



Giovani
Ingegneri
Cuneo

A.G.I.C. - Associazione Giovani Ingegneri Cuneo
Monitoraggio Periodico e Continuo di Strutture del Patrimonio Architettonico

Monitoraggio Periodico e Continuo di Strutture del Patrimonio Architettonico

Vicoforte 15/06/2017

MONITORAGGIO STATICO E MODELLAZIONE STRUTTURALE DEL SANTUARIO «REGINA MONTIS REGALIS» DI VICOFORTE

Dott. Ing. STEFANO PONZALINO

Tesoriere A.G.I.C. – Associazione Giovani Ingegneri Cuneo



PECULIARITA' / PROBLEMATICHE STRUTTURALI

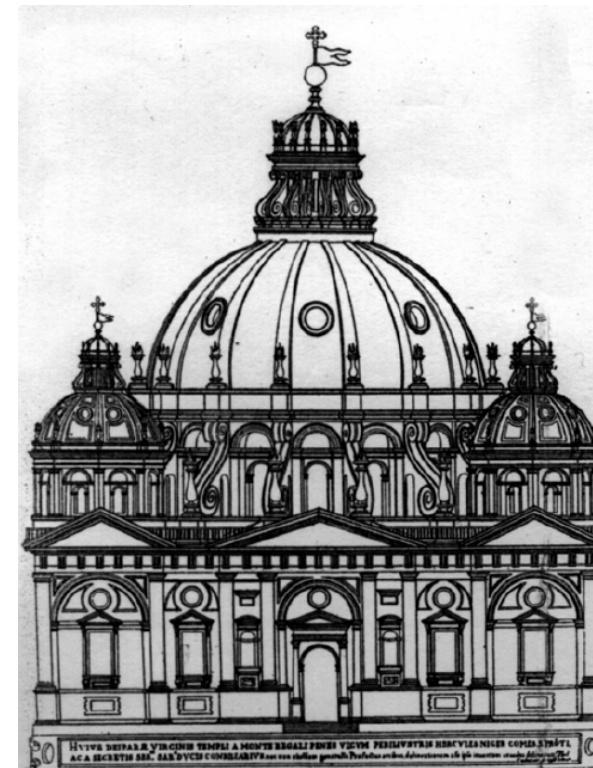
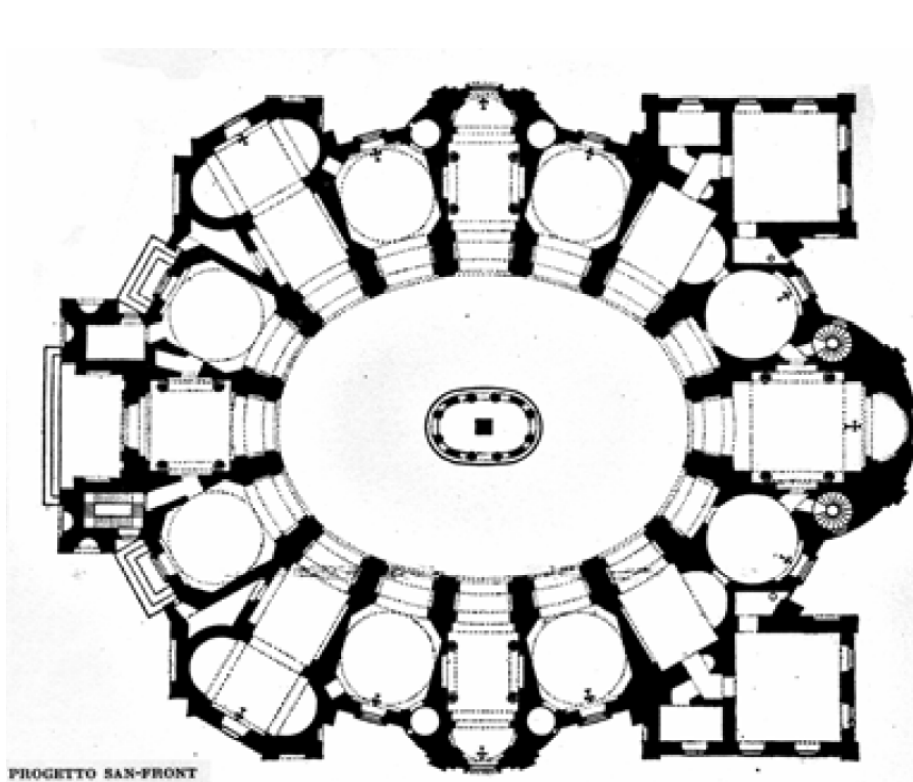
- Piu' grande cupola ellittica in muratura al mondo. (37.23mx24.89m)
- Grandi aperture nella cupola e nel tamburo
- Cedimenti differenziali suolo di fondazione



COSTRUZIONE DELLA BASILICA

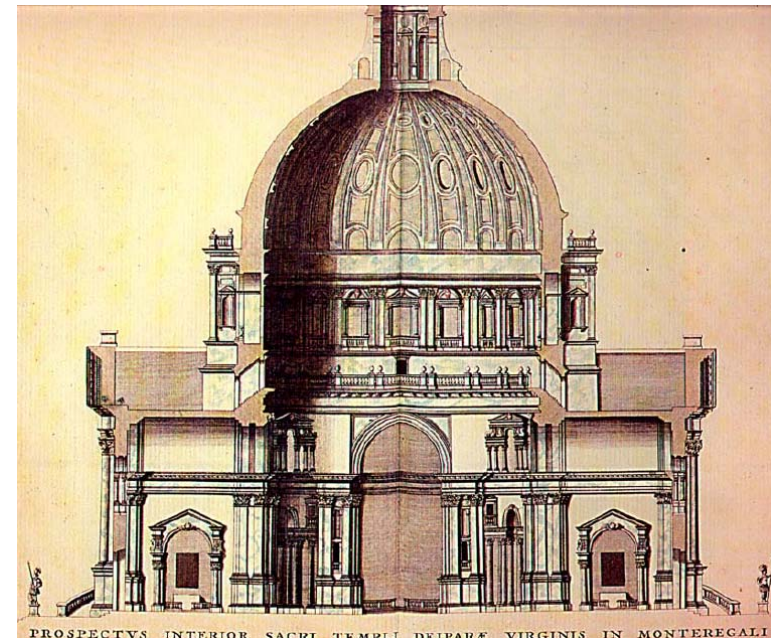
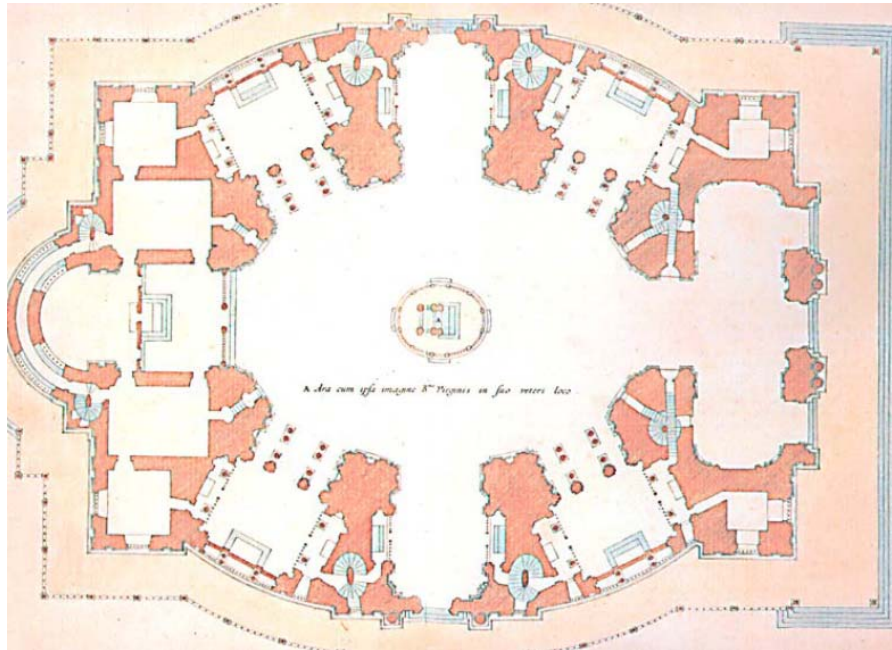
- 1596 Posa prima pietra, progetto Ascanio Vittozzi,
- 1615 Morte del Vittozzi e sospensione cantiere,
- 1615-1701 Costruzione procede a rilento,
- 1701 Incarico all'arch. Francesco Gallo,
- 1710 Risultano terminate le otto trifore,
- 1722 Comincia costruzione del «Ponte Reale» fino al 1730,
- 1730-1731 Sospensione lavori per far consolidare il terreno prima di iniziare la costruzione della cupola,
- 1735 Termine realizzazione cupola (Copertura in tegole).
- Inizio 1800 Prime lesioni nella cupola e nel tamburo
- 1825 Arch. Bonsignore completa la facciata principale

COSTRUZIONE DELLA BASILICA



Progetto **Ercole Negri**, Santuario di Vicoforte

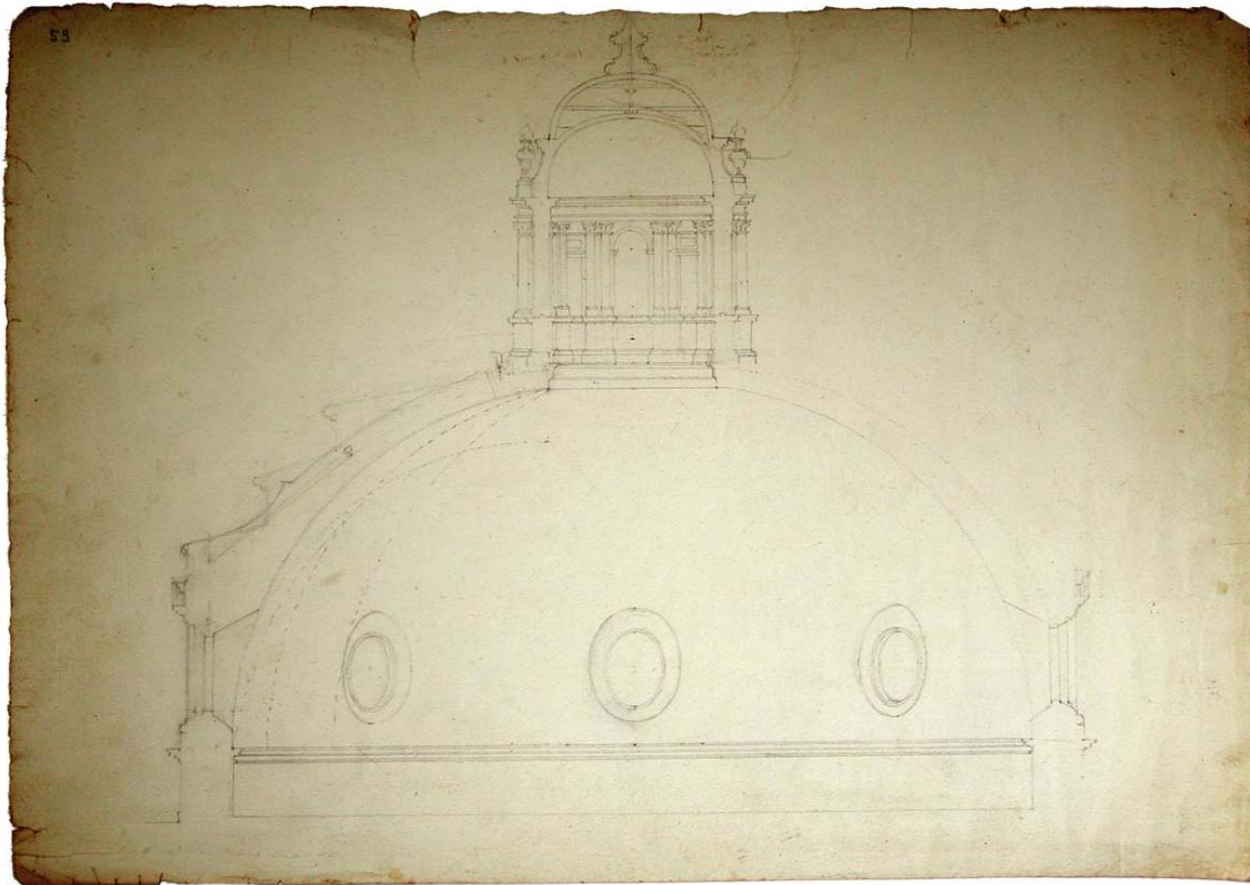
COSTRUZIONE DELLA BASILICA



Theatrum Sabaudiae, Santuario di Vicoforte

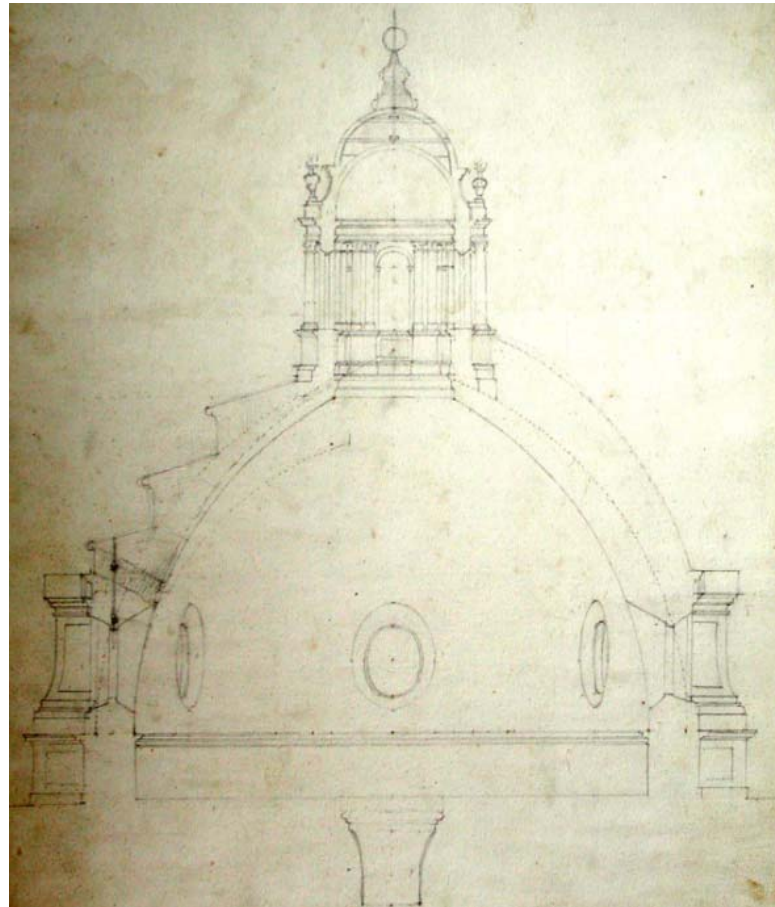


COSTRUZIONE DELLA BASILICA



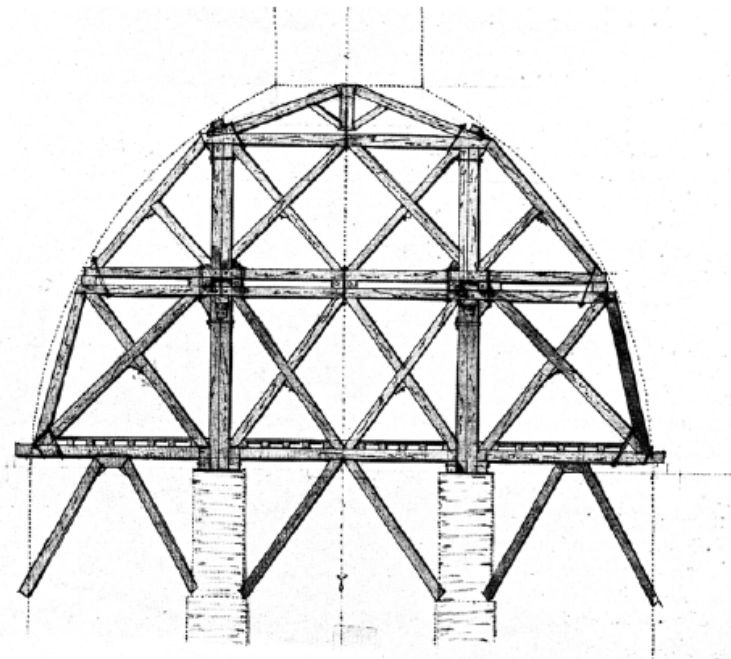
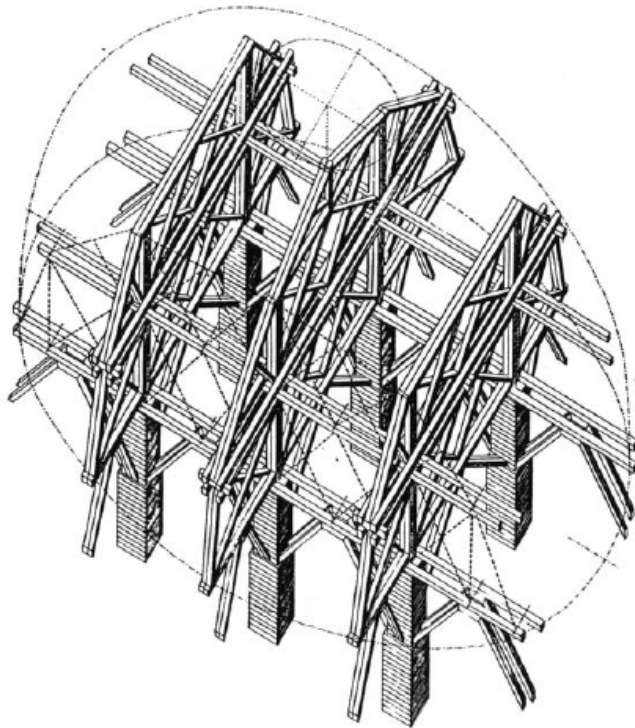
Progetto Cupola Arch. Gallo, Santuario di Vicoforte

COSTRUZIONE DELLA BASILICA



Progetto Cupola Arch. Gallo, Santuario di Vicoforte

COSTRUZIONE DELLA BASILICA



«Ponte Reale», Santuario di Vicoforte



Giovani
Ingegneri
Cuneo

A.G.I.C. - Associazione Giovani Ingegneri Cuneo
Monitoraggio Periodico e Continuo di Strutture del Patrimonio Architettonico

INDAGINI ED INTERVENTI SULLA BASILICA

MODELLAZIONE STRUTTURALE E MONITORAGGIO STATICO DEL SANTUARIO «REGINA MONTIS REGALIS» DI VICOFORTE

Tesoriere A.G.I.C. - Dott. Ing. STEFANO PONZALINO

Vicoforte 15/06/2017

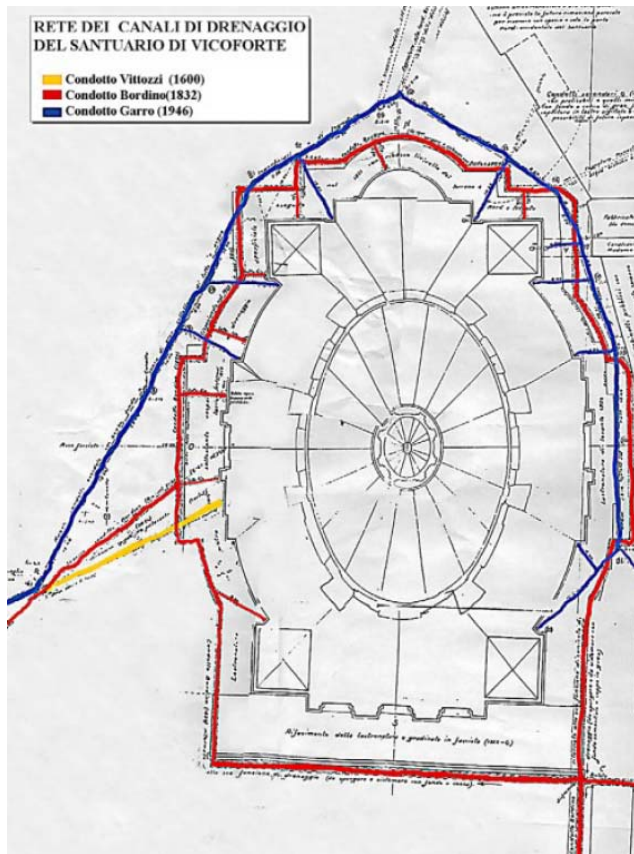


INDAGINI ED INTERVENTI SULLA BASILICA

1832 – Ing. Bordino, condotto di drenaggio acque, sottomurazione della facciata principale (eretta nel 1827) in seguito a fessurazioni nelle volte dell'atrio.



INDAGINI ED INTERVENTI SULLA BASILICA



Già dalle prime fasi costruttive vennero realizzati dei **canali drenaggio** al fine di limitare l'evolversi dei cedimenti, il sistema di drenaggio venne più volte ampliato e migliorato :

- Vittozzi (giallo) 1600
- Bordino (rosso) 1832
- Garro (blu) 1946

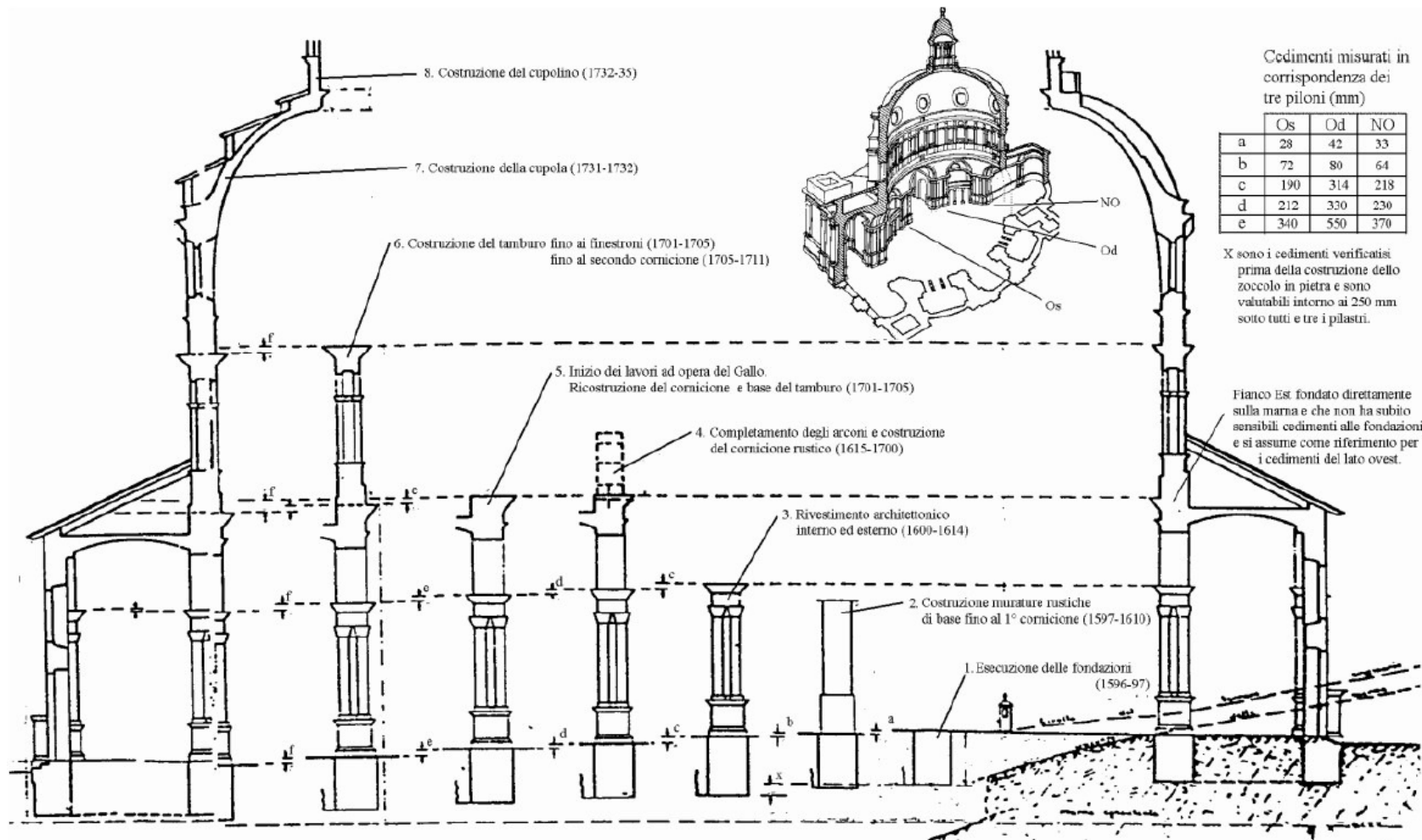


INDAGINI ED INTERVENTI SULLA BASILICA

1935-1962 – Ing. Garro, approfondito rilievo dello stato deformativo e fessurativo. Determinazione dell'entità dei cedimenti nel tempo. Installazione prime spie per monitoraggio fessurazioni nella cupola e nel tamburo. Rileva la presenza e verifica integrità della cerchiatura originale. Prima proposta di intervento riguardante l'inserimento di una nuova cerchiatura.

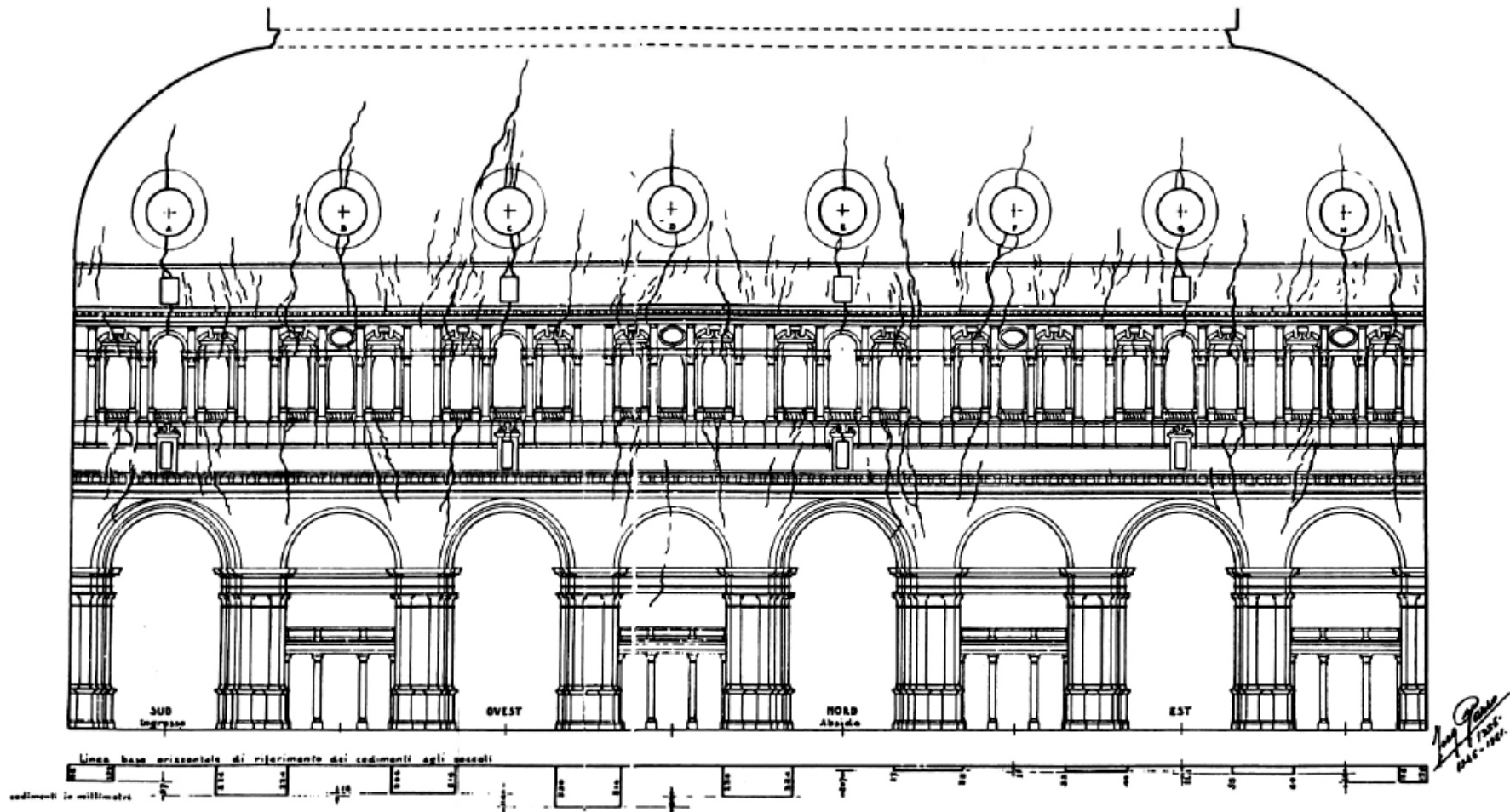


FASI COSTRUTTIVE ED EVOLUZIONE DEI CEDIMENTI (Garro 1962)





QUADRO FESSURATIVO (Garro 1962)





INDAGINI ED INTERVENTI SULLA BASILICA

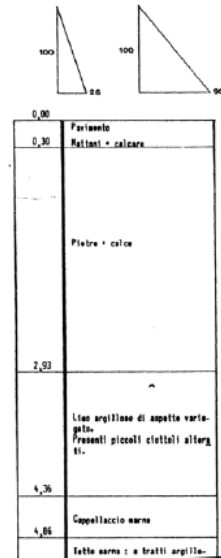
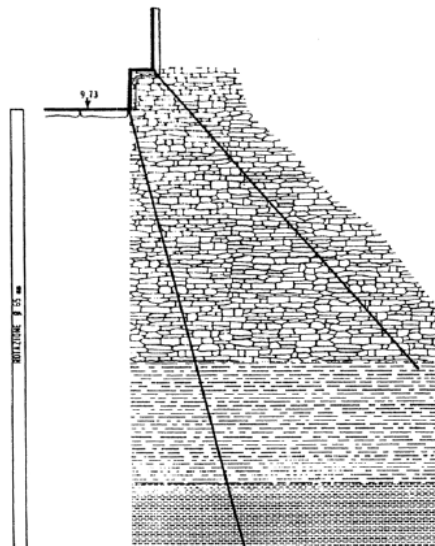
1975 – Società Rodio - Ing. Bernasconi.
Indagini geotecniche, volte a determinare la stratigrafia del suolo di fondazione e la profondità imposta fondazioni. **Rilievo** geometria cupola tramite **fotogrammetria**. **Monitoraggi** lesioni principali. Indagine di calcolo e **verifica strutturale** della cupola.



INDAGINI GEOTECNICHE (Rodio, 1976)

- 14 sondaggi per determinazione della stratificazione dei terreni,
- 29 sondaggi per determinazione della posizione del piano di imposta delle fondazioni

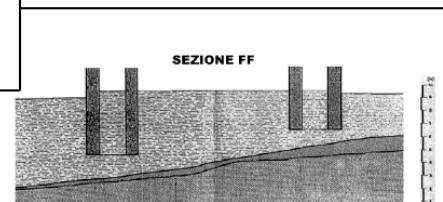
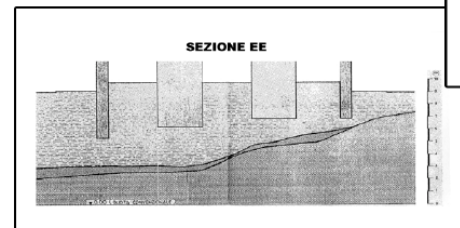
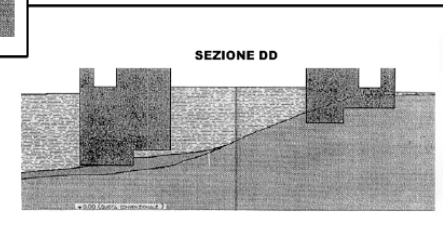
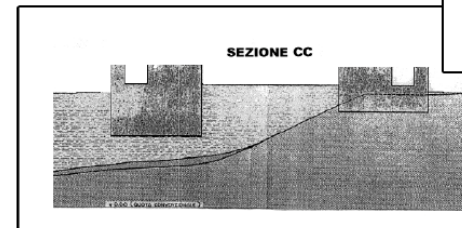
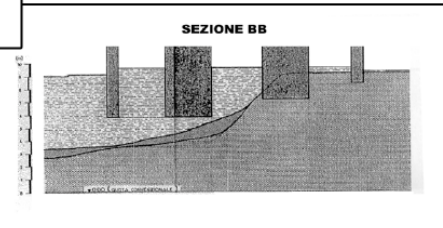
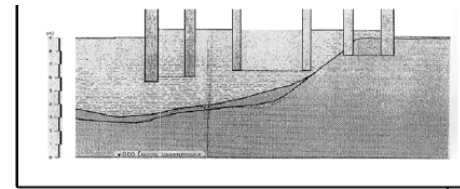
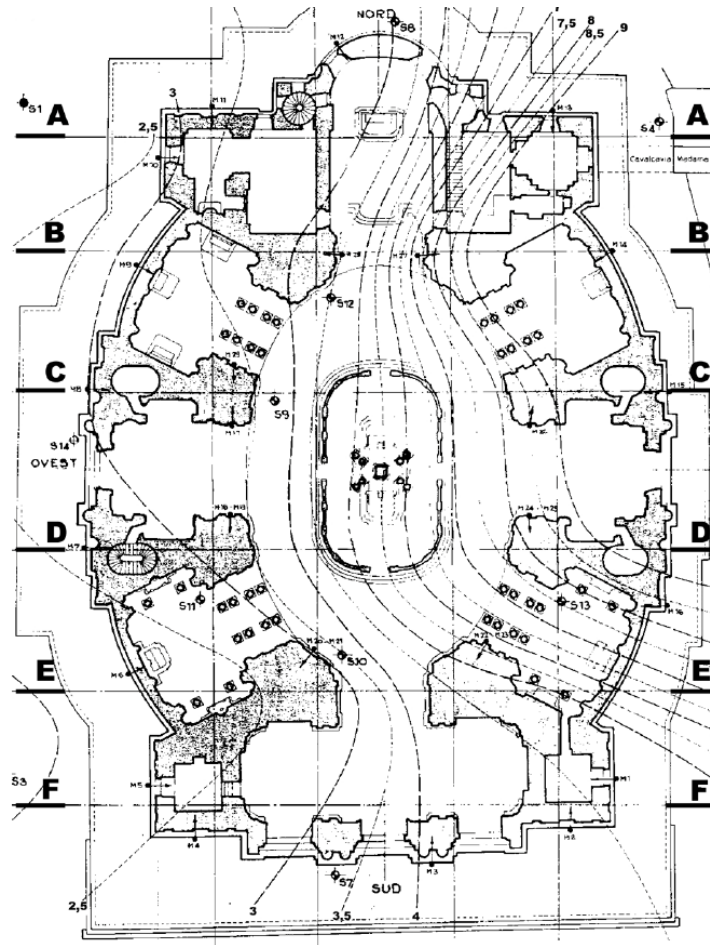
Ing. G. RODIO & C. - S.p.A.
SEZIONE GEOTECNICA
RF. N. L. 2539
SOPRINTENDENZA AI MONUMENTI DEL PIEMONTE
SANTUARIO DI VICOFORTE TAV. 37
CAROTTAGGIO MURATURA M22 - M23



Rodio		SOPRINTENDENZA AI MONUMENTI DEL PIEMONTE SANTUARIO DI VICOFORTE RF. L. 2539 TAV. 4		SONDAGGIO S 3		Inizio : 1/1/76 Terminato : 3/1/76	
Sezione copricarica		Campioni		Piano in sito		Piano in laboratorio	
Profondità m s.l.m.	Profondità m s.c.	Descrizione terreno attraversato	HP	Profondità m s.l.m.	Profondità m s.c.	Valore Test (kg/cm ²)	Profondità m s.l.m.
0.00	0.00						
2.00	2.00						
3.00	3.00						
4.00	4.00						
5.00	5.00						
6.00	6.00						
7.00	7.00						
8.00	8.00						
9.00	9.00						
10.00	10.00						
11.46	11.46						



INDAGINI GEOTECNICHE (Rodio, 1976)





INDAGINI GEOTECNICHE (Rodio, 1976)

Dagli studi emerge come l'argilla abbia raggiunto il suo limite di consolidamento pertanto, a meno di anomalie dei carichi causate da eventi eccezionali non vi è ragione di temere lo sviluppo di ulteriori cedimenti.



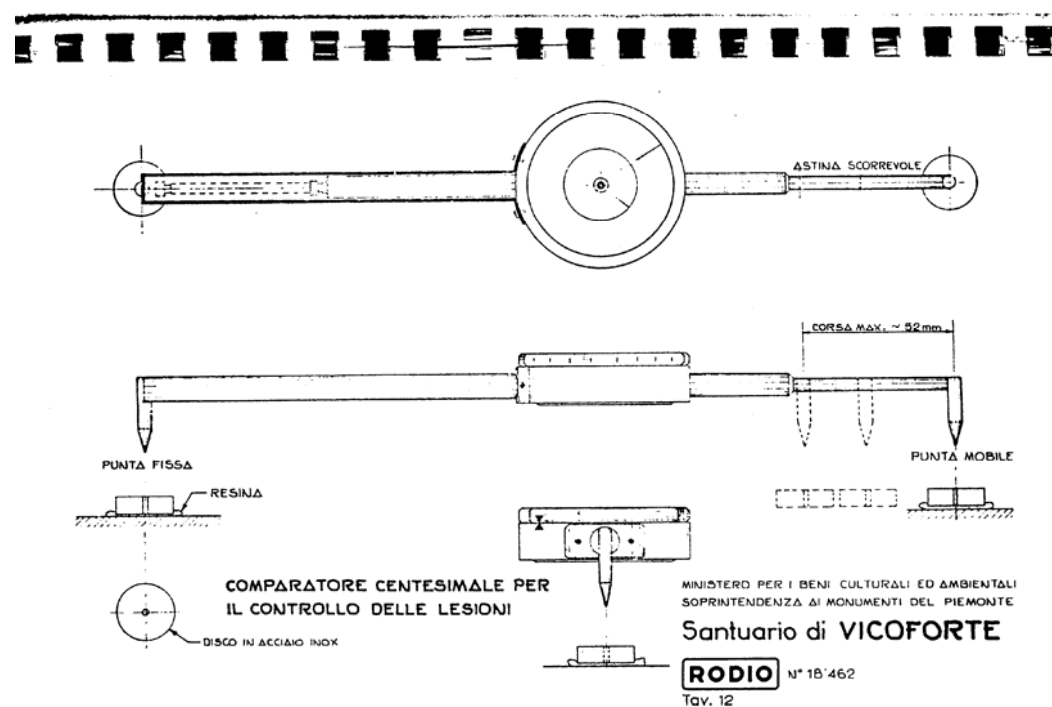
MONITORAGGI (Rodio-Bernasconi 1976)

Primo monitoraggio con strumenti di precisione e per lasso di tempo adeguato in corrispondenza delle principali lesioni.

Estensimetri elettrici abbinati a **sonde di temperatura** permettono a partire dal 1976 di verificare come gli unici **movimenti** sono legati a **fenomeni termici** e di come non vi siano significative deformazioni in senso assoluto

MONITORAGGI (Rodio-Bernasconi 1976)

Misura **diretta**, su basi di misura



MONITORAGGI (Rodio-Bernasconi 1976)

Misura **automatica**, con registrazione



Per controllare i movimenti della grande lesione sulla parte Ovest, era stato realizzato un sistema di **misura automatica con registrazione**.

La misura automatica era data da una **coppia** di **traduttori** di spostamento disposti in modo da rilevare **due componenti del movimento**, una sulla direzione della lesione (trasduttore T2) ed una ortogonale (trasduttore T1).



MONITORAGGI (Rodio-Bernasconi 1976)

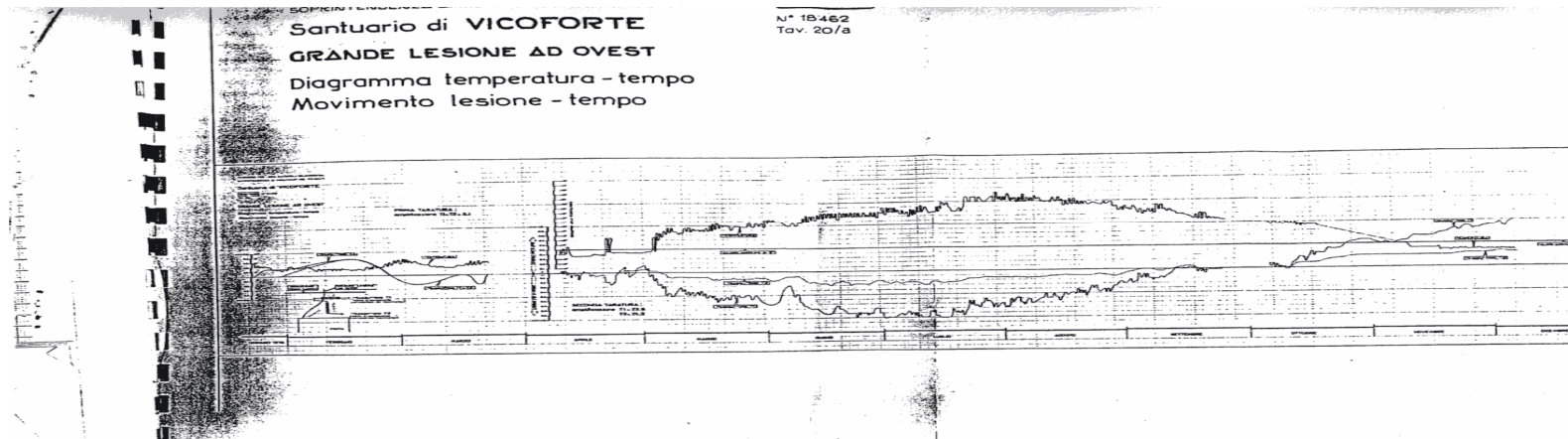
Misura automatica, con **registrazione**

La registrazione era affidata ad un registratore a punti NSK-W.H. Joens & Co-GMBH-Dusseldorf con sistema di misura galvanometrico allestito per il **tracciamento di 6 curve**. Collegando ogni segnale (due trasduttori ed un sensore di temperatura) a due morsetti si otteneva una doppia battuta della punta di un archetto-indice su un nastro inchiostroato posto sopra la carta stampata scorrevole.



MONITORAGGI (Rodio-Bernasconi 1976)

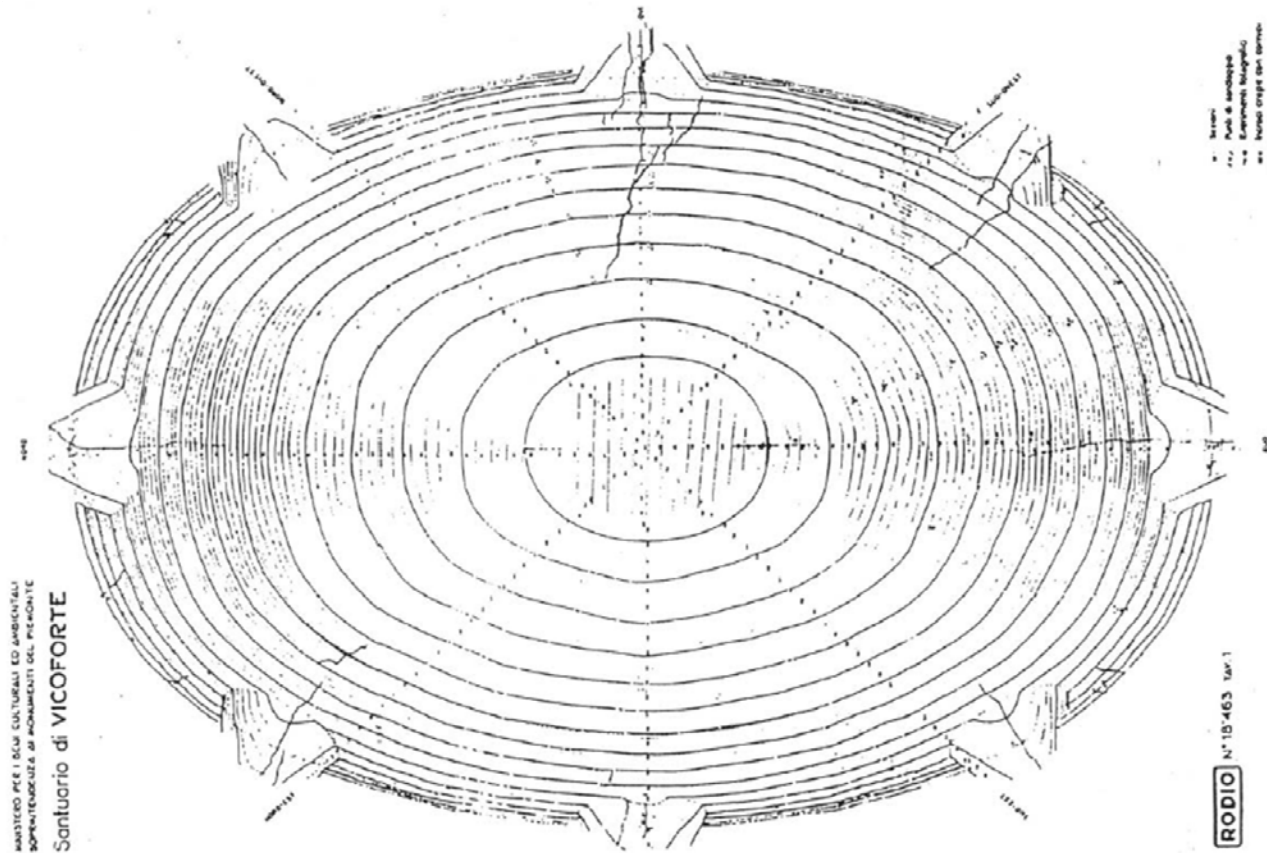
Misura automatica, con **registrazione**



La **battuta** dell'archetto si ripeteva ogni **20"** e la carta scorreva ad una velocità di 1 cm all'ora; il **rotolo** era da 30m e durava circa **120 giorni**.



RILIEVO FOTOGRAMMETRICO CUPOLA (Bernasconi 1976)





PRIMO MODELLO FEM (Bernasconi 1976)

Analisi Elastica, Codice **E.A.S.E. 2** (Elastic Analysis for Structural Engineering) presso il centro Fides di Zurigo ad opera di Bernasconi e Marchini.

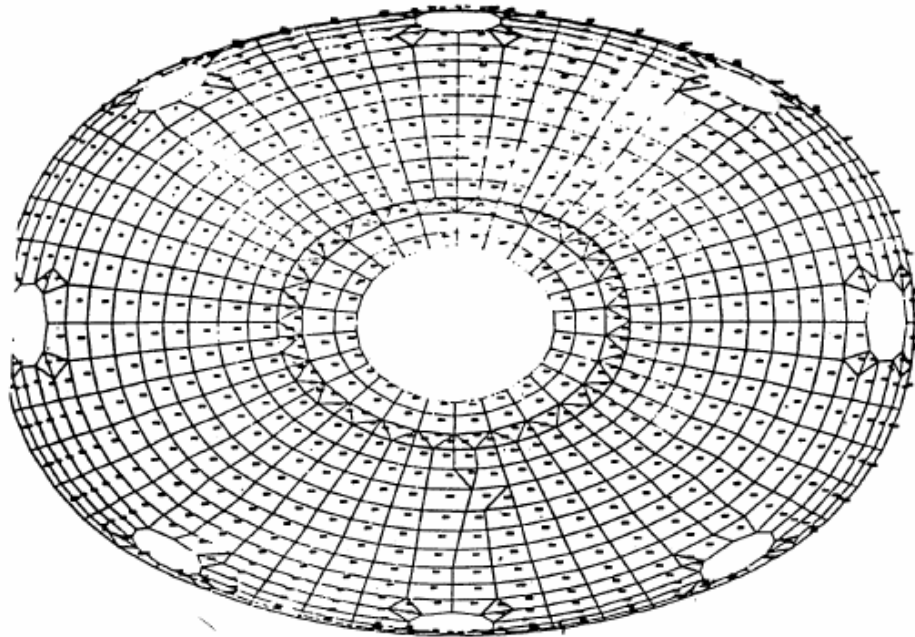
Costruito sulla base del rilievo fotogrammetrico e geometrico.

Elementi finiti bidimensionali, funzioni di forma polinomiali di terzo grado per aspetti flessionali e lineari per spostamenti nel piano.

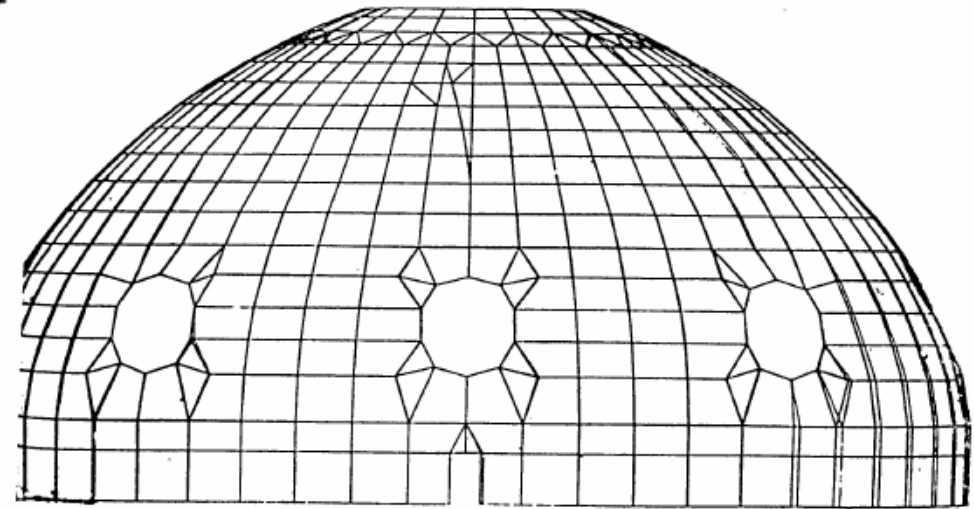
Ipotesi di **vincolo rigido alle imposte**.



PRIMO MODELLO FEM (Bernasconi 1976)



$$\begin{aligned}\gamma &= 1700 \text{ kg/m}^3 \\ E &= 14000 \text{ kg/cm}^2 \\ \nu &= 0.39 \\ \alpha &= 0.00008\end{aligned}$$





PRIMO MODELLO FEM (Bernasconi 1976)

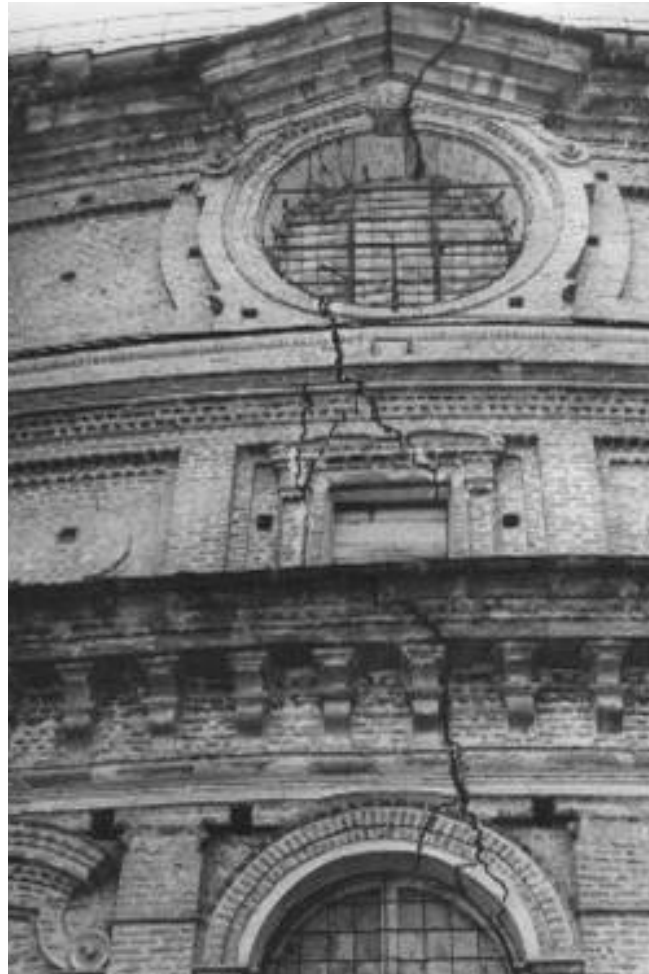
Presenza di **trazioni** presso più tangenziali al perimetro distribuite nelle zone **sovrastanti** le **aperture** finestrate.

Tensioni di trazione nel modello a base fissa dell'ordine di 1.5 kg/cm²

Viene svolto il calcolo considerando un **cedimento** dell'imposta variabile. **Stato tensionale complesso** con tensioni di **trazione** che arrivano ad **8 kg/cm²**



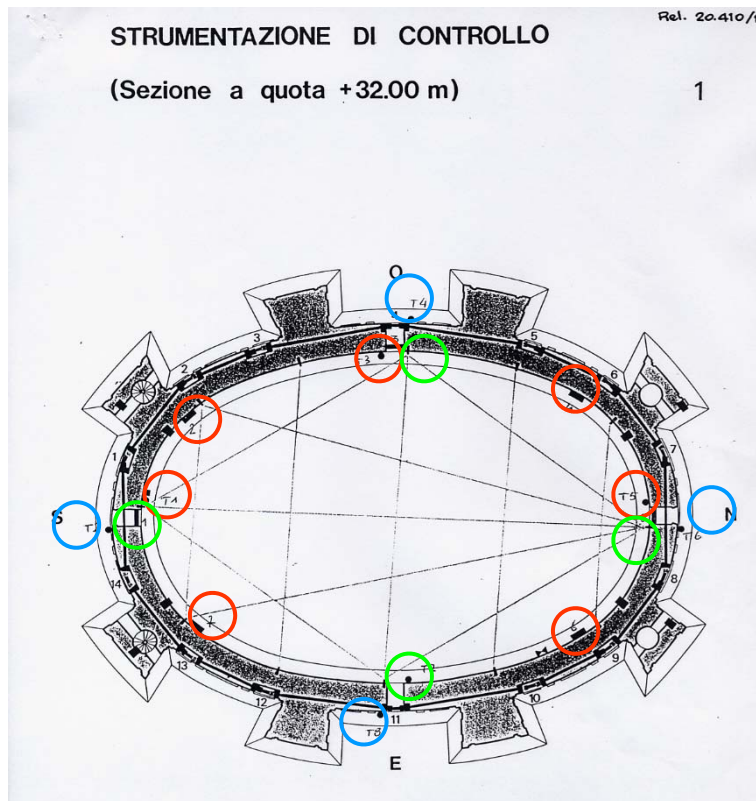
LESIONE SUL LATO OVEST ANTE INTERVENTO





POTENZIAMENTO SISTEMA DI MONITORAGGIO (1983)

Aggiunta di ulteriori 10 sonde di temperatura ed 8 sensori di spostamento collegate a registratori continui su carta diagrammata.



7 – Trasduttori di spostamento potenziometrici nel tamburo alla base della cupola.

4 – Sonde di temperatura ambientali interne

4 – Sonde di temperatura ambientali esterne



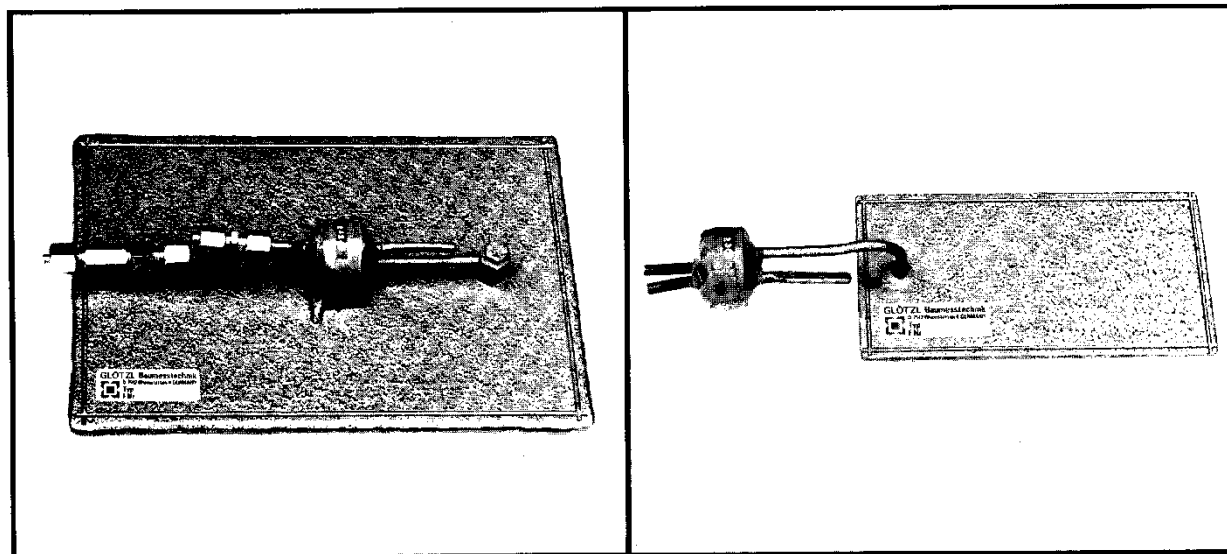
POTENZIAMENTO SISTEMA DI MONITORAGGIO (1983)

Inserimento di 20 celle di pressione idrauliche GLOTZL

Earth pressure cells

The oil filled earth pressure cells have a favourable height/diameter factor of 0,1 – 0,5. Thus the modulus error is limited caused by the modulus of the cell and that of the surrounding materials. The cells can be operated pneumatically or hydraulically. The granulation diameter shall not be more than 1/10 of the pressure pad diameter resp. its length, otherwise the ellipsoid installation method has to be chosen.

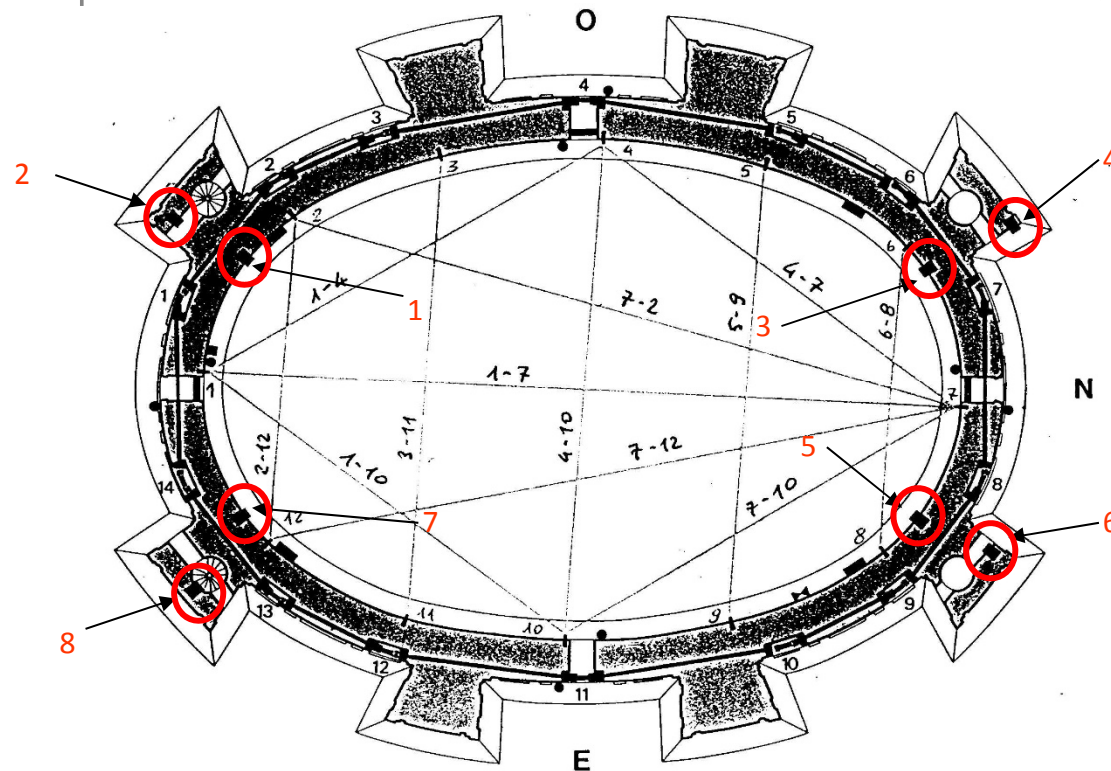
see report I Schober
report VII Hillmer
these Prager



POTENZIAMENTO SISTEMA DI MONITORAGGIO (1983)

4 celle sono posizionate in orizzontale sul lembo interno del tamburo, a quota +32m.

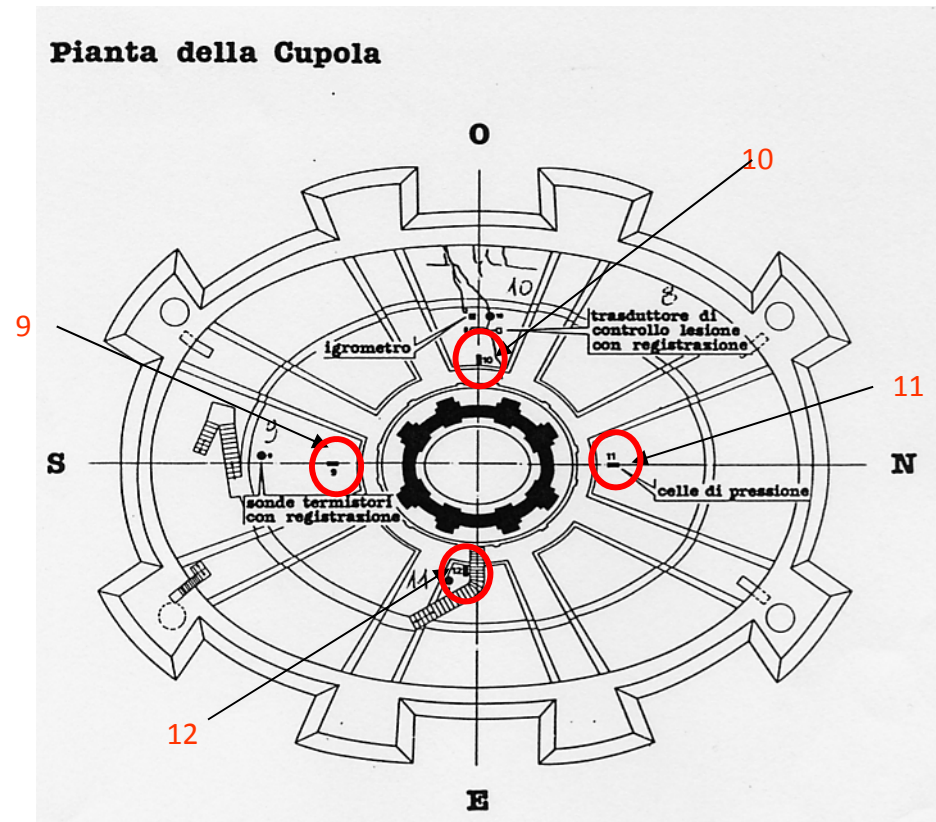
4 celle sono posizionate in orizzontale sui contrafforti, a quota +32m.





POTENZIAMENTO SISTEMA DI MONITORAGGIO (1983)

4 celle sono posizionate in verticale sull'estradosso cupola, a quota +50m.

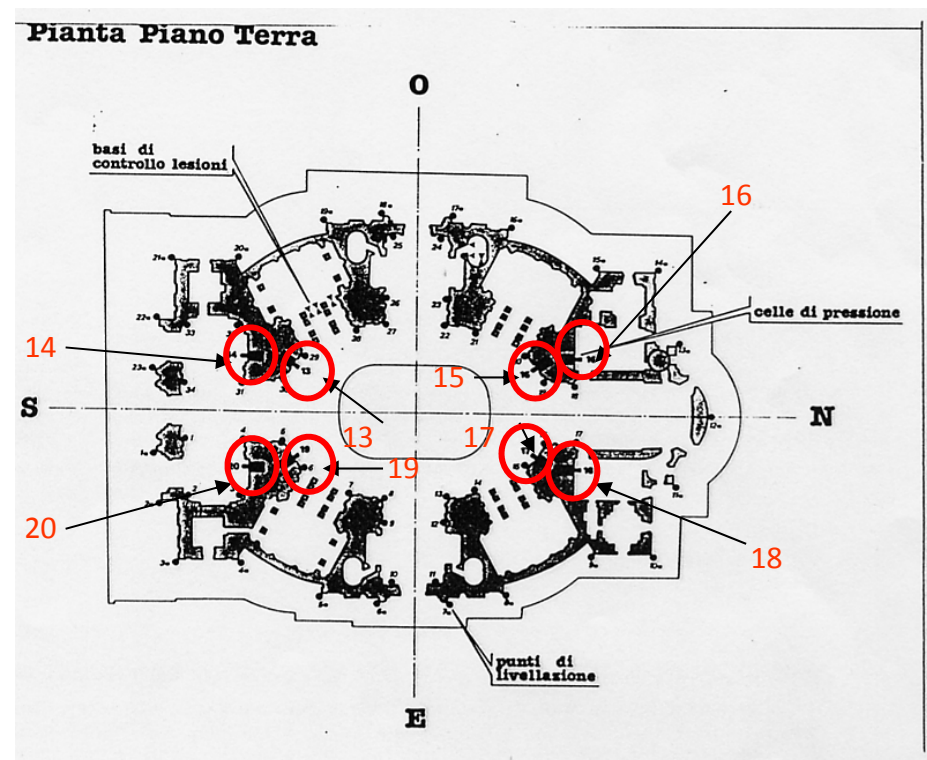




POTENZIAMENTO SISTEMA DI MONITORAGGIO (1983)

4 celle sono posizionate in orizzontale sul lembo esterno dei piloni di base, a quota +3,50m.

4 celle sono posizionate in orizzontale sul lembo interno dei piloni di base, a quota +3,50m.





PROGETTO NUOVO SISTEMA DI CERCHIAGGIO (Bernasconi 1983)

- Creare un anello alla base della cupola in modo da «**ricucire**» i vari **spicchi** separati dalle lesioni,
- Il sistema di cerchiaggio deve essere in grado di applicare **carichi differenti** in funzione della geometria ad andamento **ellittico**,
- Consentire la funzione di **giunti di dilatazione** che le lesioni principali hanno assunto nel tempo,
- **Rispetto dell'architettura** del monumento e delle decorazioni interne



NUOVO MODELLO FEM (Bernasconi 1983)

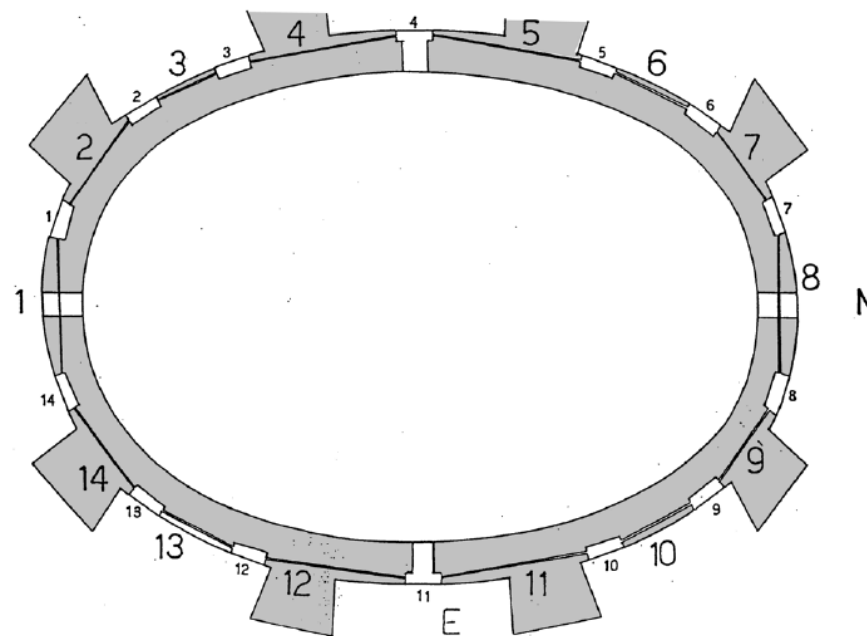
Codice di calcolo **HERCULE** – Centro di calcolo CDM di Torino

- Stesso modello geometrico del modello precedente,
- Inserimento catena rende necessario la **modifica** delle **condizioni di vincolo**. Vincolo in direzione verticale, struttura svincolata in direzione orizzontale.
- Catena simulata con elementi monodimensionali rigidamente vincolati alla struttura.
- **Precompressione** nelle barre pari al **20%** del tiro derivante dalla prima analisi pari.



NUOVO SISTEMA DI CERCHIAGGIO (Bernasconi 1985)

- 14 segmenti costituiti da 4 barre tipo **DYWIDAG $\Phi 32$** disposte all'interno di guaine $\Phi 70$ iniettate per protezione dalla corrosione.





NUOVO SISTEMA DI CERCHIAGGIO (Bernasconi 1985)

Le barre sono collegate da una serie di **profili di contrasto** inseriti in nicchie all'interno della muratura.

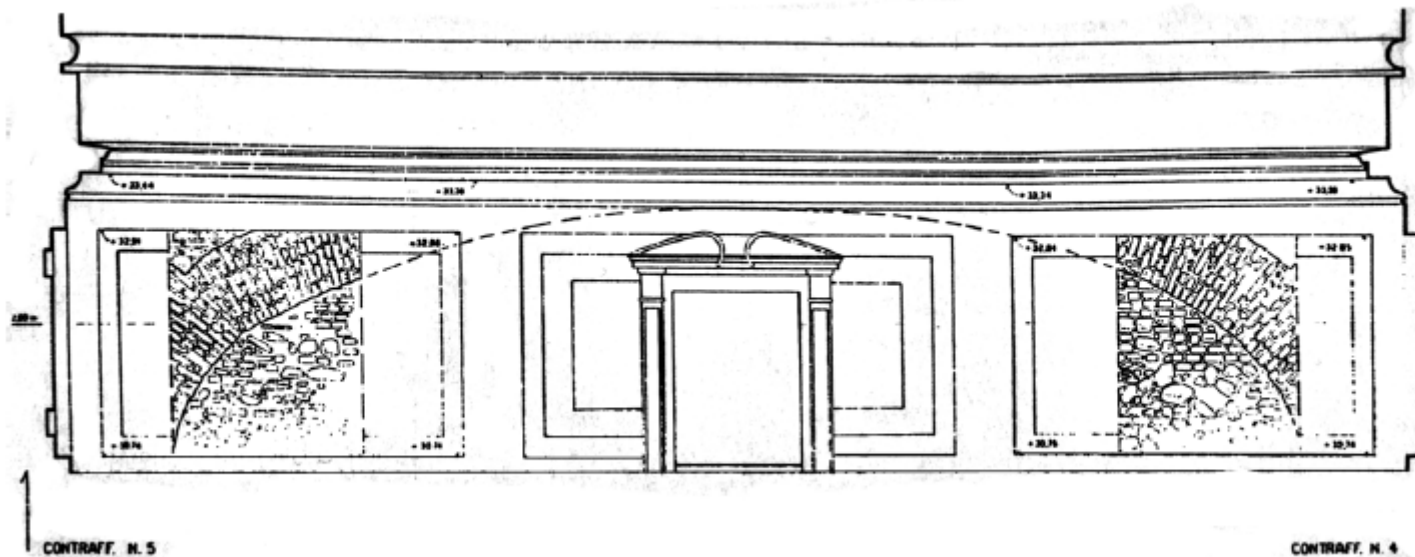
Viene svolto un **consolidamento** della muratura nelle **zone** interessate **dall'intervento** tramite iniezioni di resine epossidiche per una profondità di $\frac{3}{4}$ dello spessore del paramento al fine non danneggiare gli affreschi interni alla cupola.

Durante le operazioni di demolizione si riscontrò che la **muratura** alla **base** del **tamburo** era di tipologia «**a sacco**» con due paramenti esterni dello spessore di circa 25 cm ed un **nucleo interno** costituito di muratura e pietrame legato con **calce di scarsa resistenza**.

Viene altresì verificata la presenza di **arconi di scarico** a sesto ribassato a collegamento degli otto contrafforti.



NUOVO SISTEMA DI CERCHIAGGIO (Bernasconi 1985)



Arconi di scarico (Rilievo Abrardi)

NUOVO SISTEMA DI CERCHIAGGIO (Bernasconi 1985)



NUOVO SISTEMA DI CERCHIAGGIO (Bernasconi 1985)



56 celle di carico installate per registrare la forza di tensionamento delle barre di cerchiaggio della cupola.

Sono celle da 60t di fondo scala della ditta HUGGENBERGER di Zurigo.



NUOVO SISTEMA DI CERCHIAGGIO (Bernasconi 1985)

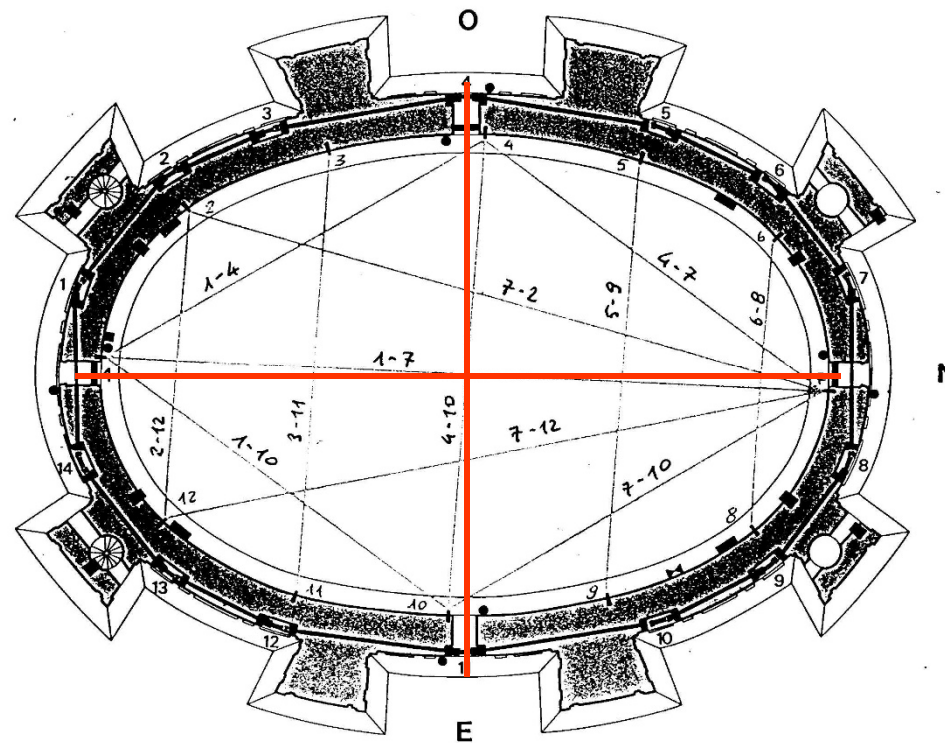
Anno 1987 – Messa in tensione delle barre in Aprile, Luglio e Novembre fino a raggiungere il 40% della tensione di progetto.

Tensione di progetto variabile tra 48 e 57 kN per singola barra.

Anno 1997 – Ri-tensionamento al carico di progetto al fine di compensare le perdite di carico registrate

MISURA CONVERGENZA

E' stato introdotto un sistema di misura degli assi principali della cupola
Si utilizzano due fili di acciaio: uno di **INVAR** ed uno di **acciaio inox** tradizionale.



MISURA CONVERGENZA

E' stato introdotto un sistema di misura degli assi principali della cupola
Si utilizzano due fili di acciaio: uno di **INVAR** ed uno di **acciaio inox**
tradizionale.





MISURA CONVERGENZA

Sono stati utilizzati **due fili** per ogni asse di **materiale diverso** per **compensare la dilatazione termica** dei fili stessi. Il filo di INVAR ha un coefficiente di dilatazione 10 volte inferiore a quello di acciaio inox. A causa della lunghezza (35 e 24 m) non è possibile conoscere la temperatura effettiva dei fili. Si può compensare giocando sulla differenza dei coefficienti di dilatazione.



MISURA CONVERGENZA

Coefficiente di dilatazione lineare di alcune sostanze

esprime numericamente l'allungamento subito da un campione di lunghezza unitaria per ogni °C di incremento di temperatura

Materiale	λ ($^{\circ}\text{C}^{-1}$)
Ferro	12×10^{-6}
Rame	17×10^{-6}
Platino	9×10^{-6}
Alluminio	24×10^{-6}
Zinco	31×10^{-6}
Bronzo	18×10^{-6}
Argento	19×10^{-6}
Oro	14×10^{-6}
Nichel	13×10^{-6}
Piombo	29×10^{-6}
Tungsteno	5×10^{-6}
Costantana (lega 45% Ni, 55% Cu)	15×10^{-6}
Invar (lega di acciaio al 36% di nichel)	0.65×10^{-6}
Vetro comune	8×10^{-6}
Vetro pyrex	3×10^{-6}
Zolfo	19×10^{-6}

Con due cavi di materiale diverso è possibile compensare l'effetto temperatura:

$$\eta_a = \eta - \alpha_a \Delta T L$$

$$\eta_i = \eta - \alpha_i \Delta T L$$

$$\eta = \left(\frac{\eta_i}{\alpha_i} - \frac{\eta_a}{\alpha_a} \right) \frac{\alpha_a \alpha_i}{\alpha_a - \alpha_i}$$

dove: α_a e α_i sono i coefficienti

dell'acciaio normale e dell'invar;

η_a e η_i sono le variazioni di lunghezza del cavo in acciaio ed in invar;

η è la variazione di lunghezza dovuta effettivamente alla variazione della misura del diametro della cupola.

LIVELLO ACQUA - PIEZOMETRI

Nel prato a Ovest del Santuario sono stati installati 3 **piezometri** ad una profondità di 10 metri per il controllo della **falda** acquifera presente sotto la fondazione e causa dei problemi del Santuario.



LIVELLO ACQUA - CISTERNA

E' presente una cisterna in cui viene convogliata l'acqua raccolta dai canali di drenaggio.



E' stata disposta una sonda ad ultrasuoni per monitorare il livello dell'acqua e se necessario attivare le pompe per la rimozione dell'acqua.





AGGIORNAMENTO SISTEMA DI MONITORAGGIO (2004)

Nell'anno 2004 viene aggiornato e **digitalizzato** il controllo del sistema di monitoraggio. Gli strumenti sono collegati ad un'**unità di acquisizione interna** e messi in rete prevedendo un **portale di accesso remoto** da cui è possibile **disporre** di tutti i **dati** relativi ai vari strumenti.

SISTEMA DI MONITORAGGIO (2004)



Antenna
UAS



Antenna
UAC



Antenna
UAP



UAS – UNITA' ACQUISIZIONE SUPERIORE

Situato alla base del tamburo, raccoglie i dati di:

56 CELLE DI CARICO,

24 TERMOMETRI,

10 FESSURIMETRI LDTV,

4 SENSORI CONVERGENZA,

Tramite un access point wireless i dati raccolti vengono trasmessi tramite un antenna alla UAC (Unità di Acquisizione Centrale)



UAP – UNITA' ACQUISIZIONE SALA POMPE

Situato nel cortile antistante il santuario, raccoglie i dati di:

3 PIEZOMETRI,

1 SENSORE LIVELLO,

2 POMPE,

Tramite un access point wireless i dati raccolti vengono trasmessi tramite un antenna alla UAC (Unità di Acquisizione Centrale)



UAC – UNITA' ACQUISIZIONE CENTRALE

raccoglie i dati di:

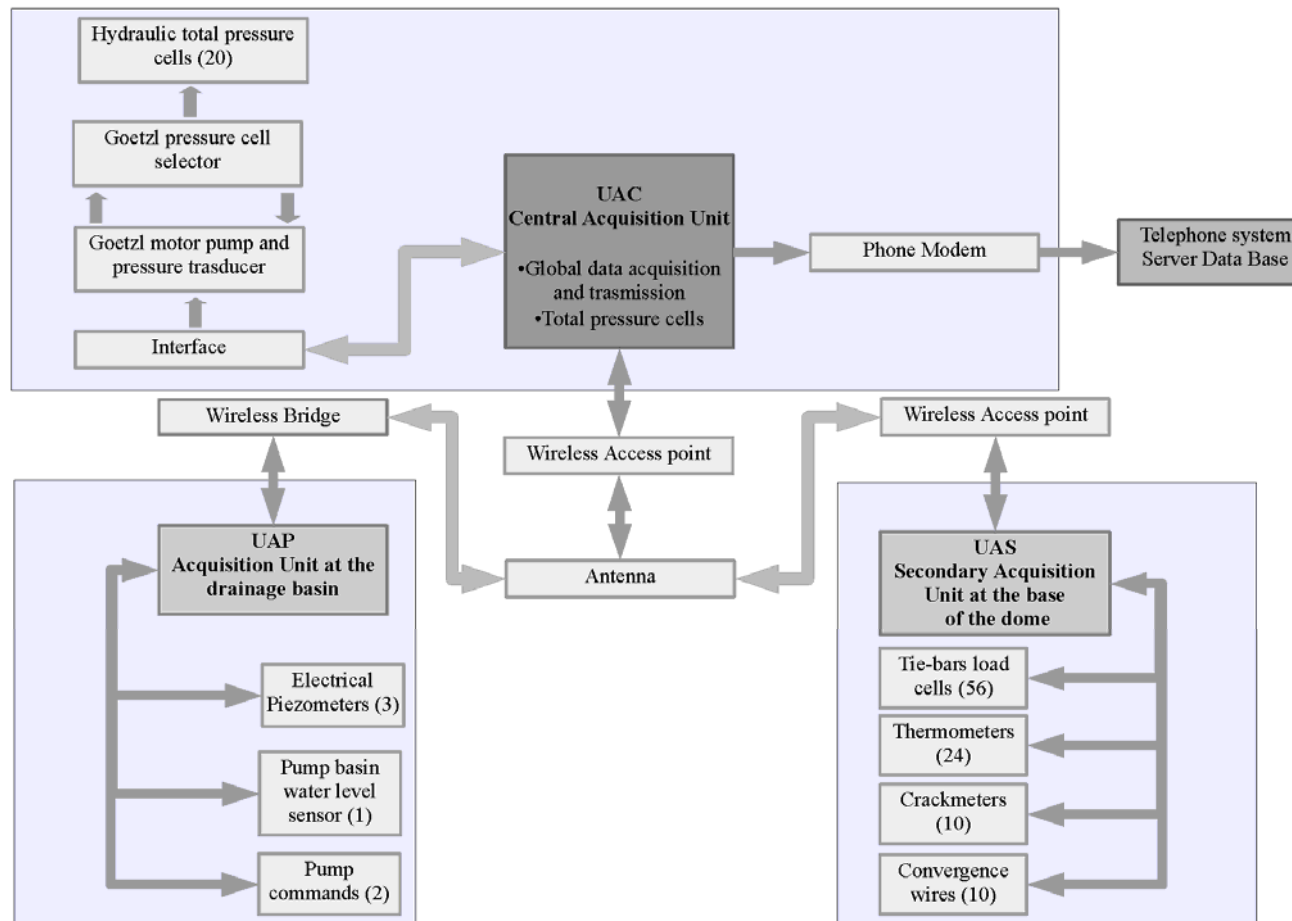
20 CELLE DI PRESSIONE IDRAULICHE,

RICEVE ED ELABORA I DATI DALLE ALTRE UNITA' DI ACQUISIZIONE

INVIA I DATI ALL'ESTERNO



SISTEMA DI MONITORAGGIO (2004)





Giovani
Ingegneri
Cuneo

A.G.I.C. - Associazione Giovani Ingegneri Cuneo
Monitoraggio Periodico e Continuo di Strutture del Patrimonio Architettonico

RACCOLTA ED ANALISI DATI DEL SISTEMA DI MONITORAGGIO

Ceravolo et al. 2016

MODELLAZIONE STRUTTURALE E MONITORAGGIO STATICO DEL SANTUARIO «REGINA MONTIS REGALIS» DI VICOFORTE

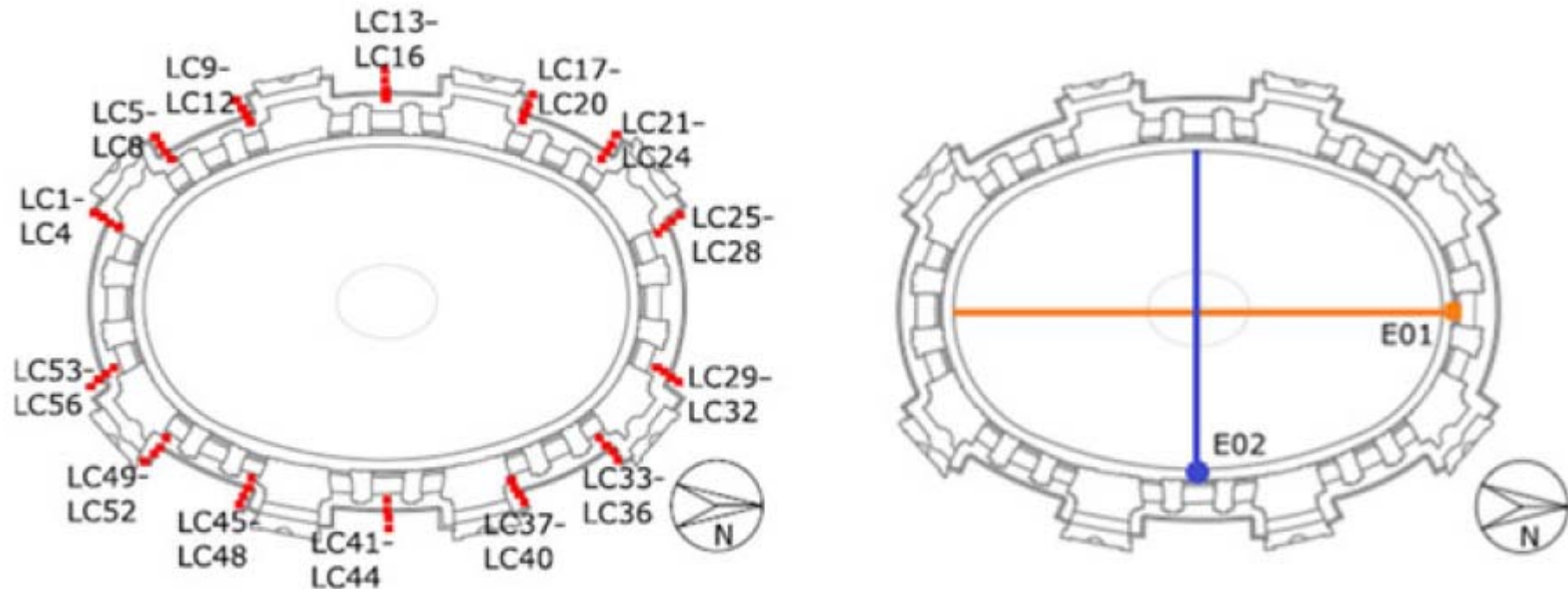
Tesoriere A.G.I.C. - Dott. Ing. STEFANO PONZALINO

Vicoforte 15/06/2017



RACCOLTA ED ANALISI DATI DEL SISTEMA DI MONITORAGGIO

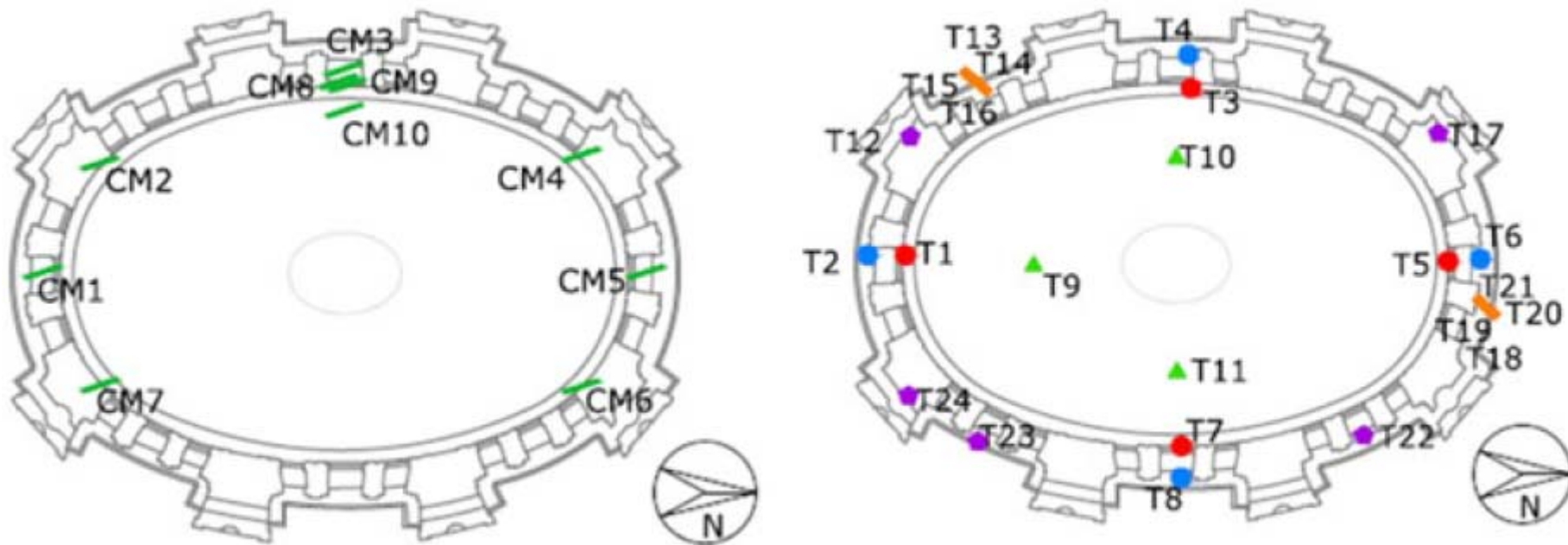
E' in seguito riportato lo schema con la numerazione in pianta dei vari strumenti. Le celle di carico (LC) e gli estensimetri atti alla misurazione degli assi della cupola (E).



Ceravolo et al. 2016

RACCOLTA ED ANALISI DATI DEL SISTEMA DI MONITORAGGIO

E' in seguito riportato lo schema con la numerazione in pianta dei vari strumenti. Gli estensimetri atti alla misurazione dell'ampiezza delle fessure (CM) ed i sensori di temperatura (T)



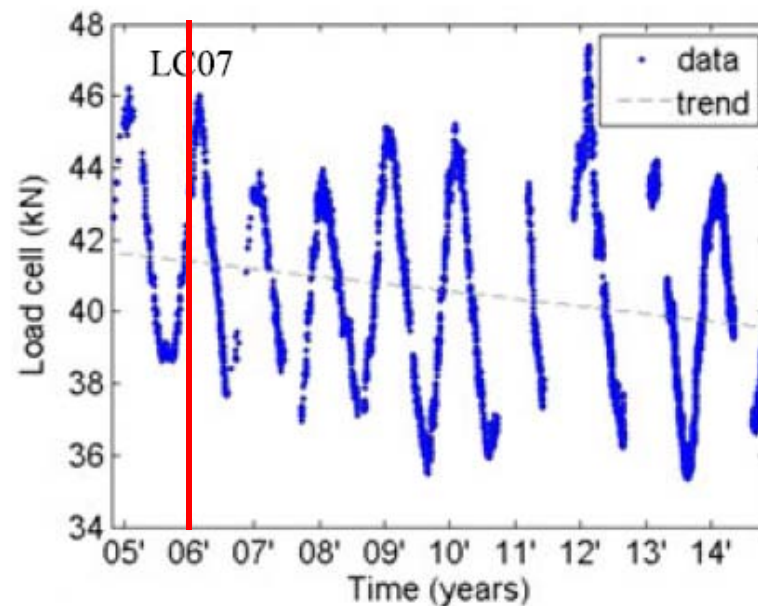
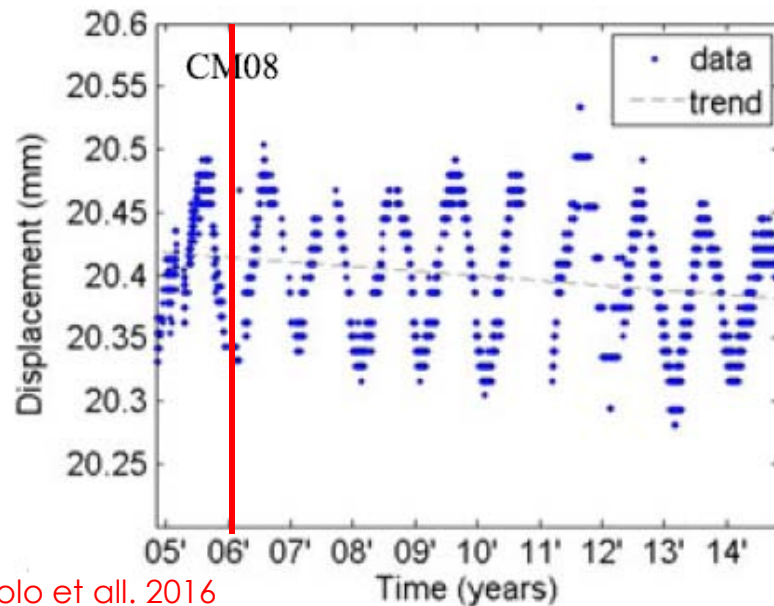
Ceravolo et al. 2016



ANALISI DEI DATI

Dai dati ricavati dagli strumenti si nota chiaramente l'effetto della variazione di temperatura stagionale.

Contrariamente a quanto intuibile l'ampiezza delle fessure diminuisce nella stagione estiva ed aumenta nella stagione invernale. Ciò è dovuto all'andamento della tensione all'interno delle barre di cerchiaggio.

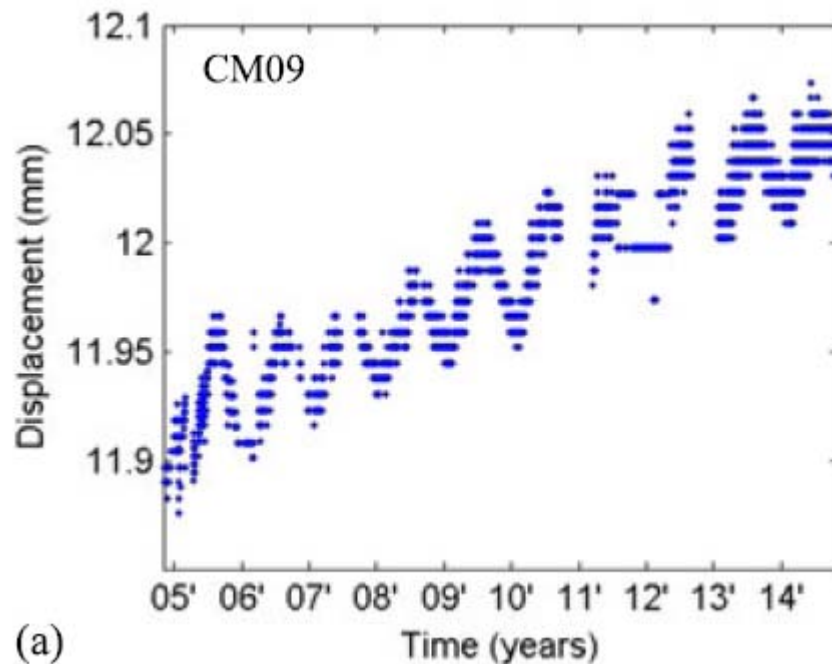


Ceravolo et al. 2016



ANALISI DEI DATI

In seguito è riportato il diagramma del sensore CM09, quello in cui l'evoluzione dell'ampiezza delle fessure risulta maggiormente rilevante.



L'incremento annuo è pari a:

$$D = 0.013 \text{ mm/anno}$$

Ceravolo et al. 2016

ANALISI DEI DATI

Confrontando il trend ottenuto con i dati di altre strutture storiche monitorate si ha:

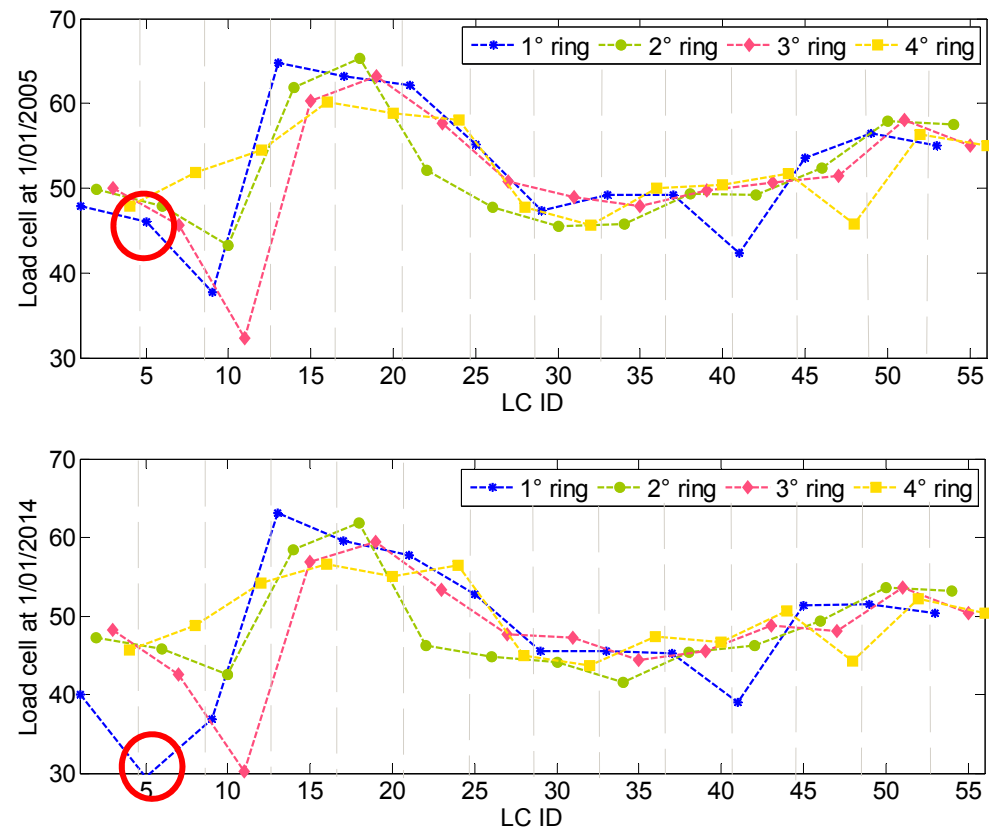
	Regina Montis Regalis	Santa Maria del Quartiere	Basilica di San Marco	Santa Maria del Fiore
Geometry	Oval dome, main axes 37.23 m and 24.89 m	Hexagonal dome, inscribing circle 20 m	Circular dome, diameter 12.5 m	Octagonal dome, inscribing circle 42 m
Annual trend	0.013 mm/year	0.8 mm/year	0.42 mm/year	0.08 mm/year

Si evince come l'evolversi dell'ampiezza delle fessure sia tutto sommato limitata e non desti particolare preoccupazione.

Ceravolo et al. 2016

ANALISI DEI DATI

In seguito è riportato il confronto tra le forze misurate nelle celle di carico negli anni 2005 e 2014

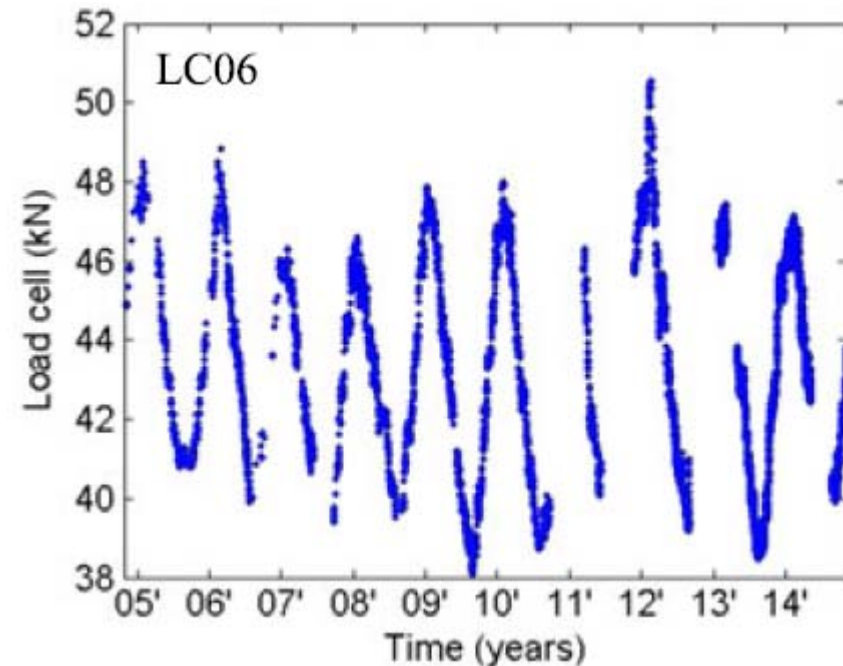
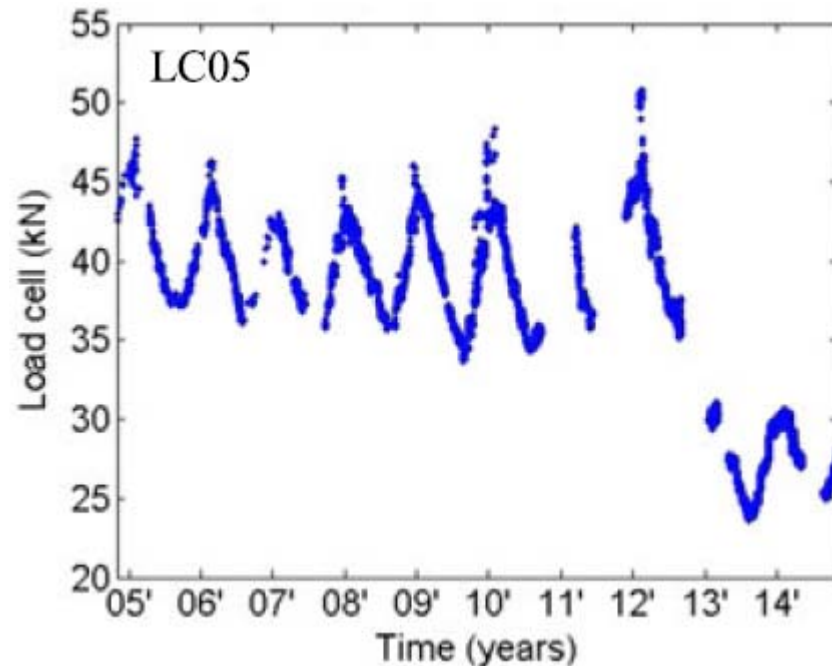


Ceravolo et al. 2016



ANALISI DEI DATI

Si ha un'improvvisa perdita di carico nella barra LC05, come mostra il grafico seguente. A fianco è riportata la time history della cella LC06 adiacente alla LC05.

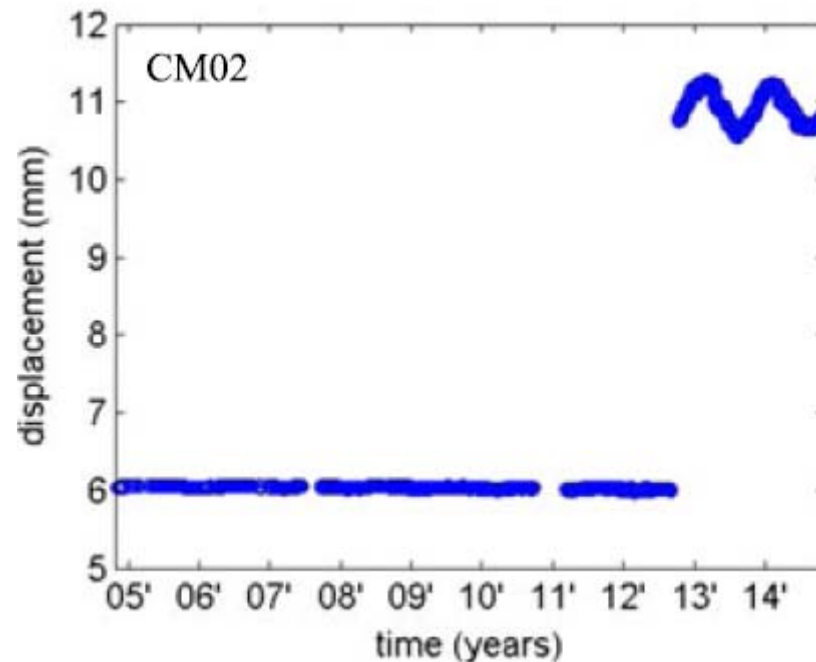


Ceravolo et al. 2016



ANALISI DEI DATI

Analizzando la time history del sensore CM02 si nota come nello stesso periodo l'ampiezza della fessura sia di fatto raddoppiata.



Ceravolo et al. 2016



ANALISI DEI DATI

Ricapitolando sulla base dei dati raccolti si possono esprimere le seguenti considerazioni:

- l'analisi dei dati mostra a livello generale un **quadro stabile** del danneggiamento,
- Emerge una conferma relativamente all'**efficacia** dell'**intervento** realizzato nel **1987**,
- Le **perdite di carico** nelle barre del **sistema di cerchiaggio** evolvono più lentamente rispetto al decennio precedentemente analizzato, ciò nonostante potrebbe essere necessario **prevedere** un **ritensionamento** al valore di progetto di 50kN,
- Necessità di ulteriori studi relativamente all'**anomalia** riscontrata nel fessurimetro **CM02** e nella cella di carico **LC05**.

Ceravolo et al. 2016



Giovani
Ingegneri
Cuneo

A.G.I.C. - Associazione Giovani Ingegneri Cuneo
Monitoraggio Periodico e Continuo di Strutture del Patrimonio Architettonico

MODELLAZIONE GEOMETRICA E MECCANICA DEL SANTUARIO

MODELLAZIONE STRUTTURALE E MONITORAGGIO STATICO DEL SANTUARIO «REGINA MONTIS REGALIS» DI VICOFORTE

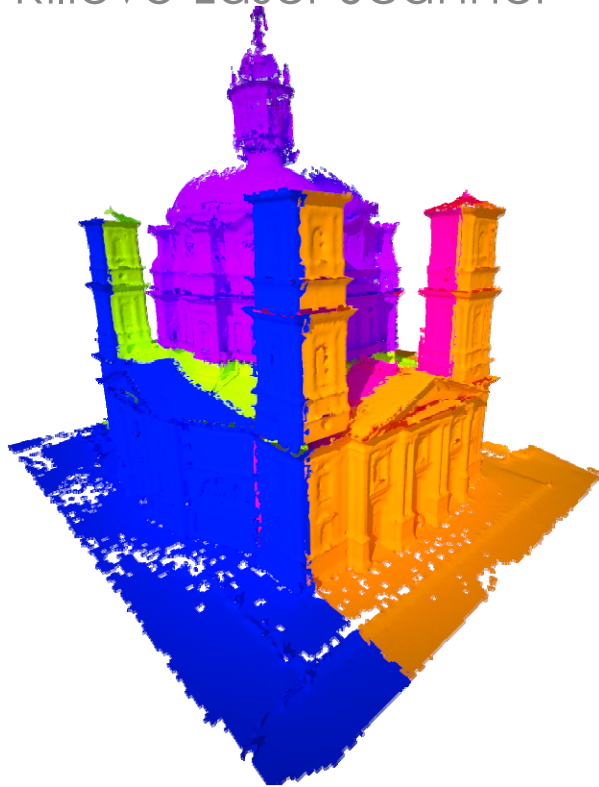
Tesoriere A.G.I.C. - Dott. Ing. STEFANO PONZALINO

Vicoforte 15/06/2017

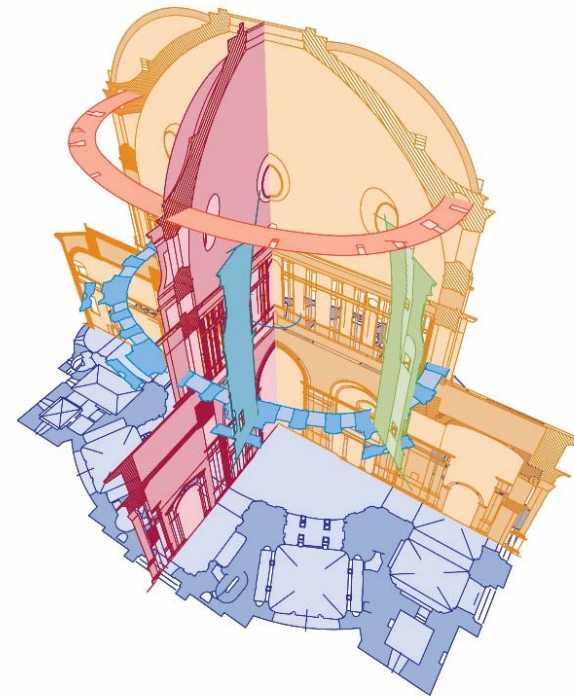
MODELLAZIONE GEOMETRICA E MECCANICA DEL SANTUARIO

Definizione della geometria

Rilievo Laser Scanner



Restituzione CAD



Ing. Garnero 2004



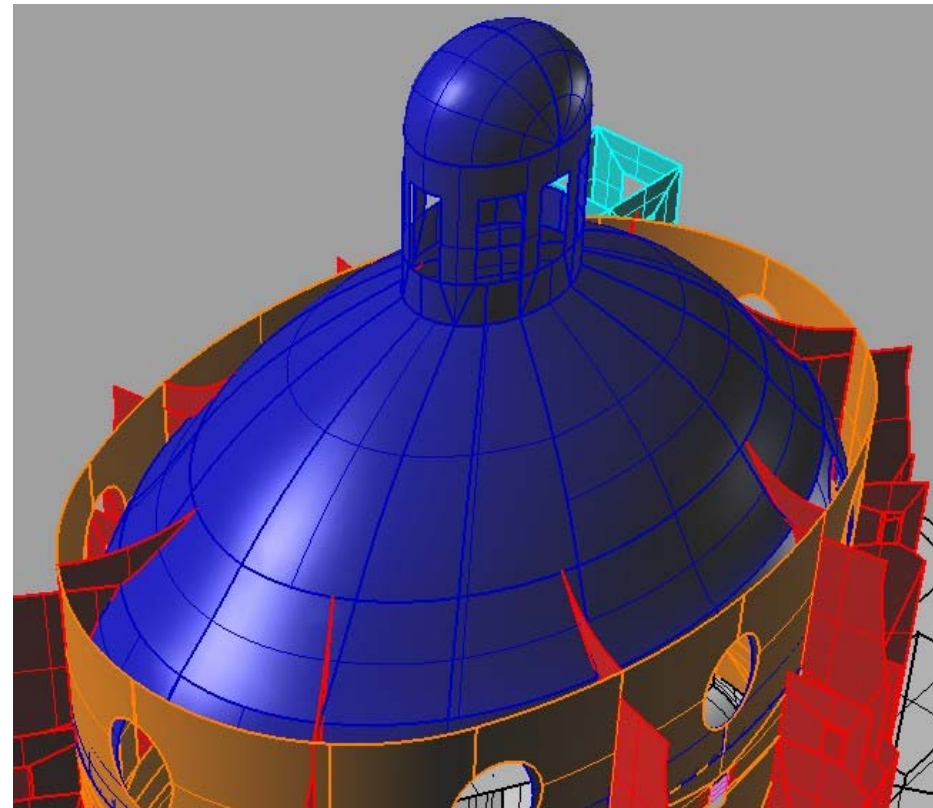
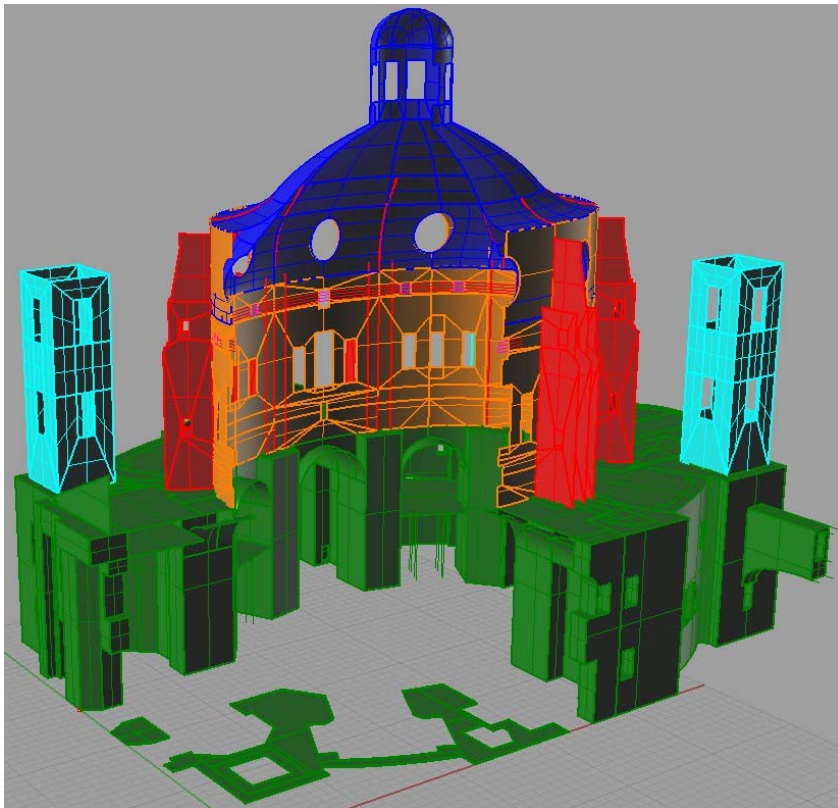
MODELLAZIONE GEOMETRICA E MECCANICA DEL SANTUARIO

Definizione della geometria

- I **contrafforti** sono di tipologia differente. Quelli sull'**asse N-S** risultano **cavi** al fine di poter ospitare le **scale** per accedere ai piani superiori. D'altronde lungo questo asse le **spinte** esercitate dalla cupola sono **inferiori**.
- Sono modellate le **nervature** di scarico all'estradosso della cupola che oltre ad irrigidire la struttura, permettono uno **scarico** maggiormente diretto delle spinte sui contrafforti.
- E' modellato il collegamento della basilica sul lato Est con il complesso adiacente.
- Suddivisione del modello in differenti **macro-zone** in modo da poter **tarare** i **parametri meccanici** dei materiali in fase di **updating**.

MODELLAZIONE GEOMETRICA E MECCANICA DEL SANTUARIO

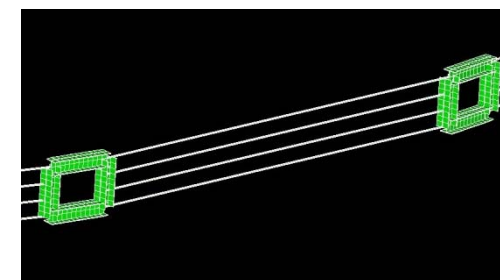
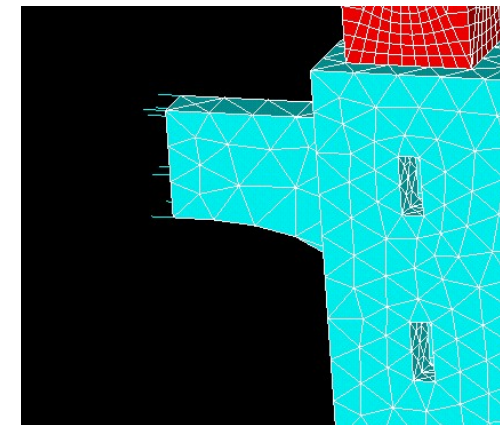
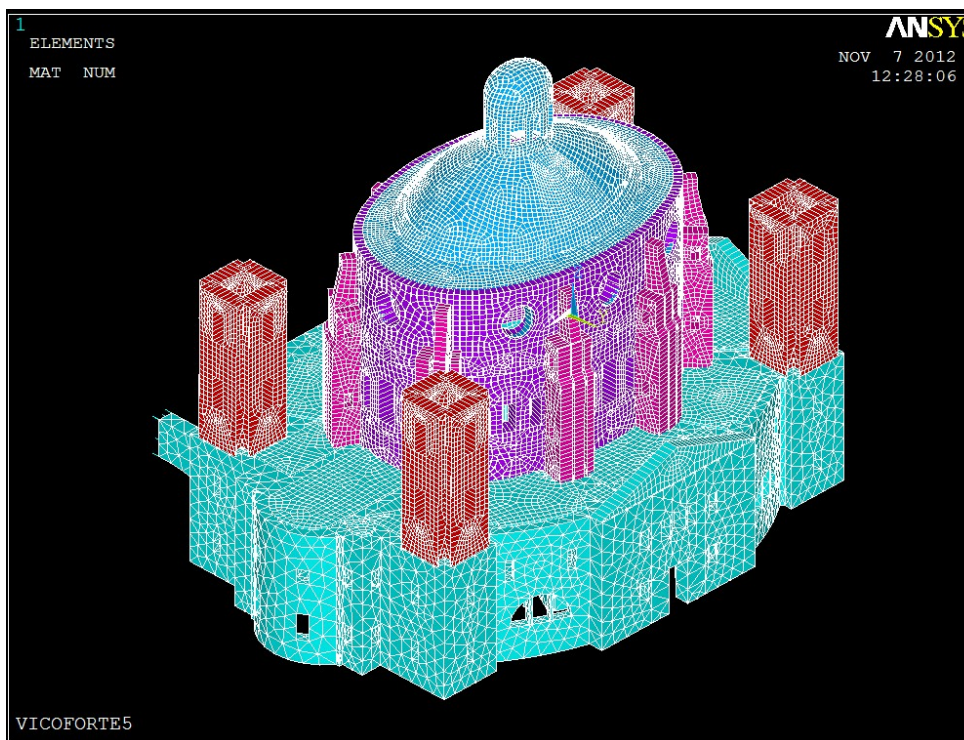
Definizione della geometria





MODELLAZIONE GEOMETRICA E MECCANICA DEL SANTUARIO

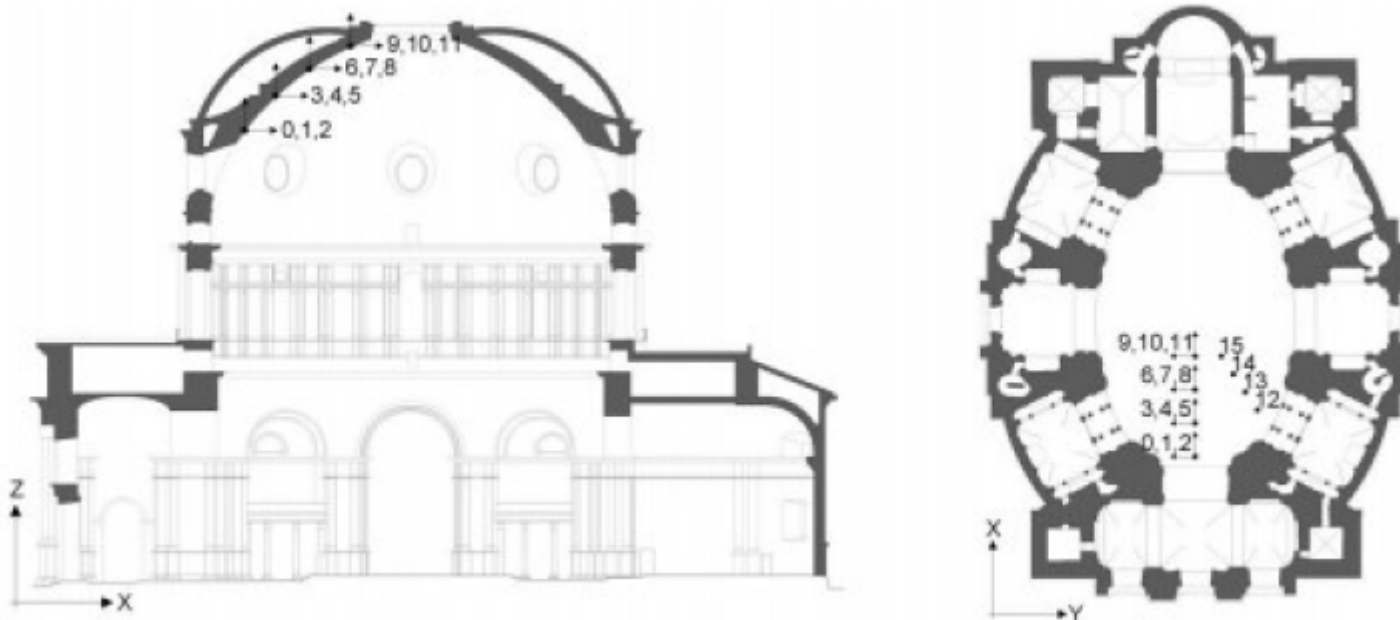
Modello Elementi Finiti realizzato in ANSYS V.14



MODELLAZIONE GEOMETRICA E MECCANICA DEL SANTUARIO

Test identificazione dinamica

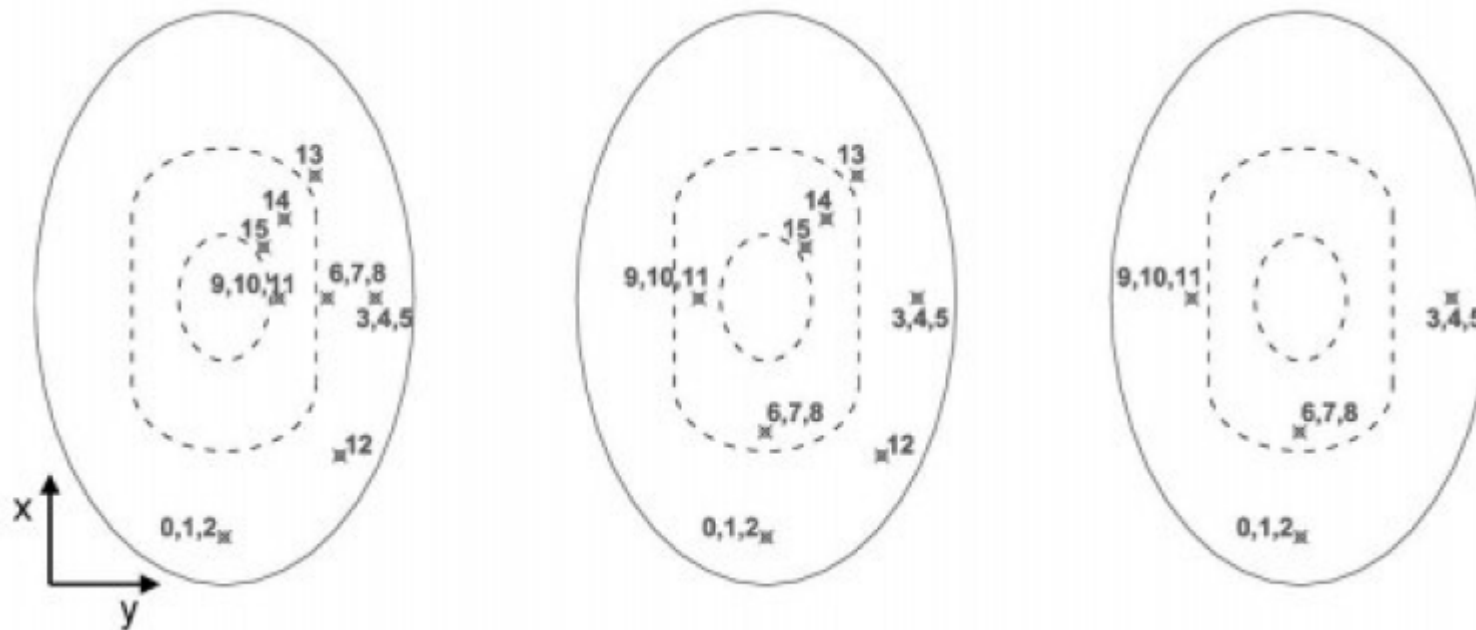
Il modello realizzato è stato tarato dinamicamente sulla base di test di **identificazione dinamica** svolti nel 2008 dall' EUCENTRE di Pavia.



MODELLAZIONE GEOMETRICA E MECCANICA DEL SANTUARIO

Test identificazione dinamica

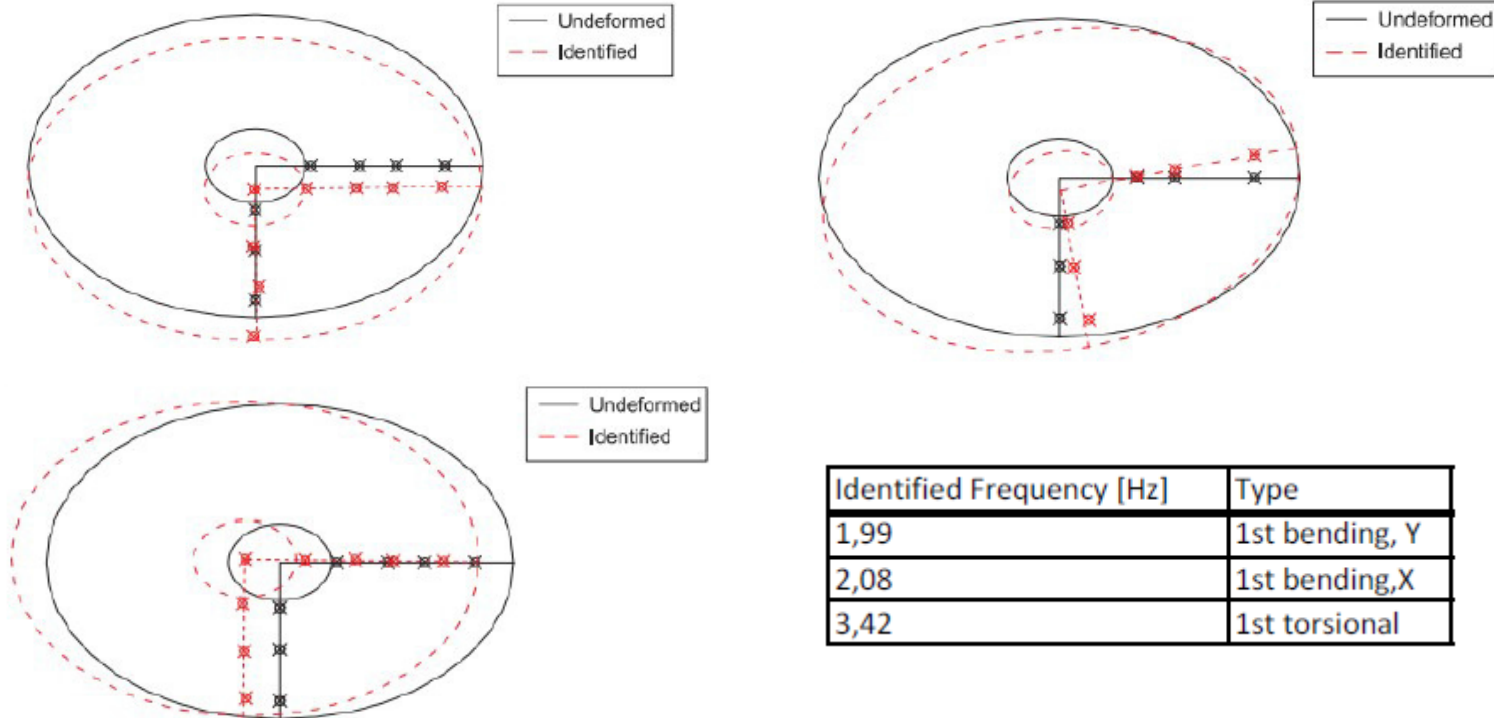
Disposizione sensori sulla cupola



MODELLAZIONE GEOMETRICA E MECCANICA DEL SANTUARIO

Test identificazione dinamica

Risultati test identificazione dinamica





MODELLAZIONE GEOMETRICA E MECCANICA DEL SANTUARIO

Model Updating

L'Updating del modello viene svolto tarando i parametri meccanici dei materiali nelle diverse macro-zone al fine di ottenere una buona corrispondenza con i dati sperimentali.

Ciò viene svolto attraverso un algoritmo di minimizzazione di tipo iterativo, che varia i parametri meccanici al fine di minimizzare una funzione obiettivo.

$$f(x) = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\lambda_{ID,i} - \lambda_{FEM,i}}{\lambda_{FEM,i}} \right)^2$$

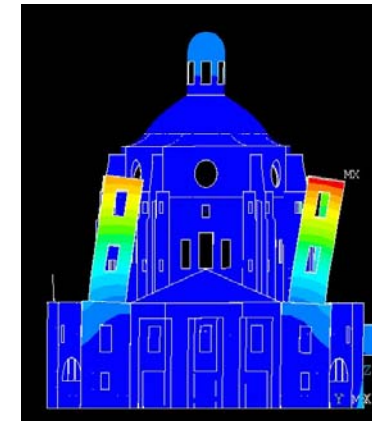
$\lambda_{ID,i}$ = frequenza identificata

$\lambda_{FEM,i}$ = frequenza modello

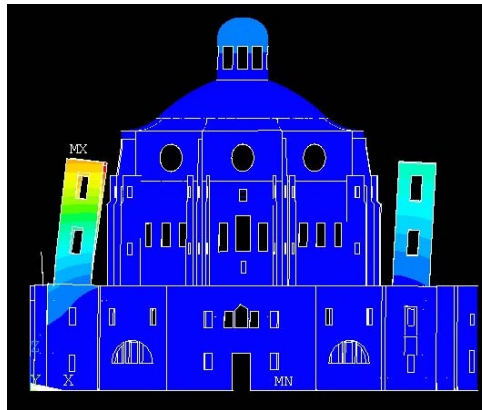
MODELLAZIONE GEOMETRICA E MECCANICA DEL SANTUARIO

1° Bending Y – 1.90 Hz

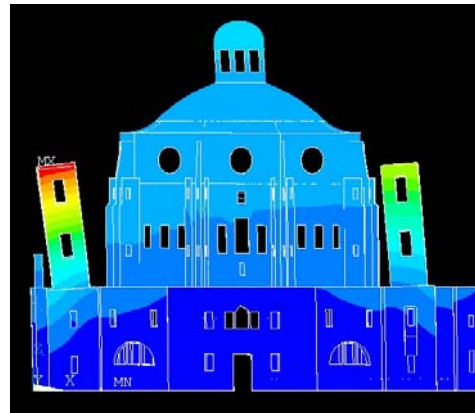
PRE - UPDATING Freq. [Hz]	POST-UPDATING Freq. [Hz]	EXPERIMENTAL Freq. [Hz]	Mode Type
1,90	2,00	1,99	1st bending Y
1,95	2,07	2,08	1st bending X
2,58	3,30	3,08	2nd bending Y
3,52	3,43	3,42	1st torsional
3,47	3,48	3,77	2nd bending X
4,20	4,05	4,11	1st dome/drum
5,18	5,02	5,16	3rd bending Y
4,27	4,17	4,36	2nd dome/drum
5,40	5,17	6,02	Vertical Dome



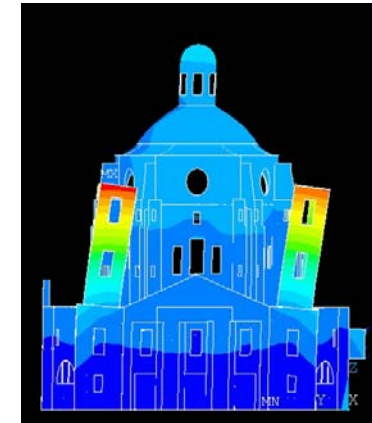
1° Bending Y – 1.95 Hz



1° Bending X – 2.08 Hz



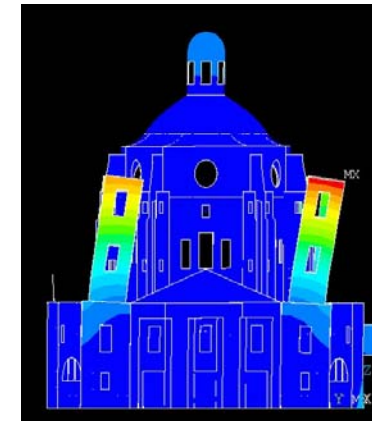
1° Bending Y – 2.00 Hz



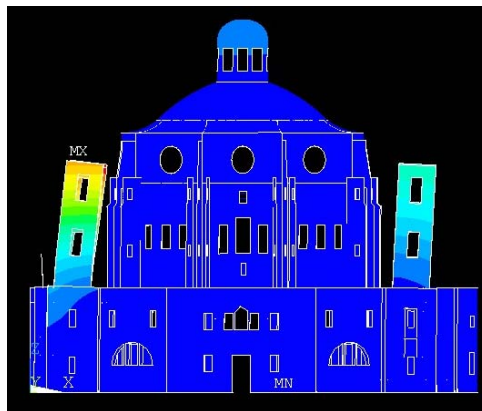
MODELLAZIONE GEOMETRICA E MECCANICA DEL SANTUARIO

PRE - UPDATING Freq. [Hz]	POST-UPDATING Freq. [Hz]	EXPERIMENTAL Freq. [Hz]	Mode Type
1,90	2,00	1,99	1st bending Y
1,95	2,07	2,08	1st bending X
2,58	3,30	3,08	2nd bending Y
3,52	3,43	3,42	1st torsional
3,47	3,48	3,77	2nd bending X
4,20	4,05	4,11	1st dome/drum
5,18	5,02	5,16	3rd bending Y
4,27	4,17	4,36	2nd dome/drum
5,40	5,17	6,02	Vertical Dome

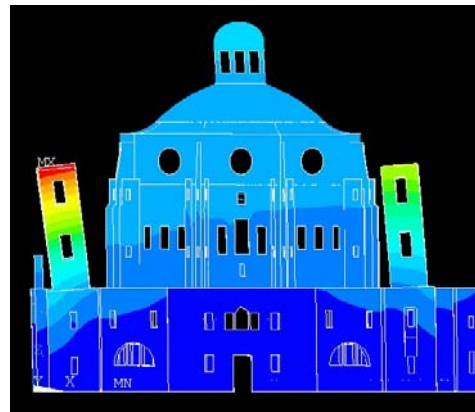
1° Bending Y – 1.90 Hz



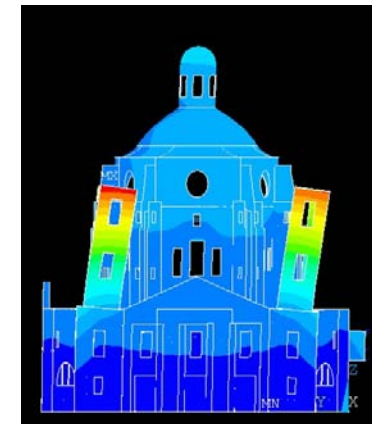
1° Bending Y – 1.95 Hz



1° Bending X – 2.08 Hz



1° Bending Y – 2.00 Hz



CONCLUSIONI

Il caso studio della Basilica «Regina Montis Regalis» di Vicoforte, rende **chiara l'utilità** fornita dall'avere a disposizione i **dati «reali»** forniti da un **sistema di monitoraggio**.

Questi dati, oltre fornire **indicazioni** sullo stato di **salute del bene** nel tempo costituiscono **materiale preziosissimo** a disposizione degli analisti strutturali, permettendo la **realizzazione** di **modelli** di calcolo ad hoc, sempre più precisi e **rappresentativi** del reale comportamento del manufatto.

Questi modelli risultano di gran lunga più **efficaci** nel fornire strumenti di **previsione** per eventuali **interventi** e per valutarne preventivamente l'efficacia.



Giovani
Ingegneri
Cuneo

A.G.I.C. - Associazione Giovani Ingegneri Cuneo
Monitoraggio Periodico e Continuo di Strutture del Patrimonio Architettonico

GRAZIE PER L'ATTENZIONE