



# *INGEGNERIA CAPALDINI STUDIO ASSOCIATO*



# *INGEGNERIA CAPALDINI STUDIO ASSOCIATO*



*Via Raffaello 5, 06030 Giano dell'Umbria, Perugia*

*tel 0742 99391/969420 fax 0742 99056*

*www.studiocapaldini.it*

*info@studiocapaldini.it progetti@studiocapaldini.it direzionelavori@studiocapaldini.it*



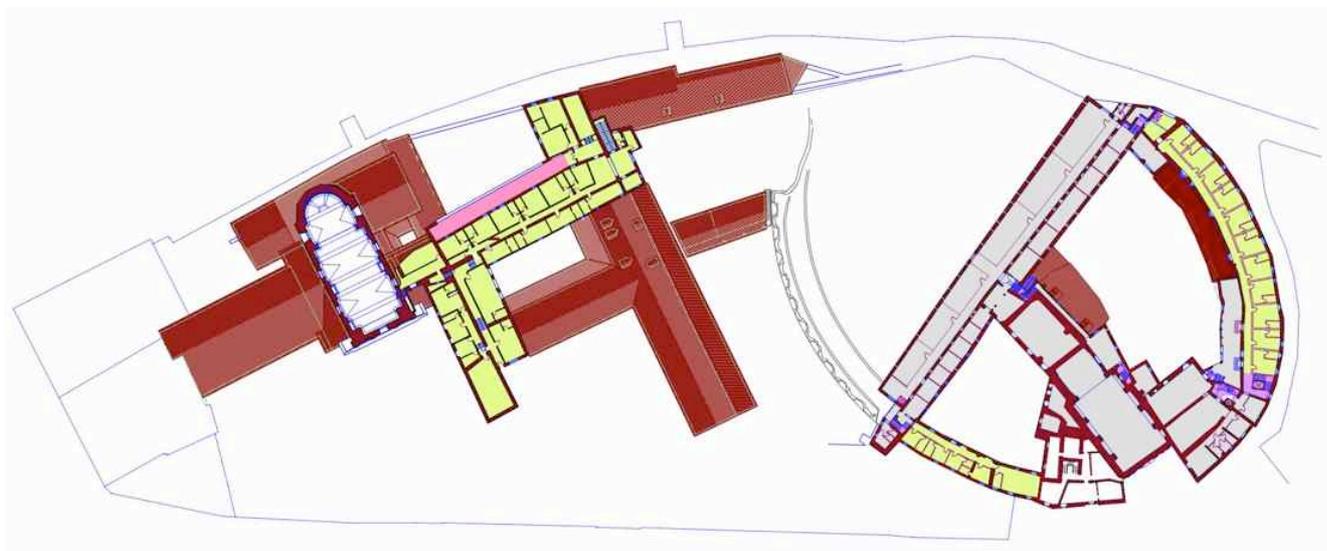
*Alcuni tra i più significativi  
lavori recentemente svolti*



**CONSOLIDAMENTO CON TECNOLOGIA SPERIMENTALE ,RESTAURO E RIUSO COME "QUARTIERE UNIVERSITARIO" DELL'AREA DELL'ANFITEATRO ROMANO IN SPOLETO: MONASTERO DELLA STELLA E MONASTERO DEL PALAZZO.**

*Il complesso dell'Anfiteatro in Spoleto, la cui originaria edificazione si ritrova in epoca romana, occupa una vasta area (circa 13.500 mq pari al 2% della superficie complessiva della città intramuraria medievale) all'interno della cinta di mura uriche costruite sul finire del XIII sec. Nei secoli avvenire una parte dell'originario impianto romano ha visto la nascita di due importanti complessi monastici di grande interesse storico-artistico, il Monastero della Stella ed il Monastero del Palazzo, il primo attribuito alla suore Agostiniane Lateranensi che gestivano anche l'ospedale annesso ed il secondo occupato dalle Benedettine Damianite dette Clarisse.*

*Con l'unità d'Italia il complesso fu requisito dallo Stato e trasformato in caserma, permanendovi fino in epoca recente quando venne completamente abbandonato.*



*Planimetria di inquadramento del complesso*

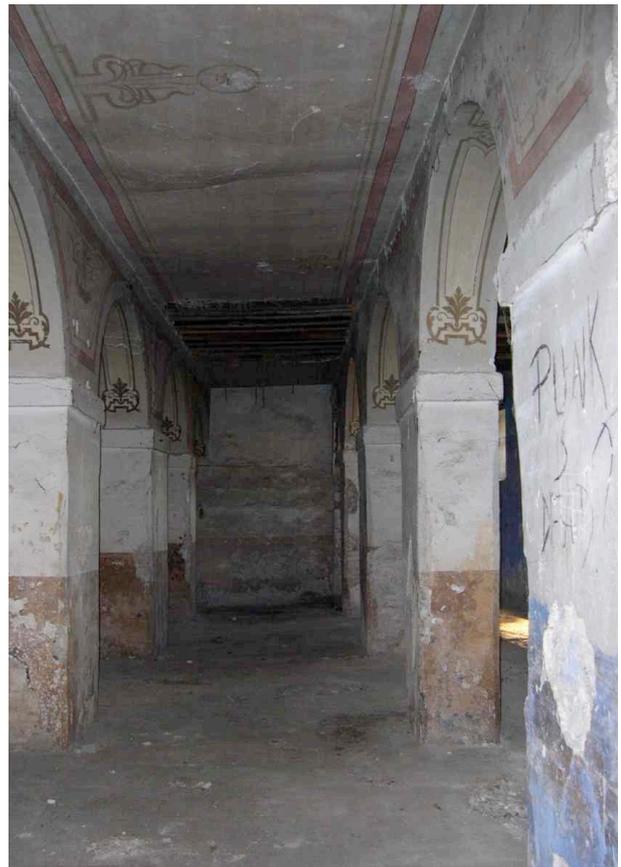


*Foto aerea del complesso monumentale*

*Si propongono di seguito alcune viste del complesso monumentale ante operam, significative per un inquadramento della complessità della struttura, della eterogeneità delle tipologie costruttive ivi presenti, nonché dello stato di fatto in cui esso versava prima dell'inizio della campagna di studio in oggetto.*



*Foto aerea del complesso monumentale*



*Foto aerea del complesso monumentale*



*Foto aerea del complesso monumentale*



*Foto aerea del complesso monumentale*



*Foto aerea del complesso monumentale*

*Il complesso dell'Anfiteatro è oggetto di una campagna di sperimentazione finanziata dalla Regione Umbria con i fondi della ricostruzione post-sismica del 1997 e condotta in collaborazione con il Politecnico di Milano. La campagna è mirata allo studio di tecniche innovative per il consolidamento degli edifici monumentali. In particolare il principio base della sperimentazione, e degli interventi successivamente, è quello di conferire alla struttura capacità dissipative dell'energia sismica, sfruttando materiali e tecniche di intervento ad alto grado di duttilità.*



*Sperimentazione dei dispositivi dissipatori su tavola vibrante*

*Gli studi condotti dal Politecnico di Milano, ed in particolare dallo staff guidato dal Prof. Duilio Benedetti, su modelli strutturali rappresentativi hanno fornito buoni risultati confermando l'esattezza delle ipotesi avanzate. Gli stessi risultati sono ora oggetto di una approfondita analisi progettuale, in corso di sviluppo, per ottimizzarne l'applicazione alle strutture reali.*

*Al momento lo Studio Associato di Ingegneria Capaldini si sta occupando dell'inserimento di dette nuove tipologie nel progetto strutturale definitivo del Monastero della Stella.*

## **PROGETTO PER IL RIPRISTINO STATICO E FUNZIONALE DELLA BASILICA PATRIARCALE E DEL COMPLESSO CONVENTUALE DI S.MARIA DEGLI ANGELI IN ASSISI**

*La Basilica Patriarcale di S. Maria degli Angeli in Assisi con all'interno l'autentica Porziuncola di S. Francesco insieme all'annesso convento rappresentano la casa madre dell'Ordine dei Frati Francescani Minori.*



*Vista del complesso Patriarcale con riqualificazione dell'area e nuovo parcheggio interrato*

*Il complesso monumentale è stato danneggiato dagli eventi sismici del 1997. I primi finanziamenti relativi alla ricostruzione post-sismica giunsero in concomitanza con quelli a sostegno degli eventi religiosi dell'anno Giubilare 2000. E' stato pertanto approntato un piano straordinario di interventi da realizzare in tempi ristretti (due anni) che prevedeva una radicale riqualificazione del complesso religioso sia per la parte storico-monumentale che per quella più recente relativa all'accoglienza.*

*I lavori hanno riguardato:*

- il recupero statico e funzionale della Basilica Patriarcale della Porziuncola di Assisi;*
- il recupero statico e funzionale di parte del Convento della Porziuncola di Assisi;*
- la riqualificazione delle strutture di accoglienza per la creazione di nuove strutture ricettive (200 posti letto)*
- la realizzazione di due parcheggi di cui uno pubblico a raso per complessivi 800 posti auto ed uno completamente interrato per altri 50 posti auto.*
- la realizzazione di una nuova " Casa delle Suore "*
- la riqualificazione della viabilità interna, del verde pubblico e del verde privato dell'intero complesso conventuale.*

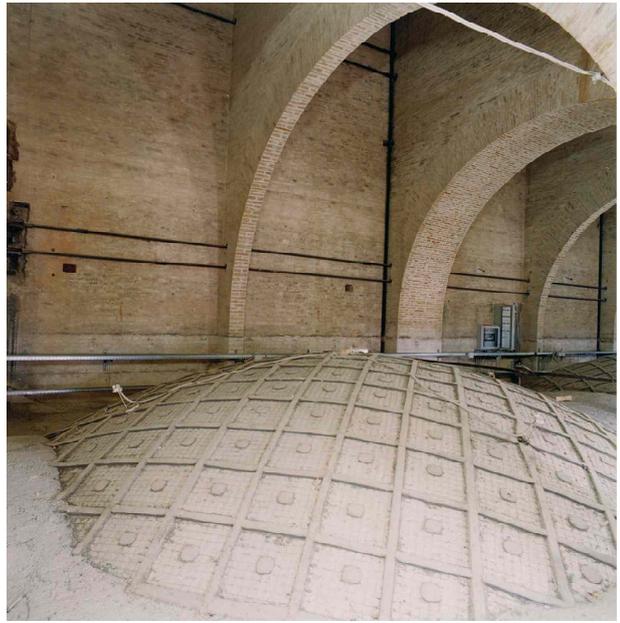
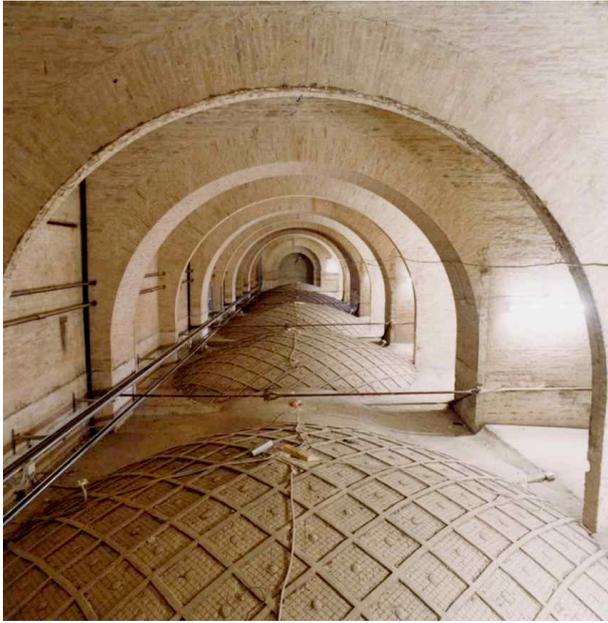


*Vista della navata centrale, con al centro la Porziuncola, durante le fasi lavorative*



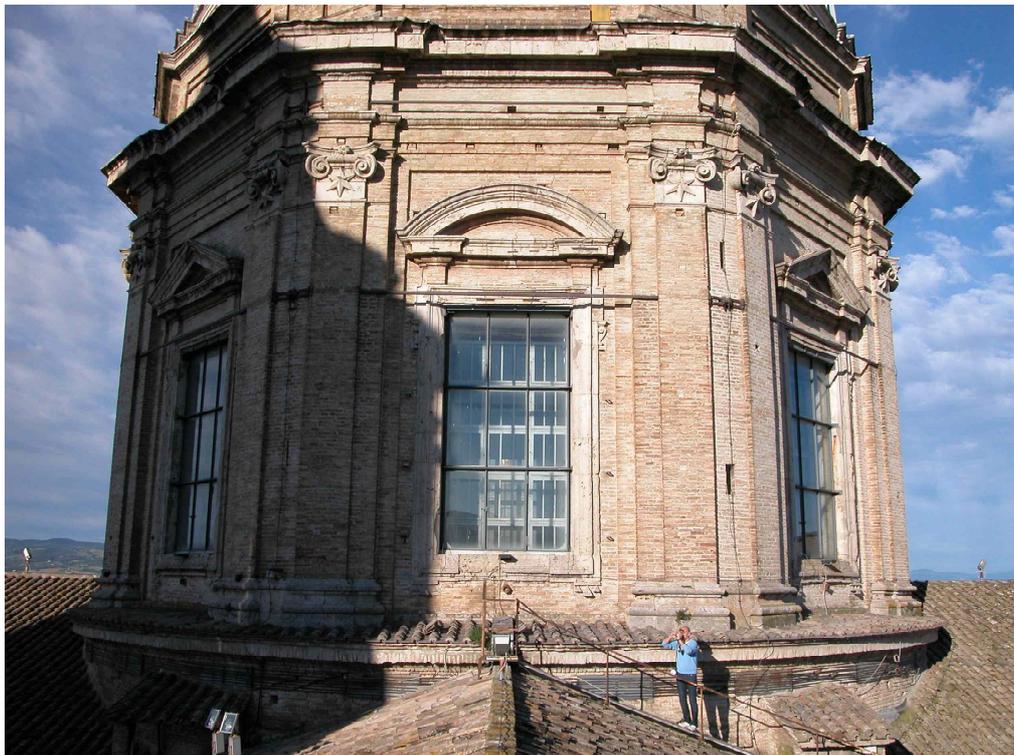
*Vista della Porziuncola, dopo le lavorazioni*

*Particolarmente impegnativi sono risultati i lavori di consolidamento delle volte delle tre navate della Basilica per l'enorme mole e complessità dell'organismo stesso nonché per la preziosità ed il valore storico-artistico che essa rappresenta.*

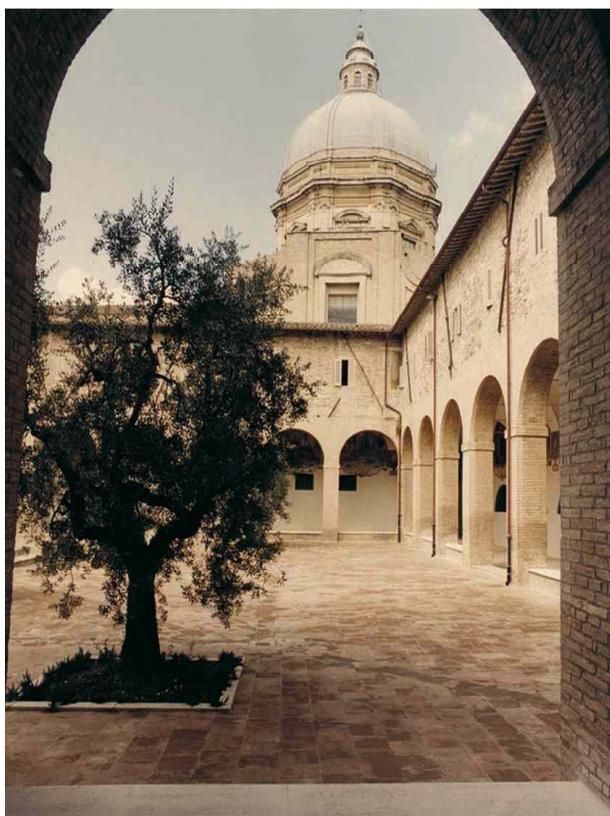


*Viste dell'estradosso delle volte delle navate laterali dopo il consolidamento*

*Nella redazione del progetto di ripristino statico della basilica si sperimentò l'applicazione su grandi edifici monumentali dell'analisi dinamica con elementi finiti tridimensionali (Brick) che permisero di indagare sul comportamento dell'edificio in caso di sisma (vedasi quanto riportato in appendice alla presente brochure.*



*Viste della cupola della Basilica*



*Viste del convento post-operam*

*L'importo dei lavori ammonta a circa 25 mln di euro. Lo Studio Associato di Ingegneria Capaldini si è occupato della progettazione strutturale, della conduzione contabile ed amministrativa e della direzione lavori. Lo studio di ripristino della Basilica Patriarcale della Porziuncola qui presentato è stato inoltre oggetto di pubblicazione sul quadrimestrale tecnico-scientifico "Ingegneria sismica", Pàtron editore, anno XVI n°2, maggio-agosto 1999, di cui si allega copia.*

## **RIPRISTINO STATICO E FUNZIONALE DEL CONVENTO DI S.FRANCESCO DEL MONTE IN MONTERIPIDO**

*A seguito degli eventi sismici umbro-marchigiani del 1997 il complesso religioso di S.Francesco del Monte in Monteripido, uno dei principali insediamenti perugini dei frati francescani minori, rimase seriamente danneggiato.*

*I lavori di ripristino sono stati volti al consolidamento delle murature mediante ricostituzione della originaria monoliticità dei maschi ed incatenamenti per contrastare cinematismi fuori del piano; al consolidamento delle volte ai diversi livelli interpiano; al rifacimento di parte delle coperture mediante capriate poggianti sulle solide murature perimetrali ed in grado di sostenere, oltre alla copertura, anche i carichi gravanti sulle sottostanti murature poste in falso sulle volte. Sono infine stati eseguiti consolidamenti in fondazione sull'ala Ovest del convento medesimo.*

*Ogni intervento di ripristino statico è stato studiato in accordo al valore storico, artistico e religioso che il complesso monastico riveste, anche in considerazione del suo essere annoverato tra i beni tutelati dalla Soprintendenza ai Beni Culturali e Paesaggistici dell'Umbria.*



*Vista dall'alto del convento di S. Francesco del Monte in Monteripido*



*Viste interne e esterne del complesso post operam*

*Lo Studio Associato di Ingegneria Capaldini si è occupato della progettazione strutturale, della conduzione contabile ed amministrativa e della direzione lavori*

## **RIPRISTINO STATICO E FUNZIONALE DEL CONVENTO DI MONTESANTO IN TODI**

*Il Convento sorse nel 1235 e rimase sotto il controllo dei Frati Domenicani fino al 1371, quando tutto il complesso fu abbattuto per costruire la Rocca di Todi. Solo nel 1448 il complesso ritornò ad essere luogo di pace e carità. In quell'anno vi si insediarono infatti i Frati Francescani Minori.*

*Nel 1997 il complesso religioso rimase danneggiato dagli eventi sismici che colpirono il territorio umbro-marchigiano.*

*I lavori sono stati volti al ripristino delle architetture preesistenti coniugando la sicurezza strutturale con il rispetto delle peculiarità storico-artistiche e sacrali dei luoghi, anche in accordo ai vincoli dettati dalla Soprintendenza ai Beni Culturali e Paesaggistici dell'Umbria.*

*Gli interventi sono volti al consolidamento delle murature mediante risarcitura delle lesioni e sostituzione delle porzioni più ammalorate con materiali compatibili ai preesistenti; al consolidamento delle volte ai diversi livelli interpiano con apposizione di nuove catene onde eliminarne le spinte; al rifacimento di parte delle coperture mediante capriate poggianti sulle solide murature perimetrali ed in grado di sostenere, oltre alla copertura, anche i carichi gravanti sulle sottostanti murature poste in falso sulle volte. Sono infine stati eseguiti consolidamenti in fondazione ove le stesse presentavano cedimenti.*



*Vista dall'alto del convento di Montesanto*



*Viste esterne post operam del complesso*



*Viste esterne post operam del complesso*



*Viste esterne post operam del complesso*



*Viste interne ed esterne post operam del Complesso*



*Fasi lavorative della nuova copertura del complesso con realizzazione della copertura provvisoria a protezione degli ambienti di pregio sottostanti*

*Lo Studio Associato di Ingegneria Capaldini si è occupato della progettazione strutturale, della conduzione contabile ed amministrativa e della direzione lavori.*

## **PROGETTO PER IL RIPRISTINO STATICO E FUNZIONALE DELLA CHIESA DI S. DOMENICO IN SPOLETO**

*Il complesso conventuale dei domenicani in Spoleto rappresenta uno dei primi insediamenti dei Frati Domenicani in Umbria e solo nell'ultimo secolo passato in gestione all'Ordine dei Frati Francescani.*

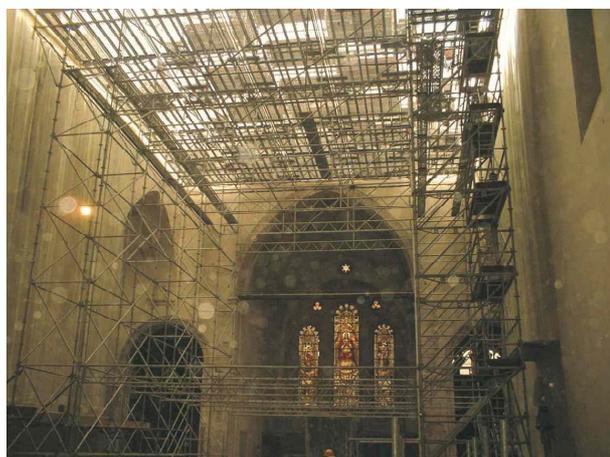
*Detto complesso conventuale è risultato fortemente danneggiato dal terremoto umbro-marchigiano del 1997. L'intervento è consistito prevalentemente nel rifacimento delle coperture e nel consolidamento degli orizzontamenti di sottotetto voltati e non, oltre al rinforzo strutturale delle strutture in elevazione, intervento tutto reso particolarmente difficile per la estesa presenza di superfici affrescate.*



*Fasi di montaggio delle nuove capriate*



*Fasi di montaggio delle nuove capriate*



*Fasi di montaggio delle nuove capriate*

*Le foto riportate rappresentano le fasi di ricostruzione della copertura prevista integralmente in legno lamellare. Il rifacimento, mirando anche all'ottenimento di falde opportunamente coibentate e ventilate oltre che al ripristino statico, prevede l'impiego del solo legno senza alcuna contaminazione di parti in c.a. od altro materiale estraneo agli schemi strutturali classici.*

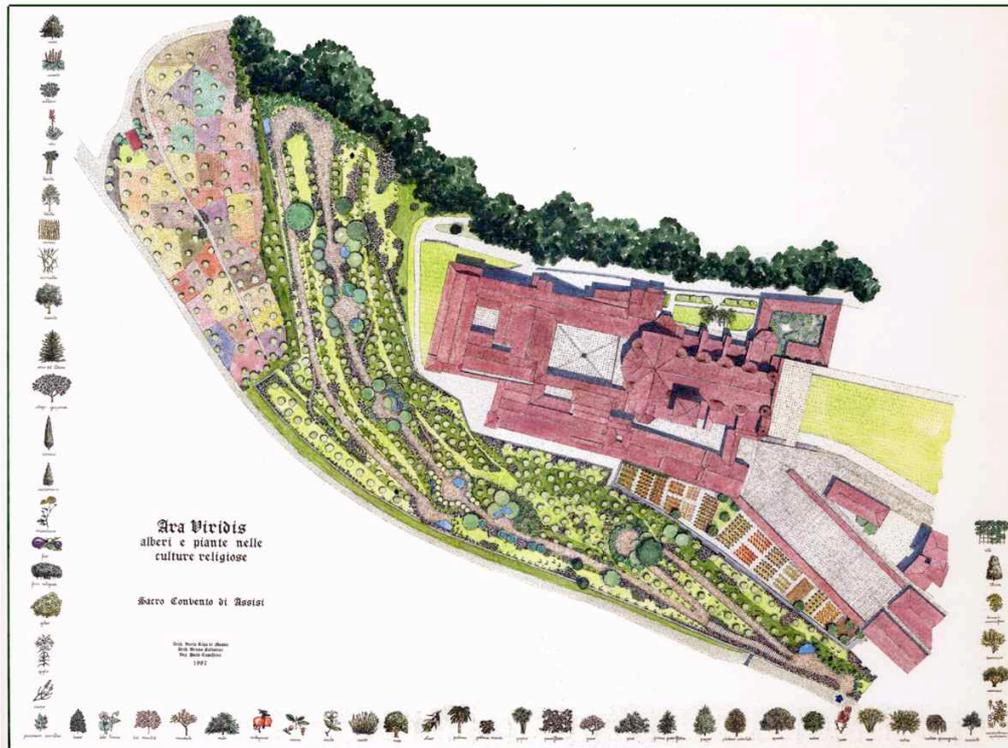


*Foto dopo l'esecuzione dell'opera*

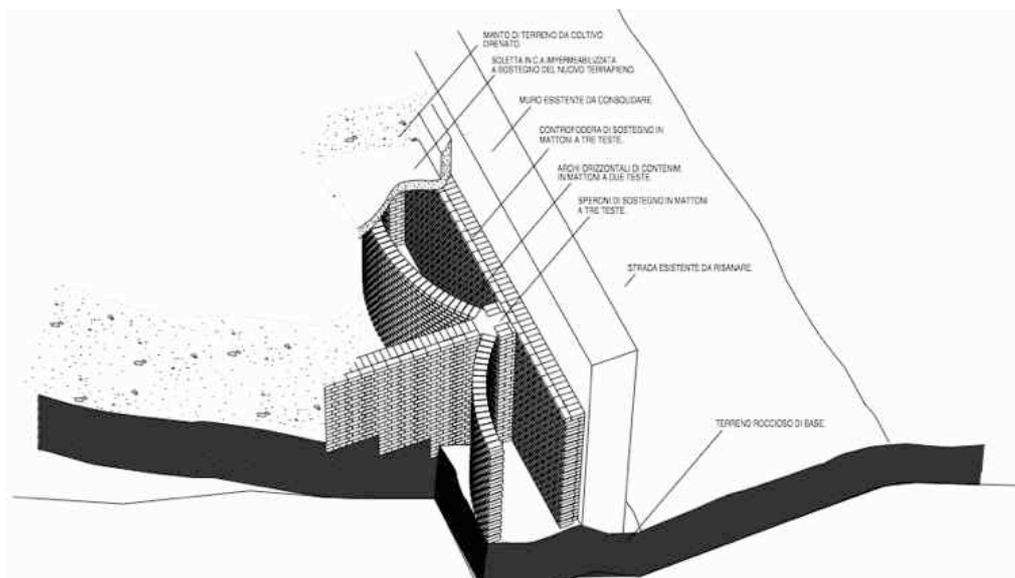
*L'importo dei lavori, oramai ultimati, è stato di circa 2 mln di euro, lo Studio Associato di Ingegneria Capaldini si è occupato della progettazione strutturale, della conduzione contabile ed amministrativa e della direzione lavori.*

## PROGETTO DI RIQUALIFICAZIONE DEGLI ANTICHI ORTI DEL SACRO CONVENTO DI ASSISI

Nell'ambito dell'intervento di riqualificazione degli antichi orti del Sacro Convento di San Francesco in Assisi si è individuata una tecnologia di consolidamento delle antiche mura di contenimento che li perimetrano a valle avente particolare valenza ambientale e curabilità dell'opera medesima. L'efficacia strutturale è basata sulla resistenza a taglio di grandi setti murari di mattoni pieni oltrechè sull'effetto arco dei muri di paramento veri e propri che ad essi si ancorano.



Planimetria di progetto antichi orti



Ipotesi di consolidamento del muro

Lo Studio Associato di Ingegneria Capaldini si è occupato della progettazione strutturale e dei computi amministrativi.

## **RISTRUTTURAZIONE CON ADEGUAMENTO SISMICO DELLA TORRE DI ALMONTE IN FRONTIGNANO DI TODI**

*Trattasi del progetto per la ristrutturazione di un complesso monumentale posto sui colli di Todi; esso risulta costituita da una antica torre di avvistamento di epoca medioevale ora adibita residenza privata. Il progetto prevedeva il ripristino statico e funzionale della totalità dell' edificio fortemente danneggiato e in stato di reale e incombente pericolo di crollo sia per la sua vetustà che a causa degli eventi sismici. L'intervento è stato pertanto molto radicale pur rispettando scrupolosamente la forma e le strutture di pregio storico artistico che la caratterizzavano.*



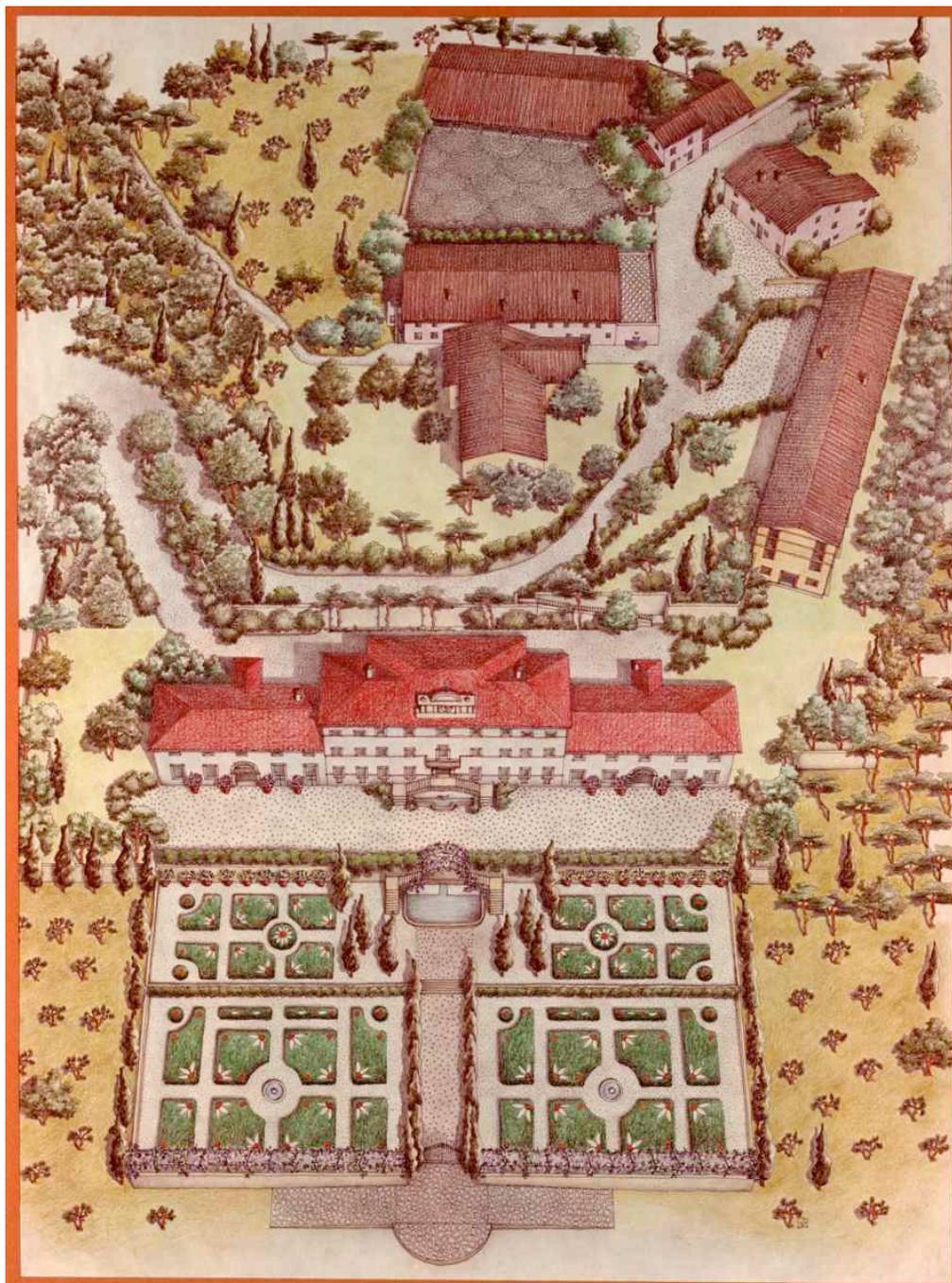
*Foto dopo l'esecuzione dell'opera*

*Lo studio Capaldini si è occupato dell'intero aspetto strutturale oltre che di quello amministrativo e contabile.*

**RISTRUTTURAZIONE CON ADEGUAMENTO ANTISISMICO DELLA VILLA DEL PISCHIELLO IN PASSIGNANO SUL TRASIMENO (PG)**

*Trattasi del progetto per la ristrutturazione con cambio di destinazione d'uso di un complesso monumentale del XVII posto sui colli che bordano a Nord il lago Trasimeno; esso risultava costituito dalla villa padronale e da una serie di case coloniche asservite al borgo medesimo.*

*Il progetto prevedeva la completa ristrutturazione della totalità degli edifici che, dal punto di vista statico significava la rivisitazione della struttura in chiave antisismica, oltre la realizzazione di nuovi consistenti volumi interrati.*



*Lo studio Capaldini si è occupato dell'intero aspetto strutturale oltre che di quello amministrativo e contabile.*

## **ASSE VIARIO MARCHE-UMBRIA E QUADRILATERO DI PENETRAZIONE INTERNA - MAXI LOTTO N°1-**

*Il Progetto Quadrilatero Marche Umbria prevede la realizzazione di opere infrastrutturali viarie (i cui assi rappresentano idealmente i quattro lati di un quadrilatero) in grado di offrire un veloce ed agevole collegamento stradale tra le due regioni.*

*Relativamente a tale progetto, il Maxi Lotto n° 1 prevede il completamento della direttrice S.S. 77" Val di Chienti" Civitanova Marche – Foligno, tramite la realizzazione del tratto Collesentino II – Foligno, oltre a interventi di completamento e di collegamento alla viabilità esistente.*



*Planimetria di inquadramento dell'intervento*

*L'opera prevede la realizzazione di tratti di superficie connessi ad estesi collegamenti in galleria, sia naturale che artificiale, in grado di sottopassare l'Appennino Umbro-Marchigiano i cui valichi ora rappresentano l'unica via di comunicazione su gomma tra le due regioni.*



*Galleria GN01 Collesentino – Pontelatave - Scavo del fronte con martello demolitore*



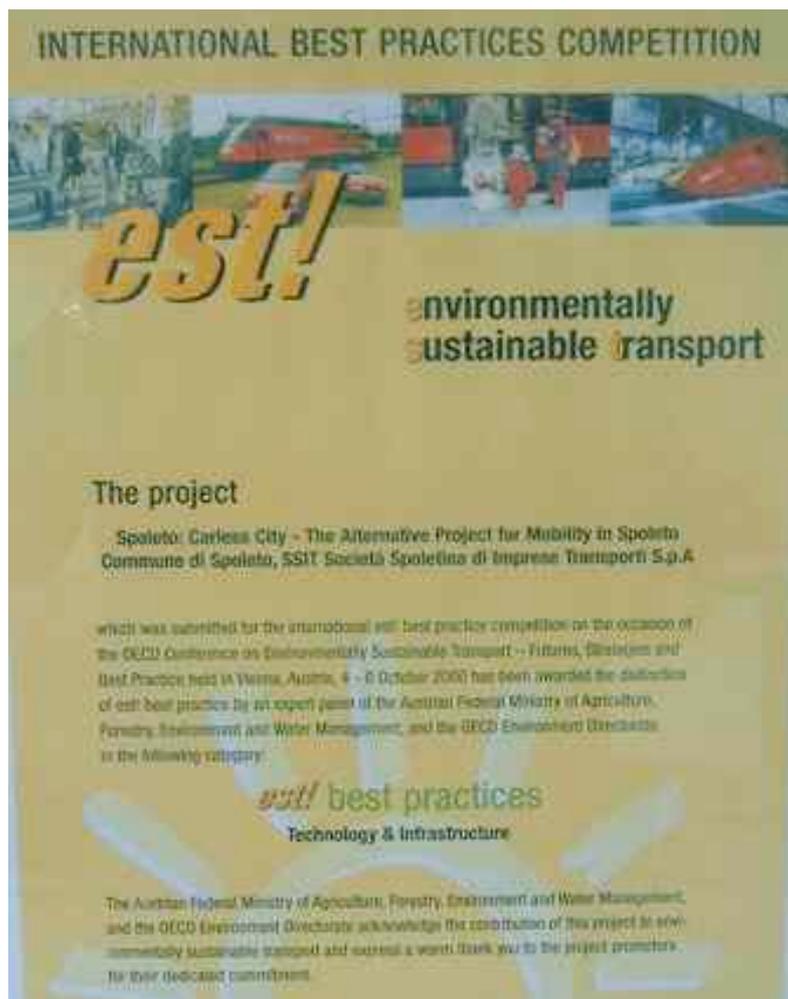
*Galleria GN01 Collesentino – Pontelatrive - Scavo del fronte con esplosivo*

*Dei lavori in oggetto lo Studio Associato di Ingegneria Capaldini è stato incaricato della Direzione Lavori Operativa esperta in opere geotecniche/gallerie.*

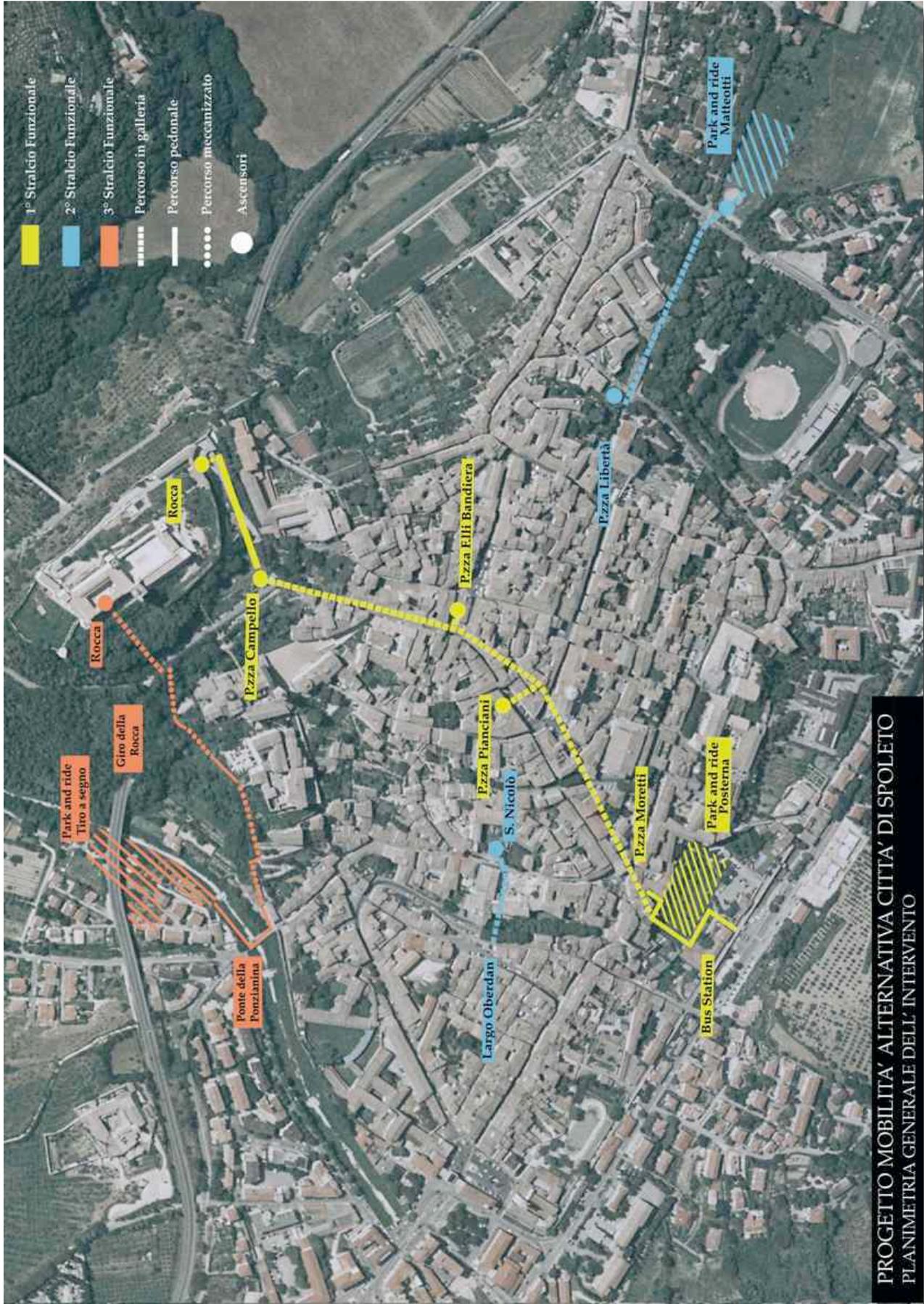
## **PROGETTO DI MOBILITÀ ALTERNATIVA PER SPOLETO CITTÀ APERTA ALL'UOMO OVVERO CITTÀ SENZA AUTO**

*La città di Spoleto (PG) ha deciso di chiudere totalmente il suo centro storico al traffico veicolare. Si è accinta pertanto alla realizzazione di tre grandi parcheggi interrati o seminterrati (oltre 1.000 posti auto) nelle immediate vicinanze dell'area su cui interdire il traffico veicolare e tre percorsi pedonali sotterranei meccanizzati (suddivisi in tre stralci funzionali) che, bypassando da sotto l'abitato e tutto il suo strato di terreno antropizzato, consentano il collegamento tra i parcheggi e le aree più strategiche della città, compresa la Rocca Albornoziana posta sulla sommità dell'impervio colle di S. Elia.*

*Il progetto della "Mobilità Alternativa per Spoleto Città Aperta all'Uomo" ha ottenuto il riconoscimento internazionale di "EST! BEST PRACTICES" da parte del O.E.C.D. Organisation for Economics Co-operation Development in occasione della Conference on Environmentally Sustainable Transport – Futures Strategies and Best Practice – Vienna 2000.*



*Premio "Est! Best Practices"*



PROGETTO MOBILITA' ALTERNATIVA CITTÀ DI SPOLETO  
 PLANIMETRIA GENERALE DELL' INTERVENTO

### **1° stralcio funzionale**

*(tracciato giallo planimetria generale)*

*Lo stralcio è composto da un parcheggio multipiano seminterrato per 450 posti auto alla cui sommità si ritrova una piazzetta con verde attrezzato e piccoli negozi*



*Paratia di sostegno del terrapieno a monte del parcheggio multipiano*

*e da un percorso meccanizzato di 620mt (munito di marciapiedi mobili in entrambi i sensi di percorrenza) in galleria naturale che dal suddetto parcheggio, sottopassando l'intero abitato ad una profondità variabile dai 20 ai 30 mt, consente di guadagnare agevolmente quota conformandosi all'acclività della Città e di emergere, per il tramite di appositi pozzi di ascensione muniti di due ascensori da 20 persone cadauno, nei punti più strategici della città.*

*Dalla stazione bus posta fuori della cerchia di mura medioevali, ma a poca distanza dallo stesso parcheggio inoltre, si sviluppa un ulteriore percorso meccanizzato di superficie con tre coppie di scale mobili che, raggiungendo prima la copertura del parcheggio e poi p.zza Moretti, consente un alternativo agevole raggiungimento del centro della Città.*



*Fasi di scavo della galleria naturale*



*Fasi di ultimazione della galleria naturale*

## **2° stralcio funzionale**

*(tracciato blu planimetria generale)*

*Lo stralcio prevede la realizzazione di un parcheggio pluripiano completamente interrato (tre piani per complessivi 450 posti auto) in quanto sito in una zona di grande pregio ambientale e paesaggistico,*



*Vista interna del parcheggio a lavori ultimati*

*e di un percorso meccanizzato in galleria artificiale posto sotto Viale Matteotti, che collega il parcheggio stesso con la porzione posta più a sud del centro storico. Anche detto percorso è attrezzato con marciapiedi mobili in entrambe i sensi di marcia oltre ad ascensori e scale fisse.*



*Vista del percorso meccanizzato a lavori ultimati*



*Vista del percorso meccanizzato a lavori ultimati*

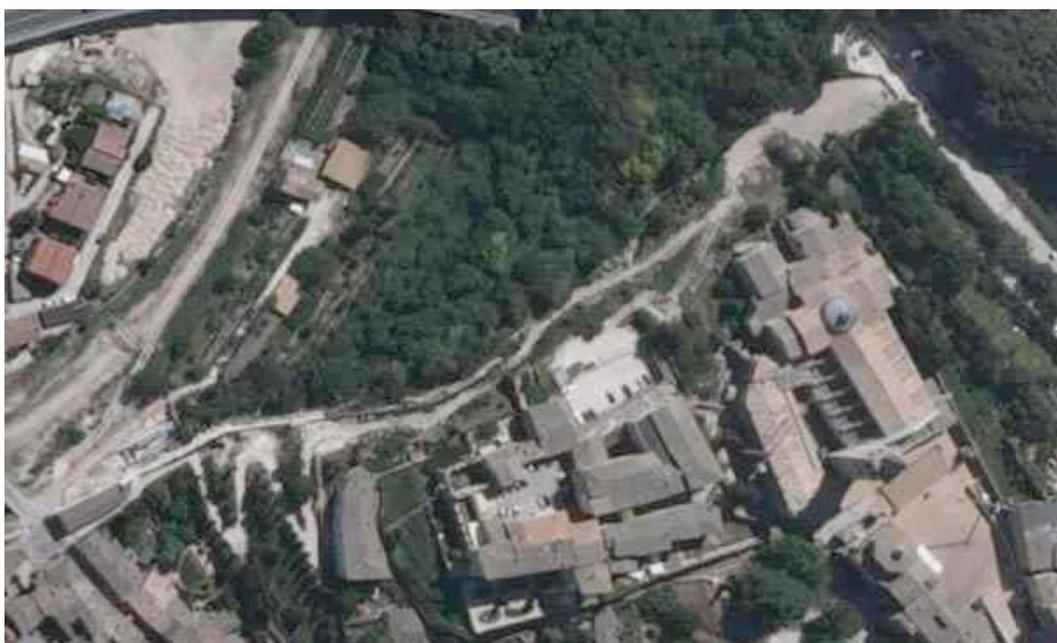
### **3° stralcio funzionale**

(tracciato rosso planimetria generale)

*Il lotto di lavori in questione prevede la realizzazione di un parcheggio a raso per auto, bus turistici e camper ed un percorso meccanizzato di superficie con otto coppie di scale mobili che collegano il parcheggio stesso con la sommità del versante nord della città passando dietro gli orti della Cattedrale per un impervio percorso segnato dalle mura medievali. Il progetto prevede inoltre la realizzazione di una ulteriore galleria naturale sotto il colle di S. Elia ed un pozzo che dalla quota raggiunta dal percorso meccanizzato di cui sopra, raggiunge direttamente l'interno della Rocca Albornoziana. Il pozzo del diametro di 10 mt e della profondità di 40 mt sarà munito di tre ascensori veloci della portata di 20 persone cadauno, oltre che da un sistema di scale di sicurezza.*



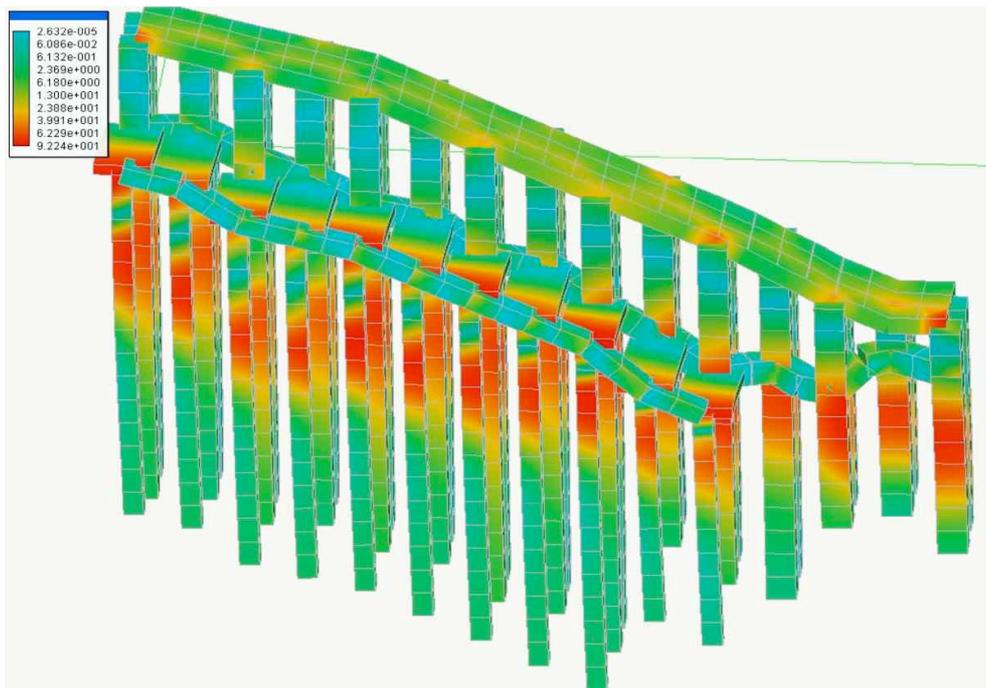
*Planimetria tratto scale mobili e galleria artificiale*







*Ricostruzione tridimensionale del percorso meccanizzato*

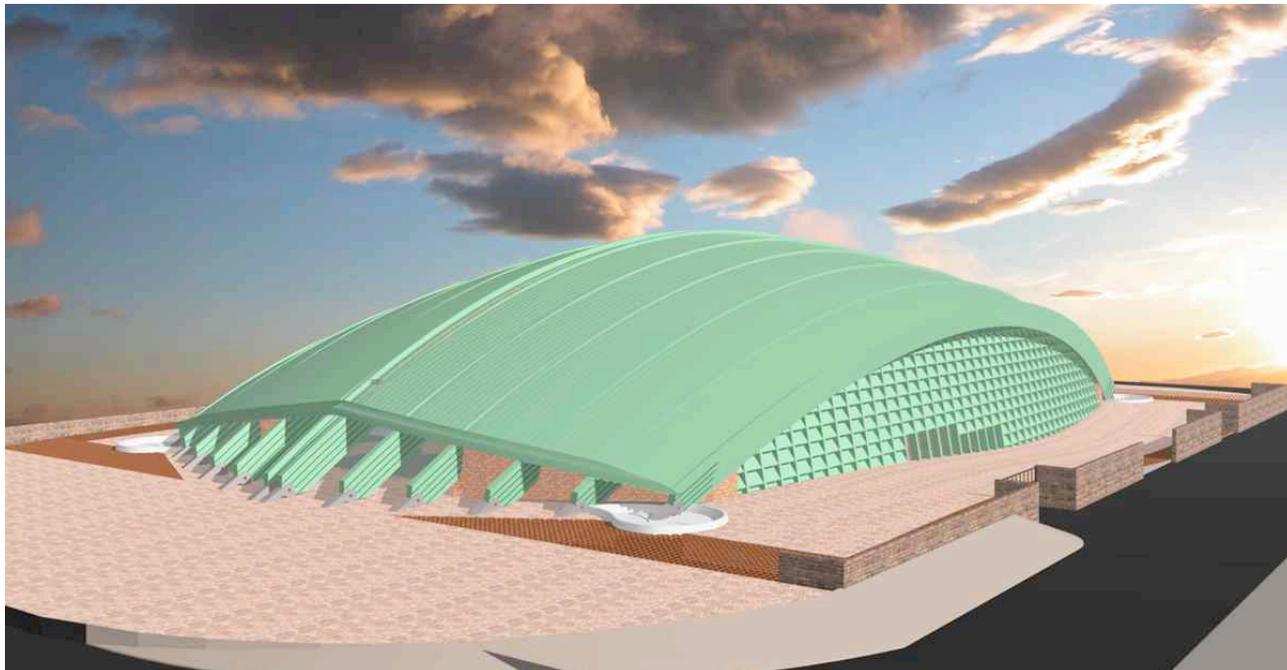


*Modellazione agli elementi finiti elastoplastici in analisi non lineare della paratia ai piedi del Duomo di Spoleto*

*Degli interi tre stralci funzionali del progetto di mobilità alternativa, lo Studio Associato di Ingegneria Capaldini si occupa della progettazione strutturale (ad esclusione della galleria del 1° stralcio funzionale), della conduzione contabile ed amministrativa e della direzione lavori; l'importo complessivo dei lavori supera i 50 mln di euro.*

## **PROGETTO PER LA REALIZZAZIONE DI UNA SALA POLIVALENTE IN S. MARIA DEGLI ANGELI DI ASSISI**

*Nel 1998 la Provincia Serafica dell'Ordine dei Frati Minori Francescani commissionò lo studio per una sala polivalente con sottostante parcheggio interrato da asservire al santuario di S. Maria degli Angeli per i grandi eventi religiosi.*



*Rappresentazione virtuale*

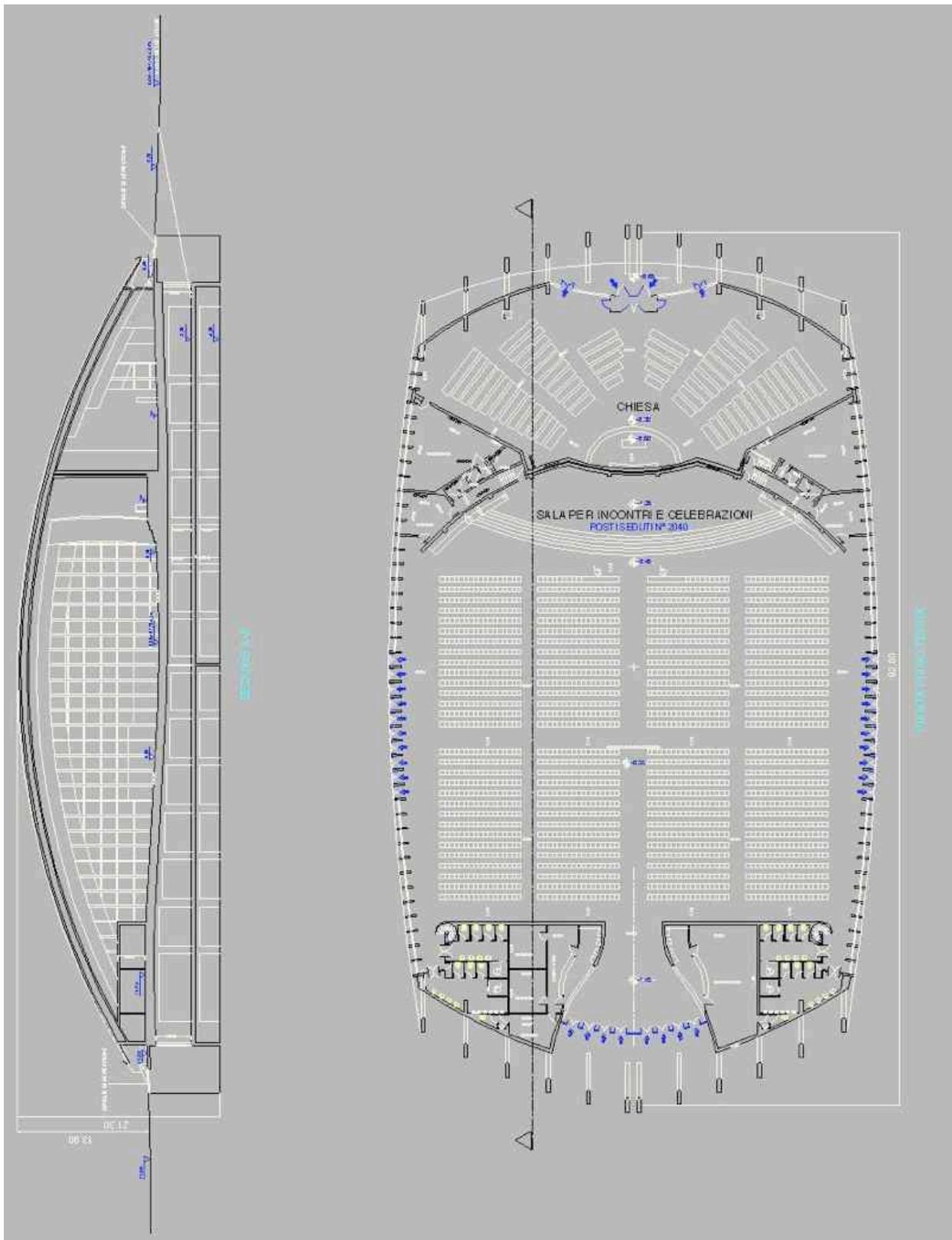
*La progettazione fu spinta fino al livello di esecutività comprendendo il dimensionamento delle strutture in c.a. e lignee.*

*Trattasi di un edificio costituito da due piani interrati di parcheggio da 500 posti auto e da una sala posta al piano terra capace di ospitare circa 2000 persone oltre ad una cappella per oltre 400 posti.*



*Rappresentazione virtuale*

*Le strutture di copertura sono costituite da grandi archi in legno lamellare con luce libera fino a 92 mt interconnessi con una orditura secondaria trasversale con funzione di controventamento.*



Planimetria e sezione

*L'appoggio a terra di dette travi è costituito da apposita struttura in acciaio opportunamente sagomata e dimensionata in modo da fungere da cerniera*

*Il costo dell'intera opera era stimato in circa 15 mln di euro. Lo Studio Associato di Ingegneria Capaldini si occupò della progettazione strutturale e dei computi estimativi.*

## **REALIZZAZIONE DI UNA LOTTIZZAZIONE RESIDENZIALE CON EDIFICI PLURIFAMILIARI**

*L'intervento riguarda le opere di urbanizzazione e la realizzazione di edifici plurifamiliari, in una nuova lottizzazione in loc. La Bruna di Castel Ritaldi (PG), per un totale di 51 unità abitative residenziali. Gli edifici sono realizzati con struttura antisismica in c.a. e dotati di piano interrato adibito a parcheggi.*



*Vista di insieme della lottizzazione in costruzione*



*Immagini di alcuni edifici in via di ultimazione*

*Lo Studio Associato di Ingegneria Capaldini si è occupato della progettazione architettonica, della progettazione strutturale, della qualificazione energetica, della conduzione amministrativa e della direzione lavori sia delle opere di urbanizzazione che degli edifici.*

## **REALIZZAZIONE DI UNA LOTTIZZAZIONE RESIDENZIALE CON VILLETTE BIFAMILIARI**

*L'intervento riguarda le opere di urbanizzazione e la realizzazione di villette bifamiliari, in una nuova lottizzazione in loc. La Bruna di Castel Ritaldi (PG), per un totale di 28 unità abitative. Tutti gli edifici sono realizzati con struttura portante antisismica in c.a.*



*Vista di insieme della lottizzazione*



*Immagini di alcune villette e della viabilità interna di lottizzazione*

*Lo Studio Associato di Ingegneria Capaldini si è occupato della progettazione architettonica, della progettazione strutturale, della conduzione amministrativa e della direzione lavori sia delle opere di urbanizzazione che degli edifici.*



## **REALIZZAZIONE DI EDIFICI PER ATTIVITA' COMMERCIALI E CIVILE ABITAZIONE**

*L'intervento riguarda le opere di realizzazione di n°3 edifici adibiti ad attività commerciali e/o civile abitazione in loc. Collepepe di Collazzone (PG). Tutti gli edifici sono realizzati con struttura portante antisismica in c.a. Gli spazi adibiti ad uso commerciale presentano una copertura in legno lamellare con luce pari a 14 metri.*



*Edificio ad uso commerciale e residenziale*



*Edifici ad uso residenziale*

*Lo Studio Associato di Ingegneria Capaldini si è occupato della progettazione strutturale degli edifici.*

## **REALIZZAZIONE DI UNA LOTTIZZAZIONE RESIDENZIALE CON VILLETTE UNIFAMILIARI E BIFAMILIARI**

*L'intervento riguarda le opere di urbanizzazione e la realizzazione di villette unifamiliari e bifamiliari, in una nuova lottizzazione in voc. Il Giglio nel comune di Corciano (PG), per un totale di 26 unità abitative. Tutti gli edifici sono realizzati con struttura portante antisismica in c.a.*



*Rappresentazione virtuale della lottizzazione*



*Rappresentazione virtuale di due edifici*

*Lo Studio Associato di Ingegneria Capaldini si occupa della progettazione architettonica, della progettazione strutturale, della conduzione amministrativa, della qualificazione energetica e della direzione lavori sia delle opere di urbanizzazione che degli edifici.*

## **NUOVO ASILO COMUNALE DELLA CITTÀ DI MASSA MARTANA (PG)**

*Trattasi di un nuovo edificio destinato ad ospitare alcune sezioni della scuola materna della Città. Esso è composto da un unico piano terreno avente struttura mista c.a. legno lamellare; data la destinazione d'uso dell'edificio e la collocazione dello stesso in area sismica, fu particolarmente curato il suo aspetto strutturale.*



*Rappresentazione virtuale edificio*



*Rappresentazione virtuale edificio*

*Lo studio Capaldini si è occupato dell'intero aspetto strutturale oltre che di quello amministrativo e contabile.*

**RIPARAZIONE CON MIGLIORAMENTO SISMICO DI UN CONDOMINIO AQUILANO DANNEGGIATO DAL SISMA DEL 06/04/2009 CON UTILIZZO DI DISSIPATORI SISMICI VISCOSI**

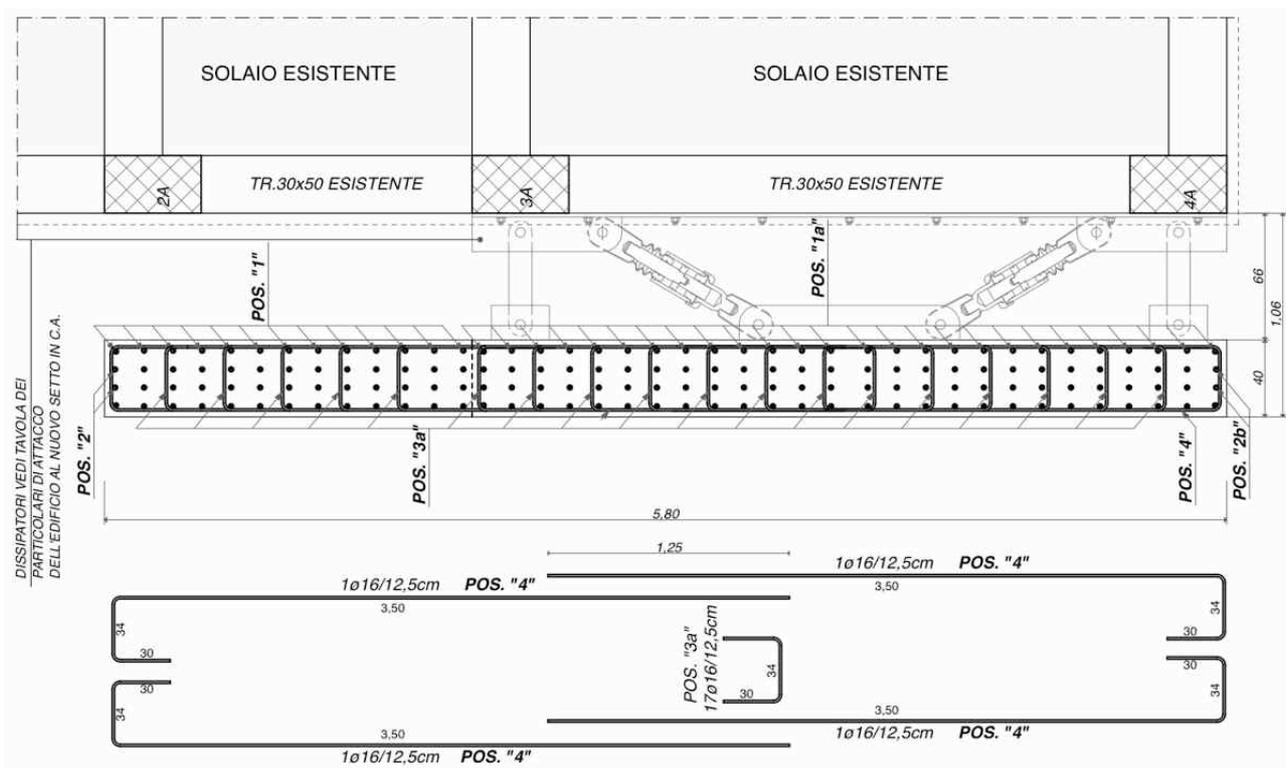
L'edificio sito nella prima periferia del capoluogo abruzzese, è stato gravemente danneggiato dal sisma del 2009, la sua particolare conformazione planimetrica ad "L" ha infatti contribuito ad accrescere gli effetti torsionali del sisma producendo un deterioramento strutturale particolarmente concentrato alle estremità.

L'intervento di ripristino è mirato particolarmente al contrasto di detta anomalia oltre che al rinforzo della capacità globale di resistenza alle azioni sismiche. Ciò è stato conseguito anche con l'impiego di particolari sistemi di smorzamento viscoso capaci di attenuare l'azione disgregatrice del sisma.

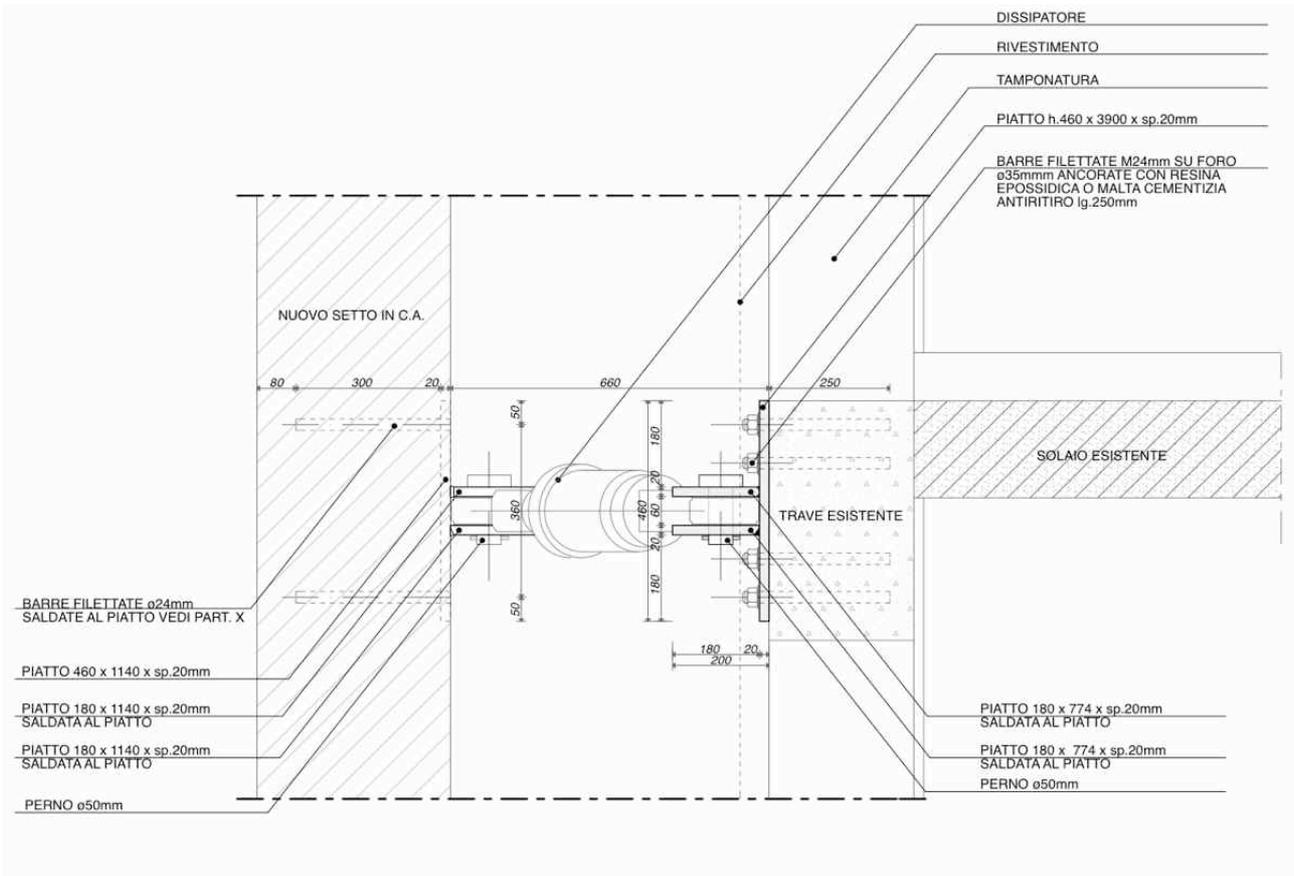
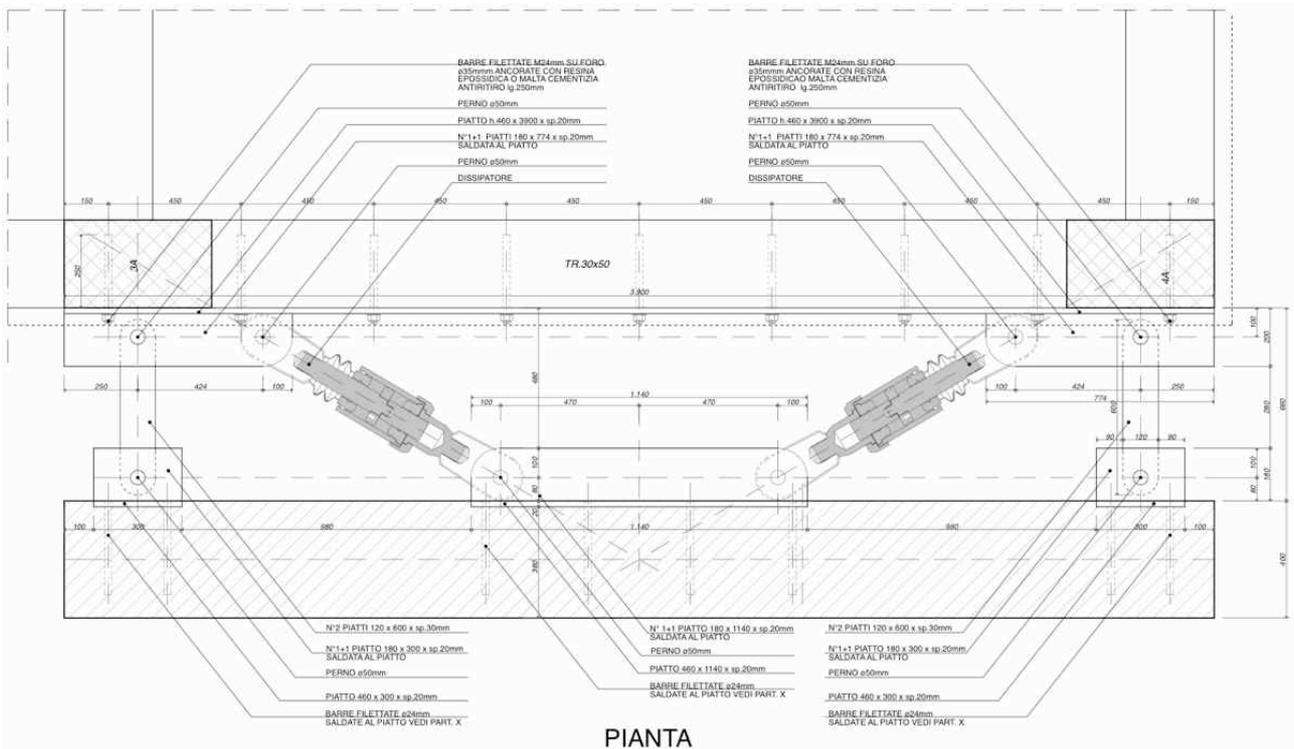
Lo studio Capaldini si è occupato del Rilievo , Progettazione, Computi metrici , Direzione lavori , Coordinamento della Sicurezza , Contabilità dei Lavori , Conduzione Amministrativa .



Rappresentazione virtuale



Pianta tipo dell'intervento



**SEZIONE TIPO**  
*Particolari costruttivi dei sistemi di smorzamento*

**RIPARAZIONE CON MIGLIORAMENTO SISMICO DI UN EDIFICIO AQUILANO DANNEGGIATO DAL SISMA DEL 06.4.2009  
SOTTOPOSTO A VINCOLO DIRETTO L.1089/39**

*L'edificio sito nell'immediata adiacenza del centro storico di L'Aquila, è stato gravemente danneggiato dal sisma del 2009, la sua particolare vulnerabilità era dovuta oltre che ad una conformazione poco felice di alcuni organismi strutturali, anche da una scarsa consistenza materica della struttura in elevazione.*

*L'intervento di ripristino è mirato, pur nel rispetto scrupoloso e nella salvaguardia delle sue valenze storico- artistiche, ad un efficace risanamento strutturale nel suo complesso, oltre alla eliminazione di particolari carenze strutturali che ne pregiudicavano la resistenza alle azioni di tipo sismico.*

*Lo studio Capaldini si è occupato del Rilievo , Progettazione Strutturale, Computi metrici , Direzione lavori Strutturale .*

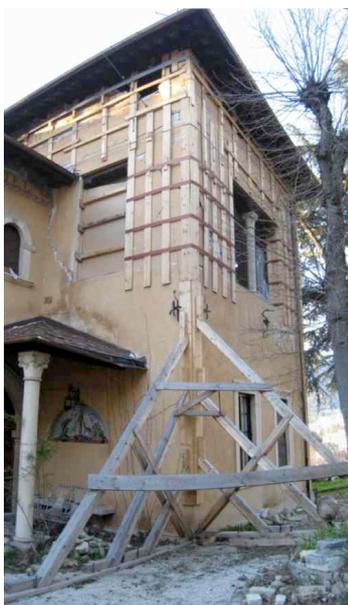
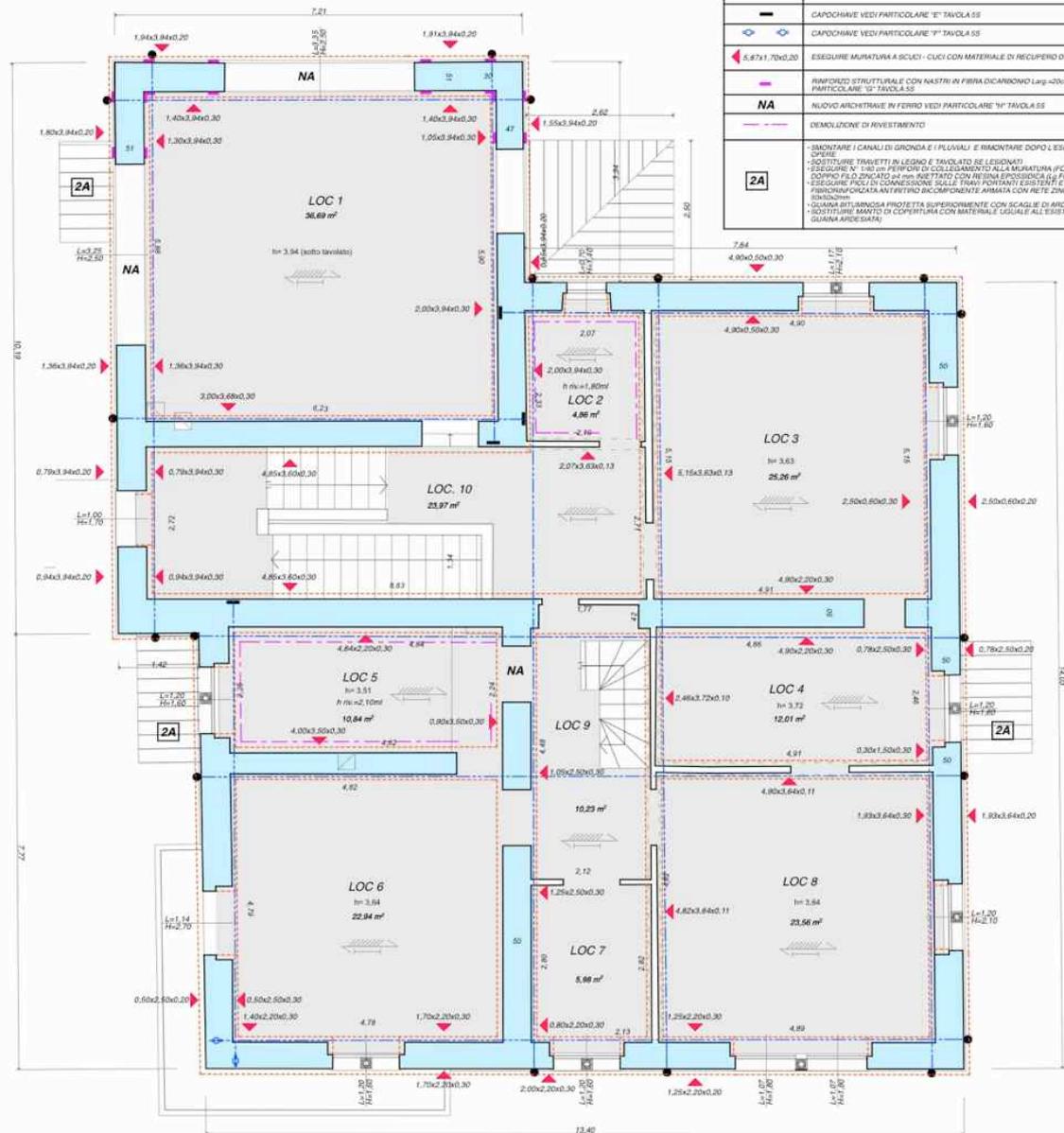


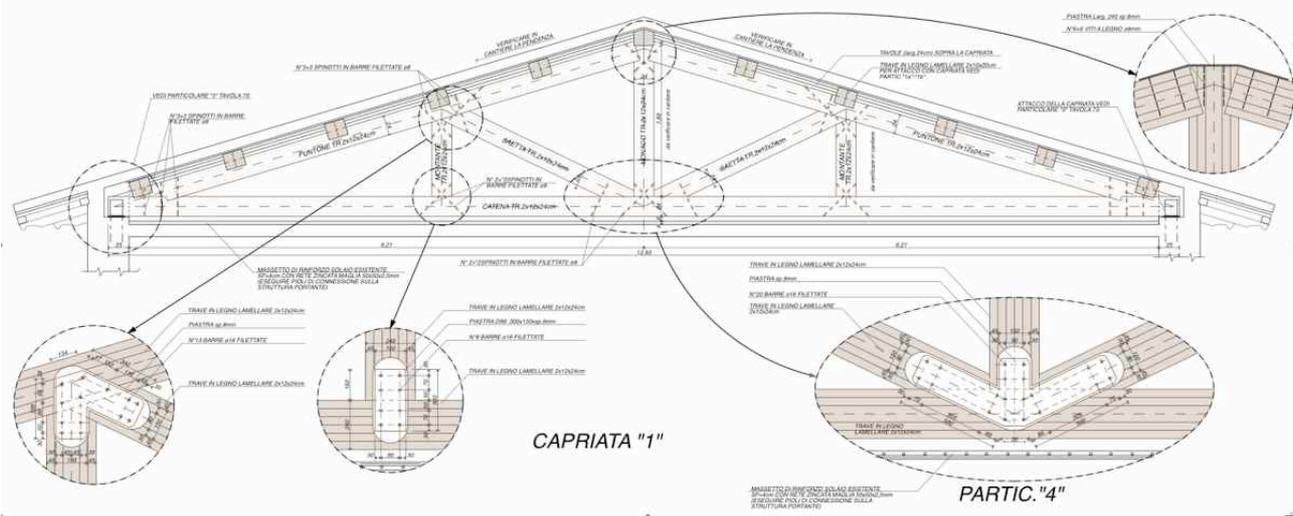
Foto dell'edificio in oggetto

### LEGENDA

	ESEGUIRE INFEZIONI SULLE MURATURE ESISTENTI CON MALTA CEMENTIZIA A RETINO COMPENSATO MEDIANTE N° 4 FORI AL mq
	RINFORZO DEI SOLAI IN ACCIAIO E LATERIZIO CON NUOVA CALDAIA 800x400x1000, ARMATA CON RETE ELETTRICIZZATA ZINCATO A MANICA 120x120x10mm PERI DI CONNESSIONE SULLA STRUTTURA PORTANTE E N° 100mm PERFORICI SUL PERIMETRO FONDO 200mm BARRE Ø10mm ZINCATO ARMATO CON MALTA CEMENTIZIA (g.BARRA 100x100x10) VEDI PARTICOLARE "E" TAVOLA 45
	INTONACO RETINATO VEDI PARTICOLARE "E" TAVOLA 45
	CATENA CON PIATTO IN ACCIAIO ZINCATO DIM. 80x60mm IN CORRESPONDENZA DEL MASSETTO DEI SOLAI
	PUNTELLATURA DEI MURI
	CAPOCHAVE VEDI PARTICOLARE "D" TAVOLA 45
	CAPOCHAVE VEDI PARTICOLARE "E" TAVOLA 45
	CAPOCHAVE VEDI PARTICOLARE "F" TAVOLA 45
	ESEGUIRE MURATURA A SCACI - CUCI CON MATERIALE DI RECUPERO DALL'ESISTENTE
	RINFORZO STRUTTURALE CON NASTRI IN FIBRA DI CARBONIO Larg. 20cm VEDI PARTICOLARE "G" TAVOLA 45
	NUOVO ARCHITRAVE IN FERRO VEDI PARTICOLARE "H" TAVOLA 45
	DEMOLIZIONE DI RIVESTIMENTI
	<ul style="list-style-type: none"> <li>DEMONTARE I CANALI DI DORADA E I PULVILI E RIMONTARE DOPO L'ESECUZIONE DELLE OPERE</li> <li>SOTTITUIRE TRAVETTI IN LEGNO E TAVOLATO SE LEGONATI</li> <li>ESEGUIRE N° 100mm PERFORI DI COLLEGAMENTO ALLA MURATURA (FONDO Ø16mm) CON COPRIFILI ZINCATI DI 40mm PERIATO CON RESINA EPOSSICA (L. FONDO 200mm)</li> <li>ESEGUIRE PIGLI DI CONNESSIONE SULLE TRAVI PORTANTI ESISTENTI E CALDAIA IN MALTA FIBROREINFORCATA ANTI-RIFLESSO RACCOMANDATA ARMATA CON RETE ZINCATO MANICA Ø10x100x10mm</li> <li>COLGARE BATTANCONA PROTETTA SUPERIORMENTE CON SCAGLIE DI ARDESIA Sp=4,5mm</li> <li>SOTTITUIRE MASSE DI COPERTURA CON MATERIALE UGUALE ALL'ESISTENTE (TEGOLE IN QUARNA ARDE SARA)</li> </ul>



Pianta tipo dell'intervento



Particolare costruttivo

## **CARENATURA DEI SILOS ESISTENTI E ADEGUAMENTO IMPIANTISTICO-STRUTTURALE DI ALCUNI EDIFICI DI UN COMPLESSO INDUSTRIALE SITO IN GIANO DELL'UMBRIA**

*Il progetto prevedeva la carenatura su tre lati di un gruppo di silos esistenti. L'involucro strutturale ha una altezza da terra di oltre 30 mt e deve quindi assorbire una considerevole spinta del vento. Per esigenze logistiche l'intera struttura è stata assemblata fuori opera ed eretta con l'ausilio di due potenti gru semoventi.*

*Lo studio Capaldini si è occupato del Rilievo , Progettazione, Computi metrici , Direzione lavori , Contabilità dei Lavori .*



*Foto in fase di esecuzione*

## REALIZZAZIONE DI UN RIPETITORE RADIO-TV SITO IN LOC. MONTE MARTANO

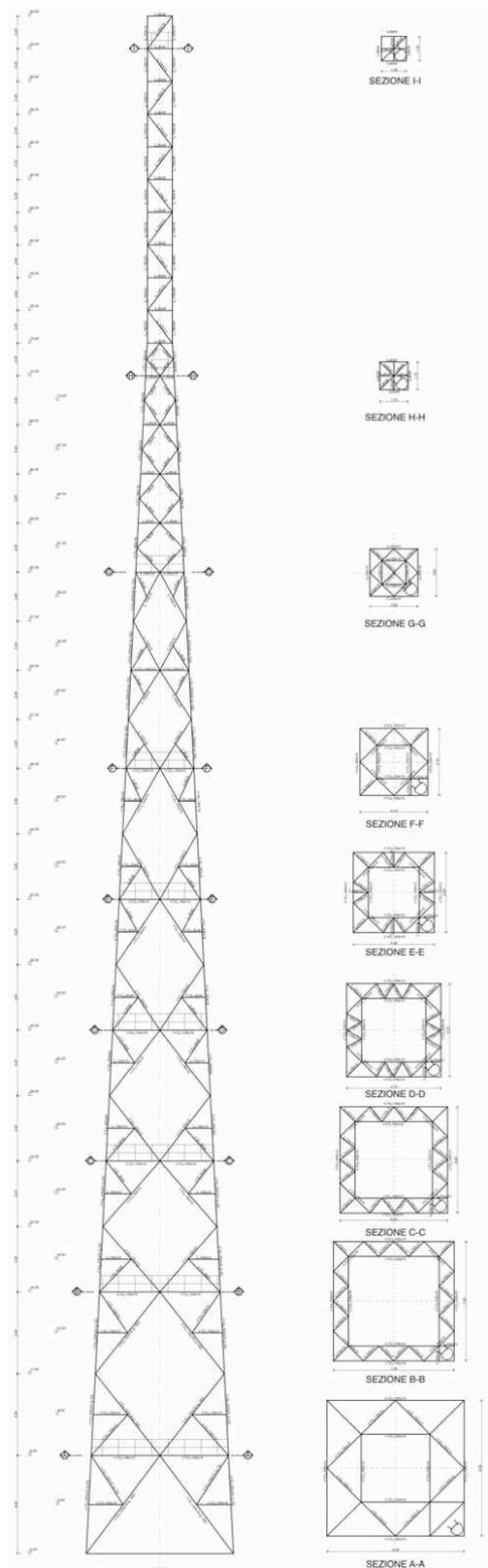
Trattasi della progettazione e Direzione lavori di un traliccio metallico di supporto agli apparati ricetrasmittenti di una postazione radiotelevisiva situata a 1100 mt. s.l.m.

L'altezza del traliccio è di 90 mt, la sua base a terra è un quadrato di 9 mt di lato; le fondazioni dello stesso sono costituite da quattro plinti con complessivi n. 28 tiranti in roccia  $2 \times \varnothing 40$  mm della profondità di mt 12.

Lo studio Capaldini si è occupato del Rilievo, Progettazione, Direzione lavori.



Fotoinserimento



Unifilare







Foto in fase di esecuzione

## REALIZZAZIONE DI UN EDIFICIO A DESTINAZIONE COMMERCIALE

*Trattasi di un supermercato realizzato a ridosso del centro storico della Città di Spoleto; esso si sviluppa su tre piani di cui uno interrato destinato a parcheggio.*

*Il progetto è stato realizzato, sin dall'inizio, in collaborazione con lo studio dell'arch. Bonucci che ha curato in particolare la conformazione architettonica.*

*Lo studio Capaldini si è occupato principalmente della progettazione strutturale e della direzione dei lavori.*

*L'opera, da questi due punti di vista, si è dimostrata particolarmente impegnativa per la particolare posizione orografica dell'edificio in quanto esso è sito molto a ridosso di una alta collina che ha imposto l'esecuzione di una poderosa paratia quale opera preliminare di sostegno dei terreni posti a tergo.*

*Operazione questa, resa ancor più problematica per la notevole presenza di acqua nel sottosuolo che ha imposto particolari metodi di scavo e di regimentazione delle falde acquifere ivi presenti.*

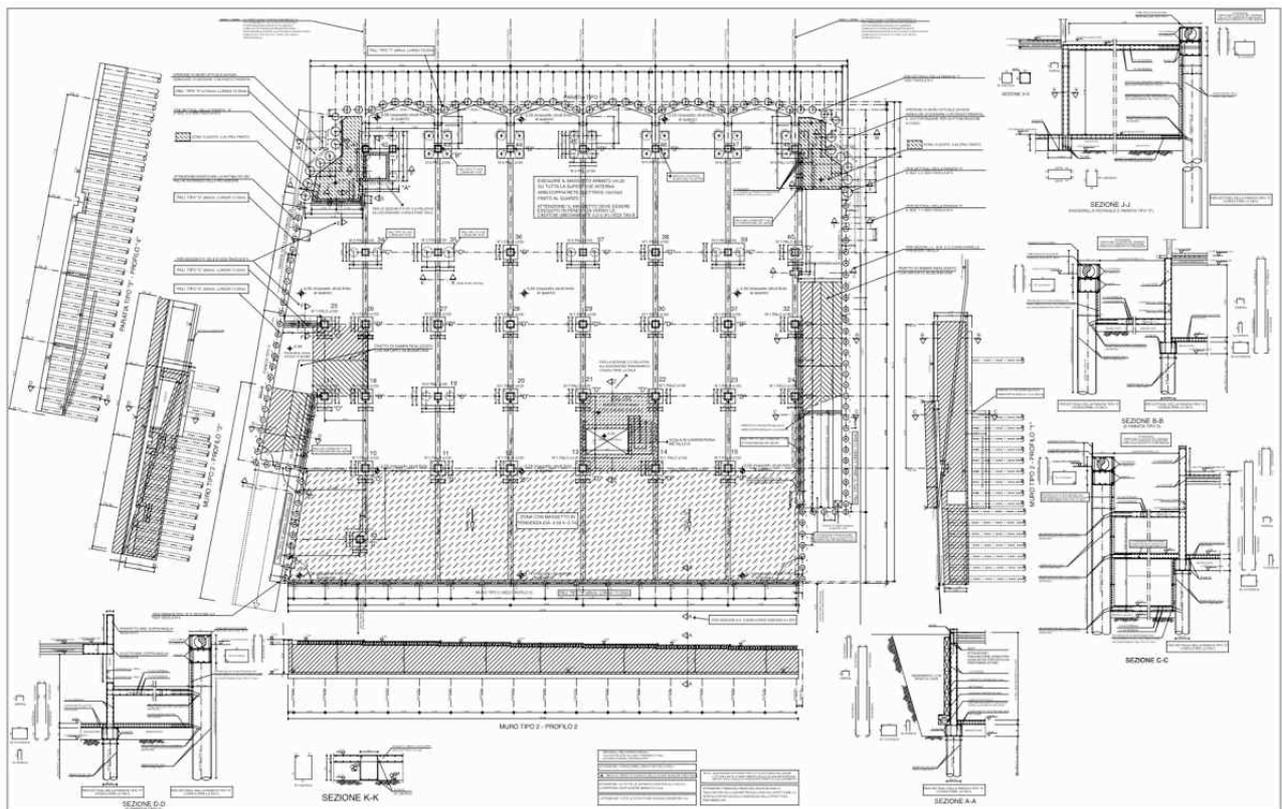
*La medesima paratia inoltre è poi diventata parte integrante dell'intero organismo strutturale che era di tipo prefabbricato.*



Foto dell'edificio in oggetto



Foto dell'edificio in oggetto



Pianta tipo dell'intervento

## CONCI PREFABBRICATI PER RIVESTIMENTO DI GALLERIE BREVETTO EUROPEO

Le esperienze maturate nel campo delle opere in sotterraneo, hanno consentito di mettere a punto una nuova tecnologia (che ha conseguito il brevetto europeo) per la velocizzazione della realizzazione del rivestimento di gallerie scavate con il sistema tradizionale in analogia con i sistemi già in uso per gallerie realizzate con sistemi meccanizzati (TBM tunnel boring machines).

Detta tecnologia si basa su un sistema di industrializzazione del processo di realizzazione del rivestimento definitivo in c.a. utilizzando conci di grandi dimensioni (autoportanti da subito e senza getto integrativo) utilizzabili per sezioni ordinarie di gallerie.

Trattasi in sintesi della individuazione di un processo per il montaggio in opera di conci prefabbricati in stabilimento (sia remoti che improntati a pié d'opera) per la realizzazione del rivestimento dell'intero cavo.

La posa, come la conformazione dei conci, può essere molto articolata e adattata alle caratteristiche geomeccaniche del terreno interessato dallo scavo, nonché alla sezione e alla lunghezza della galleria. Ovviamente il sistema risulterà tanto più vantaggioso quanto più stabile sarà il fronte di scavo; anche nei casi però in cui risulti necessario il consolidamento del fronte, esso risulterà comunque applicabile. Questa tecnologia inoltre, mira anche, nella maggior parte dei casi, all'eliminazione del rivestimento temporaneo e risulta particolarmente vantaggiosa nei casi di gallerie artificiali anche con spessori di ricoprimento dell'ordine dei 10 mt.



Rappresentazione virtuale

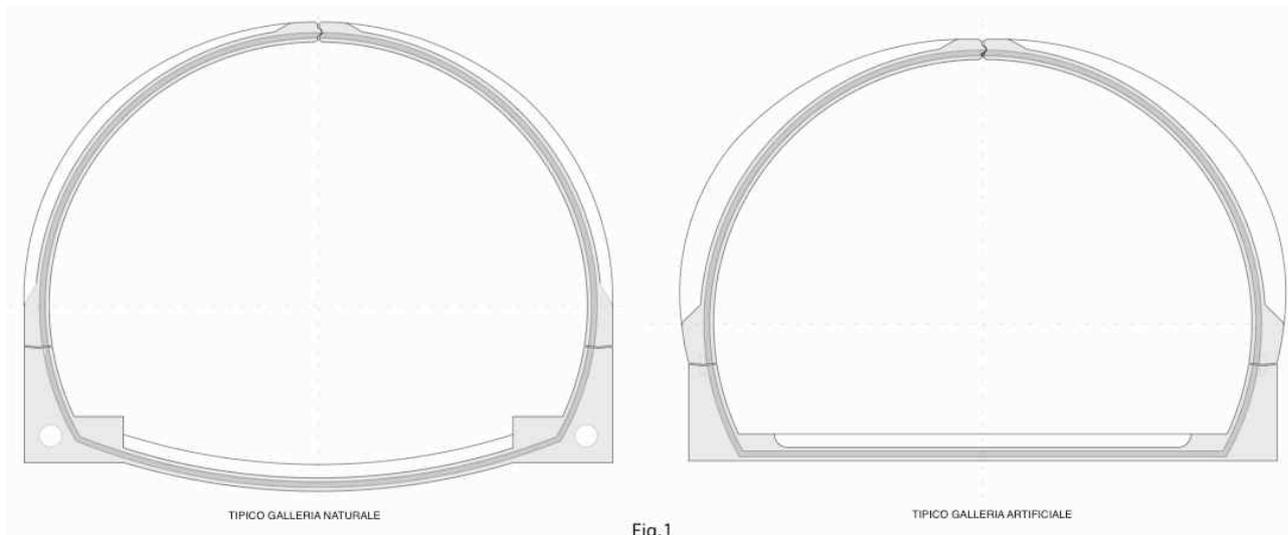
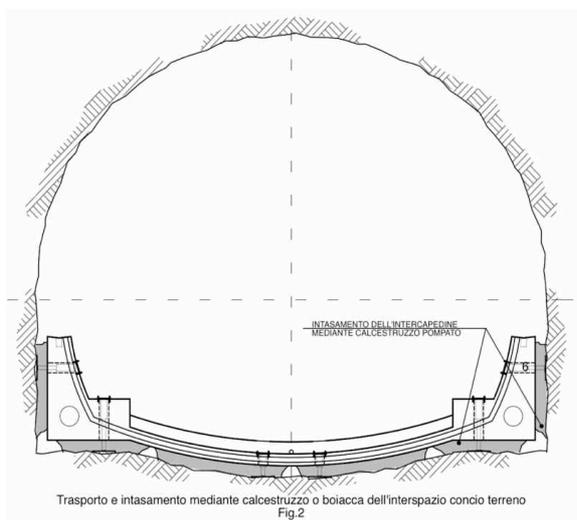
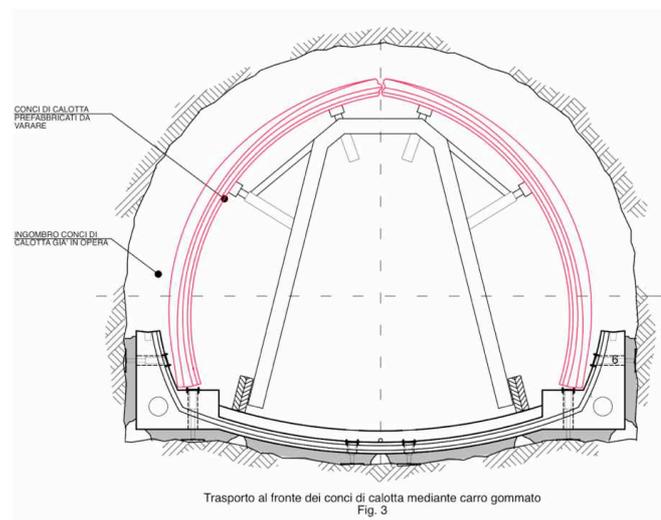


Fig.1



Trasporto e intasamento mediante calcestruzzo o boiaca dell'interspazio concio terreno  
Fig.2



Trasporto al fronte dei conchi di calotta mediante carro gommato  
Fig. 3

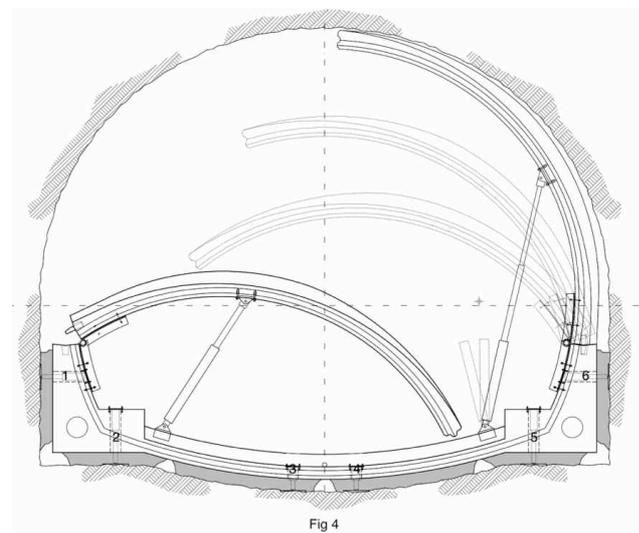


Fig 4

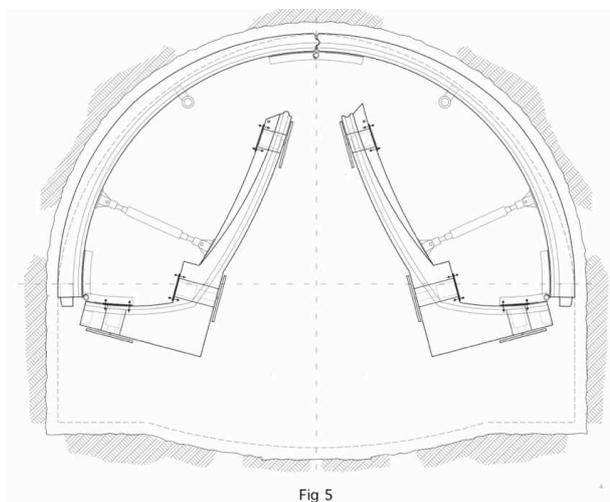


Fig 5

## SISTEMA DI PREFABBRICAZIONE DI VIADOTTI AD ARCO A VIA SUPERIORE BREVETTO INDUSTRIALE

Trattasi di un sistema di prefabbricazione di ponti e viadotti, a campate singole o multiple, ad arco a via superiore composti da pile, spalle, fiancate e archi (anche sovrapposti).

La prefabbricazione riguarda l'intera struttura di elevazione sin dall'estradosso delle fondazioni.

Costituisce innovazione, oltre la completa prefabbricazione di tutte le strutture portanti fuori terra, la molteplicità dei sistemi di formazione del corpo stradale vero e proprio; molteplicità che comunque garantisce la completa eliminazione dei giunti di dilatazione del piano viabile.

### Schema statico.

Trattasi di archi portanti (accostati a formare la larghezza dell'impalcato voluta) a tre cerniere (fig. 1), a tre cerniere con archi sovrapposti (fig. 2) che, impostati direttamente sullo spiccatto delle fondazioni, o alla sommità di pile o spalle realizzate in elementi modulari prefabbricati assemblati a secco e non, costituiscono la struttura di sostegno del superiore corpo stradale (rilevato, strutture di base e pavimentazione).

La luce ottimale di ogni singola campata può variare dai 18 ai 72 mt anche se risulta tecnicamente possibile eseguire campate ancora più corte o più lunghe.

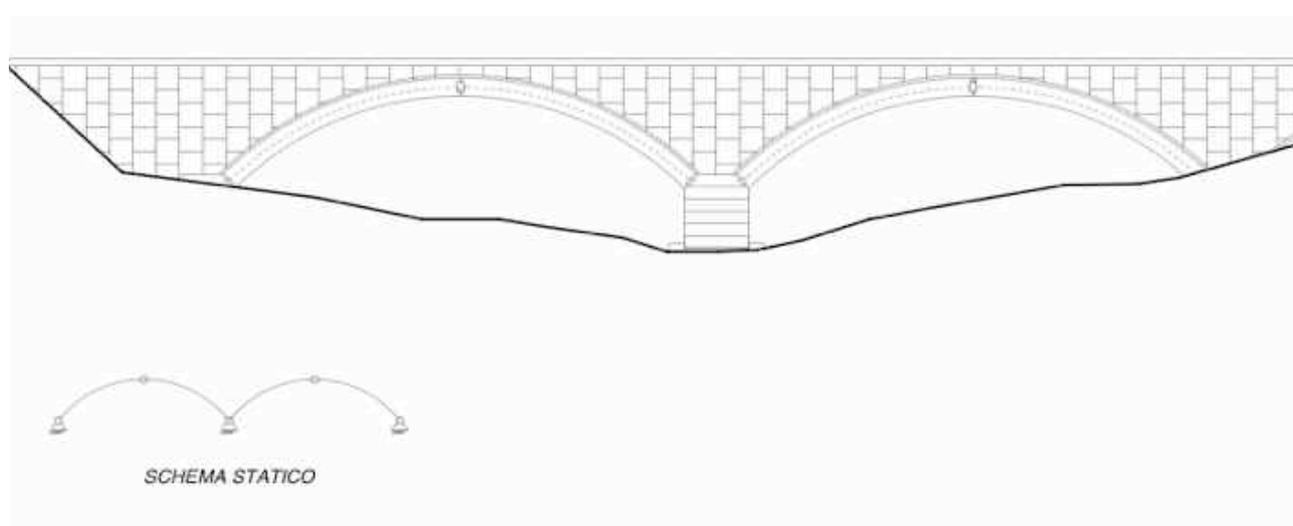


Fig.1  
Arco a tre cerniere

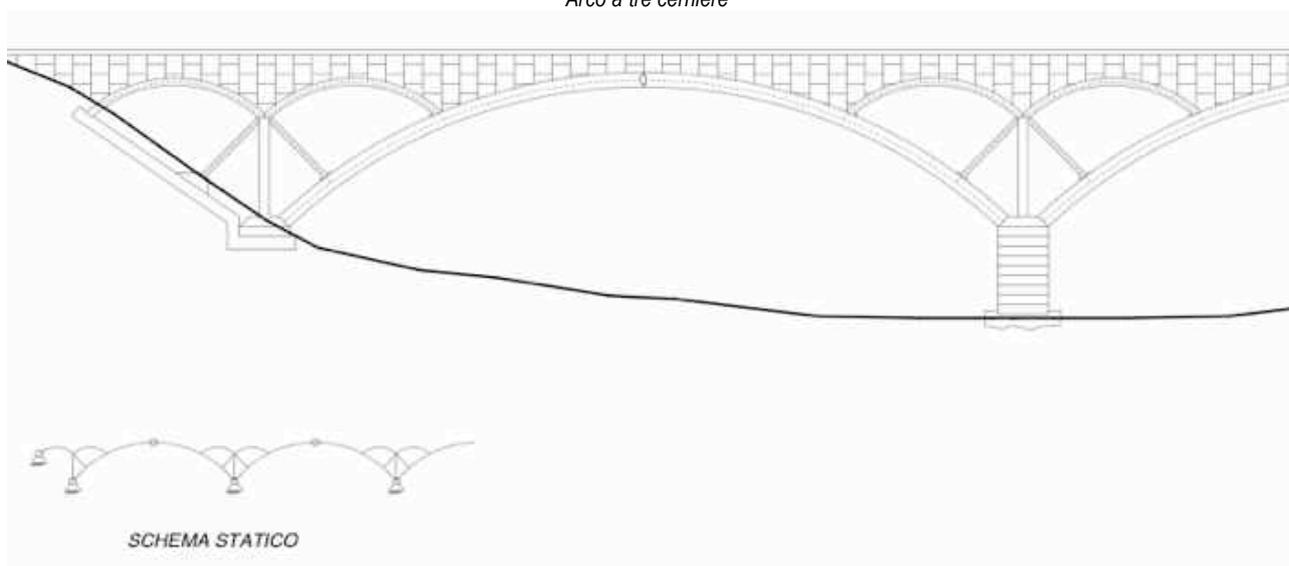


Fig.2  
Arco a tre cerniere con archi sovrapposti

## SISTEMA DI ISOLAMENTO SISMICO PER EDIFICI ESISTENTI. BREVETTO INDUSTRIALE

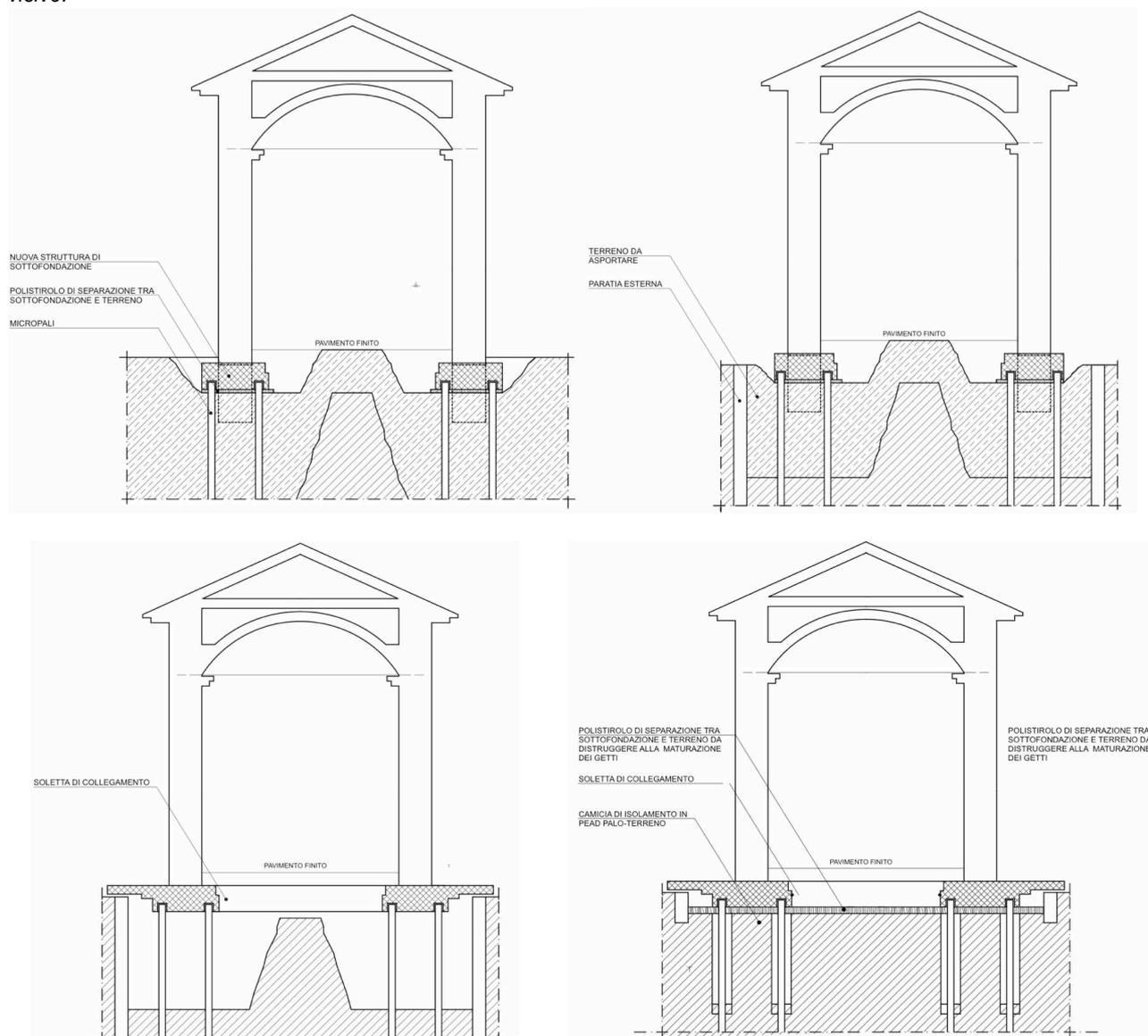
Il sistema di seguito illustrato riguarda l'ideazione di una nuova metodologia per realizzare l'isolamento sismico alla base di edifici esistenti anche di pregio storico-artistico. L'onere maggiore in questo caso, consiste nel disarticolare la costruzione esistente, dal suolo su cui è poggiata.

Il sistema in sintesi, consiste nella realizzazione, per conci successivi, di una opportuna sottofondazione su tutto lo sviluppo planimetrico delle murature portanti, costituita da conci di travi in c.a. collegate a coppie di micropali infissi convenientemente nel terreno sottostante; asportando poi uno strato di terreno di alcuni metri e quindi mettendo a nudo il primo tratto di micropali, si ottiene un sistema di strutture fondali molto deformabile alle sole azioni orizzontali. La deformabilità del tratto di micropali rimasti a giorno quindi, costituisce di fatto l'isolamento sismico dell'edificio dal terreno. In alternativa alla asportazione del terreno necessario a liberare il primo tratto di micropali, è possibile eseguire detto tratto entro una tubazione molto più larga al fine di conseguire ugualmente il necessario svincolo dal terreno circostante

Onde conseguire poi la necessaria rigidezza del piano di base, si esegue il collegamento dei vari tratti di sottofondazione, con una soletta in c.a. capace di solidarizzare in un'unica piastra, la nuova struttura fondale.

Detta piastra sarà ovviamente scollegata dall'originario terreno di fondazione. Modificando la distribuzione planimetrica dei micropali e la loro rigidezza flessionale (momento di inerzia e lunghezza libera di inflessione), si possono modulare i periodi propri della struttura, fino ad elevarli convenientemente rispetto a quelli originari e ridurre di conseguenza l'energia di origine sismica trasmessa dal terreno alla struttura.

L'intero intervento, sviluppandosi esclusivamente nella porzione non in vista dell'edificio, non genera alcun impatto visivo.



Fasi di esecuzione

## **ORGANIZZAZIONE DELLO STUDIO ASSOCIATO DI INGEGNERIA CAPALDINI**

### *ASSOCIATI*

- *Ing. Paolo Capaldini*
- *Ing. Giampaolo Capaldini*

### *COLLABORATORI*

- *Geom. Diego Anullo*
- *Sig. Leandro Bietolini*
- *Sig.ra Rita Desantis*
- *Geom. Francesca Gigli*
- *Geom. Rosita Magrini*
- *Ing. Stefania Roscioli*
- *Ing. Raffaele Testa*
- *Geom. Alessio Tulli*
- *Geom. Nicola Lupi Napolini*

### *STRUTTURE*

- *Sede principale in edificio singolo della superficie di mq 400 Giano dell'Umbria - Perugia*
- *Sede distaccata in Spoleto cantiere Mobilità Alternativa - Perugia*
- *Sede distaccata Via Fonte dell'Olmo n. 2 Tornimparte - L'Aquila*

### *DOTAZIONI*

- *n. 6 Stazioni grafiche bi-tridimensionali e photorendering Apple Macintosh*
- *n. 4 Stazioni di calcolo strutturale (analisi strutture in muratura, acciaio, calcestruzzo armato, legno, ecc. mediante metodo di calcolo agli elementi finiti, verifica POR e similari sia in analisi statica che dinamica, lineare e non lineare, calcolo geotecnico)*
- *n. 4 Stazioni di elaborazione per contabilità lavori, piani di sicurezza L. 494/96, Legge 10 sul contenimento dei consumi energetici e acustica.*
- *n. 1 Stazione totale per rilievi topografici*
- *n. 6 Postazioni di stampa su formati multipli in qualità laser b/n e colore*

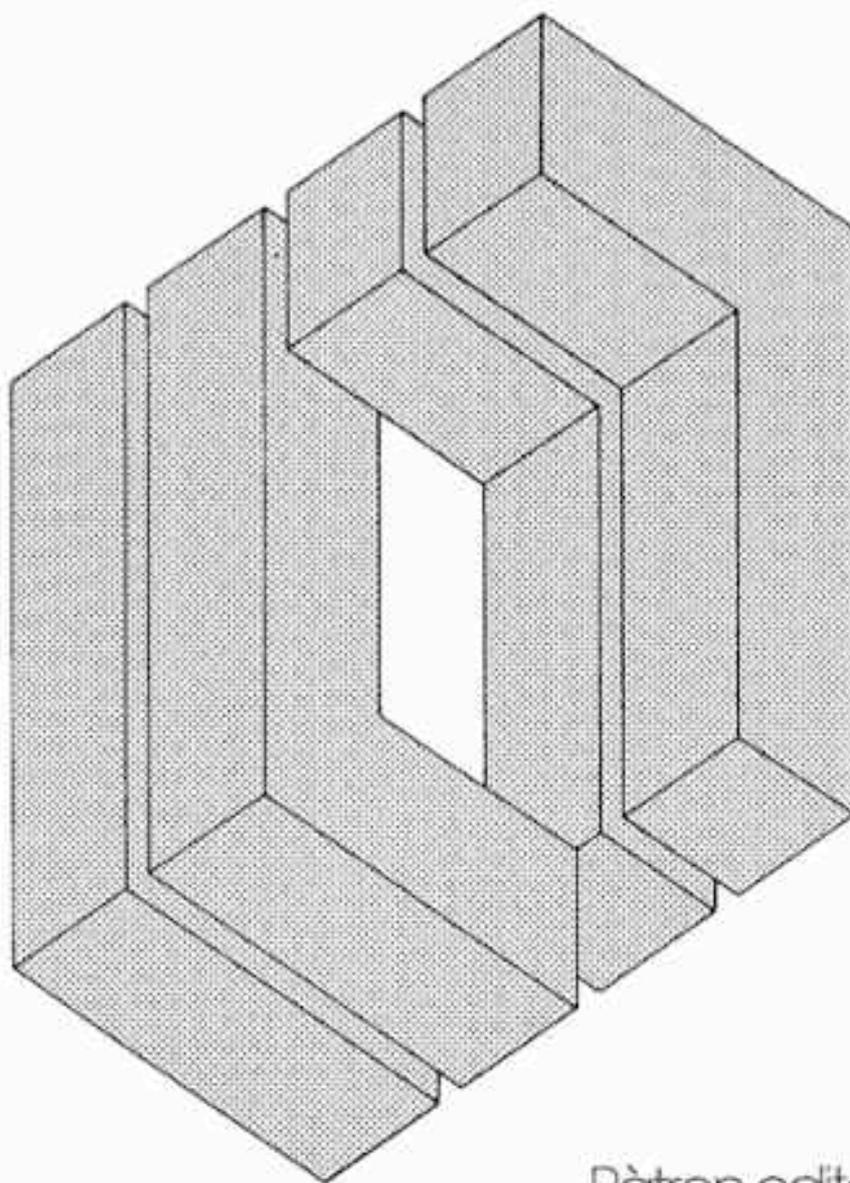
## *Pubblicazione*



estratto da:

# *ingegneria sismica*

quadrimestrale tecnico-scientifico



Patron editore

# Basilica patriarcale della «Porziuncola»: progetto di ripristino statico e funzionale a seguito degli eventi sismici del 26.09.1997 e successivi

Paolo Capaldini, Daria Ripa di Meana, Bruno Salvatici

**SOMMARIO** – *Oggetto del presente lavoro è il ripristino statico della Basilica Patriarcale di S. Maria degli Angeli in Assisi duramente colpita dal sisma del 26.09.1997. Dopo il rilievo e l'osservazione del quadro fessurativo, si è abbozzato a livello qualitativo, il comportamento dell'edificio sotto l'effetto del sisma. Successivamente si è tentato un approccio al problema di tipo analitico basato sulla modellazione tridimensionale dei vari componenti strutturali con il metodo agli elementi finiti in analisi statica e dinamica. Da ultimo, alla luce dei risultati conseguiti, si sono formulate le varie ipotesi di ripristino statico e di miglioramento del comportamento sismico del complesso monumentale.*

**SUMMARY** – *The purpose of this work is the static restoration of the Basilica Patriarcale di S. Maria degli Angeli in Assisi, badly damaged by the earthquake of 26.09.97. After inspecting cracks, a qualitative model was produced to estimate the behaviour of the building during the earthquake. Afterwards, an analytical method was used with three-dimensional models of the various structural components, with static and dynamic analysis of the finished elements. Finally, in the light of the above, various hypotheses were formulated for static restoration and for improving the monument's anti-earthquake properties.*

*Parole chiave:* ripristino monumenti, analisi dinamica edifici monumentali, comportamento sismico edifici monumentali.

*Key words:* restoring monuments, dynamic analysis of monuments, behaviour of monuments during an earthquake.

## 1. Premessa

Il presente studio ha per oggetto l'individuazione degli interventi necessari al ripristino statico e funzionale della Basilica di S. Maria degli Angeli gravemente danneggiata dagli eventi sismici del 26.09.1997 e successivi, nonché la predisposizione di una serie di accorgimenti atti a conseguire un miglioramento del suo comportamento sotto l'azione dinamica del sisma.

Lo stesso studio, soprattutto per quanto concerne la determinazione dei parametri fisico-meccanici delle strutture murarie e le caratteristiche geotecniche delle strutture fondali, si basa sui risultati prodotti da una precedente indagine diagnostica promossa dalla Soprintendenza per i Beni Ambientali Architettonici Artistici e Storici di Perugia già nell'autunno del 1988.

## 2. Principali eventi statici nella storia del monumento

Sulla base dei dati tutt'oggi disponibili, si sono potute formulare le considerazioni che seguono.

Dal punto di vista statico strutturale, la storia dell'edificio risulta caratterizzata da due diverse fenomenologie:

1) cedimenti fondali sviluppatasi nel primo periodo di vita dell'organismo;

2) eventi sismici subiti a tutt'oggi.

Per quanto attiene al primo evento, occorre considerare che il terreno interessato dalle opere fondali risulta in genere di buona qualità, ma alquanto eterogeneo per la presenza, a strati sovrapposti ed irregolari, di:

– ghiaie e sabbie in matrice limo-argillosa addensata e molto consistente;

– stratificazioni lenticolari di limo ed argilla molto meno consistenti e cedevoli.

Occorre inoltre considerare che le strutture in elevazione dell'edificio, proprio per la loro notevole mole, generano sul sottostante terreno sollecitazione assai gravose e dell'ordine dei 5-8 kg/cmq.

È pertanto naturale ed inevitabile che nel primo periodo di vita dell'edificio, si siano generati cedimenti anche differenziati e notevoli, con sicure ripercussioni anche sullo stato tensionale dello stesso organismo strutturale.

Differenziazioni comportamentali inoltre, accentuate dal lungo intervallo di tempo trascorso tra l'inizio della costruzione e il suo completamento (oltre un secolo).

Risulta per altro scontato che detti cedimenti si siano ormai da lungo tempo esauriti e che la costruzione abbia avuto modo, durante le ulteriori vicissitudini statiche, di «metabolizzare» i conseguenti dissesti operando una conveniente redistribuzione delle sollecitazioni in essa presenti.

A riguardo invece degli eventi sismici subiti dall'edificio di cui al precedente punto 2, occorre evidenziare come a partire dalla sua realizzazione, lo stesso, abbia subito una lunga serie di sollecitazioni di tipo dinamico dovute al verificarsi di terremoti anche di notevole intensità, che hanno comportato, come nel caso delle scosse del Marzo 1832 il collasso totale della navata centrale e della sinistra.

In altre circostanze comunque, anche se non si sono

verificati crolli di porzioni significative di edificio, si sono comunque avuti dissesti e danneggiamenti diffusi che hanno segnato in modo ancora a tratti visibile, le principali strutture portanti.

È da imputarsi a tale ultimo tipo di sollecitazioni infatti, buona parte del quadro fessurativo già presente prima dell'ultimo evento sismico, come ovviamente quello ora presente che in grandi linee ricalca, amplificandolo, quello precedente.

Ancora una volta infatti, si sono evidenziate lesioni dovute alla rotazione della facciata, al movimento relativo tra la navata destra e quella sinistra, oppure all'interferenza del corpo della cupola con quello limitrofo, ma indipendente, della restante basilica.

Meccanismi di collasso questi, messi anche chiaramente in evidenza dalle simulazioni dinamiche computerizzate più avanti illustrate, ma che anche a livello intuitivo possono essere facilmente rilevati e compresi una volta chiara la conformazione strutturale del complesso monumentale.

### 3. Il terremoto del 26.09.1997 e suoi effetti sulla struttura

Il quadro fessurativo della Basilica come ora si presenta, risulta essere composto da diversi gruppi di patologie, conseguenti ad anomalie comportamentali di natura dinamica.

Già da tempo infatti, a seguito delle osservazioni sistematiche e delle verifiche eseguite in occasioni di eventi sismici precedenti, erano state individuate particolarità strutturali ed effetti comportamentali di tipo dinamico ad esse correlate, capaci di produrre in zone ben individuate e circostanziate, danni consistenti sia ai rivestimenti e ai decori, che alle strutture portanti vere e proprie.

1) Comportamento della facciata per azioni fuori piano.

La quasi inesistenza di efficaci collegamenti tra le due facciate (l'originaria e quella aggiunta nel primo quarto di questo secolo) e le murature ad esse ortogonali, unita alla scarsa rigidità delle pareti stesse in senso sempre ortogonale ai piani che le contengono, fa sì che le azioni sismiche provenienti da questa direzione producano effetti deformanti notevoli e sicuramente più vistosi di quelli afferenti ai muri posti in direzione ortogonale.

2) Moti relativi tra le due navate laterali e tra le stesse e quella centrale.

Gli spostamenti relativi in senso trasversale, che si generano in caso di sisma tra le opposte porzioni di basilica, sono in assoluto i più deleteri per la stabilità dell'intero edificio ed hanno costituito la causa primaria che provocò il collasso ed il definitivo crollo della navata centrale e della laterale sinistra, durante il terremoto del 1832.

Il corpo centrale della basilica, che si estende in lunghezza dalla cupola fino alla facciata e che in larghezza comprende quanto contenuto tra le due file di cappelle

laterali contrapposte, ha una dislocazione spaziale delle strutture sismo-resistenti alquanto omogenea in senso trasversale, ma non anche in senso longitudinale.

Secondo detta ultima direzione infatti, la porzione di edificio costituita dalla navata centrale, è più deformabile (e pesante) rispetto a quelle laterali e ciò in condizioni dinamiche, genera moti relativi anche significativi.

Risulta alquanto intuitivo, come per lo spostamento degli stessi corpi laterali rigidi, anche in modo quasi slegato, la volta che li unisce e le volte delle navate laterali, ne risentano considerevolmente.

Risulta parimenti intuitivo come, in senso longitudinale, sulle pilastrate che delimitano l'aula centrale, si generano gravosissimi sforzi di pressoflessione e di taglio, o come sulle volte laterali, si generino azioni taglianti capaci di lesionarle anche in modo grave.

L'analisi del quadro fessurativo di detta porzione di edificio, mostra infatti chiaramente come anche in questo ultimo evento sismico, si sono verificati cedimenti che denotano con chiarezza quanto sopra descritto:

- l'intradosso di tutte le nervature della volta grande della navata centrale, risulta segnata da lesioni longitudinali in chiave che evidenziano come le due sezioni di imposta della stessa abbiano subito un vistoso spostamento relativo;

- tutte le volte che coprono le due navate laterali, ma più marcatamente quelle in sinistra entrando, presentano lesioni diagonali anche gravi, per lo spostamento differenziato delle loro zone di imposta, maggiore sul lato confinante con l'aula centrale, minore su quello adiacente alle cappelle.

3) Interferenze tra l'organismo della cupola e quelli limitrofi.

L'organismo strutturale costituente la cupola che sovrasta la Porziuncola, compreso il tamburo, gli arconi ed i quattro pilastri che la sostengono, costituiscono un organismo murario quasi strutturalmente indipendente dalla restante fabbrica.

In senso longitudinale si dipartono da essa, con autonomo sostentamento verticale, le volte della navata centrale e del coro; in senso trasversale si sviluppano invece le volte del transetto, sostenute anch'esse da una propria struttura di elevazione.

In caso di sollecitazione dinamica, la struttura costituente la cupola più alta e più pesante di quelle ad essa limitrofe, tenderebbe ad assumere, se libera, un periodo fondamentale di vibrazione più lungo ed oscillazioni più ampie rispetto a quanto in realtà succede, per l'interferenza che si genera con le altre strutture, più basse e meno deformabili.

L'azione di frenamento del corpo cupola da parte degli organismi murari limitrofi, produce lesioni anche vistose su quest'ultimi, specialmente sui più rigidi, ma produce sovente anche sofferenze sul tamburo della stessa cupola.

L'interferenza di cui sopra, ha comunque anche risvolti positivi per l'energia che così si dissipa, nonché per il contenimento dell'ampiezza delle oscillazioni della cupola medesima.

#### 4. Caratterizzazione sismica dell'edificio

Dalla disamina critica del quadro fessurativo di cui sopra, correlata con l'analisi delle forme e dei parametri modali degli organismi strutturali nella loro configurazione originaria, che sostanzialmente ne convalida l'individuazione e l'interpretazione del relativo comportamento dinamico, si sono individuati gli schemi statici sismo-resistenti dell'edificio (di seguito riportati nelle simulazioni computerizzate) ed il comportamento degli stessi in caso di sollecitazione di tipo dinamico.

Ai raggruppamenti delle lesioni sopra citate, corrispondono infatti altrettanti diversi e sostanzialmente autonomi sistemi sismo-resistenti affiancati a loro volta, da ulteriori organizzazioni murarie di minore significato o minore vulnerabilità.

Nella loro dislocazione planimetrica detti sistemi si possono individuare nelle seguenti porzioni di edificio:

- 1) sistema delle due facciate; (vecchia e nuova)
- 2) corpo centrale della basilica;
- 3) organismo della cupola.

In ordine decrescente di importanza quindi, si espongono brevemente i principali effetti significativi che condizionano la stabilità dell'insieme in caso di sisma.

A) La principale causa di degrado sismico, che può portare anche al collasso di porzioni considerevoli di edificio come già avvenuto durante il terremoto del 1832, è senza dubbio da ricercarsi nell'anomala distribuzione delle masse in relazione alle rigidità delle strutture che costituiscono il corpo centrale della basilica.

I moti relativi che si generano, la cedevolezza delle pilastrate in rapporto alle pareti laterali, la scarsa capacità degli stessi pilastri di assorbire deformazioni e quindi energia senza collassare, la deformabilità della volta centrale in relazione alla enorme rigidità dei due blocchi laterali, la presenza di spinte considerevoli della stessa volta e della superiore copertura sulle murature che le sostengono, costituiscono il maggior contributo alla vulnerabilità dell'intera struttura muraria.

È una debolezza intrinseca e congenita alla stessa concezione strutturale dell'insieme, in parte colmabile con gli interventi che si propongono ed in parte ineliminabile come si dirà più avanti, ritenendo improponibili ed ingiustificabili interventi che stravolgero non solo l'attuale schema strutturale, ma anche l'estetica del monumento, deturpandolo irrimediabilmente.

B) Ad essa fa subito seguito l'interferenza tra il corpo della cupola e le strutture limitrofe.

L'importanza di detto aspetto risiede essenzialmente nella enorme mole e nella enorme massa della cupola e delle sue strutture di sostegno; massa che una volta eccitata dal sisma, è capace di muoversi danneggiando considerevoli porzioni di edificio circostante prima di arrestarsi di nuovo.

Nel compiere detta azione distruttrice comunque, la stessa cupola subisce anch'essa dei danneggiamenti che, in relazione alle sue peculiarità compositive, nonché alla sua particolare posizione rispetto al sottostante edificio della Porziuncola, costituiscono l'aspetto più significativo dell'intero meccanismo degenerativo.

La maggiore attenzione pertanto, va posta non tanto ad evitare il degrado delle strutture limitrofe, quanto a studiare la possibilità di rinforzare la cupola medesima rendendola maggiormente capace di assorbire sollecitazioni di tipo dinamico senza subire danneggiamenti rilevanti o peggio ancora collassamenti estesi che danneggerebbero inesorabilmente anche la sottostante Porziuncola.

C) Il terzo meccanismo di danneggiamento di tipo sismico è da individuarsi senza dubbio nel moto fuori piano della facciata, caratteristico al suo primo modo principale di oscillare.

Il fenomeno, anche se di per se non rilevantissimo a parte la sua spettacolarità, riveste comunque una certa importanza per la salvaguardia dell'intero sistema «facciata» e per le interazioni con il vicino corpo centrale della basilica.

Occorre inoltre evidenziare come l'applicazione della seconda facciata in epoca recente, non solo non ha risolto i vecchi problemi statici della precedente, ma in condizioni dinamiche, li ha addirittura amplificati in quanto anche questa seconda non ha di per se una rigidità sufficiente a contenere le deformazioni della prima, ma anzi, a quest'ultima si aggrappa quando intervengono forze orizzontali ortogonali al suo piano.

La maggiore altezza inoltre del nuovo pronao, amplifica ulteriormente detta deficienza di rigidità, fino al punto da danneggiare anche la sua stessa copertura come è avvenuto in occasione di questo ultimo sisma.

Lo studio della porzione di edificio in oggetto inoltre, come si dirà più avanti, ha consentito di prevedere accorgimenti atti da un lato a contenere la deformabilità del sistema stesso e dall'altro a limitare quella del vicino corpo centrale.

#### 5. Analisi numeriche dei principali sistemi strutturali

##### 5.1. Generalità

Oltre alle considerazioni di tipo qualitativo/intuitivo di cui sopra, che devono sempre condizionare e convalidare ogni altra forma di indagine numerica più approfondita, sono state svolte anche modellazioni matematiche e simulazioni computerizzate del comportamento statico e dinamico dei principali sistemi strutturali.

I modelli analizzati riguardano i seguenti sistemi:

- I) complesso del corpo centrale della basilica;
- II) complesso della cupola;
- III) complesso combinato facciate-corpo cent.

È stato in fine analizzato il complesso sistema costituito dalle membrature principali di copertura della navata centrale.

##### 5.2. Il corpo centrale della Basilica

Le varie modellazioni eseguite, tentano per quanto possibile, di simulare lo stato attuale e l'effetto dei diversi possibili interventi migliorativi ipotizzati.

In particolare è stato studiato:

- 1) lo stato attuale senza intervento alcuno;
- 2) l'irrigidimento delle falde e il ritegno di testata;
- 3) l'irrigidimento delle falde, il ritegno e le catene trasversali di grande sezione.

I risultati di detto studio evidenziano come, anche ad un debole contrasto al moto longitudinale della porzione centrale conseguente al sisma in X, unito all'irrigidimento delle coperture, consente di ottenere risultati significativi soprattutto in termini di spostamento i cui valori infatti, risultano dimezzati.

Si vede in fine, come l'applicazione di catene anche di grande diametro, ( $\phi = 112,8$  mm;  $A = 100$  cmq) non comporti ulteriori sensibili miglioramenti in caso di sisma, ma solo uno sgravio di tensione in condizioni statiche per la riduzione delle spinte delle volte e della copertura della navata centrale.

Miglioramento per altro non essenziale in quanto lo stato tensionale in condizioni statiche normali, non impegna le strutture in maniera esasperata od impropria, come la realtà a tutt'oggi dimostra.

### 5.3. Il sistema della cupola

Le varie modellazioni eseguite, cercano di interpretare e comprendere, più che lo stato tensionale vero e proprio delle varie masse murarie, il modo di comportarsi dell'intero organismo sotto l'effetto del sisma.

Interpretazione per altro estremamente ostacolata dall'impossibilità di simulare con sicurezza e precisione il tipo di interferenza che si crea tra la struttura della cupola e quelle degli organismi vicini.

A questa difficoltà si è cercato di sopperire individuando due situazioni estreme entro le quali quella vera sicuramente si trova.

Si è quindi ipotizzata una prima ipotesi in cui la struttura è libera di muoversi senza ostacoli esterni ed una seconda che invece prevede un vincolo quasi rigido in corrispondenza dei punti di contatto con le strutture vicine; entrambe le soluzioni quindi rappresentano le condizioni estreme entro le quali sicuramente si troverà la cupola nella realtà.

Si è poi ipotizzata una terza soluzione che prevede ritegni variamente deformabili al posto di quelli uniformemente rigidi di cui sopra, che pur non pretendendo di simulare correttamente il reale comportamento del sistema strutturale in esame, tenta di interpretare la diversa rigidità delle strutture adiacenti alla cupola: più rigide quelle del coro, meno le altre.

In particolare quindi si ha:

- 1) il sistema strutturale della cupola libero;
- 2) il sistema strutturale della cupola bloccato;
- 3) il sistema strutturale della cupola semibloccato.

Gli elaborati che si riportano qui di seguito, mostrano come il comportamento dinamico dell'intera struttura risulti fortemente influenzato dal ritegno operato dalle altre strutture con cui si trova a contatto all'altezza del tamburo.

Il periodo del suo primo modo di vibrare infatti, quasi si dimezza, mentre la deformazione massima, soprattutto della porzione inferiore, diminuisce significativamente.

Meno evidente resta invece l'azione confinante delle nuove cerchiature; si deve infatti considerare l'enorme rigidità radiale delle poderose murature che compongono il corpo cilindrico della cupola, per comprendere come anche cerchiature di dimensioni ragguardevoli, non possano modificare vistosamente lo stato tensionale dell'organismo stesso.

È infatti da ricercarsi nella esigenza di creare un sicuro presidio, magari una ridondanza di sicurezza, le motivazioni che hanno indotto ad individuare detta tipologia di rinforzo; scelta peraltro dettata anche dal fatto che in corrispondenza della scala interna che permette l'accesso alla lanterna, si genera un sostanziale indebolimento della sezione ora segnata da una lesione tutt'altro che trascurabile.

Per ovvi motivi di semplicità di modellazione, detto indebolimento non è stato preso in considerazione nella simulazione matematica del sistema strutturale.

Ulteriori moti propri interessanti che devono essere tenuti in debita considerazione quando si tratterà di determinare la posizione delle perforazioni armate dei pilastri, sono i moti torsionali della porzione cilindrica che in corrispondenza dei finestrini assumono particolare significato.

### 5.4. Il complesso combinato facciate-corpo centrale

Le varie modellazioni eseguite, cercano di simulare lo stato attuale e l'effetto dei diversi possibili interventi migliorativi ipotizzati.

In particolare è stato studiato:

- 1) lo stato attuale senza intervento alcuno;
- 2) l'irrigidimento dei setti di facciata ed il collegamento degli stessi con i muri ortogonali delimitanti l'aula centrale.

Si vede in fine, come in generale non si sono modificate significativamente i parametri che caratterizzano il comportamento dinamico delle varie strutture evitando l'indesiderato abbassamento dei periodi propri.

## 6. Sintesi della ricerca e relative conclusioni

La disamina degli aspetti strutturali fin qui svolta, obbliga ad una sintesi sia per quanto concerne l'aspetto conoscitivo dei vari meccanismi sismo-resistenti e sia per quanto attiene alle metodologie ed ai criteri di intervento volti al ripristino statico ed al rinforzo delle membrature danneggiate.

In armonia quindi con le linee guida a suo tempo già tracciate da specialisti del Politecnico di Milano, si delineano le conclusioni qui di seguito riportate.

1) Il complesso strutturale della basilica è costituito da almeno quattro sistemi strutturali che in condizioni statiche, ma ancor più in quelle dinamiche, si comportano in maniera tendenzialmente autonoma.

I quattro sistemi sono individuabili nella:

- struttura del corpo centrale della basilica; (cappelle e navate laterali, navata centrale)
- struttura della cupola e dei suoi arconi e pilastri;

- struttura delle due facciate;
- struttura del coro e degli ambienti laterali.  
(cappella del Santissimo e Sacrestia)

2) La semilibertà di movimento dei vari sistemi strutturali è un elemento in linea generale positivo che va solo corretto per limitarne le interferenze negative ed incrementarne le mutue azioni benefiche e stabilizzanti soprattutto in condizioni dinamiche.

3) Gli interventi di ripristino e di rinforzo delle strutture danneggiate pertanto, dovranno orientarsi concordemente secondo l'ottica di cui sopra.

4) Per quanto riguarda il corpo centrale della basilica, occorrerà mettere in atto accorgimenti atti a dotare le coperture voltate di una elevata deformabilità per consentirgli di assecondare il moto dei corpi rigidi laterali.

Dovrà inoltre contenersi per quanto possibile la maggiore deformazione dell'area centrale rispetto alle laterali che sottopone i pilastri a sforzi notevoli, rinforzando il complesso delle due facciate.

5) Il sistema della cupola e delle sue strutture di sostegno, sarà opportunamente rinforzato onde contenere il danneggiamento dello stesso nell'interazione con i corpi limitrofi.

Interazione peraltro positiva, in quanto consente di contenere le deformazioni trasversali della cupola e di dissipare energia.

6) Il sistema delle due facciate sarà opportunamente rinforzato onde contenere la sua deformabilità fuori piano e quella dell'adiacente corpo centrale della basilica.

## 7. Interventi di consolidamento e rinforzo strutturale

### 7.1. Il corpo centrale della basilica

#### 7.1.1. Irrigidimento dei piani di copertura

Allo scopo di contenere la maggiore deformabilità longitudinale della porzione centrale in relazione alle aree laterali, nonché lo scompaginamento dell'orditura portante, si prevede un blando irrigidimento delle falde di copertura sia delle navate laterali e delle cappelle e sia della navata centrale.

Detto intervento, che non comporterà alcun apprezzabile aumento di peso, sarà realizzato mediante l'applicazione di retinature con reti metalliche a maglia stretta e filo zincato di piccolo diametro, solidarizzate alle strutture esistenti mediante incollaggio e spinottatura.

#### 7.1.2. Rinforzo delle volte

Le volte delle navate laterali saranno opportunamen-

te rinforzate con una tecnica analoga a quella messa a punto per le falde di copertura.

L'intervento così concepito, che coinvolgerà le volte fino alle reni ed i muri su cui esse poggiano, sarà in grado di rinforzare, in senso membranale, le stesse volte senza apportare sostanziosi irrigidimenti flessionali, né aumenti sensibili di peso.

La retinatura di cui sopra costituirà inoltre un valido intervento di ricucitura e ripristino per le zone lesionate delle stesse volte evitando irrigidimenti e/o snaturamenti della loro funzione statica.

L'intervento alle volte della basilica si completerà con il loro svuotamento ed il calo a terra di tutti i materiali sciolti e non strutturali che ora generano appesantimenti inutili ed effetti inerziali dannosi in caso di sisma.

### 7.2. L'organismo murario della cupola

#### 7.2.1. Cerchiature esterne

Il sistema della cupola e delle sue strutture di sostegno, sarà opportunamente rinforzato con cerchiature di adeguata sezione da applicare esternamente, sia all'imposta della porzione sferica, che alla base del tamburo. Esse saranno realizzate in barre di acciaio armonico debitamente poste in tensione mediante tenditori ed opportunamente protette contro la corrosione.

Lo stesso sistema di tensionamento prevederà la possibilità di controllo della tensione nel tempo, nonché la possibilità di provvedere ad una nuova ritesatura.

#### 7.2.2. Perforazioni armate delle zone lesionate

La sommità dei finestrone, la maggior parte dei pilastri che dividono gli stessi, come anche zone estese degli arconi di sostegno posti sotto la base del tamburo, riportano ora lesioni di un certo rilievo che andranno cucite mediante l'esecuzione incrociata di perforazioni eseguite con barre in acciaio inox ancorate con malte solfatoresistenti.

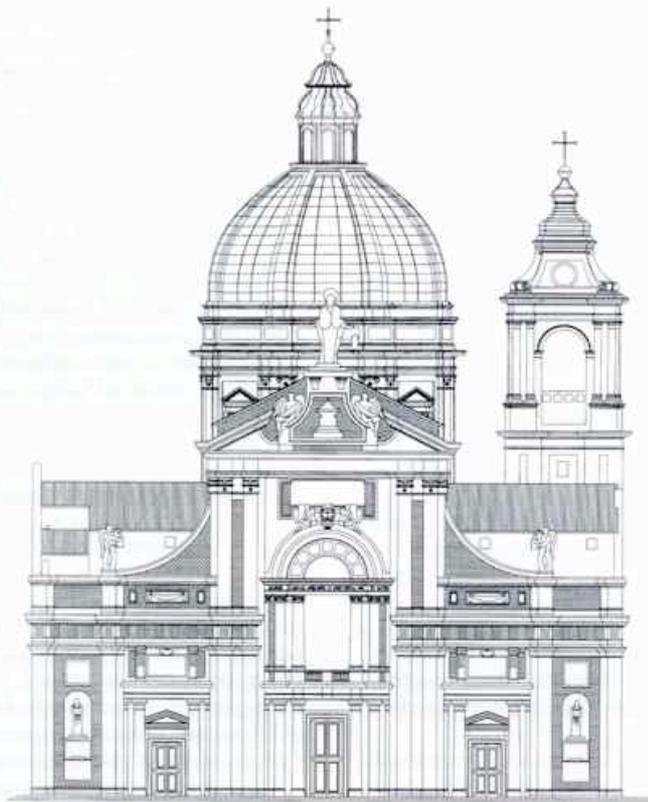
### 7.3. Rinforzi al sistema delle due facciate

Il complesso delle facciate sarà opportunamente rinforzato mediante l'esecuzione di nuove strutture scato-lari in c.a. eseguite all'interno dei due pilastri centrali esterni ora cavi.

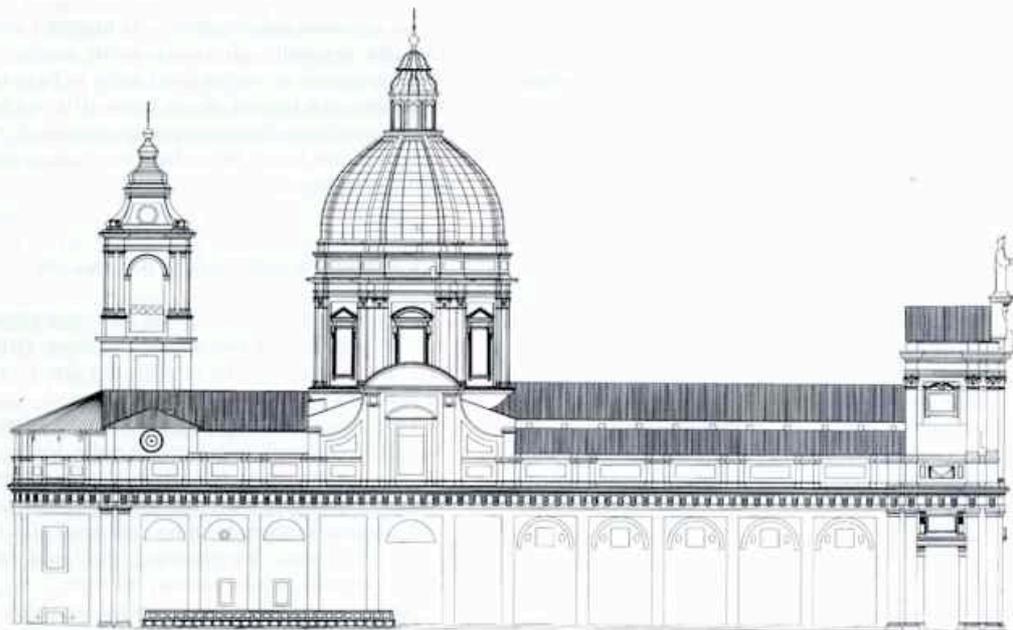
Dette nuove strutture saranno opportunamente fondate su micropali onde non gravare sulle fondazioni preesistenti e saranno rese solidali con le murature a cui aderiscono, mediante l'esecuzione di perforazioni armate.

Le stesse inoltre, saranno collegate alla vecchia facciata ed ai muri longitudinali dell'aula centrale, mediante robusti incatenamenti multipli.

Saranno inoltre ripristinate ed irrigidite le falde di copertura, con tecniche analoghe a quelle illustrate in precedenza.



*Basilica di Santa Maria degli Angeli Assisi, Prospetto*



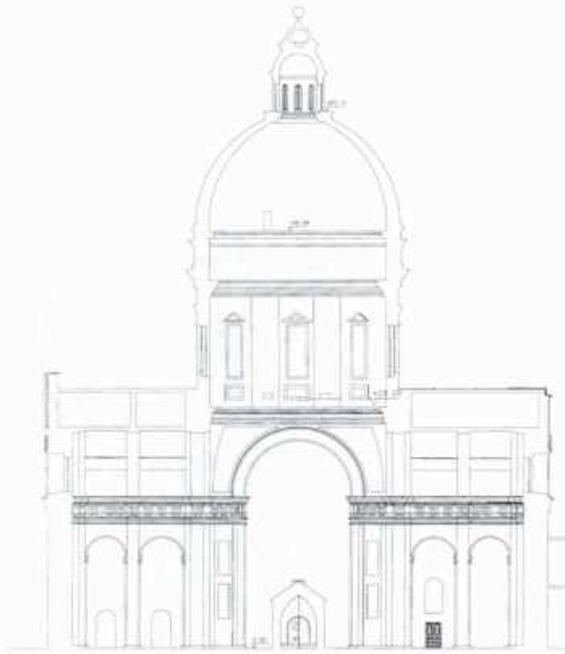
*Basilica di Santa Maria degli Angeli Assisi, Fianco sinistro*



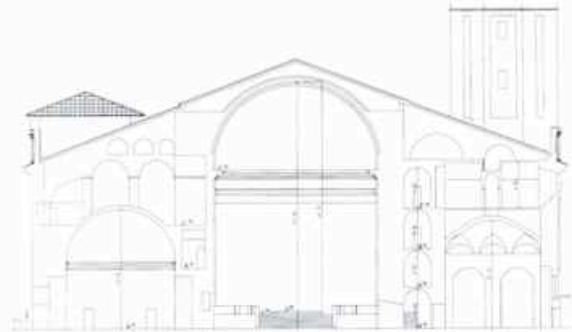
*Basilica di Santa Maria degli Angeli Assisi. Pianta livello 0.00*



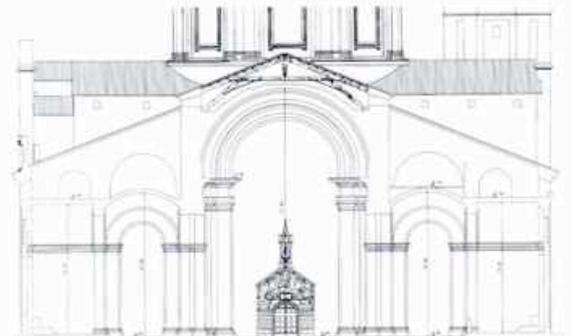
*Basilica di Santa Maria degli Angeli Assisi. Sezione F-F*



*Basilica di Santa Maria degli Angeli Assisi. Sezione E-E*

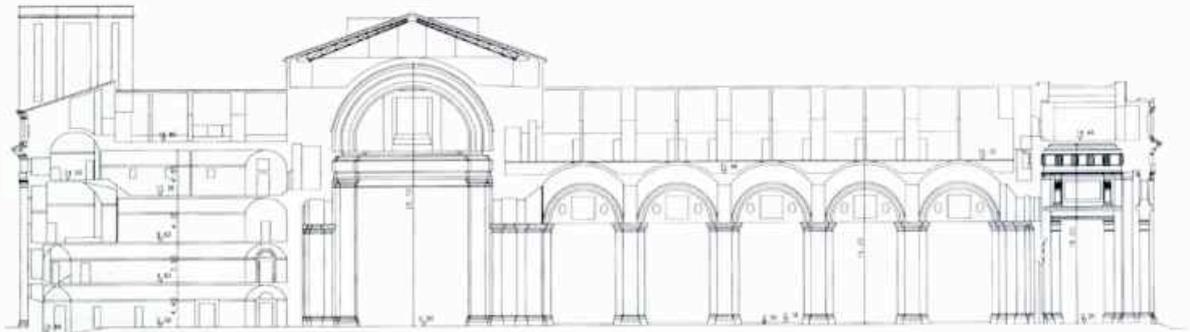


SEZIONE C-C

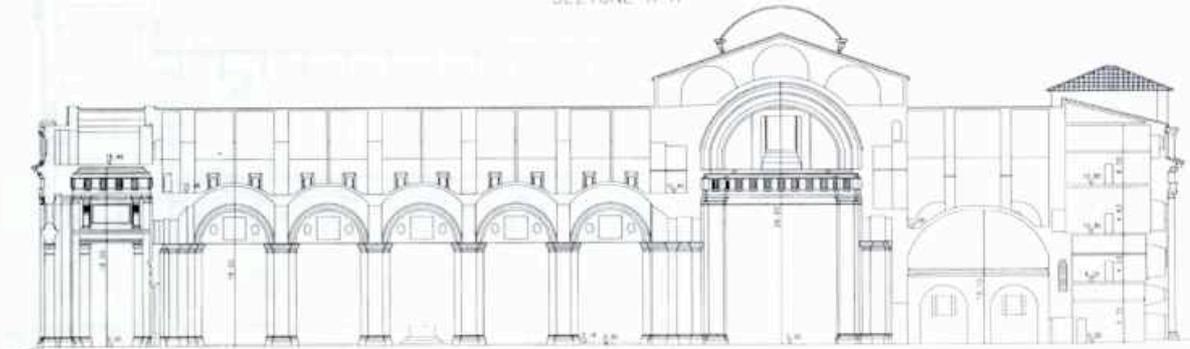


SEZIONE D-D

*Basilica di Santa Maria degli Angeli Assisi. Sezioni*



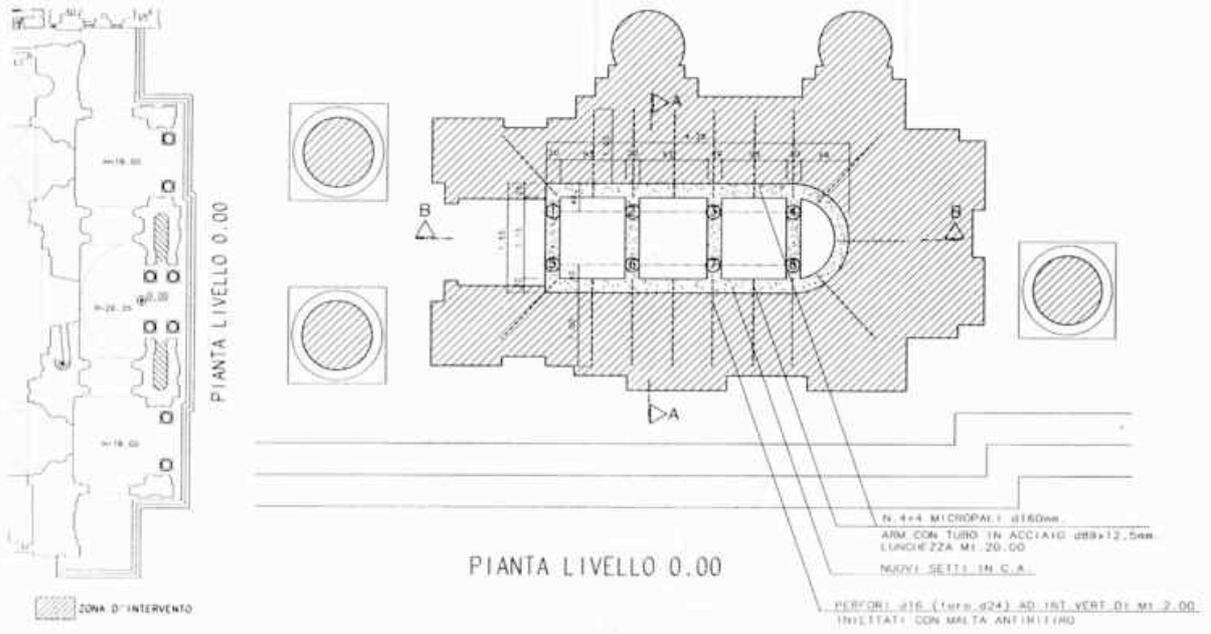
SEZIONE A-A



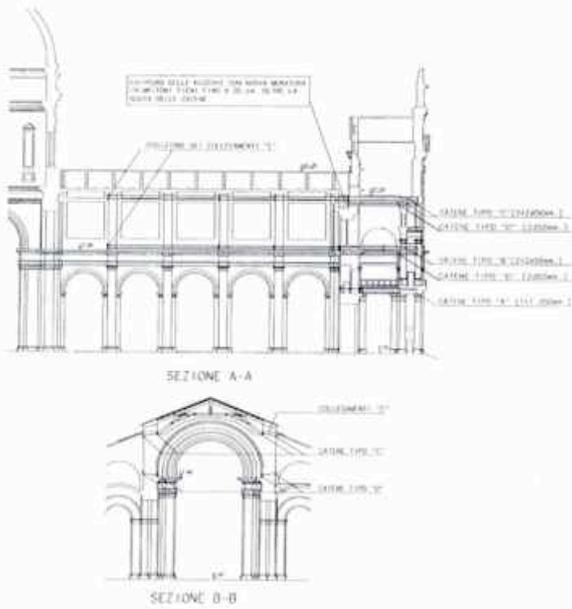
SEZIONE B-B

*Basilica di Santa Maria degli Angeli Assisi. Sezioni*

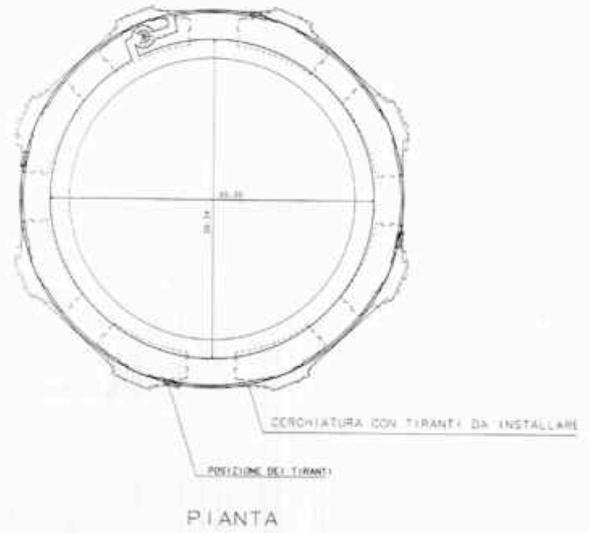




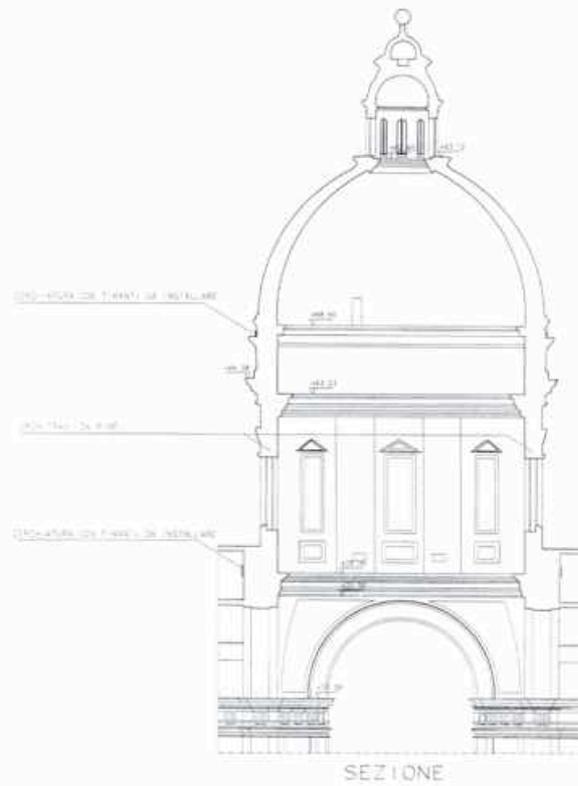
Rinforzo setti nuova facciata



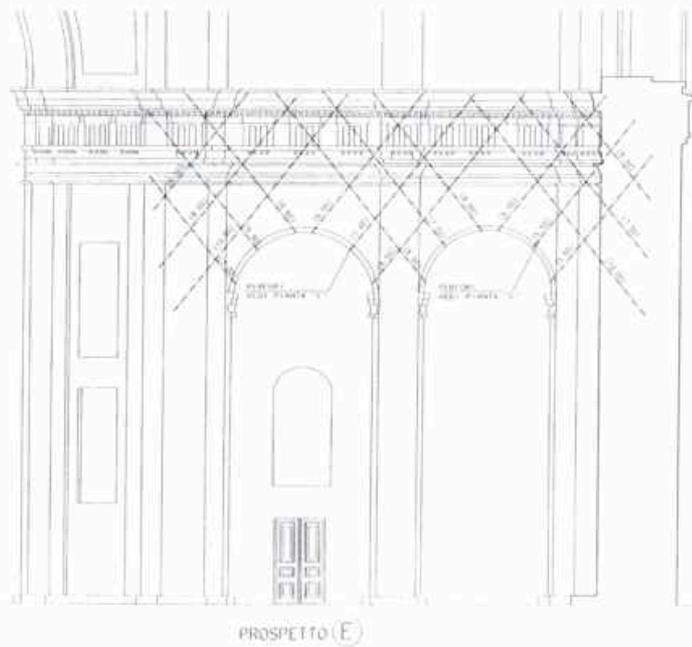
Disposizione delle catene



Interventi alla cupola



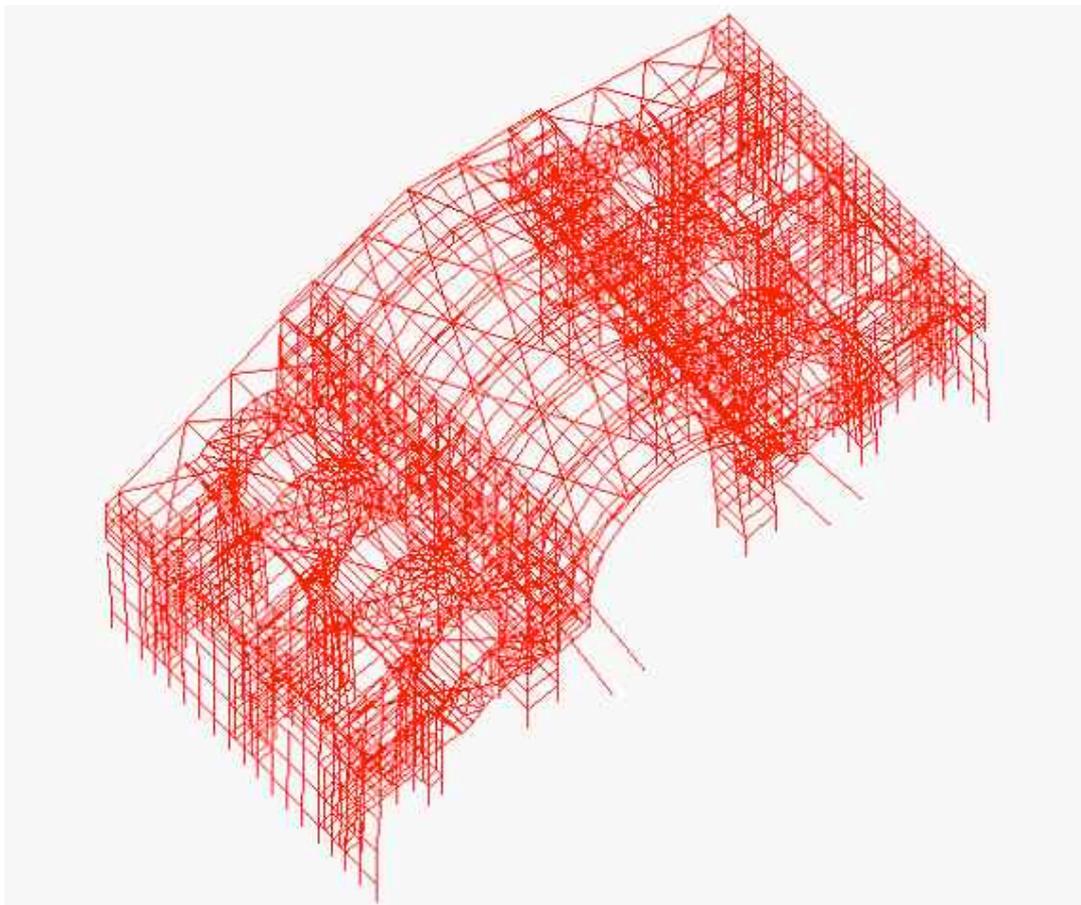
*Interventi alla cupola*



*Cucitura elevazioni transetto*



*Risposta sismica della cupola*



*Risposta sismica del corpo centrale*

