



Il miglioramento sismico della Basilica di Santa Maria degli Angeli ad Assisi
Ing. Riccardo Vetturini, INGENIUM SRL



CONSIGLIO NAZIONALE
DEGLI INGEGNERI

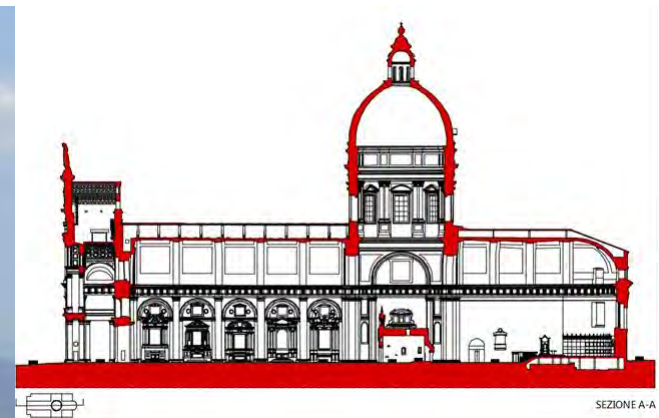


Con il supporto scientifico di:



CONVEGNO ON LINE
VENERDÌ 23 OTTOBRE 2026, ORE 15.00 - 17.00

La Sicurezza Strutturale degli Elementi
Voltati: Strategie di Consolidamento Innovative
e Interventi Pratici sul Patrimonio Monumentale





La Porziuncola è il luogo dove San Francesco comprese la sua vocazione e dove morì il 3 ottobre 1226

ORDINANZA

N. 357 del 31-10-2016

Oggetto: Ordinanza di inagibilità parziale della Basilica Papale di Santa Maria degli Angeli in Porziuncola.

IL SINDACO

Premesso:

- che in data 30.10.2016 alle ore 7,41 si è verificata una forte scossa sismica che ha interessato molti comuni umbri tra cui il territorio del Comune di Assisi;
- che la Basilica Papale di Santa Maria degli Angeli ha riportato lesioni in più parti e si è disposta quindi l'immediata chiusura al pubblico.

Preso atto della relazione redatta dall'Ufficio Tecnico, a seguito del sopralluogo effettuato in data odierna, dalla quale si evince la necessità di interdire all'utilizzo alcune parti della Basilica Papale a causa della presenza di lesioni passanti in corrispondenza della seconda Cappella di sinistra, del transetto destro di S. Pietro in Vincoli e di parte della parete di fondo dell'abside.

Ritenuto di assumere urgenti provvedimenti a tutela della pubblica e privata incolumità

Visti gli artt. 54 del D.Lgs 267/2000 e 15 della L. 225/92.

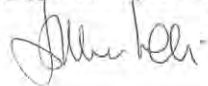
ORDINA

alla Custodia della Basilica Papale di Santa Maria degli Angeli in Porziuncola di interdire al pubblico accesso la zona del transetto destro Altare di S. Pietro in Vincoli, della Cappella delle Stimmate e di parte della parete di fondo dell'abside come meglio individuato in planimetria.

Di trasmettere la presente Ordinanza all'Ordine dei Frati Minori della Basilica di Santa Maria degli Angeli – Via Protomartiri Francescani.

Di trasmettere copia della presente Ordinanza, a mezzo posta elettronica certificata, alla Prefettura di Perugia, al Centro di Protezione Civile Regionale, alla Polizia di Stato, al Comando Carabinieri e ai Vigili Urbani.

PER RICEVUTA:

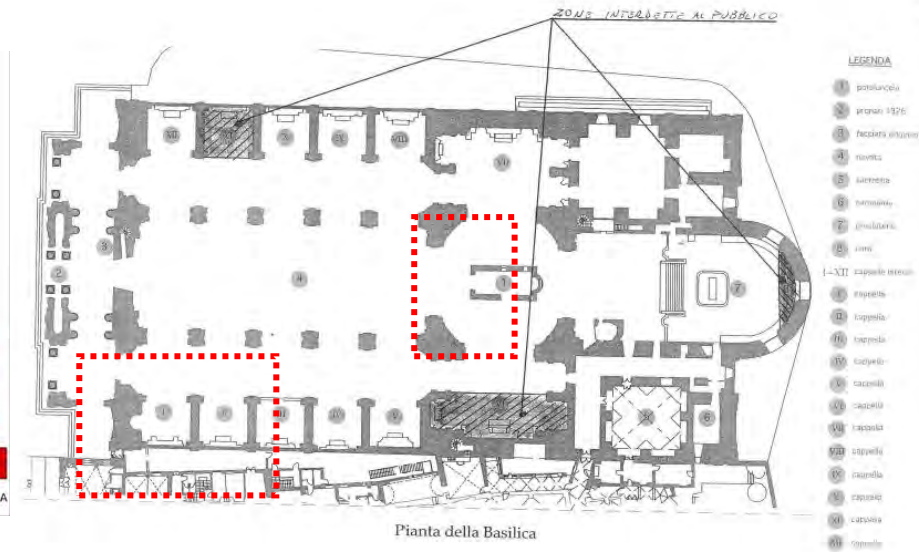
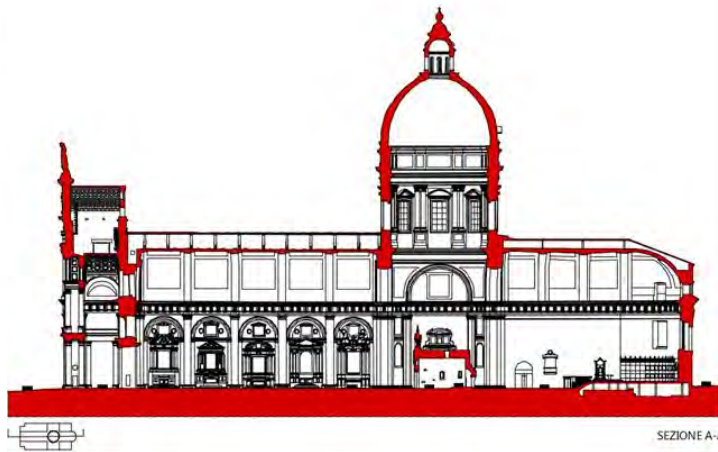




IL SINDACO

Prof. Ing. Stefania Proietti



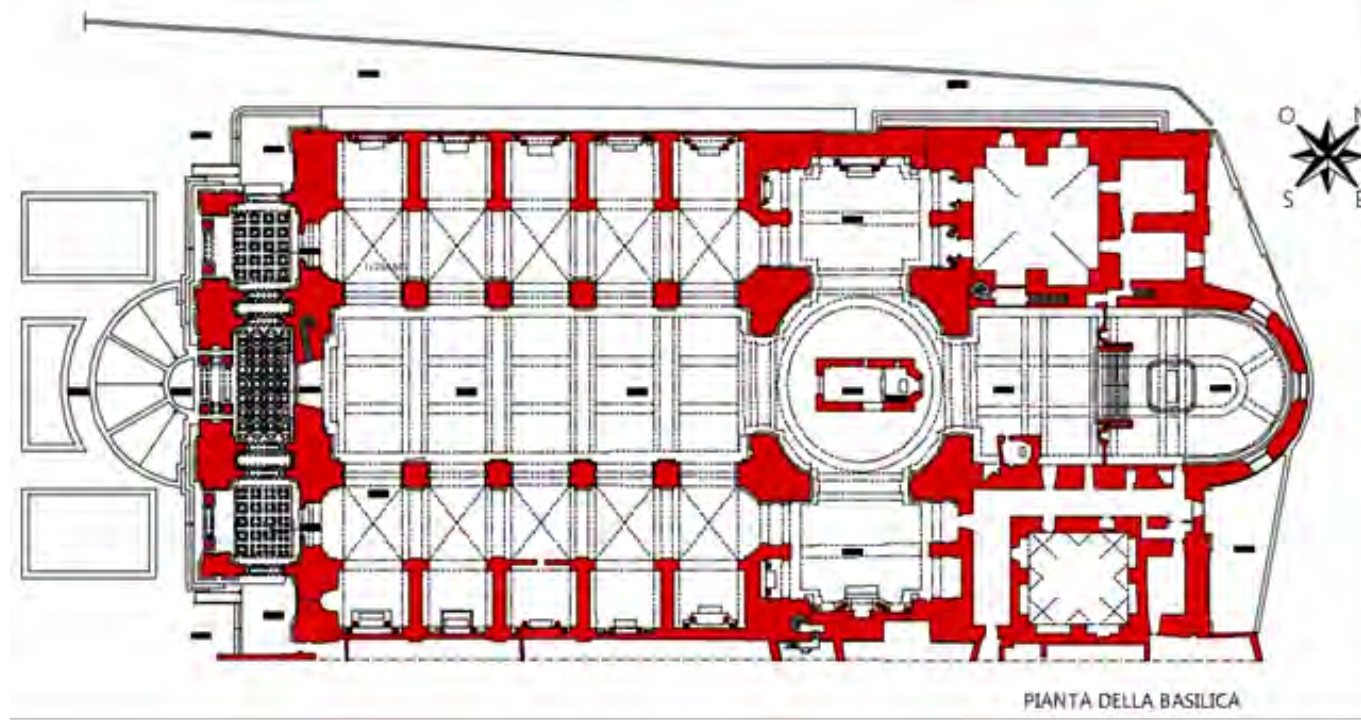


Tratto dall' Ordinanza Sindacale di Inagibilità 357 del 31.10.2016

A seguito dell'evento sismico che ha colpito l'Italia centrale dal 24 agosto del 2016, e soprattutto le repliche del 29 e 30 ottobre 2016 sono stati eseguiti dei sopralluoghi e l'Ordinanza 357 del 31.10.2016 del Sindaco del Comune di Assisi ha reso non utilizzabile ed inagibile alcune delle cappelle laterali e la zona absidale per evidenti segnali di dissesto conseguenti al sisma.

Tuttavia, oltre tale evidente stato di danno, il rilievo puntuale, l'accesso ai sottotetti e una serie di saggi ed indagini approfondite, anche in zone difficilmente accessibili (cupola e tamburo raggiunti tramite pallone aerostatico e droni), hanno consentito una verifica di uno stato di danno molto più diffuso ed accentuato con la recente crisi sismica, di cui nel seguito si da preciso riscontro e riportato nell'allegati grafici "rilievo lesioni".

PERCORSO METODOLOGICO
CONOSCENZA
(RILIEVI, INDAGINI, RICOSTRUZIONE STORICA)
DIAGNOSI
(INDIVIDUAZIONE POSSIBILI CAUSE)
RIMEDI
(PROGETTO INTERVENTI)



RILIEVO GEOMETRICO
RILIEVO DELLE TIPOLOGIE STRUTTURALI
RILIEVO DEL QUADRO FESSURATIVO
INDAGINI
(STRUTTURALI, SISMICHE E GEOLOGICHE)



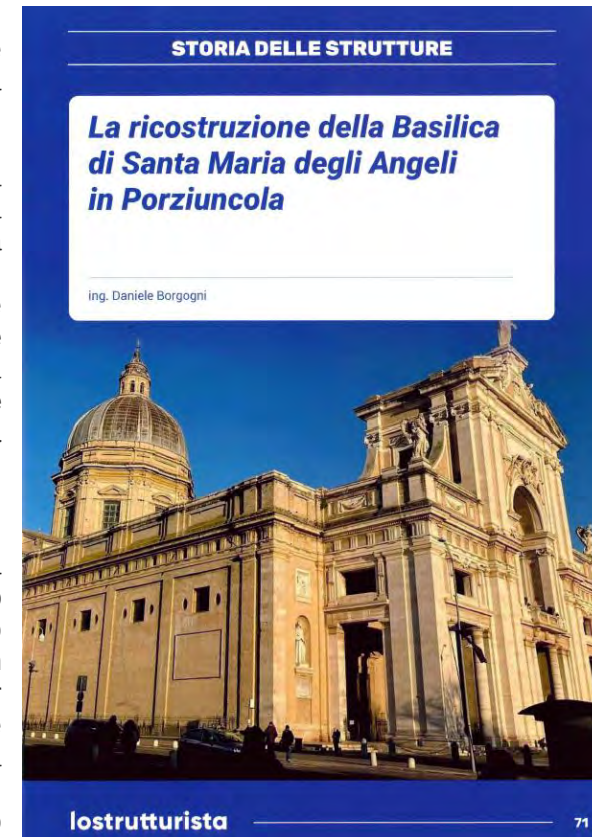
Nel IV secolo, un gruppo di eremiti provenienti dalla Palestina si stabilì in Umbria, ai piedi del Monte Subasio e, in un piccolo appezzamento di terreno, all'epoca chiamato con il nome di **Portiuncola** edificò una piccola chiesetta intitolata a Santa Maria degli Angeli. Il manufatto, delle dimensioni di quattro metri per sette era costituito da un'unica sala con una piccola abside nel lato posteriore, il tutto coperto con un tetto a due falde.

Per i trecento anni successivi - grazie alle gesta e al messaggio francescano

la Porziuncola divenne meta di pellegrinaggio, ma date le dimensioni, al suo interno, durante le celebrazioni, poteva stare solo il sacerdote ed il servitore, lasciando la gran parte dell'assemblea fuori, senza riparo da pioggia, vento o sole. Le cose cambiarono quando, nel 1566, il domenicano Pio V salì al soglio pontificio: il nuovo Papa fece della costruzione e del restauro di edifici religiosi il punto nodale della propria politica papale.

A Santa Maria degli Angeli l'idea del Romano Pontefice fu quella di ricalcare quanto fatto a Loreto, in cui la nuova Basilica era sorta attorno alla Santa Casa. Ma l'idea fu totalmente diversa, sia concettualmente che architettonicamente. Mentre a Loreto la nuova chiesa rappresentava un monumento quasi "indipendente" dal contenuto, a causa della sfarzosità, a Santa Maria degli Angeli, le vecchie e primitive strutture della Porziuncola sarebbero dovute diventare delle reliquie di pietra posizionate al centro della crociera maggiore della nuova Basilica. **La nuova struttura doveva essere concepita come una teca, uno scrigno, al cui interno era protetta la Chiesa amata da Francesco**⁴.

Ad occuparsi del progetto della nuova chiesa, i padri francescani chiamarono un Architetto perugino molto attivo e famoso tra Genova e Milano: **Gian Galeazzo Alessi**. Il modello definitivo ed il progetto vennero consegnati nel 1568. Come da richiesta del Sommo Pontefice, la Porziuncola era al centro della costruzione, sia da un punto di vista geometrico, che da un punto di vista architettonico: per esaltare la chiesa delle origini, Alessi progettò un interno volutamente spoglio e semplificato per la grande Basilica. La soluzione studiata dall'Architetto fu improntata alla semplicità di strutture ed al rifiuto di apparati ornamentali che avrebbero finito con distrarre dall'evento improvviso ed inatteso dell'apparire della Porziuncola al centro della grandiosa navata. Per accentuare quest'aspetto Alessi puntò anche sulla qualità della luce che, assorbita e riflessa dalle semplici pareti ad intonaco, avrebbe esaltato il carattere di solennità dello spazio e di quanto in esso contenuto.



STORIA DELLE STRUTTURE

La ricostruzione della Basilica di Santa Maria degli Angeli in Portiuncola

Ing. Daniele Borgogni

lostrutturista

71

Tratto da Rivista
Lo strutturista, n.20 - ottobre 2024

INGENIUM
società di ingegneria

CENNI STORICI – EVENTI SIGNIFICATIVI

Sintesi eventi significativi

- Costruzione 1568 – 1687**

La grandiosità della costruzione, una volta terminata, fu sotto gli occhi di tutti. Una Basilica a tre navate della lunghezza di 126 metri ed una larghezza di circa 55 m. La navata centrale, coperta con una volta a botte in mattoni, aveva una luce di 18.5 metri. All'incrocio delle braccia della croce latina, sopra la Porziuncola, una cupola del diametro di circa 20 metri con la lanterna posizionata a 75 metri da terra. **Cupola innalzata su un tamburo dalla spiccata verticalità, come mai fatto prima, per evitare che venisse nascosta dietro la "massa del corpo architettonico".**

- Sisma 1831-1832**

- 1924-1930 Nuova Facciata**

- Sisma 1997/Giubileo**

- SISMA 2016**





1924-1930 Nuova Facciata

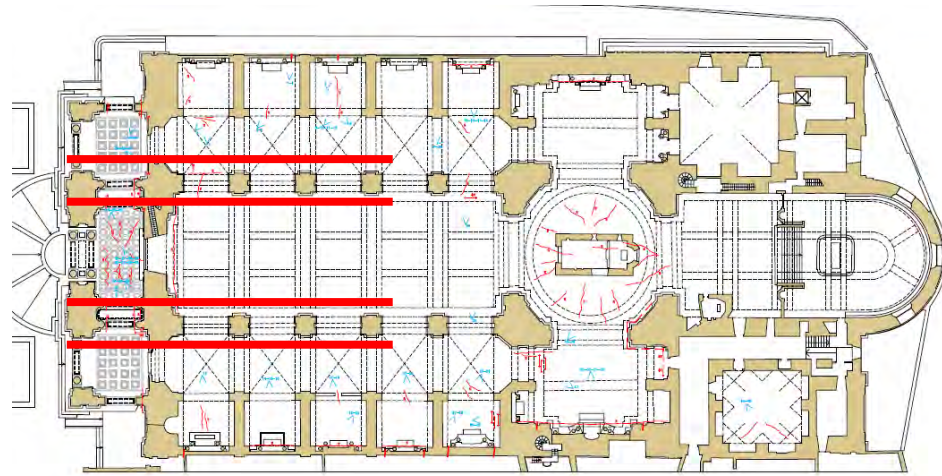


Sisma 1997/Giubileo



Intervento Sisma '97/Giubileo





INTERVENTI PREVISTI

- CUPOLA E TAMBURO
- CAPPELLE LATERALI
- FACCIATA
- TIRANTI
- ABSIDE
- CAMPANILE



STRALCIO INTERVENTO
CUPOLA-TAMBURO

ESISTENTE SOLARO TIPO 240
RICOSTRUZIONE COPERTURA IN LEGNO LAMELLARE
A. CORNICI IN ACCIAIO (LUPIN 240)
B. NUOVE CAPPELLE IN LEGNO LAMELLARE
C. TAVOLE 18x220mm INTERASSE 800mm
D. TRAVELLI 80x80mm INTERASSE 800mm
E. CORDOLI TAVOLATI 40x40mm NON PALLATO NON MASSEGGIATI
F. NASTRO FORATO IN ACCIAIO
DI CONTRAPPESO DI PALLA

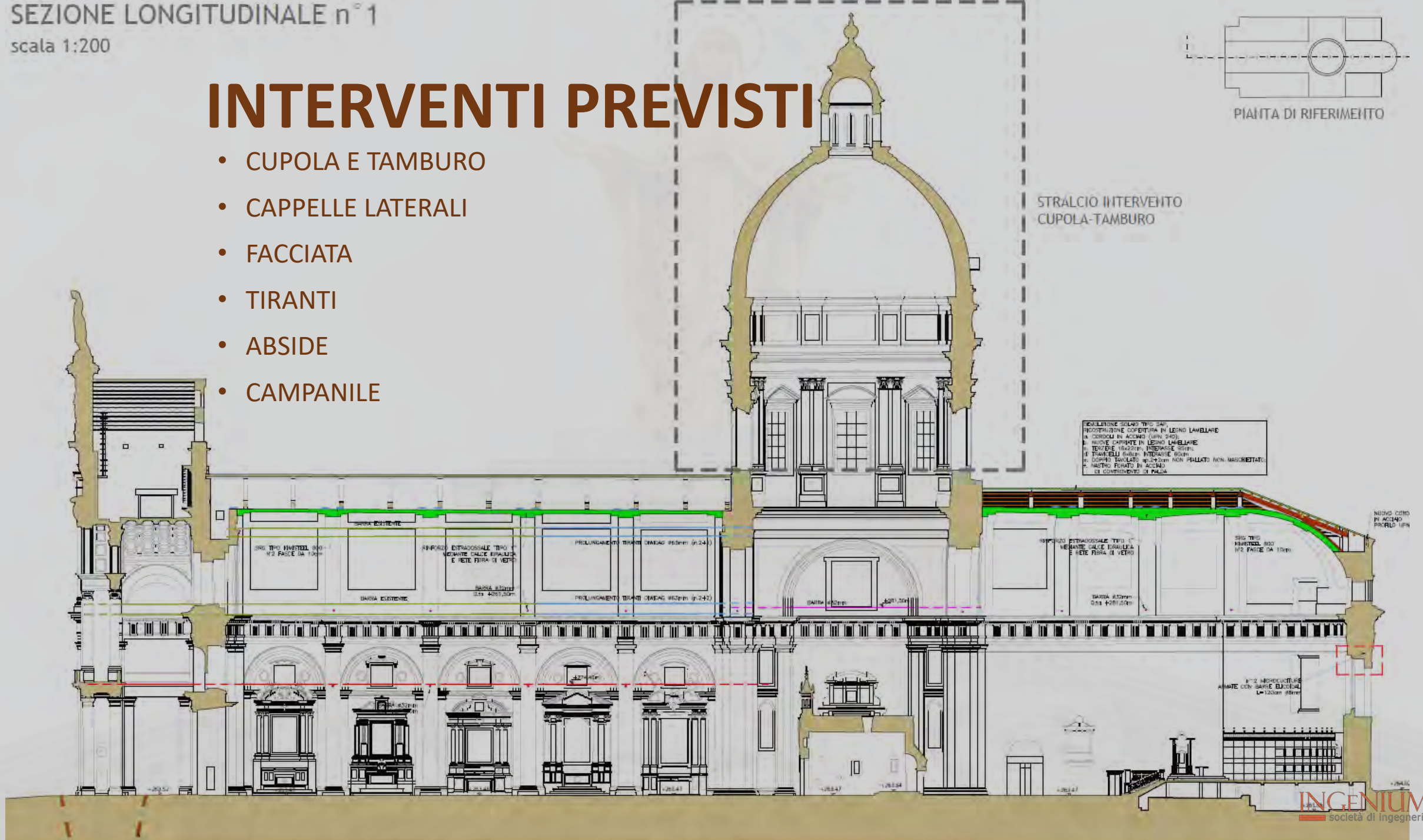
NUOVO CORO
IN ACCIAIO
PROF. 100mm

REINFORZO STRADODISALE TIPO 17
MECANTE CALCE E RAFFORZA
E RETE FERRA DI VETRO

STR. TIPO INVERTELL 800
1/2 FACCE DA 100mm

BARDA 800mm
DA 420/200mm

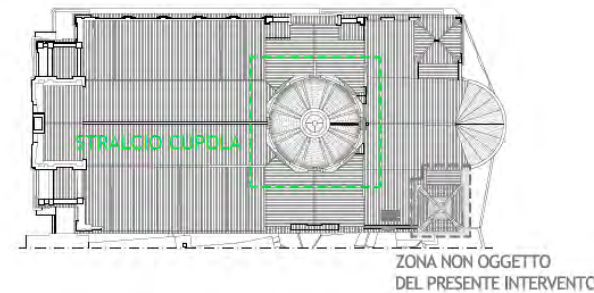
4-2 MICROCLUTTURE
ARMATE CON SARRE ELETTRICI
L=120cm Ø8mm



LA CUPOLA ED IL TAMBURO

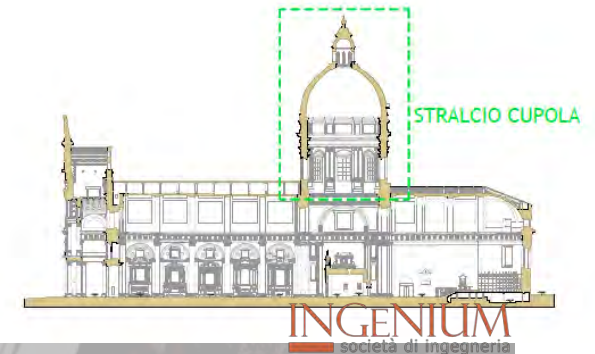
PIANTA DI RIFERIMENTO

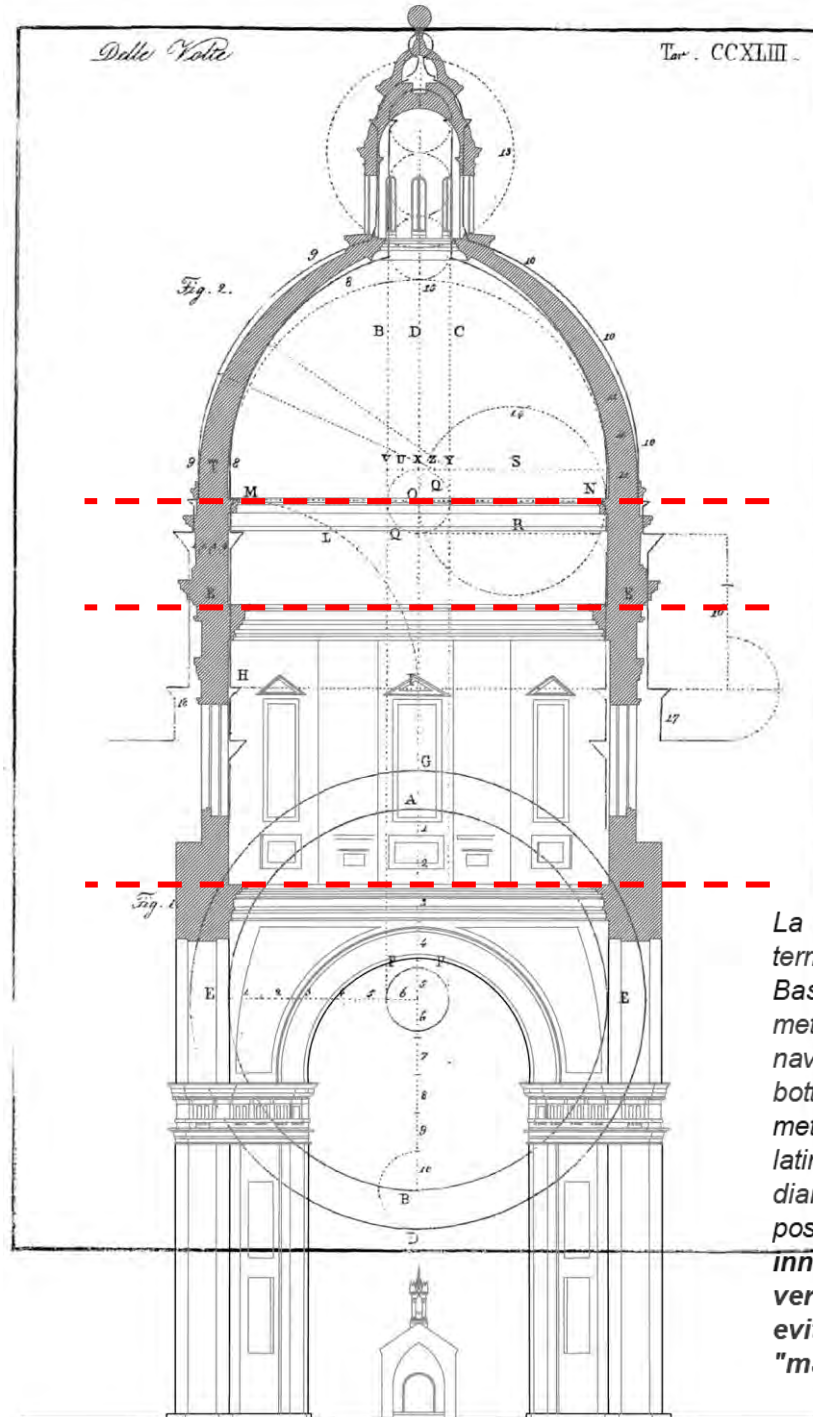
scala 1:1000



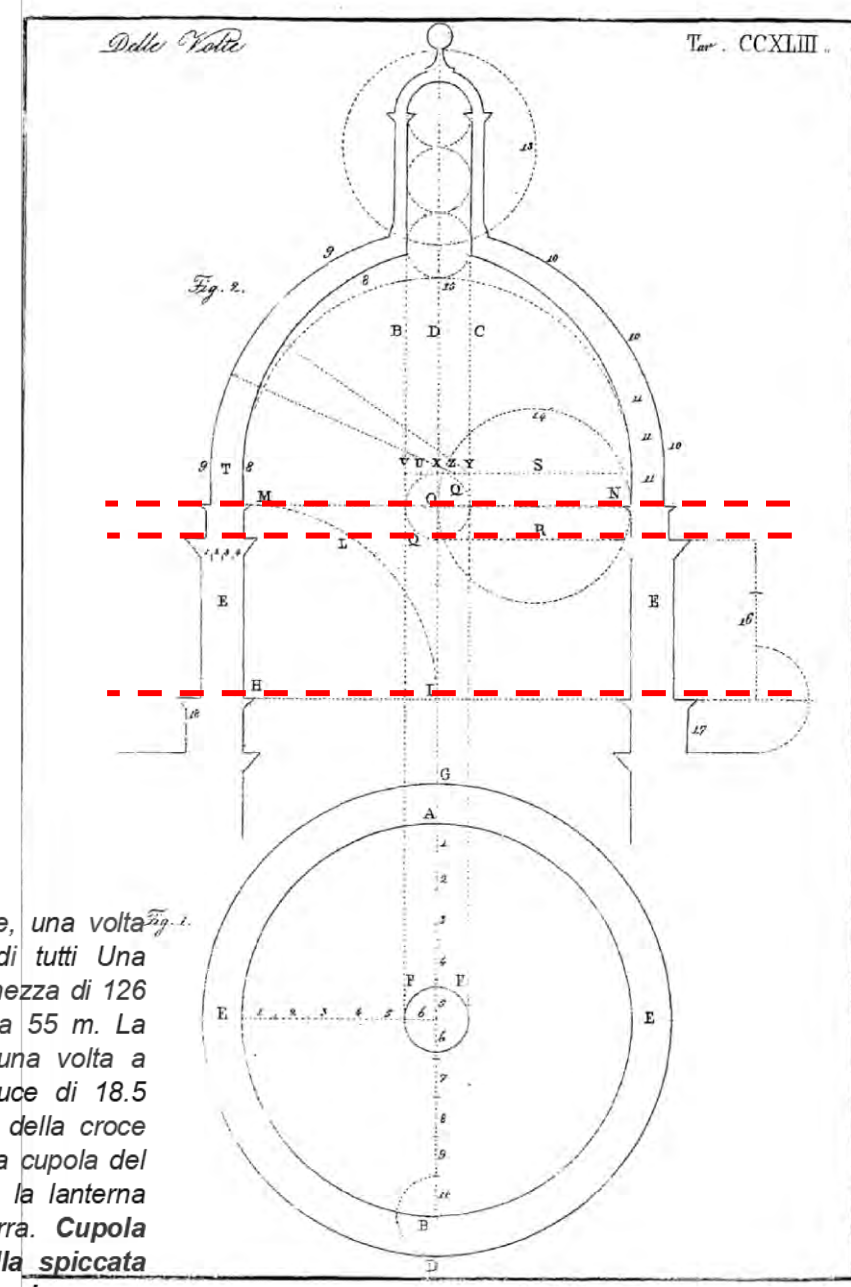
SEZIONE DI RIFERIMENTO

scala 1:1000



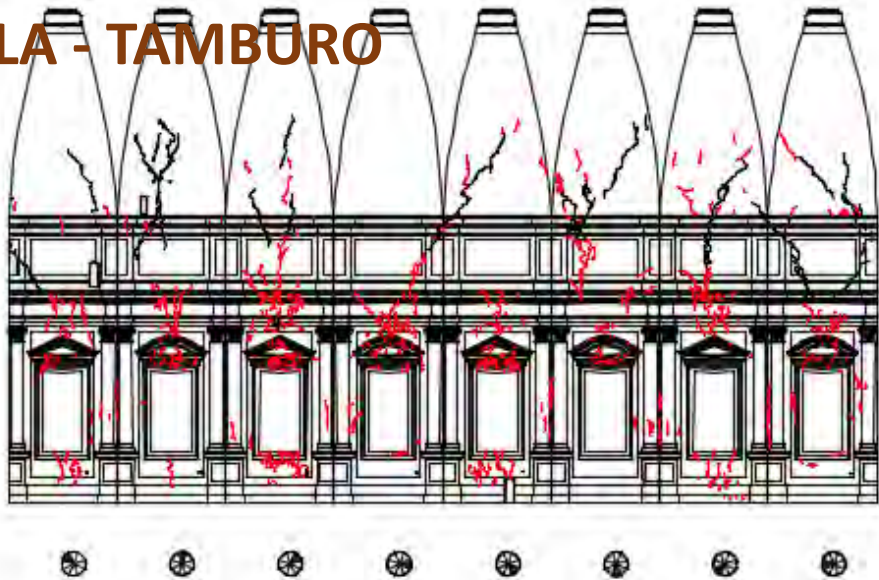


La grandiosità della costruzione, una volta terminata, fu sotto gli occhi di tutti. Una Basilica a tre navate della lunghezza di 126 metri ed una larghezza di circa 55 m. La navata centrale, coperta con una volta a botte in mattoni, aveva una luce di 18.5 metri. All'incrocio delle braccia della croce latina, sopra la Porziuncola, una cupola del diametro di circa 20 metri con la lanterna posizionata a 75 metri da terra. **Cupola innalzata su un tamburo dalla spiccata verticalità, come mai fatto prima, per evitare che venisse nascosta dietro la "massa del corpo architettonico".**





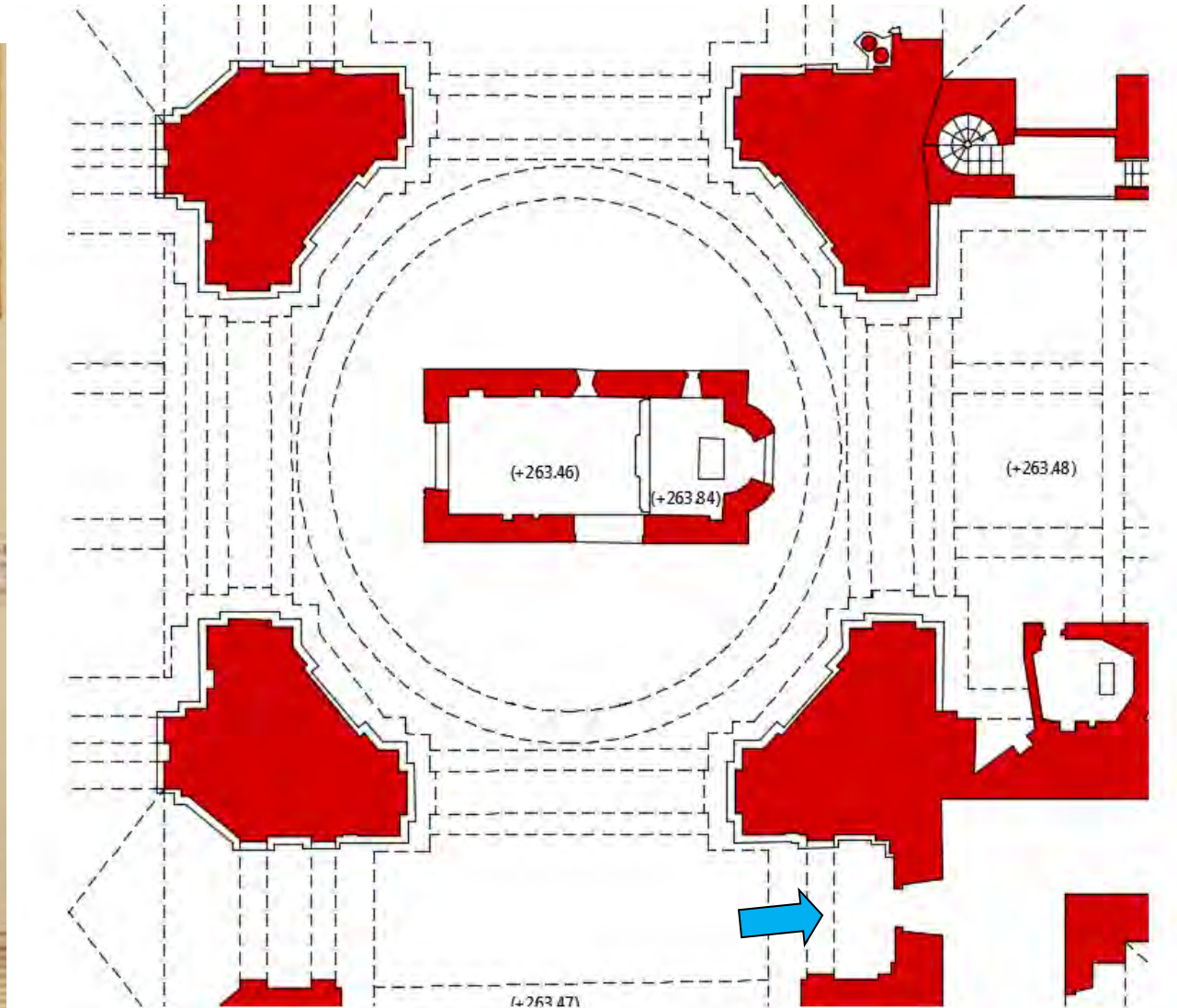
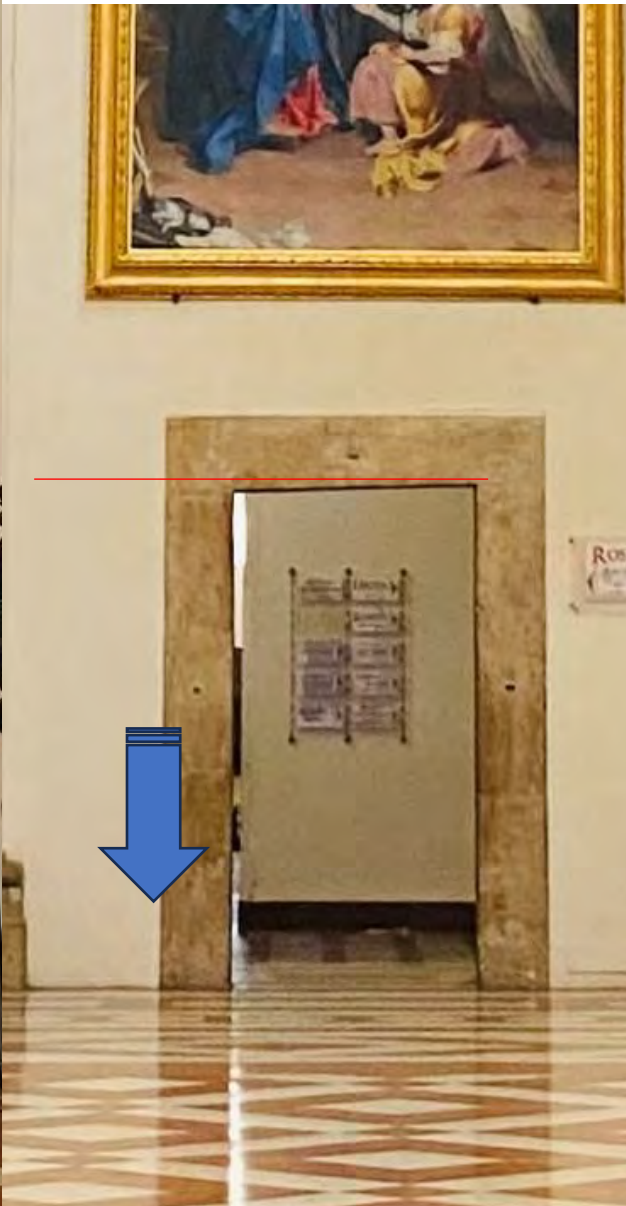
CUPOLA - TAMBURO



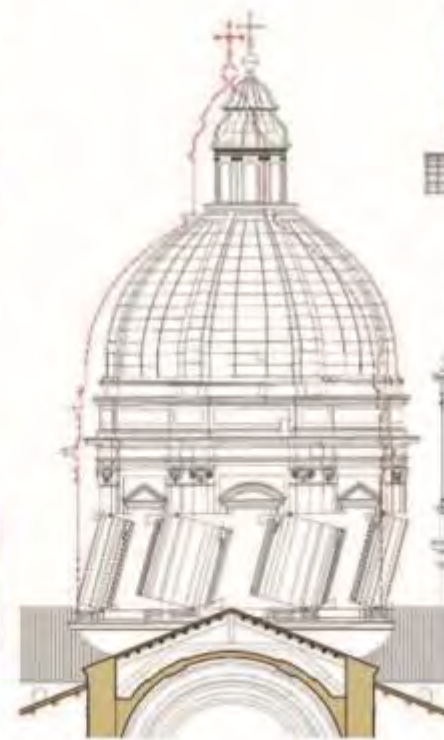
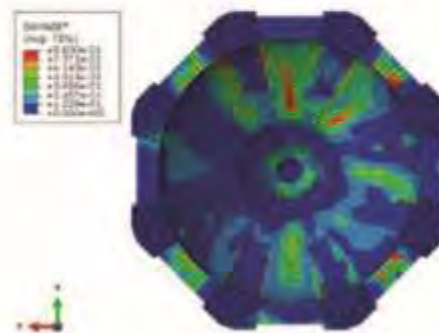
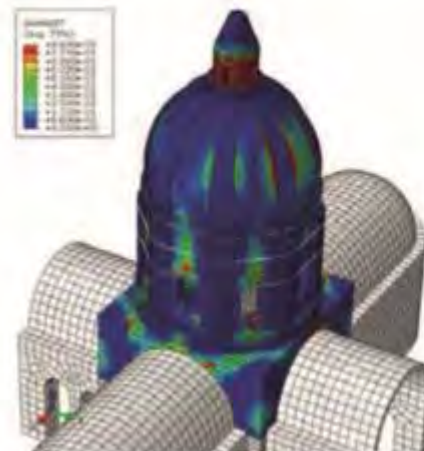
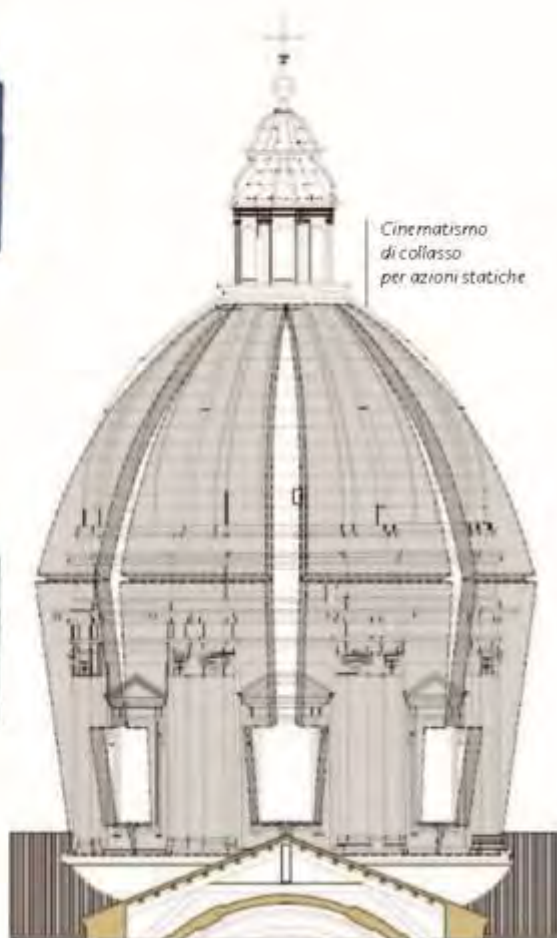
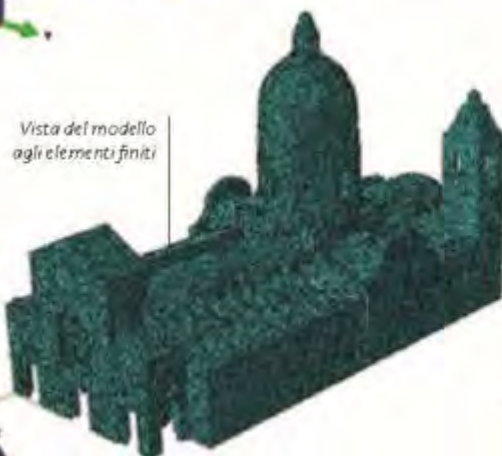
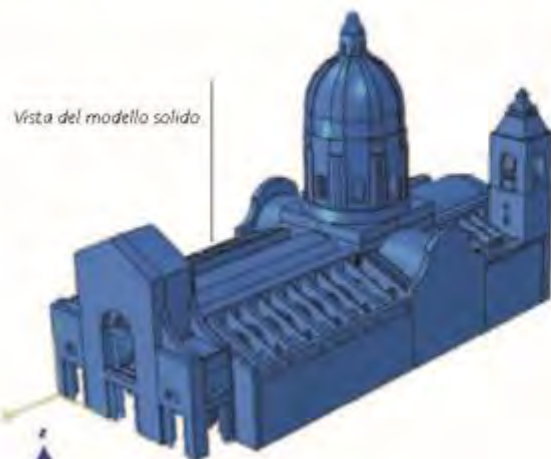
QUADRO FESSURATIVO INTERNO







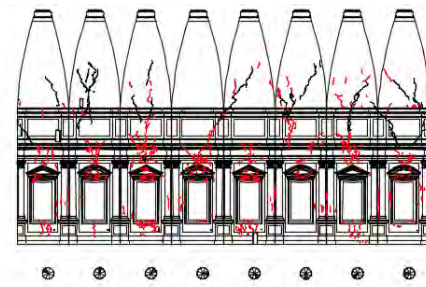
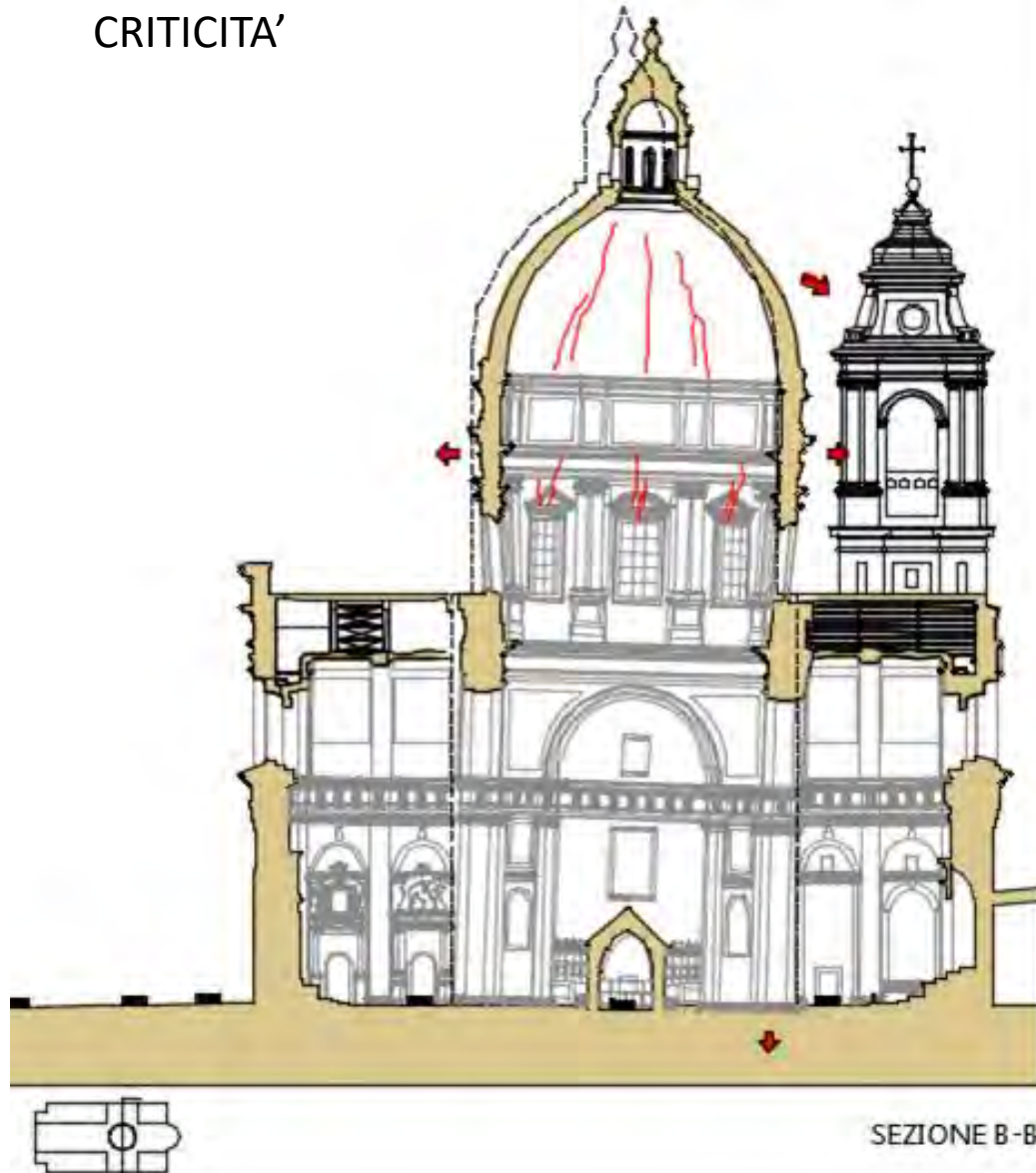
MODELLAZIONE NUMERICA DELLA BASILICA DI SANTA MARIA DEGLI ANGELI AD ASSISI



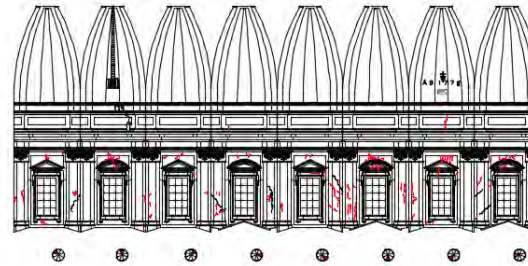
Mappe di danno a trazione sul sistema tamburo-cupola ottenute tramite analisi statica non lineare per azione orizzontale uniforme in direzione Y (SISMICA) - si osservi l'andamento pressoché diagonale delle concentrazioni di tensioni di trazione. Le zone tese indicano la formazione di bielle compresse diagonali nelle colonne murarie adiacenti le finestrate (meccanismo resistente tipico delle murature). Evidenziazione del cinematismo corrispondente.

CUPOLA - TAMBURO

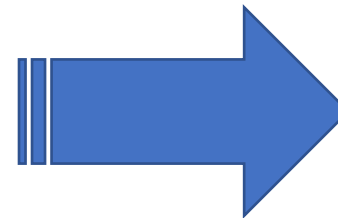
CRITICITA'



QUADRO FESSURATIVO INTERNO

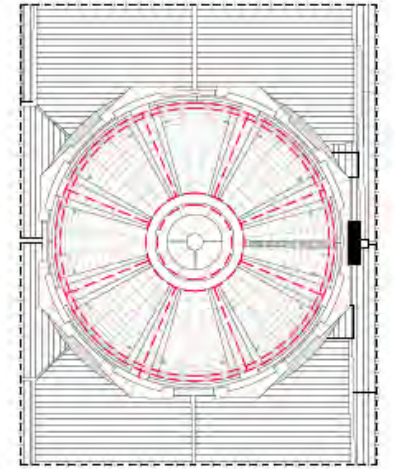


PROPOSTA DI INTERVENTO:
MONITORAGGIO

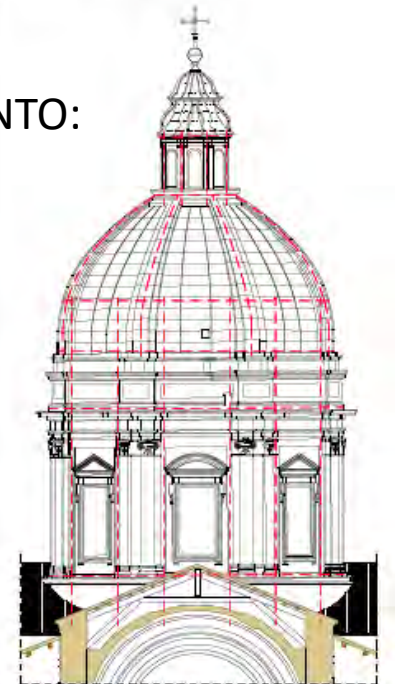


CEDIMENTO DIFFERENZIALE (ESTINTO ?)

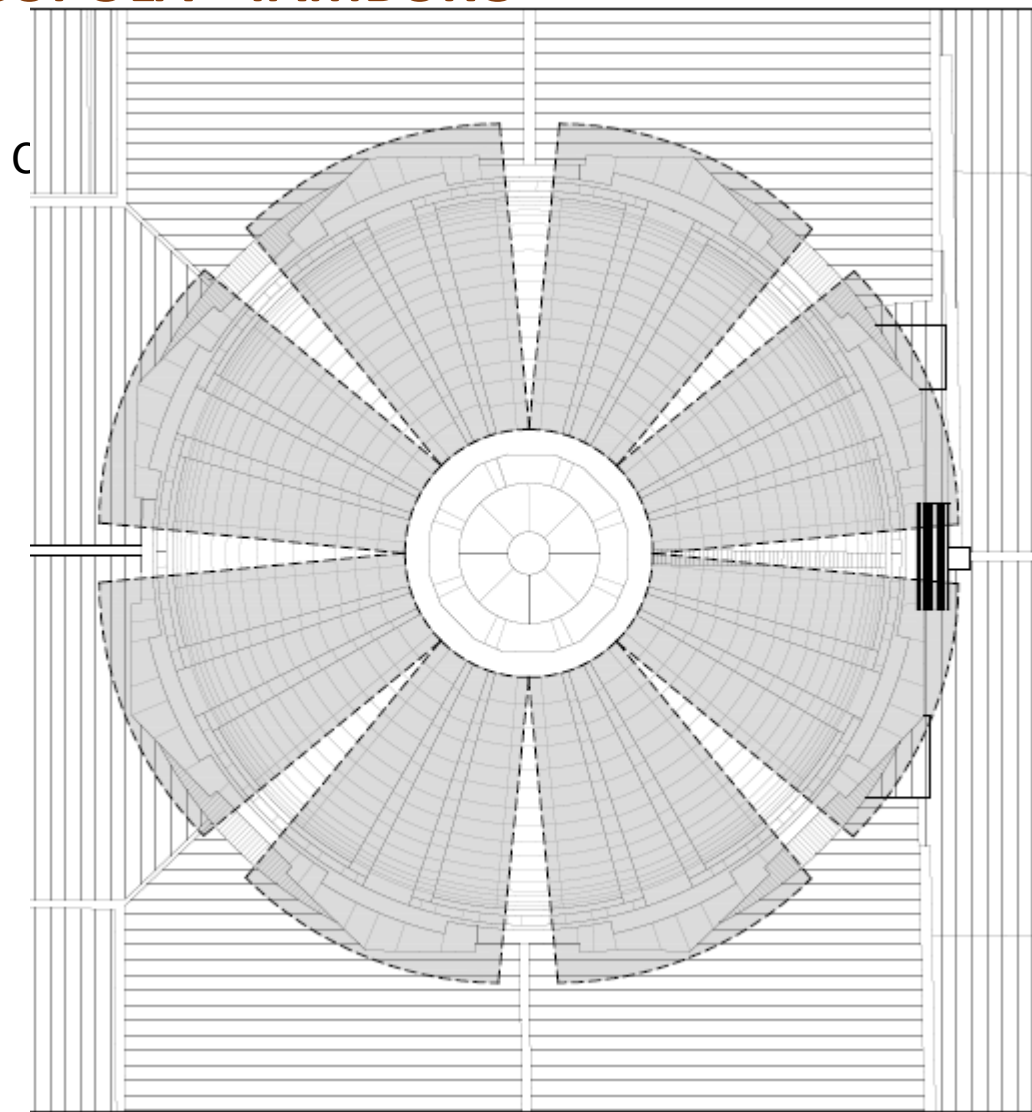
RETE FIBRA OTTICA
"MONITORAGGIO STRUTTURALE"
Scala 1:200



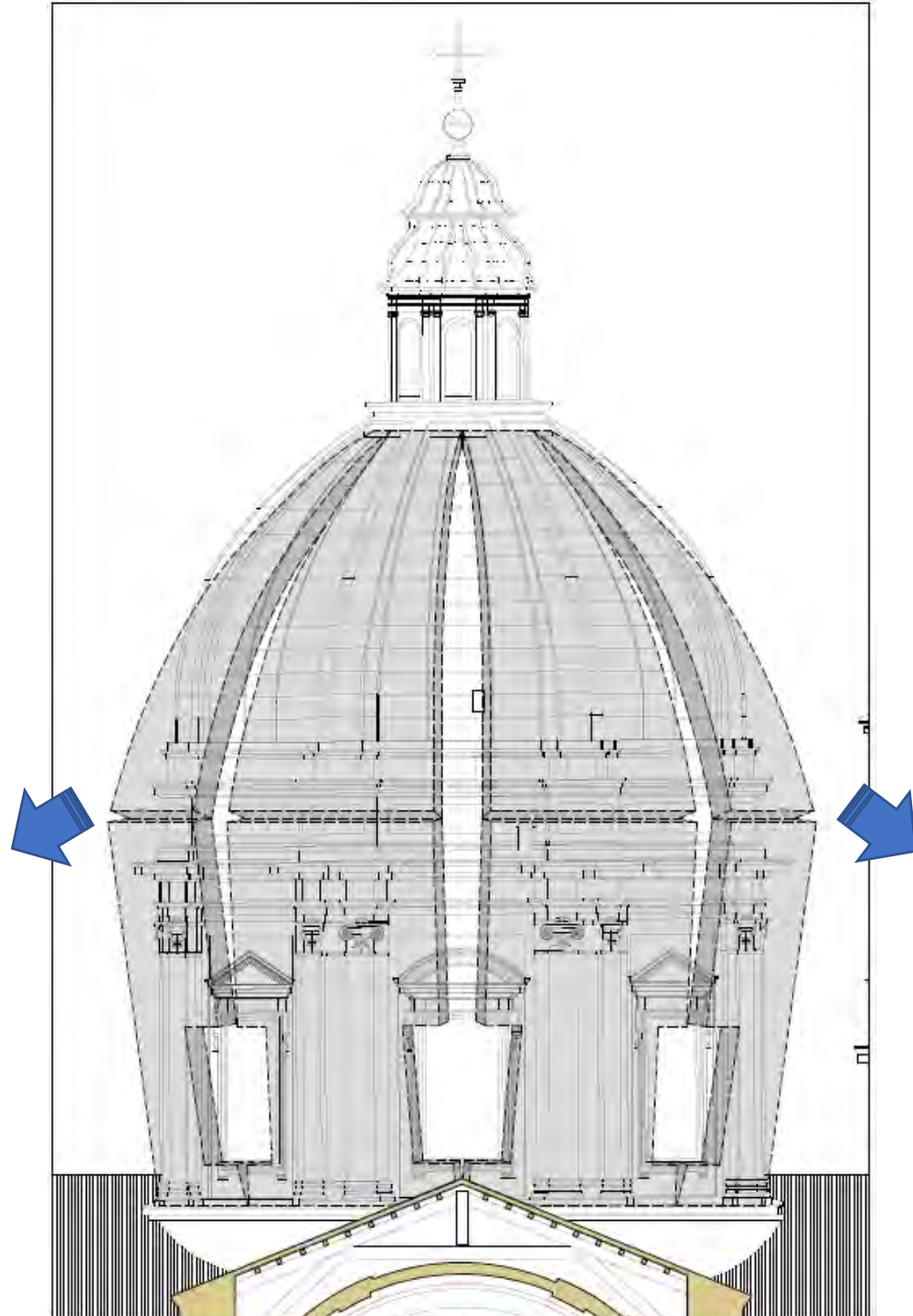
PROSPETTO TIPO



CUPOLA - TAMBURO

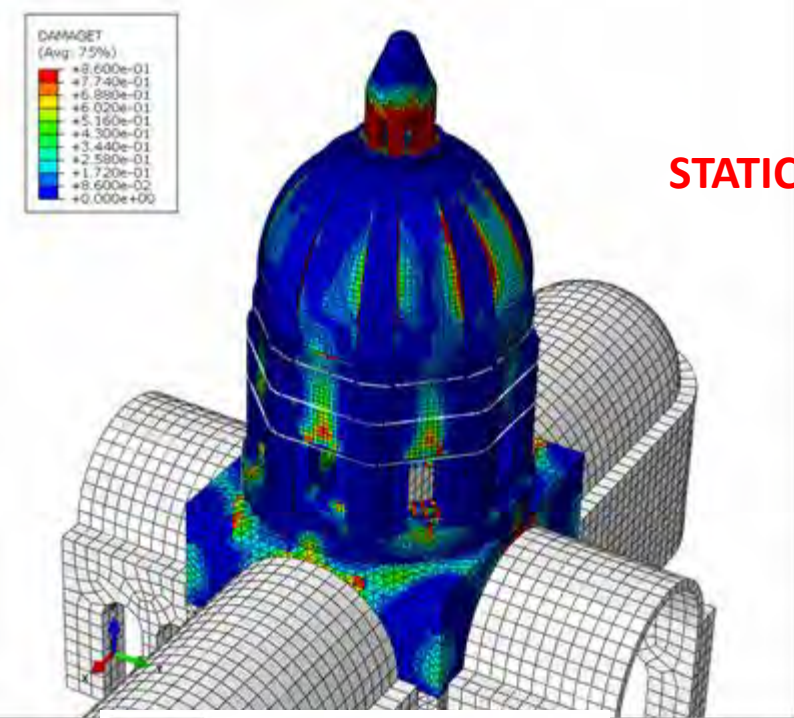


STATICA

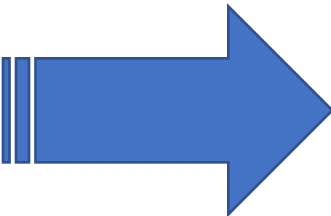
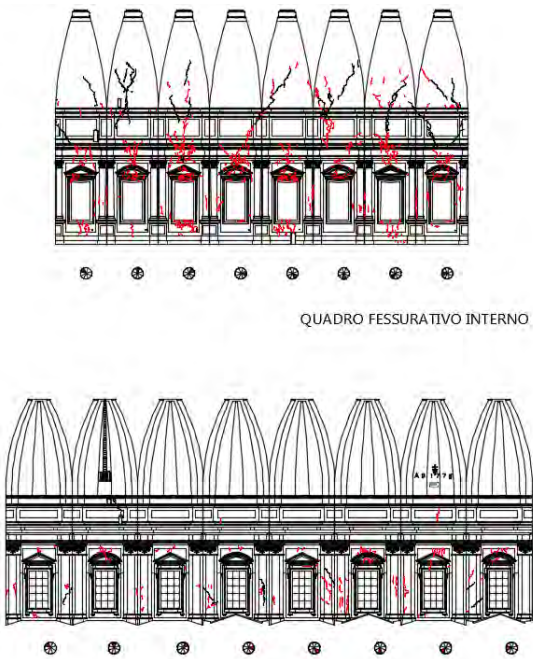


CUPOLA - TAMBURO

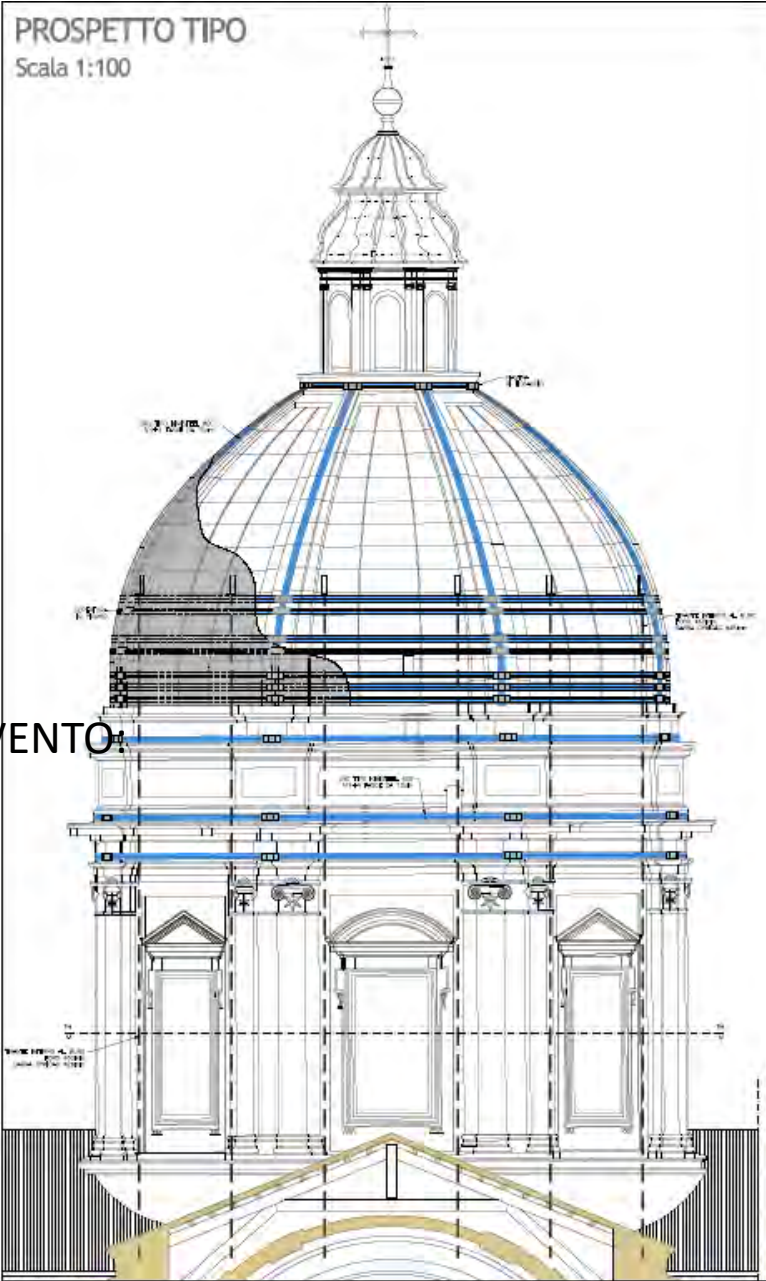
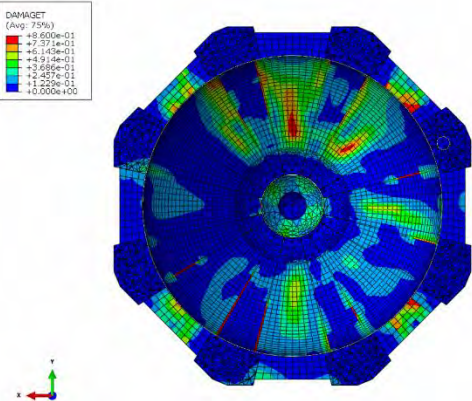
CRITICITA'



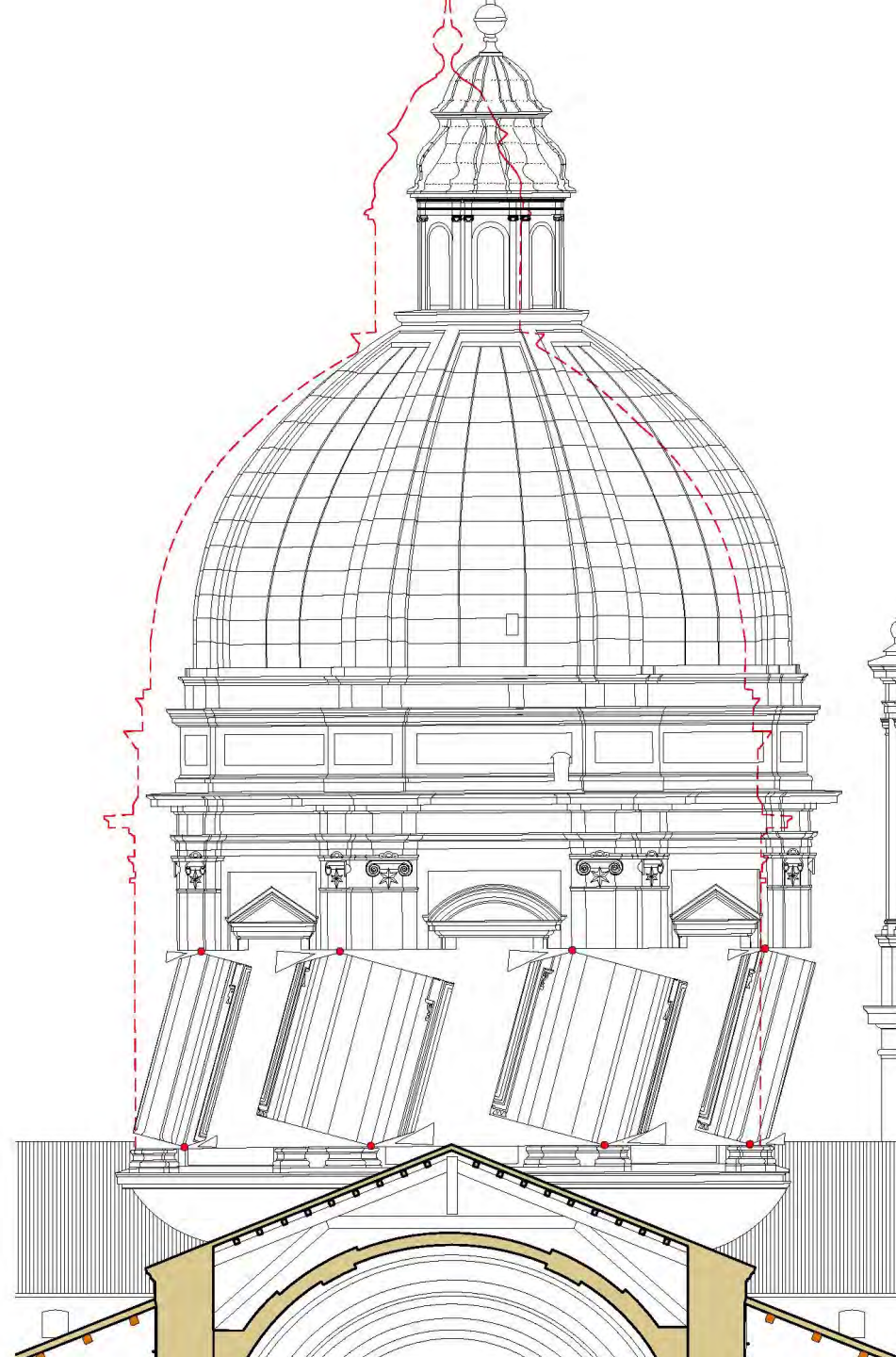
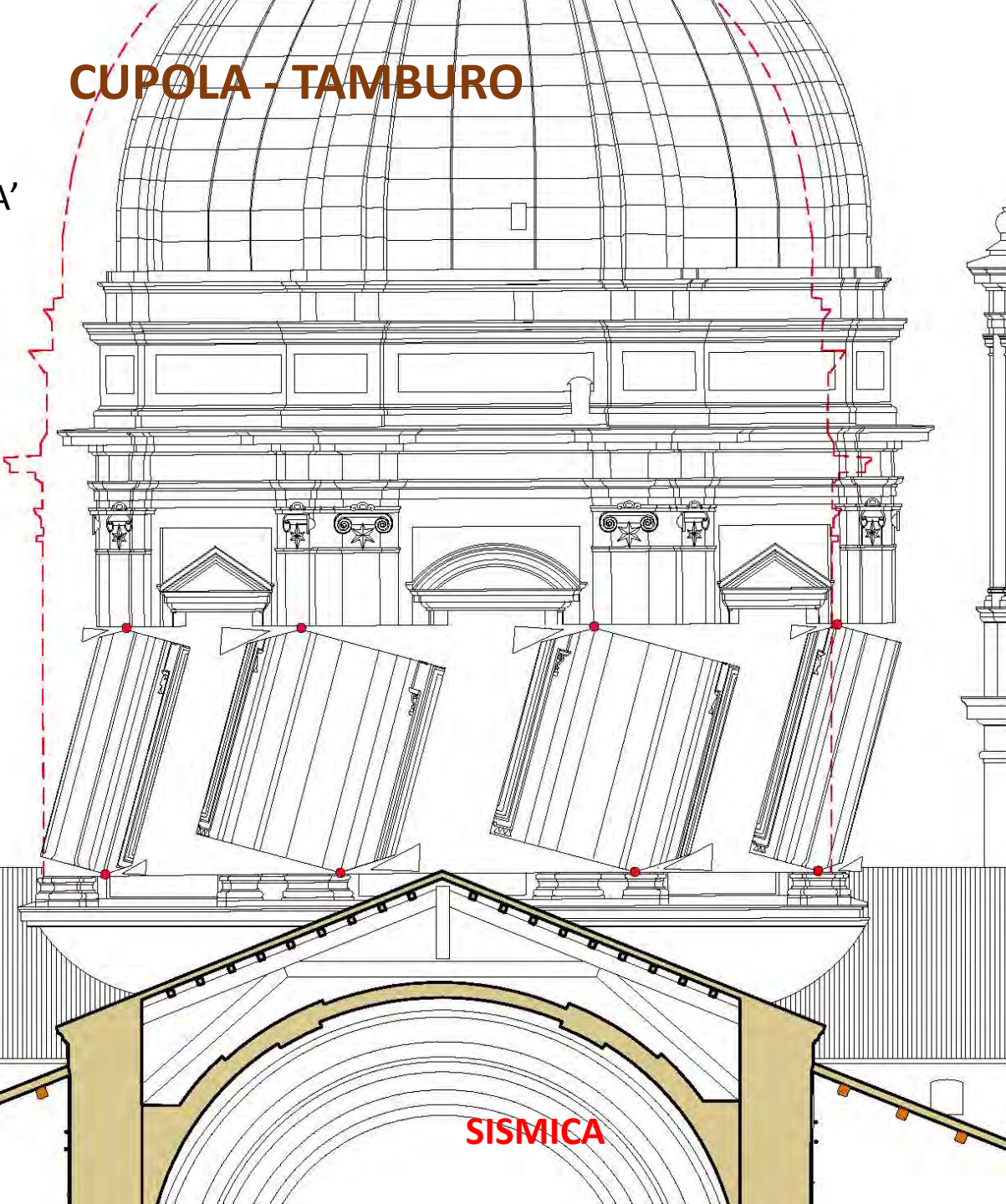
STATICA



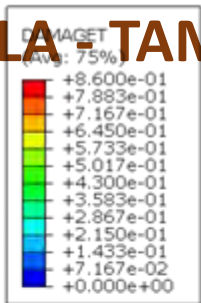
PROPOSTA DI INTERVENTO
CERCHIATURA



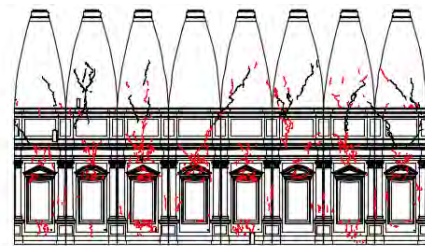
CUPOLA - TAMBURO



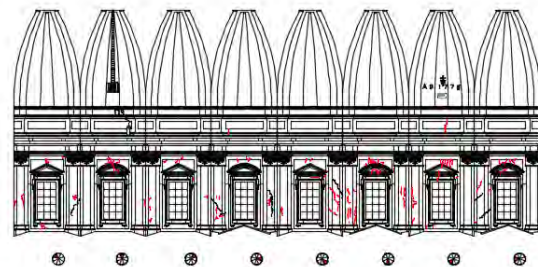
CUPOLA - TAMBURO



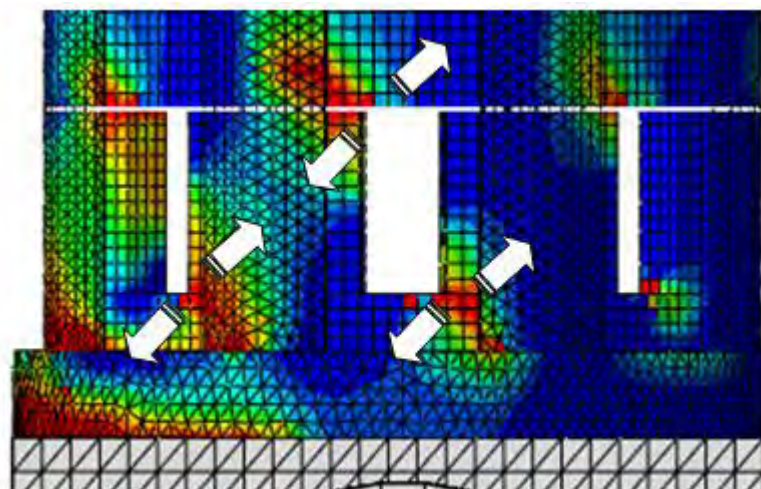
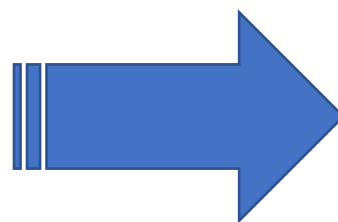
CRITICITA'



QUADRO FESSURATIVO INTERNO

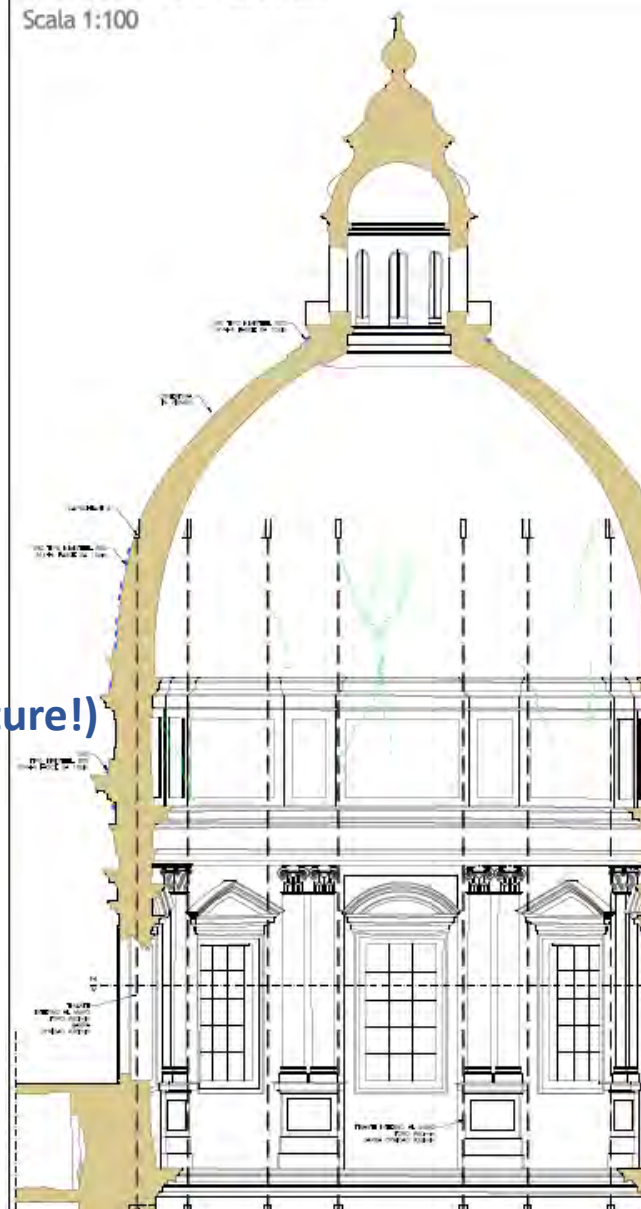


PROPOSTA DI INTERVENTO:
TIRANTI VERTICALI (e cerchiature!)



SISMICA sicurezza ANTE 33% -> POST 68%

SEZIONE TRASVERSALE
Scala 1:100



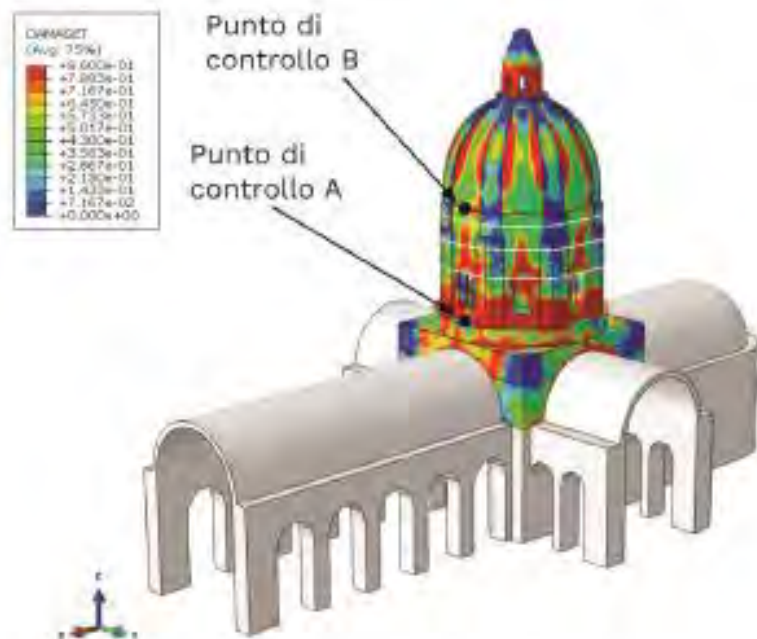


Figura 30. Mappa di danneggiamento a trazione ottenuta sul nucleo centrale della basilica mediante analisi dinamica non lineare con accelerogramma spettro-compatibile.

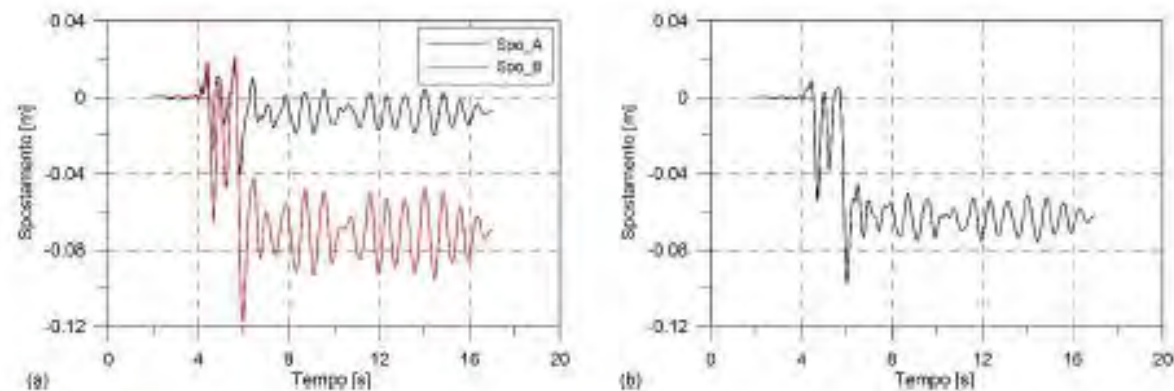


Figura 31. (a) Storie temporali degli spostamenti in direzione y dei punti di controllo A e B indicati in Figura 30. (b) Drift orizzontale dinamico calcolato in direzione y fra i punti A e B.

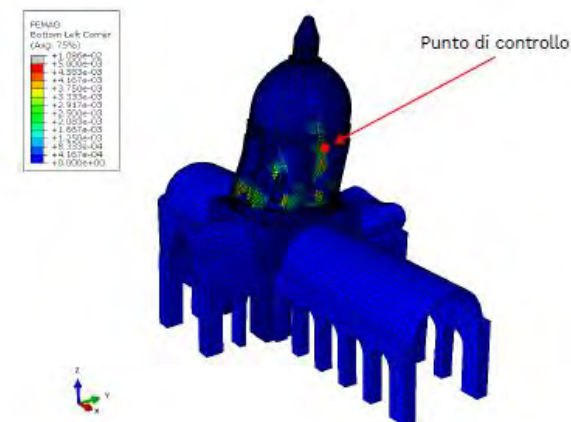


Figura 28. Analisi statica non lineare e indicazione del punto di controllo nel modello post-intervento.

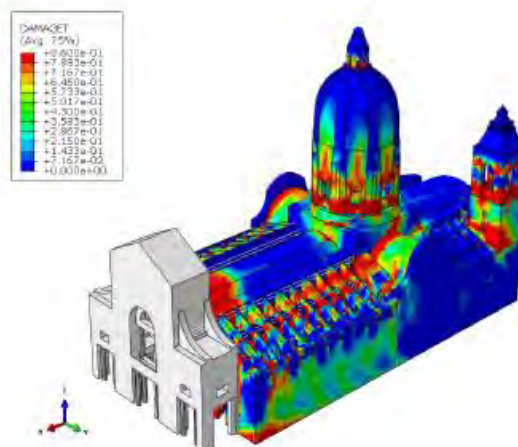


Figura 16. Mappa di danneggiamento a trazione ottenuta mediante analisi dinamica non lineare con accelerogramma spettro-compatibile su modello rinforzato

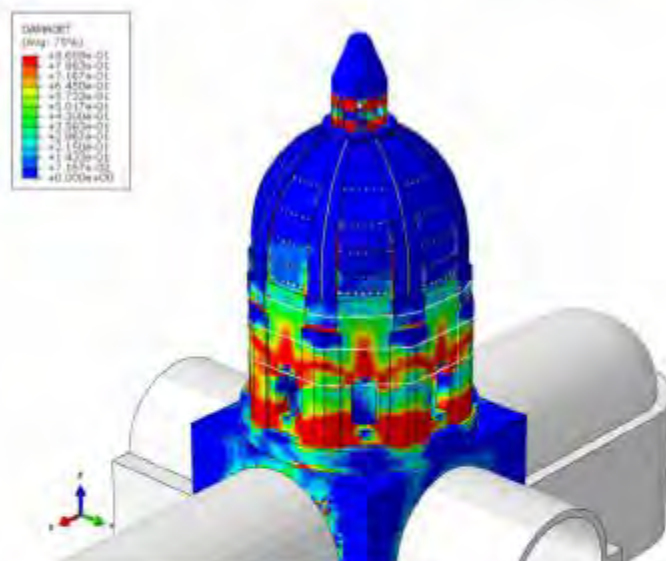


Figura 33. Mappa di danneggiamento a trazione ottenuto mediante analisi dinamica non lineare con accelerogramma spettro-compatibile su modello del nucleo centrale rinforzato

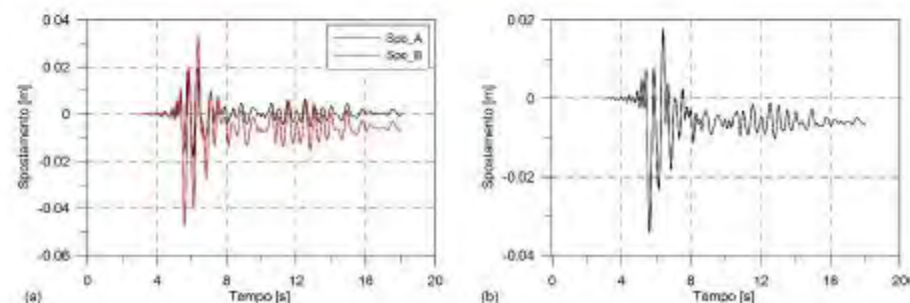


Figura 34. (a) Storie temporali degli spostamenti in direzione y dei punti di controllo A e B ottenuti nel modello post-intervento. (b) Drift orizzontale dinamico calcolato in direzione y fra i punti A e B.

5.4 Analisi dinamica non lineare post-intervento

Analogamente a quanto eseguito nel caso del modello globale della basilica, nel modello strutturale globale post-intervento del sistema archi trionfali, tamburo e cupola, oltre che ad un incremento dei parametri meccanici come descritto al paragrafo 2.3, è stato valutato l'effetto sulla risposta globale dato dall'inserimento delle 16 barre Dywidag verticali nei maschi murari del tamburo e dall'applicazione delle fasce in materiale composito a fibra d'acciaio all'estradosso della cupola. In Figura 32 si riporta un'immagine del modello solido comprensivo dei sistemi di rinforzo (Figura 32a) e un particolare della discretizzazione agli elementi finiti in cui si mettono in evidenza le barre interne alla muratura e le fasce in composito. Questi ultimi sono stati modellati con elementi shell di dimensioni rispondenti alle dimensioni di progetto e rese aderenti al supporto murario mediante vincoli cinematici. Dato il caso strutturale in esame, non si è tenuto conto della rottura per delaminazione in quanto in una cerchiatura risulta un tipo di rottura improbabile.



Figura 32. Particolare della modellazione agli elementi finiti del sistema archi trionfali – tamburo – cupola comprensivo dei sistemi di rinforzo strutturale.

Per quanto riguarda le sollecitazioni assiali delle fasce di rinforzo in materiale composito (Figura 35), si riporta in Figura 36 l'andamento dinamico della tensione di trazione in un elemento della fascia di base, ovvero quella più sollecitata.

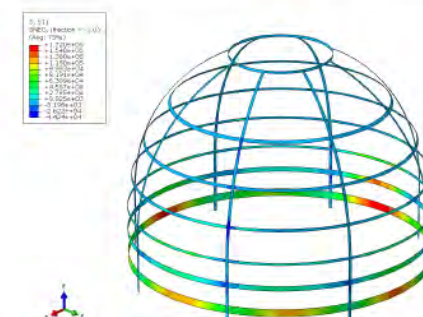
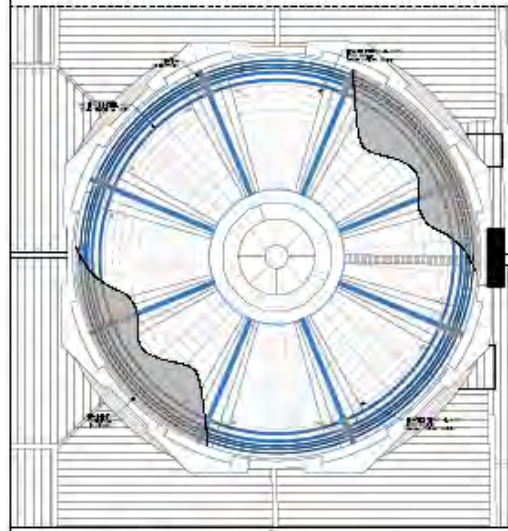
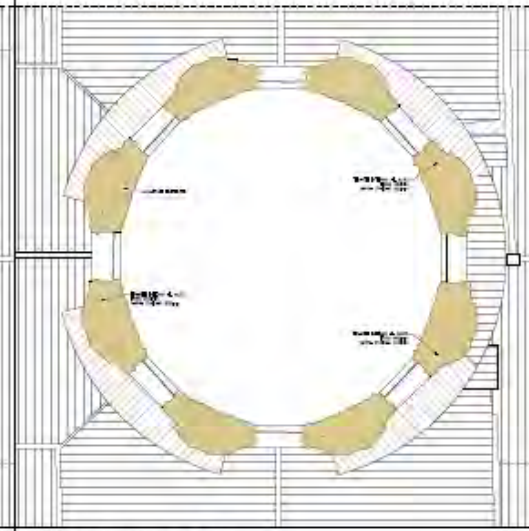


Figura 35. Mappa di tensione assiale presente nelle fasce di materiale composito alla fine della simulazione dinamica.

PIANTA COPERTURA CUPOLA - Scala 1:100

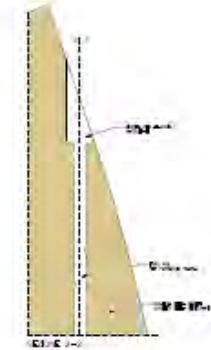


PIANTA A LIVELLO APERTURE - SEZIONE Z-Z - Scala 1:100

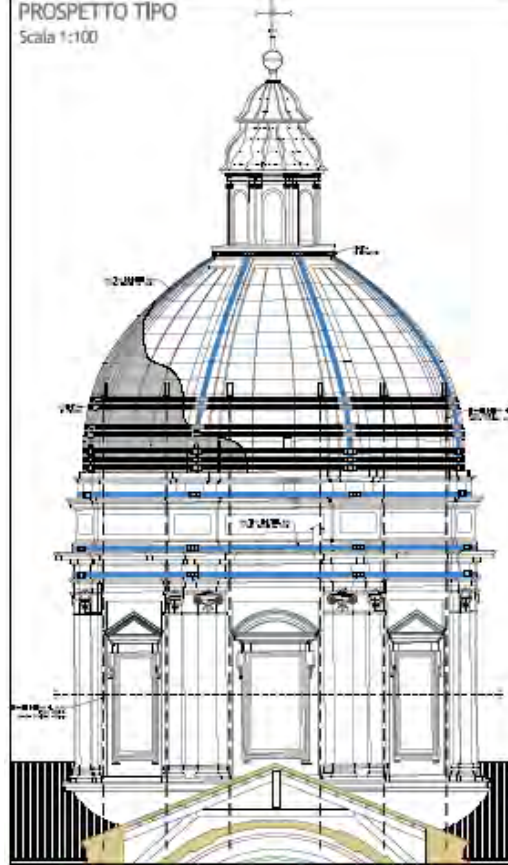


PARTICOLARE CAPOCHIAVE X
FASI DI ESECUZIONE

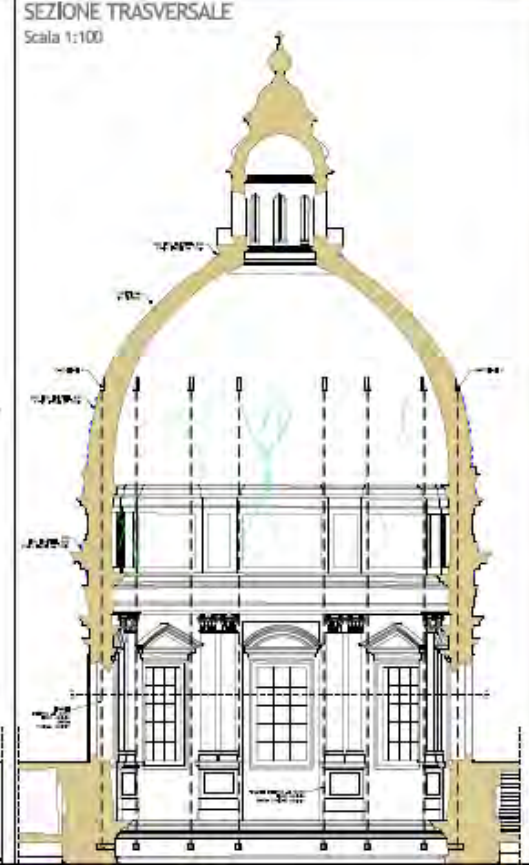
FASE 1, 2 e 3



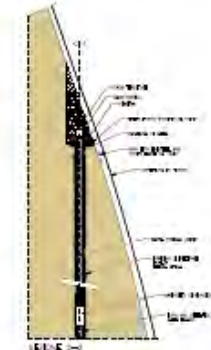
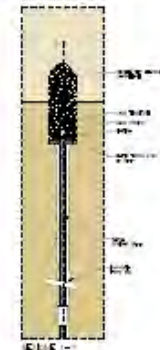
PROSPETTO TIPO
Scala 1:100



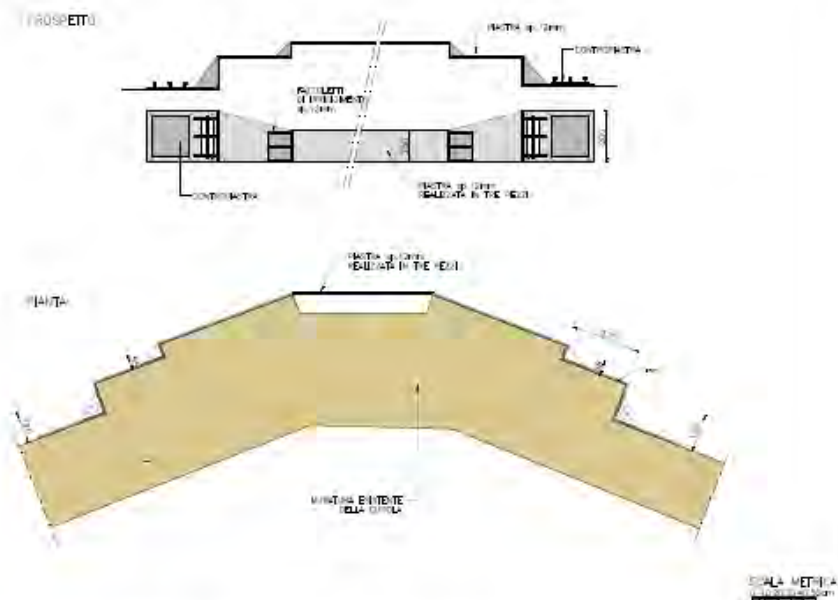
SEZIONE TRASVERSALE
Scala 1:100



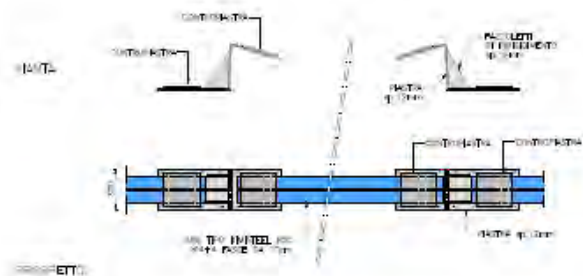
FASE 4, 5, 6 e 7



ANCORAGGIO SRG ALLA COPERTURA DELLA CUPOLA
PARTICOLARE PIASTRA DI FISSAGGIO LIVELLO 1

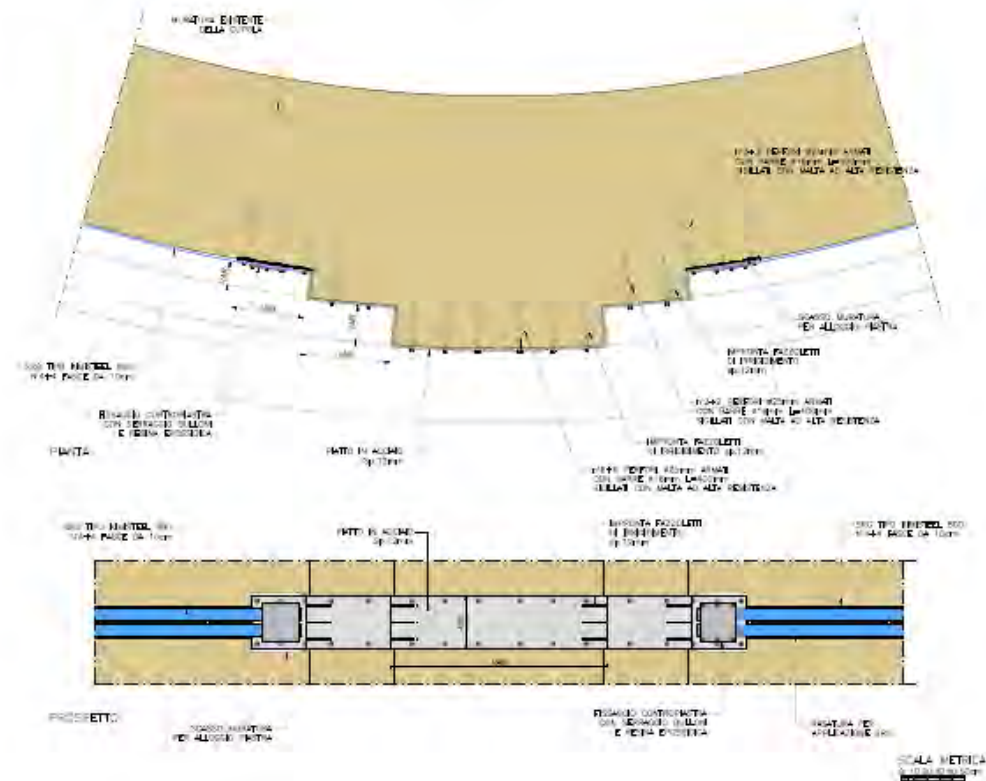


ANCORAGGIO SRG ALLA COPERTURA DELLA CUPOLA
PARTICOLARE PIASTRA DI FISSAGGIO LIVELLO 2

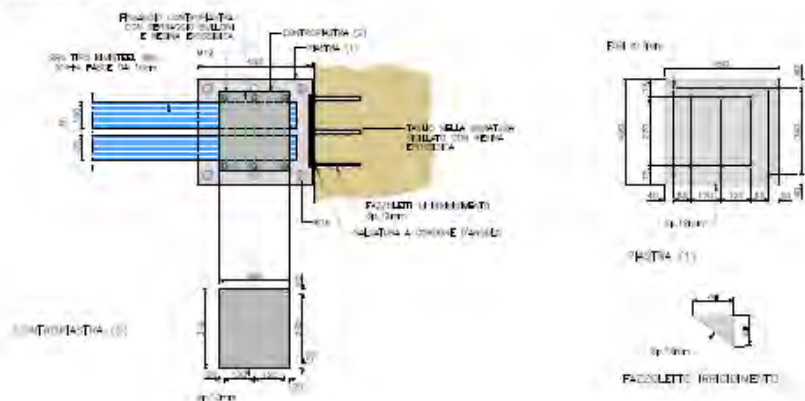


SCALA METRICA

ANCORAGGIO SRG ALLA COPERTURA DELLA CUPOLA
PARTICOLARE PIASTRA DI FISSAGGIO LIVELLI DAL 3 ALL'11



ACKNOWLEDGMENTS

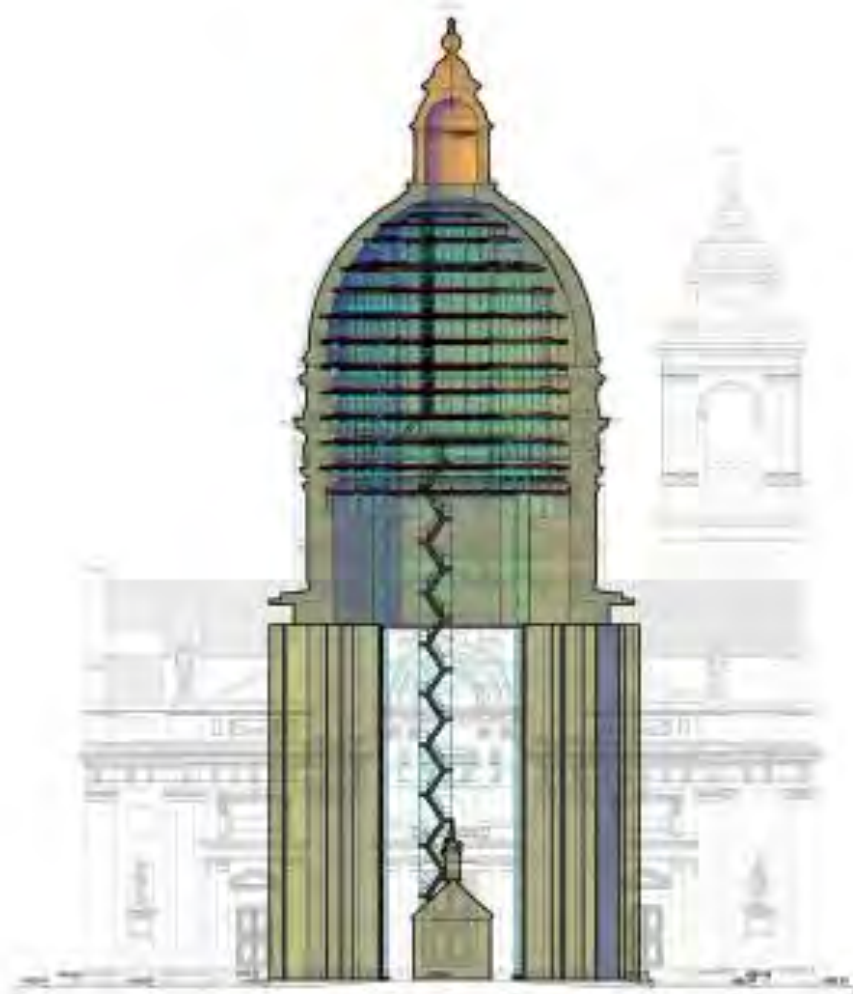
**FAZZOLETTE IRRIDIENTI**

SARCITURE PER LA CONTINUITA' MURARIA

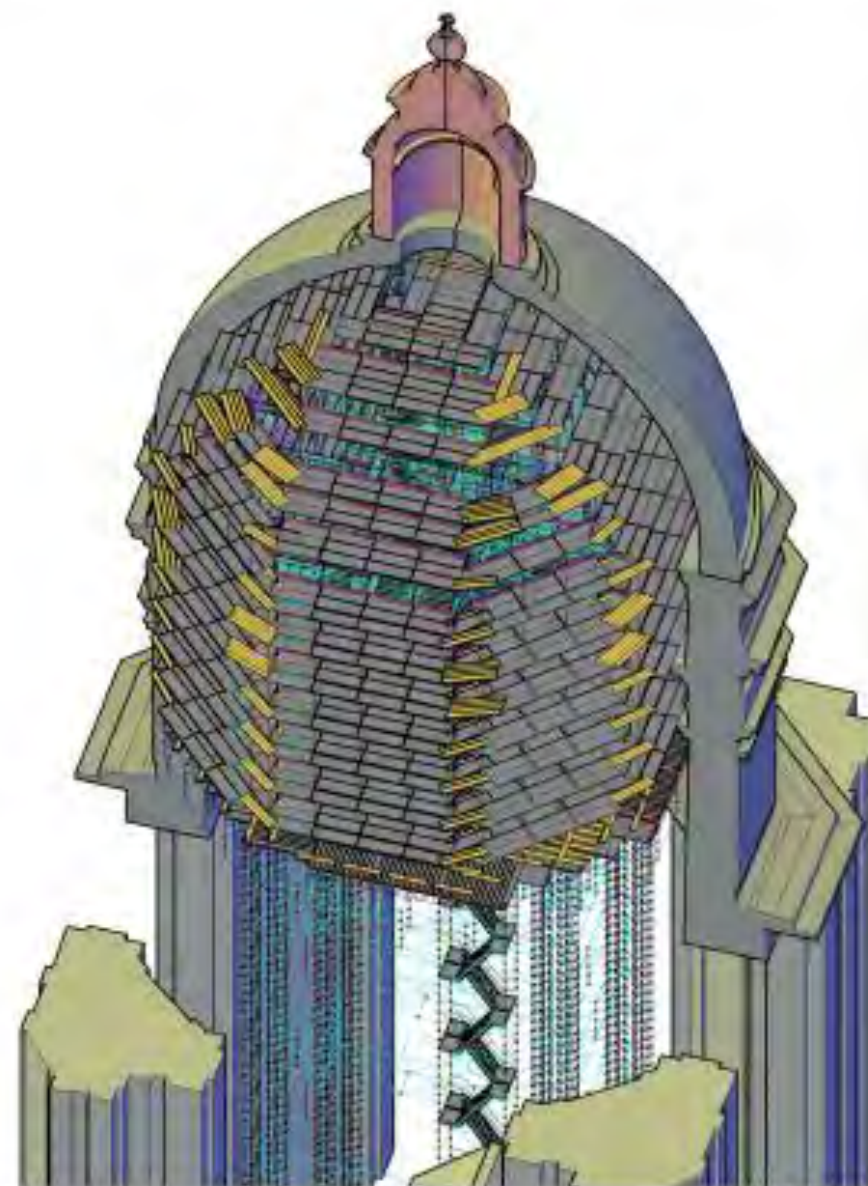
CUCI SCUCI – COLI DI MALTA – BARRE ELICOIDALI INOX



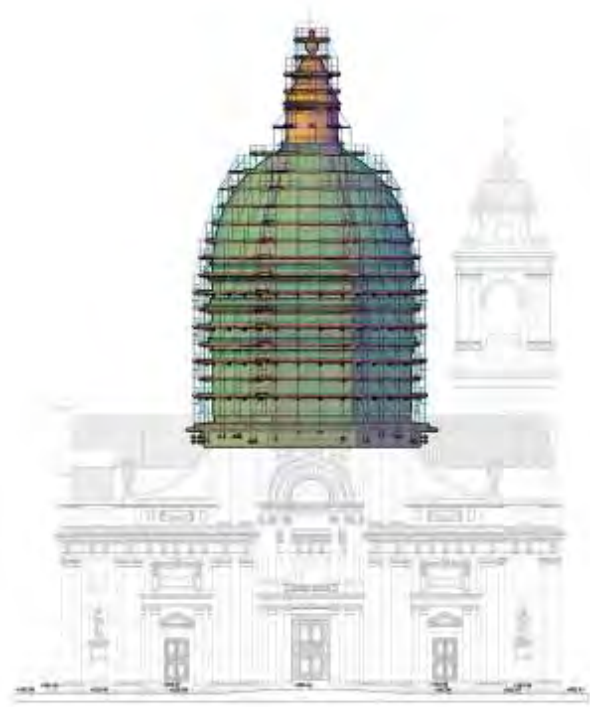
Kimisteel INOX X-BAR – preforo 8mm barre 10mm



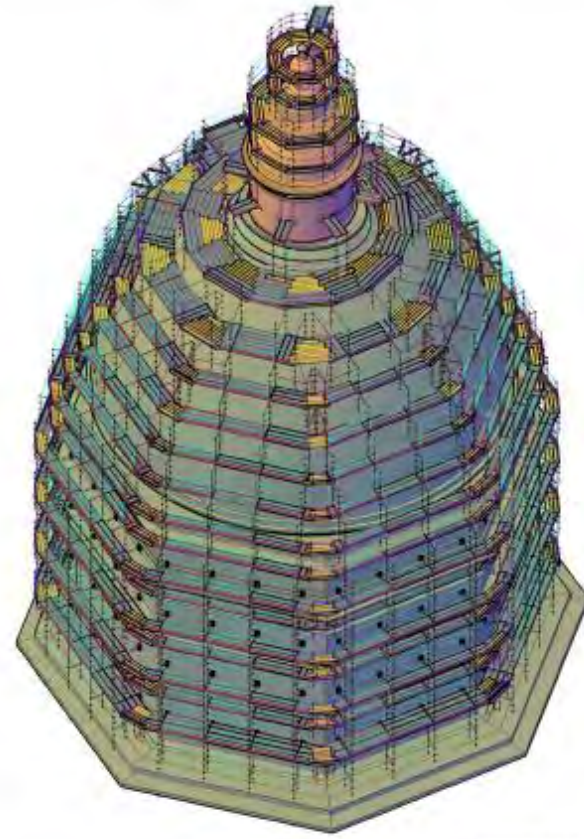
PROSPETTO FRONTE



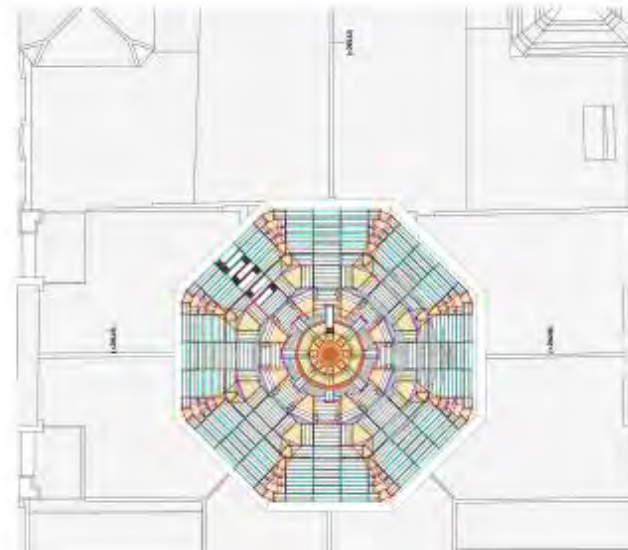
ASSONOMETRIA



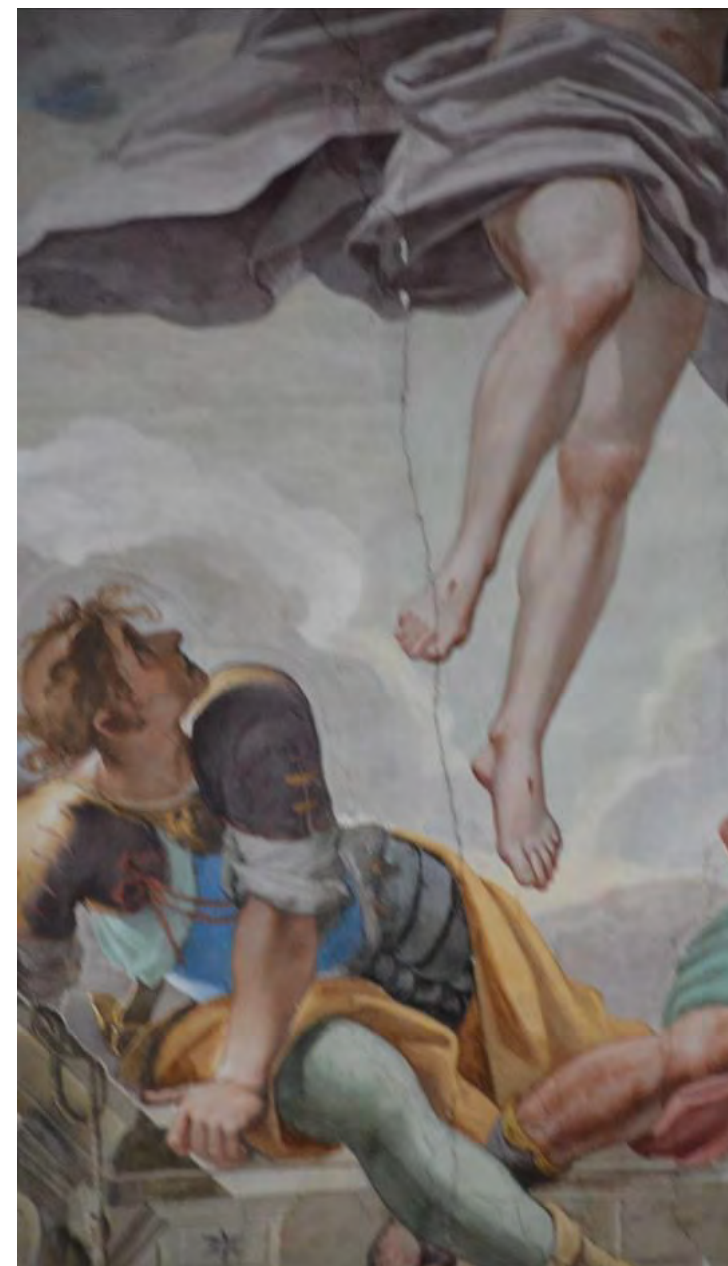
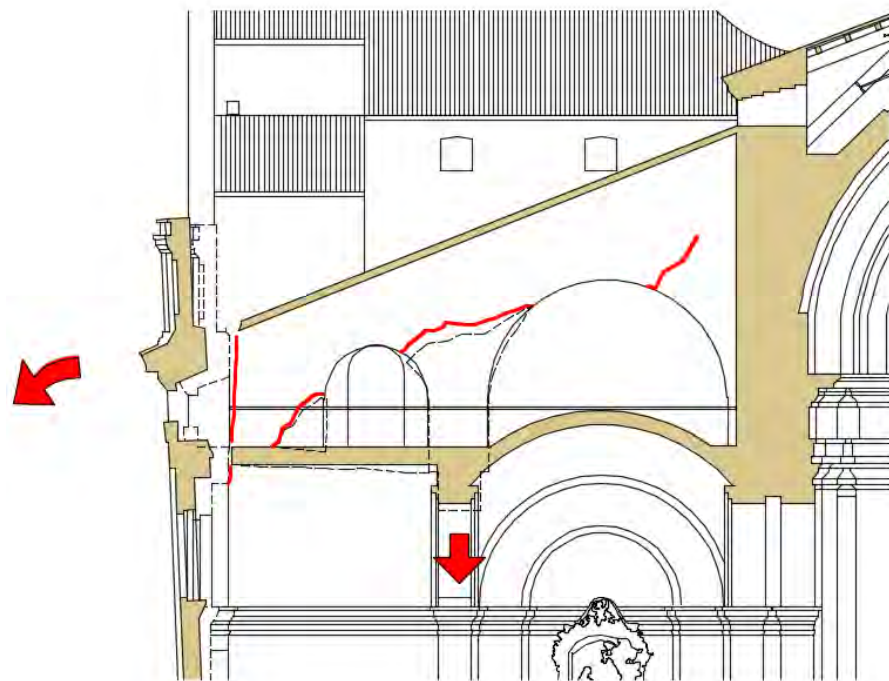
PROSPETTO FRONTE



ASSONOMETRIA



CAPPELLE LATERALI





Prospetto delle ruine del famoso Tempio di Santa Maria degli Angeli di Assisi

AL BENEMERITO COMMISSARIO

GIOVANNI IGNAZIO CAROLINI

5. EFFETTI DINAMICI SUL SISTEMA TAMBURO-CUPOLA

Gli effetti dinamici sul sistema tamburo-cupola vanno ad interessare, oltre alla cupola stessa, anche la zona del transetto, tanto che le lesioni provocate da tali azioni sono visibili su entrambi i lati della parete di separazione tra quest'ultimo e le navate laterali. Quando, infatti, tale parete all'interno degli ambienti posti al di sopra delle navate laterali è possibile riscontrare la presenza di lesioni importanti, tutte aventi un'inclinazione di circa 45°. Questo accade perché il sistema centrale tamburo-cupola, essendo più alto e meno rigido del resto della struttura, in presenza di eventi sismici oscilla con frequenze diverse, generando le lesioni appena descritte.

4. EFFETTI DINAMICI SUL CAMPANILE

Gli effetti dinamici provocati dal sisma sul campanile hanno generato un quadro fessurativo diffuso su tutti i suoi lati.

3. EFFETTI DINAMICI SULLA VOLTA DEL CORO

Gli effetti dinamici sulla copertura del coro vanno ad interessare gli archi che si trovano al di sopra della Cappella del Santissimo Sacramento e della Sacrestia. Nel caso specifico della Basilica di Santa Maria degli Angeli è possibile trovare due configurazioni differenti sui due lati del coro, da cui deriva la diversa rigidezza del complesso in corrispondenza delle due parti. Questo è il motivo che si osserva alle gravi lesioni che si trovano negli archi al di sopra della Sacrestia.

2. AZIONI ORIZZONTALI AGENTI SUGLI ARCHI RAMPANTI DELLE NAVATE LATERALI

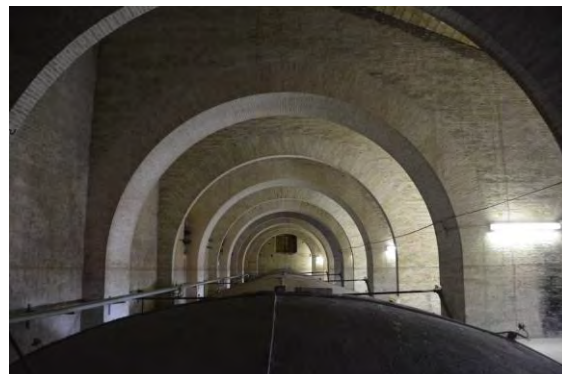
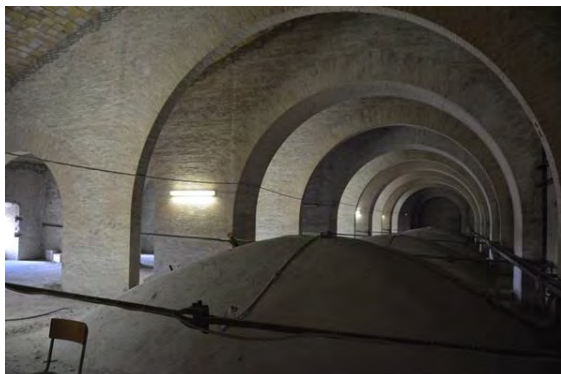
Gli archi rampanti che si trovano in corrispondenza delle navate laterali si fanno carico delle azioni orizzontali, dovute sia alla agilità della volta a botte della navata centrale che a cause dinamiche. Tali archi rampanti sono di due tipologie differenti, una avente uno spessore di 1.45 m e l'altra di 0.30 m. L'azione esercitata su di essi genera le stesse lesioni su tutti gli archi rampanti.

1. RIBALTAMENTO DELLA FACCIATA DEL 1930

In prossimità dell'unione tra la facciata più antica e quella realizzata nel 1930 è possibile riscontrare la presenza di un numero significativo di lesioni. Queste ultime indicano la chiara tendenza della facciata più recente, causata dai cedimenti del piano fondale, a distaccarsi da quella originaria. Tale fenomeno comporta che anche la facciata più antica tenda a distaccarsi dal restante corpo della Basilica, al punto che è possibile rilevare importanti lesioni nell'area di connessione tra queste due parti.

1. RIBALTAMENTO DELLA FACCIATA DEL 1930**2. AZIONI ORIZZONTALI SUGLI ARCHI RAMPANTI DELLE NAVATE LATERALI****3. EFFETTI DINAMICI SULLA VOLTA DEL CORO****4. EFFETTI DINAMICI SUL CAMPANILE****5. EFFETTI DINAMICI SUL SISTEMA TAMBURO-CUPOLA**

Scheda di sintesi quadro fessurativo (Università degli Studi di Perugia, Dip. Ingegneria)



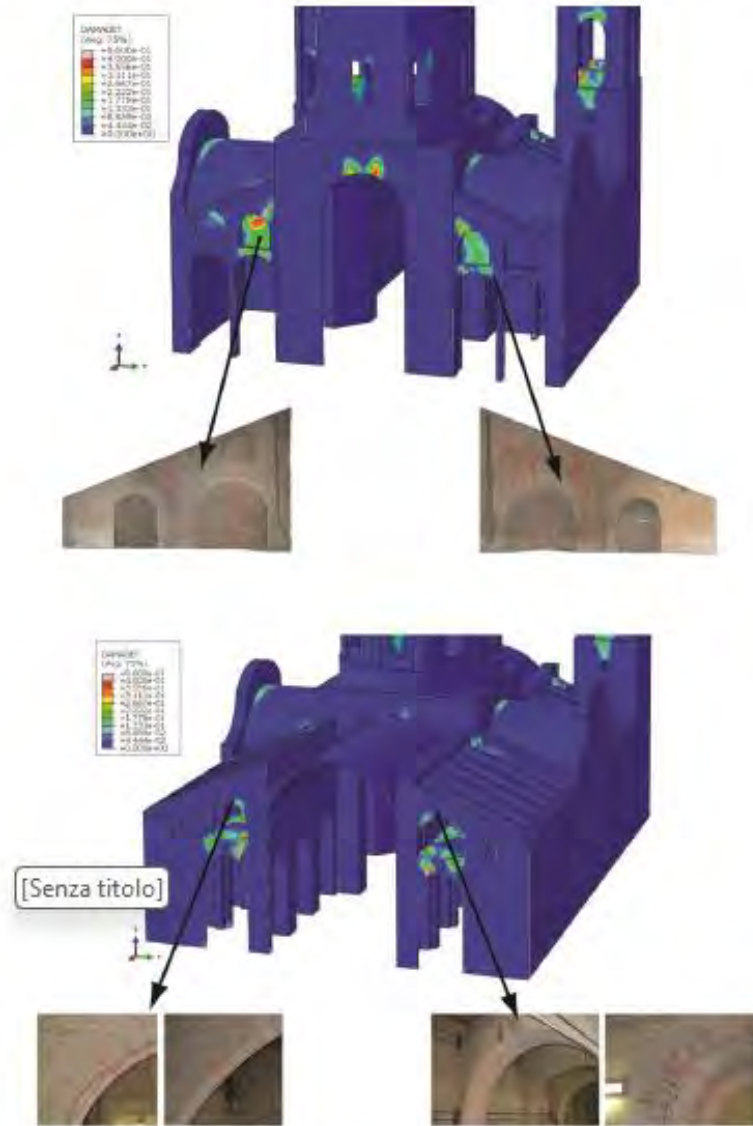
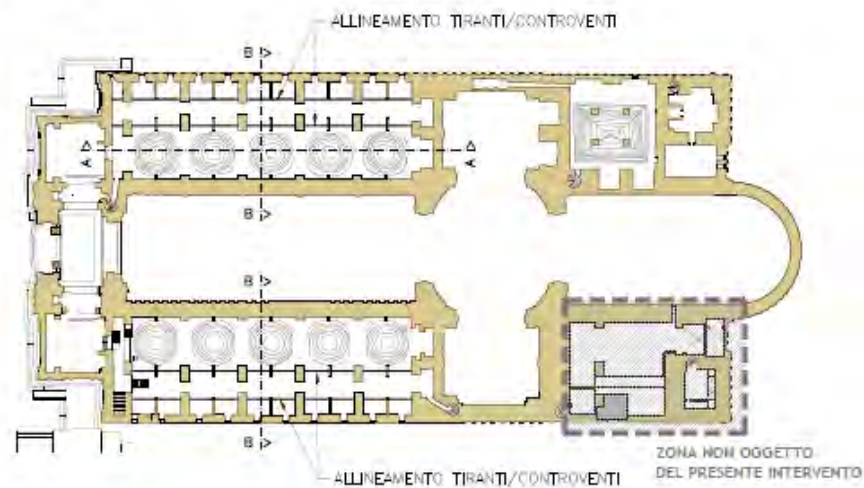


Figura 10. Confronto fra le mappe di danno ottenute dall'analisi dinamica non lineare e il quadro fessurativo rilevato sulla struttura a livello dei contrafforti posti sopra le navate laterali.

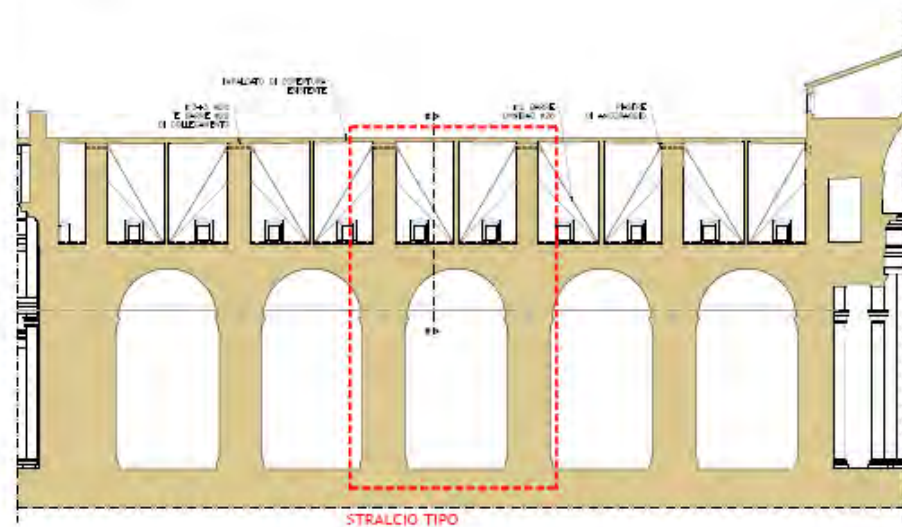
CARPENTERIA DI SOTTOTETTO

scala 1:500



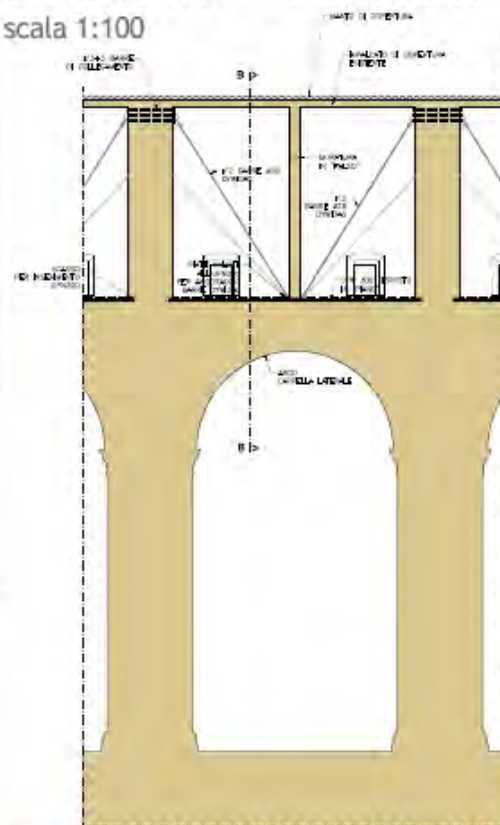
SEZIONE A-A

scala 1:200

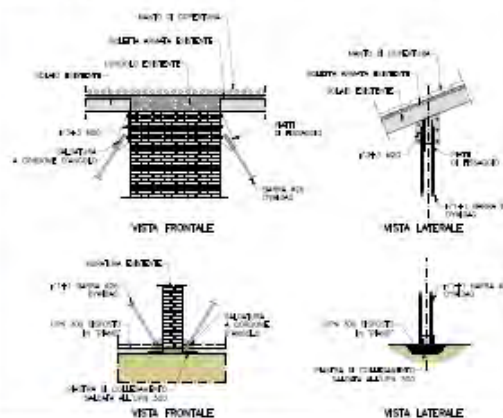


SEZIONE A-A - STRALCIO TIPO

scala 1:100

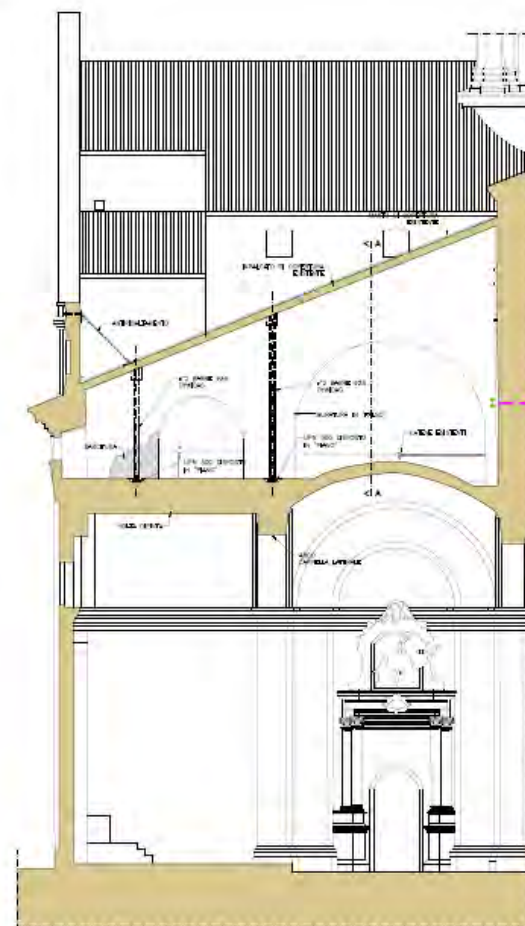


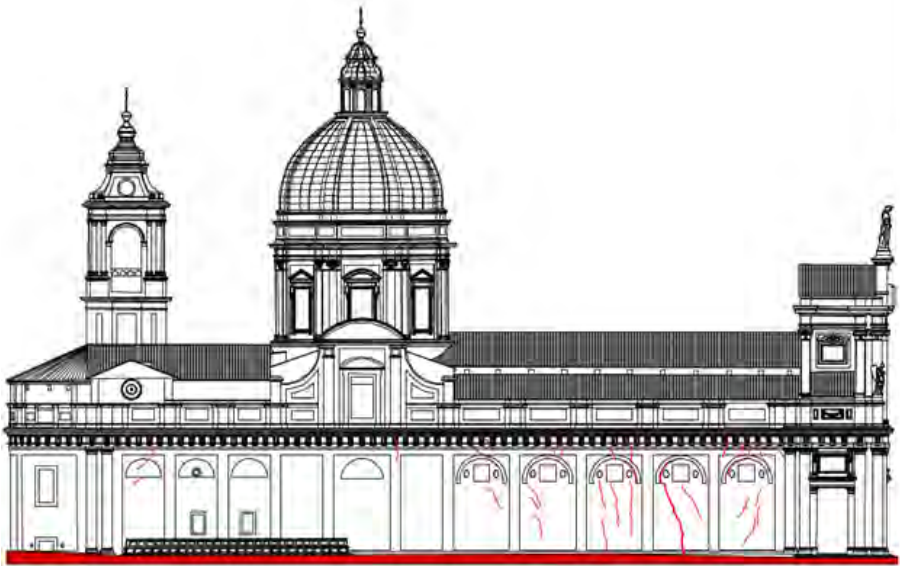
PART. ANCORAGGIO CONTROVENTI - scala 1:50



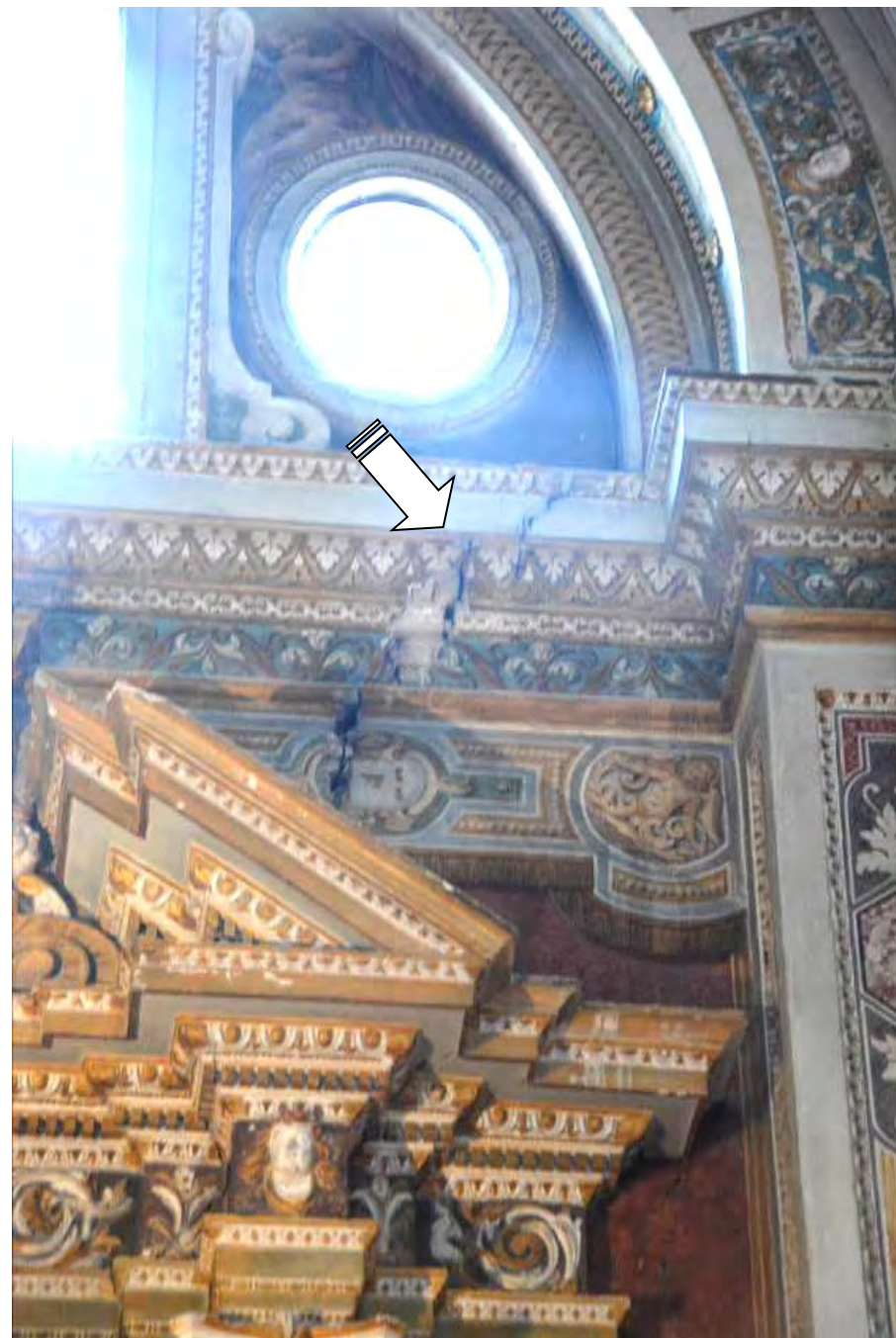
SEZIONE B-B

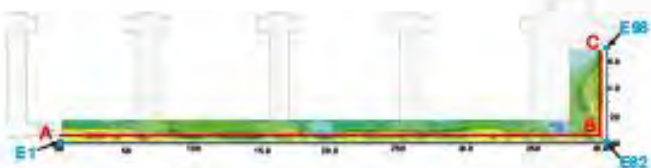
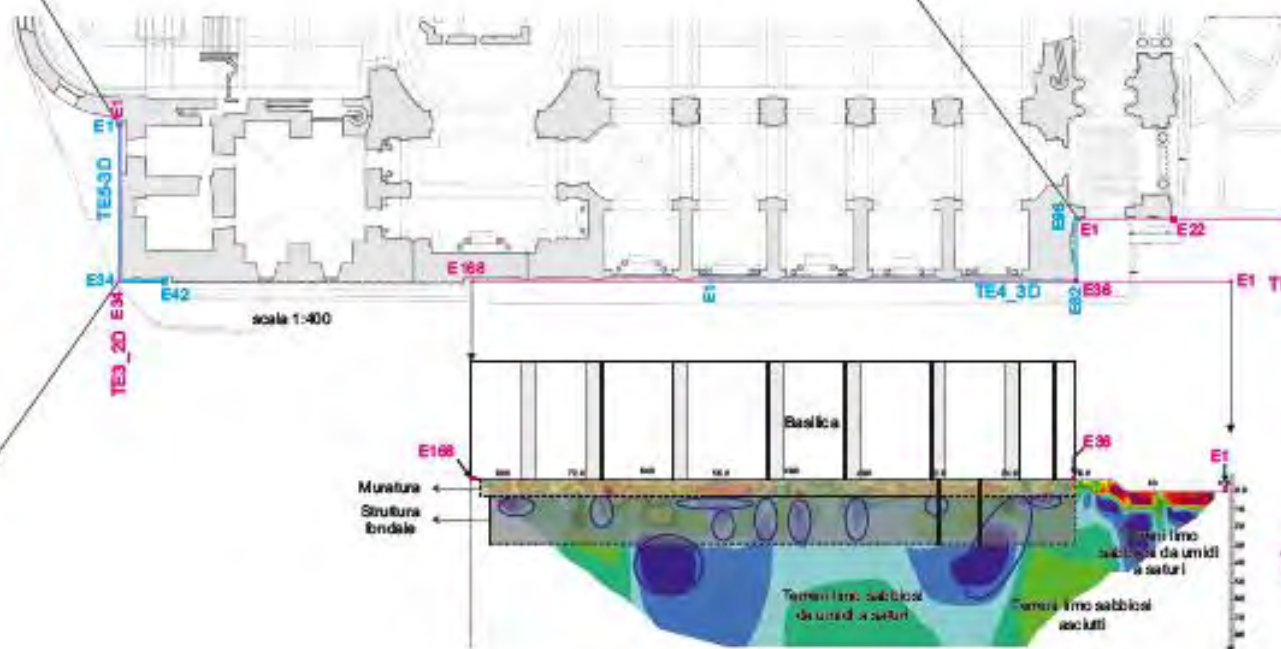
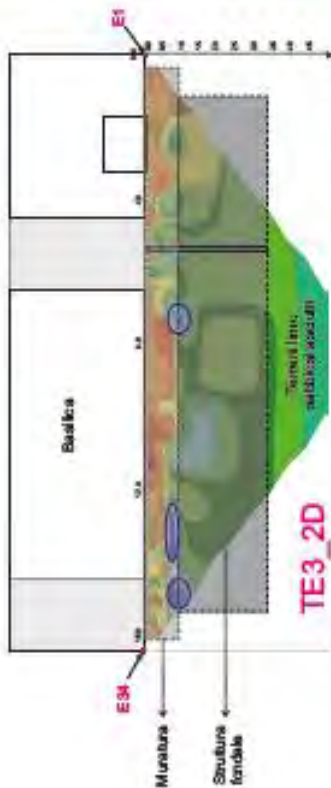
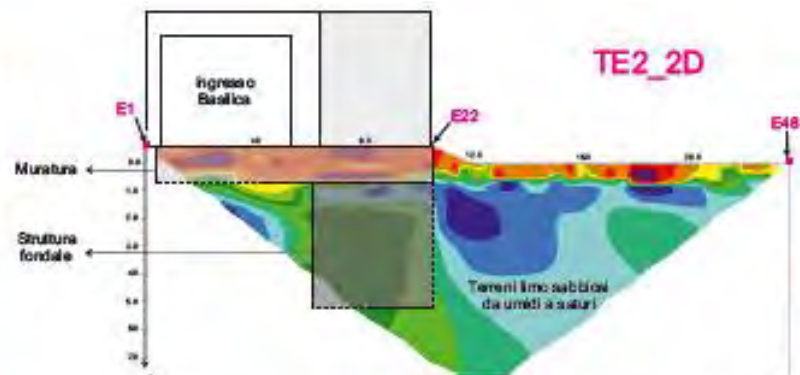
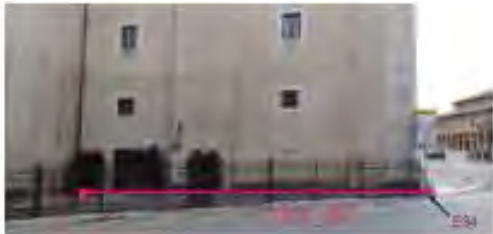
scala 1:100





PROSPETTO LATO SINISTRO

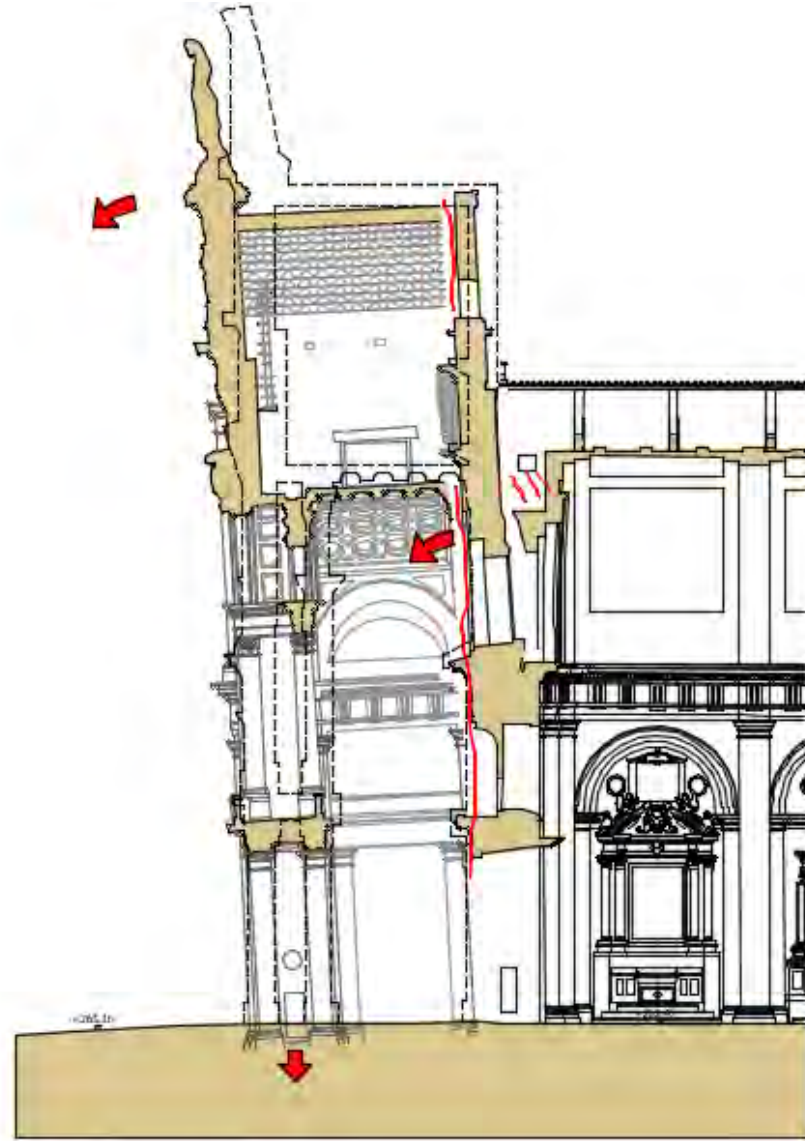


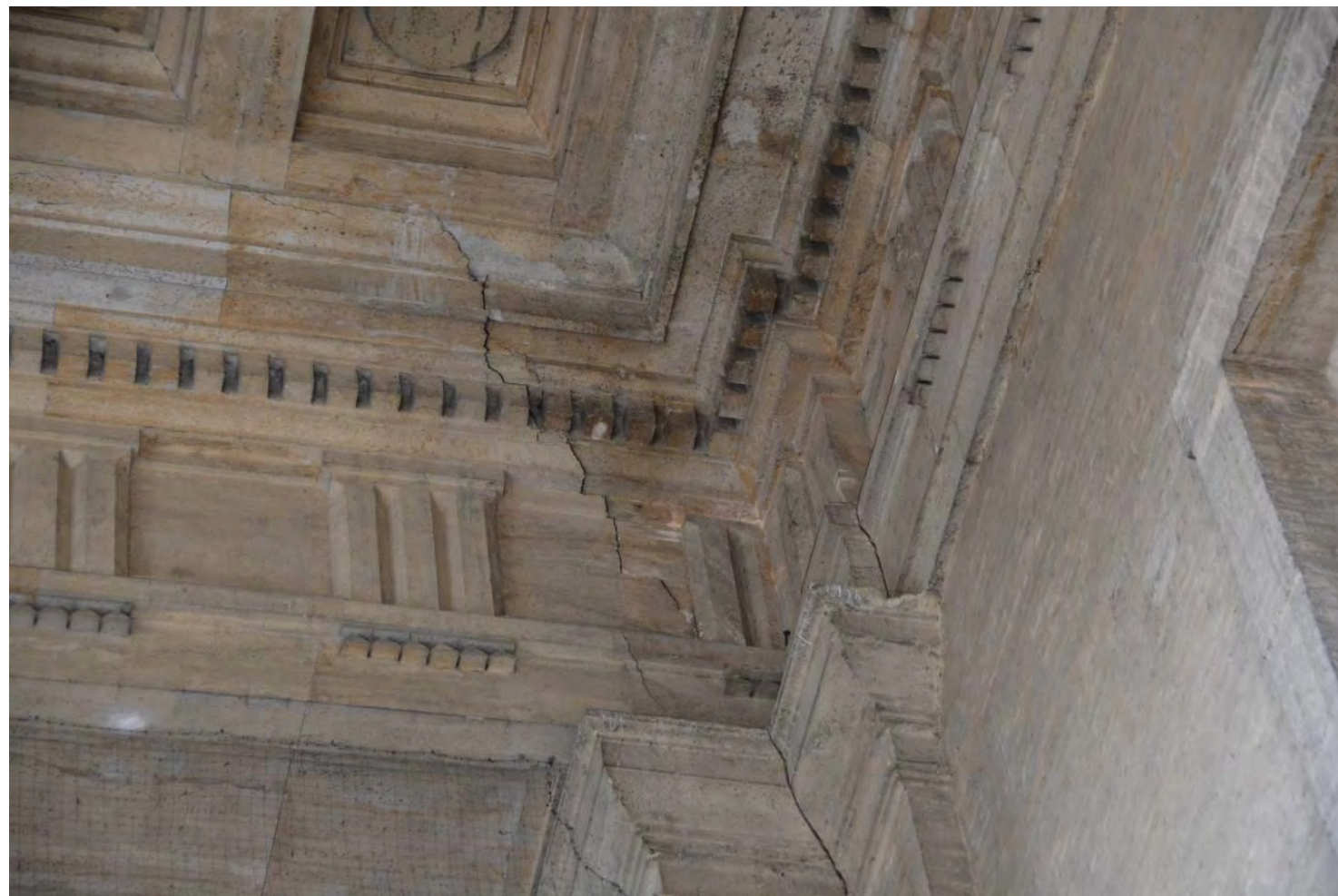


TE4_3D
Z= 0.0-0.25 mt



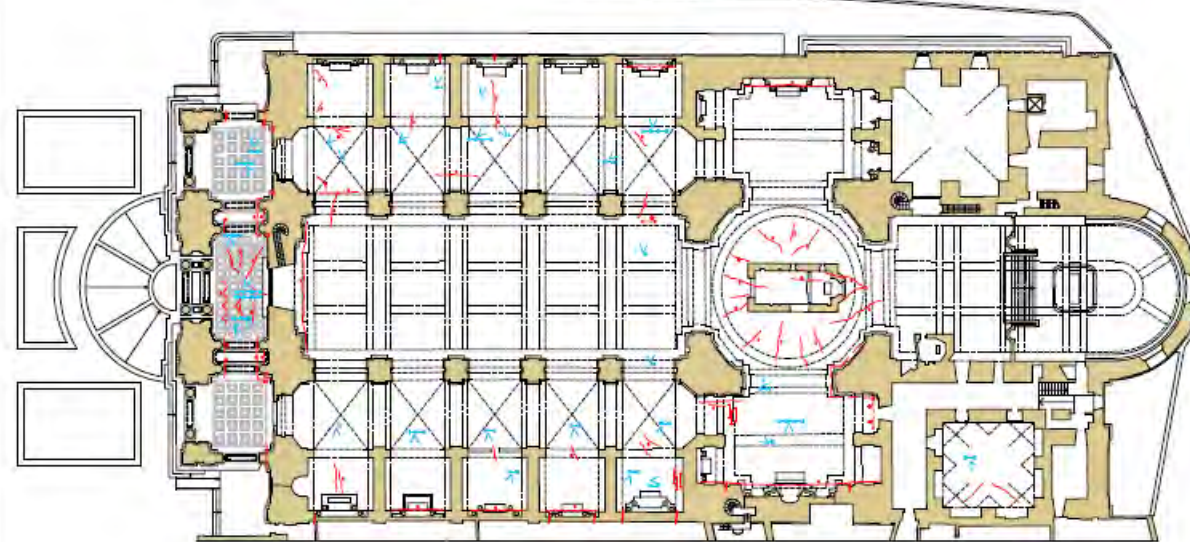
LA FACCIATA





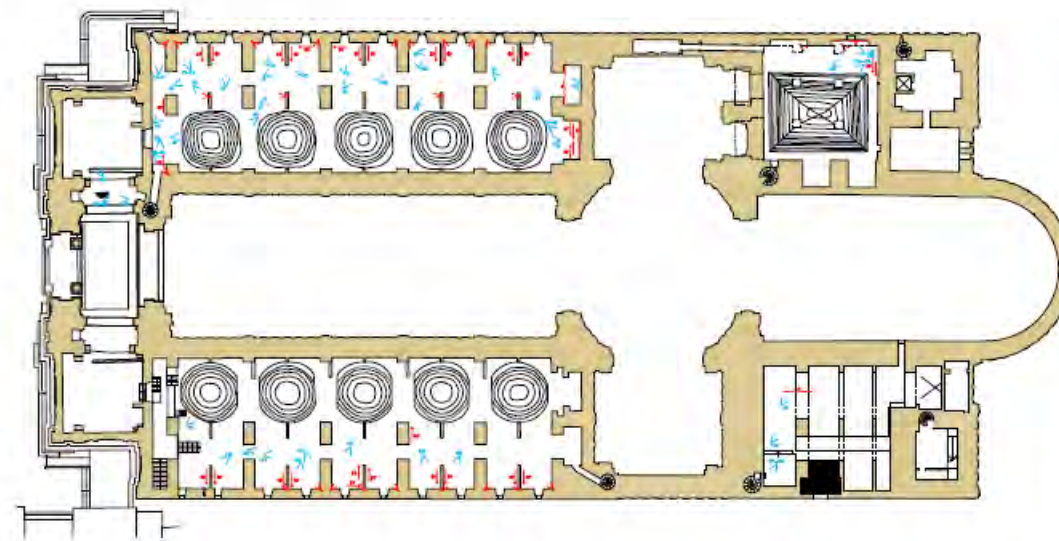


PIANTA PIANO TERRA - Q.ta 260,5m



SCALA 1:200

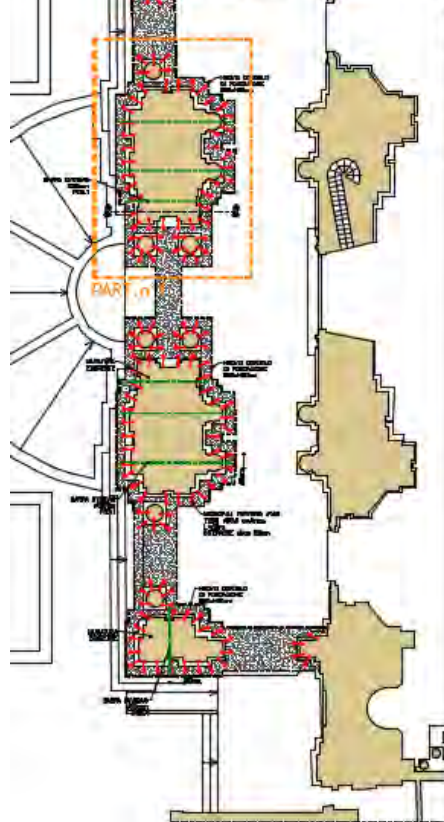
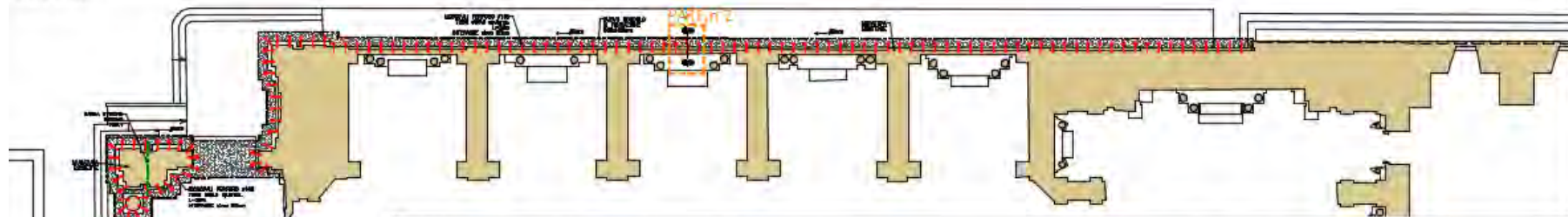
PIANTA PIANO SOTTOTETTO - Q.ta 280,00m



SCALA 1:200

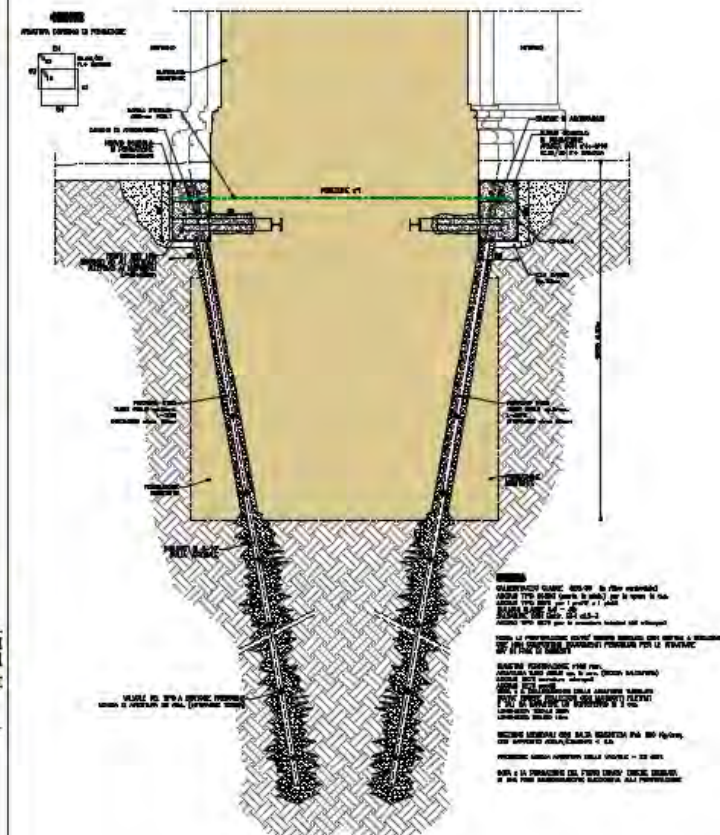
PIANTA A q.ta +260,5m - STRALCIO INTERVENTI IN FONDAZIONE

scala 1:100

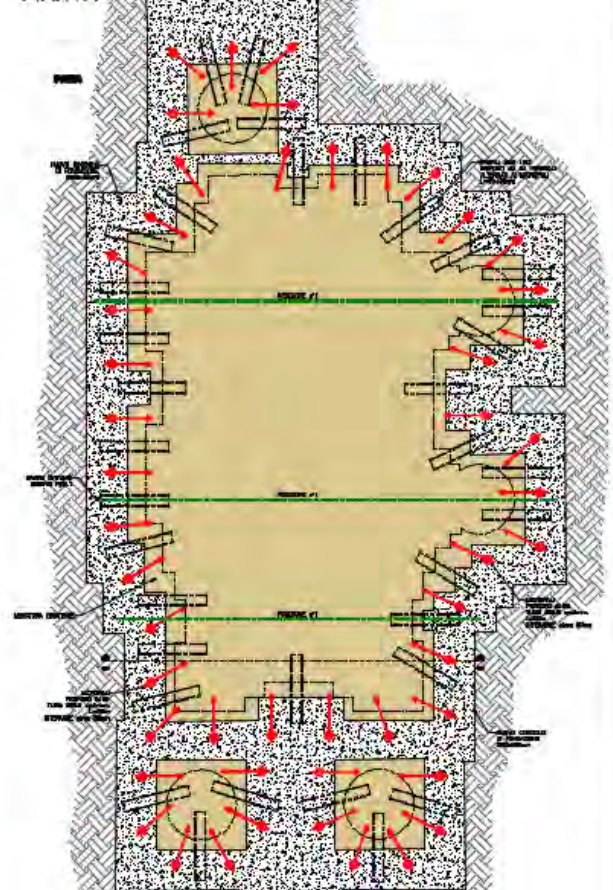


MICROPALI PARTICOLARE n°1 - SEZIONE TRASVERSALE

scala 1:25

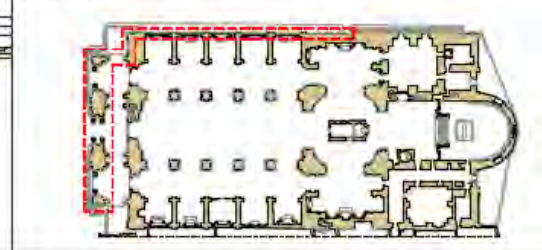


PIANTA



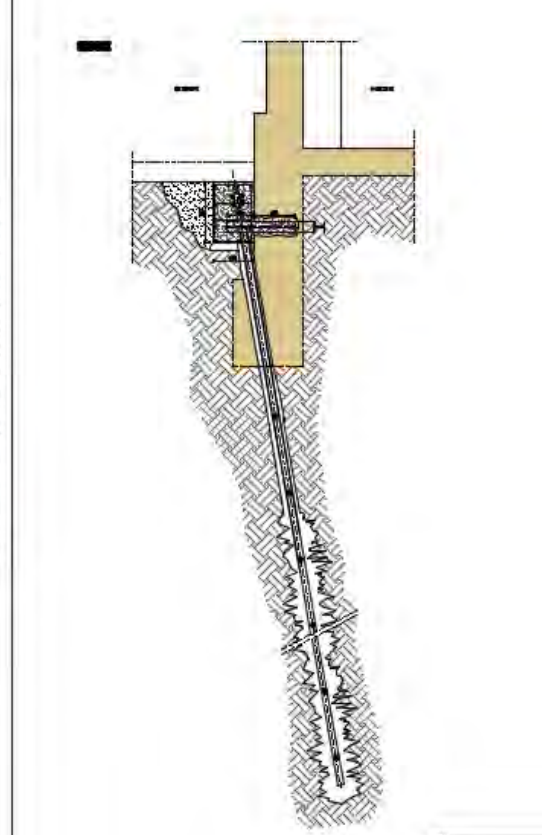
PLANIMETRIA INTERVENTI IN FONDAZIONE

scala 1:500

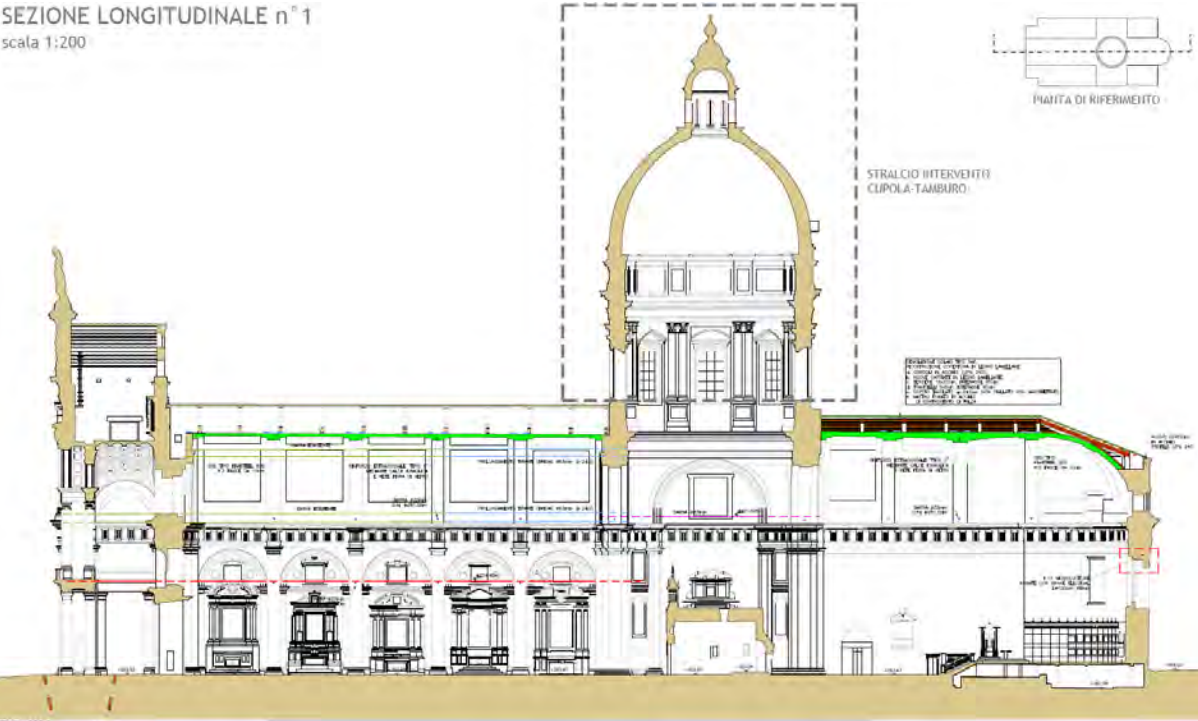


MICROPALI PARTICOLARE n°2

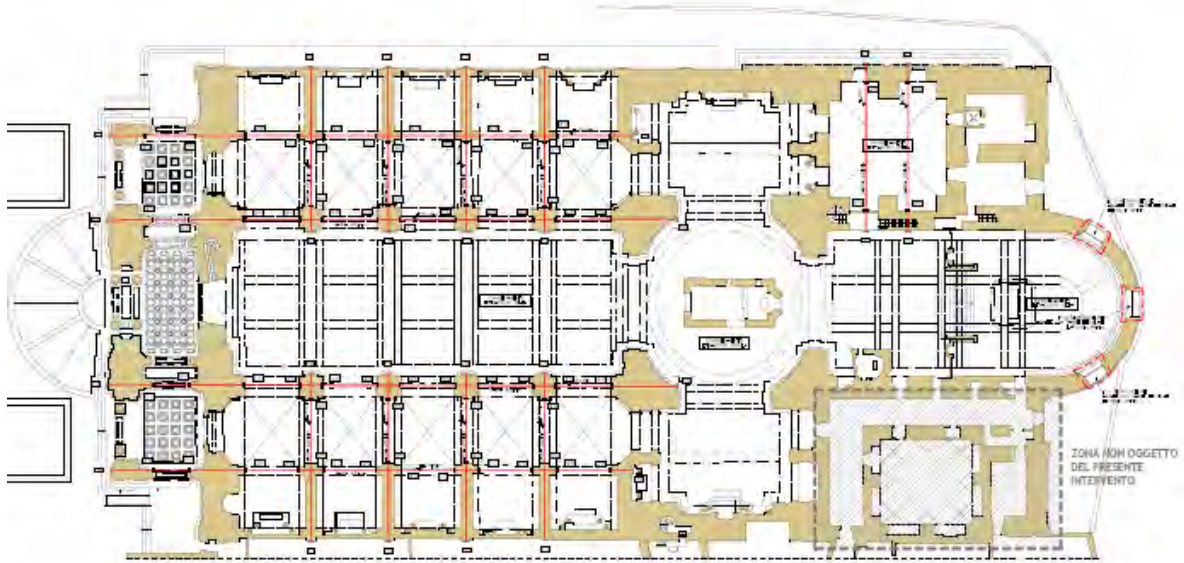
scala 1:25



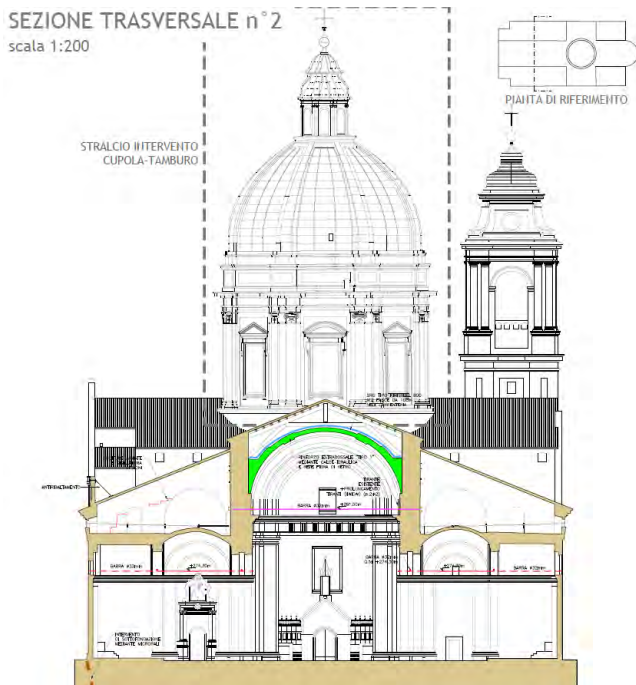
SEZIONE LONGITUDINALE n°1
scala 1:200



PIANTA LIVELLO TIRANTI A q.ta +274,30m circa
scala 1:200

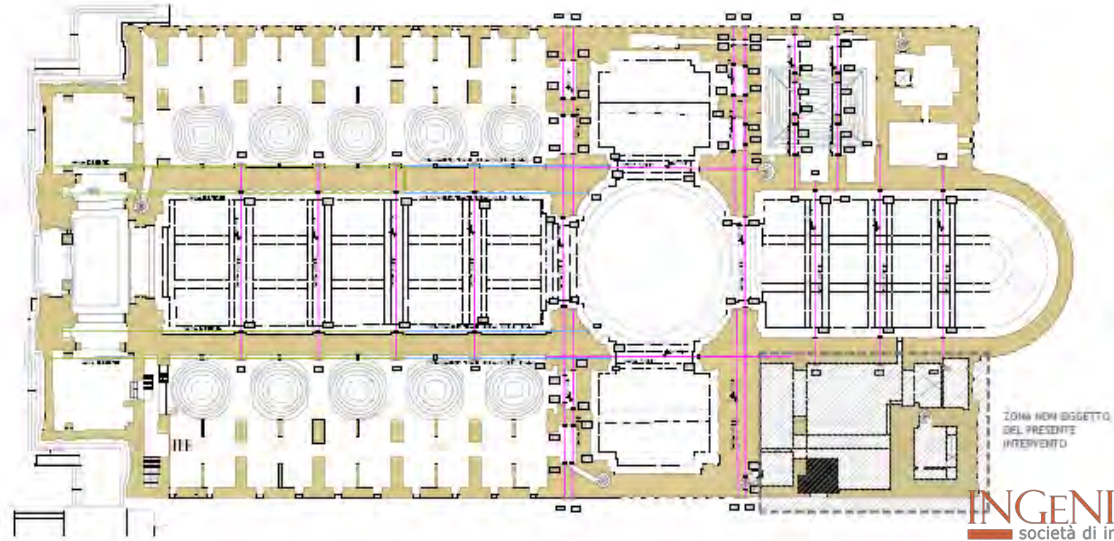


SEZIONE TRASVERSALE n°2
scala 1:200



CARPENTERIA LIVELLO TIRANTI A q.ta +280
scala 1:200

TIRANTI



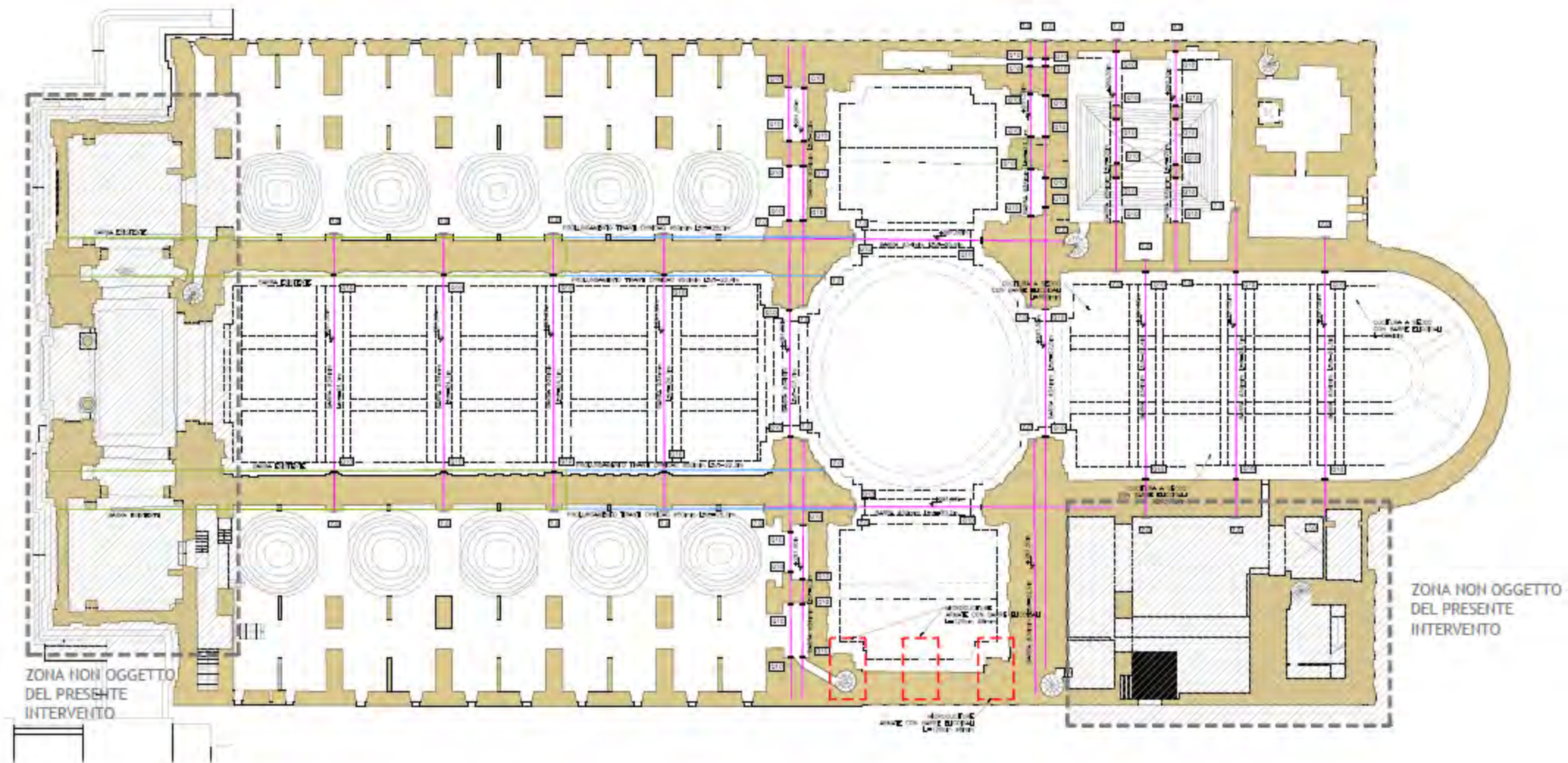
PIANTA LIVELLO TIRANTI A q.ta +274,30m circa

scala 1:200



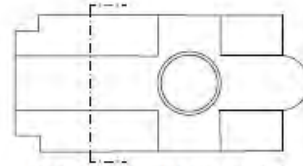
CARPENTERIA LIVELLO TIRANTI A q.ta +280m

scala 1:200



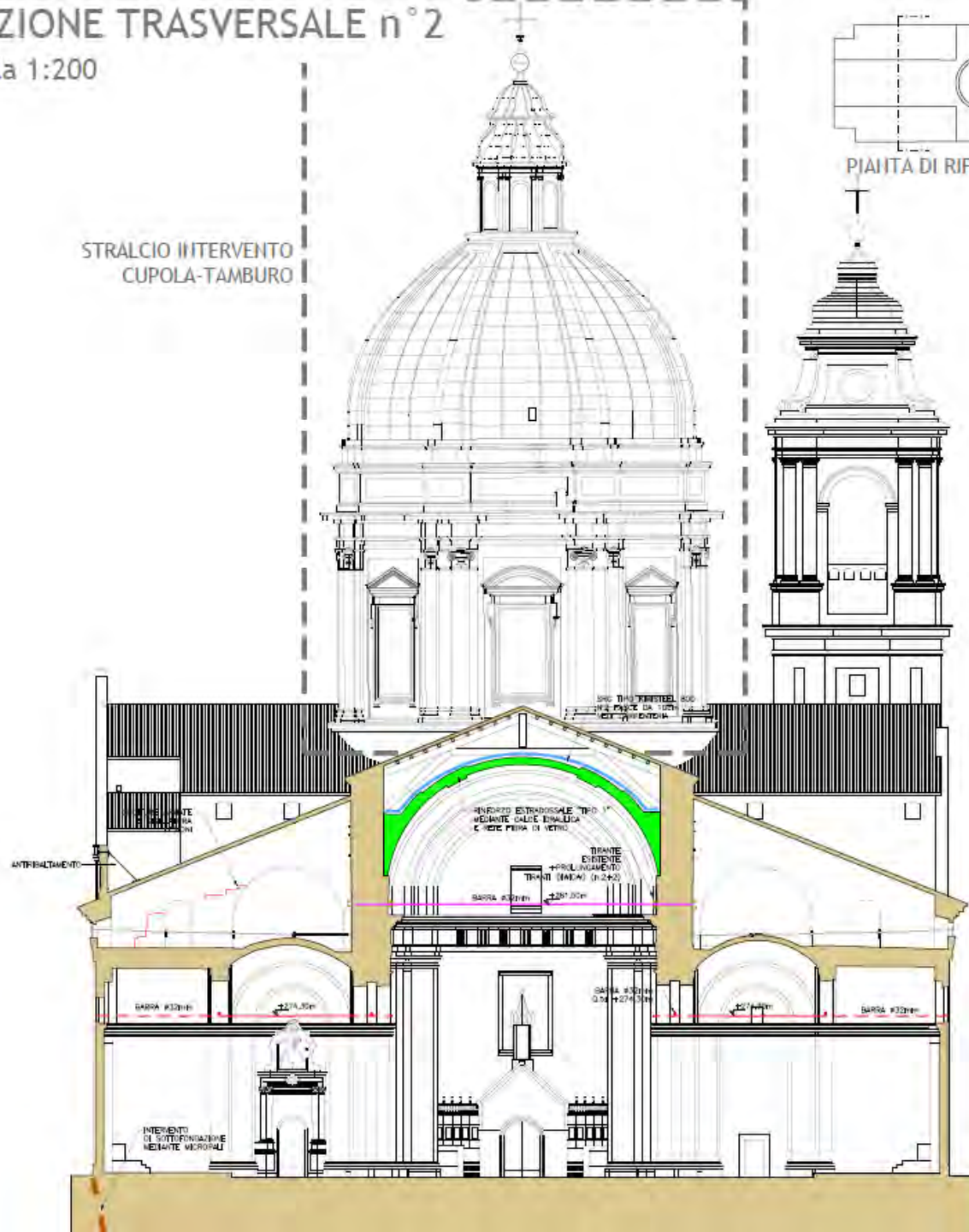
SEZIONE TRASVERSALE n° 2

scala 1:200



PIANTA DI RIFERIMENTO

STRALCIO INTERVENTO
CUPOLA-TAMBURO



4.3 Analisi dinamica non lineare pre-intervento

A livello globale la struttura è stata studiata mediante analisi dinamica non lineare applicando l'accelerogramma spettro-compatibile di Figura 8, applicato in entrambe le direzioni per una durata di 15 secondi. Da notare che il sistema monumentale della nuova facciata è stato considerato elastico lineare a causa della complessità che lo caratterizza, lasciando comunque la possibilità di considerare l'effetto dinamico di essa sul resto della struttura. In Figura 12 si mostra la mappa dello stato di danneggiamento a trazione del materiale, mentre in Figura 13 si riportano le storie temporali di spostamento e accelerazione relativa di un punto di controllo posizionato alla base del tamburo, indicato in Figura 12. Dall'analisi della mappa di danno emergono le maggiori criticità della struttura nel suo complesso. Tralasciando le volte dei transetti e delle navate laterali, le quali sono già state rinforzate con specifici interventi in seguito ai danni subiti dal sisma del 1997, ma che non sono stati considerati in questa modellazione, e il campanile il cui consolidamento non è oggetto del presente studio, le maggiori criticità si riscontrano nella volta della navata centrale, nei contrafforti sovrastanti le navate laterali, nella volta dell'abside e nel sistema centrale tamburo-cupola.

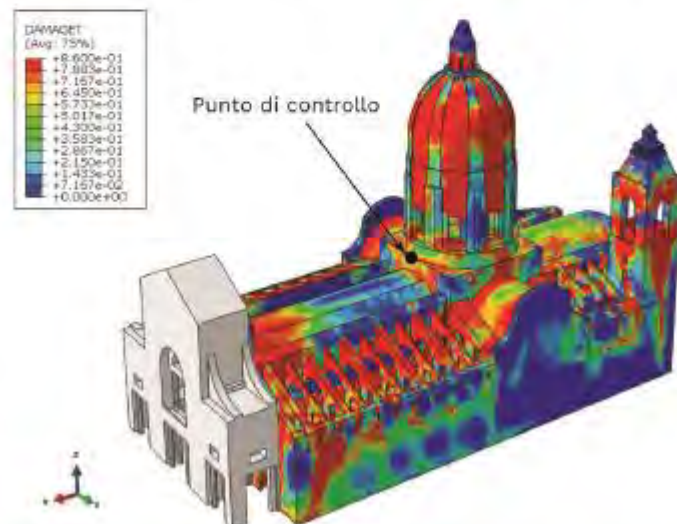


Figura 12. Mappa di danneggiamento a trazione ottenuta mediante analisi dinamica non lineare con accelerogramma spettro-compatibile.

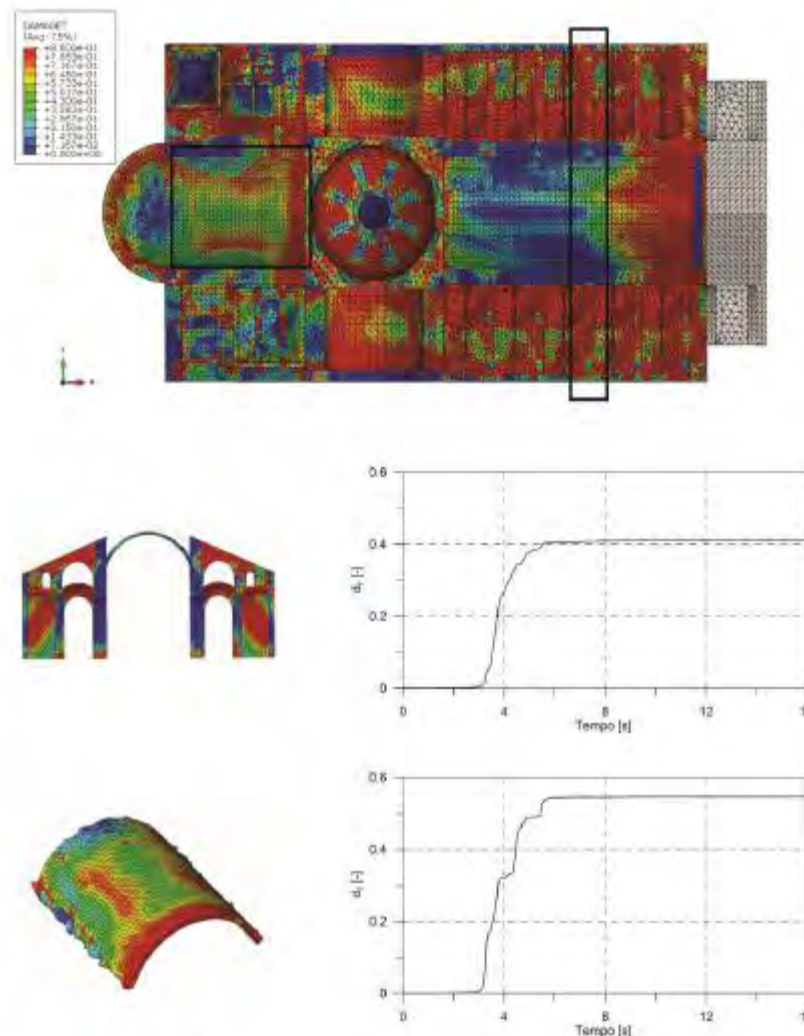


Figura 14. Valutazione del parametro di danno cumulato medio in una sezione trasversale delle navate e nella volta dell'abside.

4.4 Analisi dinamica non lineare post-intervento

Sulla base delle osservazioni fatte al punto precedente, nel modello strutturale globale post-intervento, oltre che ad un incremento dei parametri meccanici come descritto al paragrafo 2.3, è stato valutato l'effetto sulla risposta globale dato dall'inserimento delle catene nella zona delle navate e dell'abside, in quanto alla parte strutturale del tamburo e della cupola è stato dedicato uno studio individuale.

In Figura 15 si evidenziano i tiranti metallici inseriti nel modello, come previsti da progetto. In termini di modellazione numerica, i tiranti sono stati modellati come unico elemento beam legati alle murature mediante constraint interno cinematico.

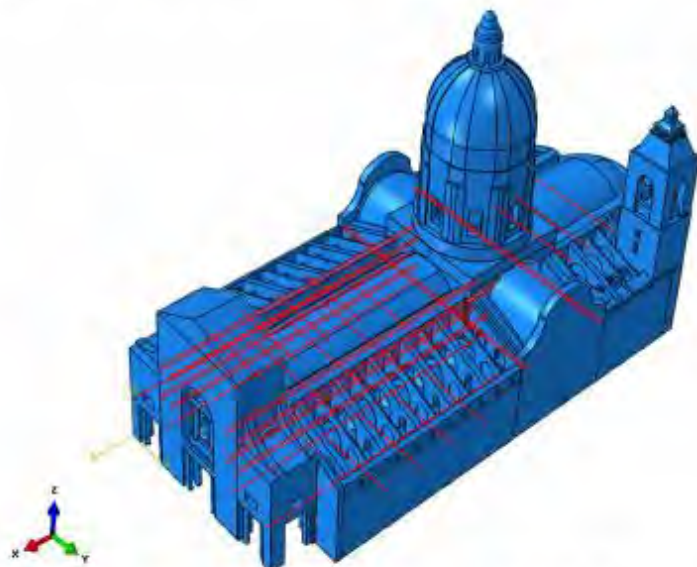


Figura 15. Schema dei tiranti metallici inseriti nel modello FEM.

Nel seguito si riportano i risultati della risposta dinamica del modello strutturale sottoposto al medesimo input sismico assegnato al modello non rinforzato. In particolare, in Figura 16 viene mostrata la mappa del parametro di danno a trazione, in Figura 17 le storie temporali di spostamento e accelerazione relativa del punto di controllo e in Figura 18 l'andamento del danno medio cumulato nei medesimi volumi analizzati al paragrafo precedente.

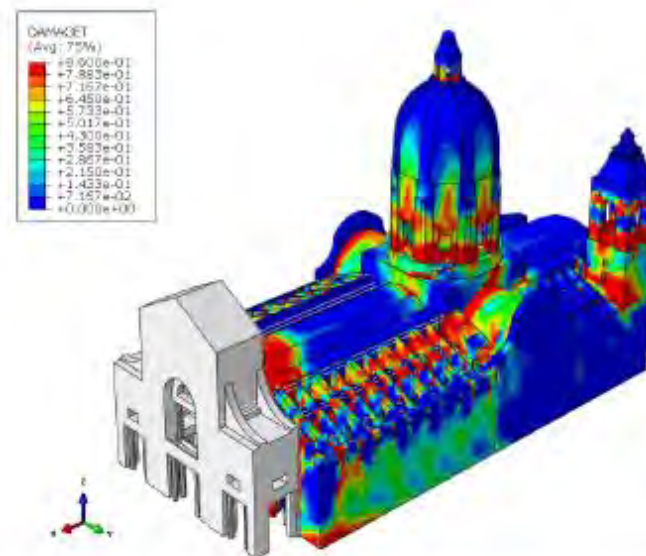


Figura 16. Mappa di danneggiamento a trazione ottenuto mediante analisi dinamica non lineare con accelerogramma spettro-compatibile su modello rinforzato

Da una prima analisi, nella Figura 16 si apprezza in linea generale una riduzione del danneggiamento diffuso, sebbene permangano aree maggiormente vulnerabili come già identificato precedentemente. In termini di output dinamico, il punto di controllo è caratterizzato da stessi valori di accelerazione relativa confrontabili con l'analisi pre-intervento, mentre gli spostamenti presentano valori più contenuti in virtù del generale irrigidimento strutturale (Figura 17).

In termini di danneggiamento medio valutato nelle porzioni dei volumi della navata centrale e della volta dell'abside si riscontra un diminuzione sostanziale dei valori del parametro di danno in confronto a quanto ottenuto con il modello non rinforzato. In particolare, per la sezione trasversale della navata si passa da un valore di circa il 40% a circa il 20%, mentre per la volta dell'abside dal 50% a circa il 16% (Figura 19). Tale beneficio espresso in riduzione del danneggiamento a trazione viene ottenuto con l'inserimento delle catene, le quali sopprimono alla necessità di deformazione elasto-plastica della muratura accollandosi gli sforzi aggiuntivi e limitando quindi l'avanzamento deformativo.

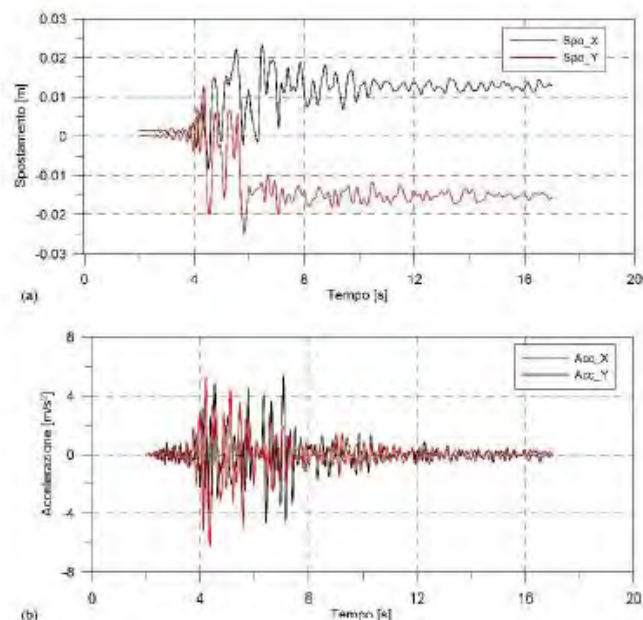


Figura 17. Risposta dinamica strutturale in termini di spostamento e accelerazione relativa del punto di controllo riportato in Figura 11 nel modello rinforzato.

Tale aspetto viene meglio reso in evidenza riportando la storia temporale di alcuni dei tiranti posti nelle aree analizzate, ovvero nella zona della navata centrale e dell'abside in cui si nota come anche a dopo la sequenza sismica, l'incremento di tiro nelle catene rimane presente seppur contenuto nei valori di tensione (Figura 20).

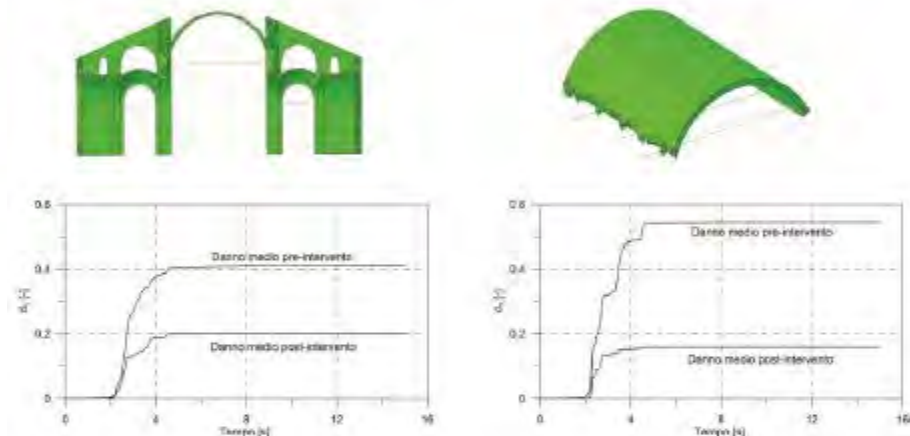
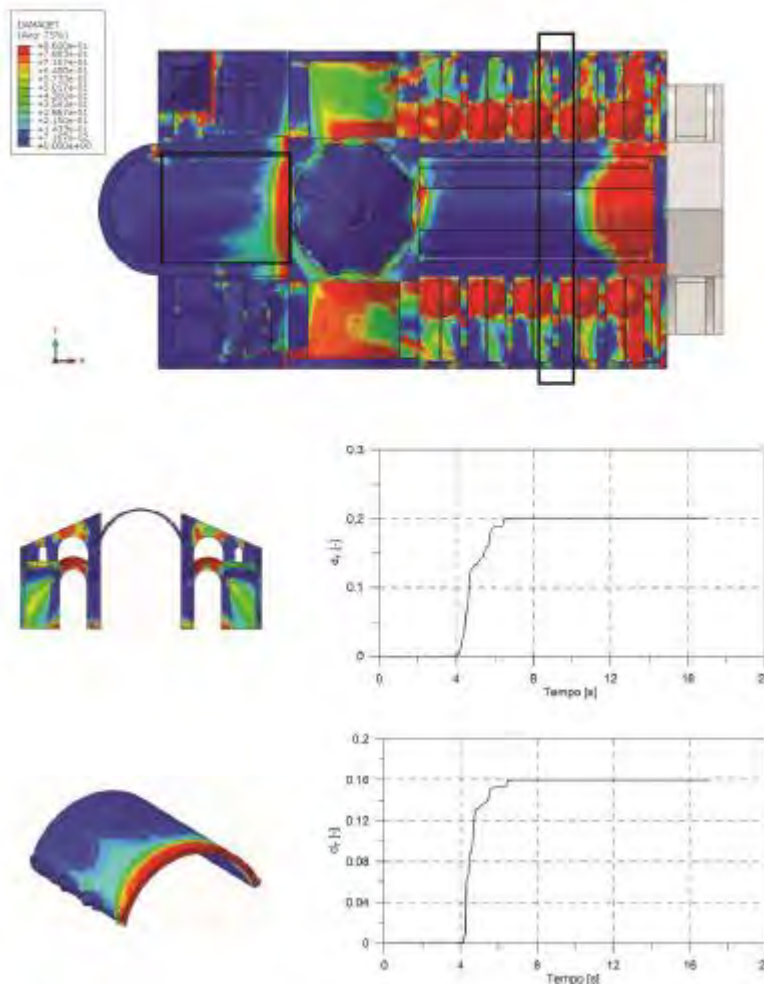


Figura 19. Confronto del valore di danno medio a trazione ottenuto in una sezione trasversale della navata centrale e nella volta absidale pre- e post-intervento.

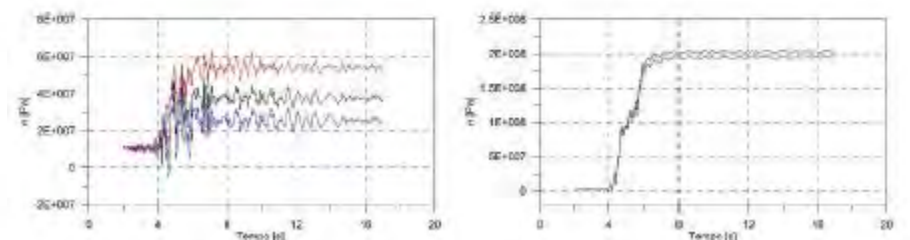
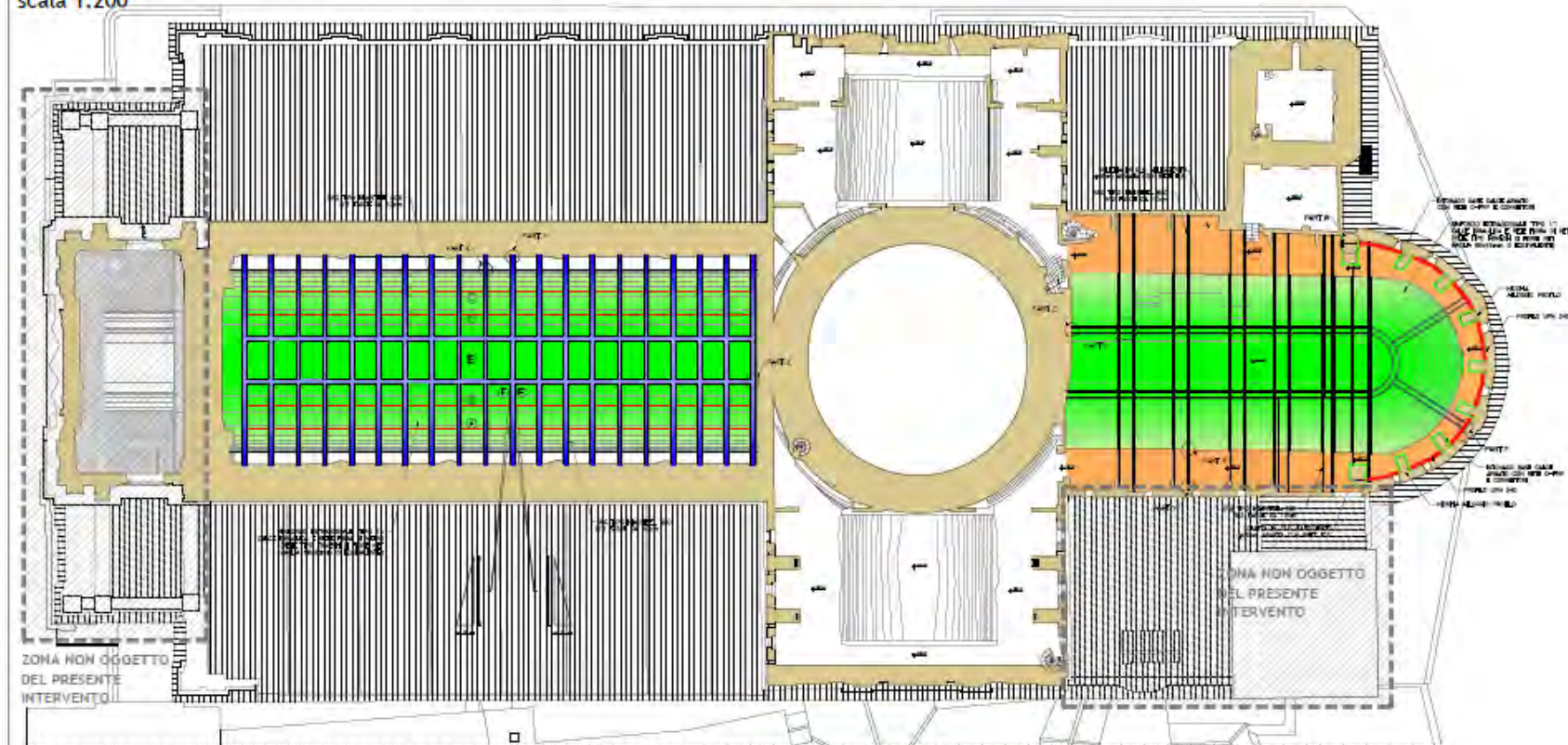


Figura 20. Andamento dinamico della tensione di trazione ottenuta nelle catene dell'abside e in due catene tipo della navata centrale e laterale.

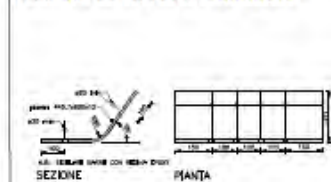
Valutazione del parametro di danno cumulato medio ottenuto in una sezione trasversale ate e nella volta dell'abside nel modello rinforzato.

CARPENTERIA INTERVENTI ESTRADOSSO VOLTE - q.ta +288m

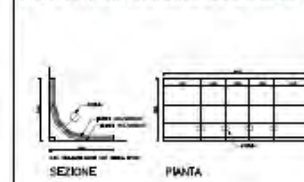
scala 1:200



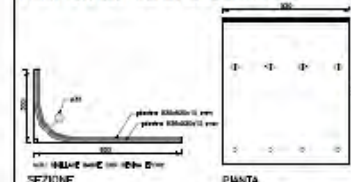
PART.X:PIASTRA DI ANCORAGGIO



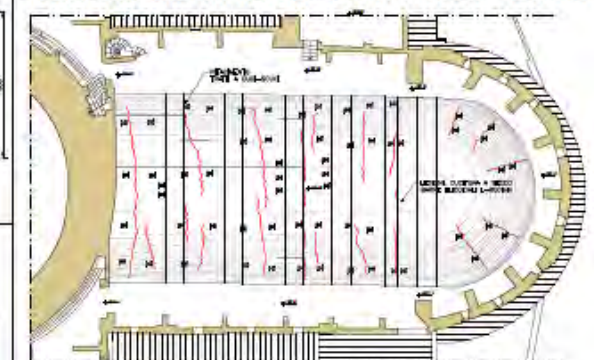
PART.Y:PIASTRA DI ANCORAGGIO



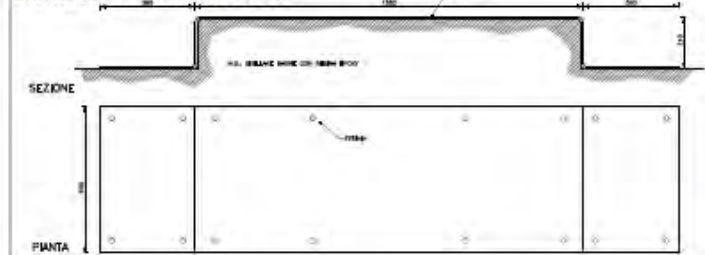
PART.Z:PIASTRA DI ANCORAGGIO



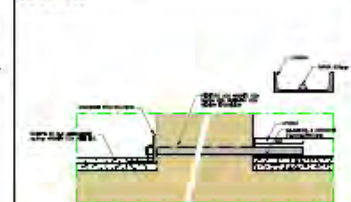
STRALCIO RIPARAZIONE ESTRADOSSO VOLTA

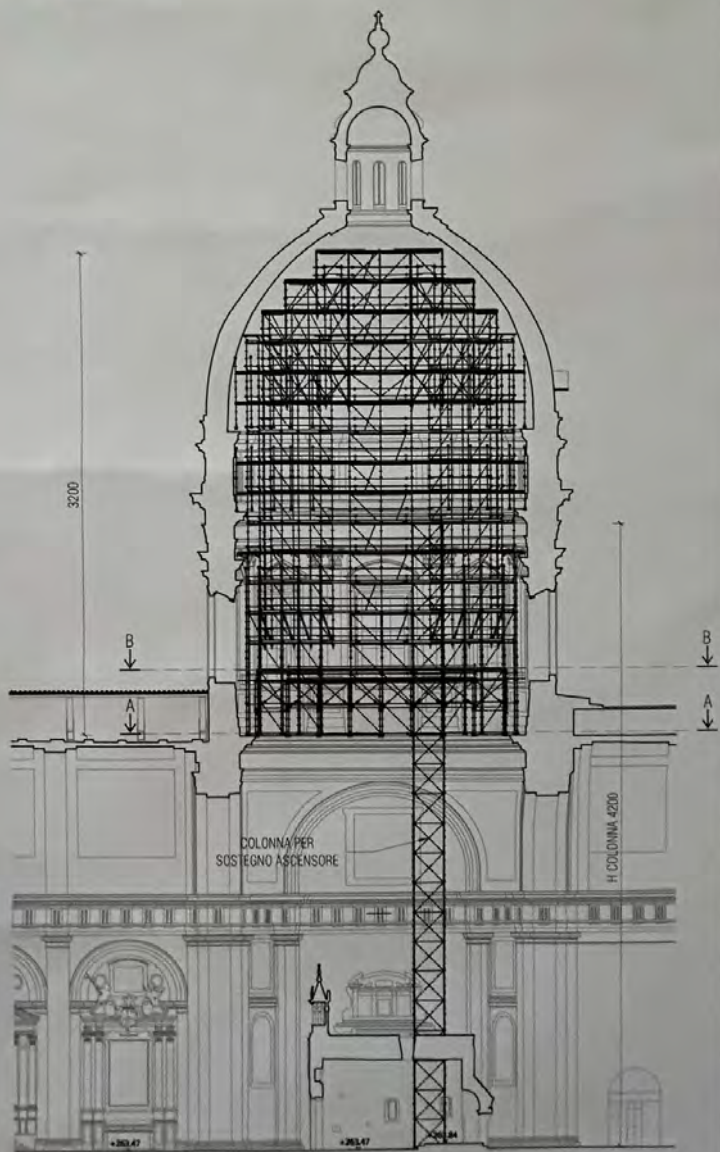


PART.J:PIASTRA DI ANCORAGGIO



PART.W

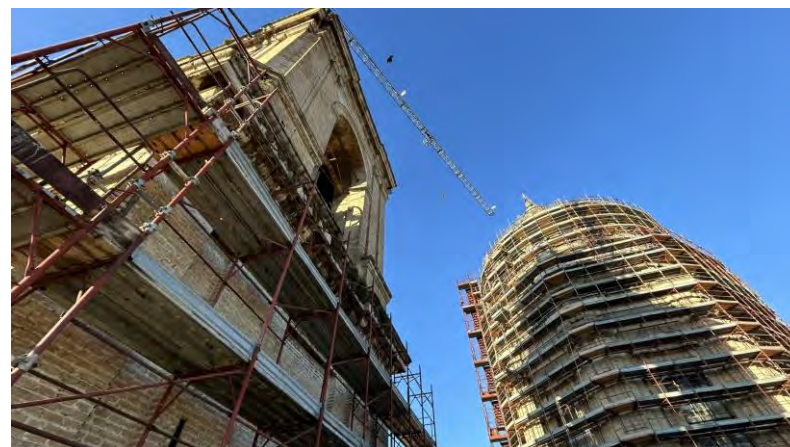




DISEGNO PRELIMINARE DA RIVEDERE SULLA BASE DEL CALCOLO IN FUNZIONE DELLA TIPOLOGIA E DISPOSIZIONE DI ANCORAGGI DA REALIZZARE



IL CANTIERE



LUNGHI
IMPRESA COSTRUZIONI



L'obiettivo posto per la realizzazione dell'intervento di miglioramento sismico è stato fin da subito individuare le **soluzioni tecniche e di cantierizzazione che consentissero, la fruibilità, anche se parziale delle Basilica e la possibilità di accedere in sicurezza alla Porziuncola.**

Gli interventi che riguardano il sottotetto e le coperture sono stati facilmente risolti procedendo alla realizzazione di percorsi e ponteggi esterni, che garantissero l'accesso alle zone di cantiere dall'esterno, senza interferenza con i percorsi e luoghi di visita e culto della Basilica. Il restauro delle cappelle laterali è stato garantito delimitando il cantiere di restauro in corrispondenza delle cappelle stesse.

Viceversa per l'esecuzione dei lavori di inserimento dei **tiranti all'interno della Basilica**, in corrispondenza degli archi e delle volte della navata principale e delle navate laterali, poiché la lavorazione prevedeva perforazioni di grande lunghezza, sono stati costruiti **ponteggi "su ruota"** che di volta in volta, sono stati spostati in corrispondenza della colonna ed arco oggetto di intervento. Tale soluzione "Leonardesca" ha evitato di ripetere più volte lo smontaggio e rimontaggio del ponteggio e la conseguente necessità di interdire l'accesso della navata e delle zone di cantiere più estese rispetto alla zona puntuale di intervento, appunto ciascuna colonna-arco.

La serie di interventi previsti di riparazione dei danni e di rafforzamento della Cupola ed del Tamburo hanno la necessità di ponteggi all'esterno, e soprattutto all'interno della Basilica, con un piano di lavoro collocato a circa 40m d'altezza, esattamente sopra la Porziuncola.

A tale scopo è stato realizzato un ponteggio con **un sistema "convenzionale" giunto tubo all'esterno a copiare la superficie esterna della Cupola e Tamburo.**

All'interno della Basilica, viceversa è stata progettata, fornita e costruita dall'azienda Layher un ponteggio multidirezionale, a cui ha provveduto al montaggio l'impresa Edilcomit Ponteggi srl. La struttura reticolare è stata realizzata in appoggio alla base del tamburo stesso, con elementi in alluminio di grande luce, senza colonne di sostegno a terra.

Sono dunque state evitate colonne alla base, sul piano di calpestio della Chiesa, che sarebbero state interferenti con i percorsi di visita e culto della Basilica e della Porziuncola in particolare. Ovviamente la Porziuncola è stata protetta da un ponteggio, non di lavoro, ma di protezione, per garantirne la conservazione durante le fasi di montaggio, e di smontaggio del ponteggio multidirezionale stesso.

Al di sopra il piano di ponteggio e lavoro, collocato alla base del tamburo a circa 40m d'altezza, si sviluppa poi il ponteggio di servizio e lavoro vero e proprio, lungo le pareti interne del tamburo e della cupola. L'intera altezza del ponteggio è servita da piattaforma elevatrice che si sviluppa complessivamente per un'altezza superiore a 70 m che permette l'accesso di persone e materiali al cantiere "sospeso".

Con le soluzioni sinteticamente descritte è stata garantita la fruibilità, anche se parziale della Basilica, della Porziuncola e dei percorsi museali presenti e collegati alla Basilica stessa durante l'intera durata dei lavori. La Basilica non è mai stata completamente chiusa, nemmeno un solo giorno durante il cantiere.



VIDEO



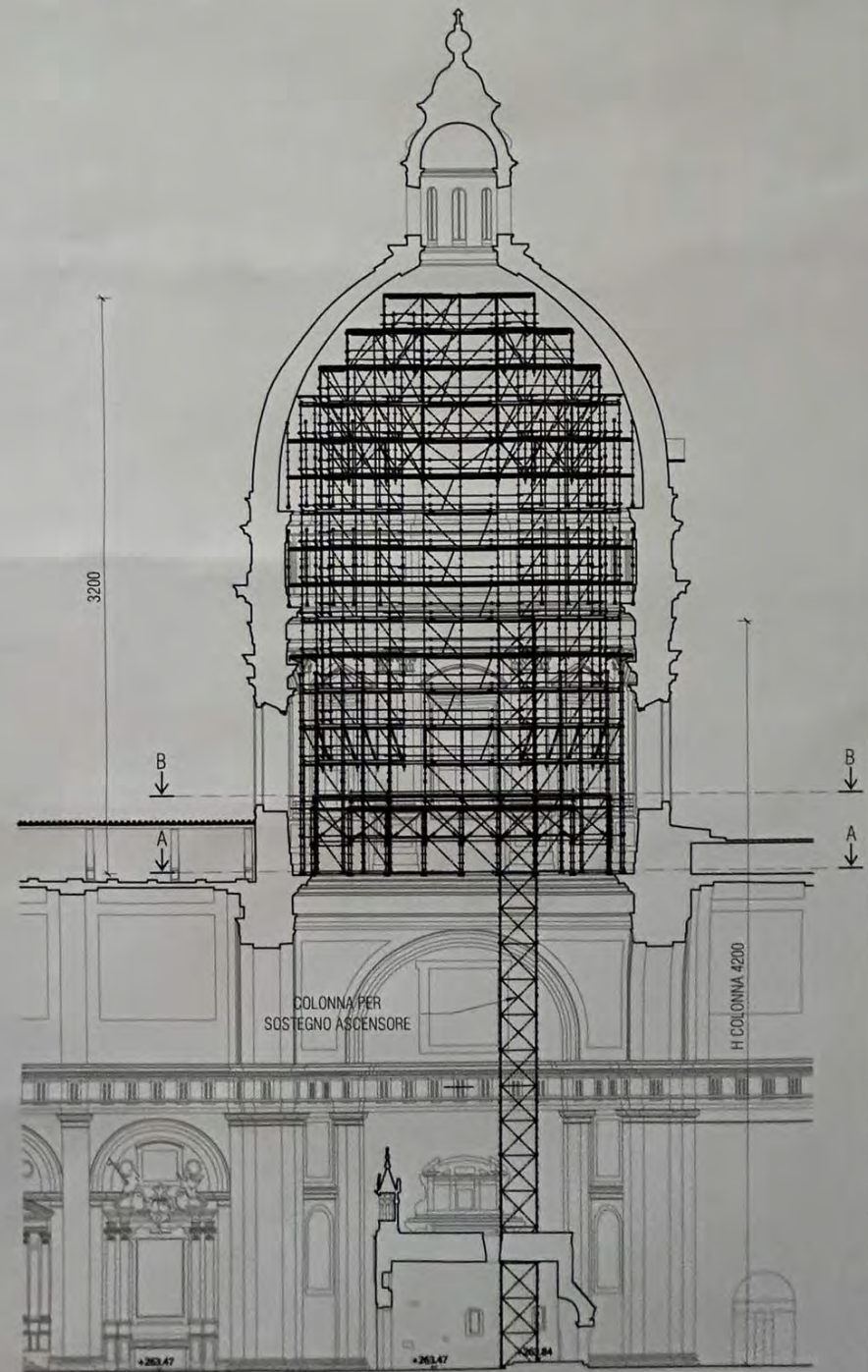




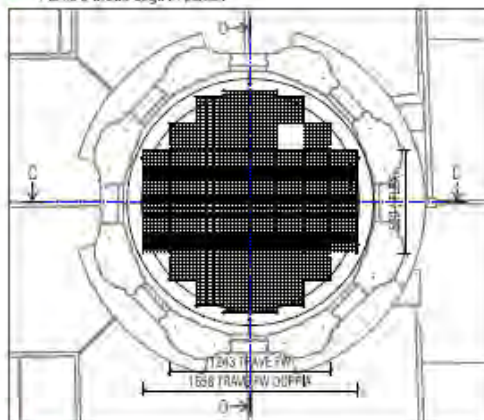




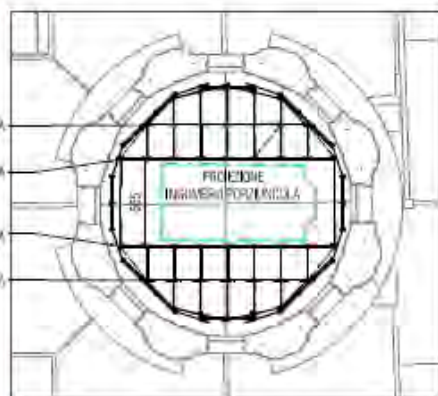




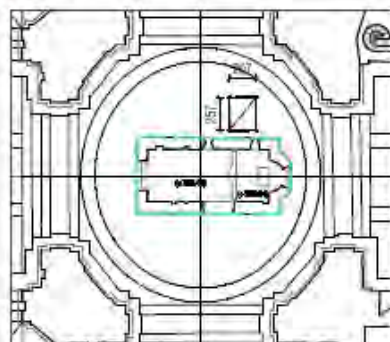
SEZIONE B-B
Pianta a livello degli Impalcati



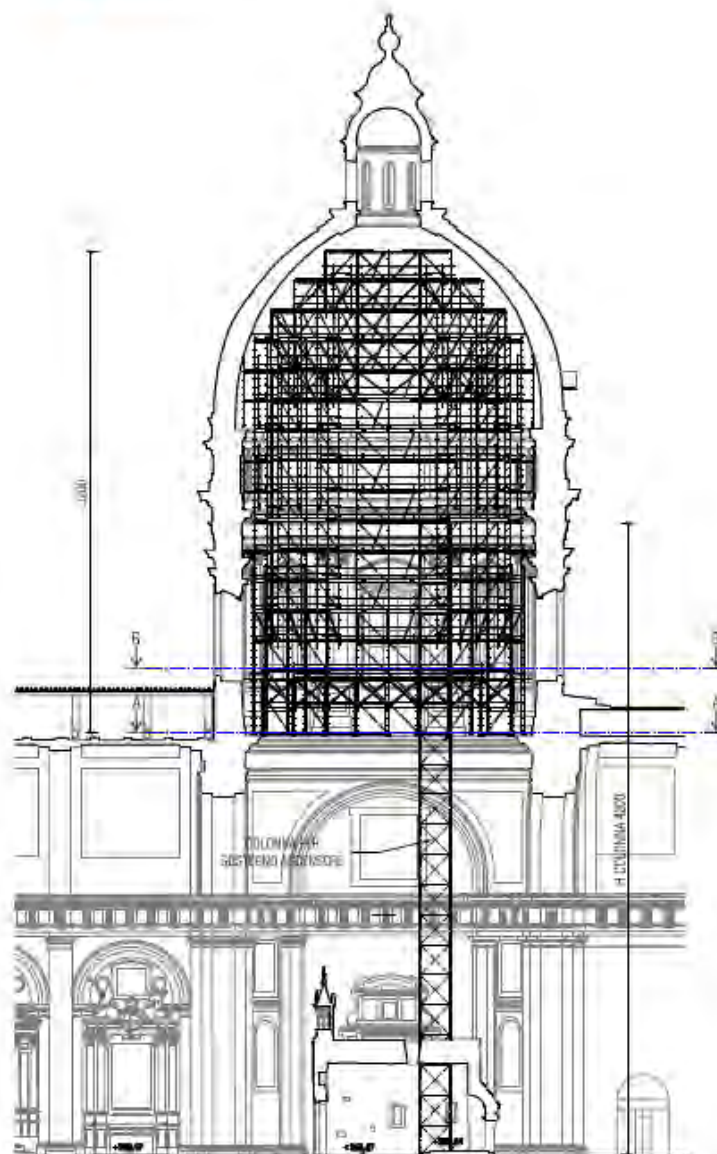
SEZIONE A-A
Pianta a livello degli appoggi in quota



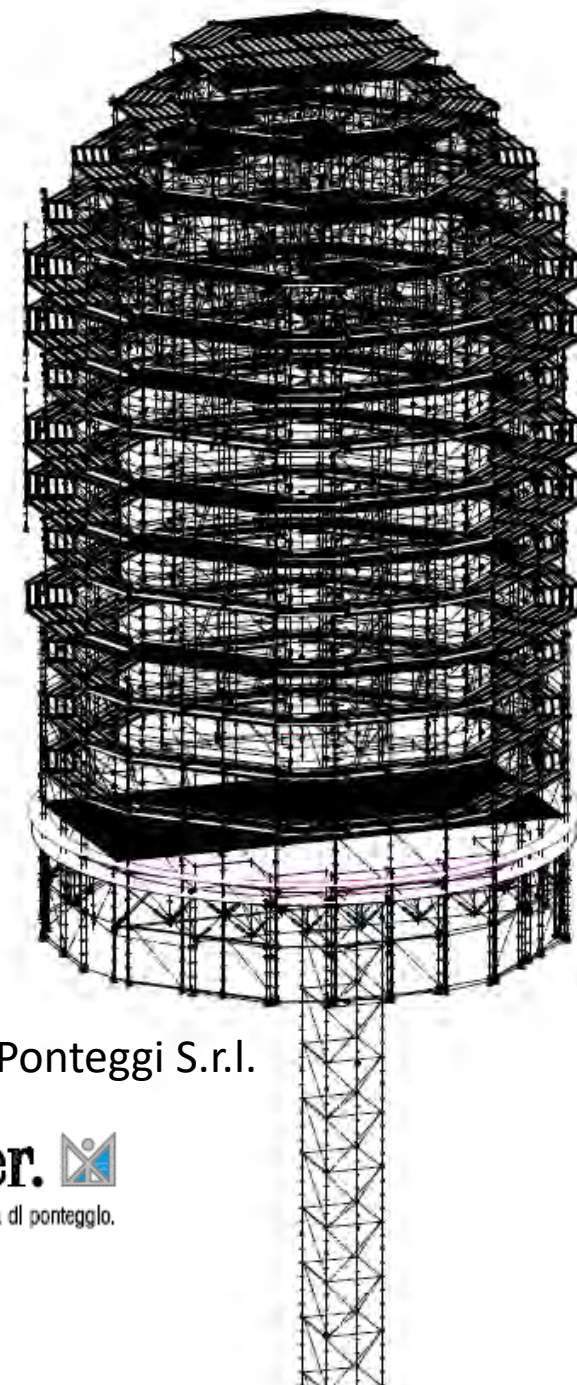
PIANTA A TERRA
Ingomero colonne per ascensore



PROSPETTO

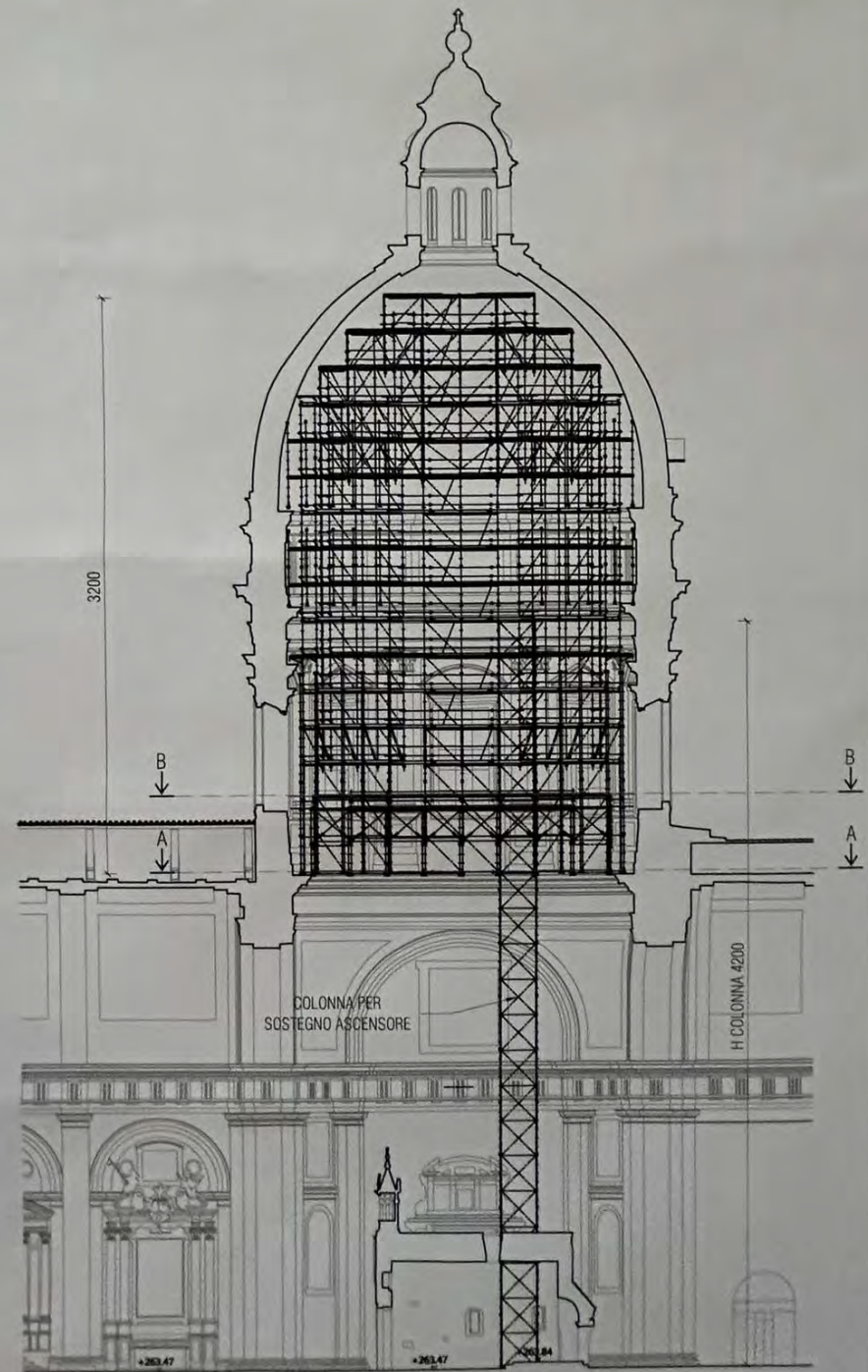


DISEGNO PRELIMINARE DA RIVEDERE SULLA BASE DEL CALCOLO IN
FUNZIONE DELLA TIPOLOGIA E DISPOSIZIONE DI ANCORAGGI DA REALIZZARE



Edilcomit Ponteggi S.r.l.

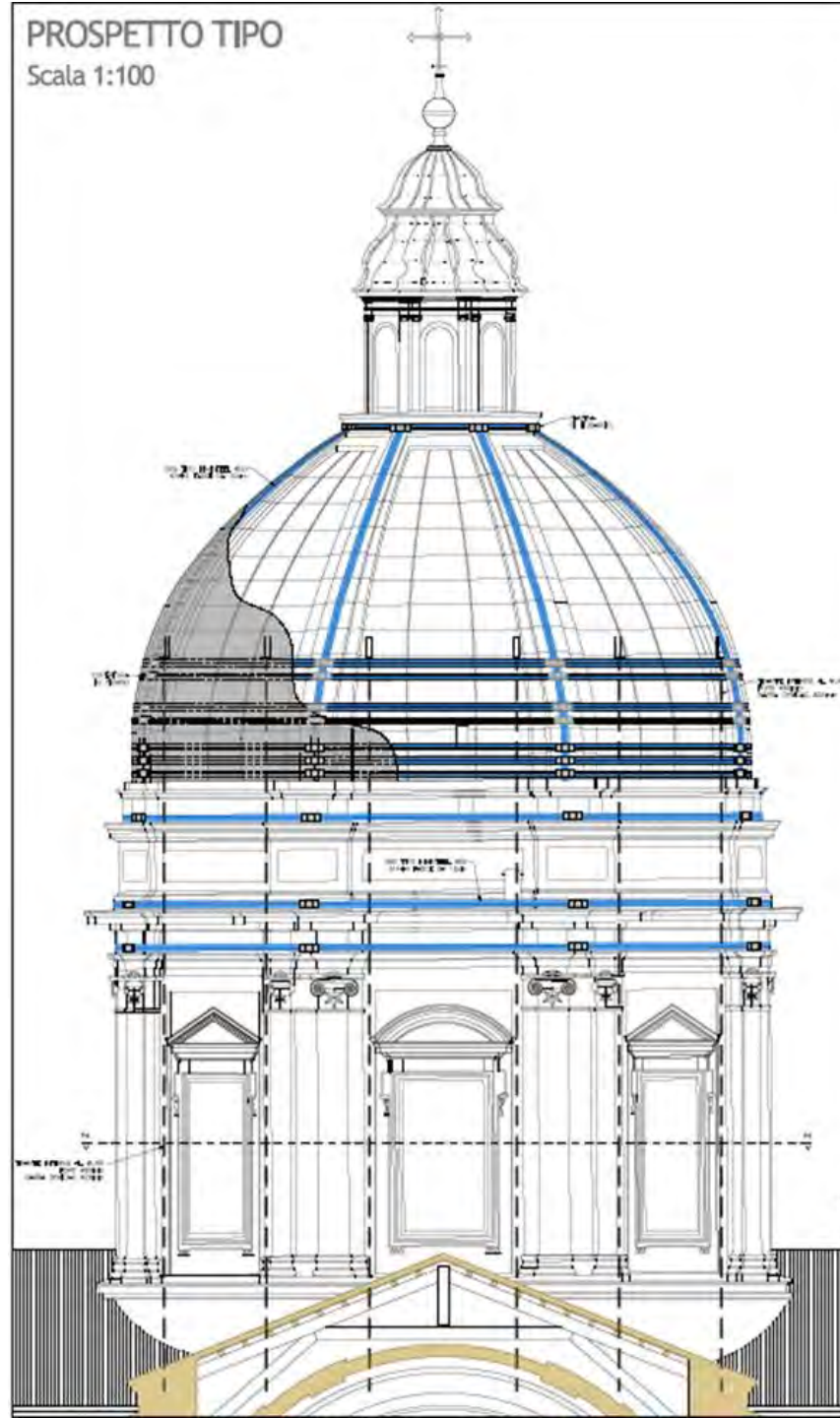
Layher. 
Più possibilità. Il sistema di ponteggio.



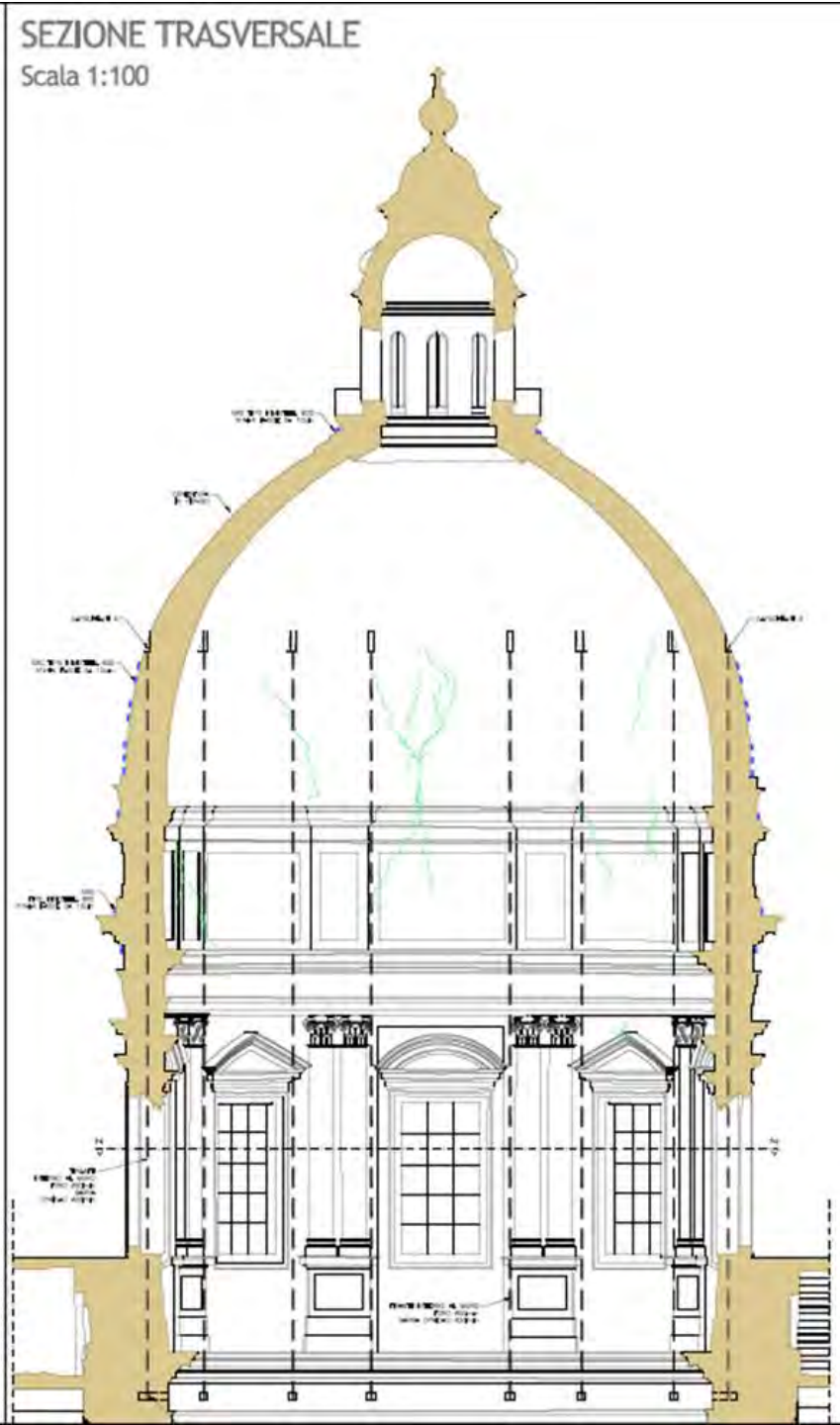


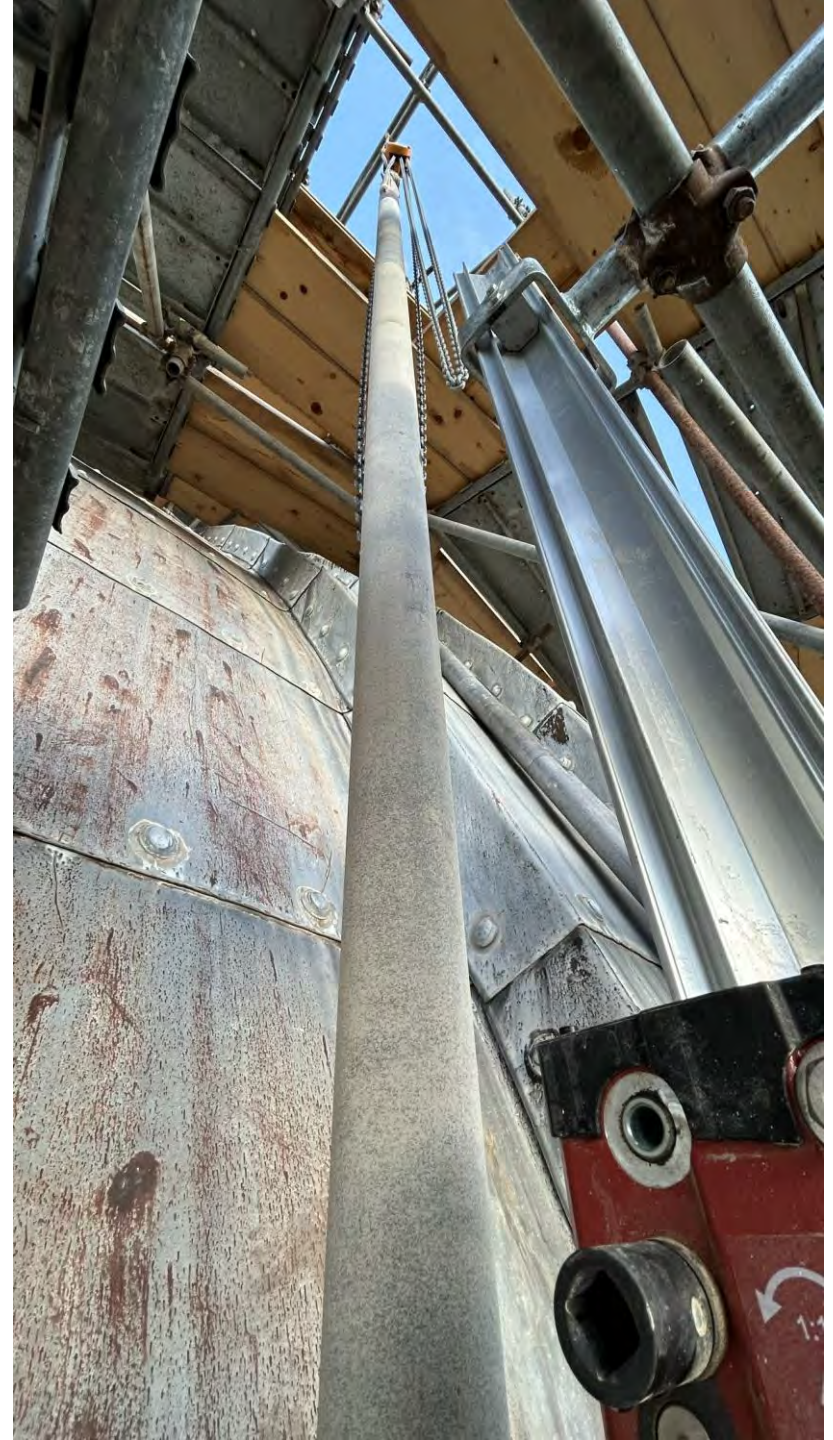
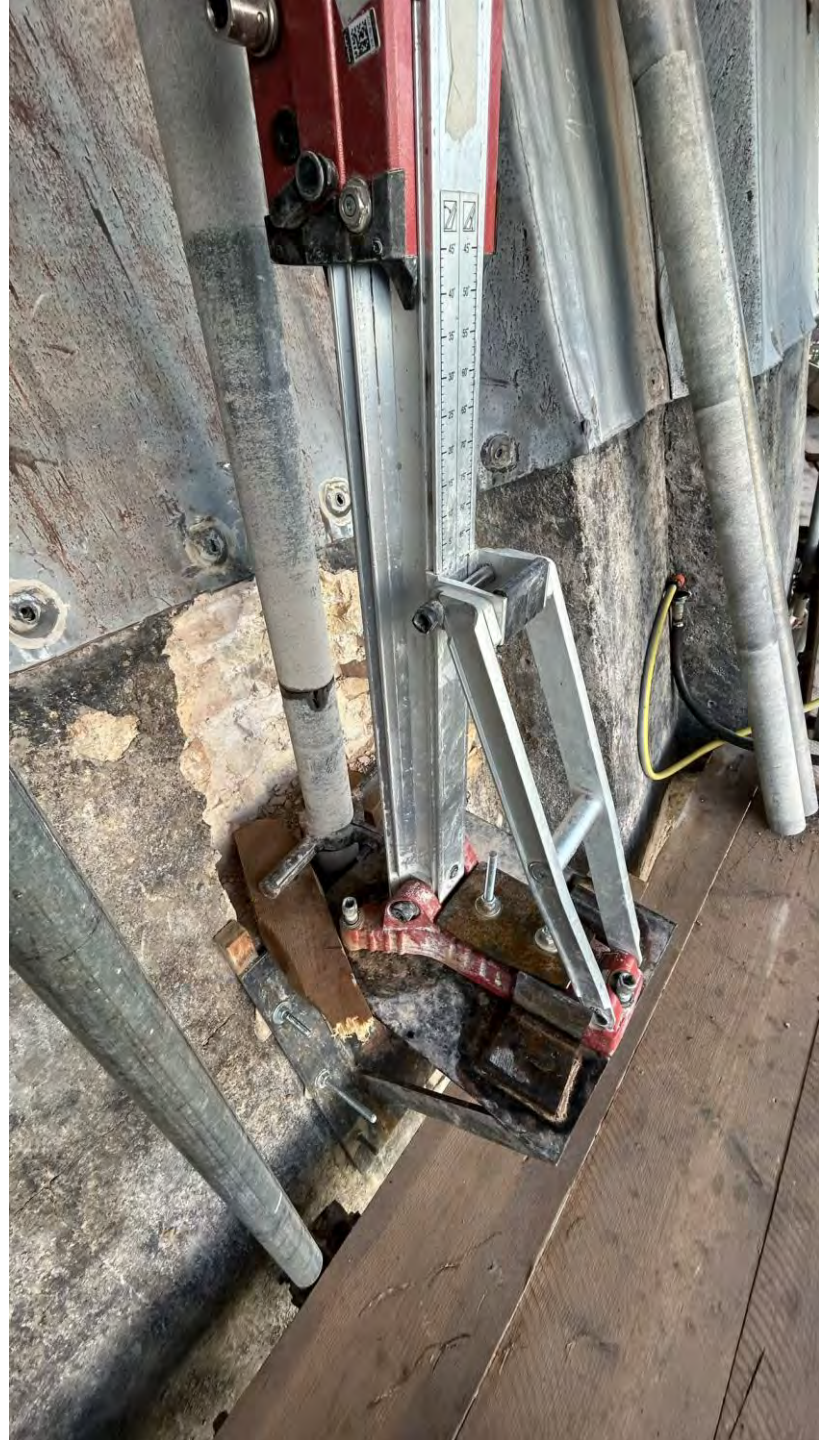


PROSPETTO TIPO
Scala 1:100



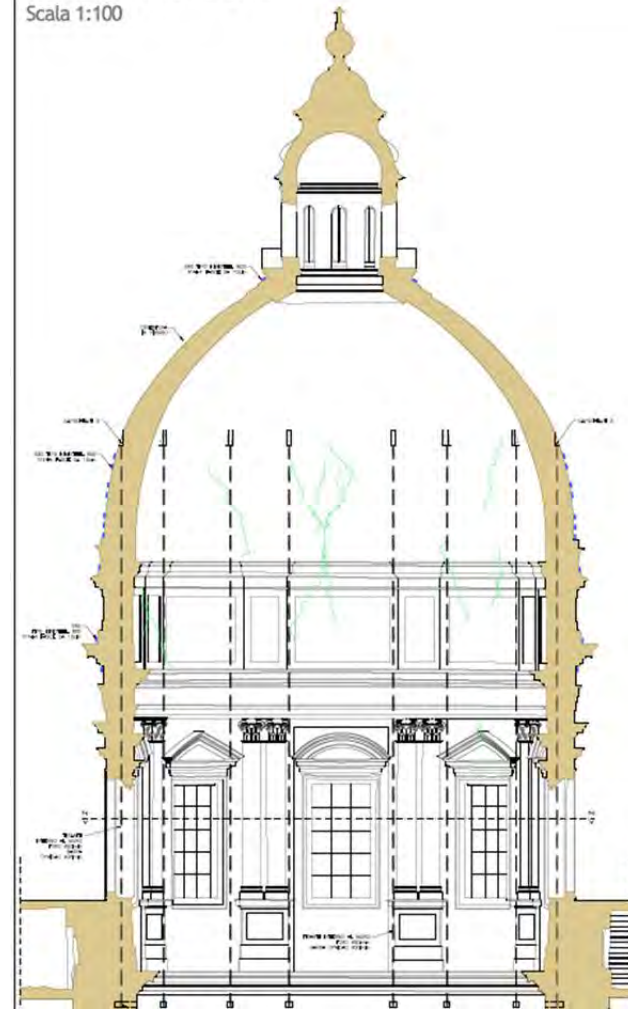
SEZIONE TRASVERSALE
Scala 1:100







SEZIONE TRASVERSALE
Scala 1:100

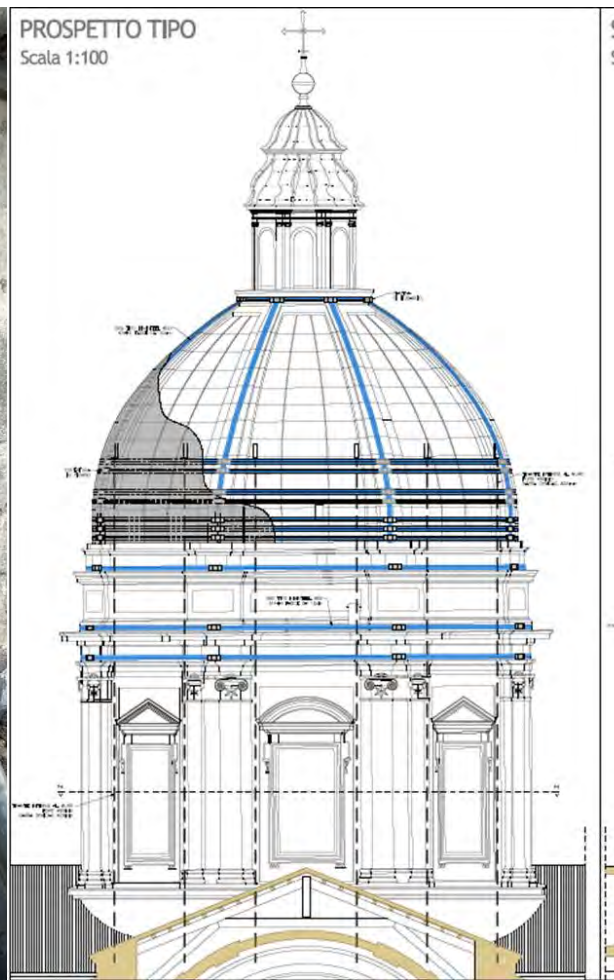


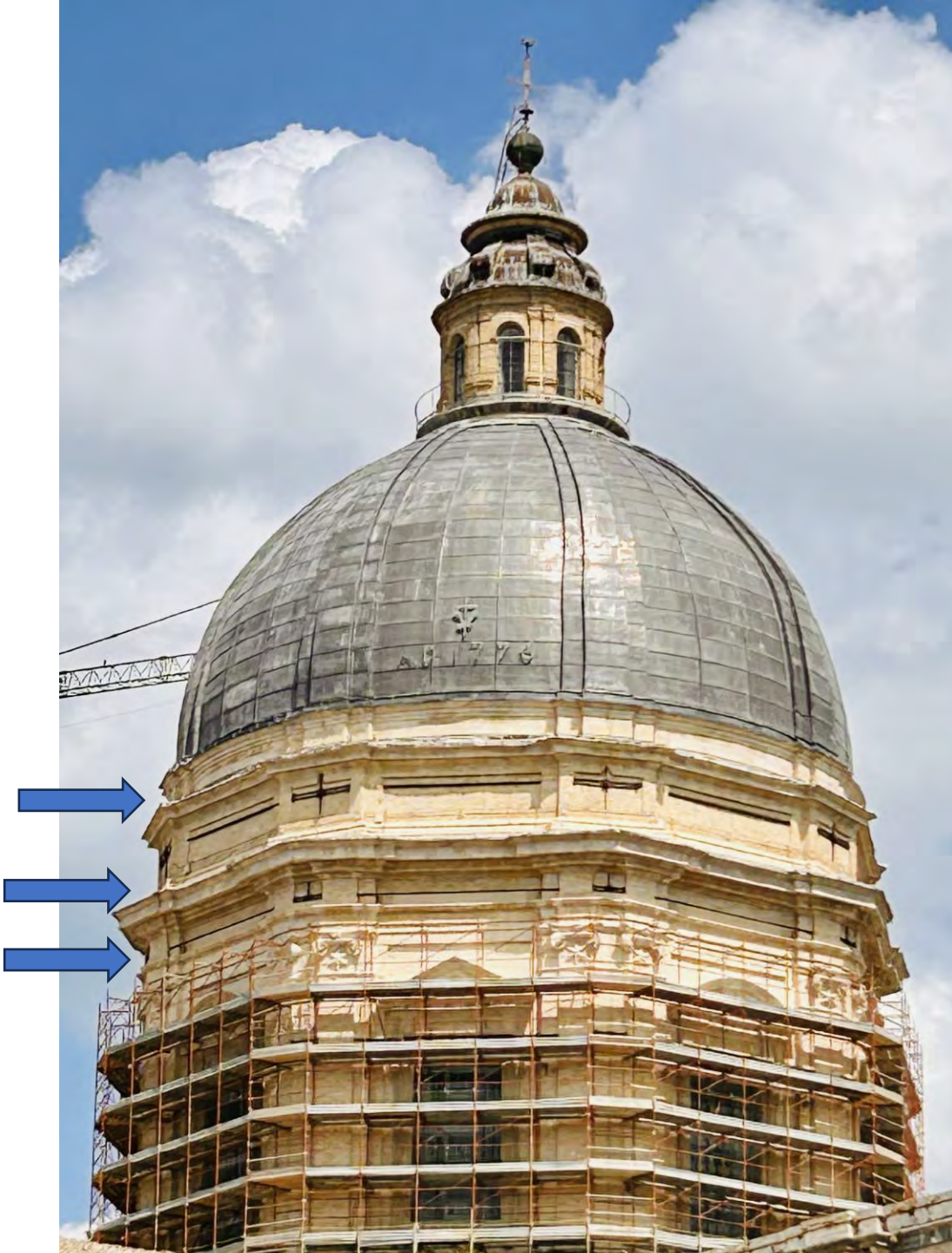




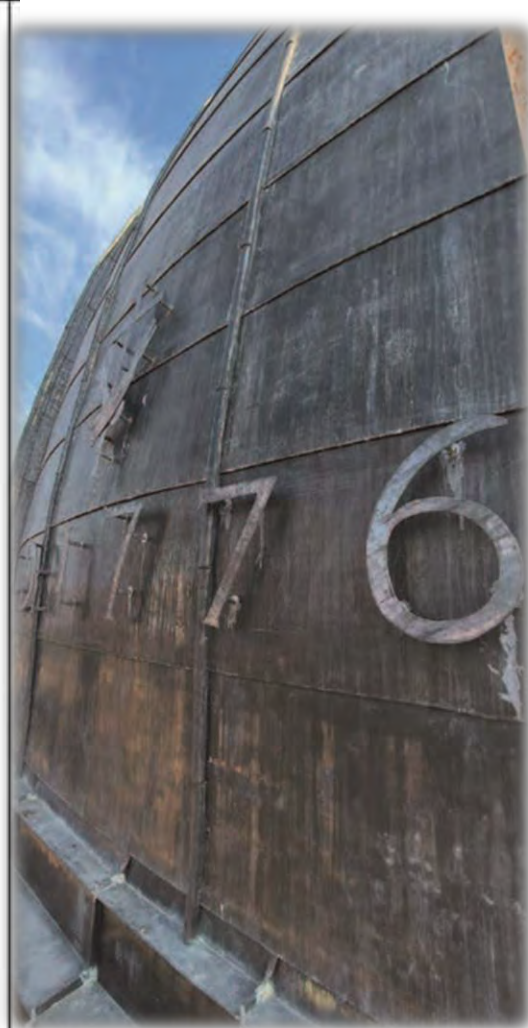
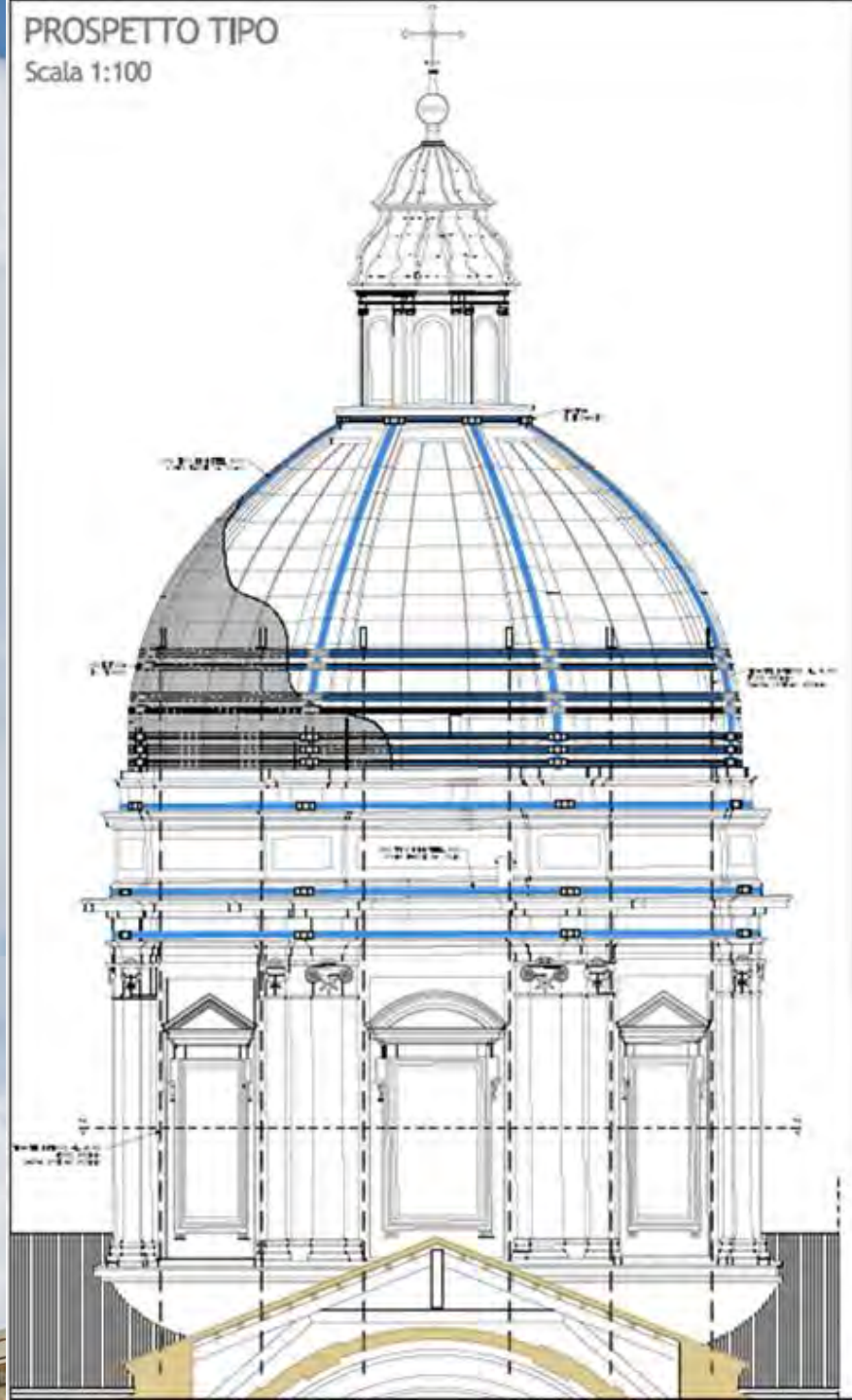






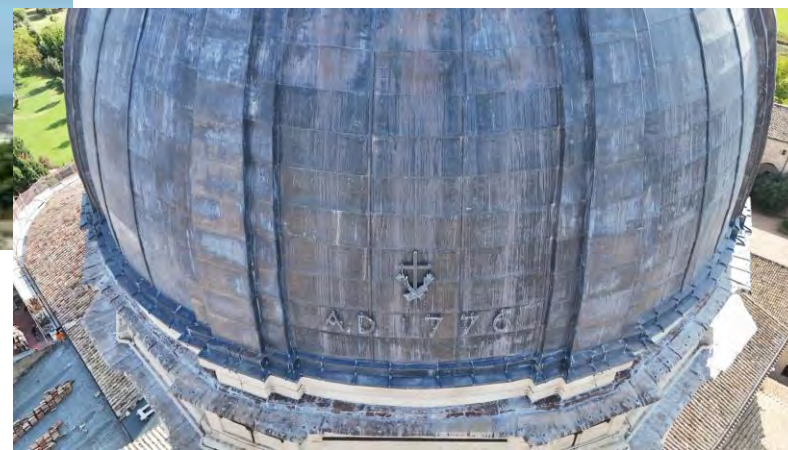
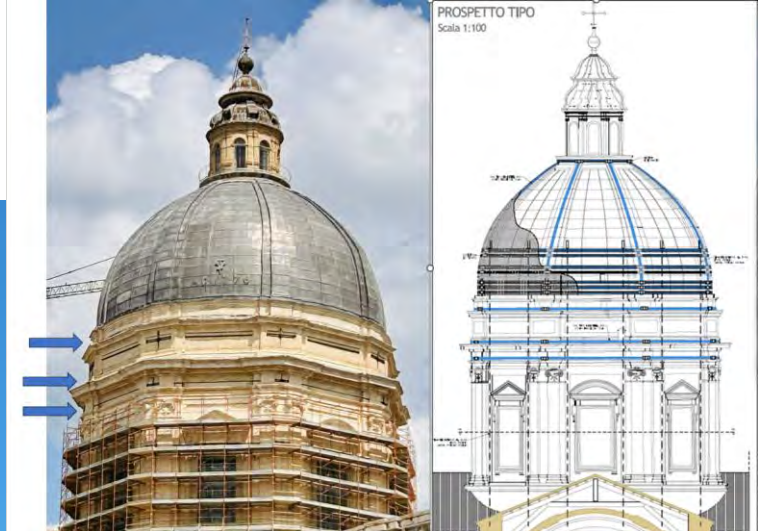


PROSPETTO TIPO
Scala 1:100









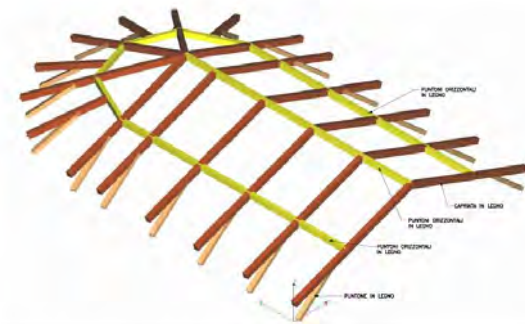


demolizione e ricostruzione della copertura del Transetto abbiamo posto in opera una copertura provvisoria che ci ha consentito di poter lavorare anche in situazioni disagiate preservando il bene da danni causati dal maltempo.

Devo ringraziare una serie di persone che ci hanno dato fiducia e con cui abbiamo instaurato un clima di confronto e di seria collaborazione: il geom. Walter Bianchi e suo figlio arch. Alessandro, l'arch. Ruggero Martinez, gli arch. Daria Ripa di Meana e Bruno Salvatici e l'ing. Riccardo Vetturini.

Vorrei ringraziare la collaborazione con l'Università di Perugia e specificatamente i Prof. Cavalagli e Gioffrè per gli interventi di messa in opera delle apparecchiature di monitoraggio che daranno la possibilità di valutare con esattezza gli spostamenti della struttura nel tempo.

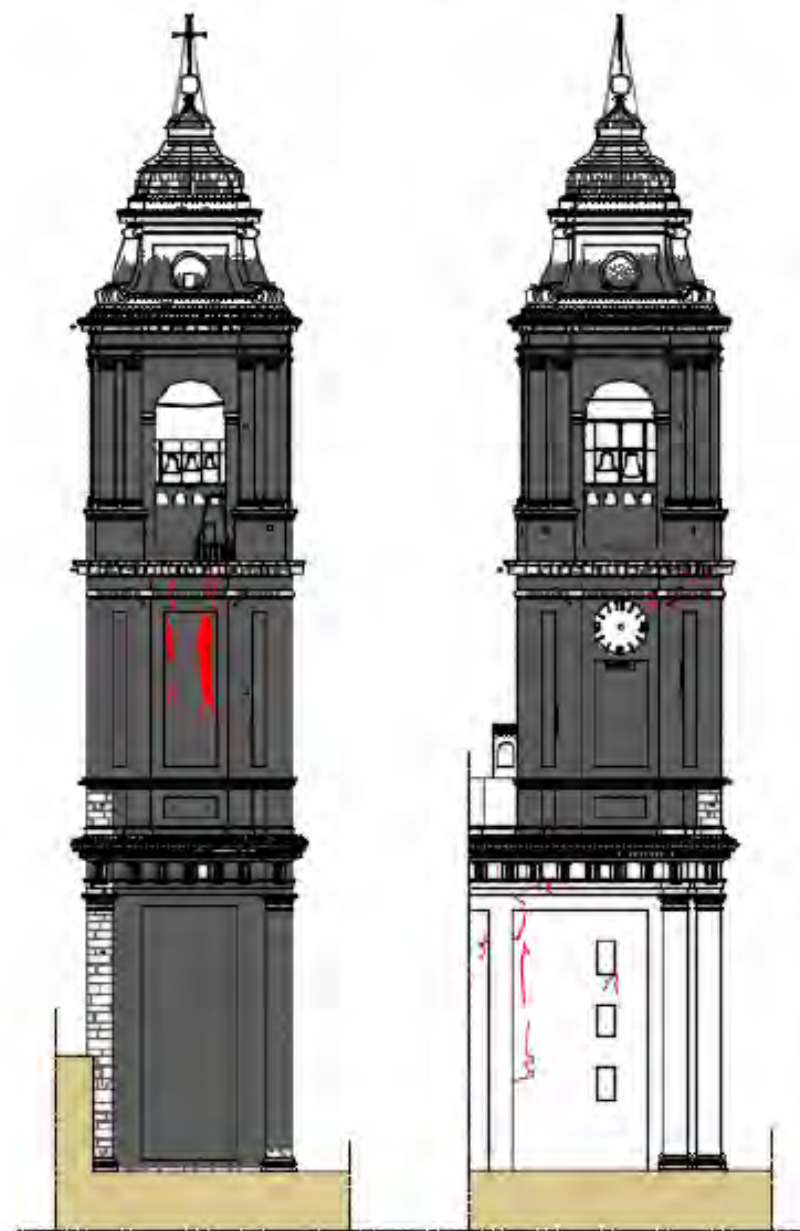
Infine un ringraziamento sincero a tutte le maestranze dell'impresa Lunghi e di tutte le imprese con cui abbiamo collaborato per il raggiungimento di questo importante traguardo, con particolare riguardo al geom. Paolo Malfetta che ha guidato e coordinato come capo cantiere il lavoro di tanti con un impegno ed una dedizione unica.



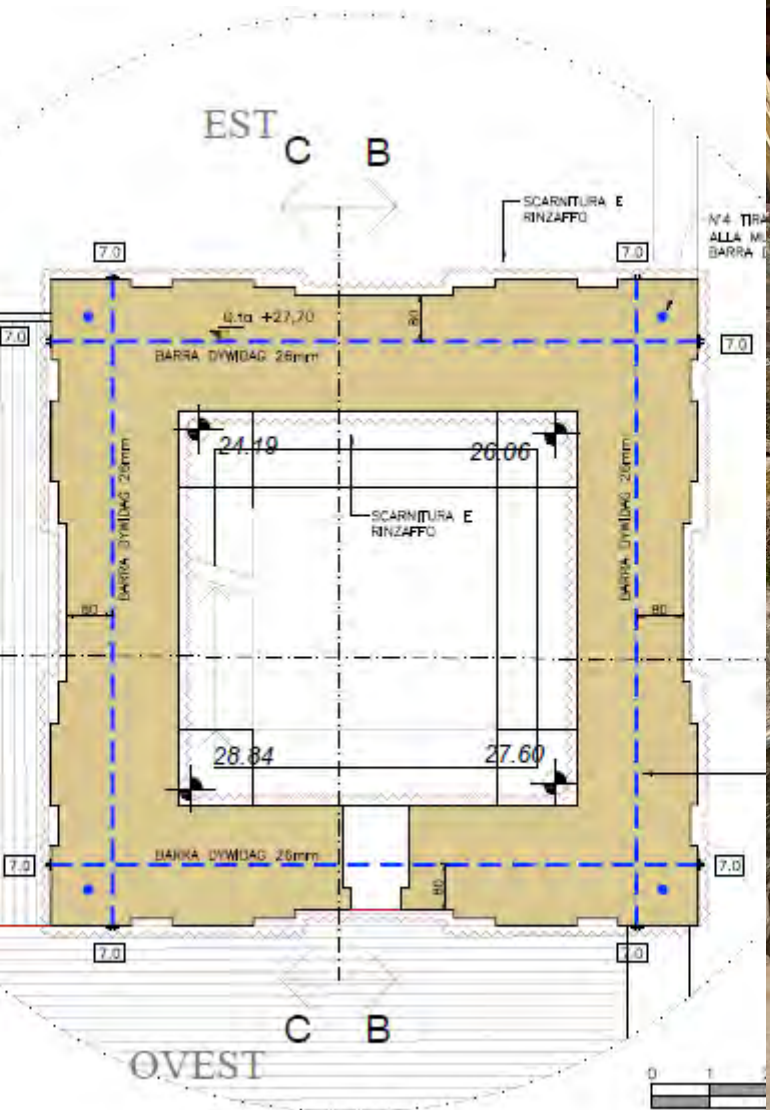
NUOVA COPERTURA LIGNEA
VISTA ASSONOMETRICA



Sezione-prospetto Ovest ed Nord



Prospetti Est e Sud

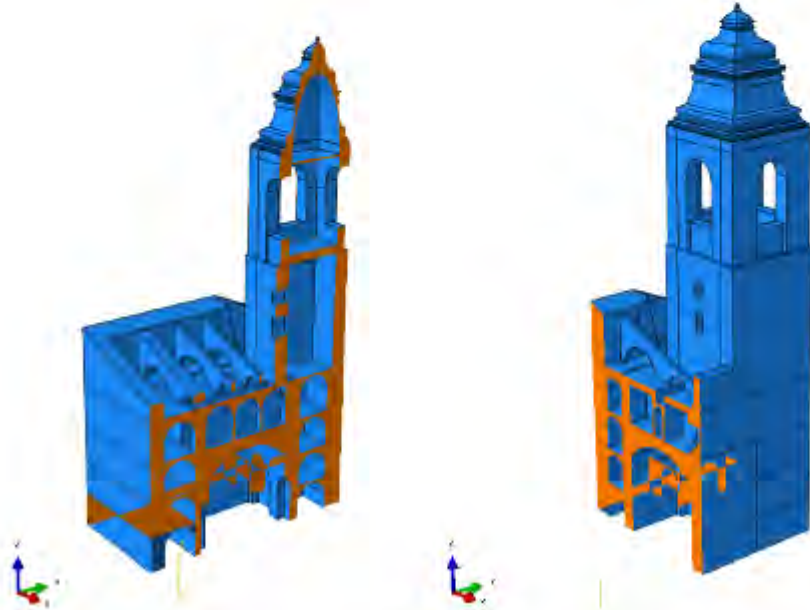


7. Modellazione numerica agli elementi finiti e calibrazione

7.1. Descrizione del modello numerico

Il modello tridimensionale del campanile è stato realizzato in ambiente Cad e poi importato per parti nel software di calcolo numerico agli elementi finiti Abaqus 6.14. La geometria del modello è stata semplificata rispetto al rilievo attuale in modo da limitare problemi di non convergenza della soluzione, dovute alla presenza di elementi architettonici, quali cornicioni e modanature caratterizzanti la struttura nel suo complesso. L'interazione con i volumi di fabbrica sottostanti e circostanti, ovvero la sacrestia e gli ambienti compresi fra l'abside e il transetto destro della basilica, si è proceduto ad una modellazione degli elementi strutturali più significativi, al fine di ottenere un adeguato comportamento strutturale. A sua volta, il grado di vincolo esercitato dall'abside e dal transetto destro è stato riprodotto mediante vincoli elastici orizzontali. Il modello è stato fissato a terra mediante vincoli a incastro alla base.

Una volta definito il modello geometrico è stato messo in atto il processo di discretizzazione, che ha permesso di generare un modello numerico caratterizzato da elementi finiti tetraedrici a 4 nodi, aventi funzioni di forma lineari.



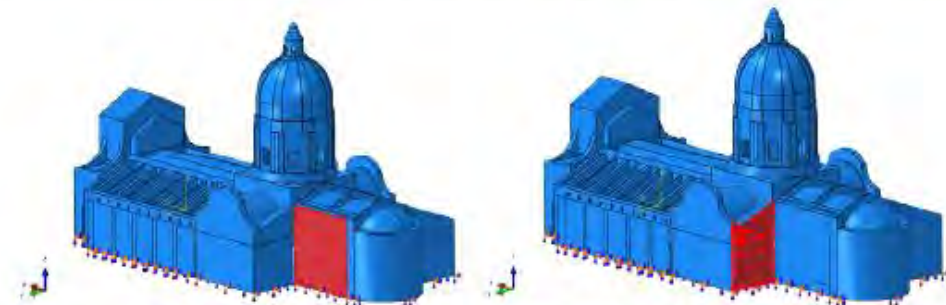
Modello tridimensionale solido del Campanile e dei volumi adiacenti.



Modello tridimensionale agli elementi finiti del campanile e dei volumi adiacenti.

7.2. Calibrazione dei vincoli laterali

Per modellare l'azione di vincolo laterale esercitata dalla basilica, e in particolare dalla struttura dell'abside e del transetto destro, sulla porzione strutturale in esame, sono stati utilizzati vincoli elastici unidirezionali in determinate porzioni delle murature laterali. Al fine di stimare il livello di rigidità esercitato, sono state eseguite due simulazioni numeriche con forzanti statiche orizzontali come indicate nella figura seguente.



Valutazione del grado di vincolo offerto dalla basilica sulla struttura oggetto di analisi.

In particolare, sono state applicate pressioni costanti pari a 1000N/m^2 su entrambe le superfici, quella absidale di 625 m^2 e quella del transetto di circa 350 m^2 , per un totale di 625 kN e 350 kN di forze risultanti, rispettivamente. Nelle immagini seguenti si riportano le mappe di spostamento in direzione normale alle pareti ottenute dall'analisi.

7.3. Definizione dei parametri meccanici dei materiali pre e post intervento

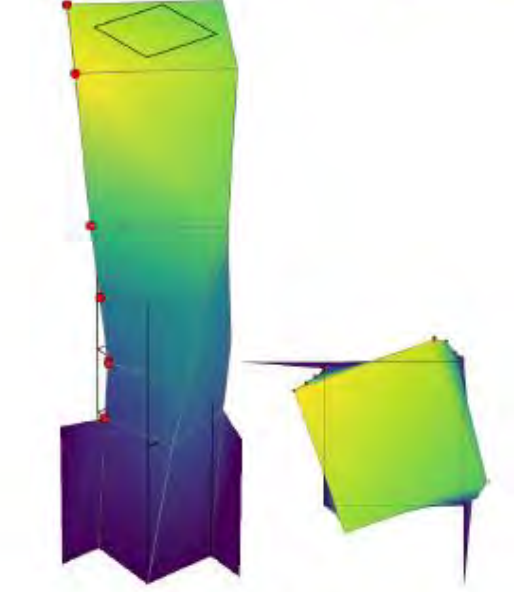
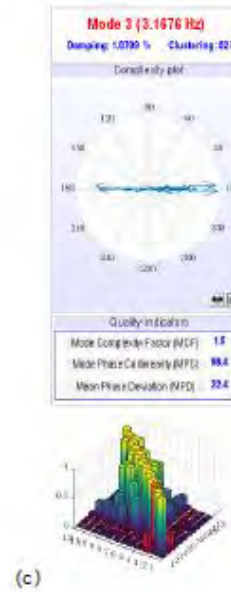
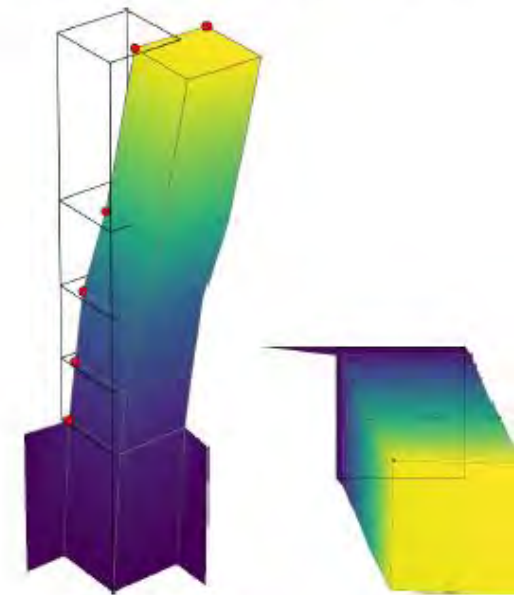
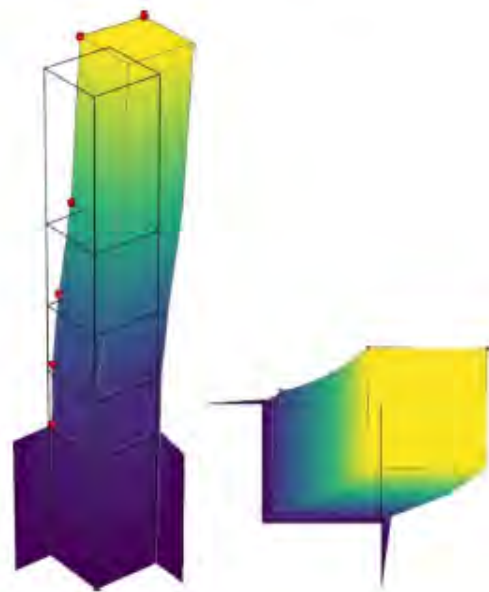
Al fine di valutare l'incremento prestazionale dovuto agli interventi di progetto, sono stati stimati gli indici di sicurezza sismica in condizioni attuali e in condizioni di progetto attraverso analisi statiche non lineari.

Per la caratterizzazione dei materiali è stato fatto riferimento alle indagini sperimentali in sito, in particolare alle prove con martinetti piatti singoli e doppi, alle prove soniche e alle prove di identificazione dinamica eseguite sul campanile. In particolare, tali indagini sono state impiegate per stimare i parametri di rigidezza e di resistenza dei materiali costituenti.

In merito ai parametri di rigidezza in condizioni attuali, a partire dalle indagini sperimentali si è tenuto conto di uno stato fessurativo maggiormente concentrato su alcune pareti del campanile, in particolare quelle anteriore e posteriore, con riferimento all'orientamento della basilica. I parametri meccanici dei materiali sono stati quindi calibrati sulla base di frequenze naturali e modi di vibrare della struttura derivanti da identificazione dinamica sperimentale. I valori target sono riportati in Tabella, con l'indicazione delle tipologie dei modi di vibrare, le frequenze naturali e i relativi smorzamenti. Nelle figure successive si riporta la rappresentazione delle forme modali.

Proprietà dinamiche delle prime tre forme modali del campanile identificate sperimentalmente.

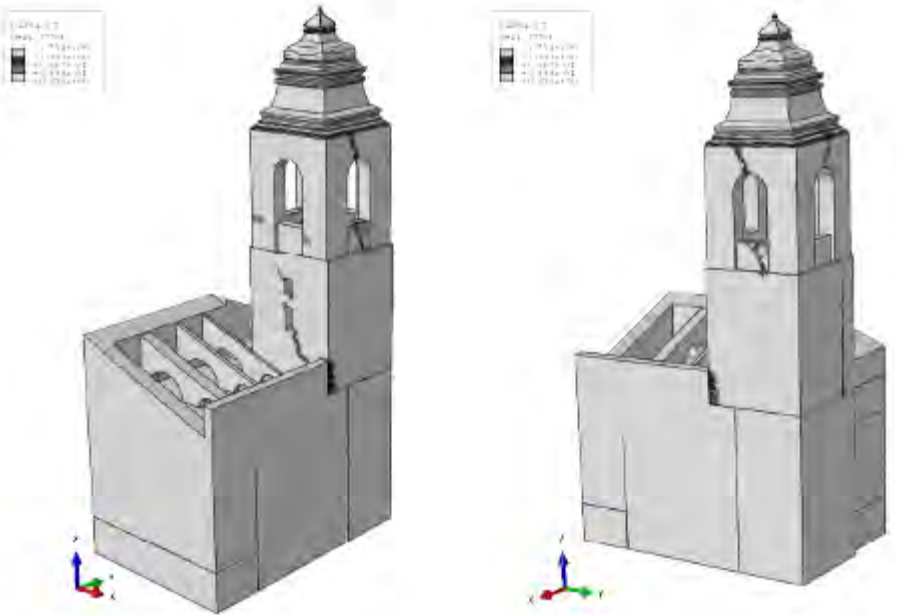
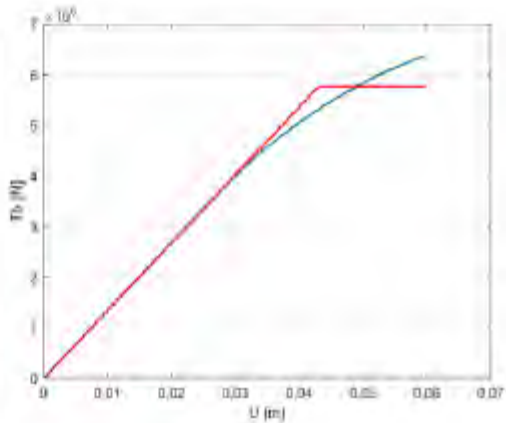
Modo	Tipo	Frequenza [Hz]	Smorzamento [%]
1	Flex 1	1.2495	0.7186
2	Flex 2	1.4297	0.5943
3	Torsionale	3.1676	1.8709



Rappresentazione grafica delle prime tre forme modali del campanile identificate sperimentalmente.

Parametri del sistema S-DOF equivalente in configurazione attuale e direzione del carico positiva.

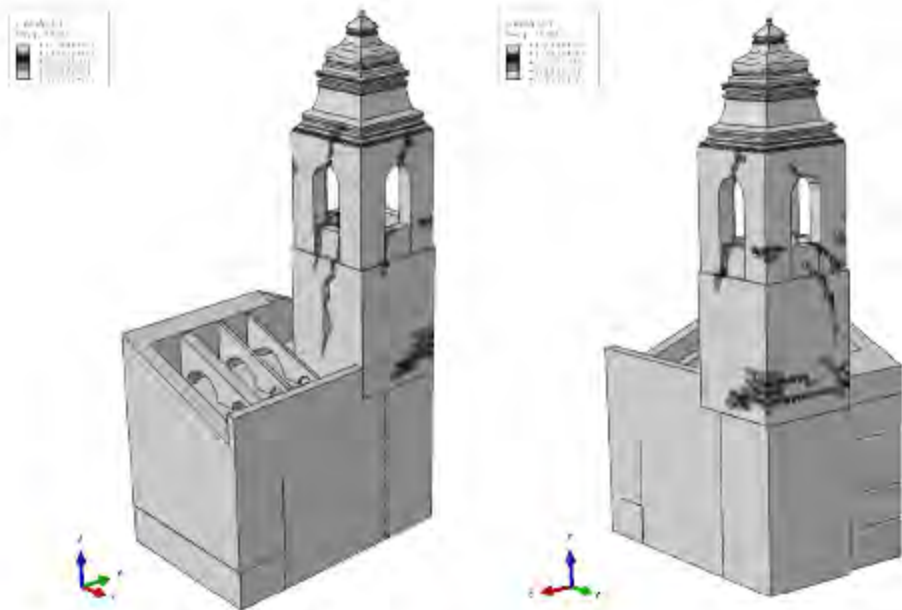
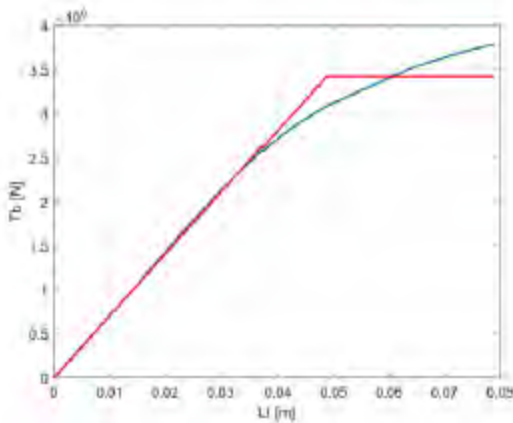
m^*	2280 ton
k^*	$1.339e8$ N/m
T^*	0,82 s
F_{ty}	$6.39e6$ N
d^{*y}	0.043 m
F^{*bu}	$5.77e6$ N
d^{*u}	0.060 mm
S_{RSLa}^{*y}	0.41 g
a^{*g}	0.21 g
lvs	0,51



Mappa dello stato di danno ottenuto dall'analisi statica non lineare con distribuzione dei carichi ad accelerazione uniforme in condizioni attuali e direzione del carico positiva.

Parametri del sistema S-DOF equivalente in configurazione attuale e direzione del carico negativa.

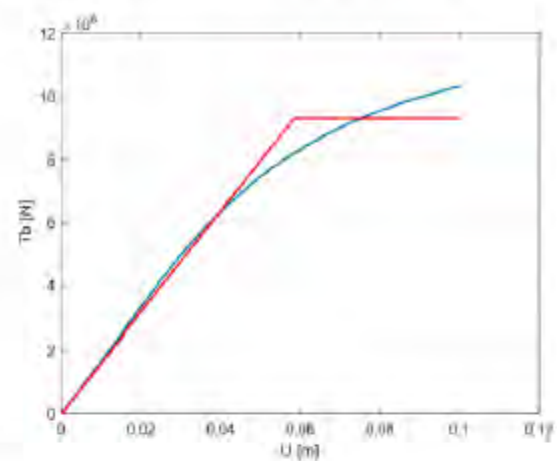
m^*	2280 ton
k^*	$7.02e7$ N/m
T^*	1,13 s
F_{ty}	$3.79e6$ N
d^{*y}	0.049 m
F^{*bu}	$3.43e6$ N
d^{*u}	0.080 mm
S_{RSLa}^{*y}	0.41 g
a^{*g}	0.20 g
lvs	0,49



Mappa dello stato di danno ottenuto dall'analisi statica non lineare con distribuzione dei carichi ad accelerazione uniforme in condizioni attuali e direzione del carico negativa.

Parametri del sistema S-DOF equivalente in configurazione di progetto e direzione del carico positiva.

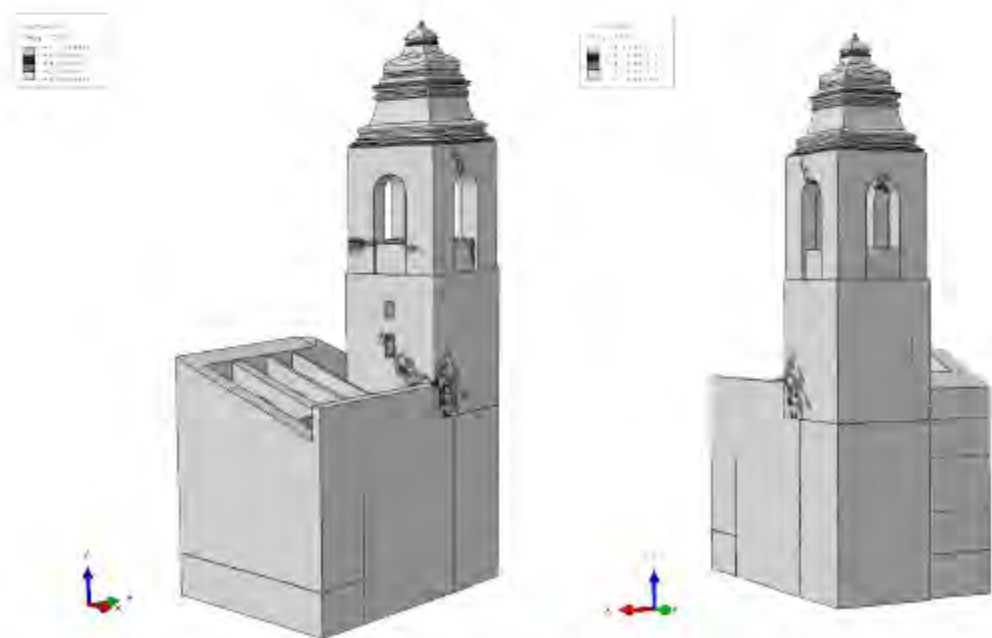
m^*	2280 ton
k^*	$1.59e8$ N/m
T^*	0.75 s
F_{xy}^*	$1.033e7$ N
d_{xy}^*	0.058 m
F_{bu}^*	$9.312e6$ N
d_{bu}^*	0.100 mm
$SRSLa_{xy}^*$	0.41 g
a_{xy}^*	0.38 g
I_{vs}	0,92



10. Confronto dei risultati ottenuti in condizioni attuali e di progetto

Le analisi statiche non lineari condotte con configurazioni di carico proporzionali ad una distribuzione uniforme delle accelerazioni in altezza hanno messo in evidenza un discreto livello di vulnerabilità della struttura in condizioni attuali, con una stima di una PGA di capacità pari a circa 0.20g-0.21g a cui corrisponde un indice di vulnerabilità sismica pari a circa 0.48-0.51.

Il modello in condizioni di progetto, che considera gli interventi di consolidamento modellati mediante una omogeneità della rigidità strutturale e un incremento di resistenza a trazione del solido murario, restituisce una stima della PGA di capacità pari a circa 0.38g-0.47g a cui corrisponde un indice di vulnerabilità sismica pari a 0.92-1.14.



Mappa dello stato di danno ottenuto dall'analisi statica non lineare con distribuzione dei carichi ad accelerazione uniforme in condizioni di progetto e direzione del carico positiva.



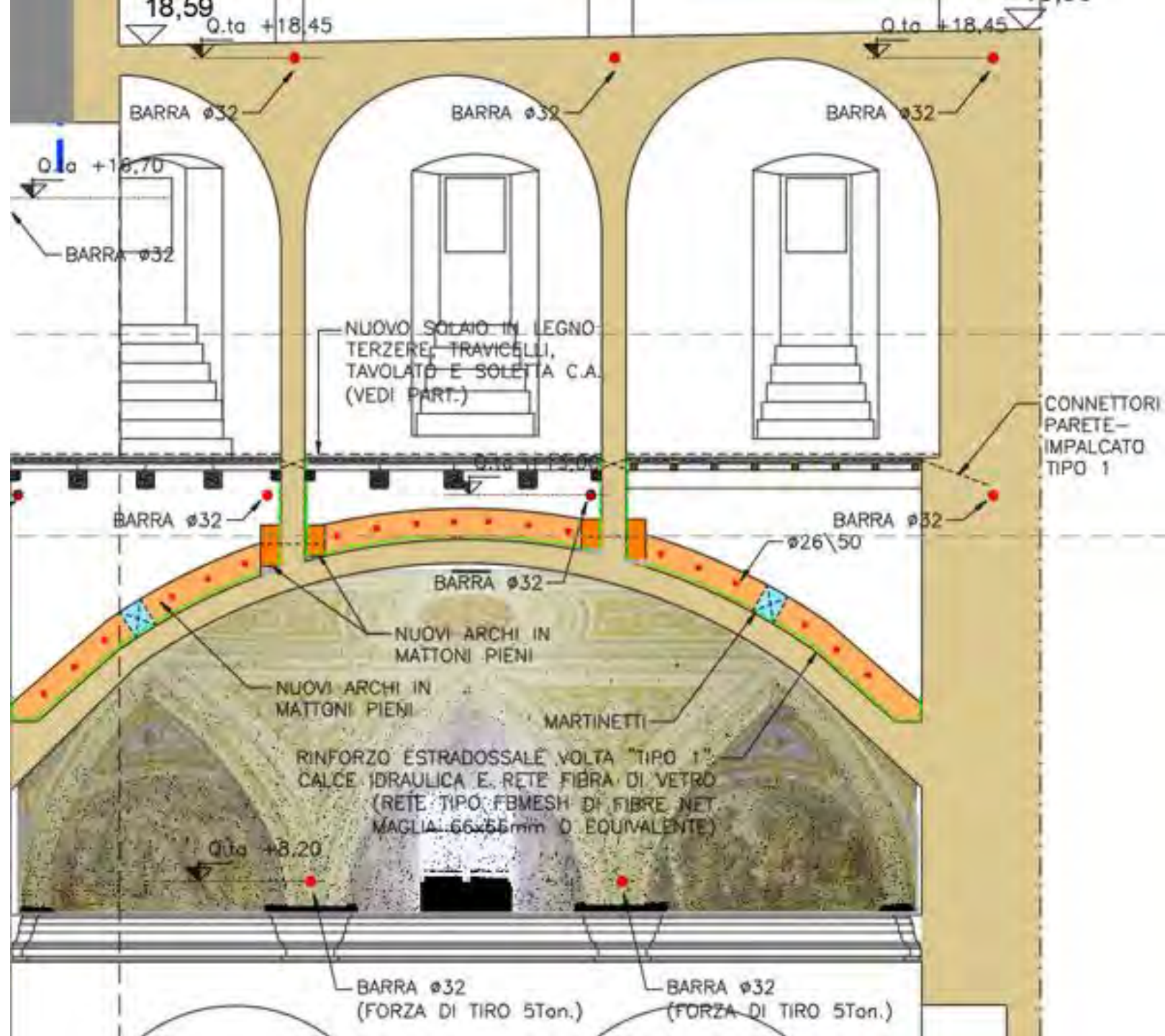
Gli arredi lignei della sacrestia

Su tutti e quattro i lati della Sacrestia sono presenti arredi in legno di noce realizzati nel 1671 da fra Giacomo da Borgo San Sepolcro, esperto nella lavorazione del legno, che fu attivo in Porziuncola per oltre un trentennio, fino al 1673, anno della sua morte. A lui si devono la conduzione dei lavori d'intaglio della sacrestia e del pulpito della Basilica. Le lavorazioni di restauro hanno compreso: rimozione di depositi superficiali incoerenti a secco, con pennellesse, spazzole e aspiratori; ristabilimento della coesione nei casi di disgregazione mediante impregnazione per mezzo di pennelli, siringhe e pipette di prodotto consolidante effettuate durante le fasi della pulitura, su legni non dipinti, monocromi, policromi, dorati o con foglia metallica con resine sintetiche in

soluzione o in emulsione o microemulsione, a bassa concentrazione; ristabilimento della coesione di legni non dipinti mediante impregnazione; ristabilimento dell'adesione e incollaggio di parti staccate mediante iniezione di adesivi; operazione eseguibile su opere con pittura monocroma, policromi, dorati o con foglia metallica; trattamento del legno con sostanze biocide per la prevenzione e l'eliminazione di microrganismi e organismi biodegradabili; rimozione di sostanze sovrappresse quali depositi coerenti ed aderenti, incrostazioni, cataboliti di animali, sostanze organiche, ecc. effettuata con mezzi meccanici, su legni non dipinti o monocromi; revisione delle guide dei cassetti ed eventuale ripristino con la reintegrazione delle parti ammalorate con legno della stessa essenza. Revisione e restauro delle parti ammalorate delle cerniere e ser-



LA SACRESTIA



March Ingenium



CONSIGLIO NAZIONALE
DEGLI INGEGNERI



Con il supporto scientifico di:



CONVEGNO ON LINE
VENERDÌ 23 OTTOBRE 2026, ORE 15.00 - 17.00

**La Sicurezza Strutturale degli Elementi
Voltati:** Strategie di Consolidamento Innovative
e Interventi Pratici sul Patrimonio Monumentale

GRAZIE PER L'ATTENZIONE

Il miglioramento sismico della Basilica di Santa Maria degli Angeli ad Assisi
Ing. Riccardo Vetturini, INGENIUM SRL