

**Federazione degli Ordini degli Architetti della Toscana  
Fondazione Centro Studi Professione Architetto**

**CORSO DI AGGIORNAMENTO SUGLI STATI LIMITE E  
LE NORME TECNICHE PER LA PROGETTAZIONE  
IN ZONA SISMICA**

**Firenze, 25 gennaio 2008**

**Prof. Ing. Angelo D'Ambrisi**

**Dipartimento di Costruzioni - Università di Firenze**

*ESEMPI DI INTERVENTO SU  
EDIFICI STORICO-MONUMENTALI  
CON TECNICHE  
INNOVATIVE E TRADIZIONALI*

# Introduzione

---

- **A poco più di un decennio dall'avvento degli FRP materials nell'ambito dell'ingegneria civile gli esempi di applicazioni di tali materiali al costruito storico in Italia sono numerosissimi.**
  - **Nonostante l'enorme sforzo prodotto dai ricercatori nel settore sia in termini di sperimentazione che di modellazione, molte sono ancora le problematiche aperte relativamente all'utilizzo degli FRP materials sul costruito storico, in particolare in zona sismica.**
  - **Il problema dell'accostamento di materiali recenti e materiali innovativi al costruito storico è, comunque, più di natura culturale che tecnica.**
-

## Introduzione (*cont. 1*)

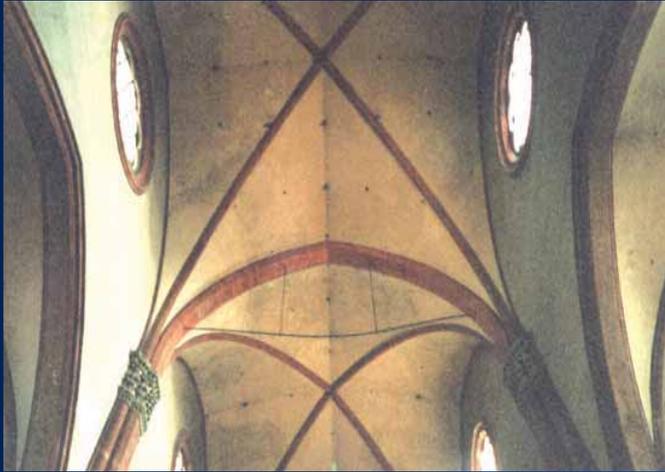
- **Gli edifici storico monumentali per essere tramandati hanno necessità di essere rinforzati al fine di superare le calamità naturali, in particolare i terremoti.**
- **Gli FRP materials, grazie alle loro prerogative, rappresentano un ottimo strumento per consolidare e ridurre la vulnerabilità sismica degli edifici storico-monumentali, soprattutto quando utilizzati in combinazione con interventi più tradizionali.**
- **Una riflessione particolare merita poi, come vedremo nel prosieguo, la problematica del proporzionamento e la valutazione dell'efficacia del rinforzo di organismi strutturali in muratura a mezzo di FRP, in altre parole “la progettazione del rinforzo in FRP”.**

## Introduzione (*cont. 2*)

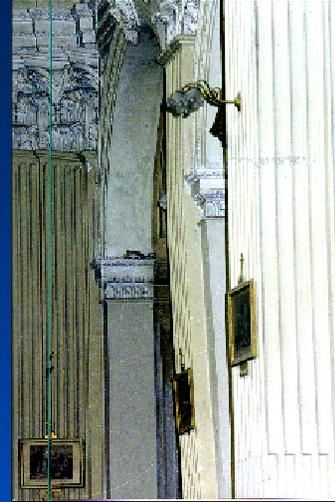
- **Vengono presentati alcuni esempi di interventi di consolidamento e miglioramento sismico di edifici storico-monumentali in cui si è fatto uso di FRP materials in associazione a tecniche tradizionali di rinforzo.**
- **Gli esempi presentati, pur riguardando casistiche e problematiche molto differenti fra loro, sono caratterizzati da una comune linea progettuale:**
  - **un uso molto discreto dei materiali innovativi;**
  - **una minimizzazione degli impatti visivi;**
  - **una rimovibilità assicurata quando il materiale o la tipologia applicativa non ha la validazione derivante da decennale pratica.**

## Introduzione (*cont. 3*)

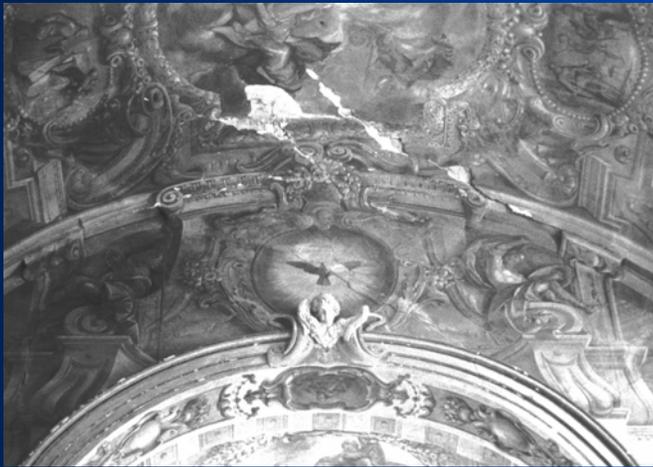
- Il primo è un intervento di consolidamento e di riduzione della vulnerabilità sismica di macro-elementi tipici dell'architettura gotica con uso esclusivo di FRP: le grandi volte a crociera della Basilica di S. Petronio in Bologna, interessate da un dissesto statico in atto da secoli.
- Il secondo ed il terzo riguardano il consolidamento ed il miglioramento sismico con FRP e tecniche tradizionali di due chiese di Modena, la chiesa di S. Biagio e quella di S. Barnaba, danneggiate dal sisma reggiano-modenese dell'ottobre 1996.
- Il quarto è un intervento di somma urgenza seguito dalla riabilitazione e miglioramento sismico del Torrizzo Gonzaga in Bagnolo in Piano (RE), danneggiato dal sisma reggiano-modenese dell'ottobre 1996. L'intervento, eseguito con FRP e tecniche tradizionali, prima ha scongiurato il crollo della torre e successivamente ne ha ridotto la vulnerabilità al sisma.



**Basilica di San Petronio** (Bologna)



**Chiesa di San Biagio** (Modena)



**Chiesa di San Barnaba** (Modena)

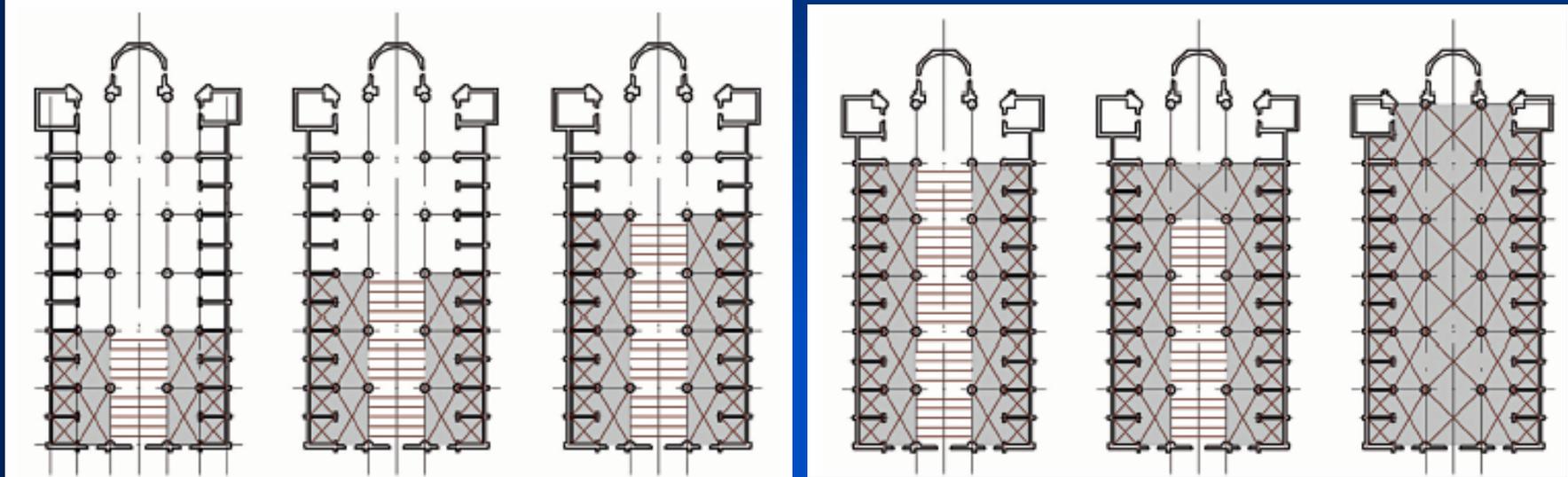


**Torrazzo Gonzaga** (Bagnolo in Piano - RE)

# Basilica di San Petronio (Bologna)



# Basilica di San Petronio (Bologna)



1391 - 1401

1441 - 1446

1447 - 1450

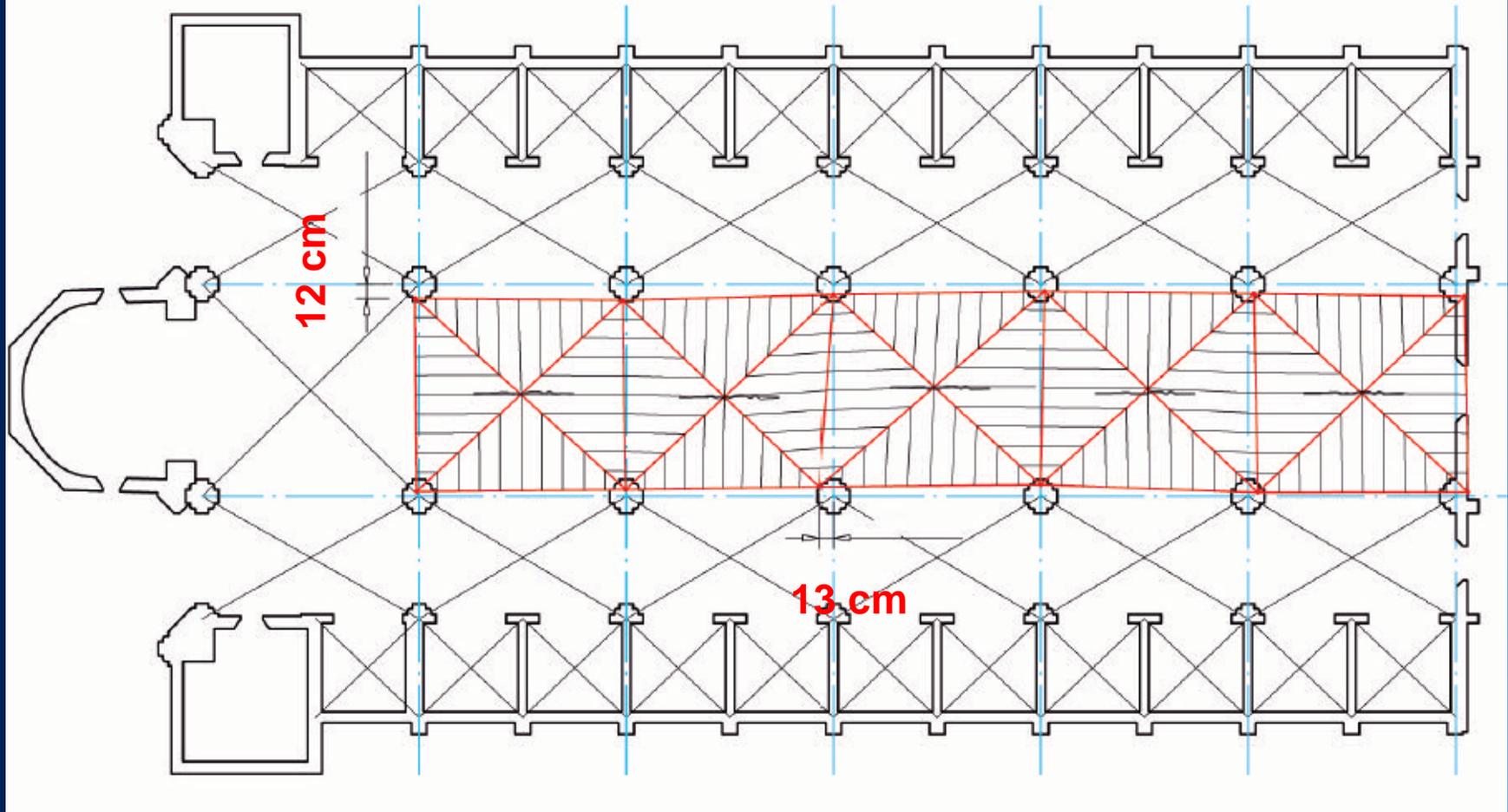
1458 - 1462

1587 - 1589

1646 - 1658

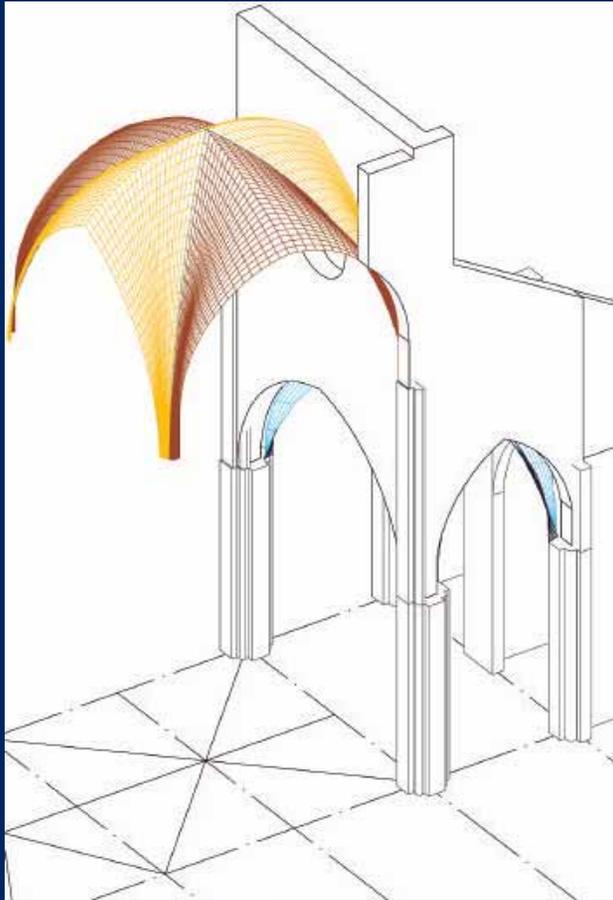
**Sviluppo storico della costruzione.**

# Basilica di San Petronio (Bologna)

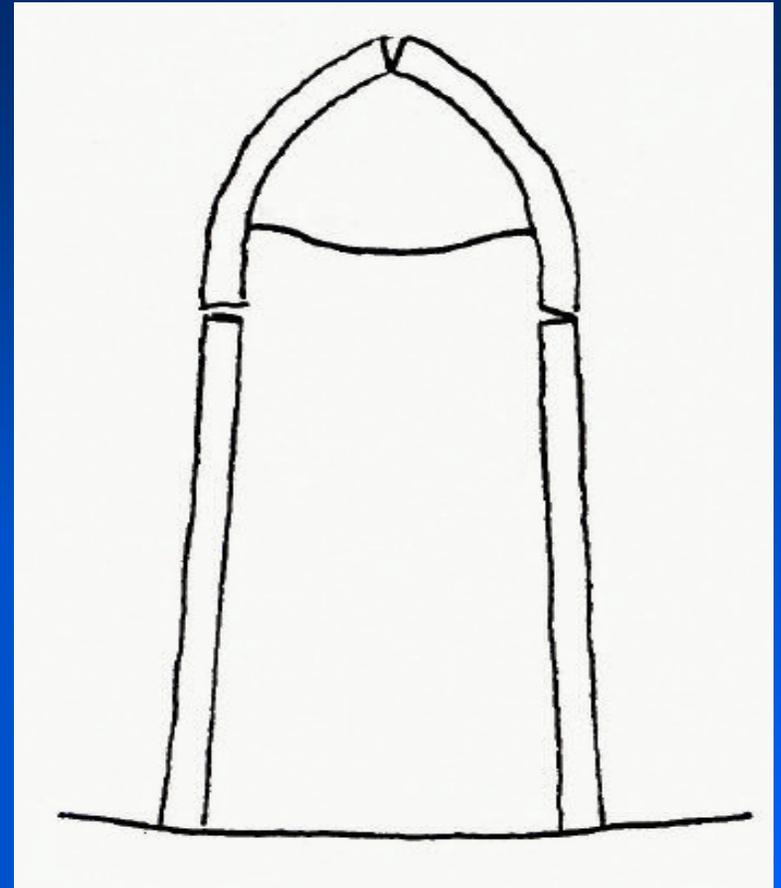


**Spostamenti nel piano di imposta delle crociere della navata centrale. Rappresentazione degli spostamenti aumentata dieci volte rispetto alla scala della pianta.**

# Basilica di San Petronio (Bologna)



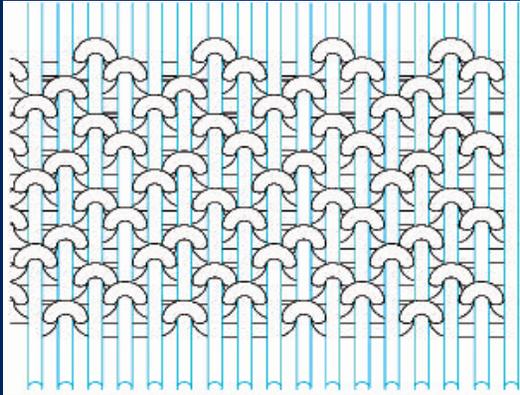
**Geometria della crociera tipo.**



**La deformata a corda lasca della catena dell'arcone.**

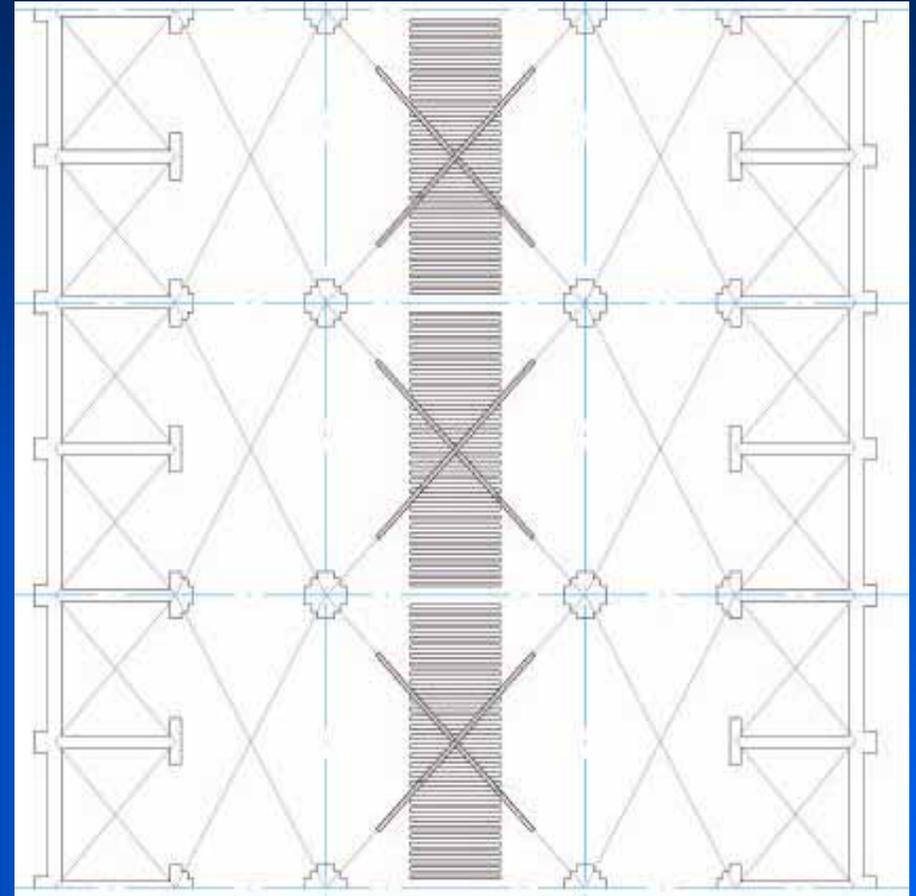
# Basilica di San Petronio (Bologna)

**PESO CARBONIO: 320 g/m<sup>2</sup>**  
**LARGHEZZA DELLA FASCIA: 20 cm**  
**SPESSORE NOMINALE: 0,17 mm**  
**RESISTENZA > 640 kg/cm**  
(per 1 cm di larghezza del tessuto)



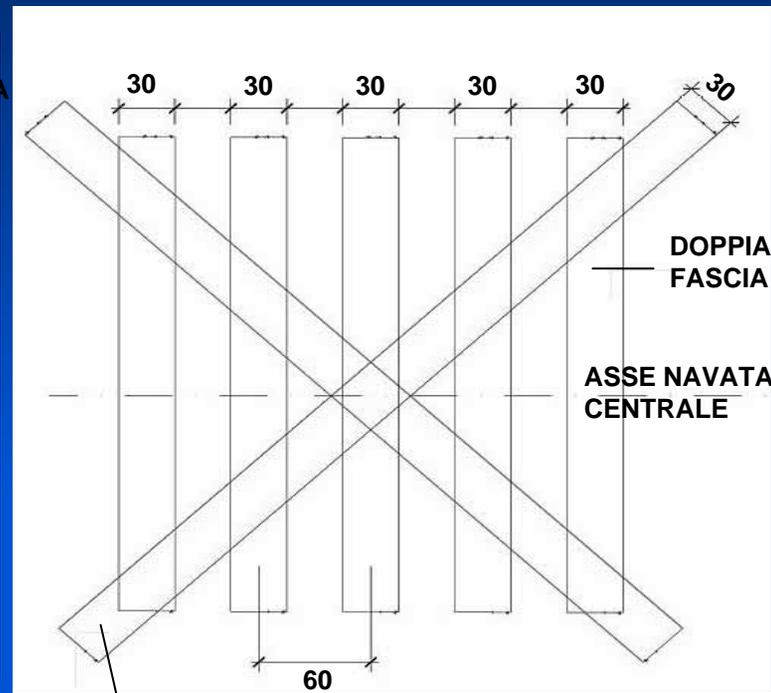
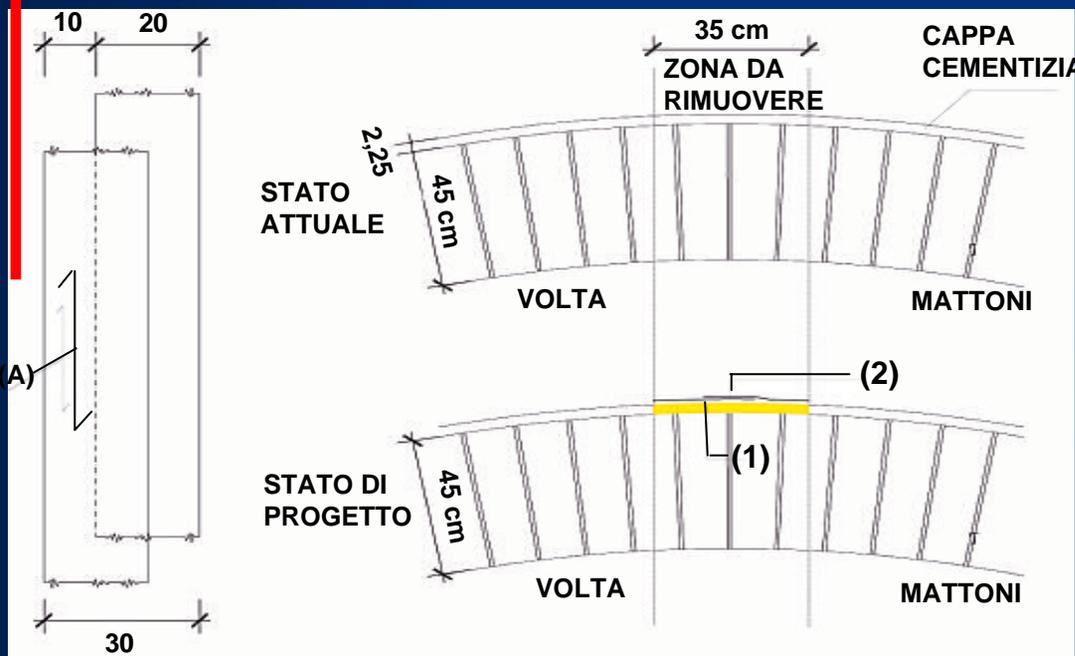
**ORDITO:**  
**FIBRE DI CARBONIO (12 K)**  
**TRAMA:**  
**FIBRE DI VETRO**

**Particolare del tessuto utilizzato.**



**Vista dell'estradosso delle volte.**  
**Disposizione delle fasce.**

# Basilica di San Petronio (Bologna)



(A) DIREZIONE FIBRE DI CARBONIO

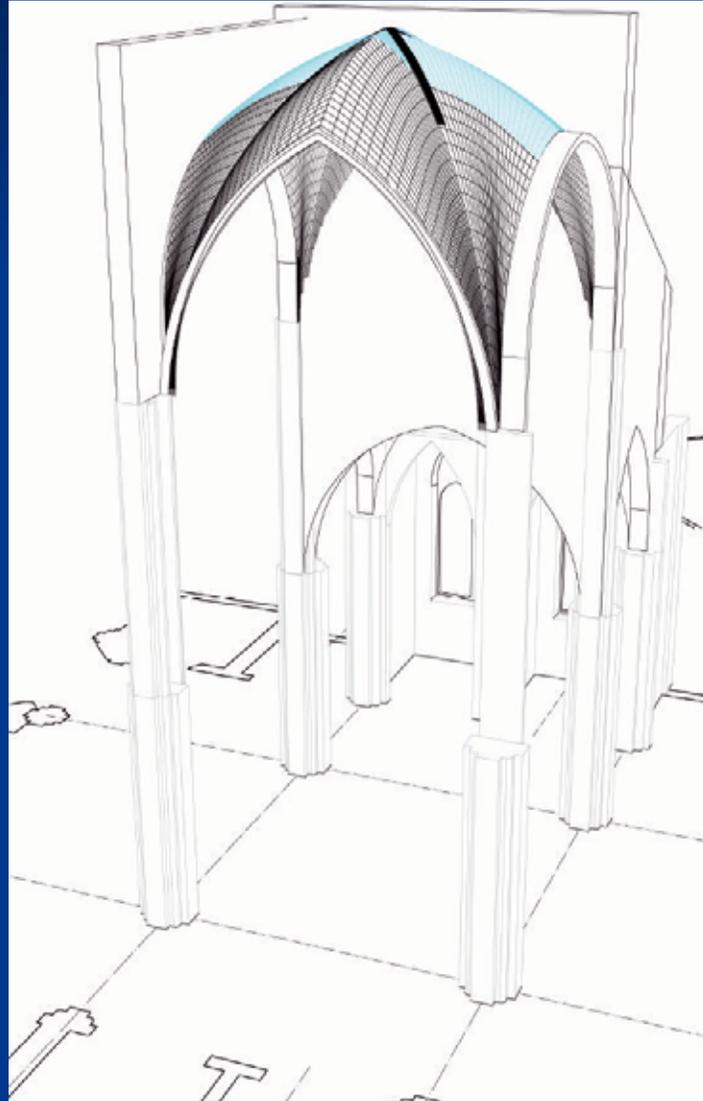
(1) MALTA DI RESINA (40%) EPOSSIDICA E SABBIA (60%) IN VOLUME, PER LIVELLAMENTO  $\pm$  SPESS. 2 cm CIRCA.

(2) DOPPIA FASCIA DI TESSUTO

DOPPIA FASCIA

Particolare dell'applicazione del composito.

# Basilica di San Petronio (Bologna)



**Vista assonometria della crociera rinforzata dal composito.**

# Basilica di San Petronio (Bologna)

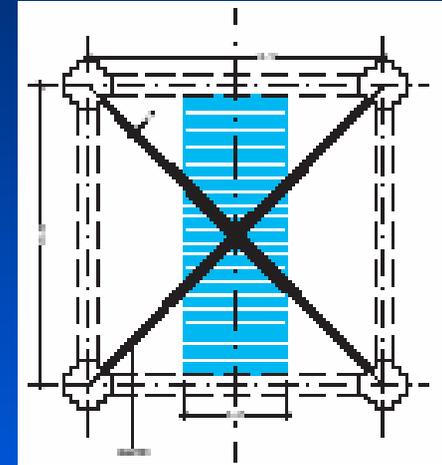


**Preparazione delle zone di applicazione del composito. Scarificazione delle zone con rimozione della cappa originaria. Si notano anche i sostegni delle catene lignee delle capriate che insistono sulle vele delle volte.**

# Basilica di San Petronio (Bologna)

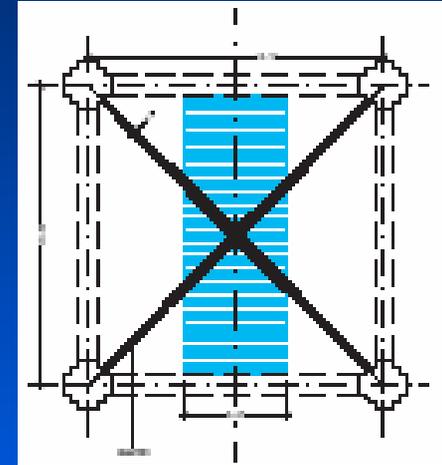


La preparazione del sottofondo delle fasce di composito su di esse del composito.



Particolare della disposizione delle fasce di composito sull'estradosso di una crociera.

# Basilica di San Petronio (Bologna)



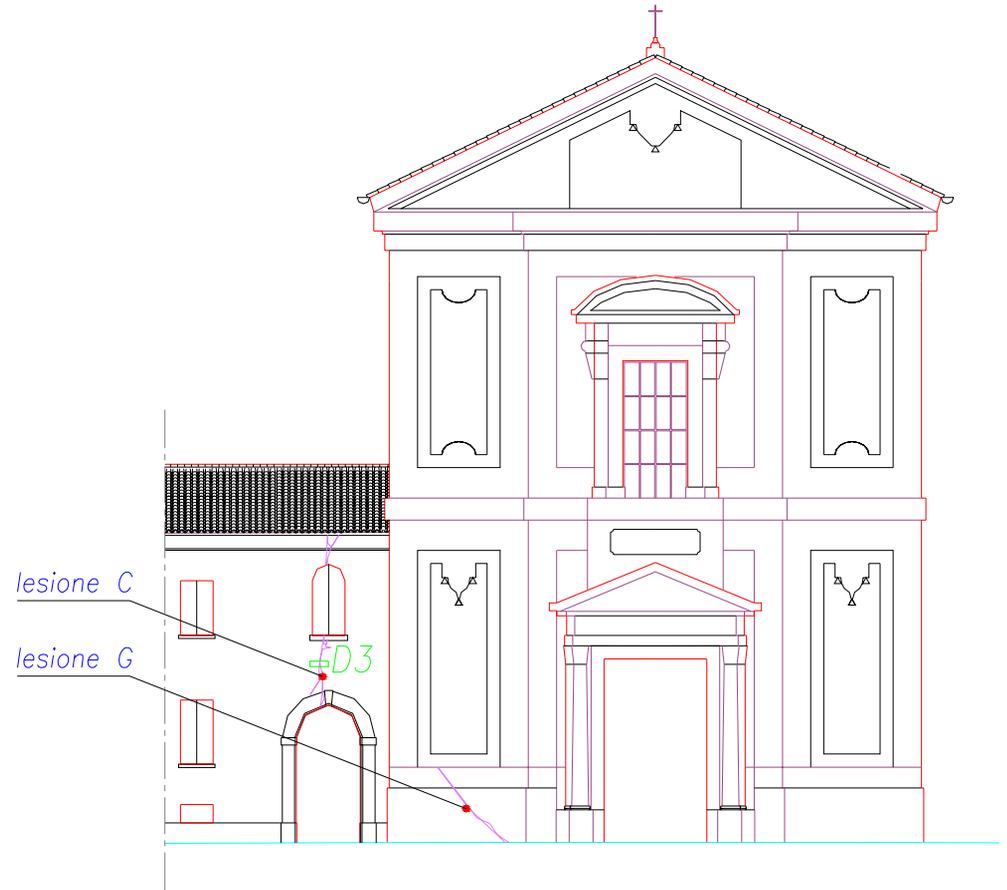
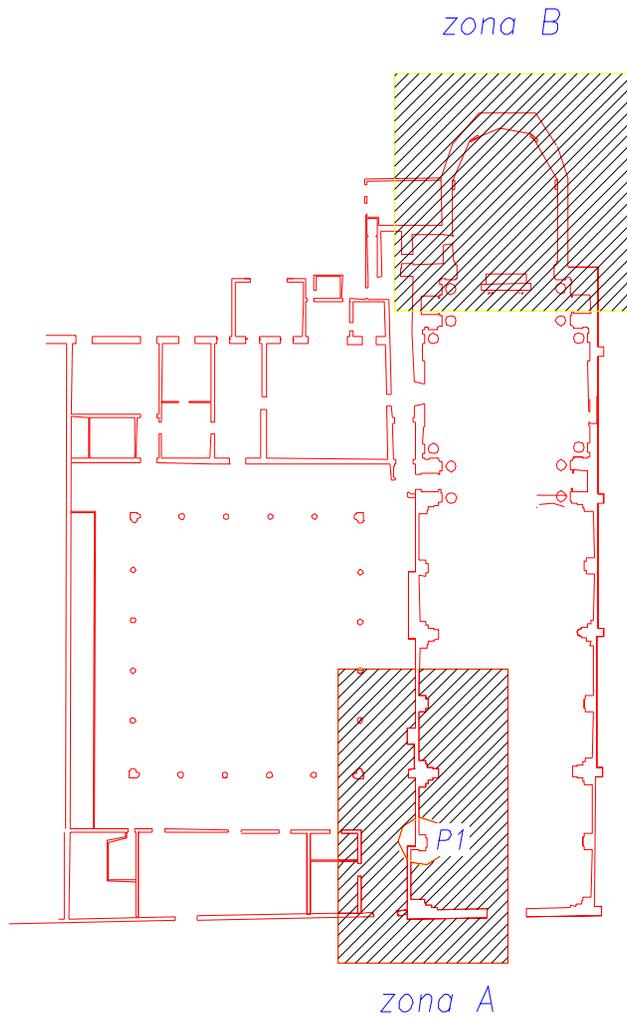
Particolare della disposizione delle fasce di composito sull'estradosso di una crociera.

Il composito formato nella sede predisposta.

# Chiesa di San Biagio (Modena)

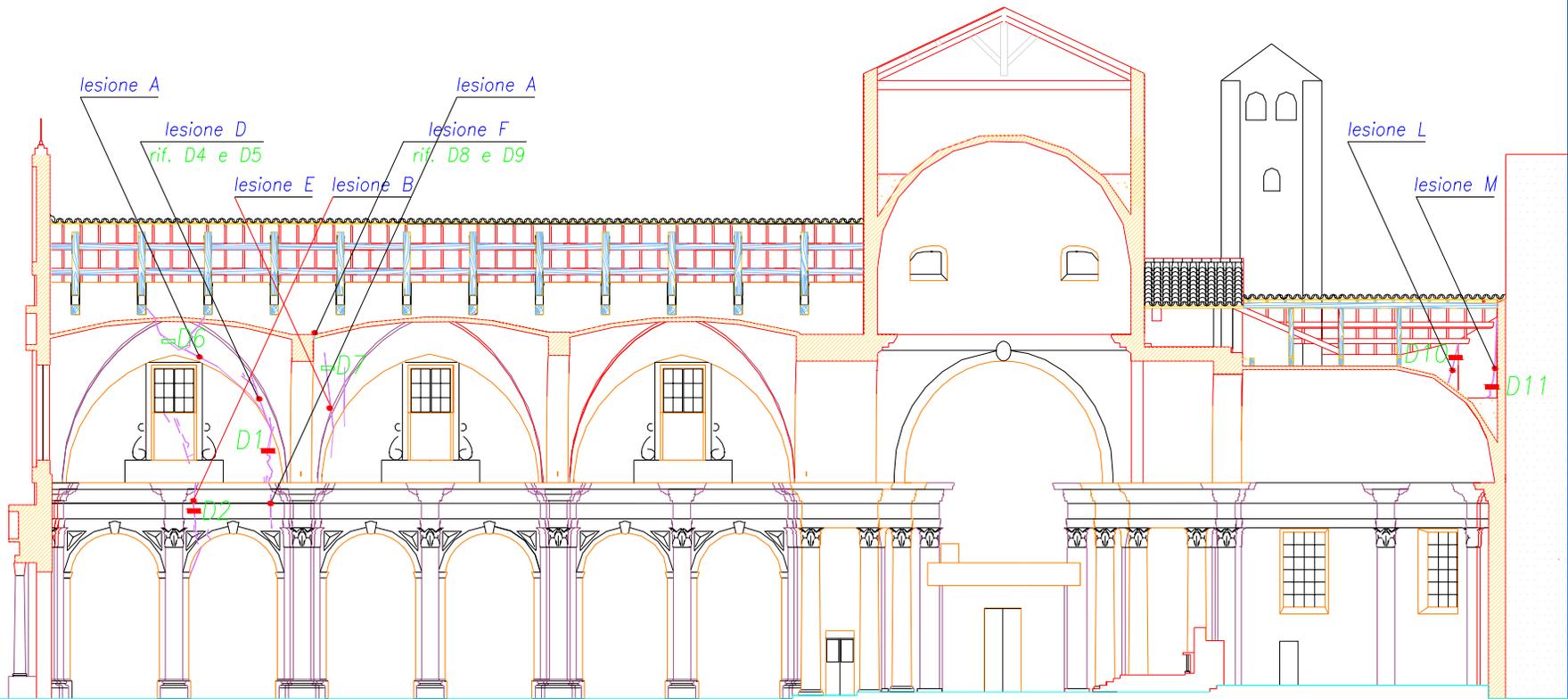


# Chiesa di San Biagio (Modena)



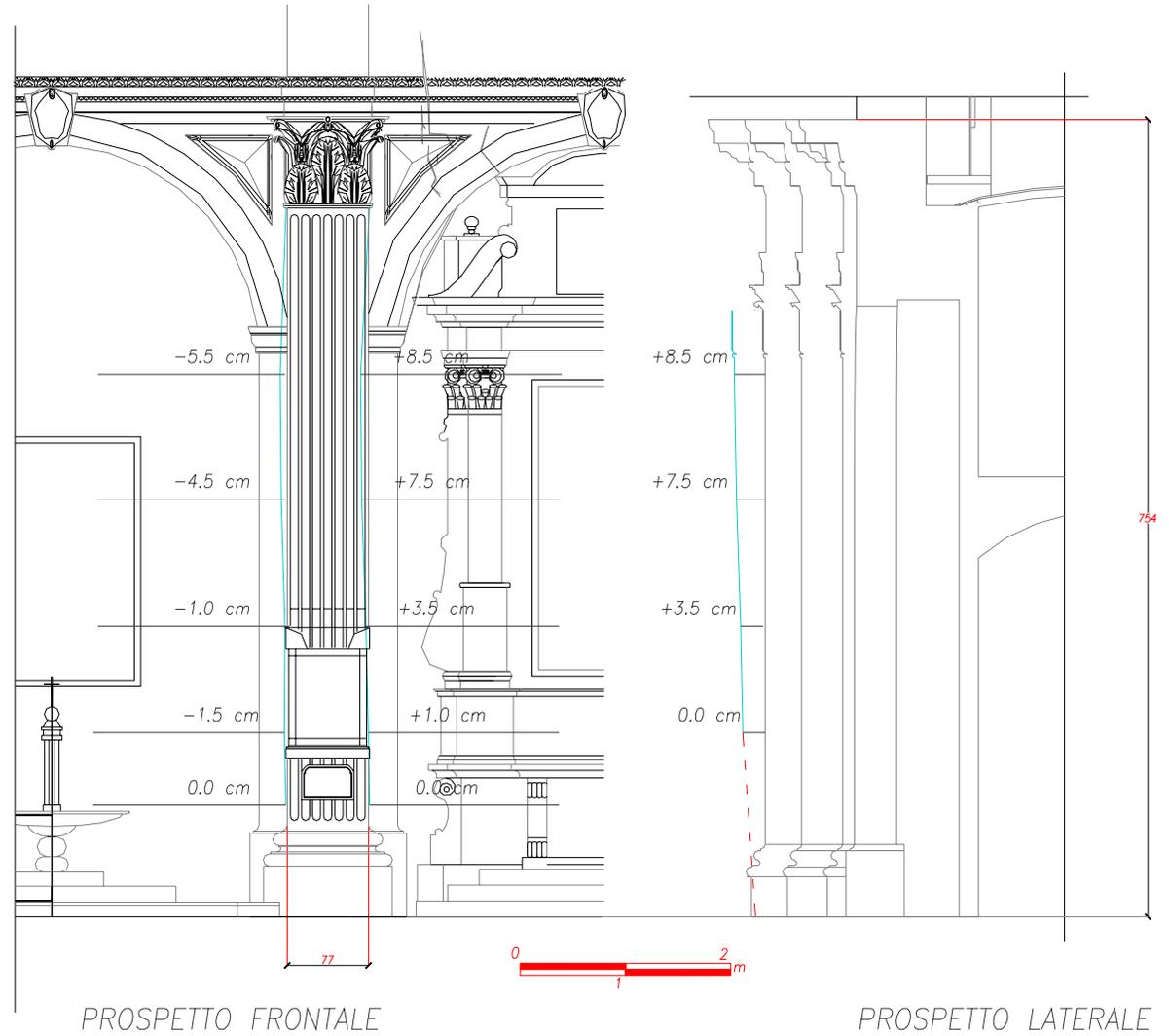
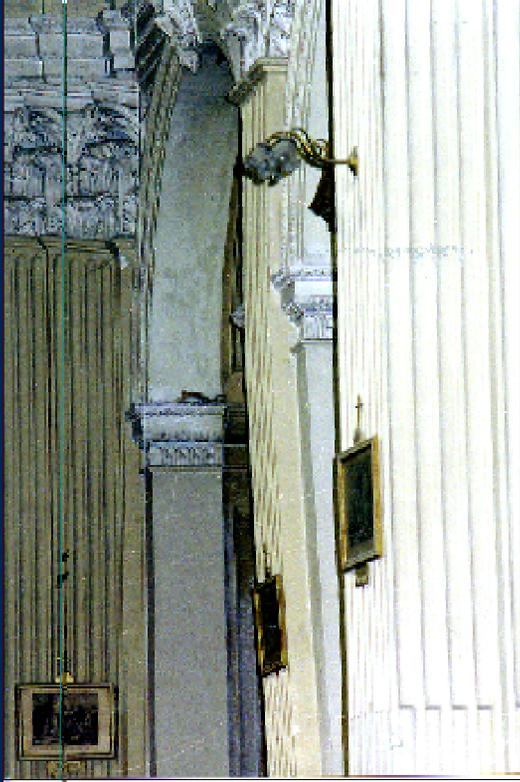
**Localizzazione dei dissesti**

# Chiesa di San Biagio (Modena)

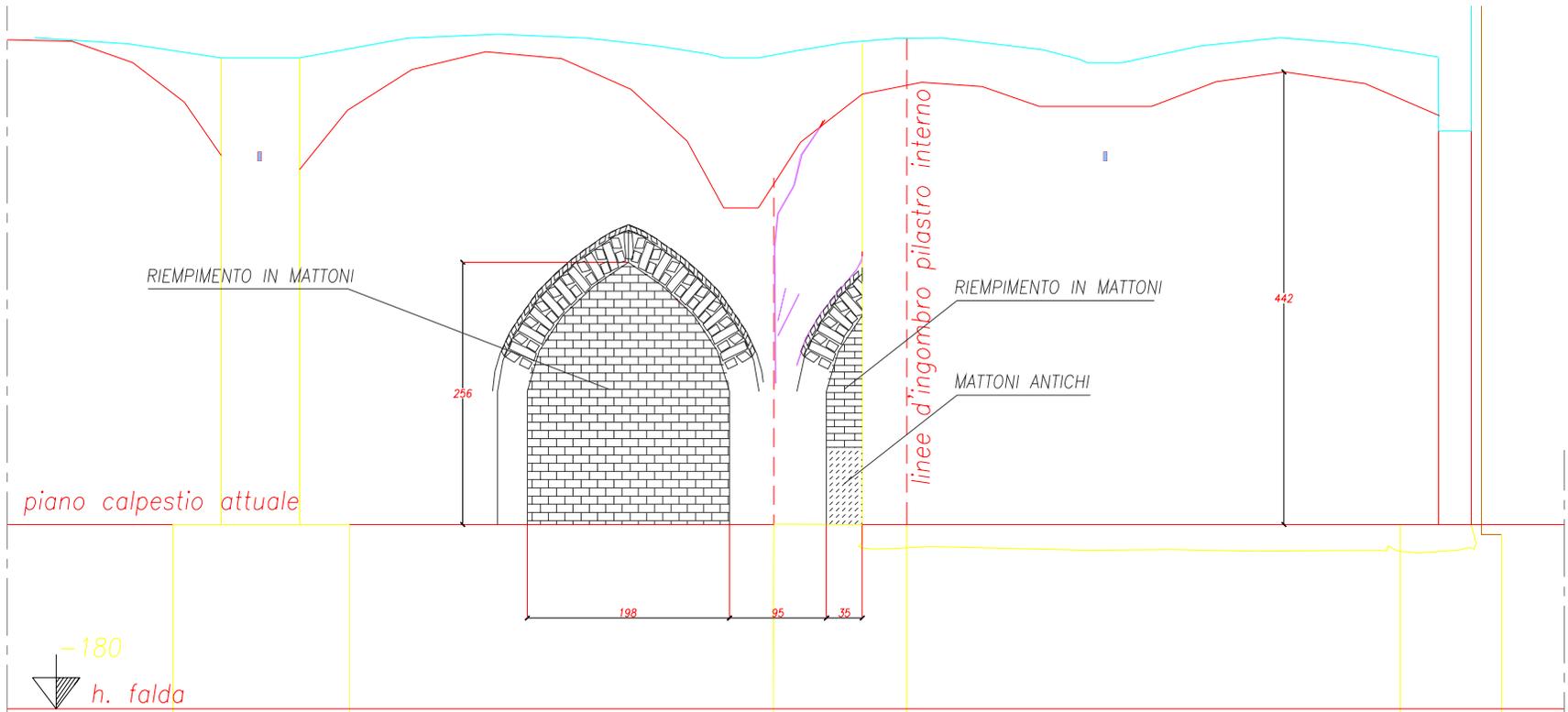
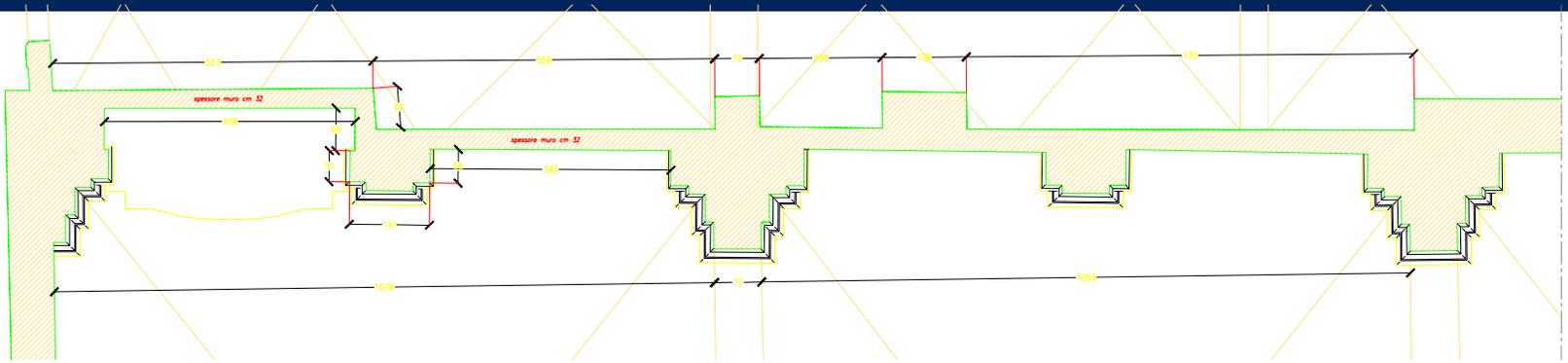


Quadro fessurativo

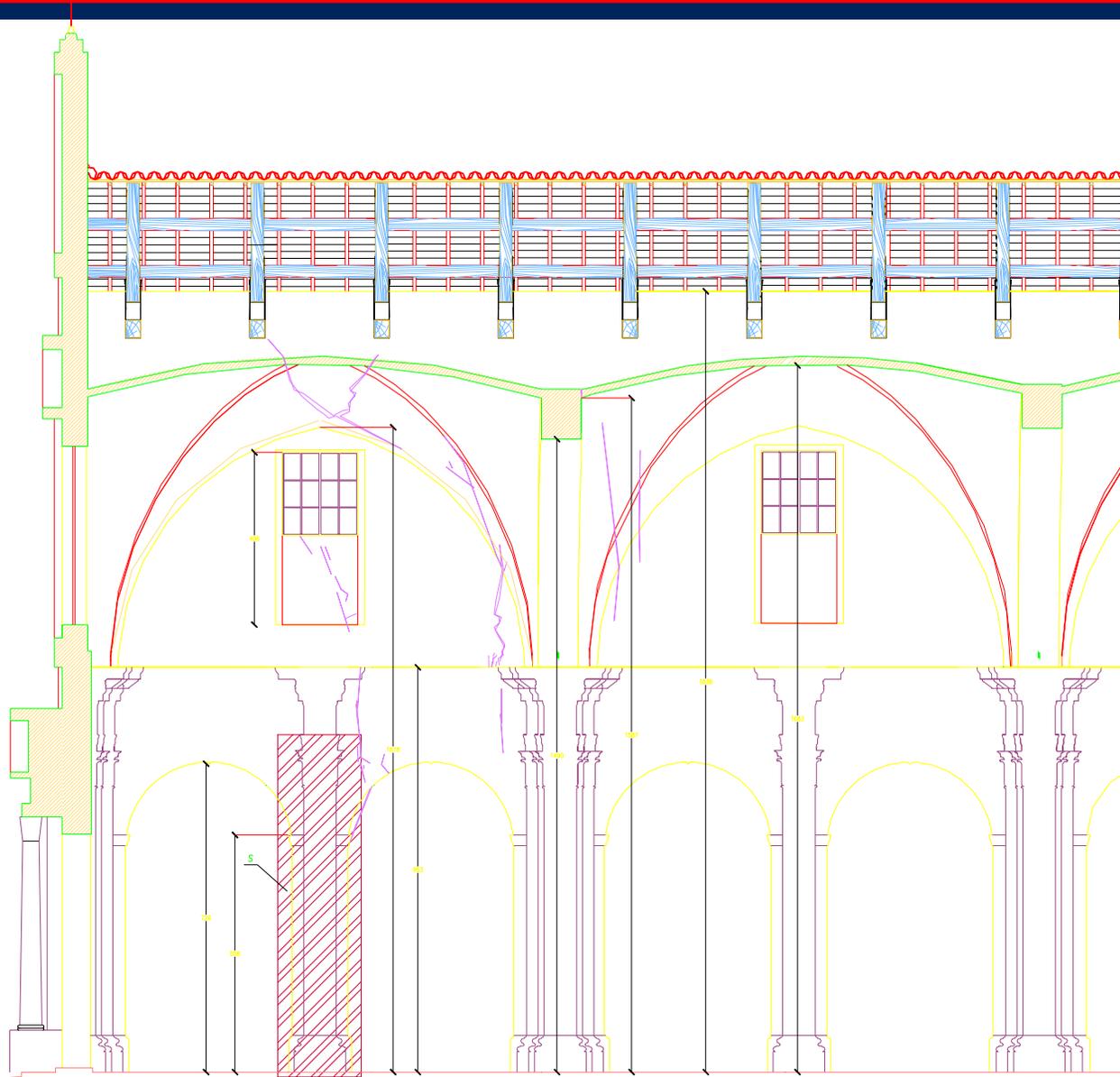
# Chiesa di San Biagio (Modena)



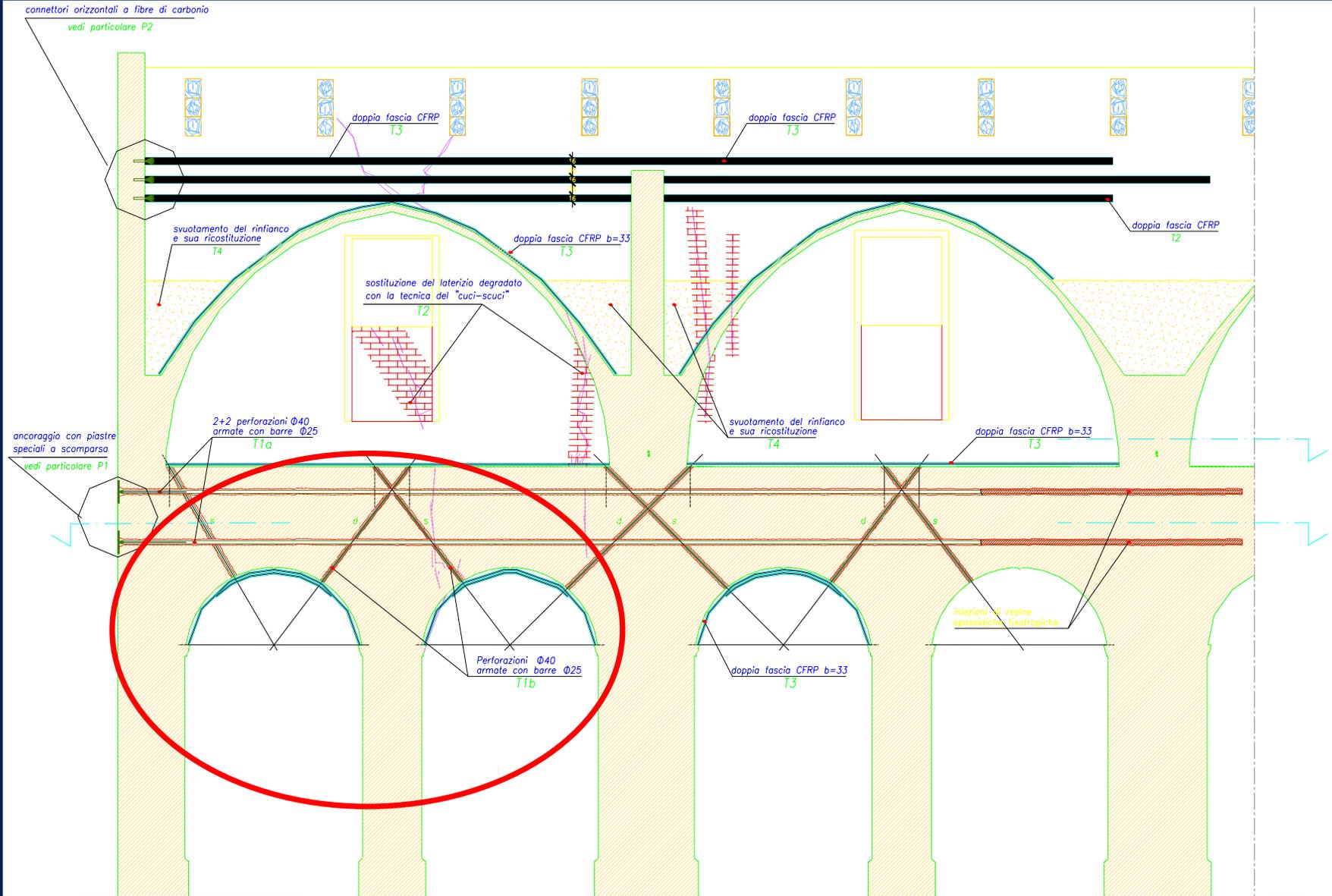
# Chiesa di San Biagio (Modena)



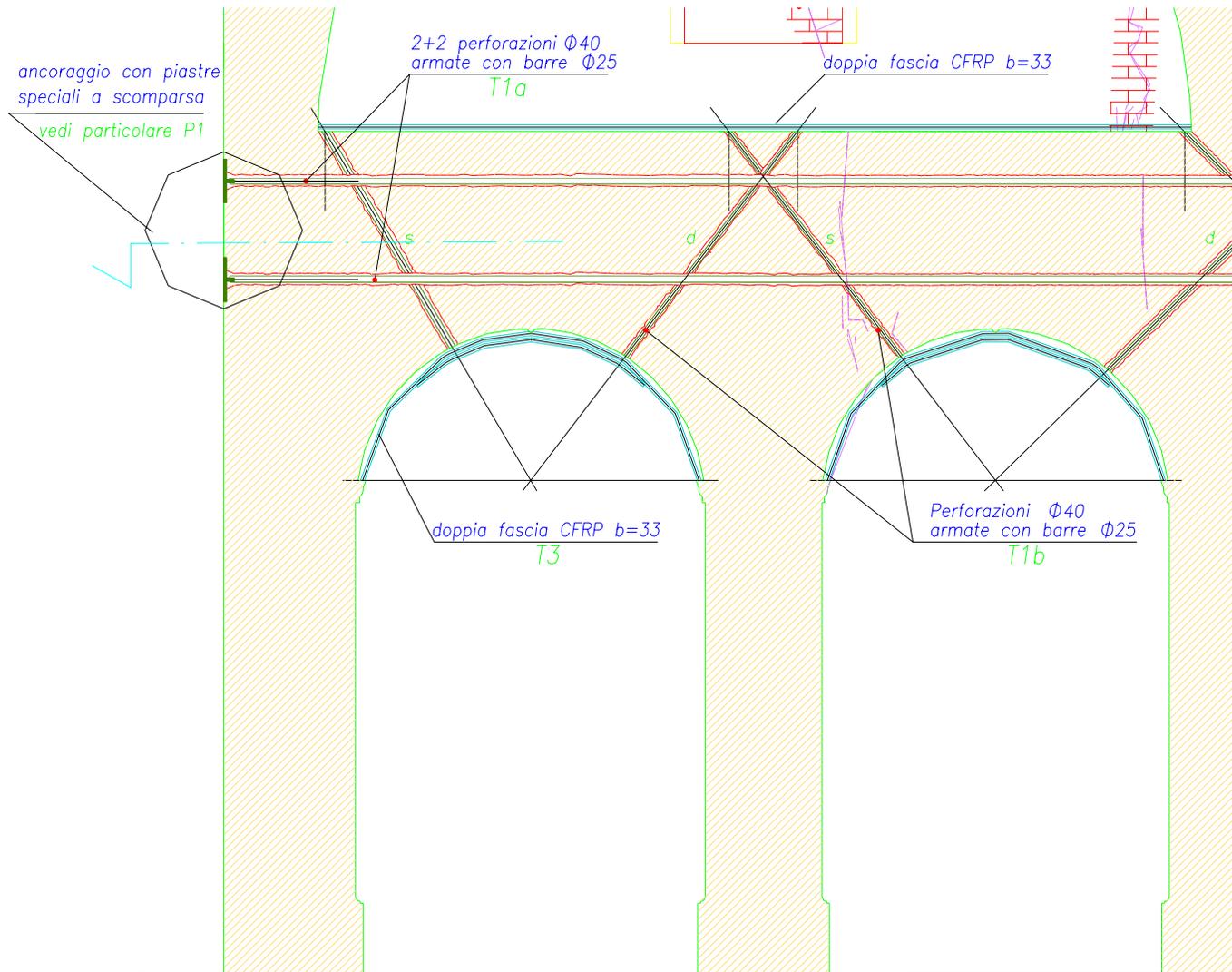
# Chiesa di San Biagio (Modena)



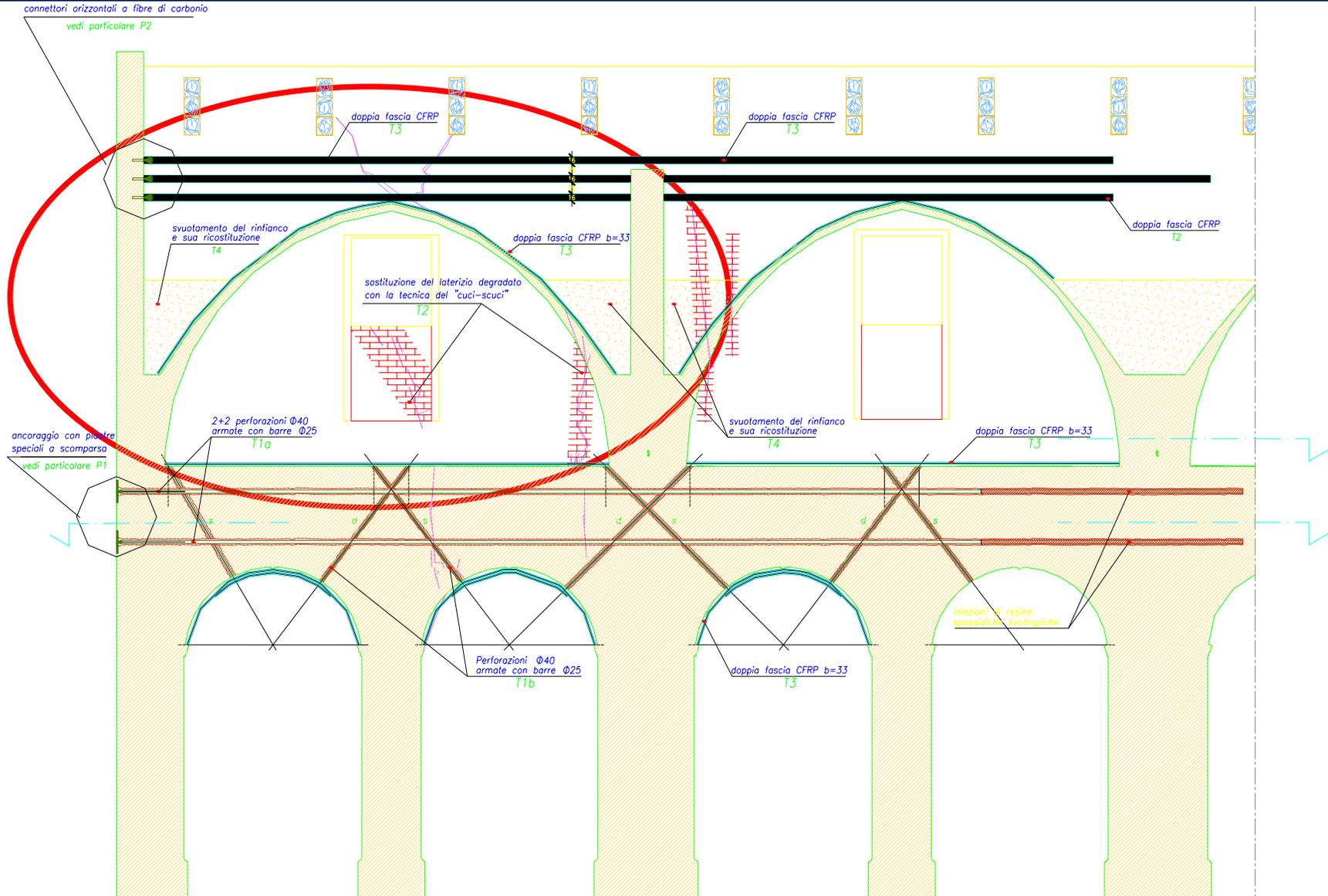
# Chiesa di San Biagio (Modena)



# Chiesa di San Biagio (Modena)

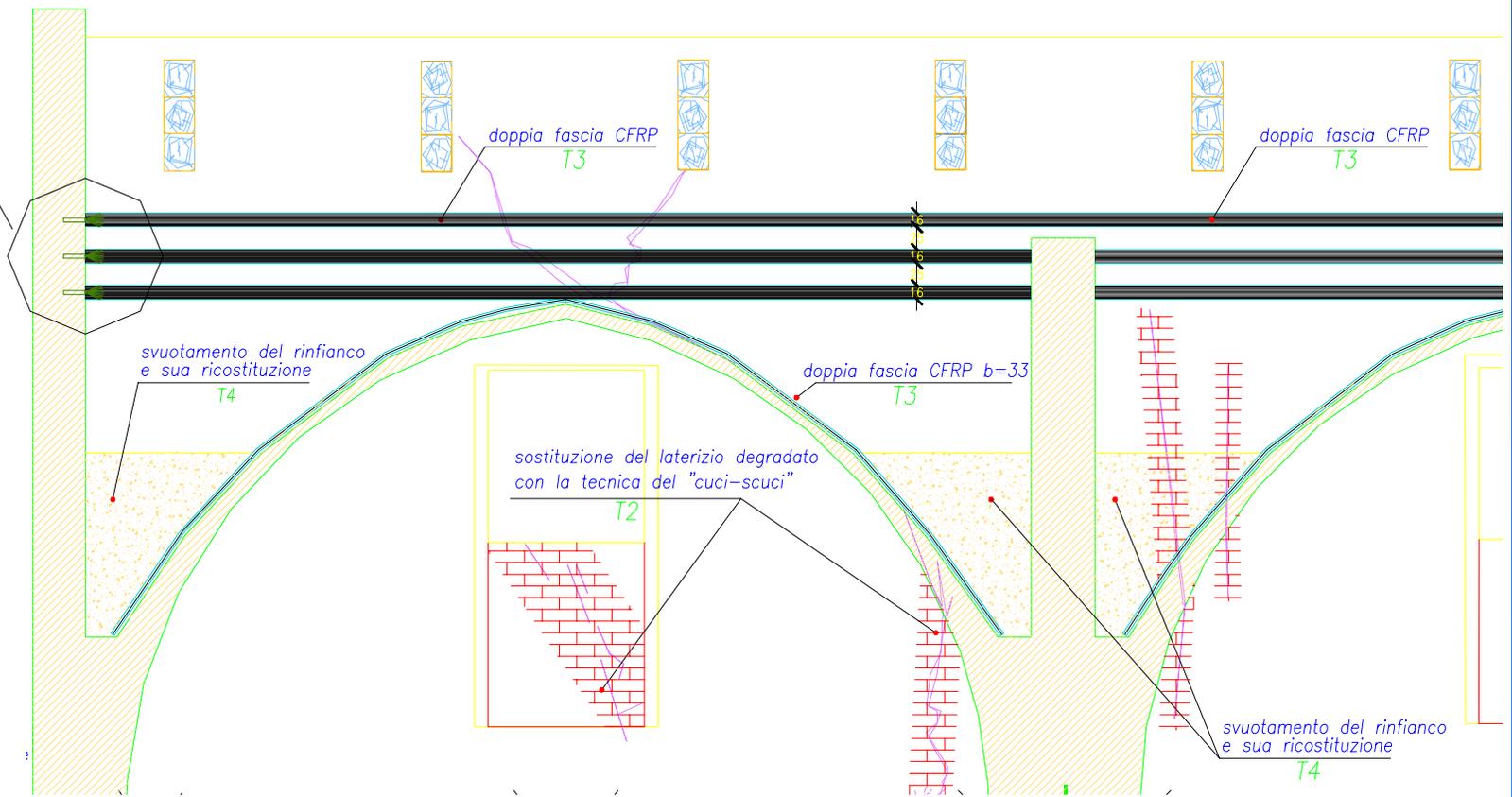


# Chiesa di San Biagio (Modena)



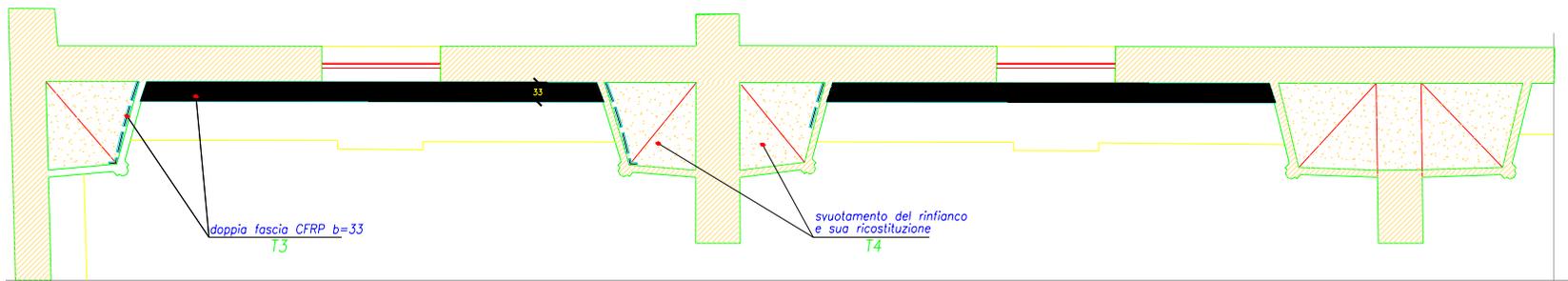
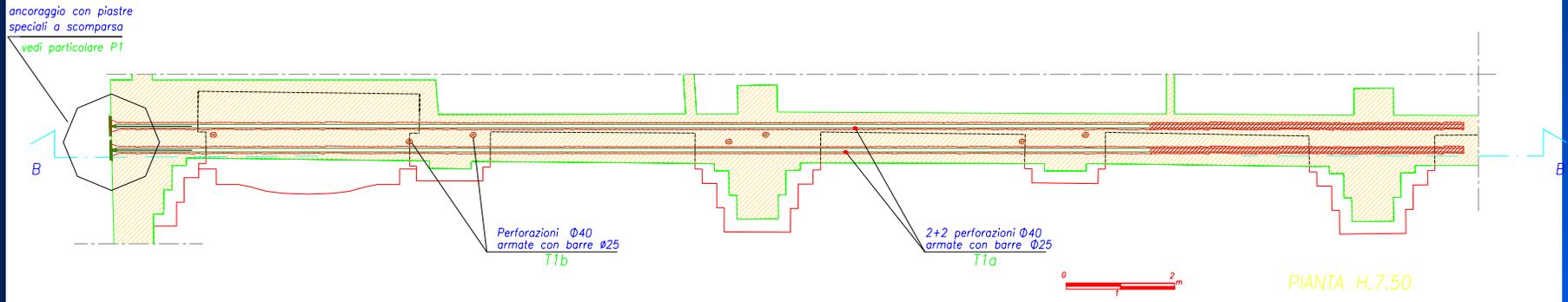
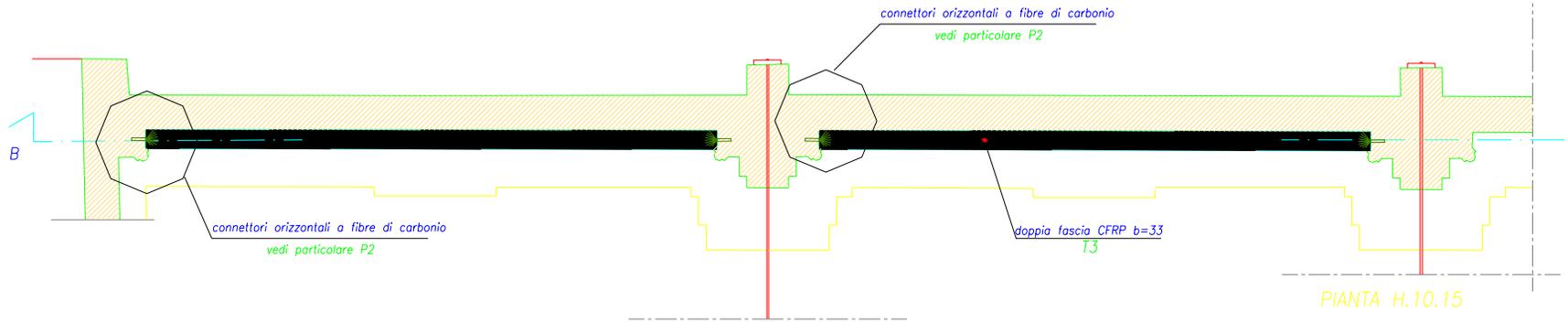
connettori orizzontali a fibre di carbonio

vedi particolare P2

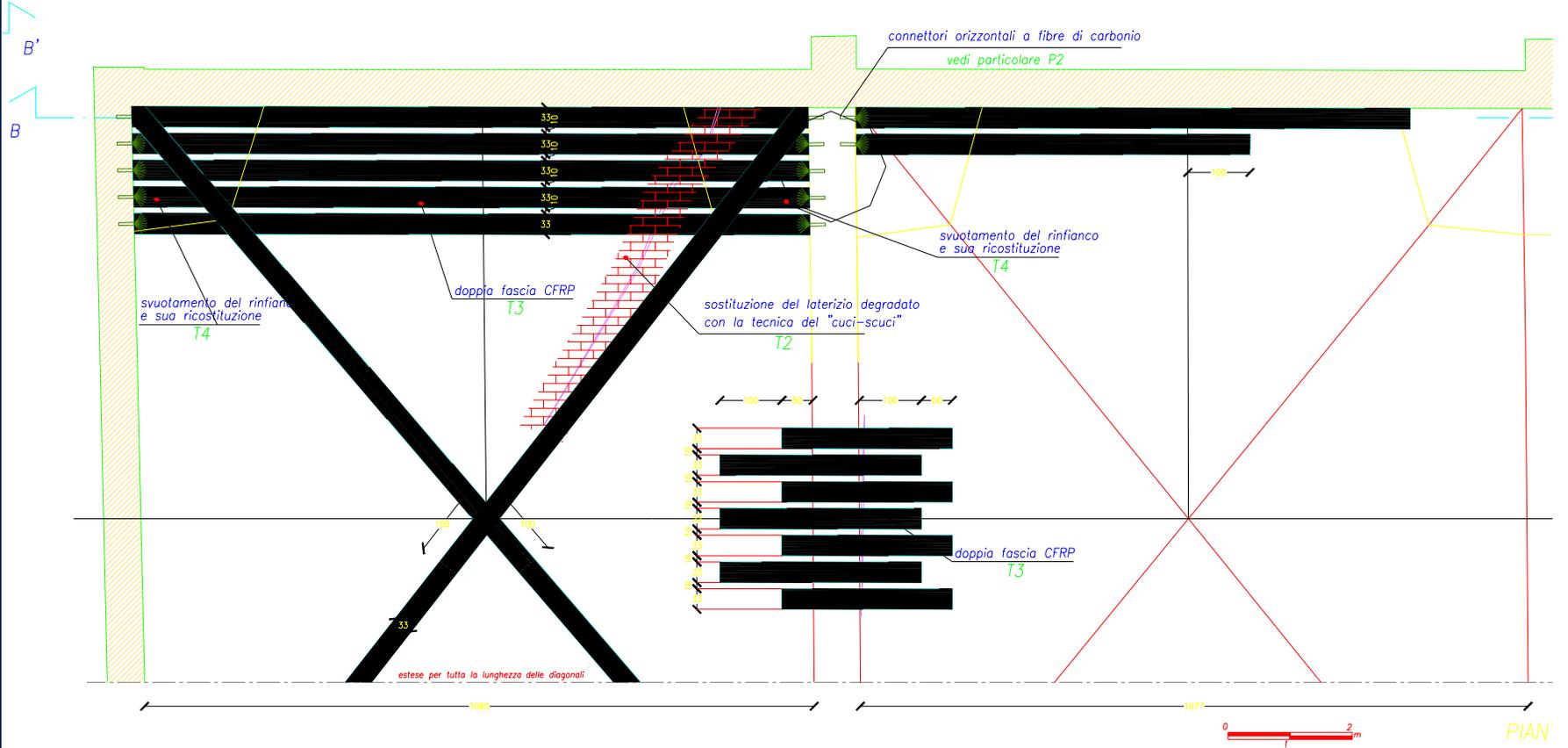


svuotamento del rifianco e sua ricostituzione T4

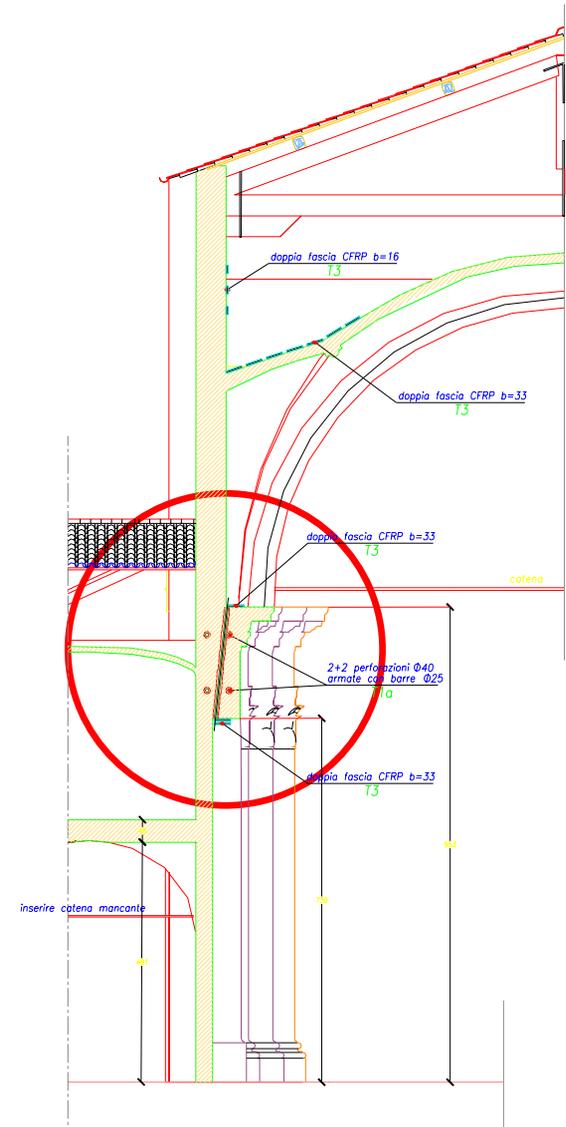
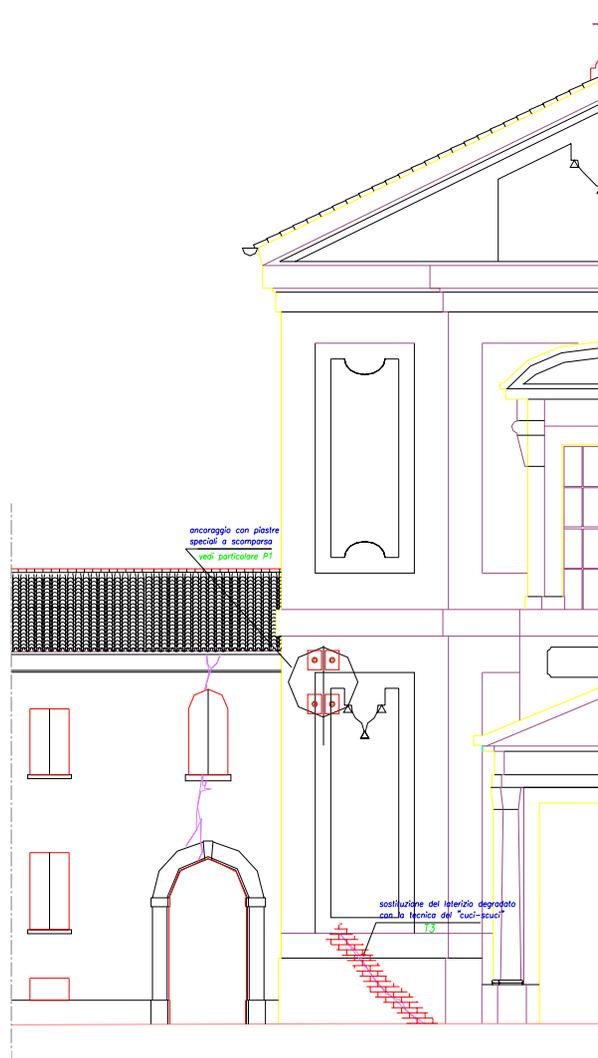
# Chiesa di San Biagio (Modena)



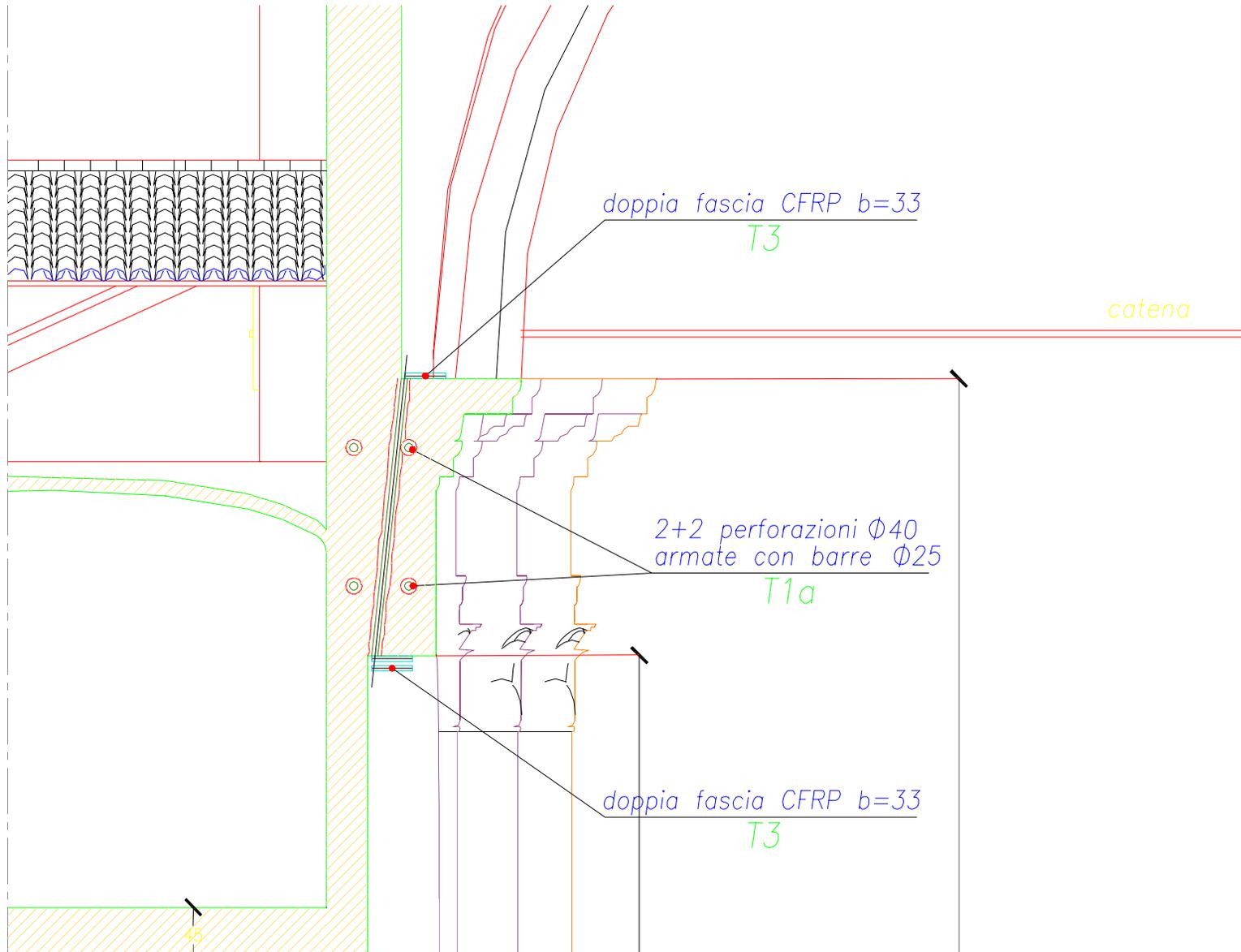
# Chiesa di San Biagio (Modena)



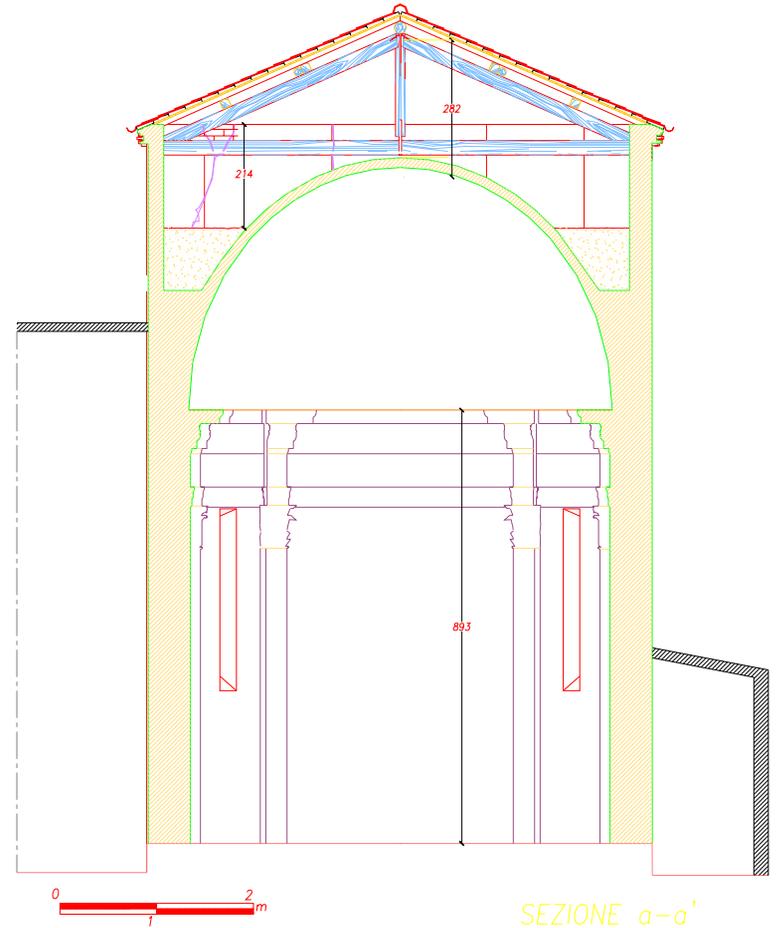
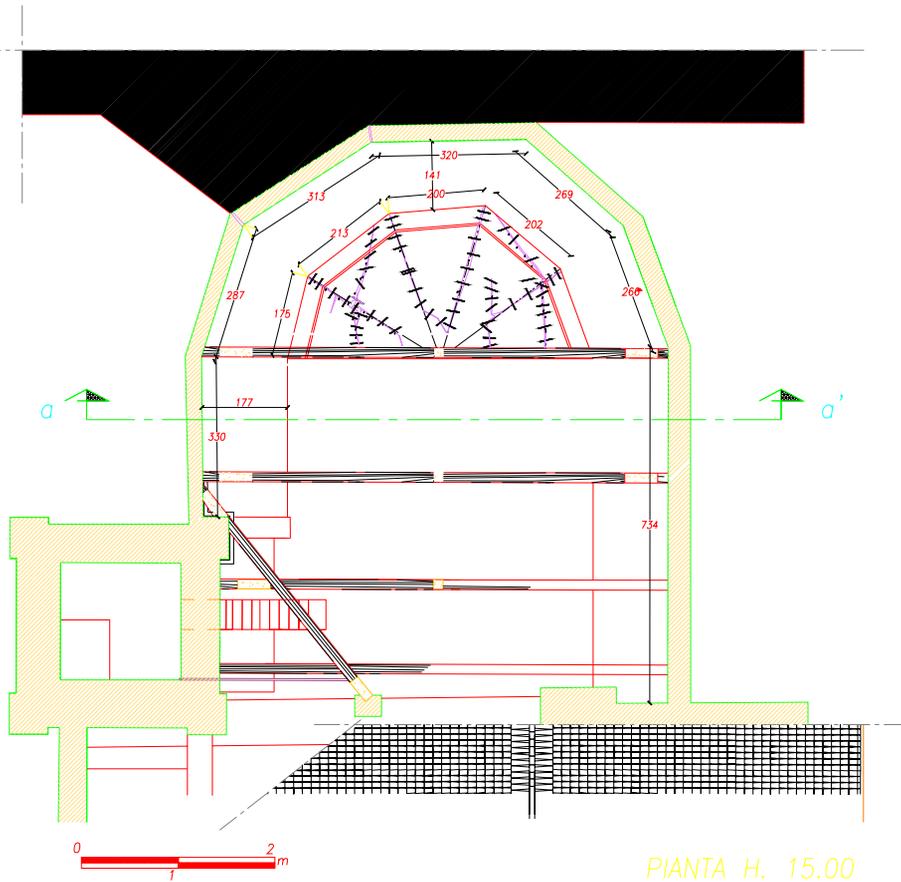
# Chiesa di San Biagio (Modena)



# Chiesa di San Biagio (Modena)

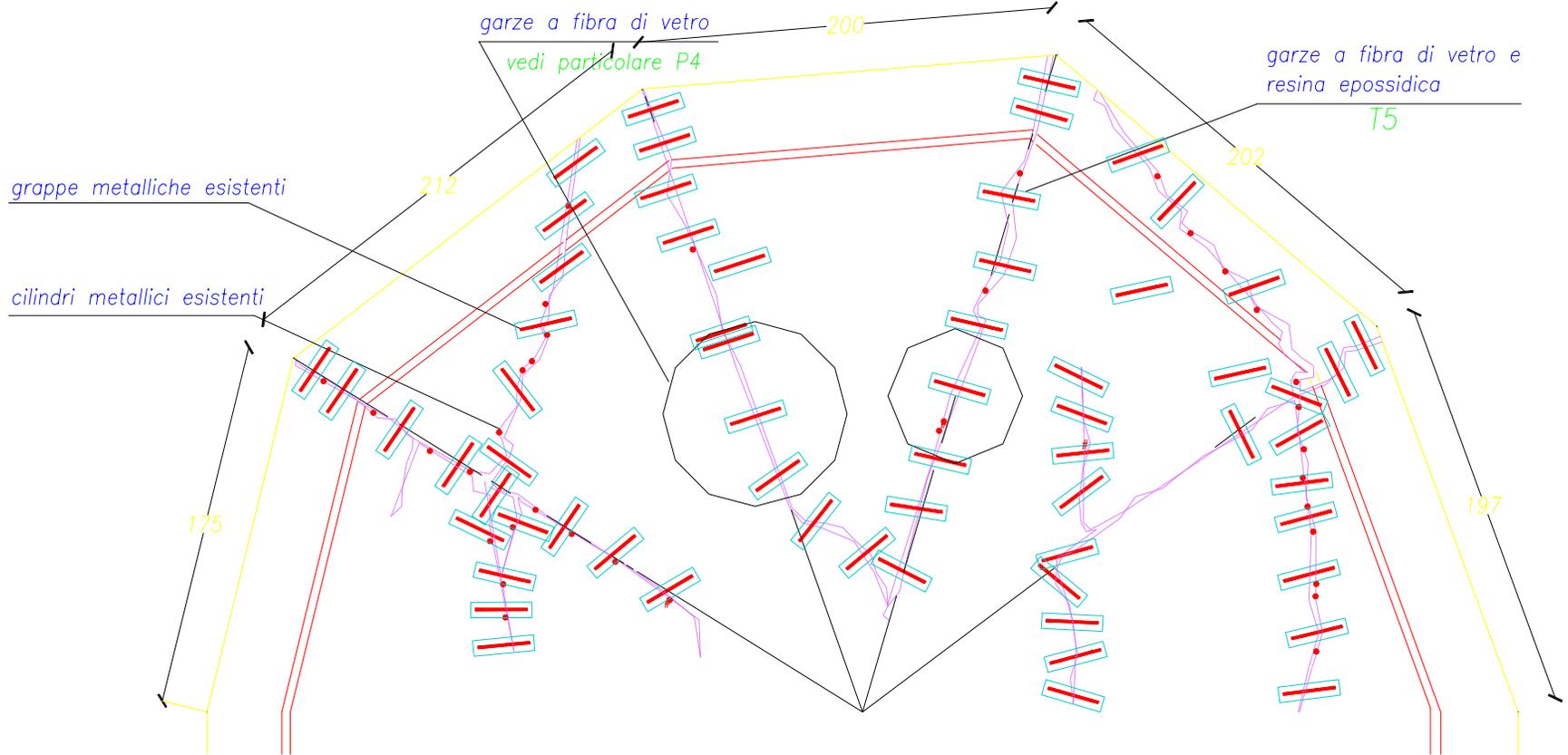


# Chiesa di San Biagio (Modena)





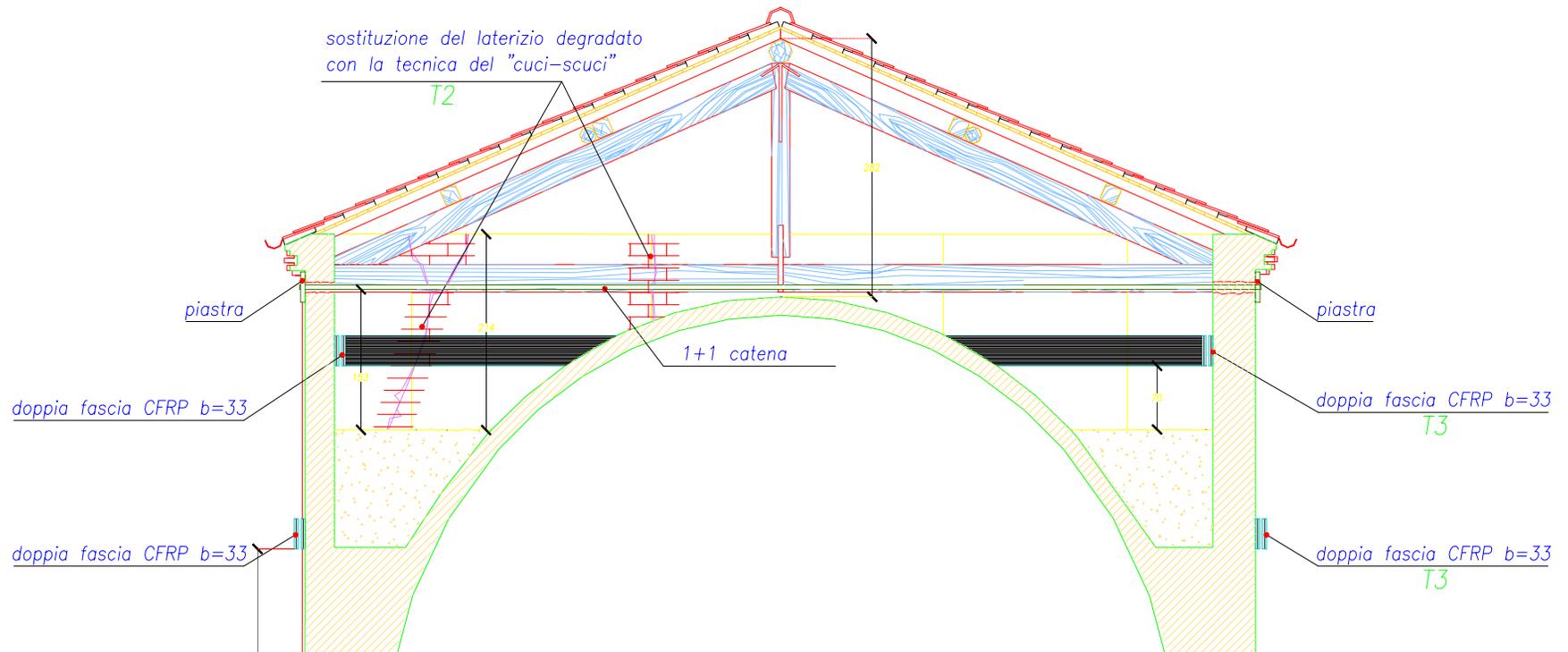
# Chiesa di San Biagio (Modena)



# Chiesa di San Biagio (Modena)

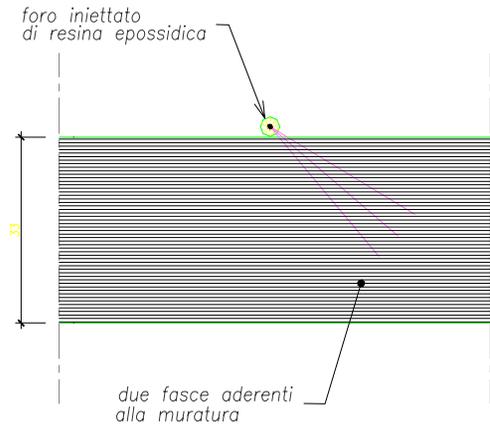


# Chiesa di San Biagio (Modena)



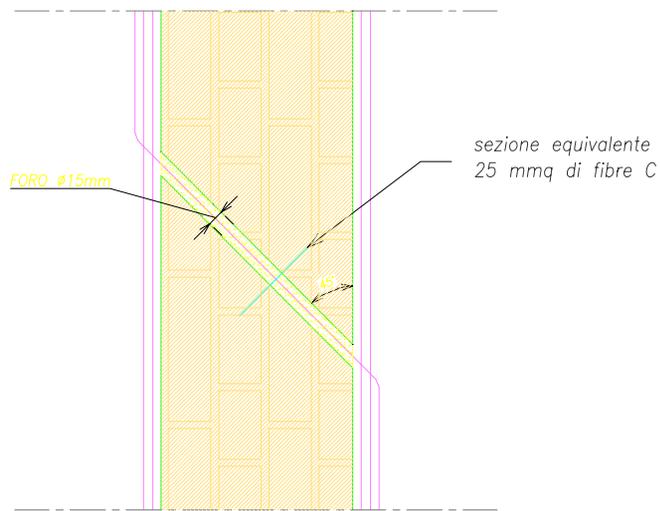


# Chiesa di San Biagio (Modena)



prospetto

scala 1:10



pianta

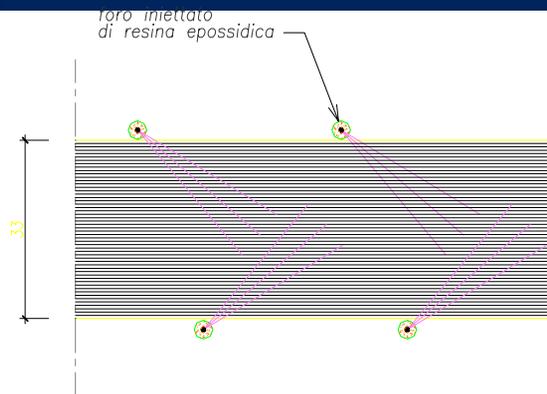
fuorisca

## CONNETTORI OBLIQUI PASSANTI A FIBRE DI CARBONIO

La lavorazione va eseguita previa applicazione del 1° e 2° strato di composito sulla muratura da entrambe le facce.

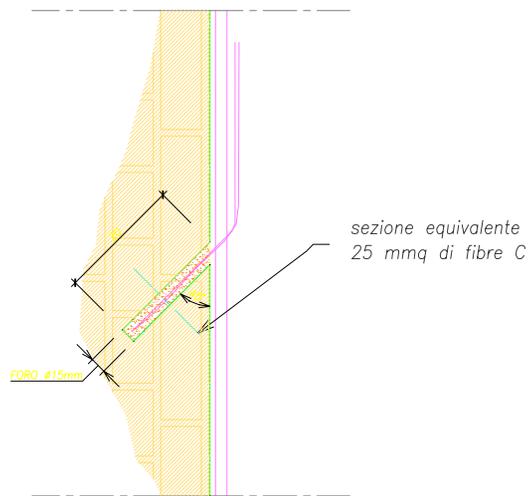
1. FORO PASSANTE INCLINATO A 45° ø15mm
2. FORMAZIONE DEL MAZZETTO DI FIBRE SECICHE DI CARBONIO DI SEZIONE EQUIVALENTE PARI A 25mm<sup>2</sup> E DI LUNGHEZZA  $L=L_f+60\text{cm}$  CON  $L_f$ =LUNGHEZZA FORO
3. INSERIRE CON STILETTO NEL FORO PASSANTE
4. INIEZIONE A RIFIUTO DI RESINA EPOSSIDICA NEL FORO
5. SPALMATURA DI RESINA EPOSSIDICA PER INCOLLAGGIO DEL CIUFFO DI FIBRE ALLA FASCIA SOTTOSTANTE (ENTRAMBI I LATI DEL FORO)

# Chiesa di San Biagio (Modena)



prospetto

scala 1:10



pianta

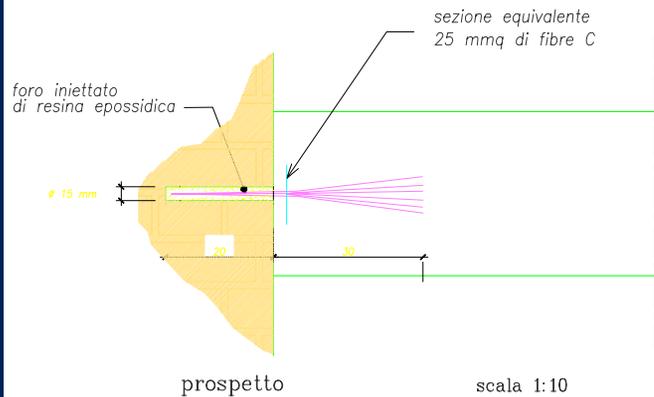
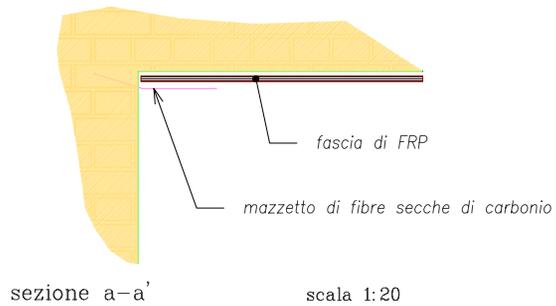
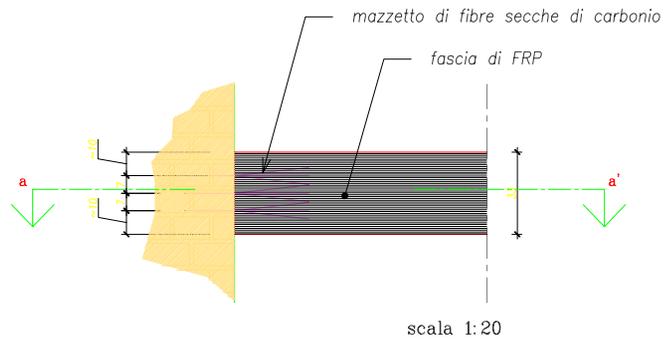
fuorisca

## CONNETTORI OBLIQUI A FIBRE DI CARBONIO

La lavorazione va eseguita previa applicazione del 1° e 2° strato di composito sulla muratura

1. FORO INCLINATO A 45°  $\phi$ 15 mm L=20 cm
2. FORMAZIONE DEL MAZZETTO DI FIBRE SECCHE DI CARBONIO DI SEZIONE EQUIVALENTE PARI A 12.5mm E DI LUNGHEZZA L=1m
3. RIPIEGATURA DEL MAZZETTO A META' LUNGHEZZA E INSERIMENTO CON STILETTO A FONDO FORO
4. INIEZIONE A RIFIUTO DI RESINA EPOSSIDICA NEL FORO
5. SPALMATURA DI RESINA EPOSSIDICA PER INCOLLAGGIO DEL CIUFFO DI FIBRE ALLA FASCIA SOTTOSTANTE

# Chiesa di San Biagio (Modena)

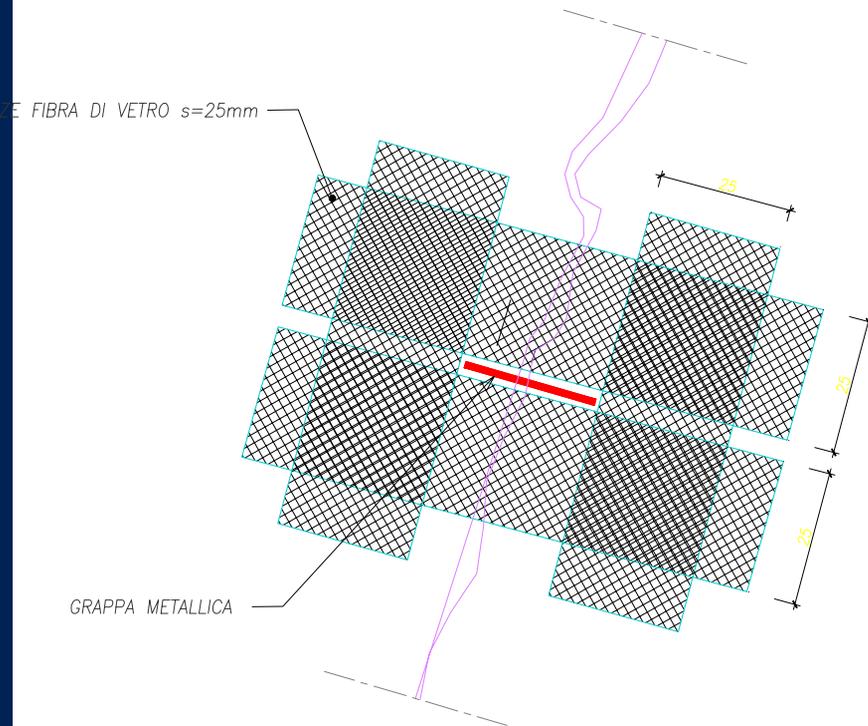


## CONNETTORI ORIZZONTALI A FIBRE DI CARBONIO

La lavorazione va eseguita previa applicazione del 1° strato di composito sulla muratura

1. FORO  $\varnothing 15\text{mm}$  L=200mm
2. FORMAZIONE DEL MAZZETTO DI FIBRE SECHE DI CARBONIO DI SEZIONE EQUIVALENTE PARI A 12.5mm E LUNGHEZZA 1 m.
3. RIPIEGATURA DEL MAZZETTO A META' LUNGHEZZA E INSERIMENTO CON STILETTO A FONDO FORO
4. INIEZIONE A RIFIUTO DI RESINA EPOSSIDICA NEL FORO
5. SPALMATURA DI RESINA EPOSSIDICA PER INCOLLAGGIO DEL CIUFFO DI FIBRE ALLA FASCIA SOTTOSTANTE
6. RICOPRIMENTO DEL CIUFFO CON SECONDO STRATO DI COMPOSITO

# Chiesa di San Biagio (Modena)



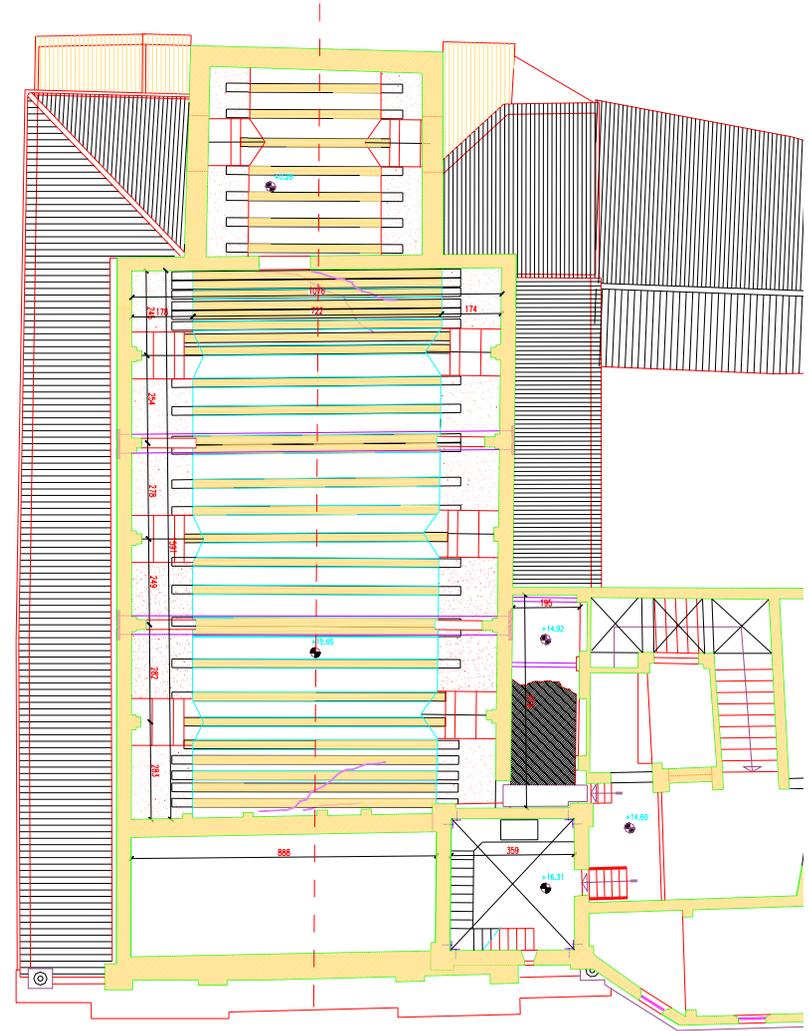
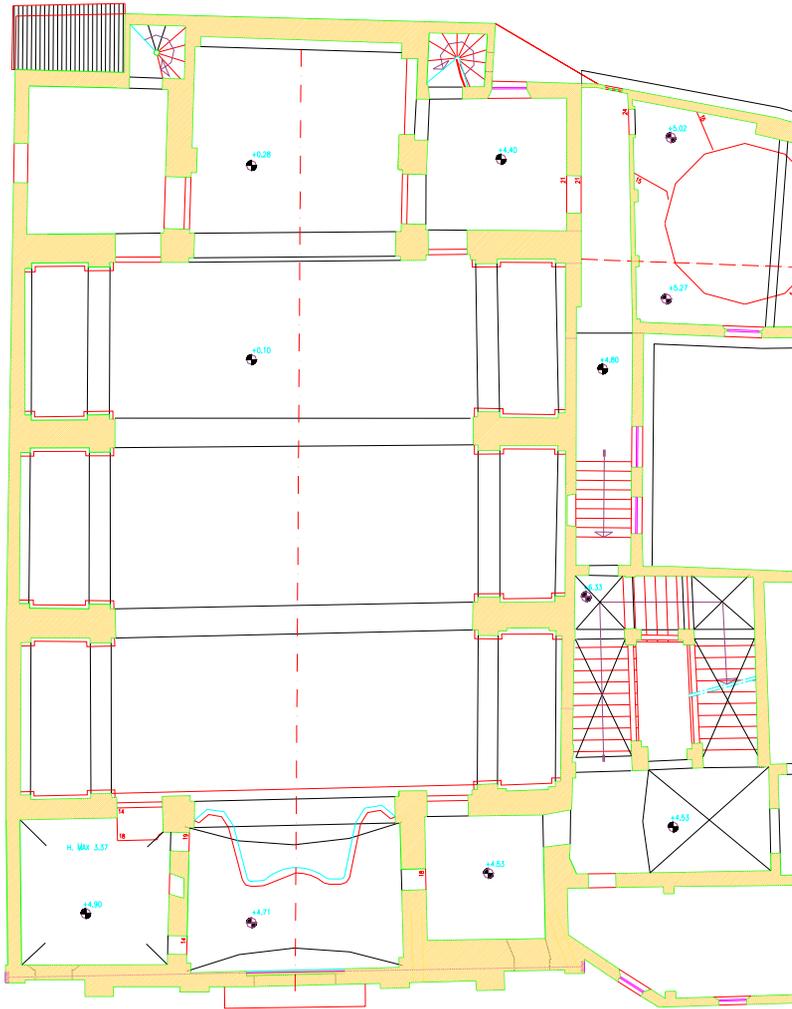
## APPLICAZIONE DI GARZE DI FIBRE DI VETRO

1. PAREGGIARE LA ZONA DI ATTACCO DEL COMPOSITO CON MALTA A BASE DI RESINA.
2. STESURA DEL PRIMER, SPENNELLATURA DI RESINA EPOSSIDICA E APPLICAZIONE DEL TESSUTO BIDIREZIONALE IN FIBRA DI VETRO (PESO UNITARIO >300g/mq)
3. PASSAGGIO ULTERIORE DI RESINA EPOSSIDICA UTILIZZANDO IL RULLO PER L'IMPREGNAZIONE

# Chiesa di San Barnaba (Modena)



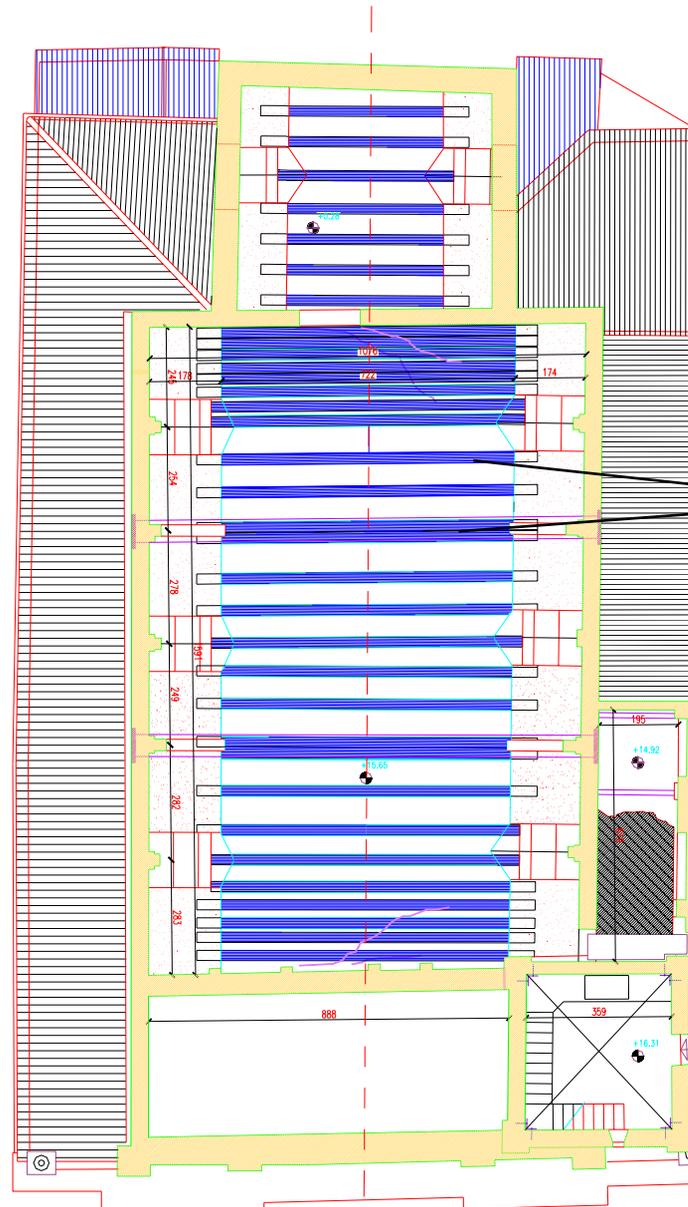
# Chiesa di San Barnaba (Modena)



# Chiesa di San Barnaba (Modena)



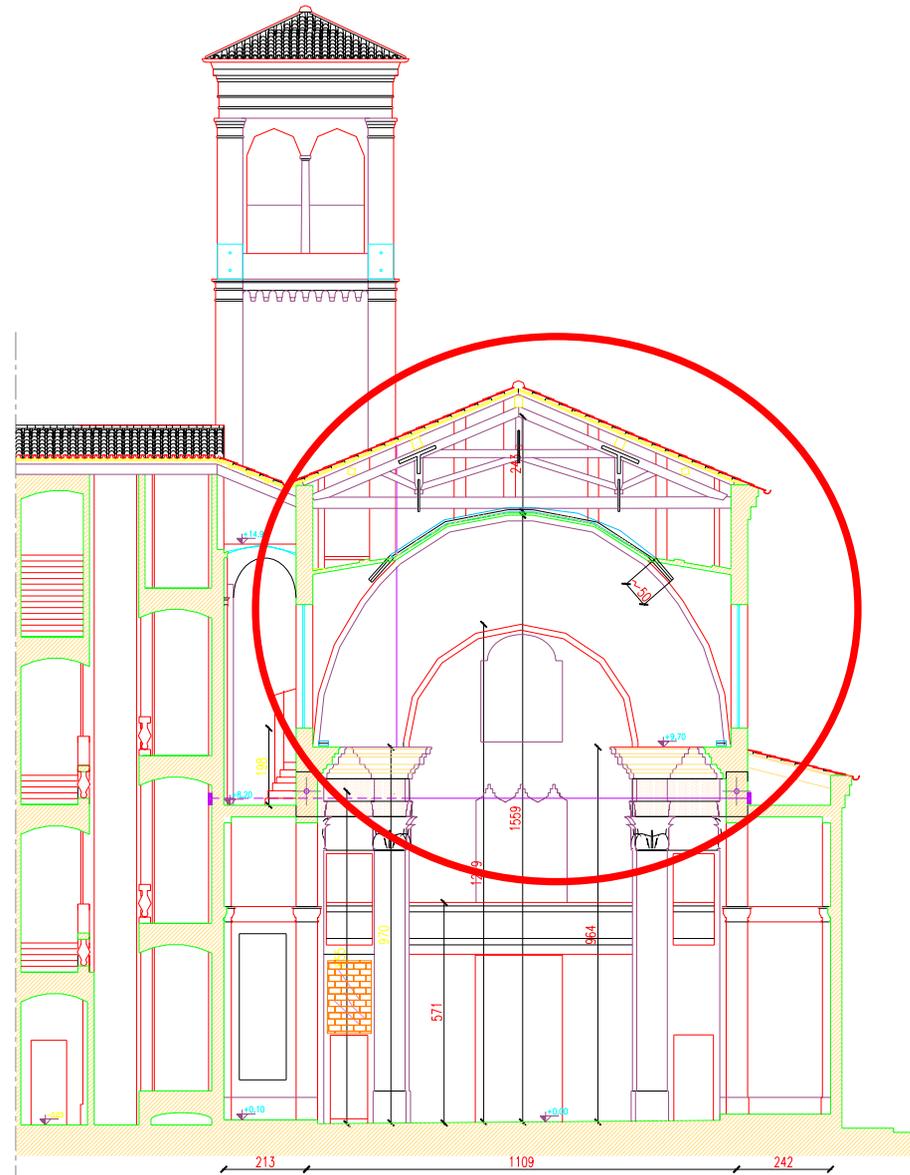
# Chiesa di San Barnaba (Modena)



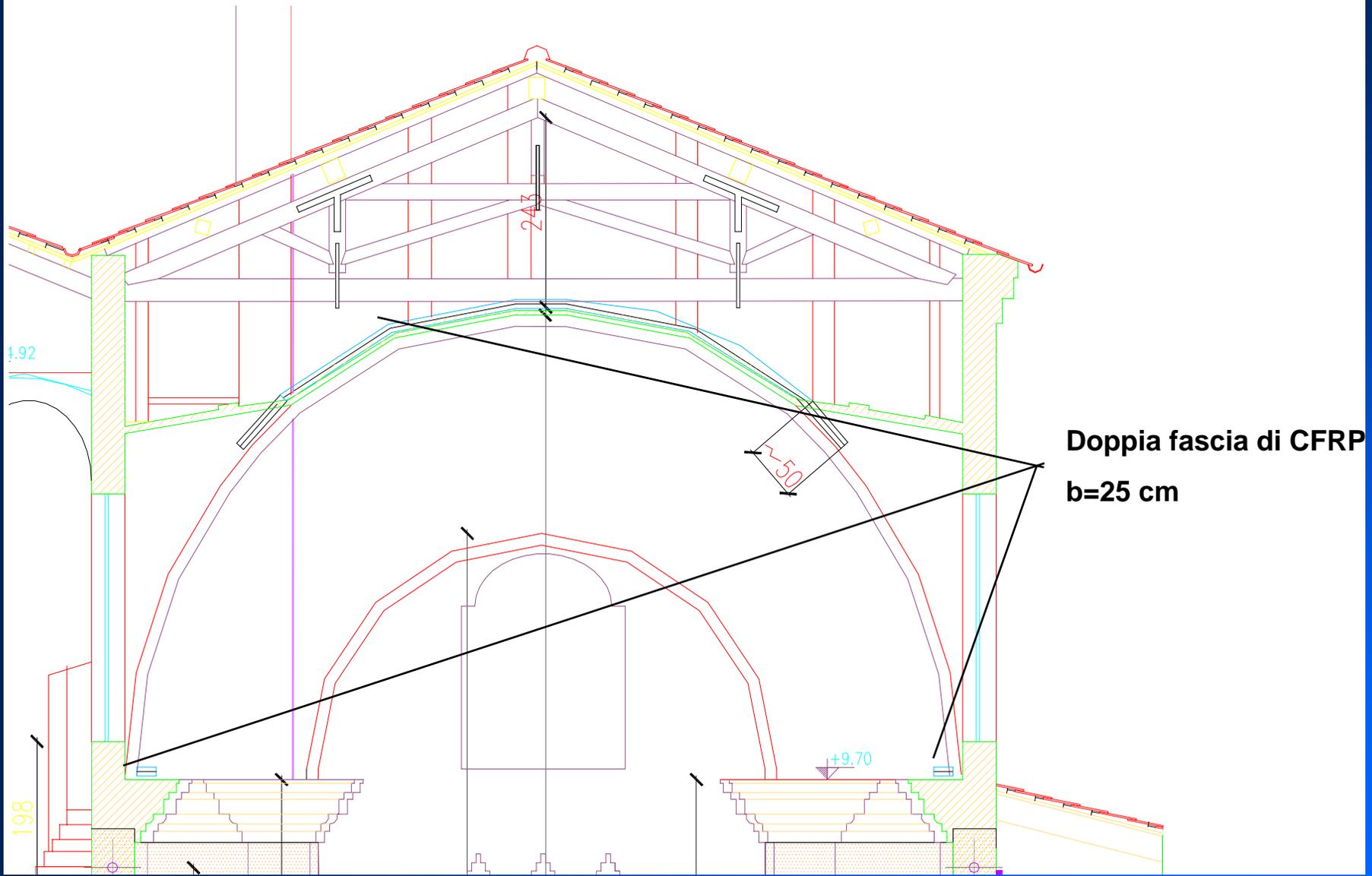
**Doppia fascia di CFRP  
b=25 cm**



# Chiesa di San Barnaba (Modena)



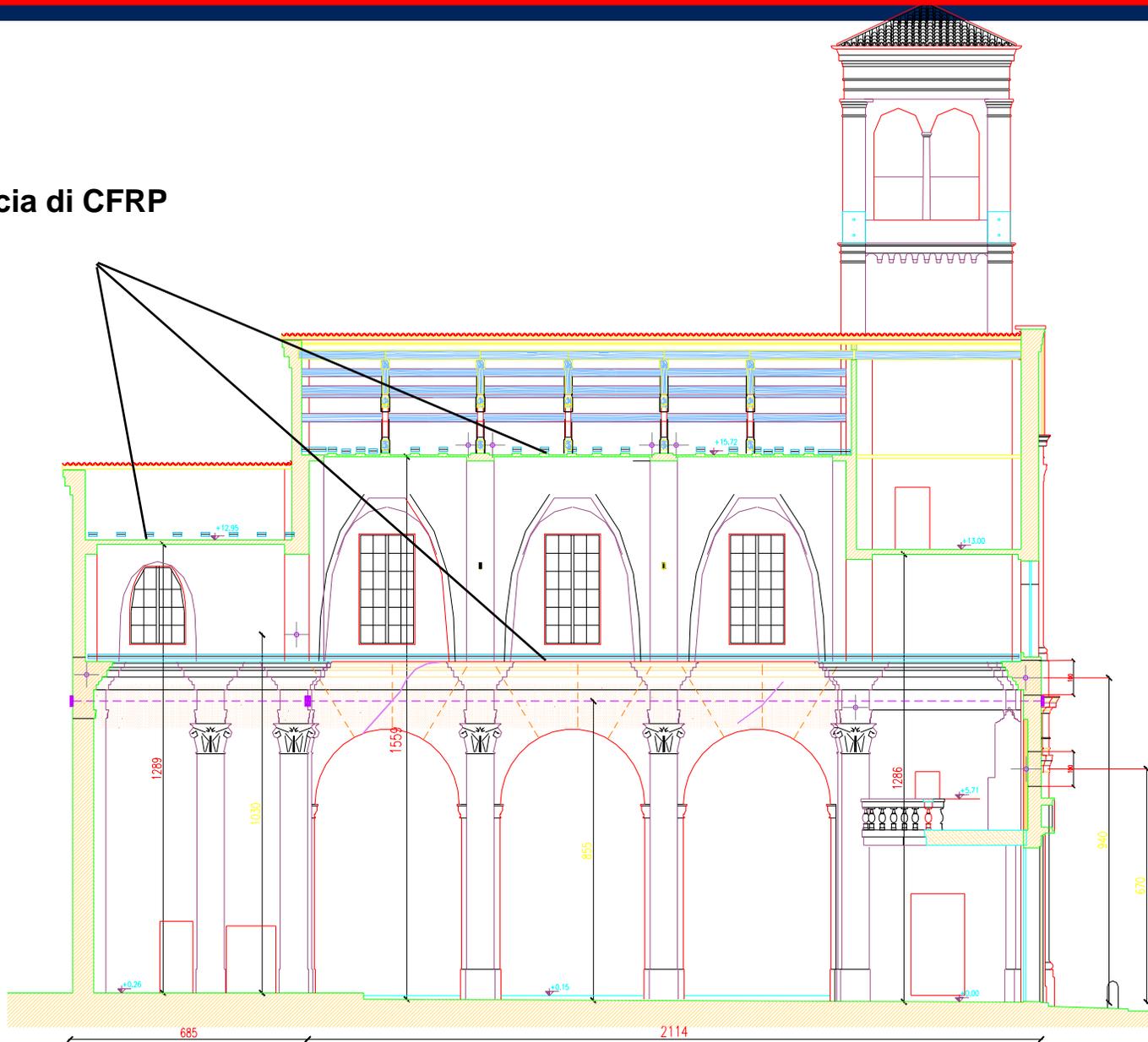
# Chiesa di San Barnaba (Modena)



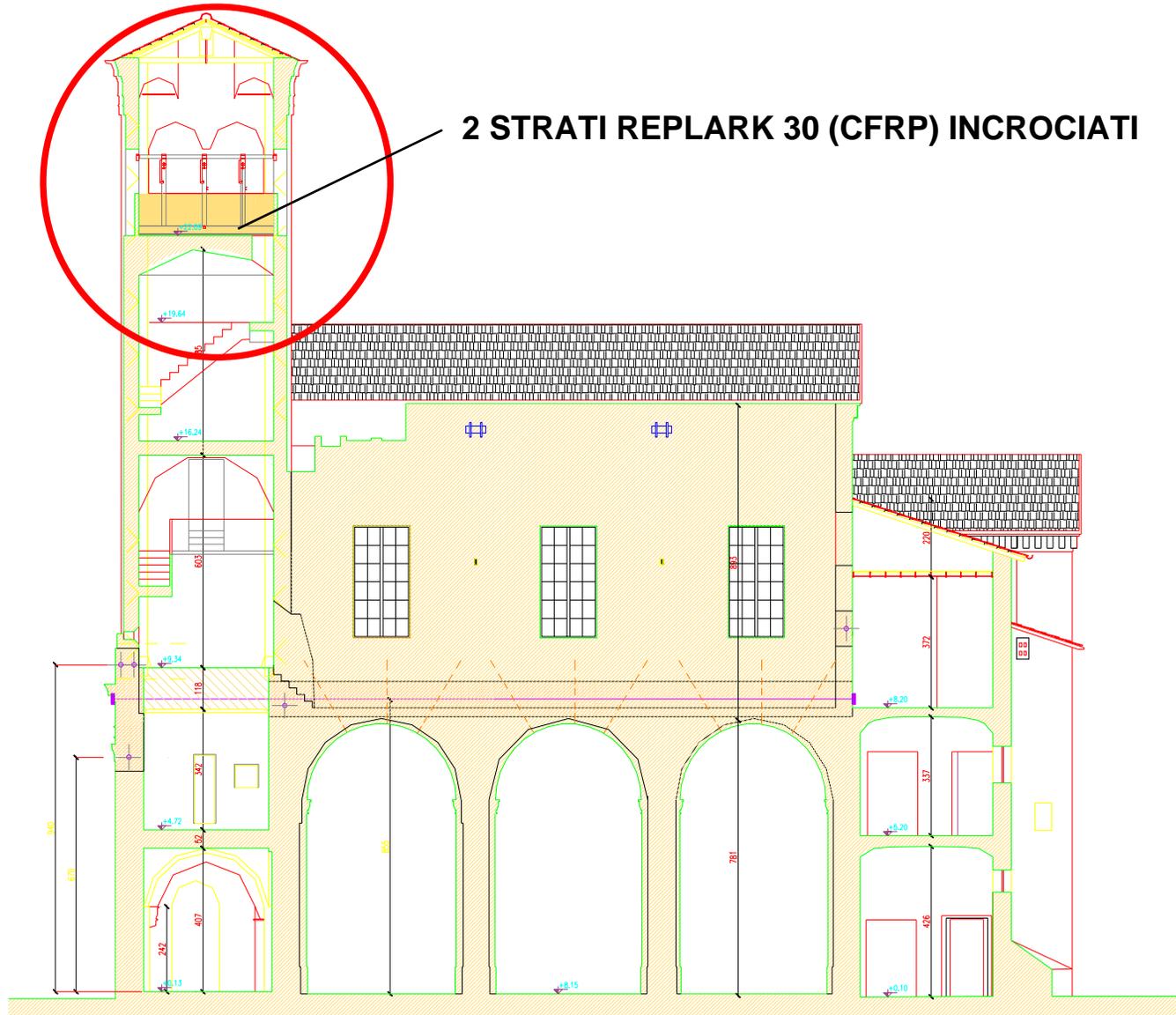
# Chiesa di San Barnaba (Modena)

Doppia fascia di CFRP

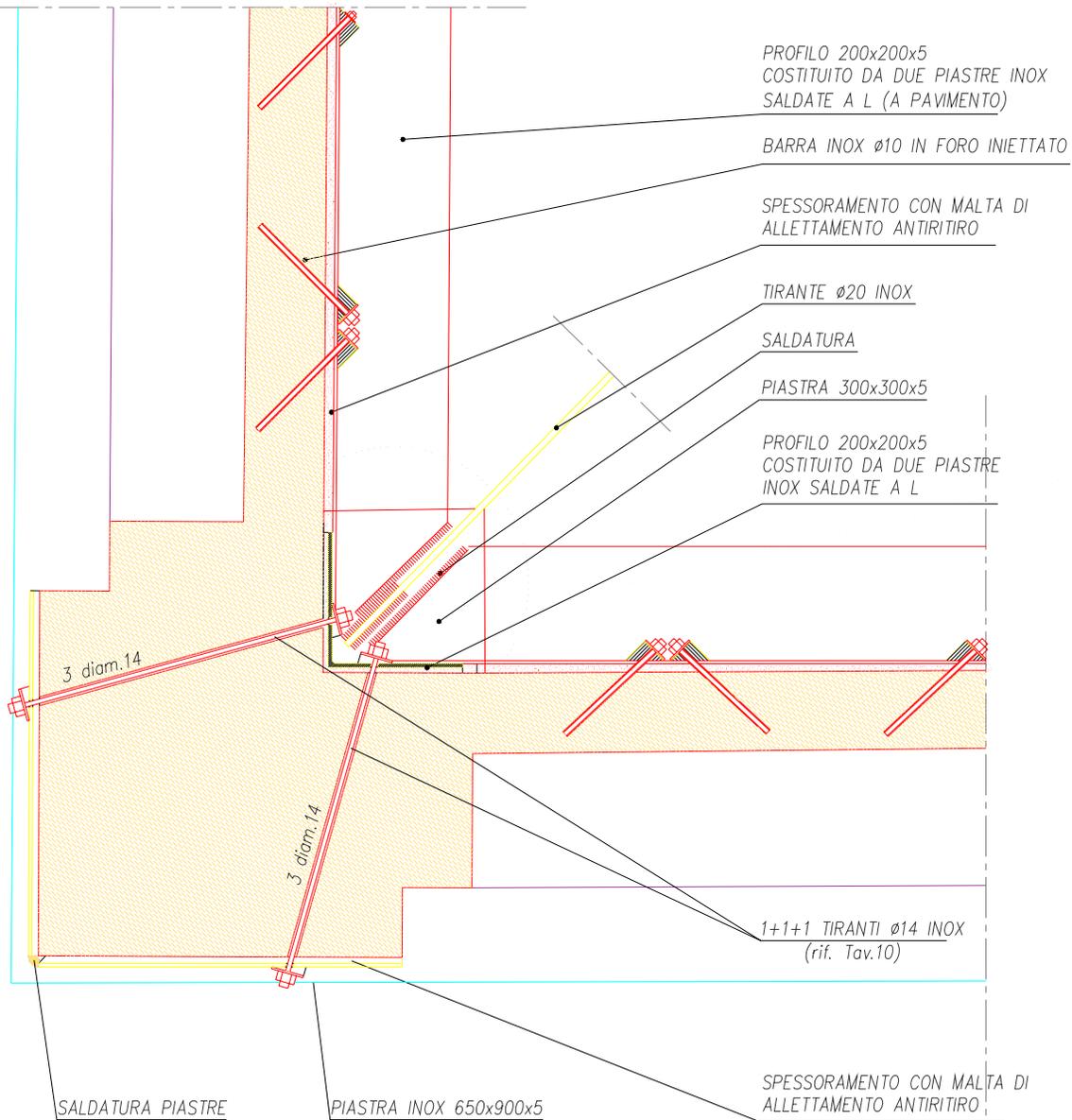
b=25 cm



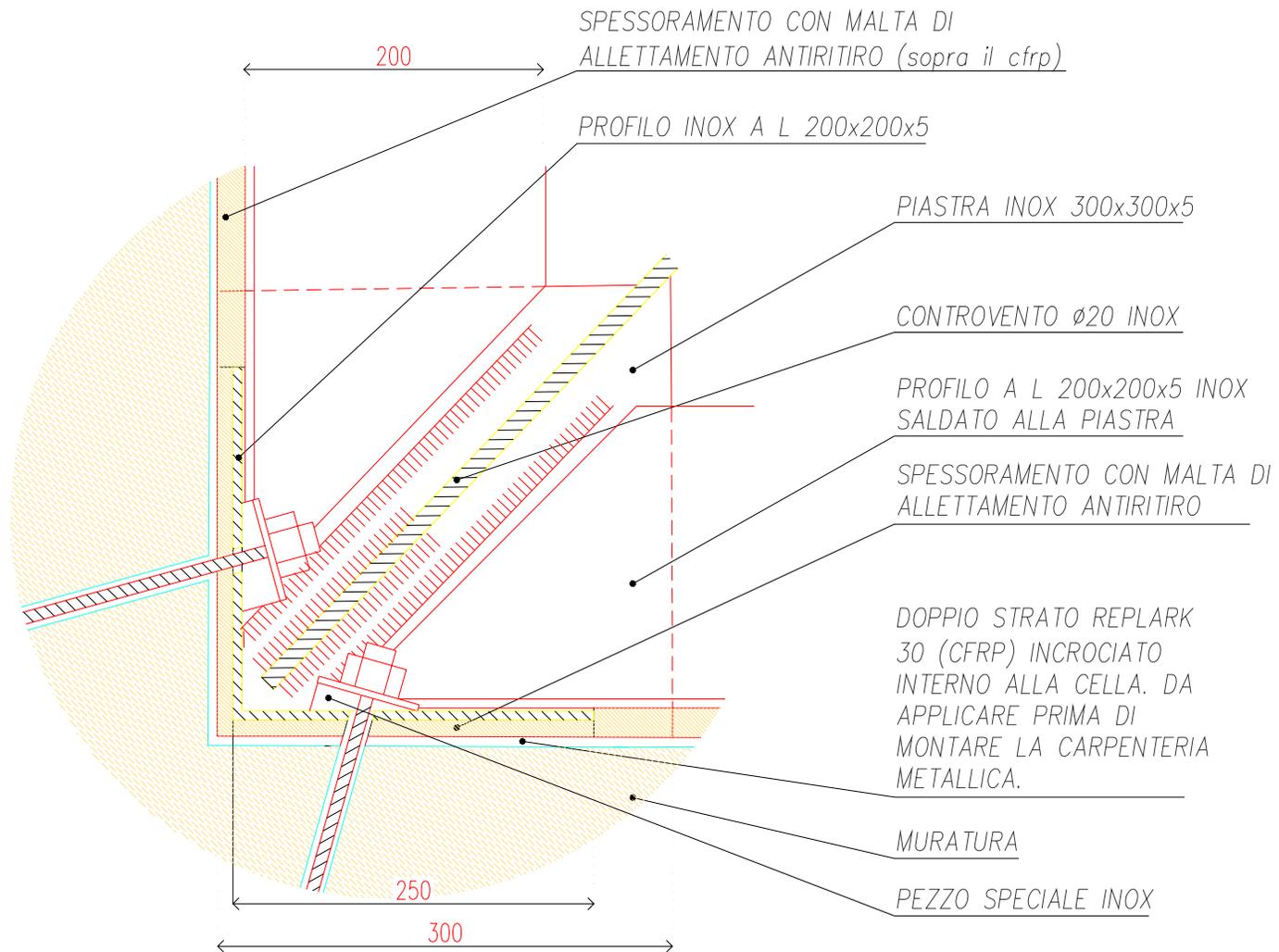
# Chiesa di San Barnaba (Modena)



# Chiesa di San Barnaba (Modena)

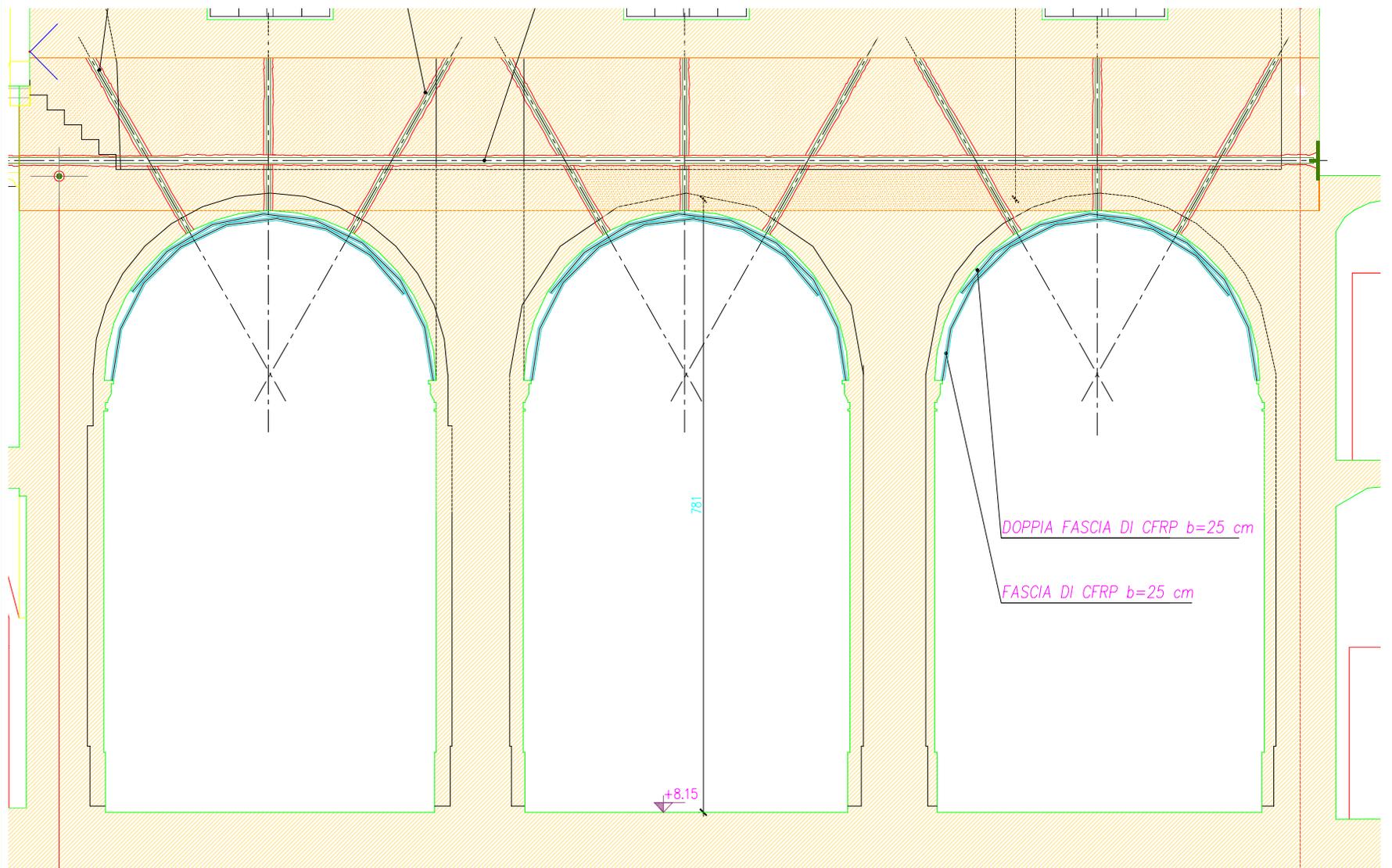


# Chiesa di San Barnaba (Modena)

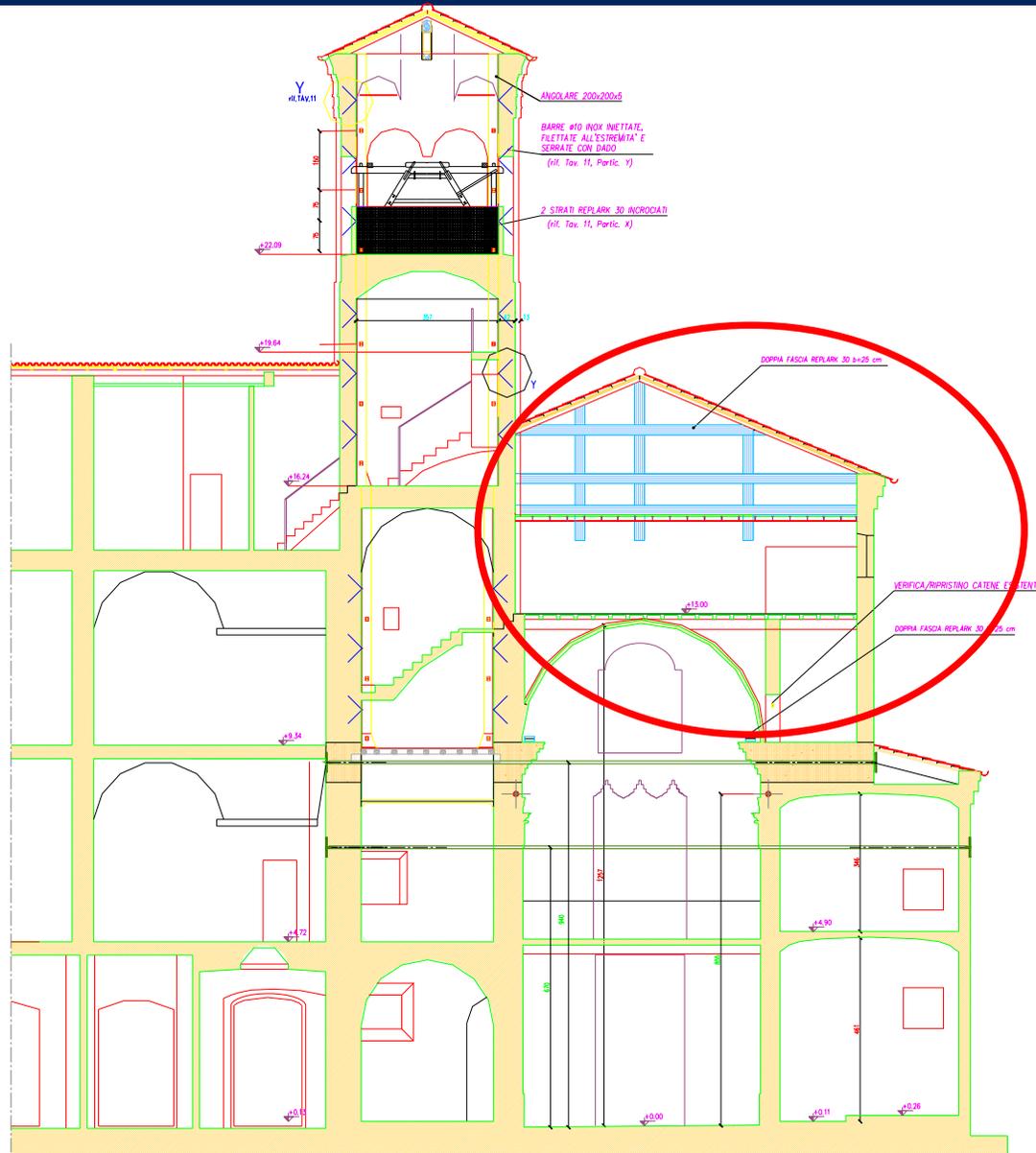




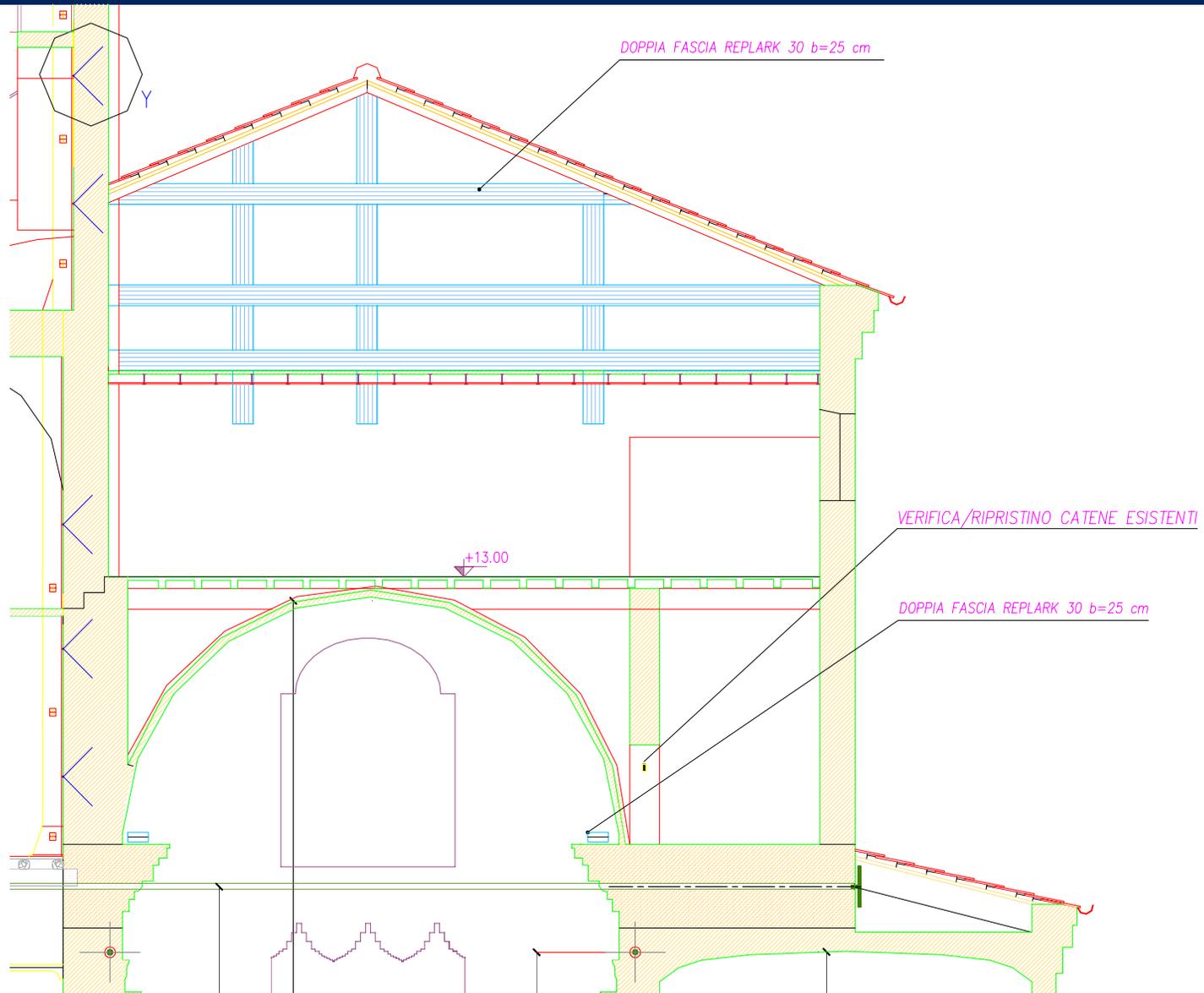
# Chiesa di San Barnaba (Modena)



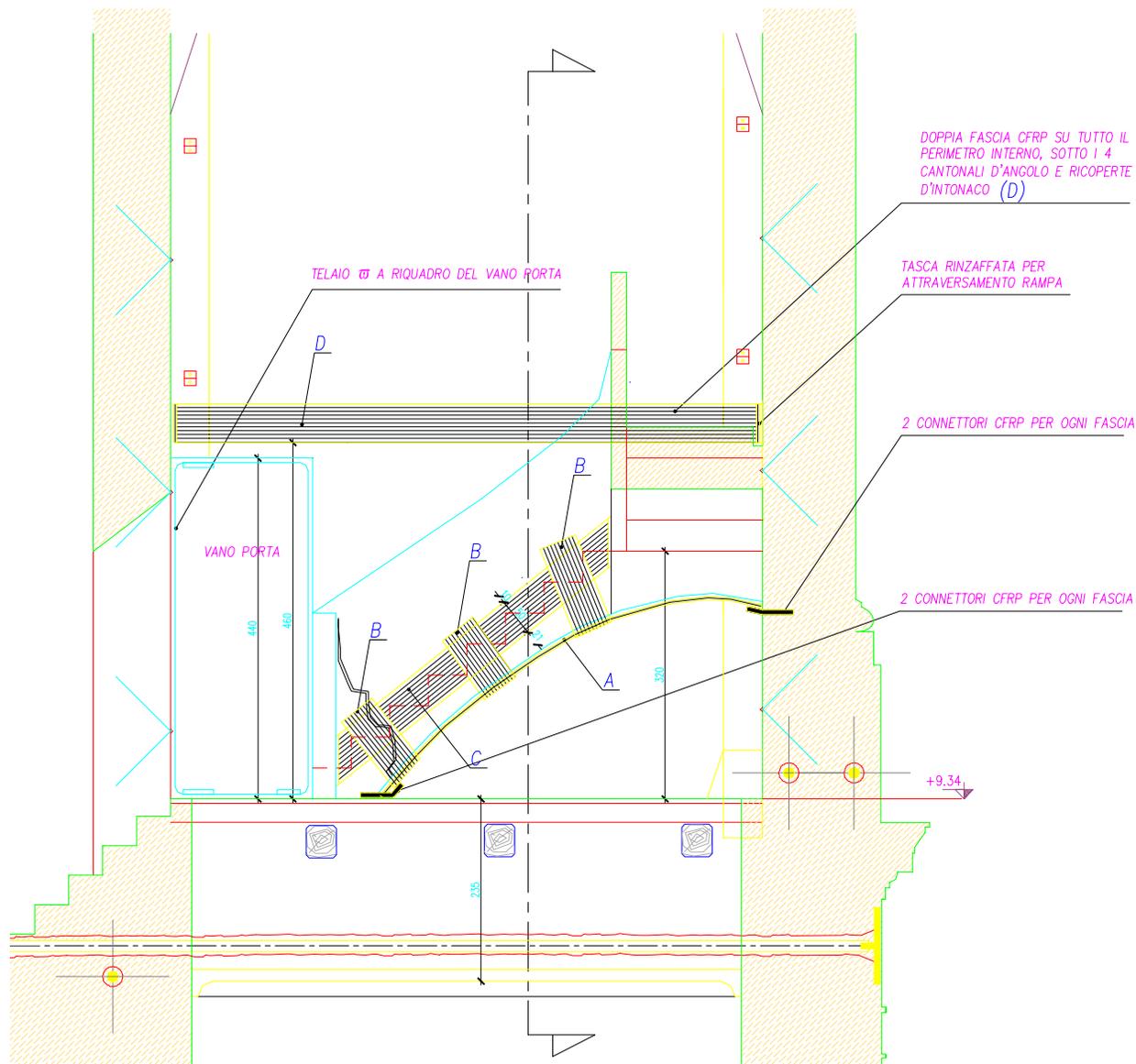
# Chiesa di San Barnaba (Modena)



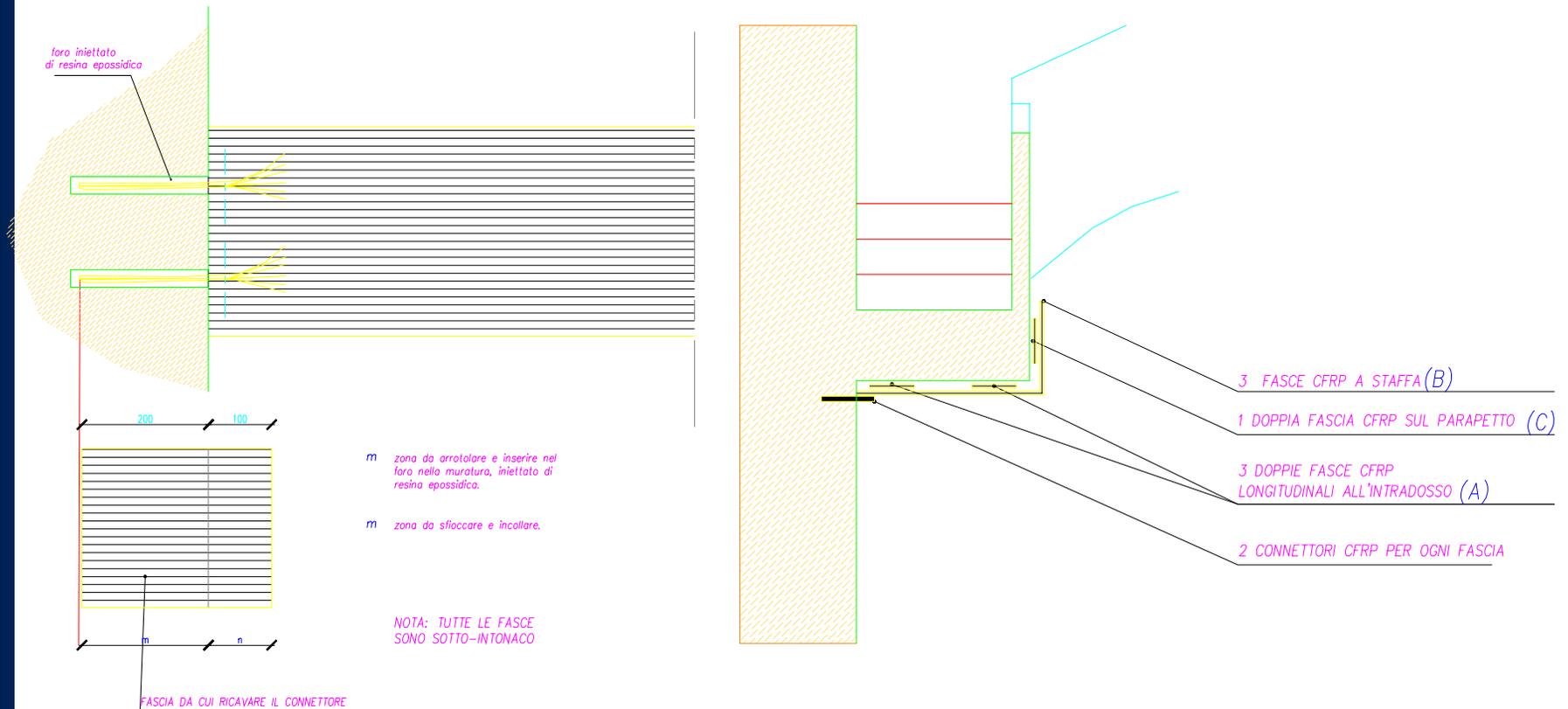
# Chiesa di San Barnaba (Modena)



# Chiesa di San Barnaba (Modena)



# Chiesa di San Barnaba (Modena)



# Torrazzo Gonzaga (Bagnolo in Piano RE)



# Torrazzo Gonzaga (Bagnolo in Piano RE)

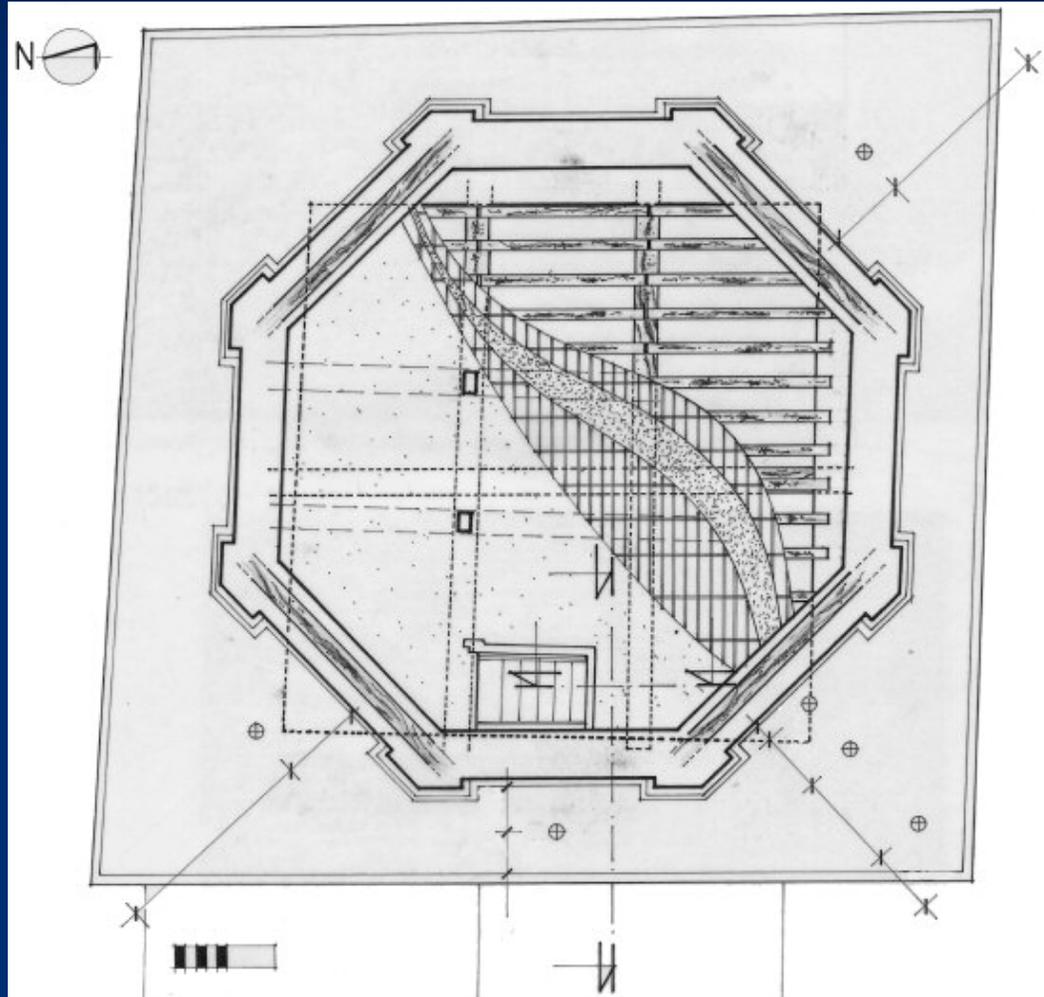


**Il Torrazzo dei Gonzaga a Bagnolo in Piano (RE), prima del sisma 1996.**



**Lavori di sistemazione della cinturazione (ottobre 1996) durante l'intervento di somma urgenza post-terremoto.**

# Torrazzo Gonzaga (Bagnolo in Piano RE)



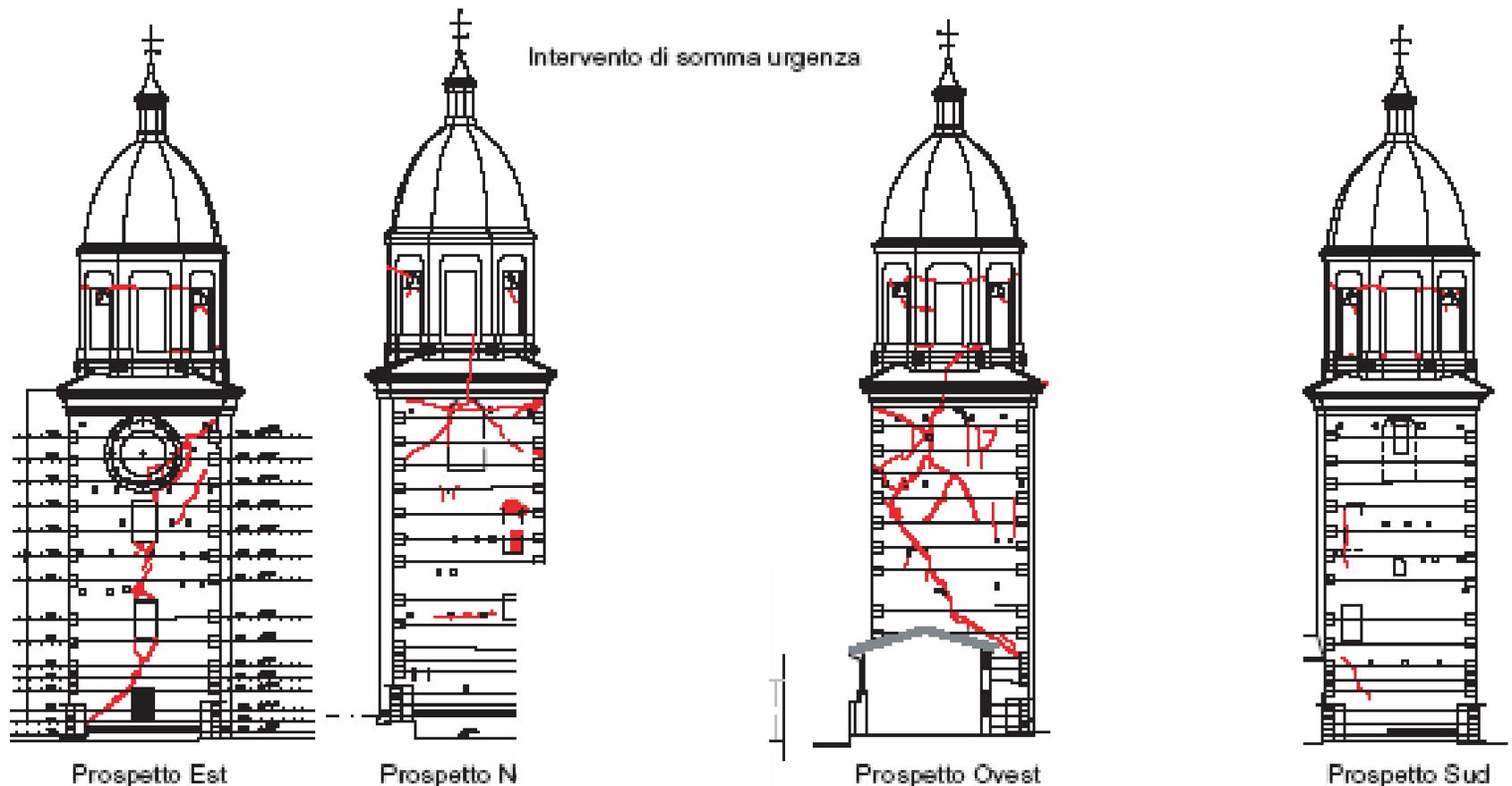
**Rilievo strutturale dell'orizzontamento alla sommità del fusto e alla base della cella campanaria (situazione stato di fatto prima del progetto). Si notano le irregolarità della pianta del fusto e l'innesto fusto-tamburo.**

## Torrazzo Gonzaga (Bagnolo in Piano RE)



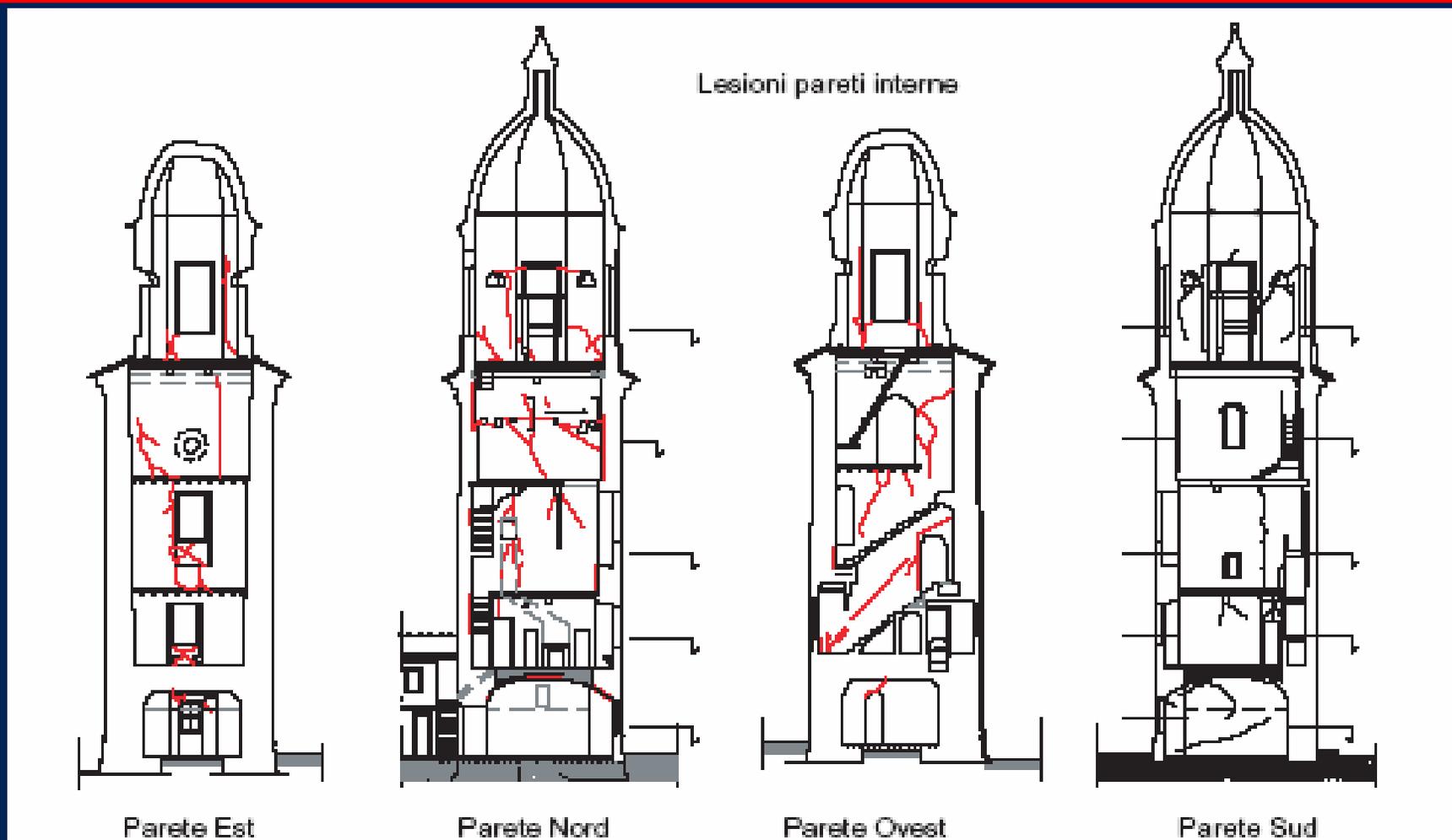
**Le lesioni della parete Ovest (opposta a quella dell'orologio) con la cinturazione eseguita (1996). Sono evidenti cunei in legno inseriti nelle lesioni e le piastre d'angolo con le barre Dywidag, relativi all'intervento provvisorio di somma urgenza.**

# Torrazzo Gonzaga (Bagnolo in Piano RE)



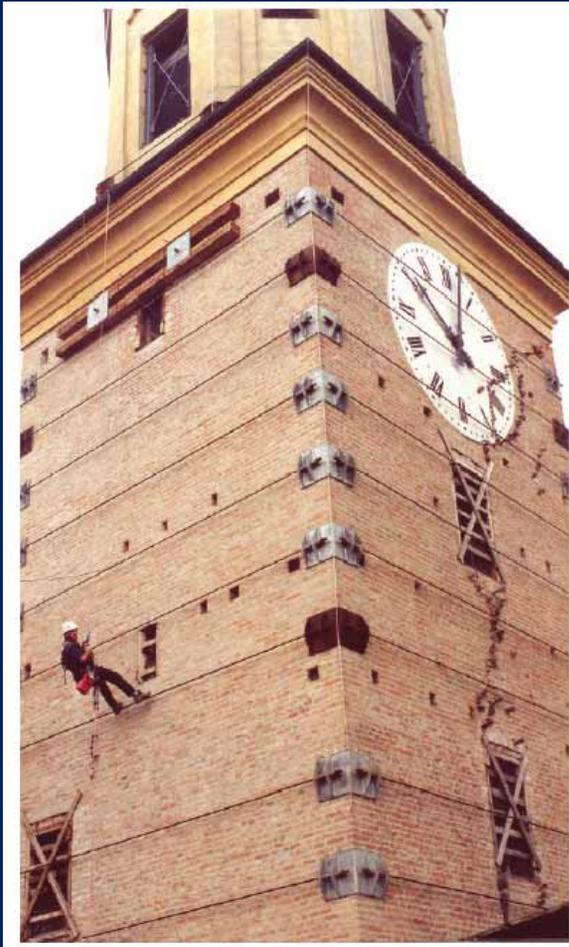
**Stato di fatto prima del progetto (Prospetti). In evidenza il sistema di cinturazione esterna eseguito in fase di intervento di somma urgenza (1996). Il progetto definitivo elimina le cinturazioni esterne riportando il sistema di incatenamento nello spessore delle pareti murarie di contorno del fusto.**

## Torrazzo Gonzaga (Bagnolo in Piano RE)



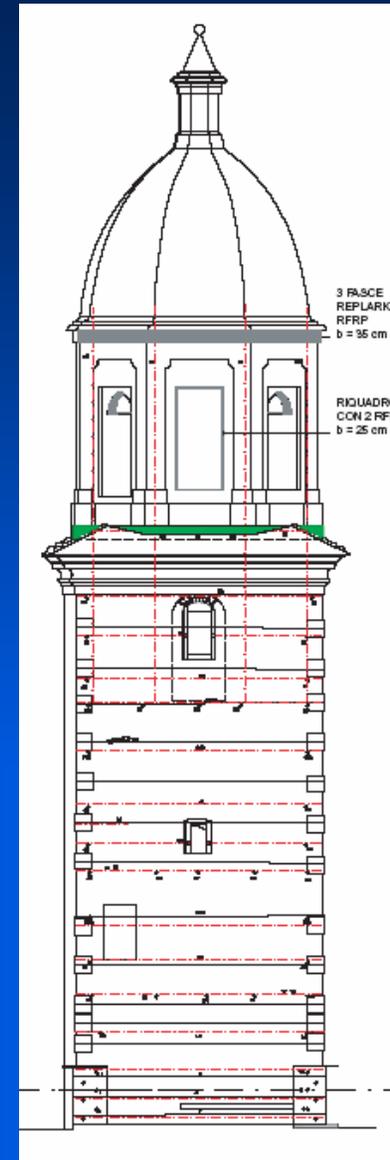
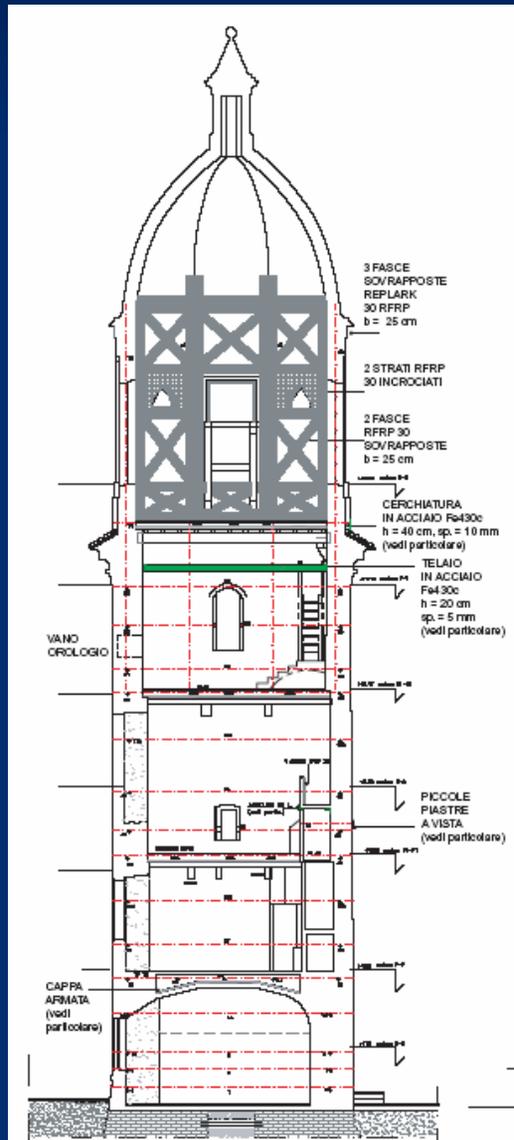
**Stato di fatto prima del progetto (Sezioni). In evidenza il sistema di cinturazione esterna eseguito in fase di intervento di somma urgenza (1996). Il progetto definitivo elimina le cinturazioni esterne riportando il sistema di incatenamento nello spessore delle pareti murarie di contorno del fusto.**

## Torrazzo Gonzaga (Bagnolo in Piano RE)



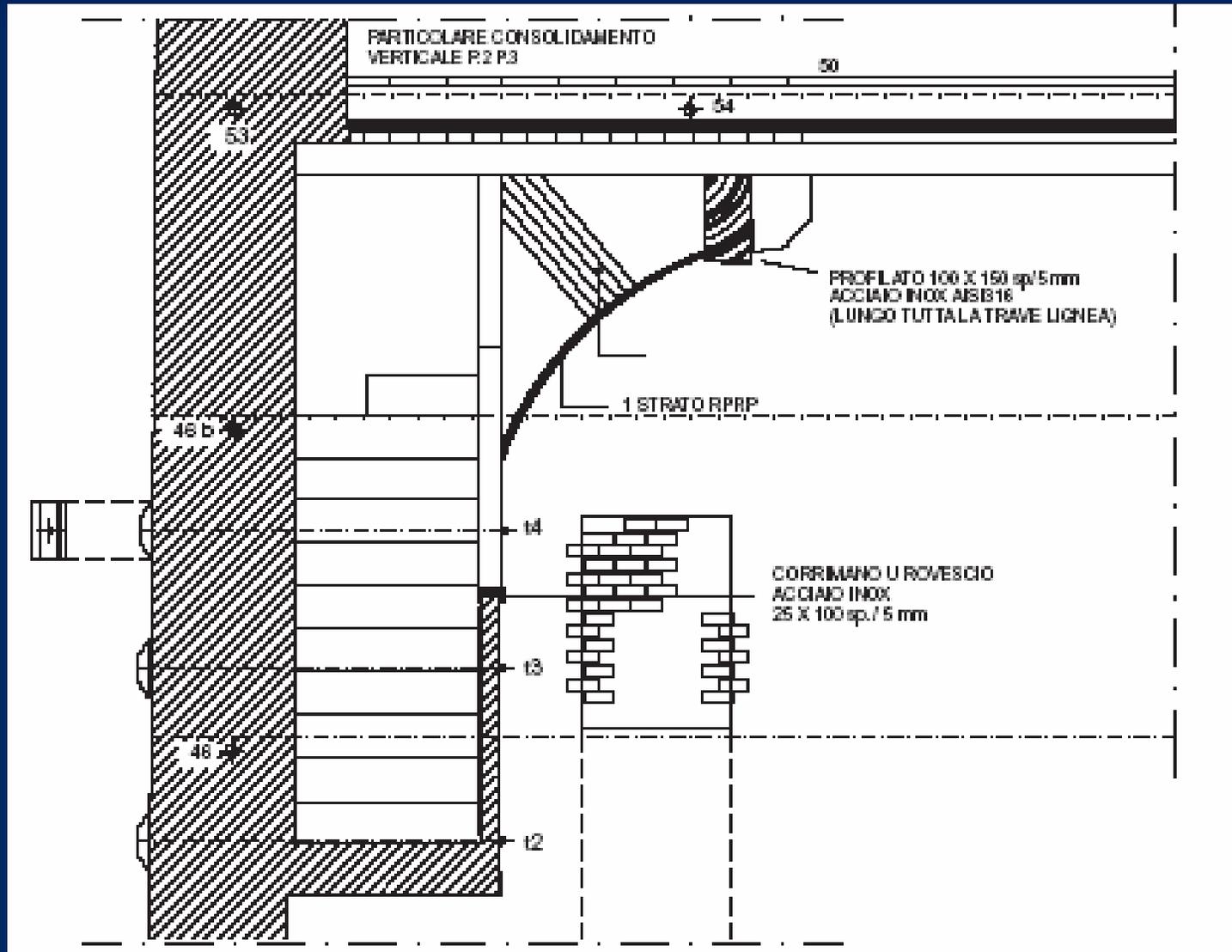
Lavori di indagine e controllo della cinturazione (2000) nel periodo della progettazione. Si nota la profonda lesione nel prospetto Est contenente l'orologio, prospiciente la piazza.

# Torrazzo Gonzaga (Bagnolo in Piano RE)



Prospetto-sezione parete Sud. Si nota (in verde) il telaio metallico al colmo del fusto.

# Torrazzo Gonzaga (Bagnolo in Piano RE)



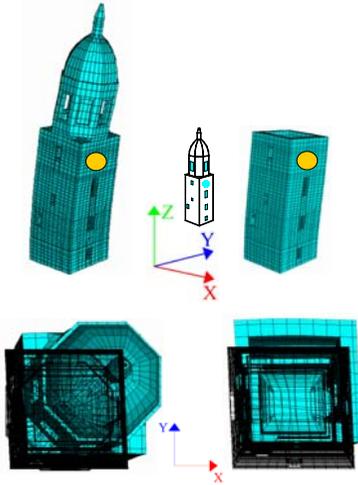
**Consolidamento della scala interna con elementi metallici e CFRP.**

# Torrazzo Gonzaga (Bagnolo in Piano RE)

I° Modo

$T_1=0.304s$

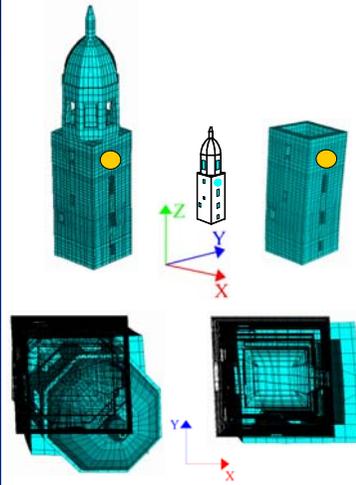
$T_1=0.168s$



II° Modo

$T_2=0.289s$

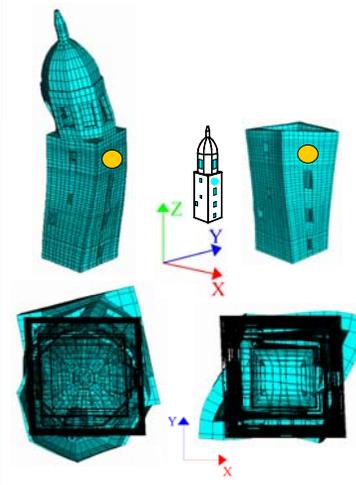
$T_2=0.151s$



III° Modo

$T_3=0.104s$

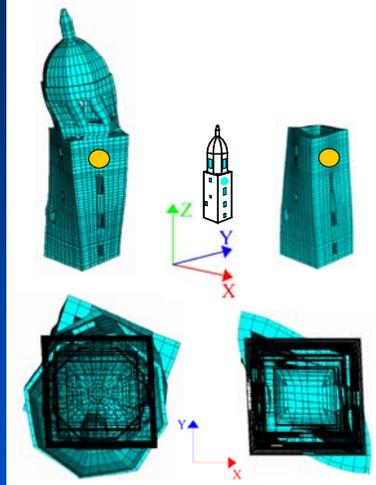
$T_3=0.081s$



IV° Modo

$T_4=0.102s$

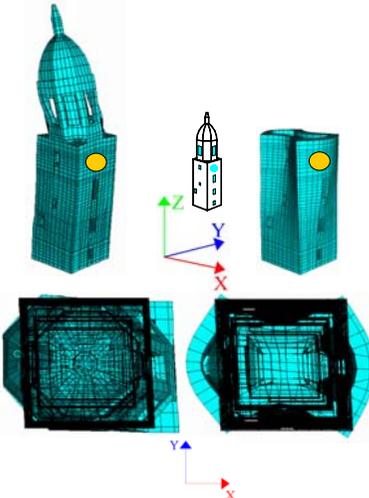
$T_4=0.079s$



V° Modo

$T_5=0.094s$

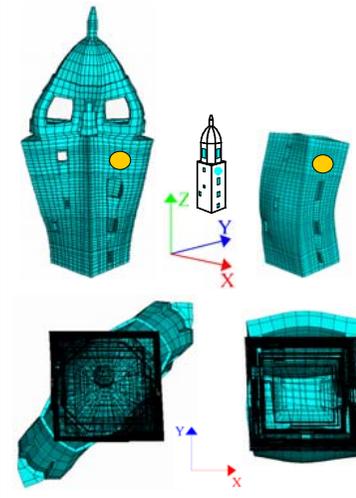
$T_5=0.055s$



VI° Modo

$T_6=0.075s$

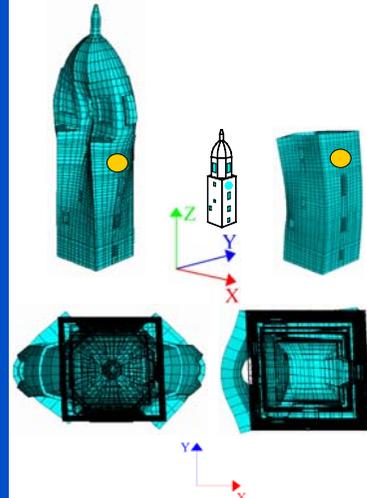
$T_6=0.051s$



VII° Modo

$T_7=0.061s$

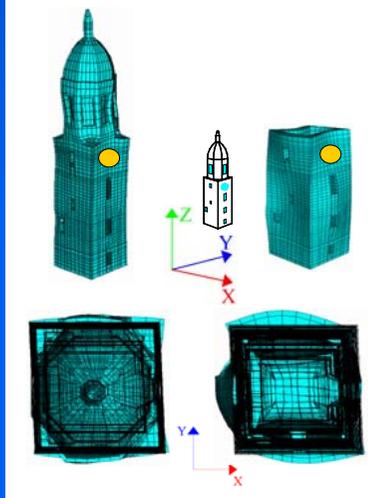
$T_7=0.043s$



VIII° Modo

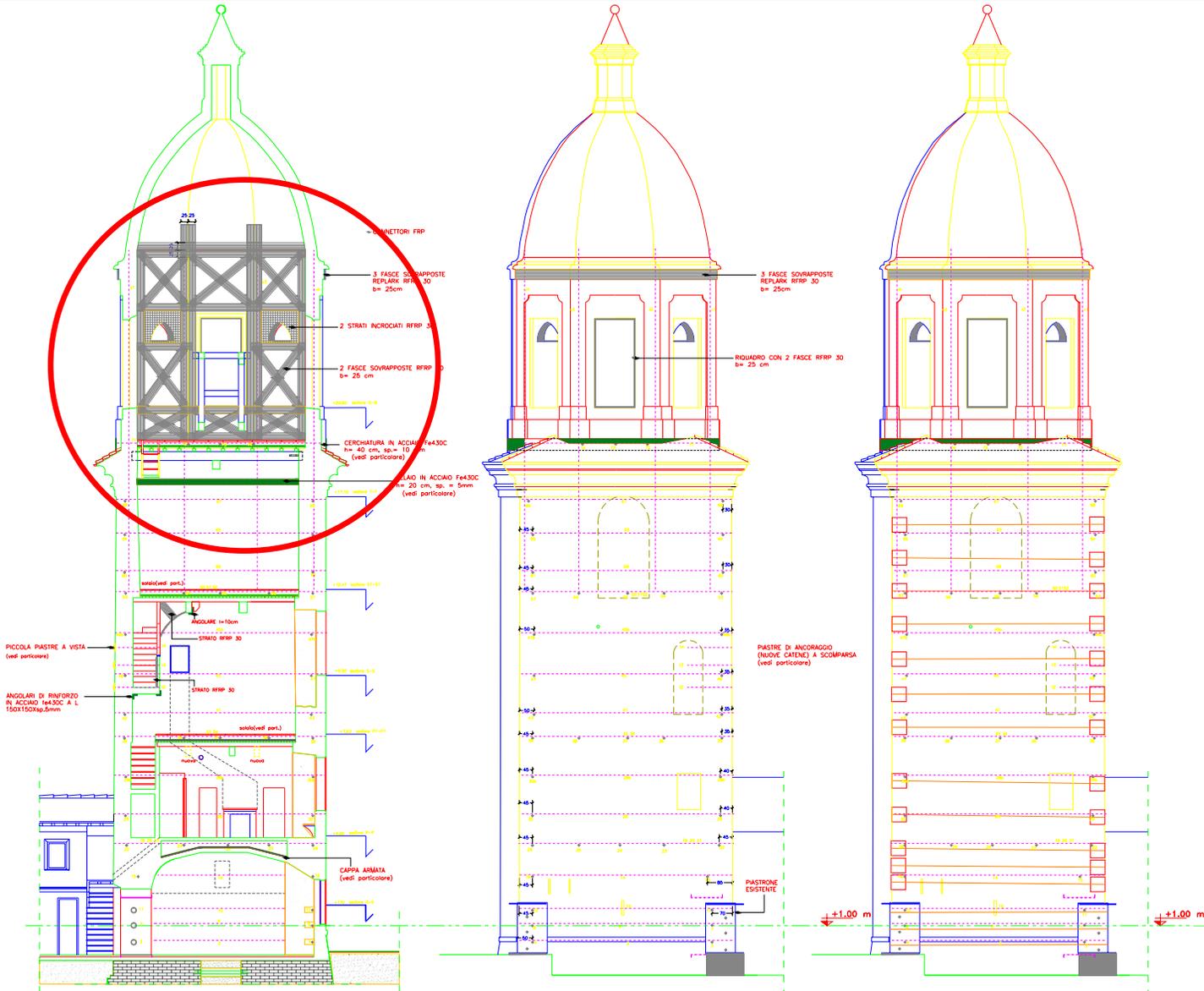
$T_8=0.057s$

$T_8=0.04s$



**Modi e periodi di vibrazione**

# Torrazzo Gonzaga (Bagnolo in Piano RE)

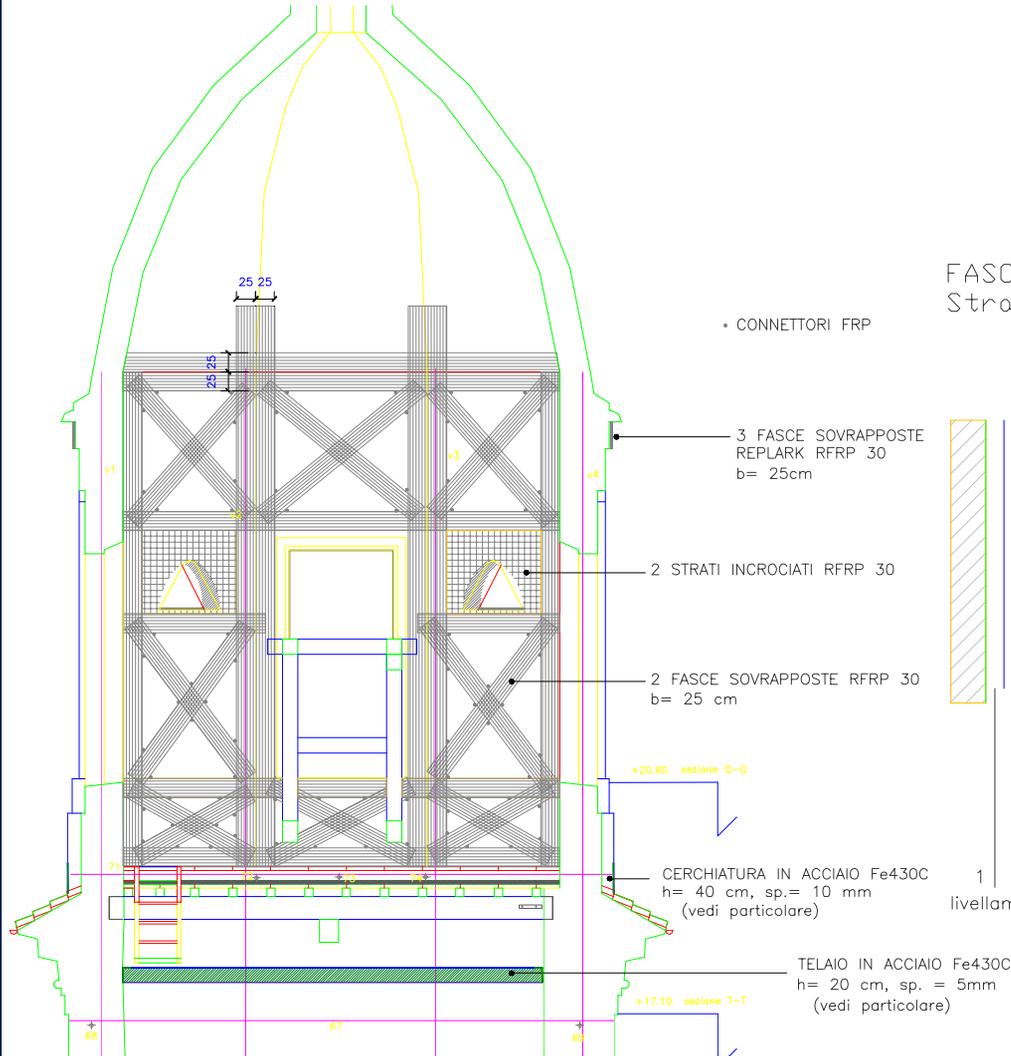


SEZIONE A-A 1:50 Posizionamento catene di progetto

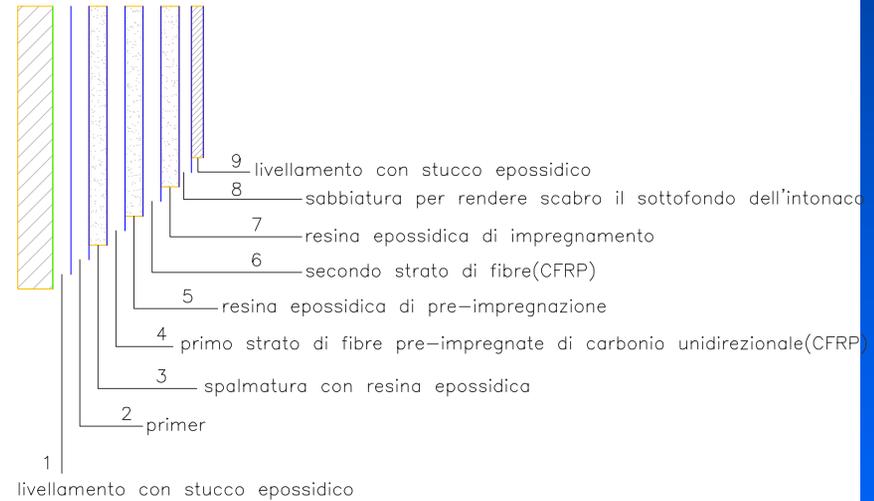
PARETE NORD posiziona. catene -QUOTE

PARETE NORD confronto catene stato attuale/stato di progetto

# Torrazzo Gonzaga (Bagnolo in Piano RE)



FASCE CFRP NEL TAMBURO.  
Strati sovrapposti sequenza applicativa:



# Criteri generali di intervento

- **Gli interventi di consolidamento e miglioramento sismico proposti salvaguardano l'identità estetica e storica dei complessi storico-artistici, in quanto non introducono elementi stravolgenti rispetto alla loro configurazione storico-architettonica.**
- **Gli interventi progettati tendono ad attenuare e possibilmente ad eliminare i fattori specifici di vulnerabilità strutturale e sismica.**
- **Essi inoltre non apportano modifiche sostanziali all'organismo resistente originario, e pertanto non ne alterano il comportamento statico e sismico.**
- **Le soluzioni individuate oltre a conformarsi ai criteri di sicurezza, si conformano a criteri di tutela e di conservazione del bene oggetto dell'intervento.**
- **Il progetto esecutivo è inquadrato in una visione unitaria di interventi da eseguire sull'immobile anche in tempi differiti.**

# Efficacia degli interventi

---

- **Gli interventi strutturali previsti migliorano sensibilmente il comportamento sismico globale e locale della costruzione.**
  
  - **Essi infatti aumentano il grado di connessione fra i vari macroelementi strutturali e modificano in senso positivo l'organizzazione del sistema resistente alle azioni sismiche.**
-

# Criteri per il calcolo di proporzionamento dei rinforzi

---

- **L'organismo strutturale su cui si opera ha una geometria complessa, dalla quale non sono facilmente enucleabili elementi sismoresistenti semplici.**
  - **Risulta pertanto estremamente difficile utilizzare i concetti dell'analisi sismica convenzionale.**
  - **E' possibile scomporre idealmente l'organismo strutturale in macroelementi (aggregazioni di elementi strutturali semplici, quali facciate, volte, arconi, absidi, ecc.) che presentano un comportamento sotto sisma più facilmente identificabile.**
  - **In ogni caso si presenta difficile la quantizzazione delle forze sismiche di progetto.**
-

# **Criteria per il calcolo di proporzionamento dei rinforzi (cont. 1)**

**In alternativa è ragionevole procedere come di seguito illustrato:**

- 1. individuare i singoli macroelementi (pareti, colonne, archi, facciate, volte, absidi);**
- 2. individuare le zone critiche dei singoli macroelementi alla luce delle attuali conoscenze, anche su base statistica, del loro comportamento sismico;**
- 3. valutare le resistenze attuali (prima dell'intervento) nelle zone critiche dei singoli macroelementi;**
- 4. incrementare le resistenze e le duttilità delle zone critiche dei singoli macroelementi mediante interventi appropriati;**
- 5. effettuare valutazioni comparative in termini di resistenza e di duttilità per individuare il grado di miglioramento sismico locale ottenuto per il singolo macroelemento;**

## **Criteria per il calcolo di proporzionamento dei rinforzi (cont. 2)**

---

- 6. individuare le zone critiche di connessione fra i vari macroelementi alla luce delle attuali conoscenze, anche su base statistica nei riguardi del comportamento sismico;**
  - 7. valutare le resistenze attuali (prima dell'intervento) nelle zone critiche fra i vari macroelementi;**
  - 8. incrementare le resistenze e le duttilità delle zone critiche di connessione fra i vari macroelementi mediante interventi appropriati;**
  - 9. valutare il grado di miglioramento sismico globale ottenuto per l'insieme dei macroelementi.**
-