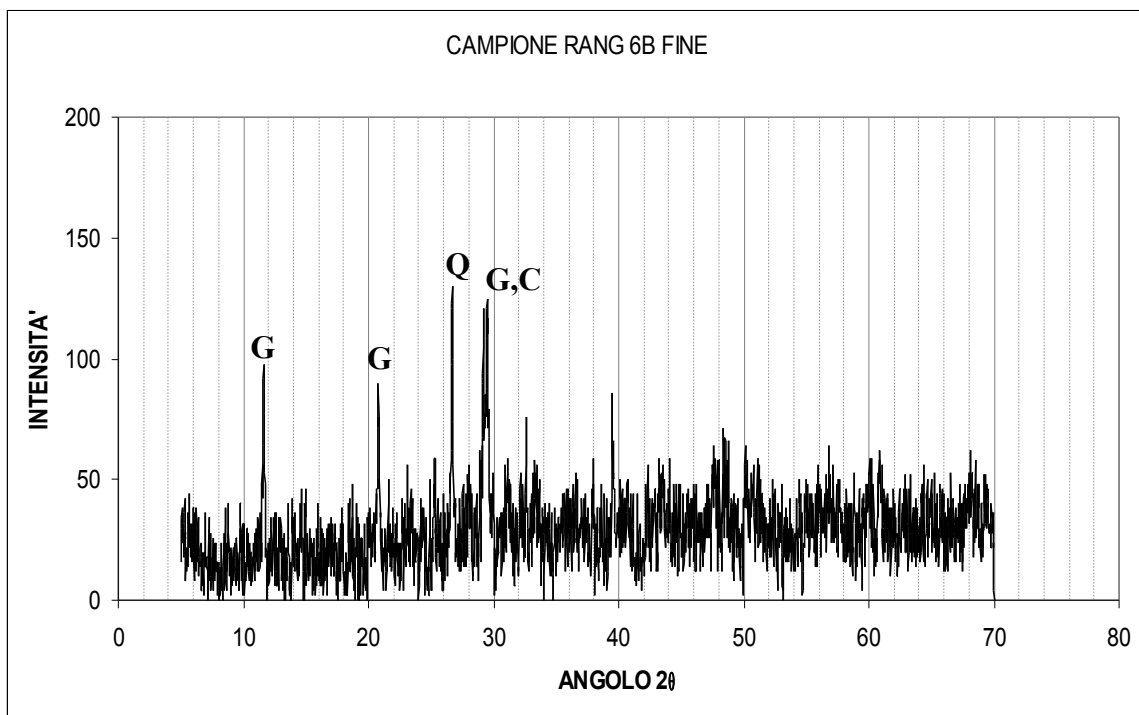


Figura 75: *Diffattogramma del campione 6B frazione fine (C = calcite; Q = quarzo)*

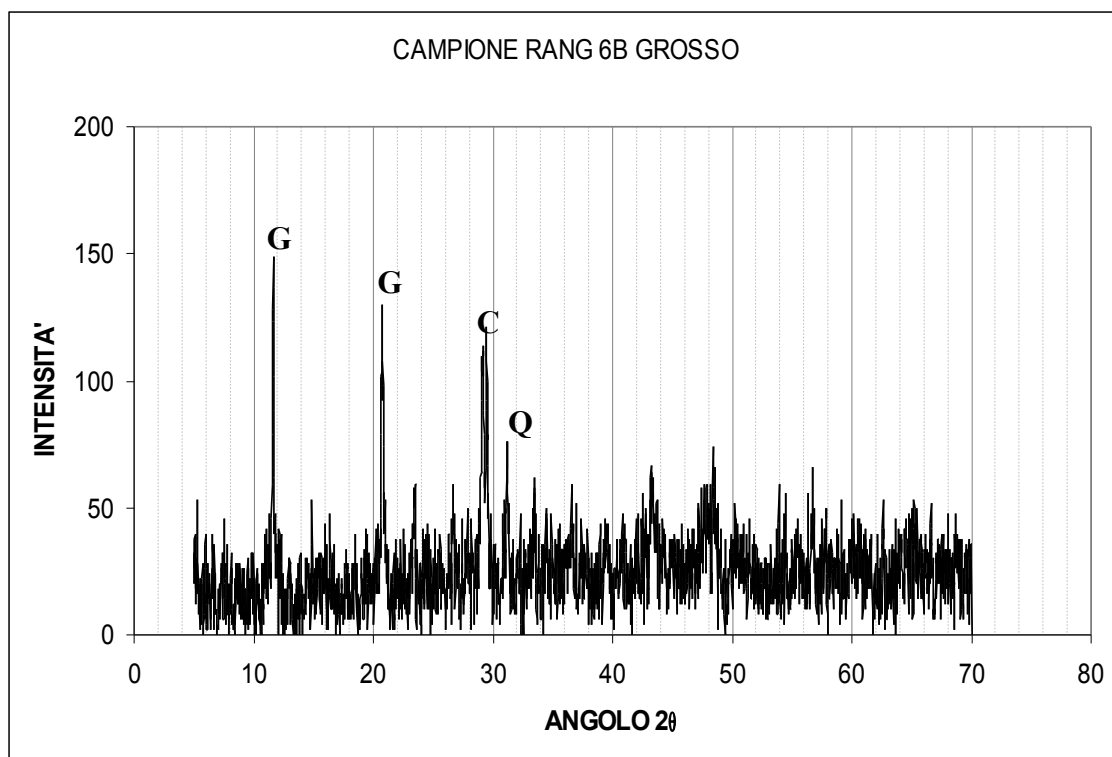


Figura 76: *Diffattogramma del campione 6B frazione grossolana (C = calcite; Q = quarzo; G = gesso)*

I diffrattogrammi delle due analisi presentano picchi corrispondenti a gesso, calcite e quarzo, quindi lo strato corrispondente al campione 6B è riconducibile ad una malta di gesso, il quale rappresenta il legante, nella quale sono presenti aggregati di calcite e quarzo.

4.8.4.3. Termogravimetria

Di seguito si riportano i risultati ottenuti:

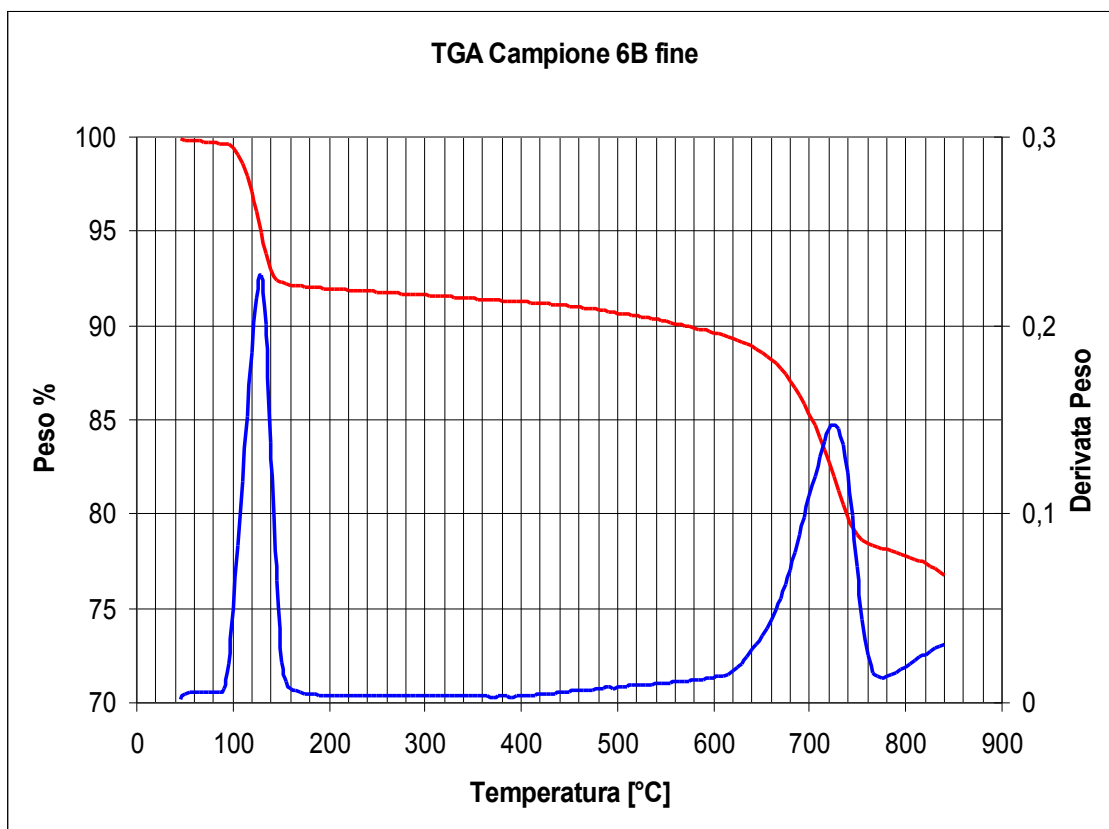


Figura 77: Risultati della termogravimetria

Analizzando la curva blu, si nota un primo picco attorno ai 130°C tipico della disidratazione del gesso, e un secondo picco, attorno ai 730°C, tipico della decomposizione del carbonato di calcio.

Durante la prova, sono emersi ad un attento esame visivo, delle particelle di color nero; ipotizzando si potesse trattare di cenere, usata nell'antichità nel territorio modenese

come additivo all'interno delle miscele di intonaci e malte per conferire pozzolanicità, si sono eseguite delle osservazioni al microscopio ottico delle prime tre frazioni ottenute dalla setacciatura.

Sono state rilevate delle particelle di color nero, brillanti sulla superficie, con facce squadrate e buona consistenza; di conseguenza, la loro natura non è attribuibile alla cenere, la quale presenta una consistenza piuttosto polverosa, ma piuttosto si potrebbe trattare di aggregati inseriti all'interno dell' impasto. Di conseguenza, unendo i risultati della diffrattometria a raggi X e della TGA, si può concludere che il campione 6B è una malta a base di gesso e calce, visto l'elevato picco presente nella TGA, all'interno della quale è stata aggiunta sabbia quarzosa come aggregato.

Dalle analisi condotte sui campioni 4 e 6, è risultato che si tratta di intonaci costituiti prevalentemente da gesso; in un primo momento, potrebbe risultare di difficile comprensione, l'applicazione di questo materiale in un edificio nobile quale Rocca Rangoni, in quanto considerato un materiale povero nell'antichità. In realtà basti pensare che si tratta ancora tutt'oggi di un materiale di facile approvvigionamento, in quanto il territorio emiliano è sede di numerose cave di gesso, di ottima qualità; di conseguenza era possibile ridurre i costi di trasporto del materiale stesso, ma anche i costi di realizzazione dell'opera stessa, trattandosi di un materiale non pregiato.

4.9 Risultati delle analisi condotte sul Campione n° 7

Questo campione è parte dell'intonaco prelevato in corrispondenza dell'intradosso del portone verso la corte interna; si tratta di un supporto di color grigio chiaro, che presenta uno strato di tinta bianca sulla superficie, e aggregati puntiformi di colorazione scura. In seguito ad un'attenta analisi visiva, sembra che la tinta bianca sia posta sopra ad un'altra tinta rosata, probabilmente anch'essa di natura pittorica. (Fig. 78)

Le dimensioni dei campioni più grandi sono 4,2 x 1,5 cm e spessore pari a 0,2 cm.



Figura 78: *Campione n° 7*

4.9.1 Diffrazione ai Raggi X

Per l'esecuzione della diffrazione a raggi X, il campione è stato macinato tutto nel suo insieme, all'interno di un mortaio di agata e successivamente inserito all'interno del porta-campione per condurre l'analisi.

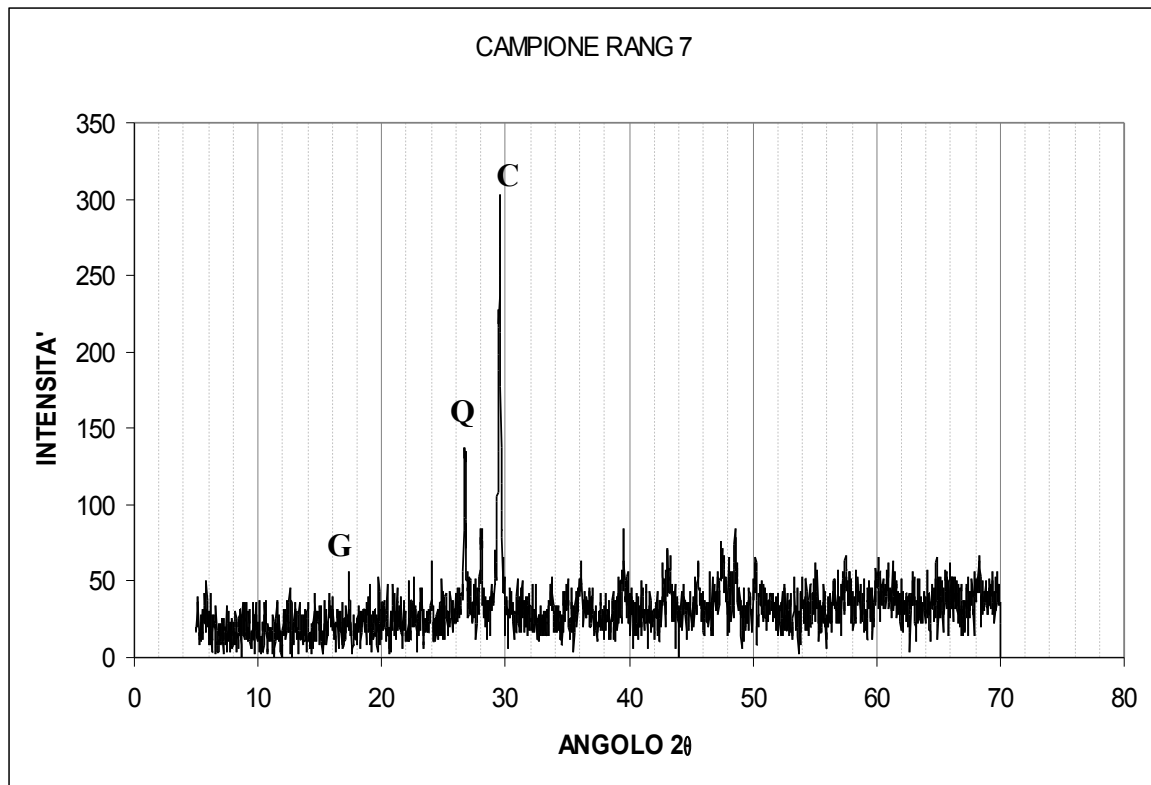


Figura 79: *Diffratogramma del campione 7 (C = calcite; Q = quarzo; G = gesso)*

Il diffratogramma è molto simile a quello ottenuto per il campione n° 5, quindi anche per questo campione formato da calcite, quarzo e feldspati, si propende a pensare ad una malta a base di calce con l'aggiunta di sabbia quarzosa come aggregato.

4.9.2 Termogravimetria

L'analisi è stata condotta come indicato per i precedenti campioni.

Di seguito si riportano i risultati ottenuti:

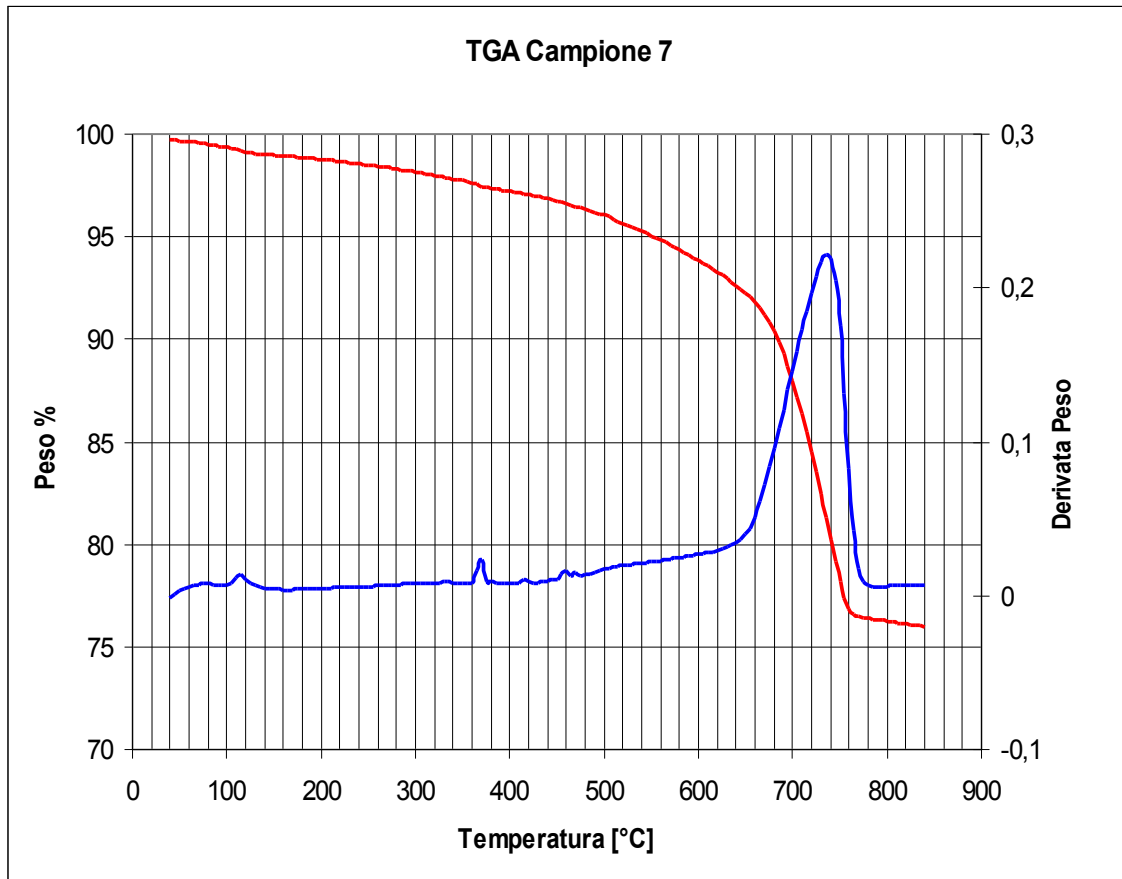


Figura 80: Risultati della termogravimetria

Analizzando la curva blu, si nota un primo picco, molto piccolo, attorno ai 380°C, e un secondo picco più importante, attorno ai 730°C, riconducibile alla decomposizione del carbonato di calcio; infine si nota chiaramente l'andamento crescente della stessa curva dopo i 500°C, a testimonianza della disidratazione di composti idrati.

Confrontando i risultati ottenuti dalla diffrazione a raggi X e dalla TGA, si deduce che si tratta di una malta a base di calce con aggiunte idrauliche e con sabbia quarzosa utilizzata come aggregato.

Cap. 5 Microprogettazione degli interventi di restauro dei materiali della Sala d'Arme

Già da un primo esame visivo, la stanza presenta un evidente stato di degrado, caratterizzato da fessurazioni e distacco dell'intonaco dalla muratura e notevoli problemi di umidità di risalita con conseguente formazione di efflorescenze saline sulla superficie del pavimento e delle murature stesse.

In seguito alle prove di laboratorio condotte sui campioni prelevati all'interno della Sala d'Arme, le quali hanno confermato quanto visto in un primo momento, si è proceduto alla microprogettazione del restauro dei materiali, in modo da ripristinare la funzionalità del vano stesso e risanare l'umidità presente a seguito della risalita capillare dell'acqua dal terreno.

5.1 Intervento sulla pavimentazione

La pavimentazione è costituita da porzioni di materiali diversi, quali laterizi, acciottolato, malta cementizia disposte in maniera irregolare; la maggior parte della stessa comunque, è interessata da laterizi disposti a diretto contatto con uno strato di materiale sabbioso, forse a separazione di un'antica pavimentazione sottostante (Fig. 81); sulla superficie di questi mattoni, in parte disgregati, sono presenti efflorescenze saline di color bianco, indice di un elevato tasso di umidità di risalita capillare dal terreno e di un elevato tenore di nitrati. (Fig. 82 e 83)

L'analisi effettuata su un frammento rileva basse temperature di cottura del laterizio.



Figura 81: *Pavimento*



Figure 82: *Efflorescenze saline e Disgregazione dei mattoni*

Dalle prove di laboratorio condotte sul laterizio e sulle efflorescenze, è emerso che:

Laterizio

Presenta un elevato tasso percentuale di carbonato di calcio, pari al 12%, indice del fatto che si tratta di materiale poco cotto, cosa abbastanza inusuale, in quanto nell'antichità era uso comune utilizzare per le pavimentazioni dei laterizi molto cotti, cioè più resistenti.

Inoltre, a seguito della cromatografia ionica, si è trovata una concentrazione di nitrati molto elevata, pari al 3,08%, in accordo con la destinazione di ricovero degli animali, a cui la stanza era precedentemente adibita.

Efflorescenza salina

La cromatografia ionica eseguita su questo campione ha mostrato una percentuale di nitrati molto elevata, pari al 45% circa, ed anche una modesta quantità di solfati, pari a circa il 5%.

A seguito di queste valutazioni, gli interventi pensati per il restauro della pavimentazione sono, in ordine:

- Rimozione dei rappezzati in malta cementizia mediante l'ausilio di spazzole e scalpelli;

- Rimozione temporanea dei laterizi costituenti la pavimentazione stessa;
- Creazione di uno strato in grado di contrastare la risalita dell'acqua, quale un vespaio di materiale grossolano (esempio ghiaietto), dello spessore pari ad almeno 5 centimetri, il quale può essere collegato ad un sistema di drenaggio e/o essere ventilato con intercapedine perimetrale;
- Apposizione di uno strato di regolarizzazione a base di malta a basso tenore di cemento, dello spessore di un paio di centimetri.
- Lavaggio con acqua dei laterizi temporaneamente rimossi;
- Riposizionamento dei laterizi, previa asciugatura, e contemporanea creazione di giunti di malta, compatibili col supporto, ad esempio a base di calce e cocchiopesto. (**Tav. Microprogettazione Pavimento**)

5.2 Interventi sulla parete A

E' la parete interposta tra la stanza in oggetto e il vano attiguo, numerato come il 112, collegato appunto con le due aperture poste sulla parete stessa; come le altre pareti della stanza, è divisa in due parti orizzontali, in accordo con le differenti destinazioni d'uso che avevano gli ambienti prima del crollo del solaio interpiano.

La parete in essere presenta evidenti problemi di degrado meccanico, quali distacchi dell'intonaco dal supporto originale, e ambientale, quali efflorescenze saline legate alla presenza di umidità di risalita capillare dal terreno. (Fig. 83 e 84)



Figura 83: *Parete A*

Evidenti i rattoppi cementizi, i distacchi dell'intonaco, l'apertura tamponata.



Figura 84: *Distacchi dell'intonaco dalla parete e fessurazioni non passanti*

L'intervento di restauro dei materiali della parte inferiore della parete prevede:

- Rimozione dell'intonaco esistente mediante pulitura meccanica manuale con l'ausilio di scalpelli e spazzole, in quanto si tratta di più strati di materiale sovrapposto, non avente elevato pregio artistico.
- Rimozione dei rattoppi cementizi presenti in corrispondenza degli architravi delle porte e nella fascia orizzontale sede dell'antico solaio, mediante un intervento di pulitura meccanica manuale realizzato con l'ausilio di scalpello e spazzole, in quanto si tratta di materiale non compatibile con quelli originali della stanza e soggetto ad attacco solfatico.
- Riduzione dell'umidità di risalita capillare dal terreno, mediante la realizzazione di un taglio chimico all'altezza di 15 centimetri dalla pavimentazione; il taglio chimico prevede un'iniezione a bassa pressione di una resina, ad esempio epossidica.
- Pulitura delle efflorescenze saline, laddove presenti, mediante cicli di pulitura con impacchi anti-sale, eseguiti con polpa di cellulosa, fino a completo annullamento del contenuto di sali all'interno della polpa stessa.
Questa tecnica consiste nell'applicare gli impacchi direttamente sulla muratura da desalinizzare e durante l'essiccamento della cellulosa, questa richiama verso l'esterno i sali contenuti nei laterizi, i quali rimangono inglobati all'interno dell'impacco; ad essiccamento completo, la polpa si auto-crepa e può essere tolta facilmente.
- Stilatura dei giunti di malta mediante l'utilizzo di una malta a base di calce e cocchiopesto.
- Apposizione di un nuovo strato d'intonaco simile allo strato a diretto contatto con la muratura: si potrebbe dunque realizzare un intonaco a base di gesso.

L'intervento di restauro dei materiali della parte superiore della parete prevede:

- Ripristino delle parti ammalorate dell'intonaco decorato, mediante l'utilizzo di una malta compatibile con quella originale, ricostruita sulla base delle curve granulometriche ottenute a seguito della setacciatura dei campioni 6a e 6b;

mediando i risultati delle due curve, si può utilizzare un intonaco di ripristino costituito dal 30-35 % di legante, in questo caso misto calce/gesso, e la restante frazione di aggregato silico-calcareo con diametro massimo pari a 1 mm.

- Tinteggiatura a calce delle parti soggette ad intervento, il cui colore dovrà essere compatibile con quello originale. (**Tav. Microprogettazione Parete A**)

5.3 Interventi sulla Parete B

Si tratta della parete finestrata, sulla quale sussistono problemi di degrado meccanico, quali fessurazioni e distacco dei diversi strati di intonaco dal supporto originale, parziale disgregazione dei laterizi venuti in superficie per il problema precedentemente esposto; da sommare a questi sono i problemi di degrado fisico-ambientale, per lo più dovuti all'umidità di risalita capillare dal terreno, quali sub-efflorescenze saline tra gli strati d'intonaco. (Fig. 85 e 86)



Figura 85: *Parete B*



Figura 86: *Distacchi dell'intonaco nella parte inferiore della parete*

A seguito delle prove di laboratorio eseguite sui campioni, è emerso che:

Strato di intonaco sottostante

Si tratta di un intonaco di gesso, risultato conforme agli usi dell'antichità, dove questo intonaco era fortemente utilizzato nelle zone emiliane, in quanto il territorio offre tuttora un elevato numero di cave di gesso di ottima qualità.

Strato di intonaco superiore

Si tratta di un intonaco di calce contenente qualche fase idrata, sul quale è presente un singolo strato di tinta pittorica.

Dall'accoppiamento di due strati d'intonaco così diversi, in quanto realizzati in periodi storici molto distanti tra loro, derivano molto probabilmente le fessurazioni e i distacchi dal supporto murario, proprio a causa della forte incompatibilità dei due materiali.

A seguito di queste valutazioni, gli interventi pensati per la parte sottostante al rattoppo cementizio orizzontale nella suddetta parete sono:

- Rimozione degli strati d'intonaco presenti, mediante pulitura meccanica manuale con scalpello e spazzole, per le motivazioni sopra riportate;
- Rimozione temporanea di alcuni laterizi per la successiva esecuzione del taglio chimico: si adotta questa tecnica, sfruttando i laterizi già ammalorati e/o disgregati, in quanto nella parete, trattandosi molto probabilmente di una muratura a sacco visto il notevole spessore pari a 1,10 metri, il taglio chimico non riuscirebbe a penetrare in profondità e sarebbe quindi inutile;
- Riduzione dell'umidità di risalita capillare dal terreno: l'intervento consiste nella messa in opera di un taglio chimico eseguito ad un'altezza di 15 centimetri dalla pavimentazione e a livello dei laterizi della muratura stessa, per aumentarne l'efficacia; nel dettaglio, si tratta di un'iniezione a bassa pressione di una resina, ad esempio epossidica, in grado di occludere i pori.
- Pulitura delle efflorescenze saline, laddove presenti, mediante cicli di pulitura con impacchi anti-sale, eseguiti con polpa di cellulosa, fino a completo annullamento del contenuto di sali all'interno della polpa stessa.
Questa tecnica consiste nell'applicare gli impacchi direttamente sulla muratura da desalinizzare e durante l'essiccamento della cellulosa, questa richiama verso l'esterno i sali contenuti nei laterizi, i quali rimangono inglobati all'interno dell'impacco; ad essiccamento completo, la polpa si auto-crepa e può essere tolta facilmente.
- Ripristino dei laterizi precedentemente tolti e successiva stilatura dei giunti di malta: l'intervento prevede il reintegro delle malte di allettamento scomparse a causa del degrado e della rimozione dei laterizi, con una malta a base di calce e cocchiopesto.
- Protezione mediante la creazione di un nuovo strato d'intonaco con caratteristiche simili allo strato a diretto contatto con la muratura: si procede con la realizzazione di un intonaco a base di gesso.

Per quanto riguarda la parte superiore al rattoppo cementizio orizzontale nella stessa parete, invece:

- Rimozione del rattoppo cementizio orizzontale mediante pulitura meccanica manuale con spazzole e scalpelli, in quanto si tratta di un intervento incompatibile con i materiali originari della stanza e soggetto ad attacco solfatico, visto l'elevato tasso di solfati presenti nella stanza.
- Stilatura dei giunti di malta in corrispondenza dei laterizi della muratura sottostante al rattoppo cementizio rimosso: l'intervento prevede l'utilizzo di una malta a base di calce e cocchiopesto.
- Creazione di un nuovo strato d'intonaco in corrispondenza della zona in cui era presente il rattoppo cementizio uguale a quello da ricrearsi per la parte inferiore della parete, cioè un intonaco a base di gesso.
- Ripristino delle parti ammalorate dell'intonaco mediante l'applicazione di uno strato di malta compatibile, da ricrearsi sulla base delle curve granulometriche ottenute a seguito della setacciatura dei campioni 6a e 6b; mediando i risultati delle due curve, si può utilizzare un intonaco di ripristino costituito dal 30-35 % di legante, in questo caso misto calce/gesso, e la restante frazione di aggregato silico-calcareo con diametro massimo pari a 1 mm. (**Tav. Microprogettazione Parete B**)

5.4 Interventi sulla parete C

Si tratta della parete che presenta le due aperture prospicienti la corte interna, anch'essa come la precedente divisa orizzontalmente in due parti, in funzione delle antiche destinazioni d'uso assegnate alle stanze quando ancora esisteva il solaio, poi crollato. (Fig. 87)

Sono anche qui presenti evidenti fenomeni di degrado, quali fessurazioni e distacchi dei diversi strati d'intonaco dai supporti originali, oltre ai comuni problemi di umidità di risalita capillare, quali efflorescenze saline da solfati, presenti in tutta la stanza. (Fig. 88 e 89)



Figura 87: *Parete C*

Sono evidenti i rattoppi cementizi, il distacco dell'intonaco, le aperture tamponate



Figura 88: *Rattoppo cementizio*



Figura 89: *Distacchi dell'intonaco*

A seguito delle prove di laboratorio eseguite sui campioni, è emerso che:

Intonaco del rattoppo cementizio

E' una malta a base di calce con al suo interno, aggregato quarzoso-feldspatico; dalla termogravimetria sono emerse anche delle fasi idrate, indice del fatto che potrebbe trattarsi di un rattoppo di natura parzialmente idraulica eseguito in tempi più recenti, e chiaramente incompatibile con i materiali originali.

Intonaco presente all'intradosso del portone

E' come prima, una malta a base di calce con al suo interno, aggregato quarzoso; dalla termogravimetria è possibile riscontrare delle fasi idrate, che possono far pensare ad una natura, quanto meno idraulica dell'intonaco.

Intonaco della parte superiore della parete

L'intonaco è formato da due strati ben distinti: quello sottostante è una malta a base di gesso, nel quale sono presenti calcite e quarzo come aggregati, mentre lo strato superiore è una malta a base di calce, alla quale è stata aggiunta una sabbia quarzosa - feldspatica come aggregato.

L'intonaco visto nel suo insieme però, anche se formato da due strati di materiale diverso, non è opportuno rimuoverlo, in quanto caratterizzato da pitture molto antiche, di elevato interesse storico-culturale.

Sulla base dei risultati dedotti dalle prove, l'intervento di restauro dei materiali della parte inferiore della parete prevede:

- Rimozione dei diversi strati d'intonaco presenti, mediante intervento di pulitura meccanica manuale con scalpelli e spazzole, in quanto questi intonaci non presentano alcun valore artistico tale da dover essere mantenuti.
- Rimozione dei rattoppi cementizi presenti in corrispondenza della fascia orizzontale sede dell'antico solaio, degli architravi delle aperture e degli spigoli mediante un intervento di pulitura meccanica manuale con scalpelli e spazzole, in quanto si tratta di materiale non compatibile con i materiali originali della stanza e soggetto ad attacco solfatico.
- Riduzione dell'umidità di risalita capillare mediante la messa in opera di un taglio chimico all'altezza di 15 centimetri dalla pavimentazione; il taglio chimico viene realizzato mediante un' iniezione a bassa pressione di resina, ad esempio epossidica.
- Stilatura dei giunti di malta venuti a mancare a causa del degrado, mediante l'utilizzo di malta a base di calce e cocchiopesto.

- Apposizione di un nuovo strato d'intonaco simile allo strato a diretto contatto con la muratura, a base di gesso.

Per quel che concerne la parte superiore della parete invece:

- Rimozione dei depositi presenti nello spigolo destro della parte, sede della canna fumaria dell'antico camino, ormai rimosso, mediante un intervento di microsabbatura o un sistema meccanico leggero.
- Rimozione dei rattoppi cementizi presenti in corrispondenza delle aperture tamponate, in quanto trattasi di un intervento recente e incompatibile coi materiali originali della stanza, oltre ad essere soggetto ad un probabile attacco solfatico.
- Ripristino delle parti ammalorate d'intonaco e delle zone in cui si è rimosso il rattoppo cementizio, mediante l'utilizzo di una malta compatibile con quella originale, da ricrearsi sulla base delle curve granulometriche ottenute dai campioni 6a e 6b; mediando i risultati delle due curve, si può utilizzare un intonaco di ripristino costituito dal 30-35 % di legante, in questo caso misto calce/gesso, e la restante frazione di aggregato silico-calcareo con diametro massimo pari a 1 mm. (**Tav. Microprogettazione Parete C**)

5.5 Interventi sulla Parete D

Si tratta della parete che presenta, in corrispondenza della parte alta, un'apertura chiusa da un serramento in legno; così come tutte le altre, la parete è suddivisa orizzontalmente in due porzioni, ad individuare i due differenti ambienti, un tempo separati dal solaio interpiano. (Fig. 90)

La parete è interessata da fenomeni di degrado meccanico, quali distacchi dell'intonaco dal supporto originale, e ambientale, quali efflorescenze saline dovute a problemi di umidità di risalita dal terreno e depositi di fuliggine nella zona in cui era alloggiata la canna fumaria. (Fig. 91 e 92)



Figura 90: *Parete D*



Figura 91: *Meccanismi di degrado sulla parete D*



Figura 92: *Distacchi dell'intonaco*

L'intervento di restauro dei materiali della parte inferiore prevede:

- Rimozione dell'intonaco esistente mediante pulitura meccanica manuale con l'ausilio di scalpelli e spazzole, in quanto si tratta di più strati di materiale sovrapposto, non avente elevato pregio artistico, e comunque probabilmente già soggetti in passato a rifacimento.
- Rimozione dei rattoppi cementizi presenti in corrispondenza della fascia orizzontale sede dell'antico solaio, mediante un intervento di pulitura meccanica manuale realizzato con l'ausilio di scalpello e spazzole, in quanto si tratta di materiale non compatibile con quelli originali della stanza e soggetto a forte degrado da attacco solfatico, visto l'elevato tasso di solfati presenti nella stanza.
- Riduzione dell'umidità di risalita capillare dal terreno, mediante la realizzazione di un taglio chimico all'altezza di 15 centimetri dalla pavimentazione; il taglio

chimico prevede un'iniezione a bassa pressione di una resina, ad esempio epossidica, in grado di occludere i pori.

- Pulitura delle efflorescenze saline, laddove presenti, mediante cicli di pulitura con impacchi anti-sale, eseguiti con polpa di cellulosa, fino a completo annullamento del contenuto di sali all'interno della polpa stessa.

Questa tecnica consiste nell'applicare gli impacchi direttamente sulla muratura da desalinizzare e durante l'essiccamento della cellulosa, questa richiama verso l'esterno i sali contenuti nei laterizi, i quali rimangono inglobati all'interno dell'impacco; ad essiccamento completo, la polpa si auto-crepa e può essere tolta facilmente.

- Ripristino delle fessurazioni presenti nella muratura, mediante consolidamento con iniezioni di malta a ritiro compensato, a base di calce e resina, per il miglioramento delle proprietà adesive.
- Stilatura dei giunti di malta mediante l'utilizzo di una malta, a base di calce e cocchiopesto.
- Apposizione di un nuovo strato d'intonaco simile all'odierno strato a diretto contatto con la muratura, di conseguenza a base di gesso.

L'intervento di restauro dei materiali della parte superiore della parete prevede:

- Pulitura dei depositi superficiali presenti nello spigolo sinistro, in corrispondenza della sede della canna fumaria dell'antico camino, ormai rimosso, mediante un trattamento di microsabbatura o un sistema meccanico leggero, in modo da non danneggiare il supporto sottostante.
- Ripristino delle parti ammalorate dell'intonaco decorato, mediante l'utilizzo di una malta compatibile con quella originale, ricostruita sulla base delle curve granulometriche ottenute a seguito della setacciatura dei campioni 6a e 6b; mediando i risultati delle due curve, si può utilizzare un intonaco di ripristino costituito dal 30-35 % di legante, in questo caso misto calce/gesso, e la restante frazione di aggregato silico-calcareo con diametro massimo pari a 1 mm.

- Tinteggiatura a calce delle parti soggette ad intervento, il cui colore dovrà essere compatibile con l'originale. (**Tav. Microprogettazione Parete D**)

5.6 Conclusioni della microprogettazione degli interventi di restauro dei materiali

Analizzando gli interventi programmati per le diverse partizioni della stanza, si può notare come essi si ripetano e siano pressoché analoghi; la motivazione è da ricercarsi nelle cause di degrado comuni che interessano in maniera omogenea tutta la stanza. Il fenomeno di degrado più significativo, accentuato anche dall'antica destinazione d'uso della parte inferiore del vano, si riscontra nell'umidità di risalita capillare dal terreno, causa delle efflorescenze saline presenti in grande quantità sulla superficie del pavimento e delle pareti, e della disgregazione dei laterizi; è fondamentale, per il futuro uso pubblico della stanza, innanzitutto, ridurre efficacemente questo problema, mediante le tecniche predisposte, per evitare la saturazione dell'ambiente stesso e l'eventuale formazione di muffe ed altre conformazioni vegetali, poi risanare i problemi già causati dall'umidità stessa.

Il secondo meccanismo di degrado importante si ritrova nel parziale distacco dei diversi strati d'intonaco dalle murature delle pareti: questo fenomeno è generato, in primo luogo, dai sali solubili, derivanti dalla prima causa di degrado, presenti all'interno dei pori della muratura che, trovando un ostacolo durante il percorso di risalita sulla superficie, tendono a spaccarlo, e poi dall'incompatibilità dei diversi materiali utilizzati nei secoli per il rifacimento degli intonaci, mediante l'applicazione di strati successivi. Qualora l'intonaco non presenti valenza storico-artistica, si preferisce rimuoverlo ed applicare, a seguito degli interventi di risanamento, un unico strato d'intonaco omogeneo, ricostruito sulla base della curva granulometrica ottenuta a seguito della prova di setacciatura; se invece l'intonaco più superficiale presenta un alto valore artistico, come nel nostro caso quello presente nella parte superiore delle pareti, è indispensabile conservarlo, e di conseguenza, ci si ripropone di trattare le parti ammalorate dello stesso mediante malta compatibile.

Così facendo, si opera nell'ottica di una serie di interventi di restauro omogenei e compatibili tra loro.

Cap. 6 Riqualificazione della Sala d'Arme come accesso principale del Museo dell'Aceto Balsamico di Modena

La Rocca Rangoni di Spilamberto è inserita all'interno di un complesso e totale progetto di restauro, per il futuro insediamento del Museo dell'Aceto Balsamico; in quest'ottica, il Comune di Spilamberto ha fatto redigere due differenti studi di fattibilità, il primo condotto da uno studio privato di Sassuolo, nel 2008, e il secondo, condotto dall'Università di Ferrara nel 2009, i quali, pur seguendo un comune denominatore sulla funzione generale, propongono diverse soluzioni da adottare in merito alla funzionalità dei vani della Rocca stessa.

A seguito di un'attenta analisi, si è deciso di fare uso dello studio di fattibilità redatto dall'Università di Ferrara, il quale propone, per il doppio volume della Sala d'Arme, la funzione di accesso principale all'edificio, essendo uno dei pochi vani situato a pian terreno, e a godere di conseguenza, di un libero accesso e della massima fruibilità dalla corte interna dell'edificio.

Dalla stessa stanza sarà inoltre possibile accedere direttamente al nuovo bookshop, adibito alla vendita di gadget e materiale conoscitivo sul Museo dell'Aceto Balsamico e sul prodotto stesso, insediato nel vano attiguo alla Sala d'Arme, ridenominato il numero 112 all'interno della numerazione delle stanze condotta dal Politecnico di Milano; a questa stanza, non avendo una diretta apertura con l'esterno, si accede direttamente dalla Sala d'Arme.

6.1 Il progetto architettonico

Oltre che il progetto di restauro dei materiali resosi necessario per la futura fruizione e utilizzo pubblico della stanza, la Sala d'Arme sarà soggetta anche ad un intervento di restauro architettonico, quanto più reversibile e compatibile possibile con la natura della stanza stessa, nell'ottica di ripristinare, almeno in parte, l'antico solaio interpiano, oggi assente in quanto crollato, con la costruzione di un soppalco in legno e acciaio.

Nell'ottica del restauro architettonico, le scelte progettuali da mettere in opera erano tra le più svariate, ma essenzialmente si trattava inizialmente di dover scegliere se realizzare, indipendentemente dal materiale, un intero solaio interpiano o un soppalco.

Per quanto riguarda la prima ipotesi, ricordando di non aver a disposizione alcuna fonte storica in merito ai materiali e alle tecnologie costruttive impiegate per la realizzazione dell'antico solaio, oggi crollato, è immediato pensare alla possibilità di cadere in errori costruttivi, volendo emulare la soluzione tecnologica preesistente; perciò si è optato per la realizzazione di un soppalco, posto allo stesso livello dell'antico solaio, cioè 3,10 m di altezza. Questa soluzione si scosta completamente dall'imitazione del solaio preesistente, in quanto reversibile, e nel contempo, permette di avere una fantastica percezione del doppio volume, caratteristica fondamentale della stanza, notando di conseguenza le decorazioni su carta applicate al solaio ligneo di copertura.

In merito ai materiali, non avendo enormi problemi di illuminazione da dover optare per una soluzione in vetro strutturale e rimanendo nell'ottica di evitare qualsiasi tipo di emulazione, è fondamentale rendere l'intervento di notevole impatto tecnologico, quindi si è pensato di realizzare un solaio in legno con struttura portante in acciaio; il soppalco avrà un aggetto di 3,30 m circa sulla stanza e verrà destinato ad ospitare una parte di bookshop, oltre quello già inserito nel vano attiguo, in quanto proprio in questo spazio sono presenti tre pilastri strutturali posti al centro della stanza, i quali limitano chiaramente lo spazio disponibile all'allestimento stesso del negozio.

Scale

All'interno dell'analisi progettuale, il posizionamento della scala ha richiesto notevole attenzione, in primo luogo per quanto riguarda le dimensioni del vano, piuttosto limitate per la realizzazione di una scala quadrata o rettangolare a doppia rampa, poi per il rispetto del doppio accesso alla stanza dalla corte interna e della necessaria fruibilità che ne deriva. Si era pensato anche alla possibilità di inserire la scala all'interno del vano attiguo preposto a bookshop, ma la presenza del solaio interpiano all'altezza di 2,80m, e della tramezza al piano superiore gravante su di esso, in posizione di mezzeria, hanno definito notevoli difficoltà di realizzazione dell'intervento.

Per una migliore fruibilità della soluzione ideata quindi, il soppalco sarà raggiungibile grazie ad una scala ad "L" in acciaio autoportante, posta all'interno della stanza preposta ad accesso principale, adiacente alla parete "A", di modo che l'utente la ritrovi davanti al suo ingresso nella sala; la scala presenterà solamente le pedate, realizzate in accordo

con le disposizioni progettuali per gli ambienti pubblici, per cui è richiesta una pedata minima pari a 30 cm, un'alzata massima pari a 16 cm, una lunghezza del gradino pari ad almeno 1,20m e sarà dotata di parapetto e corrimano posto all'altezza di 1,0 m.

Trattandosi di ambiente pubblico, le pedate dovranno essere ricoperte da materiale antiscivolo ed inoltre, il gradino iniziale e quello finale dovranno essere dotati di strisce segnalatrici dell'inizio e fine rampa.

La posizione della scala però, ha reso necessaria la chiusura di una delle due aperture di collegamento col vano attiguo, di larghezza pari ad 1,08m, in corrispondenza della quale è stata realizzata una facciata in vetro strutturale trasparente. (**Tav. Progetto Architettonico**)

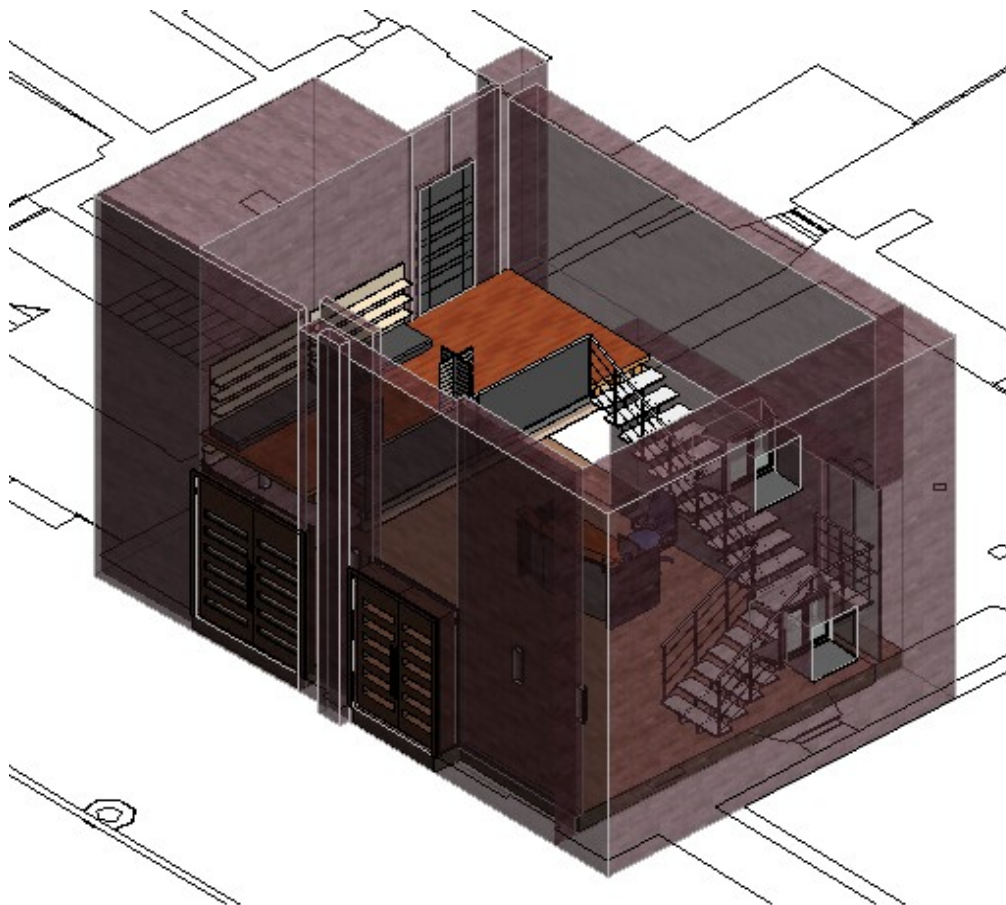


Figura 93: *Progetto architettonico della Sala d'Arme con muri*

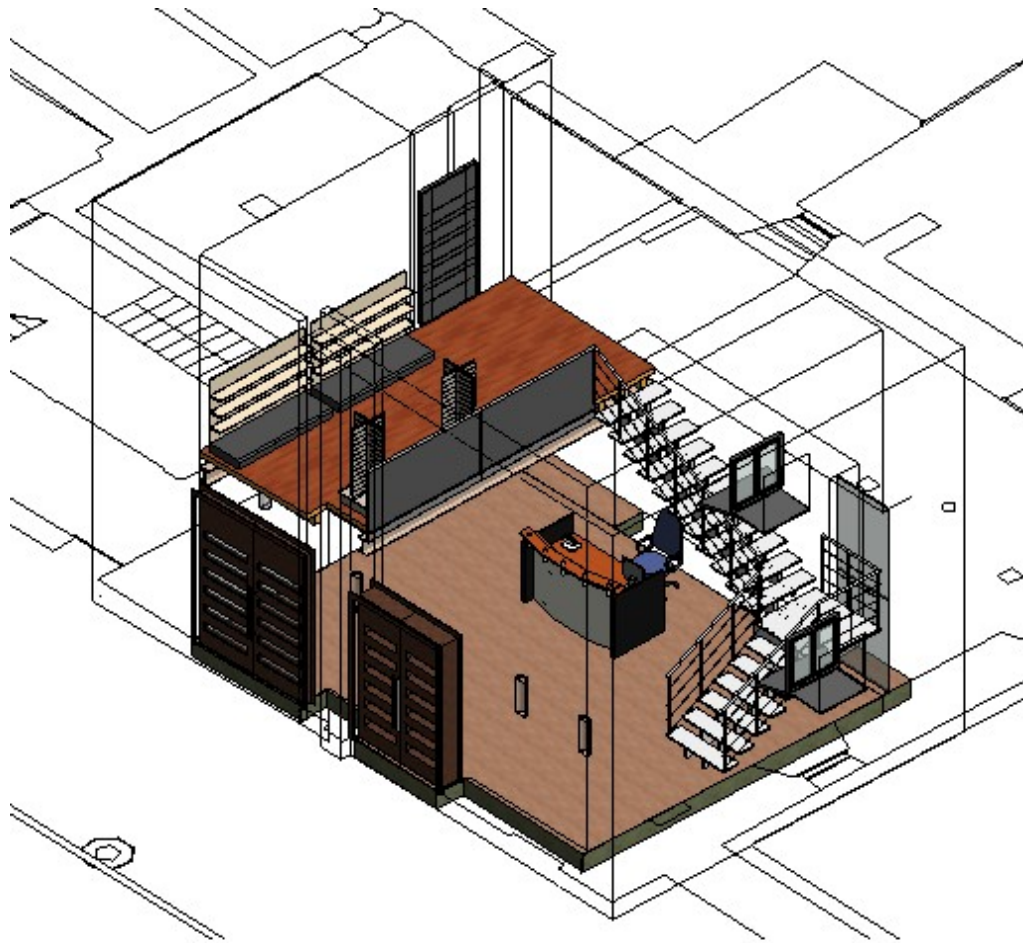


Figura 94: *Progetto architettonico della Sala d'Arme senza muri*

6.2 La progettazione del soppalco

Il soppalco ha una conformazione pressoché rettangolare di dimensioni pari a 6,08 m di lunghezza per 3,35 metri di profondità, a meno della parte destra dello stesso, in cui si rende necessario seguire il percorso della muratura perimetrale, e di conseguenza ridurre la lunghezza dello stesso a 5,60 m. (Fig. 93)

L'impalcato è costituito dai seguenti strati di materiale:

- Parquet in listoni lignei, spessore 2 cm;
- Materassino di posa, spessore 1 cm;
- Isolante fonoassorbente, spessore 2 cm;
- Manto anti-polvere, spessore 1 cm;

- Tavolato in legno, spessore 5 cm.

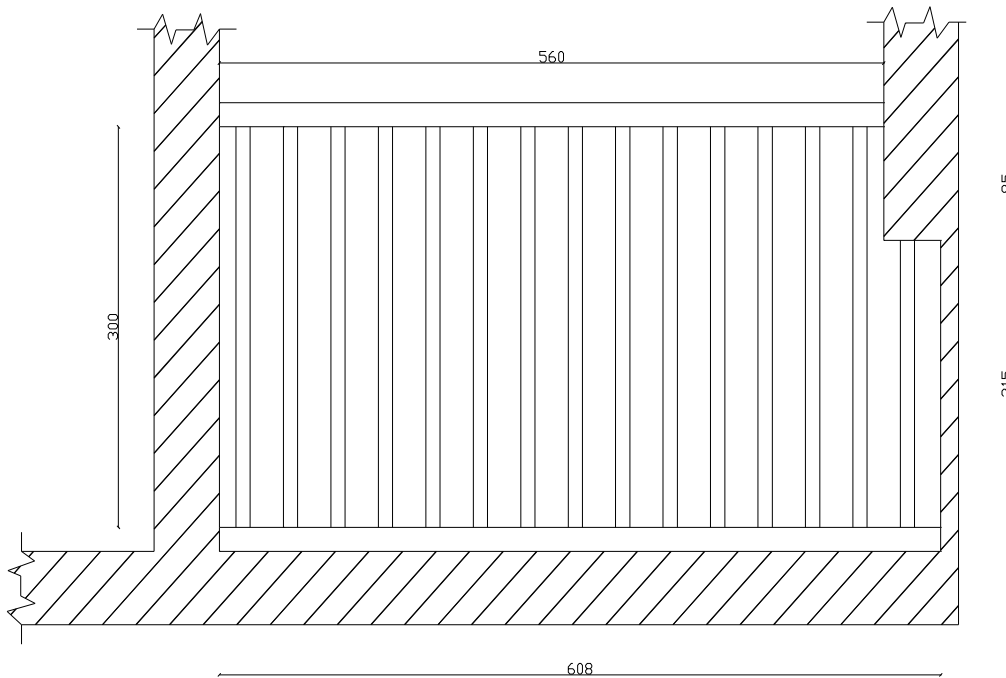


Figura 95: *Struttura del soppalco vista dal basso*

Non si è reso necessario l'utilizzo di un importante spessore di isolante termico, in quanto, persistendo la natura di doppio volume, si tratta di un elemento costruttivo di non completa separazione tra due vani.

La struttura portante è costituita da 15 travetti in legno, orditi ortogonalmente a due travi di acciaio sottostanti, ancorate alle muratura; l'ultimo travetto presenta una lunghezza minore rispetto agli altri, pari a 2,30 m, perciò per garantirne l'appoggio, verrà inserito all'interno di una trave con profilo UPN, sempre in acciaio, bullonata direttamente alla muratura retrostante.

I calcoli costruttivi, sia per il legno che per l'acciaio, sono stati condotti secondo la normativa italiana vigente, D.M NTC 2008, secondo la quale gli elementi devono essere verificati sia per lo stato limite ultimo, sia per lo stato limite d'esercizio.

6.2.1 Progettazione dei travetti in legno

Predimensionamento

Inizialmente vengono valutati i pesi agenti sul singolo travetto in legno, dati dai diversi strati costituenti l'impalcato e dal peso proprio del travetto stesso; di seguito si riporta in tabella la densità o il peso a metro quadrato dei differenti materiali, in funzione di quanto riportato all'interno del prontuario:

Materiale	Densità [kN / m³]	Peso a metro quadrato [kN / m²]	Spessore [cm]
Parquet	-	0,25	2
Materassino	-	0,1	1
Isolante fonoassorbente	1,9	-	2
Manto anti-polvere	6,36	-	1
Tavolato legno	6	-	5

Si valutano i carichi permanenti agenti, moltiplicando tra loro i dati sopra riportati:

Materiale		[kN / m²]
Parquet	0,25	0,25
Materassino	0,1	0,1
Isolante fibra legno	$1,9 \cdot 0,02$	0,0380
Manto anti-polvere	$6,36 \cdot 0,01$	0,0636
Tavolato legno	$6 \cdot 0,05$	0,3
Totale		0,7516 = 0,75

Per quanto riguarda i carichi variabili, seguendo le prescrizioni indicate dalla normativa suddetta, si fa riferimento alla tabella 3.1.II, in cui, all'interno della CATEGORIA D, ambienti ad uso commerciale, viene scelta la Cat. D1, corrispondente ai Negozi, destinazione individuata per il soppalco;

$$\text{Cat. D1} \rightarrow q_k = 4 \text{ kN / m}^2$$

Essendo una struttura posta all'interno di un ambiente, non sarà soggetta né al carico neve, né al carico vento, i quali non vengono perciò considerati.

In accordo con la normativa italiana UNI 11035-2:2010, si fa riferimento a Legno di Abete (Nord Italia), Classe di Resistenza C18, Categoria Resistente S3, le cui caratteristiche strutturali sono:

$$E_{0, \text{mean}} = 10,5 \text{ kN/mm}^2$$

$$G_{\text{mean}} = 0,66 \text{ kN/mm}^2$$

$$f_{m,k} = 18 \text{ N/mm}^2 = 18000 \text{ kN/m}^2$$

$$f_{v,k} = 3,4 \text{ N/mm}^2 = 3400 \text{ kN/m}^2$$

$$\rho_{\text{mean}} = 450 \text{ kg/m}^3$$

dove:

$f_{m,k}$: tensione di resistenza a flessione (5-perc.);

$f_{v,k}$: tensione di resistenza a taglio (5-perc.);

$E_{0, \text{mean}}$: Modulo di elasticità medio parallelo alla fibra;

G_{mean} : Modulo di taglio medio

ρ_{mean} : Massa volumica media

Si ipotizzano le dimensioni della sezione trasversale del travetto, pari a 12 x 16 cm ed interasse pari a 40 cm.

Per il dimensionamento allo Stato Limite Ultimo, si considera la Combinazione Fondamentale, secondo cui:

$$Q = \gamma_{G1} \cdot G1 + \gamma_{G2} \cdot G2 + \gamma_{Q1} \cdot Q_{K1} + \gamma_{Q2} \cdot \Psi_{02} \cdot Q_{K2} + \dots$$

dove

- Ψ_{0j} = valori dei coefficienti di combinazione, sono riportati all'interno della tabella 2.5.I della normativa NTC '08. Per la categoria D, $\Psi_{0j} = 0,7$.
- γ_{G1} , γ_{G2} , γ_{Qi} = coefficienti parziali per le azioni o per l'effetto delle azioni nelle verifiche SLU, sono riportati all'interno della tabella 2.6.I della normativa NTC '08, e valgono rispettivamente 1,3 per γ_{Gi} e 1,5 per γ_{Qi} .

Per quanto riguarda le costruzioni in legno, la normativa impone l'individuazione della Classe di durata del carico e la corrispondente Durata del carico, assumendo per:

- Peso proprio e carichi non rimovibili → classe di durata permanente;
- i Carichi Variabili → classe di durata media.

e l'individuazione della Classe di Servizio, in quanto la durata del carico e l'umidità del legno influiscono sulle sue proprietà resistenti:

- Classe di Servizio 1 → “è caratterizzata da un'umidità del materiale in equilibrio con l'ambiente a una temperatura di 20°C e un'umidità relativa dell'aria circostante che non superi il 65%, se non per poche settimane all'anno.”

Il valore di calcolo X_d di una proprietà del materiale viene calcolato mediante la seguente relazione:

$$X_d = \frac{k_{mod} \cdot X_k}{\gamma_M}$$

dove

X_k è il valore caratteristico della proprietà del materiale;

γ_M è il coefficiente parziale di sicurezza relativo al materiale;

k_{mod} è un coefficiente correttivo che tiene conto dell'effetto, sui parametri di resistenza, sia della durata del carico, sia dell'umidità della struttura.

Se una combinazione di carico comprende azioni appartenenti a differenti classi di durata del carico si dovrà scegliere un valore di k_{mod} che corrisponde all'azione di minor durata.

$$\gamma_M = 1,50 \text{ per legno massiccio;}$$

Scelta la Classe di Servizio 1 e il Legno Massiccio:

$$k_{mod} = 0,6 \text{ per Classe di Durata Permanente;}$$

$$k_{mod} = 0,8 \text{ per Classe di Durata Media.}$$

Si ottiene:

$$Q = 1,3 \cdot 0,75 + 1,5 \cdot 4 = 6,975 \simeq 6,98 \text{ kN/m}^2$$

$$q = Q \cdot \text{interasse travetti} = 6,98 \cdot 0,40 = 2,79 \text{ kN/m}$$

$$\text{Peso proprio travetto} = 0,12 \cdot 0,16 \cdot 450 = 8,64 \text{ kg/m} = 0,0864 \text{ kN/m}$$

$$q_{\text{TOT}} = 2,79 + 0,0864 = 2,8764 \approx 2,88 \text{ kN/m}$$

Considerando lo schema strutturale di una trave appoggiata, di luce pari a 3,30 m, si calcola:

$$W = \frac{b \cdot h^2}{6} = \frac{0,12 \cdot 0,16^2}{6} = 0,000512 \text{ m}^3 \quad \text{modulo di resistenza elastico}$$

$$M = \frac{q \cdot l^2}{8} = \frac{2,88 \cdot 3,30^2}{8} = 3,92 \text{ kNm} \quad \text{momento flettente}$$

$$f_{m,y,d} = \frac{M}{W} = \frac{3,92}{0,000512} = 7656,25 \text{ kN/m}^2 \quad \text{tensione sollecitante}$$

Fissata la base del travetto pari a 12 cm, si calcola l'altezza della sezione:

$$h = \sqrt{\frac{6 \cdot M}{f_{m,y,d} \cdot b}} = \sqrt{\frac{6 \cdot 3,92}{7656,25 \cdot 0,12}} = 0,16 \text{ m}$$

E' verificato il predimensionamento della sezione del travetto pari a 12 x 16 cm.

Verifiche SLU

Verifica a flessione

La resistenza a flessione nei confronti dei carichi permanenti è:

$$f_d = \frac{0,6 \cdot 18000}{1,5} = 72000 \text{ kN/m}^2$$

La resistenza a flessione nei confronti dei carichi variabili è:

$$f_d = \frac{0,8 \cdot 18000}{1,5} = 9600 \text{ kN/m}^2$$

Considero il valore più basso tra i due, per garantire la sicurezza; in ogni caso risulta che la tensione sollecitante flettente, cioè il momento agente sul travetto, sia inferiore del valore resistente:

$$f_{m,y,d} \leq f_d$$

$$7656,25 \leq 9600 \text{ kN/m}^2$$

Verifica a taglio

La resistenza a taglio nei confronti dei carichi permanenti è:

$$f_d = \frac{0,6 \cdot 3400}{1,5} = 1360 \text{ kN/m}^2$$

La resistenza a taglio nei confronti dei carichi variabili è:

$$f_d = \frac{0,8 \cdot 3400}{1,5} = 1813,3 \text{ kN/m}^2$$

Il taglio viene calcolato come:

$$V_d = \frac{q \cdot l}{2} = \frac{2,88 \cdot 3,30}{2} = 4,752 \text{ kN}$$

La tensione sollecitante a taglio la si può calcolare come:

$$\zeta_d = \frac{3}{2} \cdot \frac{V_{max}}{b \cdot h} = \frac{3}{2} \cdot \frac{4,752}{0,12 \cdot 0,16} = 371,25 \text{ kN/m}^2$$

E' verificato che la tensione sollecitante di taglio sia minore della resistenza a taglio più piccola tra le due riportate:

$$\zeta_d \leq f_d$$

$$371,25 \leq 1360 \text{ kN/m}^2$$

Verifiche SLE

La normativa NTC 2008 prevede anche per le costruzioni in legno, la verifica agli Stati Limite d'Esercizio, per la quale la deformazione dell'elemento strutturale deve rimanere all'interno di certi limiti per non compromettere la funzionalità dell'elemento stesso.

Considerando il particolare comportamento reologico del legno, si dovrà valutare sia la deformazione istantanea, calcolata mediante i valori medi dei moduli elastici per le membrature e il valore istantaneo del modulo di scorrimento dei collegamenti, sia la deformazione a lungo termine, calcolata mediante i valori medi dei moduli elastici opportunamente ridotti dal fattore $1 / (1 + k_{def})$ per le membrature, e utilizzando un

valore ridotto nello stesso modo del modulo di scorrimento dei collegamenti. Il valore del coefficiente k_{def} tiene conto dell'aumento di deformabilità con il tempo, causato dall'effetto combinato della viscosità e dell'umidità del materiale.

Il valore di k_{def} , funzione del materiale e della classe di servizio, utilizzato nelle successive verifiche è: 0,6

Freccia istantanea totale

Il carico da utilizzare per il calcolo della freccia istantanea totale viene ottenuto mediante l'utilizzo della Combinazione Rara, secondo cui:

$$Q = G_1 + G_2 + Q_{KI} = 0,75 + 4 = 4,75 \text{ kN/m}^2$$

$$q = Q \cdot \text{interasse travetto} = 4,75 \cdot 0,4 = 1,9 \text{ kN/m}$$

$$q_{\text{tot}} = q + \text{peso proprio travetto} = 1,9 + 0,0864 = 1,9864 \text{ kN/m}$$

$$I = \frac{b \cdot h^3}{12} = \frac{0,12 \cdot 0,16^3}{12} = 0,00004096 \text{ m}^4 \quad \text{modulo d'inerzia}$$

$$A^* = \frac{5}{6} \cdot b \cdot h = \frac{5}{6} \cdot 0,12 \cdot 0,16 = 0,016 \text{ m}^2 \quad \text{area resistente}$$

La freccia massima dovuta a momento flettente è pari a:

$$\omega_{M, \max} = \frac{5}{384} \cdot \frac{q \cdot l^4}{E \cdot J} = \frac{5}{384} \cdot \frac{1,9864 \cdot 3,3^4}{10500000 \cdot 0,00004096} = 0,00713 \text{ m}$$

La freccia massima dovuta al taglio è pari a:

$$\omega_{V, \max} = \frac{q \cdot l^2}{8 \cdot G \cdot A} = \frac{1,9864 \cdot 3,3^2}{8 \cdot 660000 \cdot 0,016} = 0,000256 \text{ m}$$

La freccia totale è:

$$\omega_{\text{TOT}} = \omega_{M, \max} + \omega_{V, \max} = 0,00713 + 0,000256 = 0,00739 \text{ m}$$

La verifica è soddisfatta se la freccia totale è minore di $L/200$:

$$0,00739 < \frac{L}{200} = \frac{3}{200} = 0,015 \text{ m}$$

Freccia differita

Il carico da utilizzare per il calcolo della freccia differita viene calcolato mediante la Combinazione quasi permanente, secondo cui:

$$Q = G_1 + G_2 + \psi_{21} \cdot Q_{KI}$$

quindi

$$Q = 0,75 + 0,6 \cdot 4 = 3,15 \text{ kN/m}^2$$

$$q = Q \cdot \text{interasse travetti} = 3,15 \cdot 0,4 = 1,26 \text{ kN/m}$$

$$q_{\text{TOT}} = 1,26 + 0,0864 = 1,3464 \text{ kN/m}$$

Avendo posto il coefficiente $K_{\text{def}} = 0,6$, il valore del modulo elastico e del modulo di taglio da utilizzare nel calcolo sono:

$$E = E_{o, \text{mean}} \cdot \frac{1}{1 + K_{df}} = 10,5 \cdot \frac{1}{1 + 0,6} = 6,5625 \text{ kN/mm}^2 = 6562500 \text{ kN/m}^2$$

$$G = G_{o, \text{mean}} \cdot \frac{1}{1 + K_{df}} = 0,66 \cdot \frac{1}{1 + 0,6} = 0,4125 \text{ kN/mm}^2 = 412500 \text{ kN/m}^2$$

La freccia massima data da momento flettente è pari a:

$$\omega_{M, \text{max}} = \frac{5}{384} \cdot \frac{q \cdot l^4}{E \cdot J} = \frac{5}{384} \cdot \frac{1,3464 \cdot 3,3^4}{6562500 \cdot 0,00004096} = 0,007735 \text{ m}$$

La freccia massima data dal taglio è pari a:

$$\omega_{V, \text{max}} = \frac{q \cdot l^2}{8 \cdot G \cdot A} = \frac{1,3464 \cdot 3,3^2}{8 \cdot 412500 \cdot 0,016} = 0,000278 \text{ m}$$

La freccia totale è:

$$\omega_{\text{TOT}} = \omega_{M, \text{max}} + \omega_{V, \text{max}} = 0,007735 + 0,000278 = 0,008013 \text{ m}$$

La verifica è soddisfatta se la freccia totale è minore di L/300:

$$0,008013 < \frac{L}{300} = \frac{3}{300} = 0,01 \text{ m}$$

Freccia istantanea per carichi variabili

Il carico utilizzato per calcolare questa freccia, si ottiene mediante la Combinazione Frequente dei soli carichi variabili, secondo cui:

$$Q = \psi_{11} \cdot Q_{IK}$$

quindi

$$Q = 0,7 \cdot 4 = 2,8 \text{ kN/m}^2$$

$$q = Q \cdot \text{interasse travetti} = 2,8 \cdot 0,4 = 1,12 \text{ kN/m}$$

La freccia massima data da momento flettente è pari a:

$$\omega_{M, \max} = \frac{5}{384} \cdot \frac{q \cdot l^4}{E \cdot J} = \frac{5}{384} \cdot \frac{1,12 \cdot 3,3^4}{10500000 \cdot 0,00004096} = 0,00402 \text{ m}$$

La freccia massima data da taglio è pari a:

$$\omega_{V, \max} = \frac{q \cdot l^2}{8 \cdot G \cdot A} = \frac{1,12 \cdot 3,3^2}{8 \cdot 660000 \cdot 0,016} = 0,000144 \text{ m}$$

La freccia totale è pari a:

$$\omega_{\text{TOT}} = \omega_{M, \max} + \omega_{V, \max} = 0,00402 + 0,000144 = 0,004164 \text{ m}$$

La verifica è soddisfatta se la freccia totale è minore di L/300:

$$\omega_{\text{TOT}} < \frac{L}{300} = \frac{3}{300} = 0,01 \text{ m}$$

$$0,004164 < 0,01 \text{ m}$$

In merito all'ultimo travetto in legno, di lunghezza inferiore ai restanti, vengono considerate per la sezione trasversale, le dimensioni pari a 12x16 cm, in quanto, anche se di lunghezza minore, si propende a dare omogeneità alla soluzione progettuale, andando a sovradimensionare l'ultimo travetto.

Verifica Sismica

Per quanto riguarda le disposizioni costruttive da adottare per la sismica, si rimanda al capitolo 7.7.5 della normativa italiana NTC 2008.

In merito alle verifiche di sicurezza da condurre invece, i giunti di carpenteria non presentano rischi di rottura fragile se la verifica per tensioni tangenziali precedentemente fatta, è soddisfatta utilizzando un ulteriore coefficiente parziale di sicurezza pari a 1,3, per cui:

$$1,3 \cdot \zeta_d \leq f_d$$
$$482,63 \leq 1360 \text{ kN/m}^2$$

Infine, nel rispetto delle disposizioni costruttive per i collegamenti riportate nel capitolo 7.7.7.1 della normativa, si ricorda di non utilizzare bulloni di diametro superiore a 16 mm nei collegamenti legno-legno e/o legno-acciaio, per non influenzare la resistenza a taglio.

6.2.2 Progettazione della prima trave

Predimensionamento

La struttura portante dell'impalcato è costituita da due travi in acciaio, la prima di lunghezza pari a 6,00 m, la seconda di lunghezza pari a 6,22 metri, entrambi collegate alla muratura mediante delle piastre di acciaio.

Per il progetto di queste travi verrà utilizzata la normativa italiana vigente, cioè il D.M. NTC 2008, avendo scelto un acciaio del tipo:

$$\text{ACCIAIO S235}$$
$$f_{YK} = 235 \text{ N/mm}^2$$
$$\gamma_M = 1,05$$
$$f_D = \frac{f_{YK}}{\gamma_M} = \frac{235}{1,05} = 223,81 \text{ N/mm}^2$$
$$t \leq 40 \text{ mm}$$

dove:

f_{yk} : resistenza caratteristica di snervamento dell'acciaio

f_d : resistenza di progetto

γ_m : coefficiente di sicurezza per la resistenza delle membrature e stabilità

t : spessore nominale dell'elemento

Per eseguire il predimensionamento delle travi, viene considerato lo schema statico di trave semplicemente appoggiata, sulla quale agisce il carico derivante dall'impalcato appena progettato:

$$Q = Q_{\text{fatti}} \cdot \text{area influenza} = 6,98 \cdot 1,5 = 10,47 \text{ kN/m}$$

Dal carico si determinano le azioni sollecitanti di taglio e momento flettente:

$$T = \frac{q \cdot l}{2} = \frac{10,47 \cdot 6,00}{2} = 31,41 \text{ kN}$$

$$M = \frac{q \cdot l^2}{8} = \frac{10,47 \cdot 6,00^2}{8} = 47,12 \text{ kNm}$$

Si calcola il modulo di resistenza elastico W :

$$W = \frac{M}{f_{yd}} = \frac{47,12}{223810} = 0,0002105 \text{ m}^3 = 210,5 \text{ cm}^3$$

Noto il momento statico W lungo l'asse più forte, cioè l'asse x , si procede col scegliere un profilo HEB il cui momento statico sia più elevato di quello calcolato; di conseguenza, si sceglie un profilo

$$\text{HE 180 B} \rightarrow W_x = 426 \text{ cm}^3$$

Si riportano di seguito i carichi agenti sulla trave in acciaio in oggetto:

	n°	Carico [kN/m ²]	Carico [kN/m]	Area influenza [m]	Risultato [kN/m]
Permanenti	1	0,75	-	1,5	1,125
Variabili	1	4	-	1,5	6,0
Peso travetti	14	-	0,0864	-	1,2096
Peso proprio trave	1	-	0,512	-	0,512
Parapetto in vetro	1	-	0,75	-	0,750

Totale Permanenti		3,60
Totale Variabili		6,00

Per procedere con le verifiche della trave, è necessario calcolare il carico agente su di essa, fattorizzato nel modo indicato dalla Combinazione Fondamentale, utilizzata per lo Stato Limite Ultimo, secondo cui:

$$Q = \gamma_{G1} \cdot G1 + \gamma_{G2} \cdot G2 + \gamma_{Q1} \cdot Q_{K1} + \gamma_{Q2} \cdot \psi_{02} \cdot Q_{K2} + \dots$$

dove

- Ψ_{0j} = valori dei coefficienti di combinazione, sono riportati all'interno della tabella 2.5.I della normativa NTC '08. Per la categoria D, $\Psi_{0j} = 0,7$.
- γ_{G1} , γ_{G2} , γ_{Qi} = coefficienti parziali per le azioni o per l'effetto delle azioni nelle verifiche SLU, sono riportati all'interno della tabella 2.6.I della normativa NTC '08, e valgono rispettivamente 1,3 per γ_{Gi} e 1,5 per γ_{Qi} .

Quindi:

$$Q = 1,3 \cdot 3,6 + 1,5 \cdot 6 = 4,68 + 9 = 13,68 \text{ kN/m} \approx 13,7 \text{ kN/m}$$

Verifiche SLU

Per eseguire le verifiche strutturali, è necessario calcolare le sollecitazioni di taglio e momento flettente, per cui:

$$T = \frac{q \cdot l}{2} = \frac{13,7 \cdot 6,00}{2} = 41,1 \text{ kN}$$

$$M = \frac{q \cdot l^2}{8} = \frac{13,7 \cdot 6,00^2}{8} = 61,65 \text{ kNm}$$

Verifica allo Sforzo Normale

$$N_{ed} = 0$$

$$N_{rd} = \frac{A \cdot f_{yk}}{\gamma_M} = \frac{6530 \cdot 235}{1,05} = 1461476,19 \text{ N} = 1461,48 \text{ kN}$$

dove $A = \text{area HE 180 B} = 65,3 \text{ cm}^2$

La verifica, per cui lo sforzo sollecitante deve essere inferiore a quello resistente di calcolo, è chiaramente soddisfatta.

Verifica a taglio

$$V_{rd} = \frac{A_v \cdot f_{yk}}{\sqrt{3} \cdot \gamma_M} = \frac{2024 \cdot 235}{\sqrt{3} \cdot 1,05} = 261534,17 \text{ N} = 261,53 \text{ kN} \quad \text{taglio resistente}$$

dove

A_v : area resistente a taglio lungo l'anima del profilo

Ricordando che $V_{ed} = 41,1 \text{ kN}$, la verifica è soddisfatta, in quanto:

$$V_{ed} < V_{Rd}$$
$$41,1 < 261,53 \text{ kN}$$

Visto che il taglio sollecitante è inferiore al 50% del taglio resistente, è possibile trascurare l'influenza del taglio sulla resistenza a flessione; così facendo, V_{RD} e M_{RD} possono essere valutati separatamente, secondo quanto indicato dalla normativa.

Verifica a momento flettente

$$M_{rd} = \frac{W_{pl} \cdot f_{yk}}{\gamma_M} = \frac{481000 \cdot 235}{1,05} = 107652381 \text{ Nmm} = 107,65 \text{ kNm} \quad \text{momento flettente}$$

resistente

dove:

W_{pl} : modulo di resistenza plastico = 481 cm^3

Ricordando che $M_{ed} = 61,65 \text{ kNm}$, la verifica è soddisfatta, in quanto il momento flettente sollecitante risulta essere inferiore a quello resistente.

$$M_{ed} < M_{Rd}$$
$$61,65 < 107,65 \text{ kNm}$$

Negli elementi inflessi caratterizzati da giunti strutturali bullonati , la presenza dei fori nelle piattabande dei profili può essere trascurata nel calcolo del momento flettente se è verificata la seguente relazione:

$$\frac{0,9 \cdot A_{f,nei} \cdot f_{tk}}{\gamma_{M2}} \geq \frac{A_f \cdot f_{yk}}{\gamma_{Mo}} \rightarrow 8857382,4 \geq 7775142,9 \text{ N} \quad \checkmark$$

Verifiche allo SLE

Secondo la normativa vigente, il primo stato limite d'esercizio da verificare, è quello di deformazione e/o spostamento, al fine di evitare deformazioni e spostamenti che possano compromettere l'uso efficiente della costruzione e dei suoi contenuti, nonché il suo aspetto estetico.

Inizialmente, bisogna valutare il carico agente sulla trave in oggetto, fattorizzato secondo la Combinazione Rara, per cui:

$$Q = G_1 + G_2 + Q_{K1}$$

dove:

G_1 è il carico permanente strutturale;

G_2 è il carico permanente non strutturale;

Q_{K1} è il carico variabile primario.

Quindi:

$$Q = 3,6 + 6 = 9,6 \text{ kN/m}$$

Posto J_x : momento d'inerzia lungo l'asse x = $3831 \text{ cm}^4 = 0,00003831 \text{ m}^4$

si calcola lo spostamento per soli carichi permanenti, δ_1 :

$$\delta_1 = \frac{5}{384} \cdot \frac{q \cdot l^4}{E \cdot J} = \frac{5}{384} \cdot \frac{3,6 \cdot 6,0^4}{210000000 \cdot 0,00003831} = 0,007551 \text{ m}$$

e lo spostamento per soli carichi variabili, δ_2 :

$$\delta_2 = \frac{5}{384} \cdot \frac{q \cdot l^4}{E \cdot J} = \frac{5}{384} \cdot \frac{6 \cdot 6,0^4}{210000000 \cdot 0,00003831} = 0,01259 \text{ m}$$

La prima verifica da condursi, prevede che il rapporto tra lo spostamento dato da soli carichi variabili e la lunghezza della trave sia inferiore a 1/300:

$$\frac{\delta_2}{L} = \frac{0,01259}{6,00} = 0,002098 < \frac{1}{300} = 0,0033 \quad \checkmark$$

La seconda verifica prevede invece, che il rapporto tra lo spostamento totale e la luce della trave sia inferiore a 1/250:

$$\delta_{TOT} = \delta_1 + \delta_2 = 0,007551 + 0,01259 = 0,02014 \text{ m}$$

$$\frac{\delta_{tot}}{L} = \frac{0,02014}{6,00} = 0,00336 < \frac{1}{250} = 0,004 \quad \checkmark$$

6.2.3 Progettazione della seconda trave

Predimensionamento

In questa sede si esegue il predimensionamento della seconda trave in acciaio costituente la struttura portante dell'impalcato, di lunghezza pari a 6,22 m, collegata anch'essa come la prima, alla muratura mediante delle piastre di acciaio.

Per il progetto della trave verrà utilizzata la normativa italiana vigente, cioè il D.M. NTC 2008, avendo scelto un acciaio del tipo:

ACCIAIO S235

$$f_{YK} = 235 \text{ N/mm}^2$$

$$\gamma_M = 1,05$$

$$f_D = \frac{f_{YK}}{\gamma_M} = \frac{235}{1,05} = 223,81 \text{ N/mm}^2$$

$$t \leq 40 \text{ mm}$$

dove:

f_{yk} : resistenza caratteristica di snervamento dell'acciaio

f_d : resistenza di progetto

γ_m : coefficiente di sicurezza per la resistenza delle membrature e stabilità

t : spessore nominale dell'elemento

Per eseguire il predimensionamento delle travi, viene considerato lo schema statico di trave semplicemente appoggiata, sulla quale agisce il carico derivante dall'impalcato appena progettato:

$$Q = Q_{fat} \cdot \text{area influenza} = 6,98 \cdot 1,5 = 10,47 \text{ kN/m}$$

Dal carico si determinano le azioni sollecitanti di taglio e momento flettente:

$$T = \frac{q \cdot l}{2} = \frac{10,47 \cdot 6,22}{2} = 32,56 \text{ kN}$$

$$M = \frac{q \cdot l^2}{8} = \frac{10,47 \cdot 6,22^2}{8} = 50,63 \text{ kNm}$$

Si calcola il modulo di resistenza elastico W:

$$W = \frac{M}{f_{yd}} = \frac{50,63}{223810} = 0,0002262 \text{ m}^3 = 226,2 \text{ cm}^3$$

Noto il momento statico W lungo l'asse più forte, cioè l'asse x, si procede col scegliere un profilo HEB il cui momento statico sia più elevato di quello calcolato; di conseguenza, si sceglie un profilo

$$\text{HE 180 B} \rightarrow W_x = 426 \text{ cm}^3$$

Si riportano di seguito i carichi agenti sulla trave in acciaio in oggetto:

	n°	Carico [kN/m ²]	Carico [kN/m]	Area influenza [m]	Risultato [kN/m]
Permanenti	1	0,75	-	1,5	1,125
Variabili	1	4	-	1,5	6,0
Peso travetti	14	-	0,0864	-	1,2096
Peso proprio trave	1	-	0,512	-	0,512
Parapetto in vetro	1	-	0,75	-	0,750
Totale Permanenti					3,6
Totale Variabili					6,000

Per procedere con le verifiche della trave, è necessario calcolare il carico agente su di essa, fattorizzato nel modo indicato dalla Combinazione Fondamentale, utilizzata per lo Stato Limite Ultimo, secondo cui:

$$Q = \gamma_{G1} \cdot G1 + \gamma_{G2} \cdot G2 + \gamma_{Q1} \cdot Q_{K1} + \gamma_{Q2} \cdot \psi_{02} \cdot Q_{K2} + \dots$$

dove

- Ψ_{0j} = valori dei coefficienti di combinazione, sono riportanti all'interno della tabella 2.5.I della normativa NTC '08. Per la categoria D, $\Psi_{0j} = 0,7$.
- $\gamma_{G1}, \gamma_{G2}, \gamma_{Qi}$ = coefficienti parziali per le azioni o per l'effetto delle azioni nelle verifiche SLU, sono riportati all'interno della tabella 2.6.I della normativa NTC '08, e valgono rispettivamente 1,3 per γ_{Gi} e 1,5 per γ_{Qi} .

Quindi:

$$Q = 1,3 \cdot 3,6 + 1,5 \cdot 6 = 4,68 + 9 = 13,68 \text{ kN/m} \approx 13,7 \text{ kN/m}$$

Verifiche allo SLU

Per eseguire le verifiche strutturali, è necessario calcolare le sollecitazioni di taglio e momento flettente, per cui:

$$T = \frac{q \cdot l}{2} = \frac{13,7 \cdot 6,22}{2} = 42,61 \text{ kN}$$

$$M = \frac{q \cdot l^2}{8} = \frac{13,7 \cdot 6,22^2}{8} = 66,25 \text{ kNm}$$

Verifica allo Sforzo Normale

$$N_{ed} = 0$$

$$N_{rd} = \frac{A \cdot f_{yk}}{\gamma_M} = \frac{6530 \cdot 235}{1,05} = 1461476,19 \text{ N} = 1461,48 \text{ kN}$$

dove:

$$A : \text{area HE 180 B} = 65,3 \text{ cm}^2$$

La verifica, per cui lo sforzo sollecitante deve essere inferiore a quello resistente di calcolo, è chiaramente soddisfatta.

Verifica a taglio

$$V_{rd} = \frac{A_v \cdot f_{yk}}{\sqrt{3} \cdot \gamma_M} = \frac{2024 \cdot 235}{\sqrt{3} \cdot 1,05} = 261534,17 \text{ N} = 261,53 \text{ kN} \quad \text{taglio resistente}$$

dove

A_v : area resistente a taglio lungo l'anima del profilo

Ricordando che $V_{ed} = 42,61 \text{ kN}$, la verifica è soddisfatta, in quanto:

$$V_{ed} < V_{Rd}$$

$$42,61 < 261,53 \text{ kN}$$

Visto che il taglio sollecitante è inferiore al 50% del taglio resistente, è possibile trascurare l'influenza del taglio sulla resistenza a flessione; così facendo, V_{RD} e M_{RD} possono essere valutati separatamente, secondo quanto indicato dalla normativa.

Verifica a momento flettente

$$M_{rd} = \frac{W_{pl} \cdot f_{yk}}{\gamma_M} = \frac{481000 \cdot 235}{1,05} = 107652381 \text{ Nmm} = 107,65 \text{ kNm} \quad \text{momento flettente}$$

resistente

dove:

$$W_{pl} : \text{ modulo di resistenza plastico} = 481 \text{ cm}^3$$

Ricordando che $M_{ed} = 66,25 \text{ kNm}$, la verifica è soddisfatta, in quanto il momento flettente sollecitante risulta essere inferiore a quello resistente.

$$M_{ed} < M_{Rd}$$

$$66,25 < 107,65 \text{ kNm}$$

Negli elementi inflessi caratterizzati da giunti strutturali bullonati, la presenza dei fori nelle piattabande dei profili può essere trascurata nel calcolo del momento flettente se è verificata la seguente relazione:

$$\frac{0,9 \cdot A_{f,net} \cdot f_{tk}}{\gamma_{M2}} \geq \frac{A_f \cdot f_{yk}}{\gamma_{Mo}} \rightarrow 8857382,4 \geq 7775142,9 \text{ N} \quad \checkmark$$

Verifiche allo SLE

Secondo la normativa vigente, il primo stato limite d'esercizio da verificare, è quello di deformazione e/o spostamento, al fine di evitare deformazioni e spostamenti che possano compromettere l'uso efficiente della costruzione e dei suoi contenuti, nonché il suo aspetto estetico.

Inizialmente, bisogna valutare il carico agente sulla trave in oggetto, fattorizzato secondo la Combinazione Rara, per cui:

$$Q = G_1 + G_2 + Q_{K1}$$

dove:

G_1 è il carico permanente strutturale;

G_2 è il carico permanente non strutturale;

Q_{K1} è il carico variabile primario.

Quindi:

$$Q = 3,6 + 6 = 9,6 \text{ kN/m}$$

Posto J_x : momento d'inerzia lungo l'asse x = $3831 \text{ cm}^4 = 0,00003831 \text{ m}^4$

si calcola lo spostamento per soli carichi permanenti, δ_1 :

$$\delta_1 = \frac{5}{384} \cdot \frac{q \cdot l^4}{E \cdot J} = \frac{5}{384} \cdot \frac{3,6 \cdot 6,22^4}{210000000 \cdot 0,00003831} = 0,008721 \text{ m}$$

e lo spostamento per soli carichi variabili, δ_2 :

$$\delta_2 = \frac{5}{384} \cdot \frac{q \cdot l^4}{E \cdot J} = \frac{5}{384} \cdot \frac{6 \cdot 6,22^4}{210000000 \cdot 0,00003831} = 0,01454 \text{ m}$$

La prima verifica da condursi, prevede che lo il rapporto tra lo spostamento dato da soli carichi variabili e la lunghezza della trave sia inferiore a 1/300:

$$\frac{\delta_2}{L} = \frac{0,01454}{6,22} = 0,002338 < \frac{1}{300} = 0,0033 \quad \checkmark$$

La seconda verifica prevede invece, che il rapporto tra lo spostamento totale e la luce della trave sia inferiore a 1/250:

$$\delta_{TOT} = \delta_1 + \delta_2 = 0,008721 + 0,01454 = 0,02326 \text{ m}$$

$$\frac{\delta_{tot}}{L} = \frac{0,02326}{6,22} = 0,003740 < \frac{1}{250} = 0,004 \quad \checkmark$$

6.2.4 Progettazione del profilo UPN

Per garantire l'appoggio all'ultimo travetto in legno, di lunghezza inferiore rispetto agli altri, è necessario inserire un profilo UPN in acciaio, all'interno del quale il travetto verrà inserito. Il profilo avrà una lunghezza pari a 0,40 m e verrà bullonato direttamente alla muratura retrostante.

Predimensionamento

Essendo bullonata alla muratura ortogonalmente al suo sviluppo, lo schema statico considerato è quello di una trave incastrata, con un aggetto pari alla lunghezza della sua base.

Per il progetto della trave verrà utilizzata la normativa italiana vigente, cioè il D.M. NTC 2008, avendo scelto un acciaio del tipo:

ACCIAIO S235

$$f_{YK} = 235 \text{ N/mm}^2$$

$$\gamma_M = 1,05$$

$$f_D = \frac{f_{YK}}{\gamma_M} = \frac{235}{1,05} = 223,81 \text{ N/mm}^2$$

$$t \leq 40 \text{ mm}$$

dove:

f_{yk} : resistenza caratteristica di snervamento dell'acciaio

f_d : resistenza di progetto

γ_m : coefficiente di sicurezza per la resistenza delle membrature e stabilità

t : spessore nominale dell'elemento

Per eseguire il predimensionamento, viene considerato sulla trave, il carico derivante dall'impalcato progettato:

$$Q = Q_{fat} \cdot \text{area influenza} = 6,98 \cdot \left(\frac{2,14}{2} + \frac{0,80}{2} \right) = 6,98 \cdot 1,47 = 10,26 \text{ kN/m}$$

Dal carico si determinano le azioni sollecitanti di taglio e momento flettente:

$$T = q \cdot l = 10,26 \cdot 0,4 = 4,104 \text{ kN}$$

$$M = \frac{q \cdot l^2}{2} = \frac{10,26 \cdot 0,4^2}{2} = 0,8208 \text{ kNm}$$

Si calcola il modulo di resistenza elastico W:

$$W = \frac{M}{f_{yd}} = \frac{0,8208}{223810} = 0,000003667 \text{ m}^3 = 3,7 \text{ cm}^3$$

Noto il momento statico W lungo l'asse più forte, cioè l'asse x, si procede col scegliere un profilo UPN il cui momento statico sia più elevato di quello calcolato; di conseguenza, si sceglie un profilo:

$$\text{UPN serie piccola } 50 \times 25 \rightarrow W_x = 6,73 \text{ cm}^3$$

Si riportano di seguito i carichi agenti sulla trave in acciaio in oggetto:

	n°	Carico [kN/m ²]	Carico [kN/m]	Area influenza [m]	Risultato [kN/m]
Permanenti	1	0,75	-	1,47	1,10
Variabili	1	4	-	1,47	5,9
Peso travetti	1	-	0,0864	-	0,0864
Peso proprio trave	1	-	0,0386	-	0,0386
Parapetto in vetro	1	-	0,75	-	0,750
Totale Permanenti					1,978
Totale Variabili					5,880

Per procedere con le verifiche della trave, è necessario calcolare il carico agente su di essa, fattorizzato nel modo indicato dalla Combinazione Fondamentale, utilizzata per lo Stato Limite Ultimo, secondo cui:

$$Q = \gamma_{G1} \cdot G1 + \gamma_{G2} \cdot G2 + \gamma_{Q1} \cdot Q_{K1} + \gamma_{Q2} \cdot \psi_{02} \cdot Q_{K2} + \dots$$

dove

- Ψ_{0j} = valori dei coefficienti di combinazione, sono riportati all'interno della tabella 2.5.I della normativa NTC '08. Per la categoria D, $\Psi_{0j} = 0,7$.
- $\gamma_{G1}, \gamma_{G2}, \gamma_{Qi}$ = coefficienti parziali per le azioni o per l'effetto delle azioni nelle verifiche SLU, sono riportati all'interno della tabella 2.6.I della normativa NTC '08, e valgono rispettivamente 1,3 per γ_{G1} e 1,5 per γ_{Qi} .

Quindi:

$$Q = 1,3 \cdot 1,978 + 1,5 \cdot 5,88 = 2,57 + 8,82 = 11,39 \text{ kN/m} \approx 11,4 \text{ kN/m}$$

Verifiche allo SLU

Per eseguire le verifiche strutturali, è necessario calcolare le sollecitazioni di taglio e momento flettente, per cui:

$$T = q \cdot l = 11,4 \cdot 0,4 = 4,56 \text{ kN}$$

$$M = \frac{q \cdot l^2}{2} = \frac{11,4 \cdot 0,4^2}{2} = 0,912 \text{ kNm}$$

Verifica allo Sforzo Normale

$$N_{ed} = 0$$

$$N_{rd} = \frac{A \cdot f_{yk}}{\gamma_M} = \frac{492 \cdot 235}{1,05} = 110114,29 \text{ N} = 110,11 \text{ kN}$$

dove:

$$A : \text{area UPN } 50 \times 25 = 4,92 \text{ cm}^2$$

La verifica, per cui lo sforzo sollecitante deve essere inferiore a quello resistente di calcolo, è chiaramente soddisfatta.

Verifica a taglio

$$V_{rd} = \frac{A_v \cdot f_{yk}}{\sqrt{3} \cdot \gamma_M} = \frac{252 \cdot 235}{\sqrt{3} \cdot 1,05} = 32562,56 \text{ N} = 32,56 \text{ kN} \quad \text{taglio resistente}$$

dove

$$A_v : \text{area resistente a taglio lungo l'anima del profilo}$$

Ricordando che $V_{ed} = 4,56 \text{ kN}$, la verifica è soddisfatta, in quanto:

$$V_{ed} < V_{Rd}$$

$$4,56 < 32,56 \text{ kN}$$

Visto che il taglio sollecitante è inferiore al 50% del taglio resistente, è possibile trascurare l'influenza del taglio sulla resistenza a flessione; così facendo, V_{RD} e M_{RD} possono essere valutati separatamente, secondo quanto indicato dalla normativa.

Verifica a momento flettente

$$M_{rd} = \frac{W_{pl} \cdot f_{yk}}{\gamma_M} = \frac{8520 \cdot 235}{1,05} = 1906857,14 \text{ Nmm} = 1,9069 \text{ kNm} \quad \text{momento flettente}$$

resistente

dove:

$$W_{pl} : \text{ modulo di resistenza plastico} = 8,52 \text{ cm}^3$$

Ricordando che $M_{ed} = 0,912 \text{ kNm}$, la verifica è soddisfatta, in quanto il momento flettente sollecitante risulta essere inferiore a quello resistente.

$$M_{ed} < M_{Rd}$$

$$0,912 < 1,9069 \text{ kNm}$$

Verifiche allo SLE

Secondo la normativa vigente, il primo stato limite d'esercizio da verificare, è quello di deformazione e/o spostamento, al fine di evitare deformazioni e spostamenti che possano compromettere l'uso efficiente della costruzione e dei suoi contenuti, nonché il suo aspetto estetico.

Inizialmente, bisogna valutare il carico agente sulla trave in oggetto, fattorizzato secondo la Combinazione Rara, per cui:

$$Q = G_1 + G_2 + Q_{K1}$$

dove:

G_1 è il carico permanente strutturale;

G_2 è il carico permanente non strutturale;

Q_{K1} è il carico variabile primario.

Quindi:

$$Q = 1,978 + 5,88 = 7,858 \text{ kN/m}$$

Posto J_x : momento d'inerzia lungo l'asse x = $16,8 \text{ cm}^4 = 0,000000168 \text{ m}^4$

si calcola lo spostamento per soli carichi permanenti, δ_1 :

$$\delta_1 = \frac{5}{384} \cdot \frac{q \cdot l^4}{E \cdot J} = \frac{5}{384} \cdot \frac{1,978 \cdot 0,4^4}{210000000 \cdot 0,000000168} = 0,00001869 \text{ m}$$

e lo spostamento per soli carichi variabili, δ_2 :

$$\delta_2 = \frac{5}{384} \cdot \frac{q \cdot l^4}{E \cdot J} = \frac{5}{384} \cdot \frac{5,88 \cdot 0,4^4}{210000000 \cdot 0,000000168} = 0,0000556 \text{ m}$$

La prima verifica da condursi, prevede che lo il rapporto tra lo spostamento dato da soli carichi variabili e la lunghezza della trave sia inferiore a 1/300:

$$\frac{\delta_2}{L} = \frac{0,0000556}{0,4} = 0,000139 < \frac{1}{300} = 0,0033 \quad \checkmark$$

La seconda verifica prevede invece, che il rapporto tra lo spostamento totale e la luce della trave sia inferiore a 1/250:

$$\delta_{\text{TOT}} = \delta_1 + \delta_2 = 0,00001869 + 0,0000556 = 0,0000743 \text{ m}$$

$$\frac{\delta_{\text{tot}}}{L} = \frac{0,0000743}{0,4} = 0,000186 < \frac{1}{250} = 0,004 \quad \checkmark$$

6.2.5 Progettazione del parapetto in vetro

Il parapetto è formato da due elementi consecutivi, uguali tra loro, ciascuno di lunghezza pari a 2,20 m; per rapidità, si riporteranno di seguito i calcoli di solo uno di essi.

Per la realizzazione di ciascun parapetto sono state utilizzate due lastre di vetro aventi dimensioni 220 cm di lunghezza, 100 cm di altezza e spessore pari a 15 mm ciascuna, separate tra loro, da uno strato di polivinilbutirrale, più comunemente chiamato PVC, dello spessore di 2,28 mm.

Il sostegno del parapetto è garantito dalla presenza di un elemento metallico in acciaio, bullonato alla trave sottostante, nel quale il parapetto viene inserito.

Sulla superficie esterna della lastra è stata predisposta l'applicazione di un *coating antiriflesso*, cioè una deposizione di materiale metallico, atta a ridurre fortemente la riflessione della luce sulla superficie del vetro; per proteggere questo film, vi si applica un ulteriore coating idrofobo che, basato sulle nanotecnologie, aumenta in termini di durata, la protezione del vetro, facilitandone anche la pulizia.

È importante che il coating antiriflesso non venga a diretto contatto con lo strato intermedio di polivinilbutirrale, altrimenti si innescherebbe un'interazione chimica tra i due materiali.

La progettazione degli elementi in vetro è stata effettuata con l'ausilio della Normativa Europea prEN 13474-3: “General method of calculation and determination of strength of glass by testing”; lo scopo di tale normativa è quello di fornire i principi per la determinazione della resistenza del vetro, secondo un metodo generale di calcolo, e la definizione, mediante singoli test, della resistenza del materiale, qualora sia sottoposto a diversi carichi.

I principi coi quali si determina la resistenza del vetro, derivano dall'Eurocodice EN 1990: “Basis of structural design”, mentre le azioni sono determinate in conformità dell'Eurocodice EN 1991: “Basis of structural design – Actions on structures”.

In fase di progettazione, l'aspetto della sicurezza è un tema di competenza nazionale; per questo motivo, la Normativa Europea prevede che, in conformità con le norme applicate dall' Eurocodice, il fattore parziale del materiale γ_m venga valutato, a livello nazionale, nei seguenti modi:

- un primo valore per lo stato limite ultimo;
- un secondo valore per lo stato limite d'esercizio.

Questi valori si trovano in un allegato informativo della Normativa Europea; quando uno stato membro non ha determinato un preciso valore del fattore parziale del materiale γ_m , deve avvalersi del valore di tale coefficiente imposto dalla Normativa Europea, la quale consiglia i seguenti valori:

	Stato Limite Ultimo	Stato Limite d'Esercizio
Annealed glass	$\gamma_{M,A} = 1,8$	$\gamma_{M,A} = 1,0$
Surface prestress	$\gamma_{M,V} = 1,2$	$\gamma_{M,V} = 1,0$

dove:

- $\gamma_{M,A}$ è il fattore parziale del materiale per “annealed glass”, cioè vetro che è stato trattato durante la produzione per ridurre al minimo lo stress residuo contenuto in esso; esempi, ne sono il vetro float, il vetro armato, il vetro modellato o disegnato.
- $\gamma_{M,V}$ è il fattore parziale del materiale per “surface prestress”, cioè vetro sottoposto ad un trattamento termico o chimico di rinforzo, il quale induce una sollecitazione di compressione su tutta la superficie del vetro; esempi, ne sono il vetro di sicurezza temprato termicamente, temprato chimicamente e il vetro indurito.^[7]

Verifiche

Per quanto riguarda lo stato limite ultimo, deve essere soddisfatta la seguente verifica:

$$E_{d,SLU} \leq R_d$$

dove $E_{d,SLU}$, valore di progetto della sollecitazione calcolata, è funzione di $F_{d,SLU}$, valore di progetto agli Stati Limite Ultimi di una singola azione o una combinazione di esse; infine R_d è il valore di progetto della resistenza corrispondente, espressa come massima tensione ammissibile allo Stato Limite Ultimo $f_{g,d}$, tenuta in conto all'interno del fattore parziale del materiale per lo Stato Limite Ultimo, γ_m .

Per quanto riguarda lo Stato Limite d'Esercizio, deve essere soddisfatta la seguente verifica:

$$E_{SLS,d} \leq C_d$$

dove $E_{SLS,d}$, valore di progetto della sollecitazione o deformazione calcolata, e causata dall'azione in questione, è funzione di $F_{d,SLS}$, valore di progetto agli Stati Limite d'Esercizio di una singola azione o una combinazione di esse; infine C_d è il valore di progetto limite del criterio d'esercizio in questione, espresso come massima tensione limite allo Stato Limite d'Esercizio, $f_{g,d}$, o deformazione limite w_d , considerata all'interno del fattore parziale del materiale per lo Stato Limite d'Esercizio, γ_m .^[17]

Proprietà meccaniche e fisiche del vetro

Le proprietà meccaniche e fisiche che devono essere necessariamente considerate nel calcolo sono:

- il Modulo di Young (E);
- il Modulo di Poisson (μ);
- la densità del vetro (ρ)

ricavate dalle classiche norme di prodotto. I valori utilizzati per la seguente progettazione sono:

- $\rho = 2500 \text{ kg / m}^3$
- $E = 70000 \text{ MPa}$
- $\mu = 0,22$

Calcolo della tensione di progetto per vetro temprato

Per il calcolo della massima sollecitazione limite $f_{g,d}$ di un vetro temprato si utilizza la formula:

$$f_{g,d} = [(k_{\text{mod}} \cdot k_{\text{sp}} \cdot f_{g,k}) / \gamma_{M,A}] + \{ [k_v \cdot (f_{b,k} - f_{g,k})] / \gamma_{M,v} \}$$

dove:

- $f_{b,k}$ è il valore caratteristico della resistenza a flessione del vetro temprato;
- k_v è il fattore di rafforzamento del vetro temprato;
- k_{mod} è il fattore di durata del carico;
- k_{sp} è il fattore indice della tipologia di vetro.

Per la progettazione in questione si sono assunti i coefficienti riportati nella seguente tabella:

k_{sp}	Vetro float	1
k_{mod}	Azione delle persone	0,85
	Peso proprio	0,29
k_v	Indurimento orizzontale o altri processi che non richiedano l'ausilio di tenaglie o altri dispositivi di tenuta del vetro.	1

$F_{b,k}$	Tempra termica per il vetro float	120 MPa
-----------	-----------------------------------	---------

K_{mod} è un fattore che tien conto della durata d'applicazione del carico, la quale può essere corta, intermedia, permanente; perciò, il suo valore deve essere adeguato alla durata prevista per il singolo carico, o per il carico dominante, nel caso in cui essi siano combinati. Oscilla tra un minimo di 0,25 e un massimo di 1.^[17]

Calcolo della tensione e deformazione

Il carico di progetto deve essere utilizzato per calcolare il carico di rottura a trazione o flessione nel vetro, e la sua deformazione; il metodo appropriato deve tener conto della ripartizione del carico, della forma del vetro e delle condizioni di sostegno.

In generale, la tensione e la deformazione massime sono calcolate mediante la teoria lineare; nei casi in cui però, la deformazione indotta dalle azioni superi la metà dello spessore del vetro, la teoria lineare può sopravvalutare eccessivamente le sollecitazioni e quindi, la deformazione massima. In questo caso, la distribuzione degli sforzi e la deformazione massima possono essere calcolati secondo la teoria non lineare delle lastre. Per quanto riguarda il vetro stratificato, bisogna calcolare lo sforzo agente su ogni singolo strato.^[17]

Deformazione ammissibile

Non vi è alcun obbligo specifico di limitare la flessione del vetro sotto carico; l'importante è che la deformazione massima rientri nei valori di sicurezza.

Visto che il vetro non è eccessivamente flessibile, si possono adottare particolari accorgimenti quando esso è soggetto a carichi concentrati, in quanto ciò può causare pericolo per gli utenti dell'edificio. In assenza di specifiche esigenze, le deformazioni possono essere limitate a 1/65 della luce o 50 mm, a seconda di qual'è il valore più basso.^[17]

Confronto di tensione e deformazione

Nel calcolo degli Stati Limite, la tensione di progetto massima calcolata, non deve superare il valore della tensione limite:

$$\sigma_{\max} \leq f_{g,d}$$

Se è richiesta una limitazione alla flessione del vetro, la deformazione massima, calcolata per la condizione di carico più gravosa non deve superare la deformazione ammissibile:

$$W_{\max} \leq W_d$$

Se si considerano combinazioni di carico, bisogna effettuare il calcolo della tensione di progetto massima più volte, alternando di volta in volta il carico dominante, al fine di determinare la condizione più gravosa, la quale risulterà essere il valore più alto della tensione efficace, in relazione alla tensione ammissibile calcolata sulla base della durata del carico dominante, oppure il valore più alto della deformazione massima.^[17]

Calcolo delle tensioni di progetto

Stato Limite Ultimo

La tensione di progetto, denominata anche resistenza di calcolo, viene calcolata mediante la seguente formula:

$$f_{g,d} = [(k_{\text{mod}} \cdot k_{\text{sp}} \cdot f_{g,k}) / \gamma_{M,A}] + \{[k_v \cdot (f_{b,k} - f_{g,k})] / \gamma_{M,v}\}$$

in cui, i valori considerati per lo Stato Limite Ultimo sono riportati nella tabella seguente:

γ_{MA}	1,8
γ_{MV}	1,2
K_{SP}	1
K_V	1
K_{MOD} VARIABILE	0,85
K_{MOD} PESO PROPRIO	0,29
$F_{b,k}$	120 N/mm ²
$F_{g,k}$	45 N/mm ²

Coefficienti utilizzati per il calcolo della tensione di progetto per lastre vitree

Le tensioni calcolate risultano pari a:

$$f_{gd \text{ PESO PROPRIO}} = 69,75 \text{ N/mm}^2$$

$$f_{gd \text{ VARIABILE}} = 83,75 \text{ N/mm}^2$$

Stato Limite d'Esercizio

Sfruttando la stessa formula e gli stessi parametri, a meno di γ_{MA} e γ_{MV} , stavolta posti pari ad 1, si calcolano le tensioni di progetto per lo Stato Limite d'Esercizio:

$$f_{gd \text{ PESO PROPRIO}} = 88,05 \text{ N/mm}^2$$

$$f_{gd \text{ VARIABILE}} = 113,25 \text{ N/mm}^2$$

6.2.5.1 Predimensionamento

Il predimensionamento di questi elementi avviene sulla base della Normativa Europea prEN 13474-3, secondo la quale, per ogni combinazione di carico considerata, la tensione sollecitante deve essere inferiore alla resistenza di calcolo.

La valutazione delle azioni agenti sull'elemento è stata fatta sulla base dell'NTC 2008, secondo il quale, per ogni singola azione, è stata considerata la condizione più gravosa per l'elemento stesso; dopo aver definito le azioni, queste sono state fattorizzate secondo Normativa, per la progettazione allo Stato Limite Ultimo e allo Stato Limite d'Esercizio.

Avendo sfruttato la sovrapposizione di due lastre identiche, il progetto vede il calcolo di una sola di esse, avente spessore pari a 15 mm; inoltre, il progetto è stato ulteriormente semplificato, considerando la lastra come una trave incastrata all'estremità inferiore, avente le sue stesse dimensioni.

Il progetto verte sul soddisfacimento della seguente verifica:

$$\sigma_{ed} < \sigma_{lim}$$

per cui il valore della tensione sollecitante deve essere inferiore della tensione di progetto, calcolata precedentemente in funzione dello stato limite a cui si fa riferimento.

Di seguito si riporta il modulo statico della trave, utile per i successivi calcoli:

$$W = 2500 \text{ cm}^3 = 0,0025 \text{ m}^3$$

Le azioni agenti sull'elemento sono:

$$\text{Peso Proprio} = (2,2 \cdot 0,015) \cdot 25 = 0,825 \text{ kN/m}$$

Carico Variabile d'Esercizio = 2 kN/m applicato al bordo superiore

6.2.5.2 Progettazione e verifica allo SLU

La progettazione viene eseguita utilizzando la Combinazione Fondamentale proposta dal NTC 2008, secondo cui:

$$Q = \gamma_{G1} \cdot G1 + \gamma_{G2} \cdot G2 + \gamma_{Q1} \cdot Q_{K1} + \gamma_{Q2} \cdot \psi_{02} \cdot Q_{K2} + \dots$$

dove

- Ψ_{0j} = valori dei coefficienti di combinazione, sono riportanti all'interno della tabella 2.5.I della normativa NTC '08. Per la categoria D, $\Psi_{0j} = 0,7$.
- γ_{G1} , γ_{G2} , γ_{Qi} = coefficienti parziali per le azioni o per l'effetto delle azioni nelle verifiche SLU, sono riportati all'interno della tabella 2.6.I della normativa NTC '08, e valgono rispettivamente 1,3 per γ_{Gi} e 1,5 per γ_{Qi} .

Nella tabella seguente si riportano le azioni agenti sull'elemento, coi rispettivi coefficienti di fattorizzazione, per realizzare il progetto della lastra:

	Valore Nominale	Coeff. Fattorizzazione	Carico Fattorizzato
Peso Proprio	0,825 kN/m	1,3	1,07 kN/m
Variabile	2 kN/m	1,5	3 kN/m

Il carico variabile agisce su entrambe le lastre, quindi, progettandone solo una, verrà considerato solo metà carico.

Di conseguenza, si ottiene:

$$Q = 4,07 \text{ kN/m}$$

e le seguenti sollecitazioni:

$$M = 3,3 \text{ kNm} \quad T = 1,5 \text{ kN}$$

Nota il momento sollecitante, si calcola la tensione:

$$\sigma = \frac{M}{W} = \frac{3,3}{0,0025} = 1320 \frac{kN}{m^2} = 1,32 \frac{N}{mm^2} < 83,75 \frac{N}{mm^2}$$

6.2.5.3 Progetto e verifica allo Stato Limite d'Esercizio

La progettazione allo Stato Limite d'Esercizio avviene sulla base della Combinazione Rara, per cui:

$$Q = G_1 + G_2 + Q_{K1}$$

dove:

G1 è il carico permanente strutturale;

G2 è il carico permanente non strutturale;

Q_{K1} è il carico variabile primario.

Nella tabella seguente si riportano le azioni agenti sull'elemento per realizzare il progetto allo SLE:

	Valore Nominale	Coeff. Fattorizzazione	Carico Fattorizzato
Peso Proprio	0,825 kN/m	1	0,825 kN/m
Variabile	2 kN/m	1	2 kN/m

Dal momento in cui il carico variabile agisce su entrambe le lastre, progettandone solo una, se ne considera solo metà; di conseguenza, si ottiene un carico pari a:

$$Q = 2,825 \text{ kN/m}$$

e le seguenti sollecitazioni:

$$M = 2,2 \text{ kNm} \quad T = 1 \text{ kN}$$

Nota il momento sollecitante, si calcola la tensione:

$$\sigma = \frac{M}{W} = \frac{2,2}{0,0025} = 88 \frac{kN}{m^2} = 0,088 \frac{N}{mm^2} < 113,25 \frac{N}{mm^2}$$

Le lastre sono verificate per entrambi gli stati limite.

6.2.5.4 Verifica all'azione sismica

Secondo la Normativa NTC 2008, gli elementi non strutturali, quali i parapetti, devono essere verificati all'azione orizzontale di una forza rappresentativa dell'azione sismica secondo la seguente formula:

$$F_a = \frac{(S_a \cdot W_a)}{q_a}$$

dove:

F_a = forza sismica orizzontale agente al centro di massa dell'elemento non strutturale nella direzione più sfavorevole;

W_a = peso dell'elemento;

S_a = accelerazione massima, adimensionalizzata rispetto a quella di gravità, che l'elemento strutturale subisce durante il sisma e corrisponde allo stato limite in esame;

q_a = fattore di sicurezza dell'elemento.

In assenza di specifiche determinazioni, per q_a si possono assumere i valori riportati all'interno della normativa, mentre S_a può essere calcolato come:

$$S_a = \alpha \cdot S \cdot \left[\frac{3 \cdot \left(1 + \frac{Z}{H}\right)}{1 + \left(1 - \frac{T_a}{T_1}\right)^2} - 0,5 \right]$$

in cui:

α = rapporto tra l'accelerazione massima del terreno a_g su sottosuolo di tipo A da considerare nello stato limite in esame;

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.

Stato Limite Ultimo

Per effettuare il calcolo della forza orizzontale F_a , si utilizzano i seguenti valori riportati in tabella:

α	0,163
S	1,469
T_a	0,14 s
T_1	0,21 s
Z	3,73 m
H	6,80 m
q_a	1

dove T_a e T_1 sono stati calcolati come segue:

$$T = C_1 \cdot H^{3/4}$$

$$C_1 = 0,050$$

Si è considerata la categoria di sottosuolo C e la categoria topografica T1.

Risulta:

$$S_a = 0,8768$$

$$F_a = 1,739 \text{ kN}$$

Di conseguenza, per verificare l'elemento all'azione sismica, oltre ai carichi permanenti e variabili, si applica la forza orizzontale F_a lungo la direzione più sfavorevole, in questo caso lateralmente all'elemento, ottenendo le seguenti sollecitazioni:

$$M = 7,02 \text{ kNm} \text{ in corrispondenza dell'incastro}$$

$$T = 3,45 \text{ kN} \text{ in corrispondenza della sezione in cui viene applicata la forza } F_a.$$

Calcolando nuovamente la tensione sollecitante, si ottiene:

$$\sigma = \frac{M}{W} = \frac{7,02}{0,0025} = 2808 \frac{kN}{m^2} = 2,80 \frac{N}{mm^2} < 83,75 \frac{N}{mm^2}$$

Stato Limite d'Esercizio

Per effettuare il calcolo della forza orizzontale F_a , si utilizzano i seguenti valori riportati in tabella:

α	0,064
S	1
T_a	0,14 s
T_1	0,21 s
Z	3,73 m
H	6,80 m
q_a	1

Dove T_a e T_1 sono stati calcolati come segue:

$$T = C_1 \cdot H^{3/4}$$

dove: $C_1 = 0,050$

Risulta: $S_a = 0,234$

$$F_a = 0,464 \text{ kN}$$

Di conseguenza, per verificare l'elemento all'azione sismica, oltre ai carichi permanenti e variabili, si applica la forza orizzontale F_a lungo la direzione più sfavorevole, in questo caso lateralmente all'elemento, ottenendo le seguenti sollecitazioni:

$$M = 4,91 \text{ kNm in corrispondenza dell'incastro}$$

$$T = 2,3 \text{ kN in corrispondenza della sezione in cui viene applicata la forza } F_a.$$

Calcolando nuovamente la tensione sollecitante, si ottiene:

$$\sigma = \frac{M}{W} = \frac{4,91}{0,0025} = 1964 \frac{kN}{m^2} = 1,96 \frac{N}{mm^2} < 113,25 \frac{N}{mm^2}$$

Le verifiche sono soddisfatte per entrambi gli stati limite.

6.3 Analisi Statica Lineare

L'analisi statica lineare consiste nell'applicazione di forze statiche equivalenti alle forze di inerzia indotte dall'azione sismica e può essere effettuata per costruzioni che rispettino i seguenti requisiti specifici:

- $T_1 < 2,5T_C$
- $T_1 < T_D$
- $H < 40m$
- costruzione regolare in altezza
- massa uniformemente distribuita lungo l'altezza (le variazioni di massa da un orizzontamento all'altro non devono superare 25%).

Nel seguente progetto, si sfrutta l'analisi statica lineare per calcolare il fattore q_0 della struttura.

Regione: Emilia-Romagna

Provincia: Modena

Comune: Spilamberto (longitudine : 11,0205 – latitudine : 44,5352)

Categoria di sottosuolo: C

Categoria topografica: T1

Vita nominale: $V_N = \geq 50$ anni

Classe d'uso : II (costruzione con normali affollamenti) \rightarrow $C_U =$ coefficiente d'uso = 1

Periodo di riferimento: $V_R = V_N * C_U = 50$

	T_R	a_g	F_0	T_{C^*}
SLO	30	0,052g	2,486	0,255
SLD	50	0,064g	2,499	0,269
SLV	475	0,163g	2,367	0,301
SLC	975	0,207g	2,397	0,313

(valori dei coefficienti a_g , F_0 , T_c^* per i periodi di ritorno relativi ai diversi stati limite)

dove:

$a_g =$ accelerazione orizzontale massima del sito;

F_0 = valore massimo del fattore di amplificazione dello spettro in accelerazione orizzontale;

T_c^* = periodo di inizio del tratto a velocità costante dello spettro in accelerazione orizzontale.

$$T_R = V_R \text{ per SLD}$$

$$T_R = 9,5V_R \text{ per SLV}$$

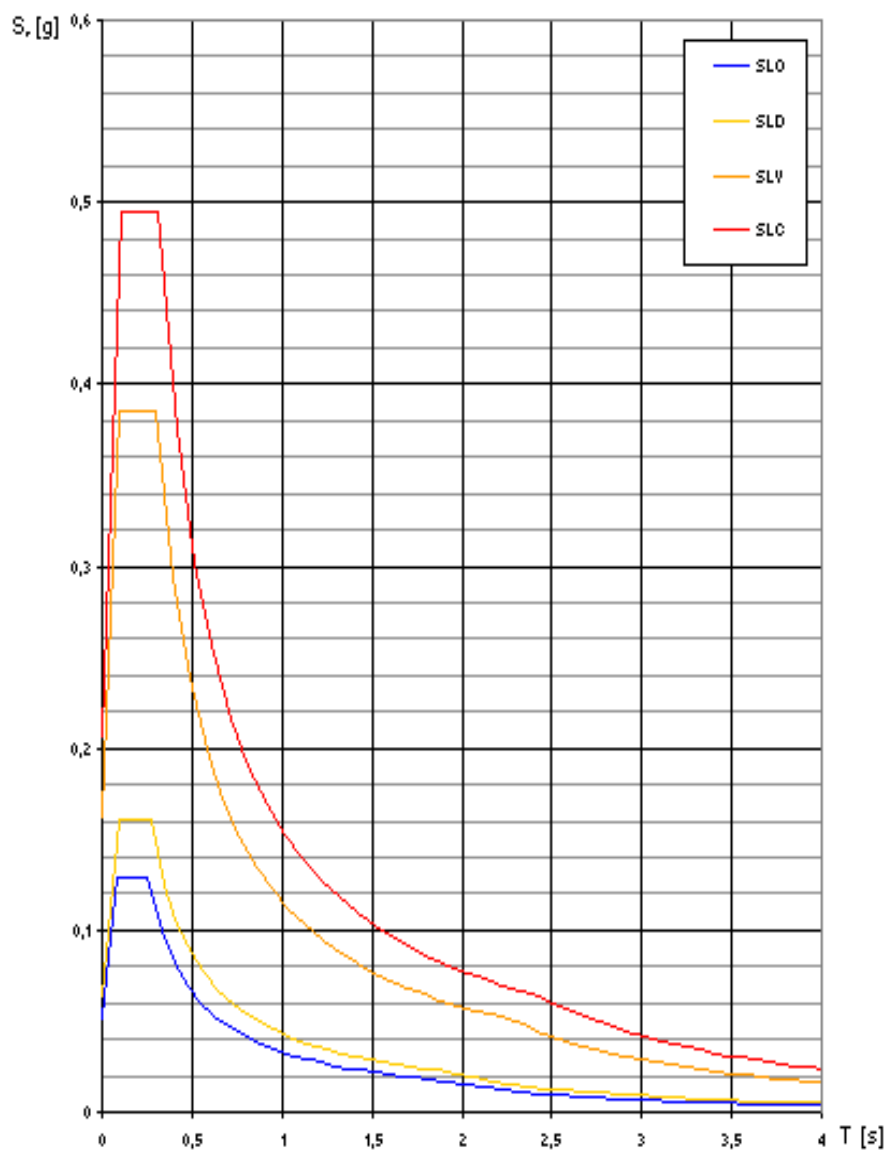


Figura 96: Spettri di risposta elastici per i diversi Stati Limite

Per l'opera in oggetto, gli stati limite da verificare sono:

SLD: stato limite di danno $\rightarrow P_{vr} = 63\%$

SLV: stato limite di salvaguardia della vita $\rightarrow P_{vr} = 10\%$

dove

P_{vr} = probabilità di superamento nel periodo di riferimento

Spettro di risposta di progetto $S_d(T1)$

T1 = periodo del modo di vibrare principale nella direzione in esame che può essere stimato, in assenza di calcoli più dettagliati, utilizzando la formula seguente:

$$T_1 = C_1 \cdot H^{3/4} = 0,21 \text{ s}$$

dove:

$C_1 = 0,05$ per costruzioni con struttura diversa dal telaio in acciaio o cemento armato

$H = 6,80$ m altezza della costruzione dal piano di fondazione

L'entità delle forze si ottiene dall'ordinata dello spettro di progetto corrispondente al periodo **T1** e la loro distribuzione sulla struttura segue la forma del modo di vibrare principale nella direzione in esame, valutata in modo approssimato.

La forza da applicare a ciascuna massa della costruzione è data dalla formula seguente:

$$F_i = \frac{F_h \cdot z_i \cdot W_i}{\sum_j z_j \cdot W_j}$$

dove:

$$F_h = \frac{S_d(T1) \cdot W \cdot \lambda}{g}$$

F_i = forza da applicare alla massa i

W_i e W_j = pesi, rispettivamente, della massa i e della massa j ;

z_i e z_j = quote, rispetto al piano di fondazione, delle masse i e j ;

$S_d(T_1)$ = ordinata dello spettro di risposta di progetto;

W = peso complessivo della costruzione;

$\lambda = 0,85$ se la costruzione ha almeno tre orizzontamenti e se $T_1 < 2 T_C$;

= 1,0 in tutti gli altri casi;

g = accelerazione di gravità.

Si riportano di seguito le espressioni con cui è definito lo spettro di risposta elastico della componente orizzontale:

$$S_d(T_1) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot F_0 \cdot \left[\frac{T}{T_B} + \frac{1}{\eta \cdot F_0} \left(1 - \frac{T}{T_B} \right) \right] \quad \text{per } 0 \leq T < T_B$$

$$S_d(T_1) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot F_0 \quad \text{per } T_B \leq T < T_C$$

$$S_d(T_1) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot F_0 \cdot \left(\frac{T_C}{T} \right) \quad \text{per } T_C \leq T < T_D$$

nelle quali:

T = periodo di vibrazione

S_d = accelerazione spettrale orizzontale

Per valutare in che rapporto T_1 si trovi con T_b , T_c , T_d , si procede al calcolo degli stessi, attraverso le formule di seguito riportate:

	SLV	SLD
$C_c = 1,05 \cdot (T_c^*)^{-0,33}$	1,561	1,620
$T_c = C_c \cdot T_c^*$	0,469	0,435
$T_b = T_c / 3$	0,156	0,145
$T_d = 4 \cdot (a_g / g) + 1,6$	2,251	1,857

dove:

Tc: periodo corrispondente all'inizio del tratto a velocità costante dello spettro

Tb: periodo corrispondente all'inizio del tratto dello spettro ad accelerazione costante

Td: periodo corrispondente all'inizio del tratto dello spettro a spostamento costante

Cc: dipende dalla categoria del sottosuolo (Spilamberto = categoria C)

Si evince che: $T_1 = 0,21 \text{ s} < T_c = 0,469 \text{ s}$

quindi si adotta la formula:

$$S_d(T_1) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot F_o \quad (T_b \leq T < T_c)$$

Di seguito si riportano i valori dei parametri utili per il calcolo sopra riportato.

$S_t = 1,0$ per categoria topografica T1 (coefficiente di amplificazione topografica)

$$S_s = 1,00 \leq 1,70 - 0,60 \cdot F_o \cdot (a_g/g) \leq 1,50 \rightarrow 1,469 \text{ (SLV)} \\ \rightarrow 1,604 \text{ (SLD)}$$

$$S = S_s \cdot S_t = 1,469 \cdot 1,0 = 1,469 \text{ (SLV)} \\ = 1,604 \cdot 1,0 = 1,604 \text{ (SLD)}$$

$$\frac{\alpha_u}{\alpha_1} = 1,8 \text{ per strutture in muratura ordinaria a due o più piani}$$

$$q_0 = 2,0 \times \frac{\alpha_u}{\alpha_1} = 2,0 \cdot 1,8 = 3,6$$

Kr = 0,8 per struttura non regolare in altezza

$$q = q_0 \cdot K_r = 3,6 \times 0,8 = 2,88$$

$$\eta = \frac{1}{q} = \frac{1}{q_0 \cdot K_r} = \frac{1}{2,88} = 0,347 \text{ (SLV)}$$

$$\eta = 1 \text{ (SLD)}$$

$$S_d(T_1) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot F_0 = 0,064 \times 1,604 \times 1 \times 2,499 = 0,257 \text{ SLD}$$

$$S_d(T_1) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot F_0 = 0,163 \times 1,469 \times 0,347 \times 2,367 = 0,197 \text{ SLV}$$

$$\begin{aligned} \text{Posto } 0,2 a_g &= 0,2 \cdot 0,064 = 0,0128 \text{ (SLD)} \\ &= 0,2 \cdot 0,163 = 0,0326 \text{ (SLV)} \end{aligned}$$

si evince che $S_d(T_1) > 0,2 a_g$ in entrambi i casi.

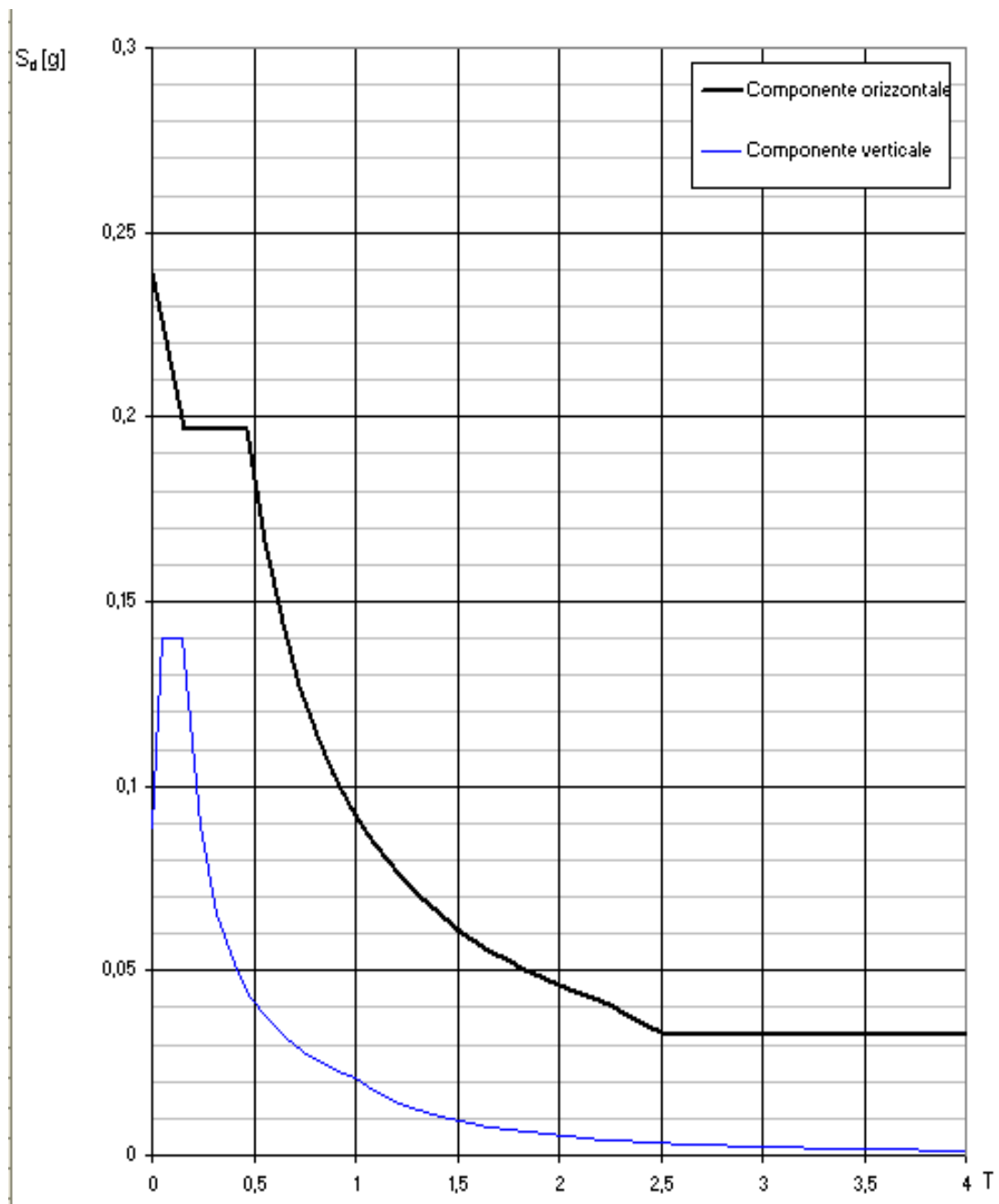


Figura 97: *Spettro di risposta per lo stato SLV*

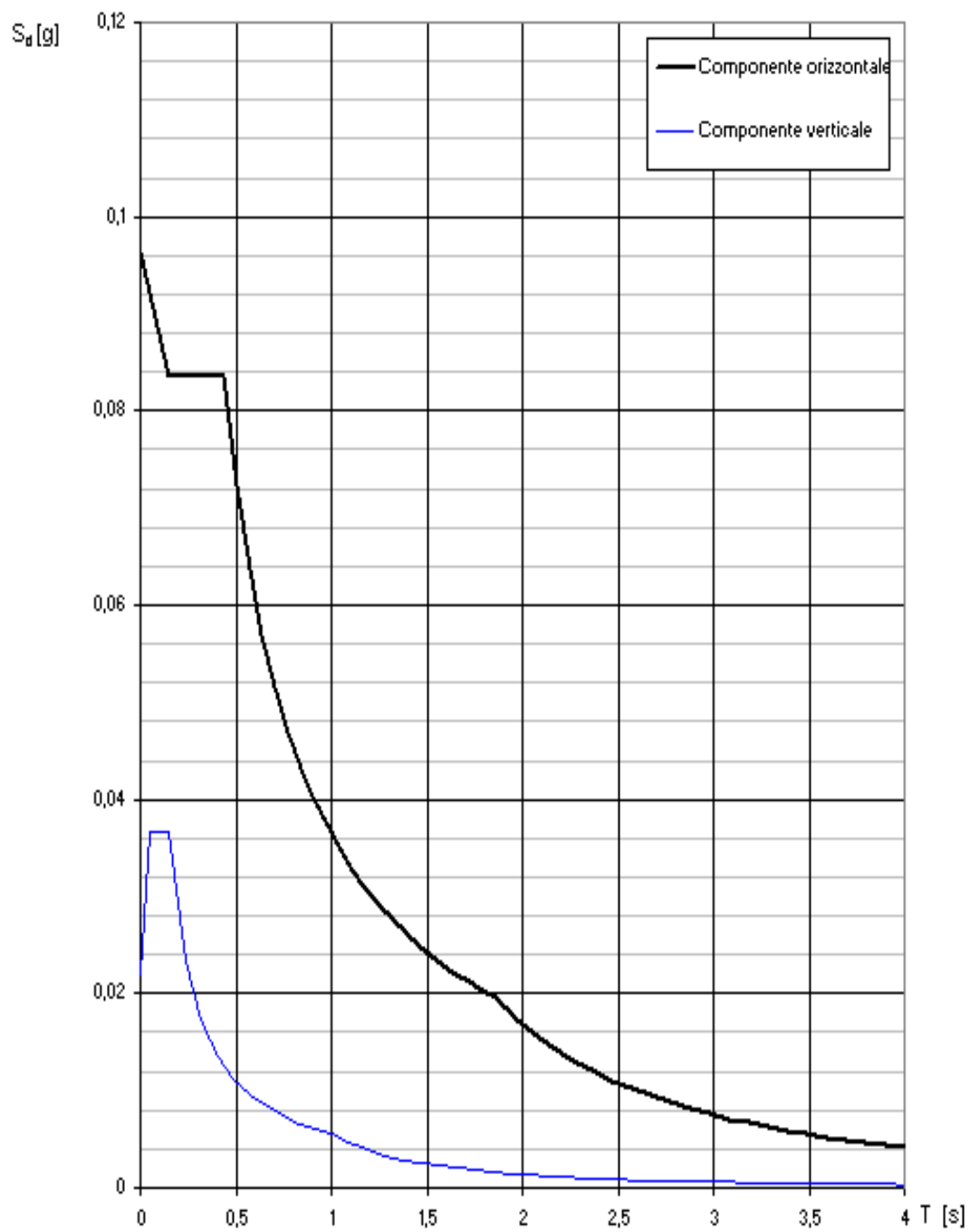


Figura 98: *Spettro di risposta per lo stato SLD*

Per quanto riguarda gli elementi strutturali in acciaio, con parti inflesse delle zone dissipative, nel rispetto della tabella 7.5.III della normativa NTC 2008, avendo calcolato

$q_0 = 3,6$, si progetterà in classe di duttilità B, con una classe di sezione trasversale richiesta pari a 1 o 2.

6.4 Collegamenti

Per la realizzazione del collegamento tra le travi in acciaio e la muratura esistente, in corrispondenza del livello a cui verranno inserite nella muratura, viene realizzato uno scasso all'interno di essa, di profondità pari a 20 cm circa; le travi, alloggiare al loro interno non necessitano di ulteriori piastre di testata da bullonare alla muratura, oltre quella su cui vengono saldate.

In corrispondenza dello scasso nella muratura, al di sotto della trave, vengono predisposte delle mensole metalliche, ambo gli appoggi, di larghezza pari a 20 cm e lunghezza pari a 25 cm, bullonate, sia alla muratura, grazie l'ausilio di un piatto, sia alla trave; queste mensole hanno lo scopo di garantire l'appoggio alle travi e facilitare le operazioni di posa in opera.

L'unione tra le travi in acciaio e i travetti lignei sovrapposti ortogonalmente ad esse viene garantito grazie alla presenza, in prossimità dell'appoggio, di grappe metalliche angolari di forma rettangolare, bullonate ad entrambe gli elementi; invece, il collegamento tra i travetti lignei e l'impalcato avviene mediante dei connettori in acciaio, di diametro inferiore a 16 mm, inseriti in corrispondenza della mezzeria della sezione trasversale del travetto stesso.

Nell'ottica di intervenire con miglioramenti strutturali necessari per adeguare il livello di protezione sismica della costruzione, potrebbe rendersi utile la realizzazione di ammorsamenti metallici tra la muratura e i travetti lignei, costituiti da un capochiave inserito all'interno della muratura stessa, collegato ai travetti, mediante dei “piatti” diagonali bullonati. Questa tipologia di intervento, assieme ad altri, quali iniezioni con resine, consolidamento dei giunti, placcaggi etc. rappresenta spesso l'unica soluzione possibile per edifici a carattere storico-artistico. (**Tav. Particolari costruttivi**)

Unioni bullonate

Le unioni bullonate hanno innumerevoli vantaggi, primo tra tutti, permettono di rispettare il criterio fondamentale della reversibilità, caratterizzante tutto l'intervento; dal punto di vista strutturale sono in grado di trasmettere sia sollecitazioni semplici che complesse, ed inoltre è possibile ridurre notevolmente i tempi di costruzione, in quanto facili da realizzare, non richiedendo uso di personale altamente specializzato.

In accordo con la normativa NTC 2008, le unioni realizzate con bulloni si dividono in “non precaricate” e “precaricate”, le quali, chiamate anche unioni ad attrito, permettono di sfruttare l'attrito tra le piastre a contatto per il trasferimento delle azioni.

Una scelta volta ad un'unione precaricata prevederebbe l'imposizione di elevati sforzi di serraggio, e quindi acciai con un elevato tenore di carbonio o termicamente trattati, perciò si preferisce scegliere un'unione non precaricata, cioè realizzata con bulloni normali, da scegliere tra quelli appartenenti alle classi 4.6, 4.8, 5.6, 5.8, 6.8.

Secondo quanto indicato dal paragrafo 4.2.8.1.1 della normativa sopra citata, per il calcolo della resistenza a taglio delle viti e dei bulloni, per il rifollamento delle piastre collegate, è necessario considerare un coefficiente di sicurezza “ γ_m ”:

$$\gamma_m = 1,25 \text{ per i bulloni}$$

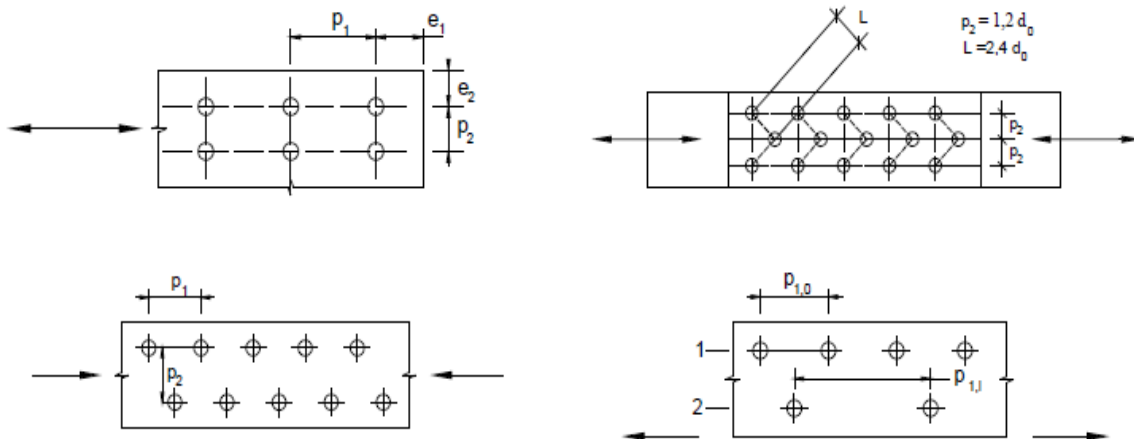
La normativa impone anche delle limitazioni geometriche sulla posizione dei fori per le unioni bullonate e/o chiodate, indicate nella tabella 4.2.XIII, di seguito riportata:

Tabella 4.2.XIII Posizione dei fori per unioni bullonate e chiodate.

Distanze e interassi (Fig. 4.2.3)	Minimo	Massimo		
		Unioni esposte a fenomeni corrosivi o ambientali	Unioni non esposte a fenomeni corrosivi o ambientali	Unioni di elementi in acciaio resistente alla corrosione (EN10025-5)
e_1	$1,2 d_0$	$4t+40\text{mm}$	-	$\max(8t;125\text{mm})$
e_2	$1,2 d_0$	$4t+40\text{mm}$	-	$\max(8t;125\text{mm})$
p_1	$2,2 d_0$	$\min(14t;200\text{mm})$	$\min(14t;200\text{mm})$	$\min(14t;175\text{mm})$
$p_{1,0}$	-	$\min(14t;200\text{mm})$	-	-
$p_{1,i}$	-	$\min(28t;400\text{mm})$	-	-
p_2	$2,4 d_0$	$\min(14t;200\text{mm})$	$\min(14t;200\text{mm})$	$\min(14t;175\text{mm})$

L'instabilità locale del piatto posto tra i bulloni/chiodi non deve essere considerata se $(p_1/t) < [9(235/f_y)^{0.5}]$; in caso contrario si assumerà una lunghezza di libera inflessione pari a $0.6 \cdot p_1$.
 t è lo spessore minimo degli elementi esterni collegati.

dove:



I fori devono avere un diametro pari a quello del bullone, maggiorato di 1 millimetro, per i bulloni fino a 20 mm di diametro, e di 1,5 millimetri per bulloni di diametro maggiore di 20 mm.

Di conseguenza, ipotizzato:

Bulloni M18, Classe 5.6

Accoppiamento con dado : 5

Spessore Piatto : 8 mm

Diametro fori : 19 mm

si calcolano le disposizioni geometriche minime da rispettare per il posizionamento dei bulloni sul piatto:

$$e1 = e2 = 1,2d_0 = 1,2 \cdot 19 = 22,8 \text{ mm}$$

$$p1 = 2,2d_0 = 2,2 \cdot 19 = 41,8 \text{ mm}$$

$$p2 = 2,4d_0 = 2,4 \cdot 19 = 45,6 \text{ mm}$$

Resistenza di calcolo a taglio per i bulloni

La resistenza di calcolo a taglio dei bulloni e dei chiodi $F_{V,Rd}$, per ogni piano di taglio che interessa il gambo dell'elemento di connessione, può essere assunta pari a:

$$F_{V,Rd} = \frac{0,6 \cdot f_{tb} \cdot A_{res}}{\gamma_{M2}} \quad \text{per i bulloni classe 4.6, 5.6, 8.8}$$

dove:

A_{res} : area resistente del bullone e si adotta quando il piano di taglio interessa la parte filettata dello stesso.

f_{tb} : resistenza a rottura del materiale impiegato per realizzare il bullone

Avendo scelto bulloni di classe 5.6, la resistenza a rottura del materiale è pari a:

$$f_{tb} = 500 \text{ N/mm}^2$$

mentre avendo scelto un diametro dei bulloni pari a 18 mm, l'area resistente è pari a:

$$A_{res} = 192 \text{ mm}^2$$

In questo modo è possibile calcolare la resistenza di calcolo a taglio dei bulloni:

$$F_{V,Rd} = \frac{0,6 \cdot f_{tb} \cdot A_{res}}{\gamma_{M2}} = \frac{0,6 \cdot 500 \cdot 192}{1,25} = 46080 \text{ N} = 46,08 \text{ kN}$$

Ricordando che il taglio sollecitante sulla trave, trasferito attraverso i bulloni, alla mensola, è pari a 42,61 kN, la verifica è soddisfatta, in quanto:

$$V_{ed} < V_{Rd}$$

Per valutare il numero di bulloni da inserire sulla piastra, è possibile imporre l'uguaglianza tra lo sforzo sollecitante e quello resistente,

$$F_{rd} = F_{Ed}$$

e posto :

$$\tau_{lm} = \frac{0,6 \cdot f_{yd}}{\gamma_M} = \frac{0,6 \cdot f_{tb}}{\gamma_M} = \frac{0,6 \cdot 500}{1,25} = 240 \frac{N}{mm^2}$$

dalla formula:

$$F_{Rd} = \tau_{lm} \cdot n_b \cdot n_s \cdot A_b$$

si può ricavare n_b , cioè il numero minimo di bulloni:

$$n_b = \frac{F_{Rd}}{\tau_{lm} \cdot n_s \cdot A_b} = \frac{41040}{240 \cdot 1 \cdot 192} = 0,89 \approx 1$$

Verifica a Rifollamento del piatto

Generalmente, la piastra arriva a rottura prima del bullone, per effetto delle forti tensioni locali che si sviluppano nell'intorno dello stesso, le quali possono portare addirittura a plasticizzazione la zona.

La resistenza di calcolo a rifollamento $F_{b,Rd}$ del piatto dell'unione, bullonata o chiodata, può essere assunta pari a:

$$F_{b,Rd} = \frac{k \cdot \alpha \cdot f_{tk} \cdot d \cdot t}{\gamma_{M2}}$$

dove:

d : diametro nominale del gambo del bullone

t : spessore della piastra collegata

f_{tk} : resistenza a rottura del materiale della piastra collegata

α : 1

k : min {2,8 $e_2/d_0 - 1,7$; 2,5} per bulloni di bordo nella direzione

perpendicolare al carico applicato

$k : \min \{ 1,4 p_2 / d_0 - 1,7 ; 2,5 \}$ per bulloni interni nella direzione perpendicolare al carico applicato

Nella nostra progettazione, posto:

$$d = 18 \text{ mm}$$

$$t = 8 \text{ mm}$$

$$f_{tk} = 360 \text{ N/mm}^2 \text{ per acciaio S235}$$

$$k = 2,8 e_2 / d_0 - 1,7 = 2,8 \cdot \left(\frac{25}{19} \right) - 1,7 = 1,98 \text{ bulloni di bordo}$$

$$k = 1,4 p_2 / d_0 - 1,7 = 1,4 \cdot \left(\frac{45}{19} \right) - 1,7 = 1,62 \text{ bulloni interni}$$

$$\alpha = 1$$

$$F_{b,Rd} = \frac{k \cdot \alpha \cdot f_{tk} \cdot d \cdot t}{\gamma_{M2}} = \frac{1,98 \cdot 1 \cdot 360 \cdot 18 \cdot 8}{1,25} = 82114,6 \text{ N} = 82,11 \text{ kN} \text{ bulloni di bordo}$$

$$F_{b,Rd} = \frac{k \cdot \alpha \cdot f_{tk} \cdot d \cdot t}{\gamma_{M2}} = \frac{1,62 \cdot 1 \cdot 360 \cdot 18 \cdot 8}{1,25} = 67184,64 \text{ N} = 67,18 \text{ kN} \text{ bulloni di bordo}$$

Ricordando che il taglio sollecitante sulla trave, trasferito attraverso i bulloni, alla mensola, e di conseguenza alla piastra, è pari a 42,61 kN, la verifica è soddisfatta, in quanto:

$$V_{ed} < F_{b,Rd}$$

La resistenza complessiva della singola unione a taglio è perciò data dal minimo valore tra $F_{v,Rd}$ e $F_{b,Rd}$, quindi in questo caso, da $F_{v,Rd} = 46,08 \text{ kN}$.

Resistenza di calcolo a trazione dei bulloni

La resistenza di calcolo degli elementi può essere assunta pari a:

$$F_{t,Rd} = \frac{0,9 \cdot f_{tb} \cdot A_{res}}{\gamma_{M2}} = \frac{0,9 \cdot 500 \cdot 192}{1,25} = 69120 \text{ N}$$

Verifica di Punzonamento della Piastra

Nel caso in cui l'unione bullonata sia soggetta a trazione, bisogna verificare anche la piastra a punzonamento, per cui la resistenza a punzonamento del piatto collegato è pari a:

$$B_{p,Rd} = \frac{0,6 \cdot \pi \cdot d_m \cdot t_p \cdot f_{tk}}{\gamma_{M2}} = \frac{0,6 \cdot \pi \cdot 5 \cdot 8 \cdot 360}{1,25} = 21714,69 \text{ N}$$

La resistenza complessiva della singola unione a trazione è perciò data dal minimo valore tra $B_{p,Rd}$ e $F_{t,Rd}$, quindi in questo caso, da $B_{p,Rd} = 21714,69 \text{ N} = 21,7 \text{ kN}$.

Verifica Sismica

Collegamenti in zone dissipative

In accordo con il capitolo 7.5.3.3 della normativa italiana NTC 2008, i collegamenti in zone dissipative devono avere sufficiente sovrarresistenza per consentire la plasticizzazione delle parti collegate. In caso di collegamenti bullonati, si deve verificare il seguente requisito:

$$R_{j,d} \geq \gamma_{Rd} \cdot 1,1 \cdot R_{pl,Rd}$$

dove:

$R_{j,d}$ = resistenza di progetto del collegamento;

$R_{pl,Rd}$ = resistenza plastica di progetto della membratura collegata;

$\gamma_{Rd} = 1,20$ per acciaio S235

Posto:

$$R_{j,d} = \frac{f_{yd}}{\gamma_M} = \frac{500}{1,25} = 400 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$R_{pl,Rd} = \frac{f_{yk}}{\gamma_M} = \frac{235}{1,05} = 223,81 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

si ottiene:

$$400 \geq 1,2 \cdot 1,1 \cdot 223,81 = 295,43 \text{ N/mm}^2$$

La verifica è soddisfatta.

6.5 Protezione degli elementi in acciaio

Protezione dal fuoco

La protezione al fuoco degli elementi strutturali viene generalmente validata attraverso sistemi di protezione passiva, quali intonaci spruzzati o lastre di cartongesso, o alternativamente, attraverso sistemi di protezione reattiva, quali le pitture intumescenti.

Nel progetto, tutti gli elementi in acciaio, quali travi, piastre, mensole e bulloni, costituenti la parte strutturale dell'intervento da realizzarsi nella Sala d'Arme, verranno trattati mediante pitture intumescenti, generalmente a base di resine sintetiche, le quali attorno alla temperatura di 200°C, a seguito di una reazione chimica, sviluppano una schiuma compatta e termoisolante che protegge gli elementi dall'attacco del fuoco.

Per quanto riguarda gli elementi strutturali in acciaio, le pitture consentono di garantire la resistenza meccanica per un certo tempo richiesto, indicato in minuti, in questo caso pari ad almeno R 60.

A differenza dei sistemi di protezione passiva, quali intonaci spruzzati e lastre di cartongesso, le pitture intumescenti possono essere dimensionate e certificate esclusivamente mediante la procedura di valutazione di tipo sperimentale, in accordo con il D.M. 16 febbraio 2007 e la normativa europea ENV 13381-8 : “Metodi di verifica del contributo alla resistenza al fuoco di elementi strutturali : Protettivi reattivi applicati ad elementi in acciaio.” e la UNI EN 1993-1-2: 2005: “Eurocodice 3: Progettazione delle strutture di acciaio: Progettazione strutturale contro l'incendio”.

Protezione dalla corrosione

Tutti gli elementi in acciaio, strutturali e non, presenti all'interno della stanza, devono essere protetti dalla corrosione, anche per la forte umidità connessa alla risalita capillare presente all'interno dell'ambiente, causa primaria dei sali solubili, e in particolar modo dei solfati di calcio, presenti in abbondanza all'interno delle murature perimetrali, con cui i piatti bullonati delle travi in acciaio vengono direttamente a contatto.

Infatti, sali disciolti come cloruri e solfati, presenti in abbondanza nelle partizioni della stanza, possono facilitare la corrosione dell'acciaio.

La verniciatura a base di resine è una tecnica molto diffusa per la protezione degli elementi metallici, in quanto permette di realizzare una barriera fisica di separazione tra il metallo e l'ambiente circostante; purtroppo bisogna porre molta attenzione ai difetti del film, che possono già preesistere o si possono formare durante la posa in opera.

Nel presente progetto, oltre ad applicare sugli elementi strutturali la vernice intumescente, la quale svolge anche funzione di protezione dell'acciaio dalla corrosione, verranno predisposti dei fogli di materiale impermeabile dello spessore di qualche mm, in corrispondenza dei collegamenti travi-mensole e mensole-muratura. Inoltre, sempre per la protezione delle connessioni dalla corrosione, i fori creati nella muratura per l'alloggiamento dei bulloni, a seguito del loro posizionamento, saranno sigillati con malta a ritiro compensato additivata con resina epossidica per evitare il danneggiamento degli stessi da parte dei solfati presenti in elevate quantità.

6.6 Protezione degli elementi lignei

Gli elementi lignei costituenti il soppalco, quali i travetti e il tavolato su di essi appoggiato, dovranno anch'essi essere trattati in maniera adeguata per la protezione al fuoco. Infatti, il legno carbonizza alla fiamma superficialmente, quindi, la sezione resistente si riduce in modo progressivo e il danno alla struttura è valutabile in funzione del tempo di esposizione al fuoco; vengono perciò previsti degli interventi di ignifugazione o protezione. Per il seguente progetto, si può adottare l'ignifugazione, cioè l'impregnazione degli elementi lignei con sostanze chimiche che impediscano lo sviluppo delle fiamme: in questo modo, il materiale si consumerà più lentamente senza emettere fiamme o calore.

Conclusioni

Rocca Rangoni è un'antica residenza nobiliare situata nel comune di Spilamberto (MO), oggi di proprietà comunale, soggetta ad evidenti problemi di degrado meccanico e fisico-ambientale; questo progetto ha trattato principalmente l'analisi e il restauro dei materiali della Sala d'Arme situata nel fronte nord-est della Rocca stessa.

Dopo aver eseguito un attento rilievo del degrado e diversi campionamenti dei materiali più rilevanti, quali laterizi, intonaci decorati e non, ed efflorescenze saline piuttosto evidenti sulle superfici della stanza, si sono condotte più analisi, volte a capire la conformazione e l'origine degli stessi. Tra gli interessanti risultati ottenuti, si può ricordare l'elevato tenore di nitrati presente all'interno dei laterizi della pavimentazione, a conferma dell'antica destinazione d'uso riservata alla parte inferiore della stanza, in corrispondenza del piano terra, quale locale per il ricovero degli animali, concausa dello sviluppo delle efflorescenze saline ad aspetto lanuginoso, trovate anche su tutta la superficie del pavimento. Sempre in merito ai laterizi della pavimentazione, si ricorda il contenuto di carbonato di calcio presente al loro interno, pari al 12%, risultato che evidenzia l'utilizzo di mattoni poco cotti, cioè materiale di scarse qualità, ma di facile approvvigionamento. Inoltre, sempre dalle analisi, è emerso che l'intonaco della parte inferiore della stanza, a diretto contatto con la muratura, se non l'originale, quanto meno il più antico, è costituito quasi totalmente da gesso: generalmente l'utilizzo di questo materiale non veniva riservato ad edifici nobili e di alto pregio artistico come Rocca Rangoni, però da un lato, il territorio emiliano è caratterizzato da molte cave di gesso di ottima qualità, fattore che garantiva l'approvvigionamento continuo del materiale, dall'altro invece, trattandosi di lavori di costruzione enormi, si cercava in qualche modo di arginare i costi, risparmiando per esempio sulle finiture. Da riportare anche l'elevato tasso di umidità presente nella stanza, come evidenziano le efflorescenze saline e il distacco degli intonaci dai supporti, il quale va risanato nell'ottica di un futuro utilizzo pubblico della stanza, per evitare il peggioramento delle condizioni di salubrità dell'ambiente stesso.

A seguito delle indagini, si è svolta la microprogettazione dell'intervento di restauro dei materiali, volto innanzitutto a rimuovere la fonte principale dell'umidità, cioè la risalita capillare dal terreno, mediante l'esecuzione di un taglio chimico realizzato sulle murature

all'altezza di 15 cm dal suolo, e successivamente, mettere in opera alcuni interventi essenziali, quali la rimozione dei rattoppi cementizi di recente apposizione, degli strati sovrapposti d'intonaco di basso pregio artistico e l'eliminazione delle efflorescenze saline mediante impacchi anti-sale. Per quanto riguarda la pavimentazione, si rende necessario, sempre nell'ottica di ridurre l'umidità, la realizzazione di un vespaio costituito da materiale grossolano al di sotto della pavimentazione in laterizio, la quale, a seguito del lavaggio e conseguente asciugatura, verrà riposta sopra ad uno strato di regolarizzazione, ripristinando i giunti di malta mediante la creazione di un impasto simile all'originale, cioè additivato con cocchiopesto.

All'interno di questo progetto, si è condotto anche uno studio architettonico sulla possibile futura fruizione dell'ambiente da parte dell'utenza del Museo dell'Aceto Balsamico che verrà insediato all'interno di Rocca Rangoni; sulla base dello studio di fattibilità redatto dall'Università di Ferrara, nel quale la Sala d'Arme viene indicata come accesso principale al museo, essendo uno dei pochi ambienti a godere della totale fruizione dalla corte interna, si è sviluppata una proposta progettuale, nella quale si prevede la realizzazione di un soppalco in legno e acciaio allo stesso livello cui si trovava quello antico, andato perso in un crollo, raggiungibile mediante una scala ad L in acciaio autoportante. Il soppalco verrà destinato ad ospitare una parte del bookshop allestito principalmente nel vano attiguo alla Sala d'Arme, raggiungibile solo mediante l'attraversamento della stessa. A causa delle dimensioni limitate della stanza e a seguito di diverse ipotesi progettuali sul collocamento della rampa di scale, queste sono state poste in adiacenza alla parete "A", posizione che vede la chiusura della seconda apertura di un metro mediante l'inserimento di una facciata in vetro strutturale.

La scelta progettuale è ricaduta su di un soppalco, in quanto non avendo a disposizione fonti storiche in merito alle caratteristiche materiche e strutturali dell'antico solaio interpiano perso nel crollo, si evitano da un lato, false imitazioni dello stesso, le quali porterebbero a commettere errori nella ricostruzione, dall'altro invece, si vuole mantenere, almeno in parte, la caratteristica odierna di doppio volume caratterizzato da un solaio ligneo a cassettoni con decorazioni su carta risalenti al quattrocento.

Bibliografia

- [1] “La Rocca Rangoni di Spilamberto: costruzione e trasformazioni, lo studio dell’ala est”. Tesi di Laurea di Piccinini Barbara, relatore: Carolina Di Biase, correlatore: Francesca Albani, Anno Accademico 2006-2007, Politecnico di Milano, Facoltà di Architettura e Società

- [2] Vasina A., Comuni e signorie in Emilia Romagna: dal secolo XI al secolo XV, UTET, Torino 1986.

- [3] “I Rangoni e il territorio di Spilamberto. Dall’ Antico Regime all’ Età Contemporanea”. Tesi di Laurea di Azzolini Giulio e Tinti Francesca, relatore: Carolina Di Biase, Anno Accademico 2007-2008, Politecnico di Milano, Facoltà di Architettura e Società.

- [4] “ Libro delle Stanze”. Rocca Rangoni, Spilamberto. Edito dal Politecnico di Milano

- [5] “ Relazione n° 03/06, Termografia e Microclima”. Autore: Laboratorio di Analisi e Diagnostica del Costruito, Dipartimento di Architettura e Pianificazione, Politecnico di Milano. Milano, 15-11-2006.

- [6] “Rocca Rangoni (MO), soffitto a cassettoni: un approccio metodologico ad un'ipotesi di restauro.” Relazione tecnica. Autori: Eleonora Del Federico, Francesca De Vita, Daniela Pittaluga, Marco Tansini Petrali, Dipartimento di Scienze per l'Architettura, Facoltà di Architettura di Genova.

- [7] Fonte fotografica: Fotografie storiche, catalogate come pos 9970, pos 9973, pos 9975. Fondo Tonini, Biblioteca Poletti di Modena

- [8] <http://www.fondazionevignola.it/attivita/attivitaeditoriale/index.htm>
Sito della Fondazione di Vignola

[9]

http://www.italiasenzabenzina.eu/italia_senza_benzina/audioguide/punti_di_interesse_arte_cultura_ambiente_e_natura/la_rocca_rangoni_di_spilamberto.htm Sito di itinerari del territorio modenese, in cui vengono raccontati punti di interesse storico-culturale ed enogastronomico

[10] <http://www.lacarbonarablog.it/?p=16848> Sito di eventi locali del territorio modenese

[11]

http://www.comune.spilamberto.mo.it/un_paese_da_scoprire/itinerari_storici_e_artistici/rocca_rangoni/index.htm Sito del Comune di Spilamberto, sezione “Itinerari storici ed artistici”

[12] <http://www.treccani.it/enciclopedia/solfati/> Sito web dell'enciclopedia Treccani

[13] “Diagnostica delle strutture lignee: Schede solai Piano Terra”. Relazione tecnica. Autore: Dr. Arch. Davide Del Curto, Politecnico di Milano, Dipartimento di Architettura e Pianificazione, Laboratorio di Analisi e Diagnostica del Costruito, in data 29.06.2007.

[14] “Storia di Spilamberto”. Autore: Silvio Cevolani, Anno di pubblicazione:2010, Spilamberto (MO), Editore: Istituto Enciclopedico Setteceni

[15] “Oltre la Rocca”. Autore: Stefano Magagnoli, Anno di pubblicazione: 1998, Editore: Centro di documentazione storica “Francesco Borghi”

[16] “Spilamberto e la sua Rocca”. Autori: Paola Corni, Vincenzo Vandelli, Anno di pubblicazione: 2008, Editore: Silvana

[17] prEN 13474, *Glass in Building – Design of glass panes – Part 3: General basis of design, design of glass by calculation for non-fenestration use and design of glass by testing for any use*, CEN TC/129, 2009.

Ringraziamenti

Con stima e riconoscenza desidero in primo luogo ringraziare il mio relatore, la Professoressa Ing. Elisa Franzoni per la professionalità, i consigli, la pazienza e la disponibilità coi quali mi ha aiutata nella realizzazione e stesura di questo lavoro; inoltre ringrazio i miei correlatori, l'Ingegnere Gabriela Graziani per l'aiuto tecnico nel svolgere le attività di laboratorio, e l'Architetto Alessandro Mordini, capo del settore Lavori Pubblici del Comune di Spilamberto, per la disponibilità e attenzione nel seguire l'intero progetto.

Un ringraziamento speciale va alla mia famiglia, ad Enrico e alle amiche di sempre, per l'affetto e la vicinanza con cui mi hanno supportato e spronato nel raggiungere i miei obiettivi.

Martina Ferrari