

PONTI GIANLUCA
architetto

Studio :

Via Emilia Est n° 9/c, 42048 Rubiera (RE)
tel. - fax 0522-627866 cell. 335-5248688
email: gpontiarchitetto@gmail.com
www.gianlucaPonti.it

ADORNI NAZARENA
ingegnere

Studio :

Via Gianna Giglioli Valle 10, 42124 Reggio Emilia
email: nazarena.adorni.ingegnere@gmail.com

Committente :

IL FORTE srl
C.F. 15154341000

Progetto :

SCIA DI VARIANTE
RESTAURO E RISANAMENTO CONSERVATIVO
PER OPERE INTERNE E
STRUTTURE ESTERNE DEHOOR
IN FABBRICATO CIVILE CON FUNZIONE MISTA
in Piazza XXIV Maggio civ. 15, 42048 Rubiera (RE).

Oggetto:

RINFORZI FRP
ILLUSTRAZIONE SINTETICA DEGLI
ELEMENTI ESSENZIALI DEL PROGETTO
RELAZIONE DI CALCOLO
RELAZIONE SUI MATERIALI
VERIFICA DI SICUREZZA

Rapporto di SCALA :

Data :

10/03/2021

Aggiornamento :

RS.2



INDICE

1	ILLUSTRAZIONE SINTETICA DEGLI ELEMENTI ESSENZIALI DEL PROGETTO STRUTTURALE	2
a)	Descrizione del contesto edilizio	2
b)	Descrizione generale della struttura	10
c)	Normativa tecnica e riferimenti tecnici utilizzati	10
d)	Definizione dei parametri di progetto.....	10
e)	Descrizione dei materiali	12
f)	Principali combinazioni delle azioni	12
g)	Metodo di analisi seguito.....	12
h)	Criteri di verifica agli Stati Limite	12
i)	Configurazioni deformate e caratteristiche di sollecitazione	13
j)	Caratteristiche e affidabilità del codice di calcolo	13
k)	Strutture geotecniche o di fondazione	13
l)	Indicazione della categoria di intervento previsto	13
m)	Descrizione della struttura esistente nel suo insieme	13
n)	Risultati significativi.....	13
2	ELABORATI GRAFICI ESECUTIVI E PARTICOLARI COSTRUTTIVI.....	14
3	PIANO DI MANUTENZIONE DELLA PARTE STRUTTURALE DELL'OPERA	14
4	RELAZIONI SPECIALISTICHE SUI RISULTATI SPERIMENTALI	14
4.1	Relazione geologica sulle indagini, caratterizzazione e modellazione geologica del sito	14
4.2	Relazione geotecnica sulle indagini, caratterizzazione e modellazione del volume significativo del terreno	14
4.3	Relazione sulla modellazione sismica concernente la "pericolosità sismica di base" del sito di costruzione	14
5	ELABORATI GRAFICI DEL RILIEVO GEOMETRICO-STRUTTURALE	14
6	VALUTAZIONE DELLA SICUREZZA	14

1 ILLUSTRAZIONE SINTETICA DEGLI ELEMENTI ESSENZIALI DEL PROGETTO STRUTTURALE

a) Descrizione del contesto edilizio

Oggetto della presente pratica è l'intervento di Restauro e risanamento conservativo riguardante le opere interne (con adeguamenti impiantistici e modifica lay-out attuale ristorante) e modifica/ installazione nuove strutture dehoor sulle terrazze del fabbricato di porzione del "Forte" oggetto di richiesta.

Attualmente l'immobile rappresenta la "testata" del complesso denominato "Il Forte" nella parte sud-est.

Al fabbricato si accede tramite un ingresso principale posto ad est su Piazza XXIV Maggio, al piano rialzato sono presenti un atrio di ingresso con alcuni locali adibiti a cantina vini, ripostiglio e studio in cui risiede anche il vano tecnologico impianto di riscaldamento.

Salendo per lo scalone principale si giunge al piano primo dove attualmente è presente il ristorante così distribuito : ingresso e corridoio di distribuzione dove ci sono una sala bar e cassa, quattro sale ristorante, un locale guardaroba, un antibagno e bagno diviso uomo e donna e cucina; sul lato sud ed est le sale si affacciano su un ampio terrazzo aperto in cui sono attualmente presenti tavoli per il pranzo e la cena, su tale terrazzo i tavoli sono protetti dalla luce del sole ed eventualmente intemperie da tende chiare che fissate al muro verticale del locale scendono verso l'esterno appoggiate a delle strutture metalliche leggere (legittimate con pratica AUTORIZZAZIONE prot n 15133 del 08.09.2000) allegata alla presente documentazione.

Dall'attuale piano secondo attraverso un collegamento verticale interno posizionato vicino all'attuale cucina, dove è presente anche un piccolo bagno di servizio, si arriva al piano terzo dove troviamo una piccola dispensa con ripostiglio, un'ampia soffitta di forma regolare con copertura a quattro acque con tetto in legno con travi principali in legno, travetti, tabelle, ondulina sottocoppo e coppi.

Allo stesso piano tramite un disimpegno si accede ad un'altra parte di sottotetto che si sviluppa a falda unica verso via Emilia Est.

Proseguendo attraverso la scala si giunge ad un mezzanino della torretta e successivamente sulla terrazza di quest'ultima.

Le pavimentazioni risultano essere in cotto antico nelle sale ristorante, nella zona disimpegno in marmette di graniglia incongrua e di recente fattura così come lo scalone principale. Gli attuali bagni hanno pavimenti e rivestimenti ceramici. I soffitti risultano essere a volta ribassata e con pareti verticali tinteggiate con elementi decorativi pittorici.

Il progetto in generale interviene sotto due aspetti principali:

- uno che prende in esame la riqualificazione distributiva, funzionale ed impiantistica del locale adibito a ristorante senza modificare la tipologia distributiva originaria a parte alcune variazioni minori imposte anche dagli Enti UsI per il corretto funzionamento e utilizzazione di quest'ultimo nel rispetto delle norme igienico-sanitarie;
- l'altro che prende in esame il dehoor esterno sulle terrazze del ristorante.

Progetto spazi interni

Per quanto riguarda gli spazi interni la seguente proposta progettuale prevede leggere modifiche distributive soprattutto riguardanti la zona cucina che verrà riprogettata con standard qualitativamente molto elevati che cerca di risolvere alcuni "suggerimenti" dell'Ufficio Usi con cui è stato fatto un confronto preventivo informale che si configura con le seguenti modifiche di seguito elencate.

A) Al **piano terra/rialzato**, al posto dell'attuale studio e zona dove è presente una caldaia, verranno ricavati due nuovi bagni separati e relativo antibagno; sarà alzata la quota di una porzione dell'attuale ingresso per uniformare i vari gradini esistenti e per rendere più fruibili i nuovi locali; verrà poi recuperato l'attuale locale destinato a cantina che sarà utilizzato per il deposito e degustazione dei vini; sarà demolita e rifatta la pavimentazione dell'atrio di ingresso e dei pianerottoli dello scalone principale con materiale tipo pietra o marmo e/o simile.

B) Al **piano secondo** si accede ai locali adibiti a spazio per il pubblico, in una maniera poco consona al "palazzo" in quanto ci si scontra con una pavimentazione a "marmittoni" tipici degli anni 50 – 60 di colore chiaro che "accoglie" nella maniera sbagliata il cliente mettendolo di fronte ad una chiara ed evidente contraddizione progettuale che continua anche nella lettura dei cromatismi delle suddette pareti.

Le sale esistenti oggi, fortunatamente, risultano caratterizzate principalmente da soffitti decorati ed arcati (di ottimo stampo e cromatismo) e da una serie di finiture correlate, a volte, di discutibile gusto. Si darà risalto ai decori dei soffitti, cercando di "spegnere" un po' la forza delle pareti andando inoltre ad uniformare anche la pavimentazione che si presenta oggi, con una parte storica (cotto eseguito a mano) che sarà mantenuta, ed una parte con marmette di foggia recente e parte con ceramica, che invece verranno sostituire con materiale analogo al primo.

L'attuale cucina verrà smantellata e rifatta completamente nuova, sarà adeguata ed ampliata demolendo gli attuali servizi igienici, l'attuale antibagno sarà destinato a corridoio di collegamento (come era originariamente) e attraverso la demolizione della tramezza verrà prolungato per annessere una porzione dell'immobile adiacente a destinazione abitazione costituito da un bagno con dimensioni e caratteristiche per portatori di handicap al quale si accede, senza gradini e senza la presenza di barriere architettoniche ed un locale stenditoio che sarà adibito ad office a servizio della cucina dove vengono raccolti i piatti sporchi, attraverso poi una nuova tramezza di tamponamento verrà separato l'attuale ristorante dall'appartamento attiguo.

A tale piano saranno mantenute le pavimentazioni in cotto storiche presenti nelle varie sale da pranzo mentre sarà demolita e la parte del corridoio distributivo che attualmente risulta essere in marmette di graniglia abbastanza recenti ed incongrue con il resto e sostituita con nuova in materiale più idoneo al contesto, questo anche per permettere l'adeguamento dell'impianto idrico, riscaldamento/condizionamento ormai vetusto con un nuovo a pompa di calore lasciando comunque intatte le sale esistenti.

Tutti locali verranno pavimentati con un cotto di uguale formato e di uguale fattezze rispetto a quello esistente a differenza dei locali tecnici (cucina) che saranno caratterizzati da una pavimentazione di facile pulizia e quindi di foggia moderna (gres porcellanato). (come anche da prescrizioni / indicazioni AUSL).

Anche l'attuale pavimentazione del terrazzo esterno verrà demolita per consentire l'impermeabilizzazione del massetto sottostante e posata nuovo in cotto o simile all'esistente. Saranno fatti ritocchi e velature dei soffitti e pareti tinteggiati nel rispetto delle cromie originarie.

C) Al **piano terzo** verranno ricavati un nuovo bagno e spogliatoio con armadietti a servizio dei dipendenti (come richiesto dall'Usi); in tali locali a destinazione soffitta verranno realizzate delle nuove pareti in cartongesso dove verranno posizionati le varie celle salumi, formaggi, cella ortofrutta, magazzino freddo e secco a servizio del ristorante.

La copertura soprastante esistente in travi principali in legno e travetti e tabelle sarà oggetto di verifica con ripassatura del manto di copertura e verifica dell'ondulina sottocoppo per evitare eventuali infiltrazioni. Verranno altresì ripresi gli attuali tinteggi esterni delle facciate al piano secondo e terzo mantenendo comunque le attuali cromie previo prova campionature da concordarsi con L'ufficio Tecnico Comunale.

Progetto spazi esterni

Attualmente le terrazze che si sviluppano sul lato est e sud sono utilizzate con alcuni tavoli per pranzare e cenare, questo uso verrà mantenuto e si vuole proporre la sostituzione delle tende chiare esistenti che fungono da schermature solari e per modesti eventi metereologici con delle strutture più moderne e funzionali nel rispetto delle facciate esistenti.

La struttura in progetto consiste in una struttura metallica con profili tubolari di diametro esiguo che sono fissate **nella mezzeria fra il limite superiore delle porte finestre che affacciano sul terrazzo e il limite inferiore delle bucaure minori della zona sottotetto**, esse nella parte terminale saranno fissate sul pavimento della terrazza e completamente staccate dal parapetto in muratura esistente.

Il parapetto interno sarà usato come una boiserie, in ferro, che svolgerà contemporaneamente il ruolo di contenitore di fioriere, chiusura del parapetto, cavedio di utilità per il passaggio di eventuali cavi elettrici, sistemi di diffusione sonora, nonché elemento di decoro di queste terrazze.

Tali strutture molto leggere saranno il sostegno per due teli, uno superiore in pvc per il riparo dall'acqua piovana ed uno sottostante in tessuto tecnico microforato anti uvb che funge da schermatura solare.

Le strutture sono divise per moduli (chiudibile ed apribili in modo indipendente l'uno dall'altro) in base alle aperture esistenti, questo serve anche per risolvere vincoli di stabilità ad esempio all'azione del vento.

Questi "teli" saranno elettrificati e impacchettati a muro, e scorreranno sino a coprire la parte orizzontale; per la parte esterna verticale il solo telo in pvc trasparente potrà arrivare sino al parapetto scorrendo in modo verticale in caso di avverse condizioni climatiche. Il telo verticale quando chiuso sarà contenuto in un cassonetto tubolare che si sviluppo in modo orizzontale atto anche ad irrigidire la struttura metallica del dehor. Le strutture tubolari fungeranno anche da sostegno per impianto di illuminazione e sonoro esterno.

Sul lato sud della terrazza che confina con Piazza del Popolo la struttura prosegue sino ad arrivare in prossimità della cucina dove la terrazza si allarga e al centro di questo spazio verrà posizionato il tavolo dello chef che dato lo spazio a disposizione (di dimensioni di 300x390 cm circa), può essere immaginato di varie dimensioni, così da avere una maggiore versatilità d'uso; ai due lati del tavolo, lungo i lati corti del

perimetro, sviluppiamo l'orto che - prendendo spunto dai "teatri di verzura" - si sviluppa a gradoni e viene chiuso da una spalliera di verde che corre lungo le pareti a tutta altezza.

La partizione di destinazioni dello spazio è sottolineato dalla suddivisione della tenda di copertura in tre parti azionabili separatamente per meglio assecondare le esigenze di illuminazione e ombra degli ospiti e della vegetazione.

Il verde rampicante (presente sia sul lato posto a Nord che quello posto sulla porzione del lato ad Est), viene confermato e reso partecipe nello e dell' intero progetto. La proprietà si impegna e si preoccuperà di mantenerlo attraverso appropriate potature e trattamenti vari, sempre nella filosofia dell'elemento presente nel contesto storico generale.

La fioriera posta a ridosso della muratura sarà collocata a ridosso del parapetto ma costruita con potenzialità multifunzionali. Garantirà la piantumazione di un verde adatto al sito e capace di garantire effetti estetici gradevoli, risulterà elemento contenitivo (mediante appositi sportelli ricavati sulla parete verticale interna), conterrà eventuali impianti elettrici o meccanici per consentire o dare la possibilità di creare funzioni diversificate (luci, audio, impianti vari ecc. ecc.), garantirà il contenimento della pilastratura del tendaggio.

L'immobile in esame è un edificio a funzione mista, composto da piano terra, piano ammezzato, piano primo, piano secondo e piano sottotetto. Trattasi di un'unica unità strutturale, composta da svariate unità immobiliari.

Ad oggi ci occupiamo dell'unità immobiliare relativa al ristorante, costituita da un livello posto al piano terra, piano primo, piano secondo (sottotetto) e attico.

Da un punto di vista strutturale l'edificio, nella porzione in esame, presenta murature portanti perimetrali, fino al livello della terrazza del ristorante, rappresentate dai bastioni del forte, murature con apparecchiatura del tipo casuale, con tessitura muraria a corsi irregolari e del tipo mista composta da mattoni pieni e sassi. Al piano del ristorante a salire le murature portanti sono in mattoni pieni.

Gli orizzontamenti si presentano, in generale, realizzati con volte a botte e a padiglione su base rettangolare, nella maggior parte dei casi, realizzati con mattoni/tavole di laterizio e rinfiancate.

La struttura della copertura è composta da orditura primaria e secondaria in legno con tavole di laterizio e soprastante impermeabilizzazione con doppio strato di coppi.

Quanto sopra come inquadramento generale degli interventi che sono già stati presentati e oggetto della prima Segnalazione Certificata di inizio lavori, già autorizzata.

Variante

Visto l'acquisto in corso anche degli spazi sottostanti il ristorante si è aperta la possibilità di creare, nell'ambiente posto al di sotto della cucina stessa, una zona laboratorio.

Questo nasce dalla necessità di "allargare" gli spazi della cucina, che erano da sempre ridotti ed eseguiti per quelle che sono le effettive esigenze di una cucina di questa portata.

L'aver inoltre rilevato la presenza di una scala metallica (in parte a chiocciola ed in parte rettilinea) che collegava, da sempre, l'ambiente sottostante alla cucina, ha aperto nuove prospettive.

Il collegamento presente, vista poi la diversa proprietà, era stato chiuso con un semplice tavolato, ben visibile da sotto e coperto, nel piano soprastante (la cucina dell'Osteria) dal pavimento.

Oggi l'esigenza chiede di collegare i due ambienti anche in un modo funzionale, ovvero che sia comodamente utilizzabile, da qui l'esigenza di una scala rettilinea, e che per esigenze di layout impatti nel modo corretto rispetto all'ambiente cucina soprastante.

Il solaio del sottotetto è realizzato con volte del tipo a botte e crociera, che rappresentano i soffitti affrescati del piano ristorante.

Nell'ambito della prima Scia presentata si rimandava a successiva valutazione e quindi a successiva presentazione di relativo progetto, che avrebbe costituito variante sostanziale ai depositi iniziali, poiché il sottotetto risultava essere utilizzato come deposito e completamente pieno di materiale che impediva lo svolgimento di sondaggi accurati sullo stato conservativo delle volte stesse.

Si era già anticipato che una volta liberato, durante l'inizio dei lavori, si sarebbe provveduto all'esecuzione di sondaggi ed ispezioni, oltre all'esecuzione di eventuali prove di carico e/o l'esecuzione di sondaggi di caratterizzazione dei materiali, che avrebbero consentito di procedere con la puntuale progettazione degli interventi necessari al rinforzo strutturale.

Si era in ogni caso già assunta, come soluzione strutturale, quella di effettuare opere di rinforzo strutturale delle volte del sottotetto mediante l'utilizzo di fibre di carbonio.

L'impiego dei materiali compositi sta trovando una sempre più ampia diffusione in ambito edilizio, in particolare nel campo del consolidamento strutturale e dell'adeguamento sismico, alla luce dell'incremento della capacità portante che si può ricavare senza l'apporto di nuove masse strutturali.

Comunemente denominati FRP, acronimo di Fiber Reinforced Polymers, si tratta di matrici polimeriche e fibre lunghe continue di carbonio (il nostro caso), vetro o arammide, che presentano un comportamento prevalentemente elastico lineare fino a rottura.

Tra i vantaggi che può offrire l'applicazione delle FRP vi sono la celerità dell'intervento, nonché l'immediata adattabilità del rinforzo alle strutture. I materiali compositi possono essere più resistenti e, almeno nel caso dei compositi a fibra di carbonio, più rigidi dei materiali da costruzione tradizionali; di conseguenza, avendo una minore densità, una struttura in composito può arrivare ad avere un peso dimezzato rispetto ad un'altra realizzata mediante materiali tradizionali e una resistenza superiore di circa 4 volte.

Pertanto, tramite questi aspetti, ovvero maggiore resistenza, maggiore rigidezza; peso minore, si può dire che questi materiali risultano, a tutt'oggi, un'alternativa molto valida alle tecniche tradizionali di miglioramento e adeguamento sismico, al rinforzo e consolidamento statico di elementi strutturali di varia natura.

La metodologia del rinforzo si basa sul concetto di realizzare una nuova struttura in grado di sostenere le sollecitazioni di progetto.

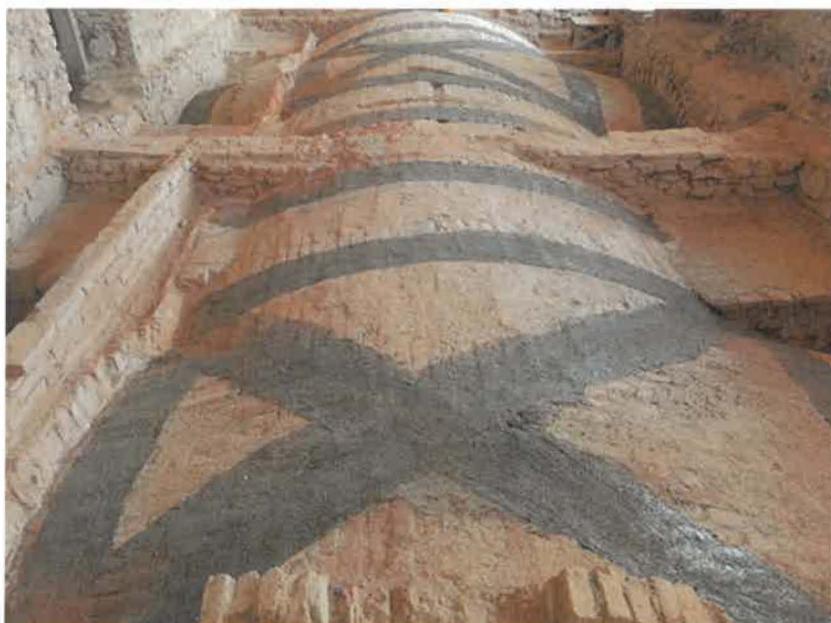
Il principio statico alla base del dimensionamento dei rinforzi con fibre di carbonio di strutture ad arco a singola o doppia curvatura si basa sul calcolo a rottura. La disposizione di tessuti in CFRP consente, infatti, di modificare il meccanismo di rottura della volta originaria, permettendo, in tal modo, un incremento anche notevole del moltiplicatore di collasso.

Supponendo di disporre di appoggi capaci di reggere la spinta orizzontale, il meccanismo di collasso prevede la formazione di una cerniera in chiave con apertura all'intradosso e di due cerniere laterali con apertura all'estradosso; **la disposizione delle fibre in carbonio consente di contenere queste due cerniere.** Impedito tale meccanismo la volta si comporta come un arco a tre cerniere e può essere caricata ulteriormente sino a che non si giunge alla rottura per schiacciamento della muratura compressa.

L'intervento di rinforzo consiste nell'applicazione di tessuti unidirezionali o bidirezionali ad alta tenacità in fibra di carbonio e tessuti bidirezionali all'estradosso delle volte in esame, solidarizzati alla struttura mediante adesivo epossidico.

Vengono, inoltre, realizzati una serie di ancoraggi con apertura a fiocco di tessuti in CFRP, utili al collegamento strutturale.

La geometria dell'intervento si basa sull'applicazione delle fasce del tessuto suddetto sia lungo i lati delle arcate, sia lungo le diagonali, con una larghezza di circa 25-30 cm; i fiocchi in CFRP di diametro 10 mm vengono disposti entro un foro 1,5Ø di profondità 30 cm, riempiti con adesivo epossidico, nelle varie intersezioni del tessuto disposto in precedenza. Si allega pianta con indicata la possibile area di intervento.



Esempi di applicazioni su volte

La tecnologia più classica normalmente utilizzata è sempre stata rappresentata dalla realizzazione di una cappa armata.

Sicuramente l'intervento più classico di rinforzo di una volta è rappresentato dalla realizzazione di una cappa armata collaborante connessa alla muratura. La diffusione di questa tecnica deriva dal fatto che sia sempre stata considerata come quella più rapida e semplice da realizzare.

La cappa armata prevede l'impiego di una rete metallica all'interno di una soletta in calcestruzzo gettata in opera. Essa apporta un aumento di resistenza, ma sicuramente anche di massa alla sezione resistente della volta che lavora principalmente a compressione. L'aumento di massa della cappa armata può rappresentare tuttavia un aspetto negativo.

Un'altra problematica della cappa armata è legata alla difficoltà nella maggior parte dei casi di conseguire un'effettiva collaborazione fra la cappa stessa e la volta mediante l'inserimento di connettori. Spesso infatti risulta difficile realizzare perforazioni all'estradosso per l'inserimento e l'inghisaggio di connettori metallici. Ciò vale soprattutto come nel nostro caso, in presenza di affreschi all'intradosso e su volte di spessore ridotto.

Insomma, le cappe armate hanno una serie di limiti che non le rendono in molti casi la scelta più indicata.

Le condizioni che determinano lo stato di crisi in una volta, nel piano della sezione trasversale, si generano quando si ha la formazione di almeno quattro cerniere plastiche che producono condizioni di depressione o innalzamento della chiave.

Molti di questi meccanismi di collasso possono essere scongiurati attraverso interventi mirati sia alla limitazione dei movimenti relativi fra i piedritti, mediante inserimento di catene o con un corretto ammortamento con le murature ortogonali, che attraverso interventi sulle volte finalizzati a:

- incrementare la capacità di ripartizione delle azioni orizzontali;
- incrementare la capacità portante nei confronti dei carichi verticali.

Quest'ultimo aspetto risulta essere particolarmente rilevante nelle volte in laterizio in foglio dove le capacità elencate risultano essere carenti per via della morfologia stessa della volta.

I rinforzi con materiali compositi in fibra di carbonio permettono di incrementare la resistenza delle volte applicando fasciature sia all'intradosso che all'estradosso. Nel caso specifico, vista anche la presenza di intradossi affrescati, si considera di intervenire all'estradosso della volta.

Il rinforzo con FRP in fibra di carbonio prevede l'applicazione di fasciature secondo la generatrice della volta, con la funzione di resistere agli sforzi di trazione prodotti sull'estradosso della sezione della volta stessa.

Inoltre vengono disposte delle fasciature ortogonali, secondo la direttrice della volta. In questo modo è possibile ridistribuire gli sforzi che assorbono le singole fasciature, creando una maglia di ripartizione che garantisce una maggiore omogeneità del sistema di rinforzo su tutta la superficie.

Come ultima fase di intervento si predispongono infine delle connessioni perimetrali, con dei connettori a fiocco per il collegamento delle fasce alle murature perimetrali.

In questa variante, vengono inoltre anche depositati i progetti relativi agli interventi di riparazione locale relativi alle volte in laterizio.

Dai sondaggi svolti in loco le volte esistenti sono costituite da tavelloni in muratura di spessore pari a circa 10 cm posizionati di piatto e gravanti sulle murature portanti verticali di irrigidimento.

All'estradosso delle volte è poi presente un riempimento in sabbia e cemento fino al raggiungimento della quota di estradosso dell'orizzontamento.

Visto l'esiguo spessore delle strutture costituenti gli orizzontamenti, si procederà innanzitutto ad un consolidamento delle volte mediante una rasatura pari a circa 2cm di malta cementizia strutturale avente la duplice funzione di caldana stabilizzante e di supporto per il successivo rinforzo mediante fasce di FRP con fibre di carbonio di larghezza pari a 50 cm che verranno poste ad interasse pari a 1,00 m circa.

Le opere si classificano come "Interventi di riparazione o interventi locali" ai sensi del par. § 8.4.1. del D.M. 17.01.2018 "Norme Tecniche per le Costruzioni", dal momento che si tratta di opere riguardanti i singoli elementi strutturali dell'edificio, **non sono previsti** sopraelevazioni o ampliamenti della costruzione, **aumenti dei carichi**, cambi di destinazione d'uso e interventi strutturali che modifichino il comportamento dell'organismo edilizio esistente.

b) Descrizione generale della struttura

Il presente paragrafo non è necessario in quanto l'intervento in oggetto è un INTERVENTO DI RIPARAZIONE LOCALE su un edificio esistente.

Si rimanda alla relazione allegata.

c) Normativa tecnica e riferimenti tecnici utilizzati

Nella progettazione degli interventi di seguito descritti si sono osservate le seguenti disposizioni normative:

Normativa a livello Nazionale

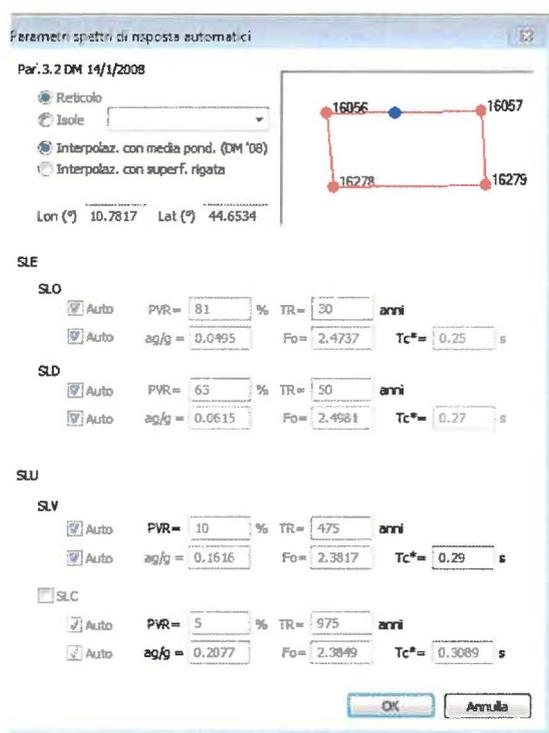
- a) D.M.17.01.18 "Aggiornamento delle Norme tecniche per le costruzioni"
- b) Circolare n° 7 del 21.01.19 "Istruzioni relative all'aggiornamento delle norme tecniche di cui al D.M. 17.01.18"
- c) CNR DT 200 R1/2013 Istruzioni per la progettazione, l'esecuzione ed il controllo di interventi di consolidamento statico mediante l'utilizzo di compositi fibrorinforzati.
- d) Documento min. LL.PP 24/07/2009 Linee guida per la progettazione, l'esecuzione ed il collaudo di interventi di rinforzo di strutture in ca, cap e murarie mediante FRP.

d) Definizione dei parametri di progetto

L'edificio in esame è stato progettato adottando i seguenti parametri, che concorrono alla definizione dell'azione sismica di base del sito.

- Vita Nominale $V_N = 50$ anni – Opera ordinaria
- Classe d'Uso Classe II – Costruzione il cui uso preveda normali affollamenti;
 $C_U = 1,0$
- Periodo di riferimento dell'azione sismica: $V_R = V_N \cdot C_U = 50$ anni
- Categoria del sottosuolo C – Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fina mediamente consistenti;

- Categoria topografica T1 – Pendii con inclinazione media < 15°
- Amplificazione topografica $S_T = 1$
- Zona sismica del sito Zona 3
- Coordinate del sito (espressa in gradi secondo le coordinate geografiche WGS84 GD):
 Latitudine: 44.65340°
 Longitudine: 10.78170°
- Parametri sismici:



- Coeff. smorzam. equivalente $\xi = 5 \%$
- Percentuale eccentricità accidentale centro di massa: 0.05

Dal momento che gli interventi in oggetto rientrano nella casistica degli interventi di riparazione o di intervento locale, non è necessario definire il fattore di struttura del fabbricato non dovendo procedere alla verifica globale dell'edificio.

Di seguito si riportano le analisi dei carichi relative ai vari impalcati dell'edificio necessarie ai fini dei calcoli successivi.

Analisi dei carichi solaio di piano

Peso proprio solai	50 daN/m ²
Carichi permanenti non strutturali	<u>200 daN/m²</u>
	250 daN/m ²
Carico variabile	400 daN/m ²

e) Descrizione dei materiali

Tutti i principali materiali (considerati strutturali come definito nel § 11 del D.M. 17/01/2018) utilizzati per gli interventi locali oggetto della presente relazione tecnica e le relative principali caratteristiche meccaniche sono riportate nella tabella riassuntiva seguente.

Tutti i materiali devono rispondere ai requisiti di cui al D.M. 17.01.18.

Criteria di progettazione e di modellazione

Poiché l'intervento in oggetto è classificato come "INTERVENTO DI RIPARAZIONE LOCALE" riguardante un edificio esistente; per la valutazione degli interventi in progetto si sono adottati (ove necessario) schemi di calcolo semplificati relativi all'area locale in cui è previsto l'intervento.

Il calcolo della struttura è stato eseguito con il metodo degli stati limite, secondo quanto prescritto dalle *Nuove Norme Tecniche per le Costruzioni* (D.M. 17/01/2018), attraverso un procedimento di calcolo automatico e verifiche specifiche condotte manualmente. Nel dettaglio, attraverso un'analisi di tipo *statica lineare* sono state valutate le sollecitazioni e le deformazioni in tutti gli stati limite in esame (Stati Limite Ultimi e di Esercizio).

Per quanto concerne le verifiche di resistenza allo Stato Limite Ultimo si è proceduto ad una valutazione di tipo sezionale tenendo conto del comportamento non lineare dei materiali.

f) Principali combinazioni delle azioni

Nello specifico si sono adottate le seguenti combinazioni di carico elementari:

$G_1 = \text{pesi propri strutturali}$

$G_2 = \text{carichi permanenti non strutturali}$

$Q_1 = \text{neve a quota inferiore ai 1000 m s.l.m.}$

$E = \text{azione sismica}$

Sono state utilizzate le seguenti combinazioni delle azioni:

Combinazione sismica SLU $E + G_1 + G_2 + 0.0 Q_1$

g) Metodo di analisi seguito

Il presente paragrafo non risulta necessario in quanto l'intervento in oggetto è classificato come "INTERVENTO DI RIPARAZIONE LOCALE" riguardante un edificio esistente e non sono state eseguite analisi globali dell'edificio ma esclusivamente verifiche locali. La verifica delle cerchiature è stata condotta valutando la variazione di rigidità, resistenza e capacità di spostamento ultimo del paramento murario nella situazione prima e dopo l'intervento.

h) Criteri di verifica agli Stati Limite

Per quanto concerne le verifiche di resistenza allo Stato Limite Ultimo si è proceduto ad una valutazione di tipo sezionale tenendo conto del comportamento non lineare dei materiali.

i) Configurazioni deformate e caratteristiche di sollecitazione

Il presente paragrafo non risulta necessario in quanto l'intervento in oggetto è classificato come "INTERVENTO DI RIPARAZIONE LOCALE" riguardante un edificio esistente.

j) Caratteristiche e affidabilità del codice di calcolo

Il presente paragrafo non risulta necessario in quanto l'intervento in oggetto è classificato come "INTERVENTO DI RIPARAZIONE LOCALE" riguardante un edificio esistente, pertanto non si è fatto ricorso ad alcun programma di calcolo automatizzato ma a schemi statici semplificati basati sulla teoria di scienza delle costruzioni.

k) Strutture geotecniche o di fondazione

Il presente paragrafo non risulta necessario in quanto l'intervento in oggetto è classificato come "INTERVENTO DI RIPARAZIONE LOCALE" riguardante un edificio esistente, ma senza che tali interventi interessino le strutture fondali dell'edificio.

l) Indicazione della categoria di intervento previsto

Gli interventi descritti nei paragrafi seguenti si classificano come "Interventi di riparazione o interventi locali" ai sensi del par. 8.4.1. del D.M. 17.01.2018 "Norme Tecniche per le Costruzioni", in quanto non sono previsti sopraelevazioni o ampliamenti della costruzione, aumenti dei carichi e cambi di destinazione d'uso e interventi strutturali che modifichino il comportamento dell'organismo edilizio esistente.

L'intervento di riparazione consiste nell'esecuzione di opere riguardanti i singoli elementi strutturali dell'edificio interessanti porzioni limitate della costruzione.

Di seguito sono descritti gli interventi previsti, mentre per la loro identificazione planimetrica si faccia riferimento all'elaborato esecutivo allegata alla presente relazione.

m) Descrizione della struttura esistente nel suo insieme

Gli edifici oggetto di intervento presentano struttura portante verticale in muratura realizzata con pieni e solai di piano realizzati con volte in mattoni/tavole e copertura in legno.

n) Risultati significativi

Di seguito è proposto un riepilogo sintetico delle principali verifiche numeriche effettuate; si rimanda però al paragrafo "Relazione di calcolo" per il dettaglio delle singole verifiche.

2 ELABORATI GRAFICI ESECUTIVI E PARTICOLARI COSTRUTTIVI

Si rimanda agli elaborati allegati.

3 PIANO DI MANUTENZIONE DELLA PARTE STRUTTURALE DELL'OPERA

Si rimanda agli elaborati allegati.

4 RELAZIONI SPECIALISTICHE SUI RISULTATI SPERIMENTALI

4.1 Relazione geologica sulle indagini, caratterizzazione e modellazione geologica del sito

Il presente paragrafo non risulta necessario dal momento che gli interventi non interessano le strutture di fondazione.

4.2 Relazione geotecnica sulle indagini, caratterizzazione e modellazione del volume significativo del terreno

Il presente paragrafo non risulta necessario dal momento che gli interventi non interessano le strutture di fondazione.

4.3 Relazione sulla modellazione sismica concernente la "pericolosità sismica di base" del sito di costruzione

Il presente paragrafo non risulta necessario dal momento che gli interventi non interessano le strutture di fondazione e trattandosi di interventi di riparazione locale.

5 ELABORATI GRAFICI DEL RILIEVO GEOMETRICO-STRUTTURALE

Considerata la tipologia della struttura e la destinazione d'uso sono stati effettuati:

- un rilievo geometrico sul posto adeguatamente approfondito;
- verifiche in situ limitate relativamente ai dettagli costruttivi eseguendo sondaggi nei punti critici
- indagini in situ limitate relativamente alle caratteristiche dei materiali vista l'omogeneità dei materiali medesimi.

6 VALUTAZIONE DELLA SICUREZZA

Gli interventi in progetto, classificati come "*Interventi di riparazione o interventi locali*" ai sensi del par. § 8.4.1. del D.M. 17.01.2018 "Norme Tecniche per le Costruzioni", riguardano singoli elementi strutturali dell'edificio senza modificare il comportamento dell'organismo edilizio esistente. La sicurezza degli edifici

oggetto di intervento nei confronti di eventuali azioni sismiche non si modifica dallo stato di fatto allo stato di progetto.

Il presente elaborato risulta costituito da n° 15 pagine numerate progressivamente (escluso il frontespizio).

Il tecnico progettista

Ing. Nazarena Adorni



A handwritten signature in black ink, appearing to read "Nazarena Adorni", written over a horizontal line.

Sommario

1. RELAZIONE ILLUSTRATIVA.....	2
1.1 Premessa	2
1.2 Descrizione delle strutture oggetto di rinforzo.....	2
1.3 Criteri di calcolo e di verifica	6
1.4 Normativa tecnica di riferimento.....	7
1.5 Caratteristiche dei materiali.....	7
1.5.1 Sistema di rinforzo in fibra di carbonio unidirezionale ad alta tenacità – CB320UDHT 7	
1.5.2 “FIOCCO CB 12” - Connettore unidirezionale a fiocco in fibra di carbonio	9
1.6 Condizioni e combinazioni di carico	10
1.6.1 Carichi di progetto.....	10
1.6.2 Combinazioni di carico	10
2. RELAZIONE DI CALCOLO STRUTTURALE	11
2.1 Determinazione delle sollecitazioni	11
2.2 Verifica dei rinforzi delle volte a botte.....	12
2.3 Verifica dei rinforzi delle volte a crociera.....	15

1. RELAZIONE ILLUSTRATIVA

1.1 Premessa

La presente relazione di calcolo viene redatta con riferimento al rinforzo statico di parte dei solai esistenti nel fabbricato "Osteria Il Viandante" sito in Via XXIV Maggio n.15, nel Comune di Rubiera (RE).

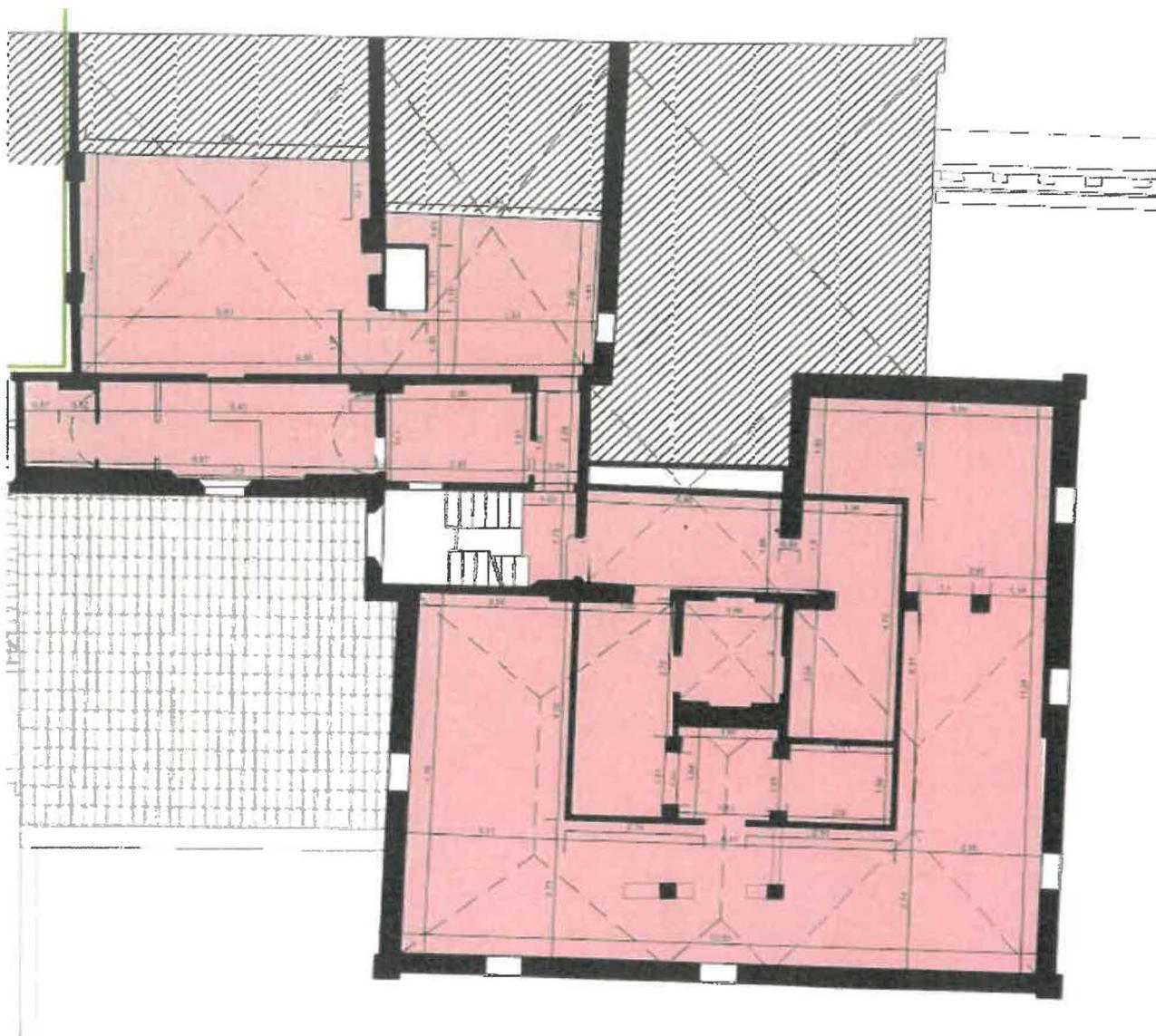
1.2 Descrizione delle strutture oggetto di rinforzo

Le strutture oggetto di rinforzo sono costituite da orizzontamenti realizzati con volte di varia tipologia, principalmente a botte e a crociera in muratura. Nello specifico le opere di rinforzo si inquadrano come opere di riparazione locale poiché si interviene in questi orizzontamenti o per riparare evidenti lesioni emerse durante l'esecuzione dei lavori ovvero si interviene a rinforzo delle strutture visti i nuovi carichi agenti sugli orizzontamenti medesimi.

Nel dettaglio il rinforzo è previsto nelle zone a piano secondo e sottotetto evidenziate nelle seguenti figure:



Zone di rinforzo a piano secondo.

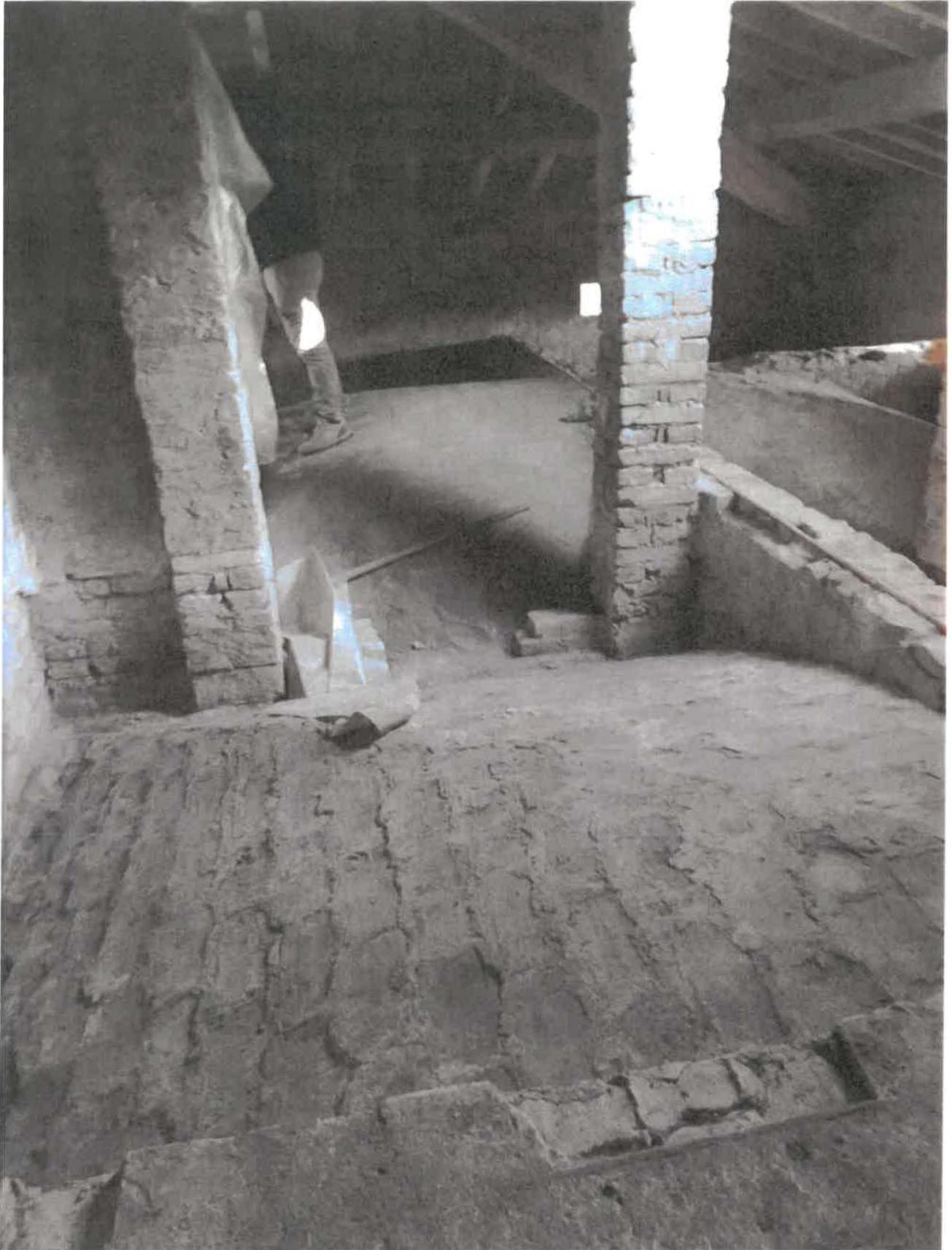


Zone di rinforzo nel sottotetto

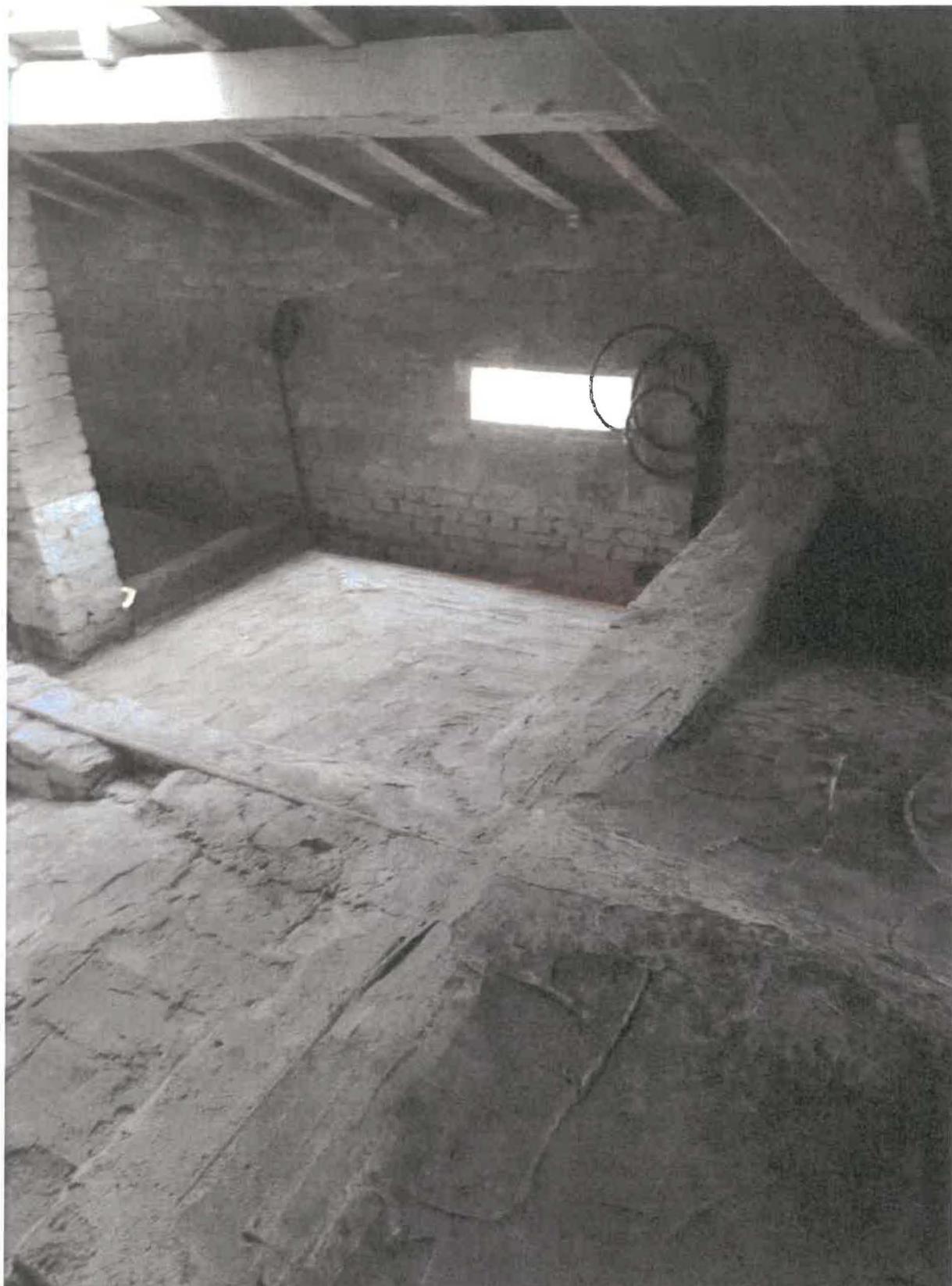
Già nell'ambito della presentazione del primo deposito sismico si era accennato alla necessità di intervenire in tal senso, ma si era rimandato all'esecuzione dei lavori al fine di procedere innanzitutto allo sgombero effettivo dei locali, che consentisse l'esecuzione di sondaggi per la presa visione dell'effettivo stato delle strutture.

Dai sondaggi svolti in loco le volte esistenti sono costituite da tavelloni in muratura di spessore pari a circa 10 cm posizionati di piatto e gravanti sulle murature portanti verticali di irrigidimento. All'estradosso delle volte è poi presente un riempimento in sabbia e cemento fino al raggiungimento della quota di estradosso dell'orizzontamento.

Si riporta nel seguito la tipologia di orizzontamento oggetto di rinforzo:



Volta a botte tipologica oggetto di rinforzo presente nel piano sottotetto



Volta a crociera tipologica oggetto di rinforzo presente nel piano sottotetto



: Lesione su volta a botte presente nel piano osteria

Visto l'esiguo spessore delle strutture costituenti gli orizzontamenti, si procederà innanzitutto ad un consolidamento delle volte mediante una rasatura pari a circa 2cm di malta cementizia strutturale avente la duplice funzione di caldana stabilizzante e di supporto per il successivo rinforzo mediante fasce di FRP con fibre di carbonio di larghezza pari a 50 cm che verranno poste ad interasse pari a 1,00 m circa.

Per quel che concerne le volte a crociera si procederà poi al rinforzo, sempre con fasce in CFRP di larghezza pari a 50cm.

1.3 Criteri di calcolo e di verifica

Il calcolo della struttura è stato eseguito con il metodo degli stati limite, secondo quanto prescritto dalle *Nuove Norme Tecniche per le Costruzioni* (D.M. 17/01/2018), attraverso un procedimento di calcolo automatico e verifiche specifiche condotte manualmente.

Nel dettaglio, attraverso un'analisi di tipo *statica lineare* sono state valutate le sollecitazioni e le deformazioni in tutti gli stati limite in esame (Stati Limite Ultimi e di Esercizio).

Per quanto concerne le verifiche di resistenza allo Stato Limite Ultimo si è proceduto ad una valutazione di tipo sezionale tenendo conto del comportamento non lineare dei materiali.

1.4 Normativa tecnica di riferimento

Il dimensionamento della struttura è stato sviluppato nel rispetto delle normative elencate:

- D.M. 17 Gennaio 2018** - Norme tecniche per le costruzioni;
- Circolare 21 Gennaio 2019, n° 7** - Istruzioni per l'applicazione dell'aggiornamento delle "Norme tecniche per le costruzioni" di cui al D.M. 17 Gennaio 2018.
- CNR DT 200 R1/2013** - Istruzioni per la progettazione, l'esecuzione ed il controllo di interventi di consolidamento statico mediante l'utilizzo di compositi fibrorinforzati.
- Documento Min. LL.PP. 24/07/2009** - Linee guida per la progettazione, l'esecuzione ed il collaudo di interventi di rinforzo di strutture in c.a., c.a.p., e murarie mediante FRP.

1.5 Caratteristiche dei materiali

Di seguito si riportano le caratteristiche dei materiali considerati nelle analisi svolte:

1.5.1 Sistema di rinforzo in fibra di carbonio unidirezionale ad alta tenacità - CB320UDHT

Resistenza caratteristica a trazione della fibra:	$f_{fk} = 5100 \text{ MPa}$
Deformazione caratteristica a rottura della fibra:	$\varepsilon_{fk} = 2,26 \%$
Coefficienti parziali del materiale	
- Per verifiche agli SLU:	$\gamma_f = 1,10$
- Per verifiche di distacco da supporto:	$\gamma_f = 1,20$
- Per verifiche agli SLE:	$\gamma_f = 1,00$
Fattore di conversione:	
- Fattore di conversione ambientale (Esposizione esterna, CFRP+resina epossidica):	$\eta = 0,85$
- Fattore di conversione per effetti di lunga durata per verifiche SLE (Carico di lungo termine, CFRP+resina epossidica):	$\eta = 0,80$
Massa del tessuto:	$m_f = 320 \text{ g / m}^2$
Spessore equivalente:	$t_f = 0,180 \text{ mm}$
Area resistente per unità di larghezza totale:	$A_f = 180 \text{ mm}^2 / m$
Modulo elastico della fibra:	$E_f = 245 \text{ GPa}$

Conformemente al Certificato di Valutazione Tecnica rilasciato ai sensi del Cap.11, punto 11.1 lett. c) del DM 17/01/2018 e delle Linee guida per la progettazione, l'esecuzione ed il collaudo di interventi di rinforzo di strutture in c.a., c.a.p., e murarie mediante FRP, il sistema in FRP è classificato in classe 210C, con i seguenti valori caratteristici del sistema:

Modulo elastico del laminato riferita all'area netta fibre	210 GPa
Resistenza del laminato riferita all'area netta fibre	2700 MPa

I valori di resistenza e di deformazione di calcolo a trazione si determinano secondo quanto indicato al paragrafo 3.3.1 delle CNR-DT 200 R1/2013.

1.5.2 "FIOCCO CB 12" - Connettore unidirezionale a fiocco in fibra di carbonio

Resistenza caratteristica a trazione della fibra: $f_{fk} = 4900 \text{ MPa}$

Deformazione caratteristica a rottura della fibra: $\varepsilon_{fk} = 2,10 \%$

Coefficienti parziali del materiale

- Per verifiche agli SLU: $\gamma_f = 1,10$

- Per verifiche di distacco da supporto: $\gamma_f = 1,20$

- Per verifiche agli SLE:

$$\gamma_f = 1,00$$

Fattore di conversione:

$$\eta = \eta_a \cdot \eta_l$$

- Fattore di conversione ambientale

(Esposizione esterna, CFRP+resina epossidica):

$$\eta = 0,85$$

- Fattore di conversione per effetti di lunga durata per verifiche SLE

(Carico di lungo termine, CFRP+resina epossidica):

$$\eta = 0,80$$

Massa volumica delle fibre:

$$m_f = 1,81 \text{ g / m}^3$$

Area resistente nel diametro ($\Phi 12$):

$$A_{res,f} = 32,75 \text{ mm}^2$$

Modulo elastico della fibra:

$$E_f = 250 \text{ GPa}$$

I valori di resistenza e di deformazione di calcolo a trazione si determinano secondo quanto indicato al paragrafo 3.3.1 delle CNR-DT R1/2012:

Resistenza di progetto a trazione della fibra:

$$f_{fd} = \eta \cdot \frac{f_{fk}}{\gamma_f} = 3786,4 \text{ MPa}$$

Deformazione di progetto a rottura della fibra:

$$\varepsilon_{fd} = \eta \cdot \frac{\varepsilon_{fk}}{\gamma_f} = 1,62 \%$$

1.6 Condizioni e combinazioni di carico

Il calcolo delle sollecitazioni e le verifiche di resistenza e deformabilità vengono condotte con riferimento alle seguenti azioni agenti sulla pavimentazione:

1.6.1 Carichi di progetto

Il calcolo delle sollecitazioni e le verifiche di resistenza e deformabilità vengono condotte con riferimento alle seguenti azioni indotte sulla pavimentazione fornite dalla committenza.

- a) Peso Proprio Solaio G1: 50,00 daN/m²
- b) Carichi Permanenti G1: 200,00 daN/m²
- c) Carichi Variabili Q1: 400,00 daN/m²

1.6.2 Combinazioni di carico

Condizioni di carico definite:

Condizione	
1	Peso Proprio
2	Carichi Permanenti
3	Carichi Variabili

Combinazioni agli Stati Limite Ultimi

Combinazione di carico numero			
1			SLU
Comb.\Cond	1	2	3
1	1.3	1.3	1.5

Combinazioni RARE Stati Limite di Esercizio

Combinazione di carico numero				
2				SLE
Comb.\Cond	1	2	3	4
2	1	1	1	1

2. RELAZIONE DI CALCOLO STRUTTURALE

2.1 Determinazione delle sollecitazioni

Si riportano nel seguito le sollecitazioni ricavate mediante l'ausilio di un codice agli elementi finiti:

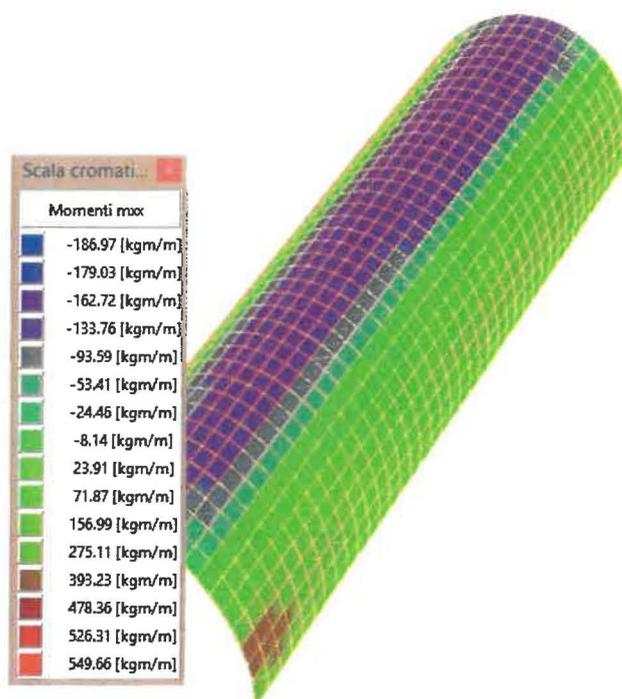


Figura 7: Sollecitazioni massime nelle volte a botte.

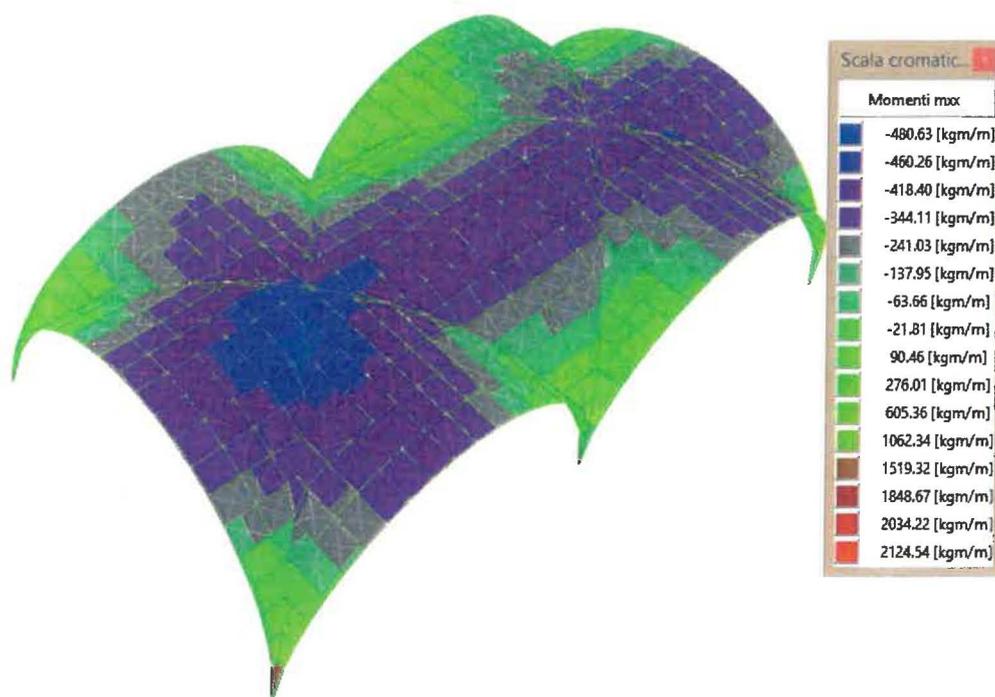


Figura 8: Sollecitazioni massime nelle volte a crociera.

2.2 Verifica dei rinforzi delle volte a botte

Si procede quindi alla verifica del rinforzo considerando la sezione più sollecitata delle volte a botte, caratterizzata da un momento massimo, valutato mediante l'analisi dei carichi precedentemente riportata, pari a $M_{xx,d} = 186,97 \text{ kgm/ml}$.

Secondo quanto prescritto al punto 5.5.2. delle CNR-DT 200 R1/2013, lo studio delle volte a botte realizzate con mattoni disposti lungo la generatrice o ad essa ortogonali, è riconducibile a quello di un arco di profondità unitaria il cui profilo corrisponde alla curva direttrice della volta.

Ne consegue che le volte a botte possano essere rinforzate mediante compositi FRP applicati lungo la direttrice su tutto lo sviluppo longitudinale della volta.

L'interasse dei rinforzi, funzione sia dello spessore che della luce della volta, deve ostacolare la formazione di cinematismi anche in tale direzione.

Sono quindi consigliabili interassi p_f che soddisfino la seguente disuguaglianza:

$$p_f \leq 5 \cdot t + b_f$$

in cui t è lo spessore della volta e b_f è la larghezza dei rinforzi adottati.

Nel caso in essere, considerando rinforzi costituiti da fasce in CFRP caratterizzate da una larghezza pari a 50 cm su un tavellone ($t = 10 \text{ cm}$), si ottiene:

$$p_f \leq 5 \cdot t + b_f \rightarrow 5 \cdot 10 + 50 = 100 \text{ cm}$$

Si opererà quindi per un rinforzo costituito da fasce in CFRP poste in opera ad un interasse pari a 100 cm.

Posto che i requisiti geometrici del rinforzo rispettano le limitazioni imposte da normativa, si procede al calcolo del rinforzo in materiale composito della volta a botte.

Si sottolinea che di norma è consigliato agire su volte a botte mediante applicazione di tessuti o lamine completa sull'estradosso o sull'intradosso mentre è sconsigliato eseguire interventi parziali, eseguiti in parte dell'intradosso ed in parte dell'estradosso. Inoltre evidenze sperimentali hanno dimostrato che l'applicazione di sistemi di rinforzo FRP sulle superfici laterali dell'arco non comporta sensibili miglioramenti strutturali. Infatti, è stato rilevato un prematuro distacco del composito fibrorinforzato dal paramento murario, che, partendo dalle zone compresse per effetto di instabilità locale, si estende progressivamente a tutta la superficie di incollaggio.

Alla luce di quanto esposto si procederà per un rinforzo completo estradosso attraverso tessuti di larghezza pari a 50 cm e spessore pari a 0,18 mm poste in opera ad un interasse di 100 cm ed ancorate alle strutture verticali attraverso connettori, sempre in fibra di carbonio.

Si procede quindi al calcolo della tensione di progetto della lamina tipo di rinforzo.

Valutazione della resistenza nei confronti del distacco da supporto

In accordo a quanto prescritto al punto 5.2.3. delle CNR-DT 200 R1/2013, la deformazione massima attribuibile al rinforzo CFRP in sede di progettazione è pari a:

$$\varepsilon_{fd} = \min \left\{ \eta_a \cdot \frac{\varepsilon_{fk}}{\gamma_f}, \varepsilon_{fdd} \right\}$$

in cui ε_{fk} è la competente deformazione caratteristica a rottura, mentre ε_{fdd} è la deformazione massima del sistema di rinforzo all'atto del distacco intermedio incipiente dal supporto, di seguito calcolata.

Il valore del primo termine della precedente equazione, considerando un rinforzo con fibre di carbonio e resina epossidica in condizione di esposizione esterna assume un valore pari a $\varepsilon_1 = 0,96$ %.

Per quanto concerne il secondo termine della medesima equazione occorre specificare che, nel rinforzo di paramenti murari mediante lamine e tessuti di materiale composito, il ruolo dell'aderenza tra muratura e composito assume grande importanza in quanto il meccanismo di rottura per distacco dal supporto è di tipo fragile e, dunque, indesiderabile.

Nello spirito di gerarchia delle resistenze tale meccanismo di crisi non deve precedere lo schiacciamento anelastico della muratura.

Con riferimento a quanto prescritto al punto 5.3. delle CNR-DT 200 R1/2013, si distinguono due meccanismi distinti di distacco dal paramento murario delle lamine: il distacco di estremità, *end debording*, ed il distacco intermedio, *intermediate debording*, che si innesca da giunti di malta o da fessure trasversali nella muratura. Nel caso in essere il distacco di estremità è scongiurato dall'adozione di connettori meccanici in fibra di carbonio applicati alle estremità di ciascuna lamina, occorre invece tenere in considerazione il distacco intermedio.

Tale meccanismo di distacco viene scongiurato contenendo il livello tensionale delle lamine entro una tensione limite di progetto definita come tensione di delaminazione per distacco intermedio. Si definisce quindi l'energia specifica di frattura come segue:

$$\Gamma_{fd} = \frac{k_b \cdot k_G}{FC} \cdot \sqrt{f_{bm} \cdot f_{btm}} = \frac{1,36 \cdot 0,0186}{1,2} \cdot \sqrt{3,2 \cdot 0,32} = 0,02133146$$

La tensione di progetto per delaminazione intermedia assume quindi un valore pari a:

$$f_{fdd,2} = \frac{2}{\gamma_{fd}} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot E_f \cdot \Gamma_{fd}}{t_f}} = \frac{2}{1,2} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot 245000 \cdot 0,02133146}{0,18}} = 401,63 \text{ N/mm}^2$$

Il valore del secondo termine dell'equazione che definisce il valore massimo della deformazione ammissibile nel rinforzo assume un valore pari a $\varepsilon_2 = 0,055$ %.

La massima deformazione di progetto risulta quindi pari a $\varepsilon_{fd} = 0,055$ %, corrispondente ad una tensione di progetto massima pari a $f_{fd} = 401,63 \text{ N/mm}^2$

Verifiche di Sicurezza

Si esegue quindi la verifica del rinforzo, considerando il momento sollecitante ottenuto mediante codice di calcolo e la tensione di progetto massima del rinforzo, di cui al punto precedente.

Considerando l'interasse tra le lamine pari a 1,00m, il momento sollecitante massimo sulla fascia più sollecitata risulta pari a:

$$M_{sd} = 186,97 \text{ kgm/ml} \cdot 1,00 \text{ m} = 186,97 \text{ kgm}$$

Tale momento sollecitante induce un tiro nella lamina tipo pari a:

$$T_{sd} = 1900 \text{ kg/fascia}$$

Lo sforzo normale di trazione resistente per il singolo tessuto vale invece:

$$T_{rd} = 3615 \text{ kg/fascia}$$

La verifica della sezione rinforzata più sollecitata risulta quindi ampiamente soddisfatta.

Per quanto concerne i rinforzi longitudinali disposti lungo le direttrici, si sottolinea che sono predisposti come "cucitura" tra gli archi ideali formanti la volta a botte ed inoltre possono contribuire ad impedire la formazione di meccanismi lungo lo sviluppo longitudinale della volta in presenza di azioni sismiche.

Con riferimento a quanto prescritto al punto 5.3. delle CNR-DT 200 R1/2013, risulta consigliabile disporre lungo le generatrici della volta una quantità di rinforzo per unità di area pari al 10% di quella disposta lungo la direttrice, innalzando tale percentuale sino al 25% in zona sismica.

Tutte le verifiche inerenti le volte a botte risultano quindi soddisfatte.

2.3 Verifica dei rinforzi delle volte a crociera

Le volte a crociera sono caratterizzate dalla presenza di due volte a botte intersecatesi formando quattro unghie, il loro comportamento risulta quindi assimilabile a quello di due archi disposti in corrispondenza delle intersezioni delle unghie stesse.

La distribuzione dei momenti e le deformate ottenute mediante codice di calcolo rispecchiano il quadro fessurativo esistente nelle volte a crociera, caratterizzato da lesioni all'intradosso dell'intersezione delle unghie, sezioni in cui il momento sollecitante risulta massimo, soprattutto in corrispondenza della chiave di volta.

Nel caso in essere si predisporrà il rinforzo costituito da nastri di tessuto unidirezionale in fibra di carbonio con base pari a 50 cm e spessore pari a 0,18 mm disposti in singolo strato nelle unghie nella direzione della direttrice delle stesse in zona mediana e

da nastri di tessuto unidirezionale in fibra di carbonio con base pari a 50cm e spessore pari a 0,18mm disposti in doppio strato all'intradosso degli archi formati dall'intersezione delle unghie. Si procede quindi alla verifica dei rinforzi considerando la sezione più sollecitata degli elementi interessati, considerando un valore massimo del momento sollecitante le fasce in singolo strato pari a $M_{1d} = 381,3 \text{ kgm/ml}$ ed un valore massimo del momento sollecitante le fasce in doppio strato pari a $M_{2d} = 480,63 \text{ kgm/ml}$.

Come al punto precedente, lo studio delle volte a crociera viene ricondotto a quello di un arco di profondità unitaria.

Sono quindi consigliabili interassi p_f che soddisfino la seguente disuguaglianza:

$$p_f \leq 5 \cdot t + b_f$$

in cui t è lo spessore della volta e b_f è la larghezza dei rinforzi adottati.

Nel caso in essere, considerando rinforzi costituiti da lfasce in CFRP caratterizzate da una larghezza pari a 50 cm su un tavellone ($t = 10\text{cm}$), si ottiene:

$$p_f \leq 5 \cdot t + b_f \rightarrow 5 \cdot 10 + 50 = 100 \text{ cm}$$

Si opterà quindi per un rinforzo costituito da fasce in CFRP poste in opera ad un interasse pari a 100 cm.

Si sottolinea che di norma è consigliato agire su volte a crociera mediante applicazione di tessuti o lamine completa sull'estradosso o sull'intradosso mentre è sconsigliato eseguire interventi parziali, eseguiti in parte dell'intradosso ed in parte dell'estradosso.

Alla luce di quanto esposto si è optato per un rinforzo completo estradosso attraverso tessuti di larghezza pari a 50 cm e spessore pari a 0,18mm poste in opera ad un interasse di 100cm ed ancorate alle strutture verticali attraverso connettori, sempre in fibra di carbonio.

Si procede quindi al calcolo della tensione di progetto della lamina tipo di rinforzo.

Valutazione della resistenza nei confronti del distacco da supporto

In accordo a quanto prescritto al punto 5.2.3. delle CNR-DT 200 R1/2012, la deformazione massima attribuibile al rinforzo CFRP in sede di progettazione è pari a:

$$\varepsilon_{fd} = \min \left\{ \eta_a \cdot \frac{\varepsilon_{fk}}{\gamma_f}, \varepsilon_{fdd} \right\}$$

in cui ε_{fk} è la competente deformazione caratteristica a rottura, mentre ε_{fdd} è la deformazione massima del sistema di rinforzo all'atto del distacco intermedio incipiente dal supporto, di seguito calcolata.

Il valore del primo termine della precedente equazione, considerando un rinforzo in fibre di carbonio e resina epossidica in condizione di esposizione esterna assume il valore di $\varepsilon_1 = 1,56 \%$.

Per quanto concerne il secondo termine della medesima equazione occorre specificare che, nel rinforzo di paramenti murari mediante lamine e tessuti di materiale composito, il ruolo dell'aderenza tra muratura e composito assume grande importanza in quanto il meccanismo di rottura per distacco dal supporto è di tipo fragile e, dunque, indesiderabile. Nello spirito di gerarchia delle resistenze tale meccanismo di crisi non deve precedere lo schiacciamento anelastico della muratura.

Con riferimento a quanto prescritto al punto 5.3. delle CNR-DT 200 R1/2013, si distinguono due meccanismi distinti di distacco dal paramento murario delle lamine: il distacco di estremità, *end debording*, ed il distacco intermedio, *intermediate debording*, che si innesca da giunti di malta o da fessure trasversali nella muratura. Nel caso in essere il distacco di estremità è scongiurato dall'adozione di connettori meccanici in fibra di carbonio applicati alle estremità di ciascuna fascia di tessuto, occorre invece tenere in considerazione il distacco intermedio.

Tale meccanismo di distacco viene scongiurato contenendo il livello tensionale delle lamine entro una tensione limite di progetto definita come tensione di delaminazione per distacco intermedio. Si definisce quindi l'energia specifica di frattura come segue:

$$\Gamma_{fd} = \frac{k_b \cdot k_G}{FC} \cdot \sqrt{f_{bm} \cdot f_{btm}} = \frac{1,36 \cdot 0,0186}{1,2} \cdot \sqrt{3,2 \cdot 0,32} = 0,02133146$$

La tensione di progetto per delaminazione intermedia assume quindi un valore pari a:

$$f_{fd,2} = \frac{2}{\gamma_{fd}} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot E_f \cdot \Gamma_{fd}}{t_f}} = \frac{2}{1,2} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot 245000 \cdot 0,02133146}{0,18}} = 401,63 \text{ N/mm}^2$$

Il valore del secondo termine dell'equazione che definisce il valore massimo della deformazione ammissibile nel rinforzo assume un valore pari a $\epsilon_2 = 0,055 \%$.

La massima deformazione di progetto risulta quindi pari a $\epsilon_{fd} = 0,055 \%$, corrispondente ad una tensione di progetto massima pari a $f_{fd} = 401,63 \text{ N/mm}^2$.

Verifiche di Sicurezza

Si esegue quindi la verifica dei rinforzi, considerando i momenti sollecitanti ottenuti mediante codice di calcolo e le tensioni di progetto massime del rinforzo, di cui al punto precedente.

Considerando l'arco ideale più sollecitato nella direzione della direttrice dell'unghia tipo con estensione pari ad 1m, il momento sollecitante massimo sulla fascia di tessuto più sollecitata risulta pari a:

$$M_{sd} = 381,3 \text{ kgm/ml} \cdot 1,00 \text{ m} = 381,3 \text{ kgm}$$

Tale momento sollecitante induce un tiro nella fascia tipo in singolo strato pari a:

$$T_{sd} = 1525,02 \text{ kg/fascia}$$

Lo sforzo normale di trazione resistente per la singola fascia in singolo strato vale invece:

$$\text{Trd} = 3615 \text{ kg/fascia}$$

La verifica della sezione rinforzata più sollecitata risulta quindi soddisfatta.

Considerando invece l'arco ideale più sollecitato in corrispondenza dell'intersezione delle unghie con estensione pari ad 1m, il momento sollecitante massimo sulla fascia di tessuto più sollecitata risulta pari a:

$$M_{sd} = 480,63 \text{ kgm/ml} \cdot 1,00 \text{ m} = 480,63 \text{ kgm}$$

Tale momento sollecitante induce un tiro nella fascia pari a:

$$\text{Tsd} = 1922,522 \text{ kg/fascia}$$

Lo sforzo normale di trazione resistente per la singola fascia in doppio strato vale invece:

$$\text{Trd} = 3615 \text{ kg/fascia}$$

La verifica della sezione rinforzata più sollecitata risulta quindi soddisfatta.

Si sottolinea inoltre che le diverse fasce di carbonio predisposte in singolo strato forniscono inoltre una funzione di "cucitura" tra gli archi formanti l'intersezione delle unghie e possono quindi contribuire ad impedire la formazione di meccanismi in presenza di azioni sismiche.

Tutte le verifiche inerenti le volte a crociera risultano quindi soddisfatte.

Il tecnico incaricato

Dott. Ing. Nazarena Adorni

