

Politecnico di Torino

Corso di Laurea Ingegneria Edile Magistrale
A.A. 2021/2022



**Politecnico
di Torino**

Modellazione FEM della Guglia del Duomo di Novara

Cupola della Basilica di San Gaudenzio in Novara

Relatori:

Prof. Gabriele BERTAGNOLI

Candidati:

Ang GUO

Sessione di Laurea Novembre 2022

Riassunto

La modellazione FEM non solo è un lavoro che mira a passare da una struttura reale ad una struttura in forma digitale, ma è un lavoro che consente di ottenere una migliore capacità di analizzare e monitorare la condizione attuale di una struttura.

Lo scopo della tesi è creare un modello a elementi finiti con il software (SAP2000), per poter apprezzare il comportamento dinamico della Cupola e la distribuzione delle rigidità al fine di poter individuare i punti della struttura, in cui installare il sistema di monitoraggio costituito da sensori accelerometrici e inclinometrici.

Nelle prime tre parti della tesi, si andrà studiare la storia della Cupola di S. Gaudenzio in Novara, utilizzando diversi documenti storici. Nella quarta parte si inizia a modellare la struttura in SAP2000. Nel capitolo successivo si presentano tutte le sollecitazioni analizzate presenti nella cupola in condizione indeformata e a seguito del cedimento fondale rilevato nei documenti storici. Nell'ultima parte si confrontano le caratteristiche dinamiche strutturali del modello sviluppato, con quelle presentate in altre tesi scritte negli anni precedenti a seguito di campagne di monitoraggio svolte dall'Università di Trento.

Il corpo del lavoro di questa tesi è la creazione di un modello FEM a partire da tre diversi rilievi geometrici della Cupola, eseguiti in anni successivi con tecnologie diverse. Il comportamento meccanico della Cupola è estremamente complesso a causa della numerosità e della forma dei singoli elementi strutturali. Tutte le strutture della Cupola sono state approssimate con elementi unidimensionali di tipo trave o arco e con elementi bidimensionali di tipo shell.

Abstract

FEM modeling is not only work that aims to go from a real structure to a structure in digital form, but it is work that enables a better ability to analyze and monitor the current condition of a structure.

The purpose of the thesis is to create a finite element model with software (SAP20000) to be able to appreciate the dynamic behavior of the Dome and the distribution of stiffnesses in order to be able to identify the points of the structure, where to install the monitoring system consisting of accelerometer and inclinometer sensors.

In the first three parts of the thesis, the history of the Dome of St. Gaudentius in Novara will be studied, using various historical documents. In the fourth part, we start modeling the structure in SAP2000. In the next chapter, all the analyzed stresses present in the dome in the undeformed condition and as a result of the bottom failure detected in the historical documents are presented. In the last part, the structural dynamic characteristics of the developed model are compared with those presented in other theses written in previous years following monitoring campaigns carried out by the University of Trento.

The body of work in this thesis is the creation of a FEM model from three different geometric surveys of the Dome, carried out in successive years with different technologies. The mechanical behavior of the Dome is extremely complex due to the numerosity and shape of the individual structural elements. All the structures of the Dome were approximated with one-dimensional beam or arch type elements and two-dimensional shell type elements.

Indice

CAPITOLO 1. STORIA DELLA CUPOLA DI S. GAUDENZIO	1
1.1 INTRODUZIONE.....	1
1.2 CENNI STORICI SULLA COSTRUZIONE DELLA BASILICA E DELLA CUPOLA	1
CAPITOLO 2. STRUTTURA DELLA CUPOLA DI S. GAUDENZIO	5
2.1 INTRODUZIONE.....	5
2.2 ARCONI DI BASE	9
2.3 BASAMENTO DELLA CUPOLA E PRIMO ORDINE DELLA CUPOLA (24M – 46M).....	14
2.4 SECONDO ORDINE DELLA CUPOLA (48M – 67M).....	17
2.5 ATTICO, IMBUTO ANTONELLIANO E GRAN TAZZA (67M – 84M)	21
2.6 CUPOLINO (84M – 118M).....	24
CAPITOLO 3. I DISSESTI DELL’OPERA.....	25
3.1 1844 – 1878 L’OPERATO DI ALESSANDRO ANTONELLI	25
3.2 1881 – 1888 PRIMI CEDIMENTI E CONSOLIDAMENTI	26
3.3 1889 – 1906 INTERVENTI MINORI.....	32
3.4 1906 – 1926 UN TRANQUILLO INTERMEZZO	34
3.5 1927 – 1954 L’EPOCA DANUSSO	35
3.6 I GIORNI NOSTRI	41
CAPITOLO 4. MODELLAZIONE DELLA CUPOLA DI S. GAUDENZIO	45
4.1 MODELLAZIONE DEI PILASTRI SOTTO DELLA CUPOLA DI BASILICA.....	47
4.2 MODELLAZIONE DEGLI ARCONI SOTTO LA CUPOLA DI BASILICA	48
4.3 MODELLAZIONE DEL BASAMENTO DELLA CUPOLA DI BASILICA.....	52
4.4 MODELLAZIONE DEL PRIMO STILOBATE DELLA CUPOLA DI BASILICA	55
4.4.1 Elementi portanti verticali dei pilastri in “frame”	57
4.4.2 Elementi portanti di architravi in “shell”	58
4.4.3 Elementi portanti circolari in “shell”	59
4.5 MODELLAZIONE DEL PRIMO PERISTILIO E DELLA PRIMA CUPOLA CASSETTONATA	61
4.5.1 Elementi portanti verticali di pilastri in “frame”	63
4.5.2 Elementi portanti verticali di pilastri in “shell”	64
4.5.3 Elementi portanti circolari in “shell”	66
4.5.4 Prima Cupola Cassettonata di Basilica	69

4.6	MODELLAZIONE DEL SECONDO STILOBATE	71
4.6.1	<i>Elementi portanti verticali dei pilastri in “frame”</i>	72
4.6.2	<i>Elementi portanti di architravi in “shell”</i>	73
4.6.3	<i>Elementi portanti circolari in “shell”</i>	75
4.7	MODELLAZIONE DEL SECONDO PERISTILIO E DELLA SECONDA CUPOLA	76
4.7.1	<i>Elementi portanti dei pilastri e degli archi in “frame”</i>	78
4.7.2	<i>Elementi portanti di pilastri in “shell”</i>	80
4.7.3	<i>Elementi portanti circolari in “shell”</i>	82
4.7.4	<i>Seconda Cupola di Basilica</i>	84
4.8	MODELLAZIONE DELL’ATTICO E DELLA TERZA CUPOLA	86
4.8.1	<i>Elementi portanti dei pilastri e degli archi in “frame”</i>	88
4.8.2	<i>Elementi portanti dei pilastri in “shell”</i>	90
4.8.3	<i>Elementi portanti circolari in “shell”</i>	91
4.8.4	<i>Terza Cupola di Basilica</i>	92
4.9	MODELLAZIONE DEL GRAN TAZZA E DELL’IMBUTO ANTONELLIANO	93
4.9.1	<i>Elementi di Gran Tazza</i>	95
4.9.2	<i>Elementi di Imbutto Antonelliano</i>	96
4.9.3	<i>Quarta Cupola e Quinta Cupola di Basilica</i>	101
4.10	MODELLAZIONE DEL CUPOLINO DELLA CUPOLA DI BASILICA	102
4.10.1	<i>Basamento e Primo Stilobate del Cupolino</i>	105
4.10.2	<i>Primo Peristilio del Cupolino</i>	109
4.10.3	<i>Secondo Stilobate di Cupolino</i>	110
4.10.4	<i>Scala interna del Cupolino</i>	112
4.10.5	<i>Secondo Peristilio di Cupolino</i>	114
4.10.6	<i>Attico del Cupolino</i>	116
4.10.7	<i>Modellazione della Cuspide di Cupolino</i>	117
CAPITOLO 5. SOLLECITAZIONI SOTTO AI CARICHI DI PESO STRUTTURALE...		121
5.1	INTRODUZIONE.....	121
5.2	PILASTRI SOTTO LA CUPOLA DELLA BASILICA	127
5.3	ARCONI SOTTO LA CUPOLA DI BASILICA.....	129
5.4	BASAMENTO DELLA CUPOLA DI BASILICA	140
5.4.1	<i>Elementi portanti di pilastri in “frame”</i>	140
5.4.2	<i>Elementi portanti circolari in “shell”</i>	145
5.5	PRIMO STILOBATE DELLA CUPOLA DI BASILICA	149

5.5.1	<i>Elementi portanti verticali dei pilastri in “frame”</i>	149
5.5.2	<i>Elementi portanti di architravi in “shell”</i>	154
5.5.3	<i>Elementi portanti circolari in “shell”</i>	157
5.6	PRIMO PERISTILIO E PRIMA CUPOLA CASSETTONATA DELLA CUPOLA DI BASILICA	165
5.6.1	<i>Elementi portanti verticali di pilastri in “frame”</i>	165
5.6.2	<i>Elementi portanti verticali di pilastri in “shell”</i>	168
5.6.3	<i>Elementi portanti circolari in “shell”</i>	173
5.6.4	<i>Prima Cupola Cassettonata di Basilica</i>	181
5.7	SECONDO STILOBATE DELLA CUPOLA DI BASILICA	186
5.7.1	<i>Elementi portanti verticali dei pilastri in “frame”</i>	186
5.7.2	<i>Elementi portanti di architravi in “shell”</i>	191
5.7.3	<i>Elementi portanti circolari in “shell”</i>	194
5.8	SECONDO PERISTILIO E DELLA SECONDA CUPOLA DI BASILICA	202
5.8.1	<i>Elementi portanti dei pilastri e degli archi in “frame”</i>	202
5.8.2	<i>Elementi portanti di pilastri in “shell”</i>	208
5.8.3	<i>Elementi portanti circolari in “shell”</i>	213
5.8.4	<i>Seconda Cupola di Basilica</i>	217
5.9	ATTICO E DELLA TERZA CUPOLA DI BASILICA	221
5.9.1	<i>Elementi portanti dei pilastri e degli archi in “frame”</i>	221
5.9.2	<i>Elementi portanti dei pilastri in “shell”</i>	224
5.9.3	<i>Elementi portanti circolari in “shell”</i>	227
5.9.4	<i>Terza Cupola di Basilica</i>	231
5.10	GRAN TAZZA, IMBUTO ANTONELLIANO QUARTA CUPOLA E QUINTA CUPOLA	235
5.10.1	<i>Gran Tazza</i>	235
5.10.2	<i>Imbuto Antonelliano di Gran Tazza, Quarta Cupola e Quinta Cupola</i>	242
5.11	CUPOLINO DELLA CUPOLA DI BASILICA	256
5.11.1	<i>Basamento e Primo Stilobate del Cupolino</i>	256
5.11.2	<i>Primo Peristilio del Cupolino</i>	269
5.11.3	<i>Secondo Stilobate di Cupolino</i>	276
5.11.4	<i>Secondo Peristilio di Cupolino</i>	284
5.11.5	<i>Attico del Cupolino</i>	287
5.11.6	<i>Cuspide di Cupolino</i>	292
CAPITOLO 6. CARATTERIZZAZIONE DINAMICA		299
6.1	INTRODUZIONE	299

6.2	TESI MORAVI (A.A 2000/2001) – UNIVERSITÀ DI TRENTO	299
6.2.1	<i>Tecniche di elaborazione</i>	301
6.2.2	<i>Basic Frequency Domain (BFD)</i>	302
6.2.3	<i>Frequency Domain Decomposition (FDD)</i>	302
6.2.4	<i>Identificazione dinamica</i>	303
6.2.5	<i>Individuazione delle frequenze e delle forme modali dal primo segmento</i>	303
6.2.6	<i>Individuazioni delle frequenze e delle forme modali dal secondo segmento</i>	306
6.3	INDIVIDUAZIONE DINAMICA (TESI FILIPPI A.A 2001/2002)	309
6.4	RISULTATI DI ANALISI DEL MODELLO IN STUDIO	311
CAPITOLO 7. CONCLUSIONE		315
BIBLIOGRAFIA		317

Capitolo 1. Storia della cupola di S. Gaudenzio

1.1 Introduzione

Oggi, la protezione e il monitoraggio degli edifici antichi è diventato un argomento indispensabile. Per ogni edificio storico, sia esso di ricerca o di tutela, è necessario stabilire preliminarmente il corrispondente modello strutturale, in modo da tutelare e monitorare al meglio l'impatto dell'ambiente su di esso.

Per la costruzione del modello strutturale digitale, oltre si basa sui dati edilizi misurati sul campo e, dovrebbe confrontare con le informazioni utili ottenute dai documenti storici raccolti.

Quindi per ogni intervento architettonico, ed in alcuni casi anche ingegneristico, un modello architettonico deve essere rimodellato sulla base di una comprensione del suo contesto, un'analisi dello stato delle cose e un processo di cambiamento storico vissuto dall'oggetto dell'intervento, in modo da proteggerlo e monitorarlo in modo più efficace.

Nel caso dell'organismo di S. Gaudenzio, data la sua complessità e fragilità, senza prima conoscere la storia della Basilica e della Cupola, in quanto lo stato generale attuale, l'andamento delle fessure, lo stato di protezione e di tensione, dipendono direttamente la caratteristica delle vite passate.

È per questo motivo che il primo passo di questo lavoro è quello di svelare un complesso studio storico attraverso l'analisi delle fonti primarie della letteratura, i documenti originali conservati in vari archivi, e l'integrazione e il confronto di queste informazioni con quelle sull'argomento di pubblicazioni esistenti.

1.2 Cenni storici sulla costruzione della Basilica e della Cupola

L'attuale complesso architettonico della Basilica di San Gaudenzio venne edificato tra il 1577 ed il 1690, in seguito all'abbattimento della primitiva chiesa di San Vincenzo dedicata al patrono di Novara, per la costruzione della nuova cinta muraria voluta da Carlo V. Inoltre, il complesso architettonico è composto da tre elementi: la Basilica, il Campanile e la Cupola, si trova nella zona elevata della città di Novara, in cui si innesta la cupola simbolo

dell'identità novarese. Il progetto della basilica è dovuto a Pellegrino Pellegrini detto il Tibaldi, architetto di fiducia di San Carlo Borromeo, come già raccontava G.A. Prina nel "Il Trionfo di San Gaudenzio" del 1711.

La costruzione della Basilica procedette in due fasi: la navata con le cappelle laterali fu consacrata ed aperta al culto nel 1590, mentre transetto, sacrestie ed abside furono ultimate solo nel 1659, peraltro accorciando la dimensione trasversale della chiesa rispetto al progetto tibaldiano, così da rendere possibile l'aggiunta della cappella sopraelevata detta "Scurolo" per ospitare le reliquie di San Gaudenzio, inaugurata l'11 giugno 1711, reliquie prima custodite nella cappella di San Giorgio, sopravvissuta alla demolizione della chiesa di San Vincenzo resasi necessaria per la costruzione della basilica nuova.

Il campanile fu progettato da Benedetto Alfieri, e fu costruito tra il 1753 e il 1786. È posizionato isolato dalla Basilica, alla sinistra dell'abside, ed è realizzato in laterizi e granito di Baveno. Raggiunge un'altezza di circa 75 metri. Il campanile rappresenta il massimo avvicinamento all'esperienza Juarriana e culmine della ricerca formale sul tema della torre nel Settecento, come messo in evidenza da Amedeo Bellini nel suo studio monografico sull'Alfieri del 1978: *Sintesi, volumi fortemente definiti, assenza di finzioni, razionalità costruttiva con il massimo avvicinamento possibile alle istanze barocche di movimento, di capriccio, di inconsueto, ottenute senza sacrificio dei valori di volume e di razionalità.*

Prima della sua costruzione esisteva una torretta campanaria provvisoria sul pilastro sud-ovest della chiesa, il quale rischiava di arrecare danni alla struttura dell'edificio con le vibrazioni prodotte dalle campane. Nel 1753 si decise quindi la costruzione di un nuovo campanile, giudicato prioritario rispetto all'edificazione di una nuova cupola, e si affidò il progetto all'Alfieri, architetto di Casa Savoia. La torre fu realizzata con conci di cotto e granito di Baveno, ne cercò con i materiali che assunse il compito di farsi simbolo architettonico e visivo per la città Novara, considerando la sua altezza di 92metri, fino all'intervento della Cupola Antonelliana.

La Cupola dopo il termine di costruzione è diventato l'elemento architettonico più significativo della basilica, considerando la sua altezza di 121metri progettata dall'architetto-ingegnere Alessandro Antonelli, assunta a simbolo della città e segno distintivo del suo panorama.

L'idea di un coronamento monumentale alla Basilica era nell'aria praticamente da sempre, ma sarà solo dopo il 1825, quando il re Carlo Felice di Savoia concesse di nuovo alla Fabbrica Lapidea il diritto di usufruire dei proventi derivati dall'imposta del Sesino, che vi saranno i fondi per poter metter mano al progetto. In quell'anno e nell'arco di qualche anno riuscirono così a reperire i fondi per poter dare inizio ai lavori. Nel 1840 i fabbricieri prendono contatti con l'Antonelli, architetto/ingegnere oramai affermato, e novarese, e nella seduta del 21 maggio 1840, il Consiglio di Amministrazione della Fabbrica Lapidea di S. Gaudenzio, unanimemente deliberava:

Considerando che all'abbellimento e perfezione del tempio patronale l'opera più lodevole, la cupola vi manca e che il suo disegno non fu lasciato dal Pellegrini o sfortunatamente si è perduto, e volendo approfittare della scienza ed abilità del valente architetto novarese Alessandro Antonelli, sono (i congregati fabbricieri) venuti in determinazione di commettere al medesimo di formare e presentare il disegno della cupola [...] colla speranza di vederlo effettuato sotto la sua direzione, o se non altro di lasciare ai posteri un eccitamento a farlo proseguire e rendere così compiuta una tanto magnifica e sontuosa basilica che sarà sempre il più bell'ornamento della città...

Il primo progetto venne presentato nel 1841 mentre i lavori iniziarono nel 1844; i primi due anni furono spesi per rifare il tamburo e gli archi di sostegno, essendo quelli vecchi inadatti a sostenere il peso dell'opera. Subito dopo il cantiere si interruppe. Negli anni successivi furono combattute le guerre d'indipendenza contro l'Austria e il comune ridusse drasticamente i fondi destinati alla fabbrica Lapidea.

Nel 1855, Antonelli presentò un secondo progetto modificato con il quale portava l'altezza da 65 a 75 metri. Nel 1858 la situazione economica era migliorata e i lavori poterono riprendere ma l'architetto, invece di impostare la base per la chiusura della cupola, fece erigere una seconda corona di pilastri alti 5 metri, recuperando così la fruibilità visiva del monumento. Nel 1860 presentò quindi il progetto di una cupola a due ordini di colonne che però fu bocciato. Nel maggio 1861 il progetto venne ripresentato con la garanzia che sarebbe costato meno del precedente; dopo molte contestazioni fu infine accettato e due anni dopo la costruzione della cupola vera e propria giunse al termine. A quel punto mancava solo la guglia, ma i dissidi tra la fabbrica e l'architetto bloccarono nuovamente i lavori per un decennio, durante i quali egli si dedicò alla costruzione della Mole Antonelliana di Torino.

Nel frattempo, la cupola suscitava l'ammirazione dei visitatori e lentamente si fece strada l'idea che si sarebbe dovuta completare finché il suo progettista, ormai anziano, era in vita e che perciò fosse necessario lasciargli carta bianca. I lavori ripresero: tra il 1873 e il 1874 l'Antonelli si dedicò alla decorazione floreale a stucco della cupola interna e soltanto nell'estate del 1876 mise finalmente mano al cupolino che fu completato nel 1878.



Figura 1.1 Primo progetto, presentato il 29 aprile 1841



Figura 1.2 Terzo progetto del 1848

Capitolo 2. Struttura della Cupola di S. Gaudenzio

2.1 Introduzione

Per comprendere il valore della sintesi realizzata da Antonelli riassumiamo che l'evoluzione storica dell'architettura nei suoi temi tradizionali: la Basilica e la Cupola. La Basilica Romana e Cristiana è caratterizzata, come il tempio greco, da uno spazio interno principale a pianta rettangolare, in seguito si evolve nella forma a croce latina o greca.

Lo studio dell'evoluzione delle cupole si partono soprattutto dal Pantheon, il quale l'organismo geometrico è impostato sulla circonferenza. Studiando l'evoluzione geometrica e spaziale della cupola, notiamo che il Pantheon adotta una volta sferica, innalzata sulla base di un cerchio; se togliamo dalla volta sferica quattro porzioni, in modo da ridurla a base quadrata, otteniamo una volta a vela, sostenuta su quattro punti; tagliando ancora tutta la calotta superiore, rimane un cerchio, cioè un anello, portato da quattro archi e pennacchi. Vediamo così risolto il problema di sostenere un cerchio sui quattro vertici di un quadrato. Su questo cerchio i Bizantini di S. Sofia costruirono una cupola sferica.

La basilica a croce latina è formata dall'incrocio di due rettangoli, la navata principale ed il transetto, la cui intersezione ha la forma di un quadrato. È su questo quadrato che si è costruita la cupola di S. Pietro, con lo stesso meccanismo di S. Sofia, ma con la calotta innalzata su di un tamburo e coronata con una lanterna. Si arriva così a S. Gaudenzio, dove la Cupola costruita sulla croce si amplia in forma di torre verso l'alto (Figura 2.1).

La struttura della Cupola (Figura 2.2) è idealmente suddivisa in otto parti, così denominate:

- Basamento della cupola (24,16 m – 33,95 m)
- Primo stilobate (33,95 m – 38,40 m)
- Primo peristilio (38,40 m – 48,46 m)
- Secondo stilobate (48,46 m – 56,35 m)
- Secondo peristilio (56,35 m – 66,90 m)
- Attico (66,90 m – 70,55 m)
- Gran tazza (70,55 m – 84,10 m)
- Cupolino (84,10 m – 117,65 m)

Il Cupolino è suddiviso a sua volta in sei parti:

- Basamento del cupolino (84,10m – 85,10m)

- Primo stilobate del cupolino (85,10m – 89,94m)
- Primo peristilio del cupolino (89,94m – 96,92m)
- Secondo stilobate del cupolino (96,92m – 101,72m)
- Secondo peristilio del cupolino (101,72m – 105,83m)
- Attico del cupolino (105,83m – 107,79m)
- Cuspide (107,79m – 117,65m)

La quota 0,00 m è presa in corrispondenza del pavimento della basilica.

La descrizione della suddivisione della cupola in porzioni distinte sarà utile per la comprensione degli step di modellazione.

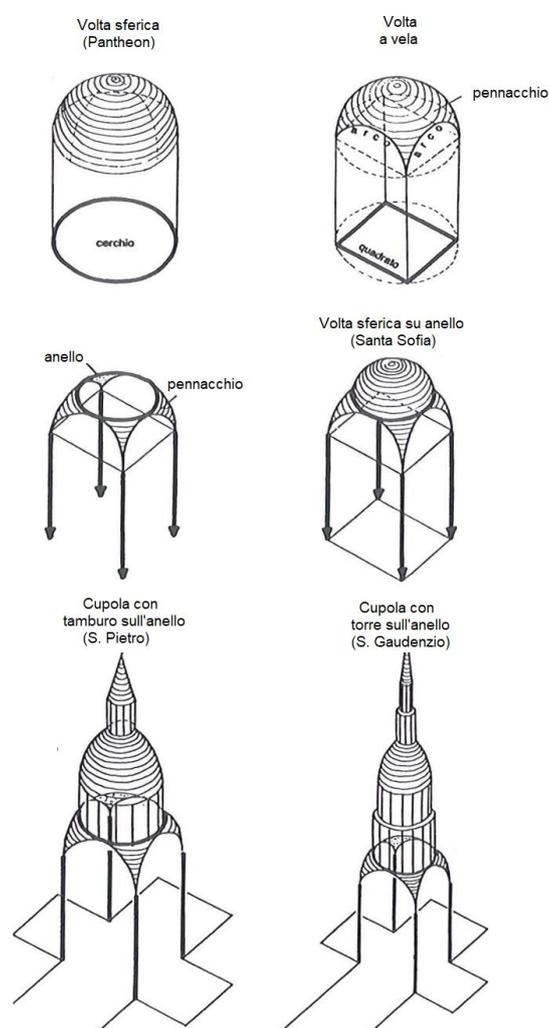


Figura 2.1 Evoluzione della Cupola

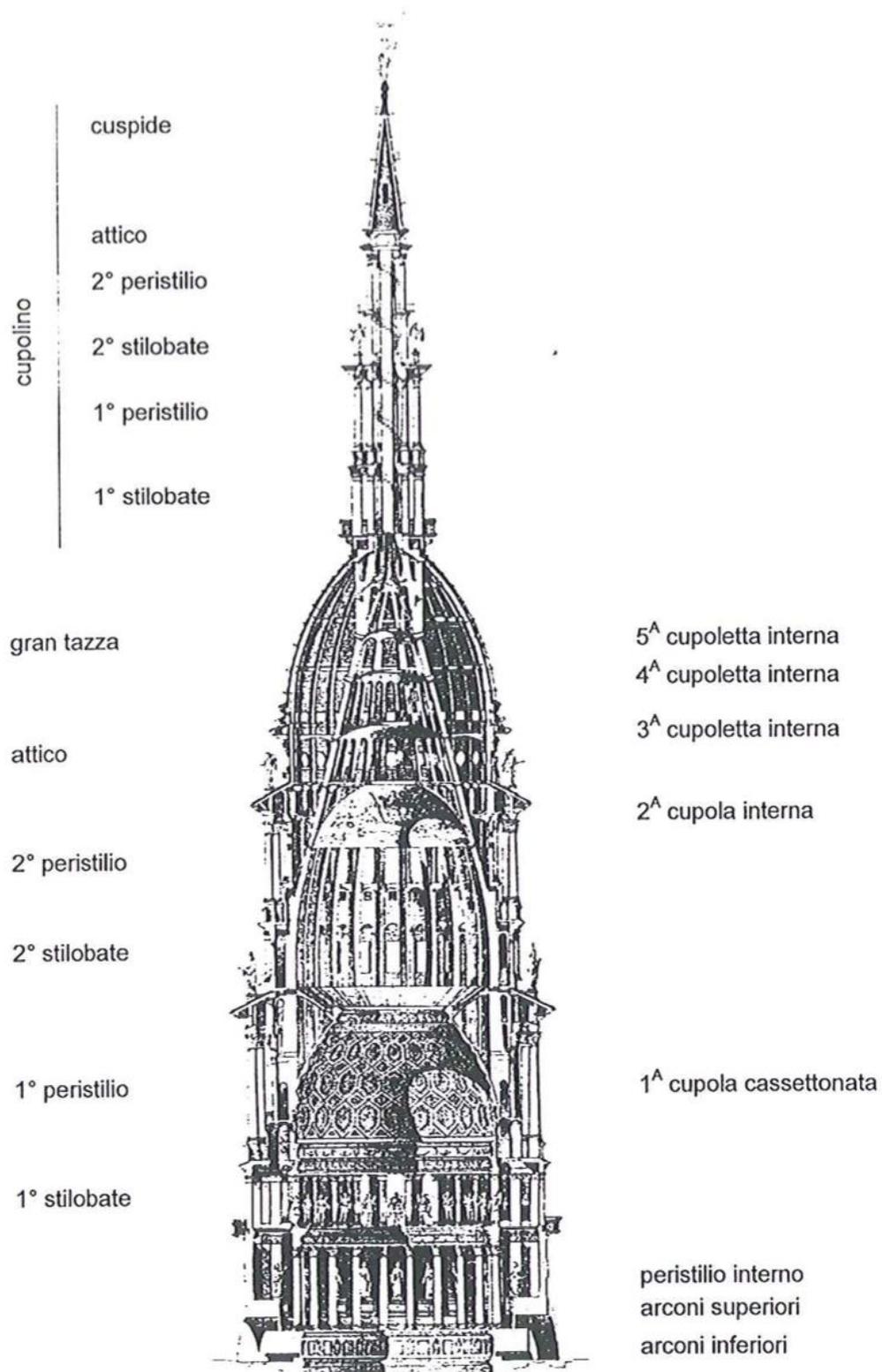


Figura 2.2 Struttura della Cupola di Antonelli

Modellazione FEM della Guglia del Duomo di Novara

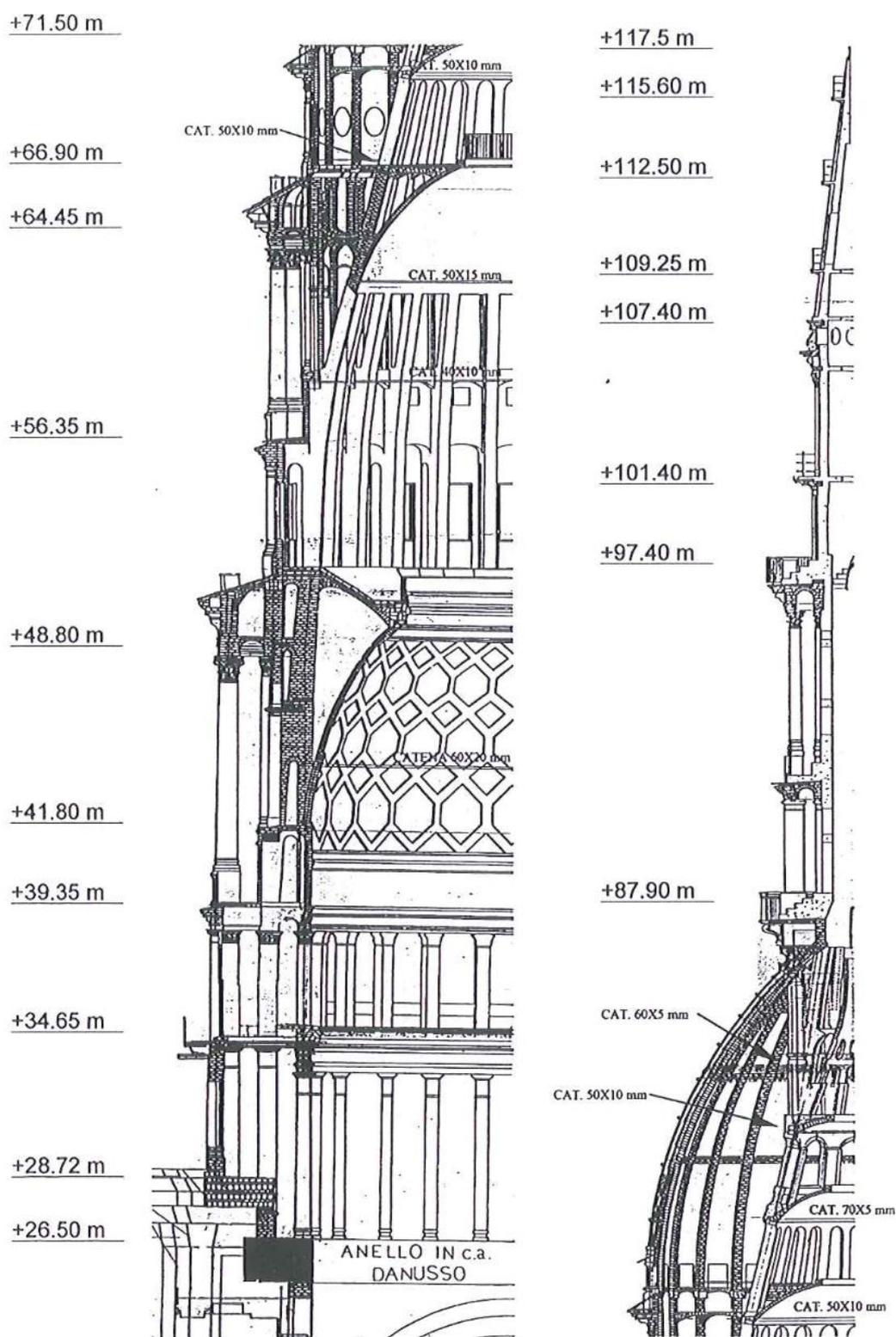


Figura 2.3 Sezione verticale della Cupola, con le principali quote riferite al pavimento della Basilica

2.2 Arconi di base

L'idea di coronare la Basilica di S. Gaudenzio con una cupola fu già del Pellegrini; l'architetto del tempio, infatti, fece costruire all'incrocio delle navi dell'edificio quattro piloni, ciascuno avente una sezione di muratura di circa 30 m², destinati a reggere la futura calotta. Oltre ai pilastri, furono costruiti archi e pennacchi, fino all'anello sul quale la cupola doveva elevarsi.

Antonelli, chiamato nel 1840 a progettare la Cupola, ideò un nuovo sistema di archi e pennacchi, indipendente dal sistema primitivo e ad esso sovrapposto, direttamente appoggiato alle murature verticali della Basilica. (Figura 2.4)

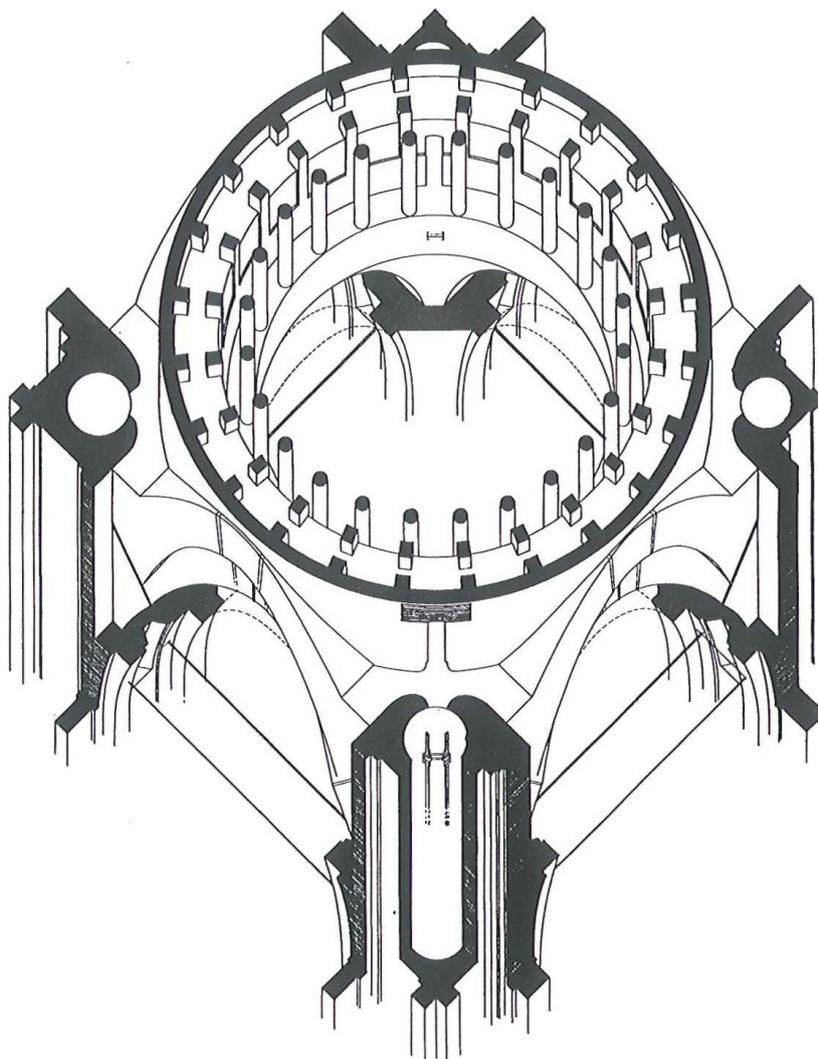


Figura 2.4 I piloni, il sistema di archi sguinciati, anello superiore e inferiore

Il sistema portante di supporto di Basamento della Cupola Antonelliana è costruito dai quattro arconi superiori formati corpo unico coi pennacchi, e dai quattro arconi superiori. (Figura 2.5)

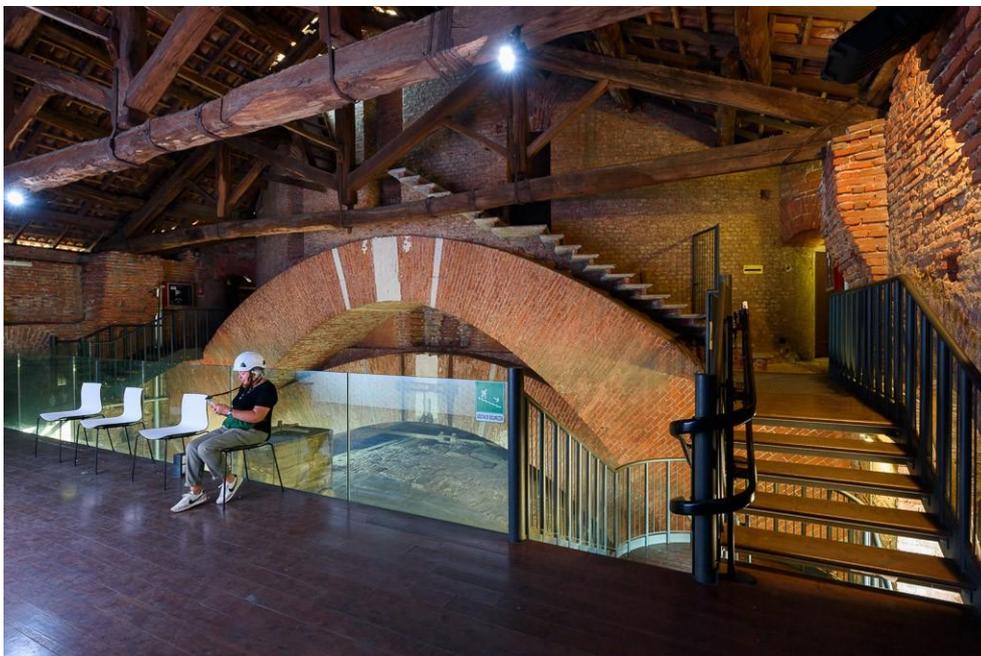


Figura 2.5 Arconi di Base della Cupola a circa 27m dal suolo

Le quattro fronti esterne dei quattro arconi inferiori non sono in un piano verticale, ma sono sostituite da una superficie cilindrica concava a generatrici verticali, avente un raggio di circa 11m. In tal modo, come già esposto, l'arcone interessa all'imposta ampiamente le strutture portanti, ed è sperone per contrastare alle spinte dei pennacchi.

I quattro arconi superiori, a sesto rialzato, sovrastano gli inferiori e determinano, come meglio si dirà in seguito, una seconda corona circolare di maggior diametro dell'inferiore.

Tutto il sistema della Cupola è stato supportato sul gruppo di arconi, cui si innestano i pennacchi. Gli arconi trasmettono i carichi ai quattro piloni fondamentali ed alle otto ali di speronamento, rappresentate dalle pareti annesse ai pilastri stessi.

Gli arconi superiori, più rialzati, ricevono i fulcri dei due giri esterni; gli arconi inferiori ricevono, coi pennacchi, il giro interno.

Da un esame sommario risulta che i due giri esterni di fulcri sostengono tutta la parte esterna inferiore della Cupola, i colonnati dei due ordini, fino all'attico; il giro interno sosterrrebbe invece la Cupola vera e propria, il castello interno ed infine il cupolino.

Un attento esame rivela però che Antonelli ha stabilito in vari punti, e particolarmente all'altezza delle colonne del primo peristilio, un certo collegamento tra i due fulcri interni,

tale da permettere con tutta probabilità una ripartizione degli sforzi sui due arconi effettivamente proporzionale alla capacità portante di ciascuno, grazie all'intervento di deformazioni plastiche della struttura.

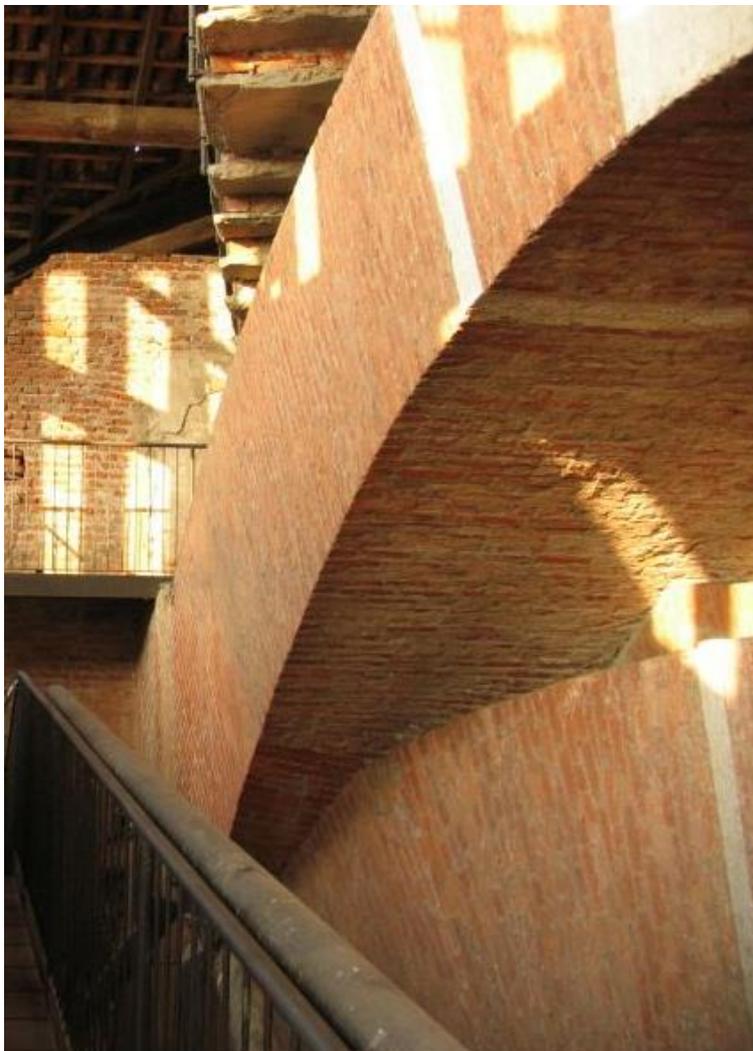


Figura 2.6 Particolare arconi inferiori e superiori di imposta del tamburo della Cupola

La muratura degli arconi è legata da quattro gruppi di chiavi in ferro (Figura 2.7). Infatti, se si tiene in conto, oltre alle chiavi che imbrigliano la parte nuova della impostazione della Cupola, anche di quelle che legano gli antichi archi del crocicchio delle navate, si possono distinguere quattro sistemi di collegamenti con catene di ferro, collocati ciascuno in un piano orizzontale distinto.

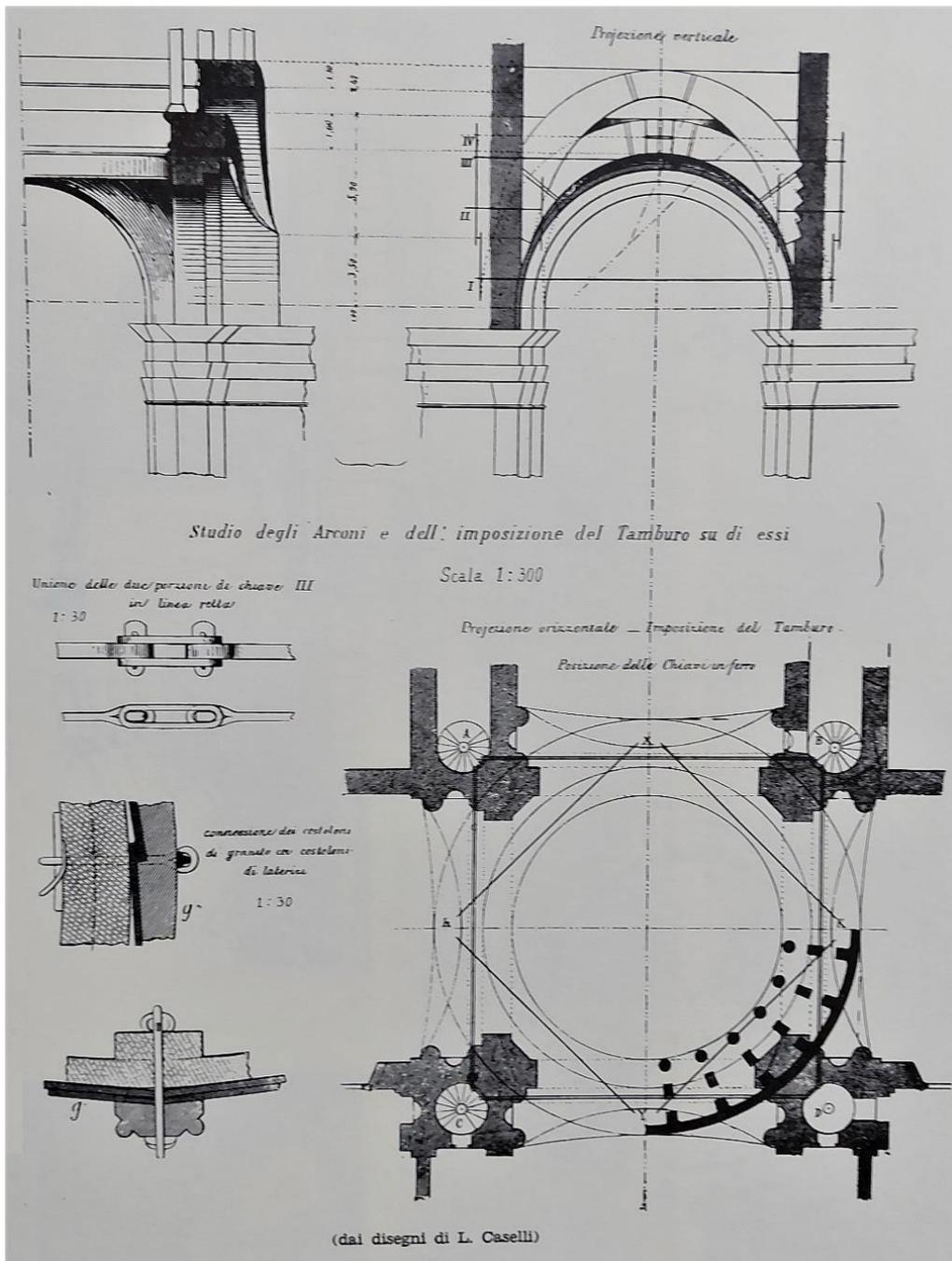


Figura 2.7 Posizionamento delle chiavi in ferro degli arconi

Il primo sistema giace nel piano orizzontale che si trova 1,3 m sopra il piano orizzontale di imposta degli arconi; qui si trovano le otto catene che furono sostituite alle antiche nell'anno 1867; hanno sezione circolare di diametro 6 cm; sono di ferro d'Aosta. Le quattro di esse più centrali immettono le loro estremità nei pozzi o gabbie di scala dei quattro pilastri maestri e vengono in ciascun pozzo legate due a due con un anello di forma rettangolare lungo 0,78 m, in cui passano gli occhi delle estremità delle catene, attraversati

da lunghi e robusti bolzoni che contrastano mediante cuscinetti di ghisa sull' anello stesso, e si poggiano sulla superficie cilindrica del pozzo.

La lunghezza delle catene è di 17,26 m; esse si compongono per ciascuna di due parti ben saldate e connesse. Le antiche catene furono messe per reggere alle spinte delle volte e degli arconi retti delle crociere; le nuove hanno la medesima funzione, ma entrano a far parte, con gli altri sistemi di catene, nel sistema che equilibra le spinte della costruzione interna.

Il secondo sistema si trova nel piano orizzontale 4,80 m sopra il piano di imposta; gli otto tiranti in ferro di sezione rettangolare con la dimensione maggiore di 5 cm circa, servono a legare i piedi di vela agli arconi ed ai pilastri. I tiranti sono trattenuti con bolzoni, sono collegati a due a due con un anello e si immorsano in ogni pennacchio.

Il terzo sistema è composto da quattro catene, formate ciascuna di due pezzi lunghi 8,42 m (non compresi gli occhi delle estremità). Le catene sono collocate nel piano orizzontale a 7,25 m dal piano di imposta, ed alla distanza di 2,45 m dal piano delle precedenti chiavi. Il collegamento di due catene nel pozzo di un pilastro è simile a quello del primo sistema. L'anello che trattiene gli occhi di estremità, attraversato dai soliti bolzoni, ha il lato maggiore di 1,10 m. La sezione retta della catena è rettangolare, delle dimensioni di 80 x 35 mm. L'unione in linea retta dei pezzi di una stessa catena, visibile con parte delle catene appena sotto la chiave degli arconi nuovi, è realizzata con due anelli lunghi 0,51 m, che giungono le estremità dei pezzi della catena, mediante due chiavette passate negli occhi dei pezzi.

L'ultimo sistema di chiavi in ferro è collocato nel piano a quota 9,50 m sul piano di imposta, ed a distanza di 1,35 m dalle catene del terzo sistema; tale sistema è formato da quattro catene, non più collocate normalmente agli assi della Basilica, ma poste diagonalmente sulla pianta quadrata del crocicchio. La loro lunghezza è di 12,70 m circa; la sezione è rettangolare, 80 x 35 mm. Le estremità vicine di due di esse, poste ad angolo retto, si collegano con un anello rettangolare (lungo 1,50m), bolzoni e cuscinetti in ghisa. Quest'unione è visibile nel mezzo della chiave degli arconi retti.

2.3 Basamento della Cupola e Primo ordine della Cupola (24m – 46m)

Il sistema di basamento della Cupola è fornito dalla corona di impostazione, avendo il diametro interno di 14,4m, la larghezza di 3,8m (dalle colonne interne al tamburo esterno), ed il diametro esterno di 22,2m. Tale corona di impostazione della Cupola è costruita da due anelli circolari orizzontalmente, avendo uno spazio tra di loro pari a 2,20m, tangenti rispettivamente secondo le generatrici supreme agli estradossi degli arconi retti e degli arconi superiori.

Partendo dal Basamento della Cupola si innalzano tre ordini di sostegni, supportandoci in maggior parte di carichi isolati su 24 allineamenti radiali: colonne e pilastri in tutta la struttura della Cupola.

L'anello inferiore interno supporta il giro di colonne interne del primo peristilio, in materiale di granito, che poggiano sugli arconi inferiori (Figura 2.8). Mentre il giro esterno, in tamburo e pilastro poggiano sugli arconi superiori. Pertanto, l'anello superiore della corona di impostazione supporta il muro continuo esterno del tamburo, insieme con il maggior parte delle sezioni dei pilastri intermedi. Inoltre, i pilastri intermedi in muratura scaricano sugli entrambi dei sistemi di arconi. Nella parte superiore delle colonne sono collegate con cerchiature e tiranti in ferro. La proporzione con cui la sezione di questi pilastri intermedi si distribuisce per il fatto delle resistenze provocate negli apparecchi murari sopra gli arconi superiori ed inferiori è 17:5.



Figura 2.8 Vista interna del Peristilio e anello interno (dal livello di pavimento della Basilica)

Il giro esterno si è formato il tamburo, che è terminato con un ambulacro esterno di lastra in gneiss sostenute da modiglioni, appaiati per ogni pilastro di muratura. Pertanto, è stato innalzato il basamento Stilobate del primo Peristilio esterno, i cui pilastri sono in continuazione dei fulcri del tamburo. Una cornice architravata lega questi pilastri e ne separa l'ordinazione da quella del grande peristilio, formato con 24 colonne granitiche di ordine corinzio, sormontato da una trabeazione ornata di mensole e rosoni, coperto con un tetto conico di lastre di pietra da cui spuntano in corrispondenza delle colonne sottostanti i peducci delle 24 statue del primo giro esterno (solo in stato progettuale, non sono stati realizzati).

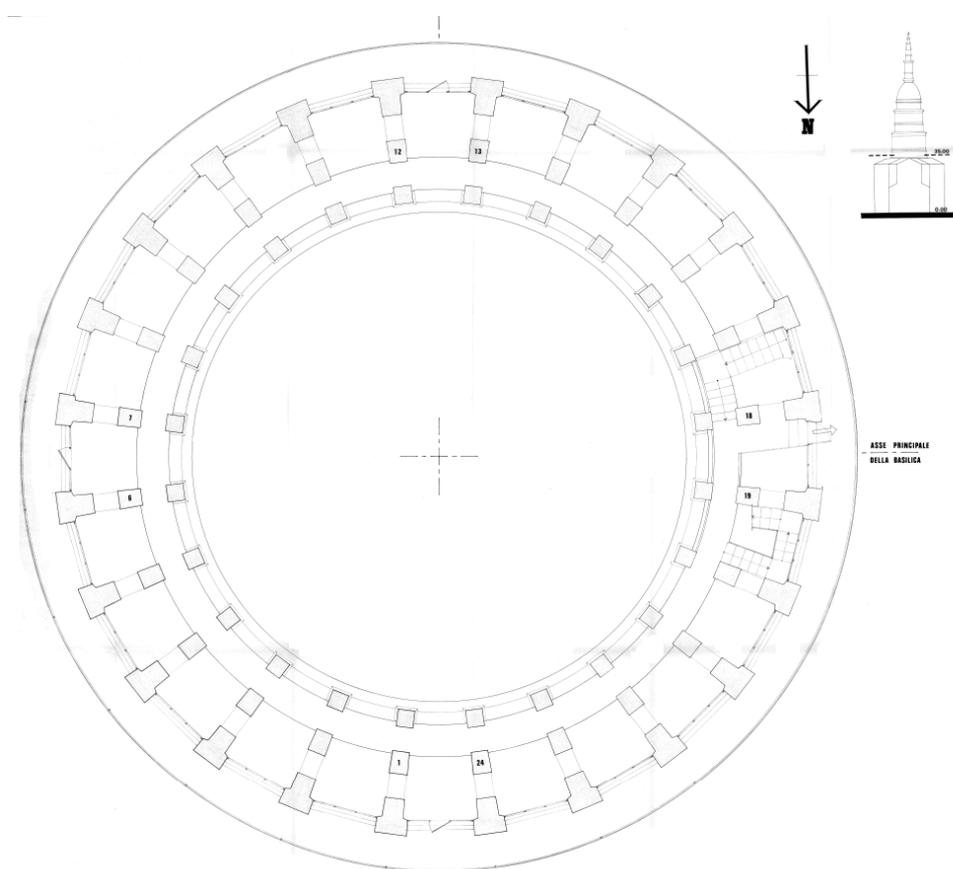


Figura 2.9 Sezione orizzontale a quota di 35m (Basamento del Primo Stilobate)

Mentre il giro interno di sostegni forma dapprima il Peristilio interno di colonne, ed un grande attico di 24 pilastri in muratura rettangolari. I due giri interni sostengono la volta cassettonata a sfondi esagonali e quadrilateri detta Seconda Cupola. Questa Cupola scarica il proprio peso in parte sull'ordine interno di colonne e su quello intermedio, mentre la Prima Cupola scarica alle colonne interne di Primo Peristilio.

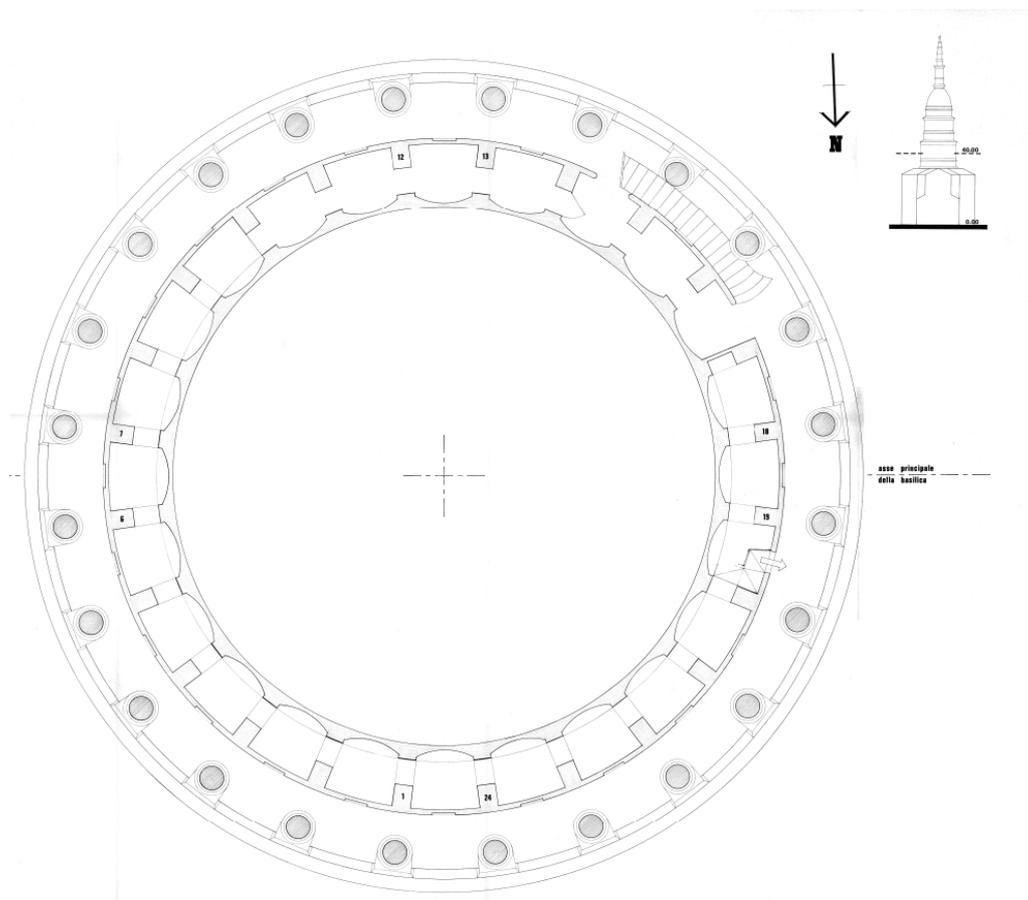


Figura 2.10 Sezione orizzontale a quota 41m (Primo Peristilio)

Alzandoci la vista pochi metri più sopra, i due ordini interni di colonne in muratura andrebbero unire per formare un unico corpo strutturale e, che collegano insieme la parte superiore della Prima Cupola cassettonata da 24 archi rampanti uniti da sottili volte a botte. (Figura 2.11)



Figura 2.11 Vista esterna della Prima Cupola cassettonata, quota tra 42m e 52m

In particolare, sulla Prima Cupola cassettonata presenta un'armatura circolare di ferro della sezione circa di 5cm x 1cm che è collocata verso le reni all'altezza di 3,27m sul piano di imposta per assicurarla da ogni cedimento murario. A tale proposito è molto importante far nota che (secondo Antonelli, Caselli e Daverio) questa armatura circolare di ferro della struttura Antonelliana non determinano l'equilibrio statico, ma servono come lagamenti elastici atti a contenere l'invariabilità della forma, innanzitutto nel caso di azioni dinamiche eccezionali.

2.4 Secondo ordine della Cupola (48m – 67m)

Proseguendo verso in alto del Primo Peristilio, si colloca il basamento del Secondo Stilobate, che a questa quota nella parte interna si trova della Gran Sala (Figura 2.12), posizionata appena sopra della Prima Cupola cassettonata e comunicata con essa attraverso l'occhi della Cupola.



Figura 2.12 Gran Sala

Mentre a questa quota, gli ordini di colonne si riducono a due (come mostrato in Figura 2.13). Inoltre, le cui colonne sono in entrambi muratura. Quello esterno sorregge il Secondo Peristilio e, quello interno prosegue fino alla Cupola esterna detta Gran Tazza.

Nella parte esterna di secondo Peristilio è costituito da 24 colonne in granito, che proseguono fino in corrispondenza dell'Attico e sorregge una copertura in lastre di Luserna. Invece al giro interno di colonne, nella parte alta della Gran Sala, andrebbero unire con i pilastri inclinati costituenti la parte bassa dell'Imbuto Antonelliano, che è la struttura interna formata da tre piccole Cupole (come presentato in Figura 2.3 basso destra).

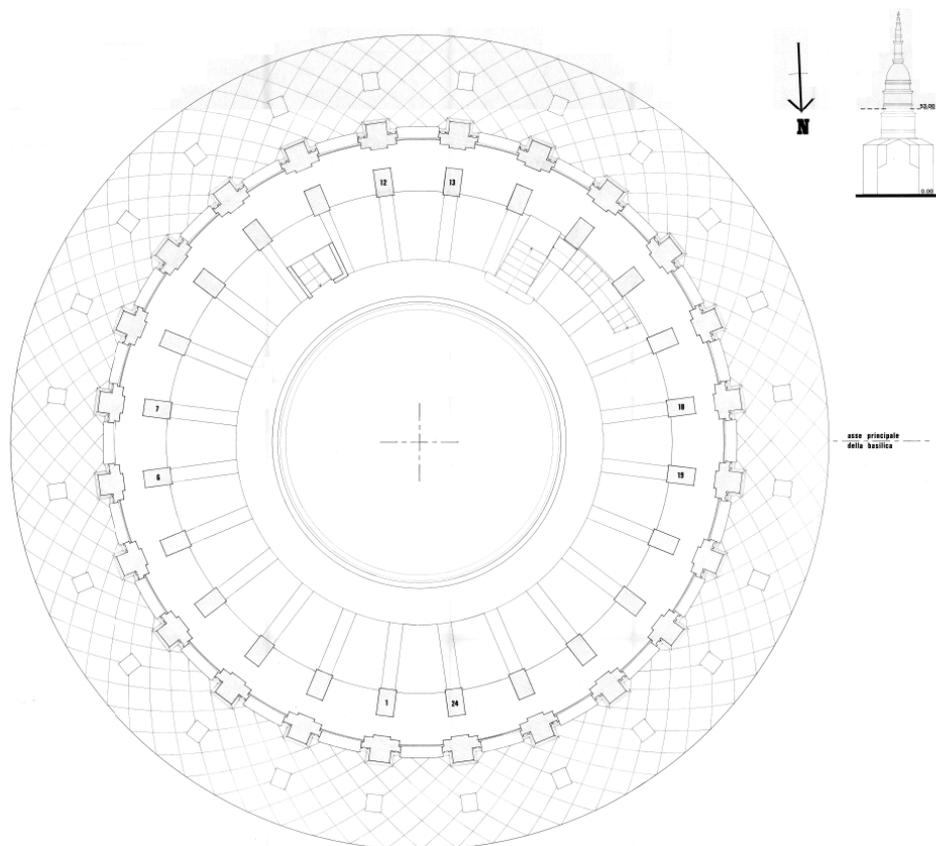


Figura 2.13 Sezione orizzontale a quota di 53m (il Basamento di Secondo Stilobate)



Figura 2.14 Interno della Gran Sala: salita dal livello 53m al livello 69m

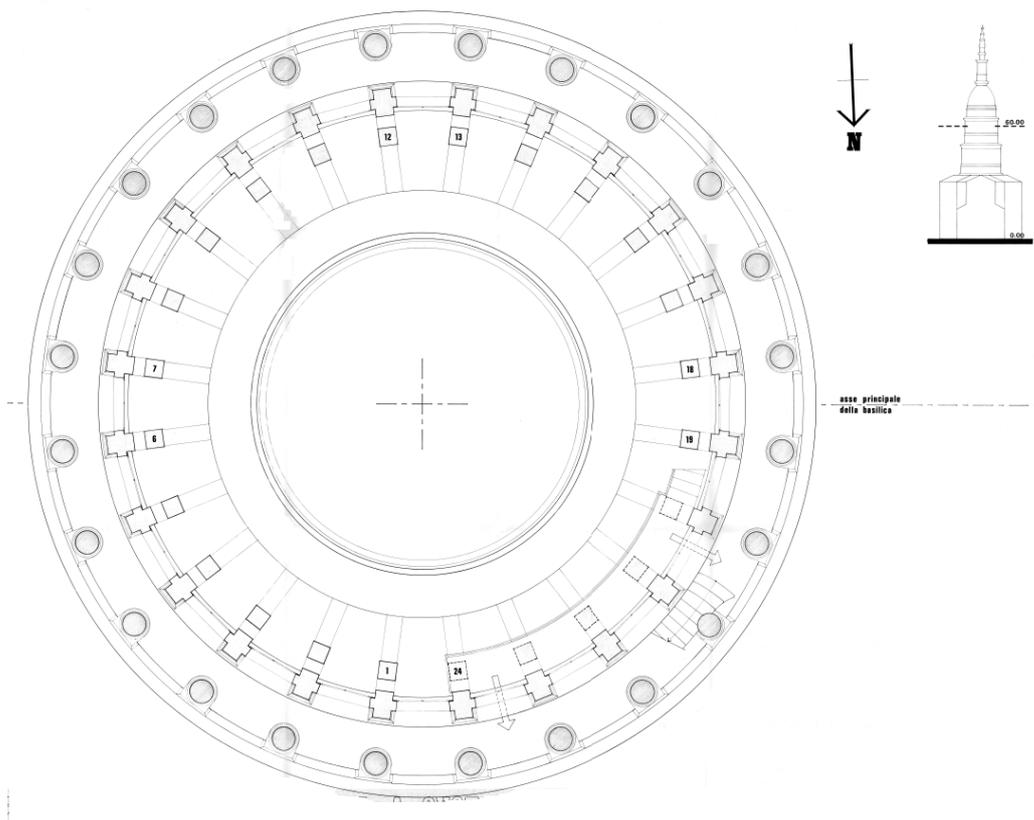


Figura 2.15 Sezione orizzontale a quota 61.6m (Secondo Peristilio)

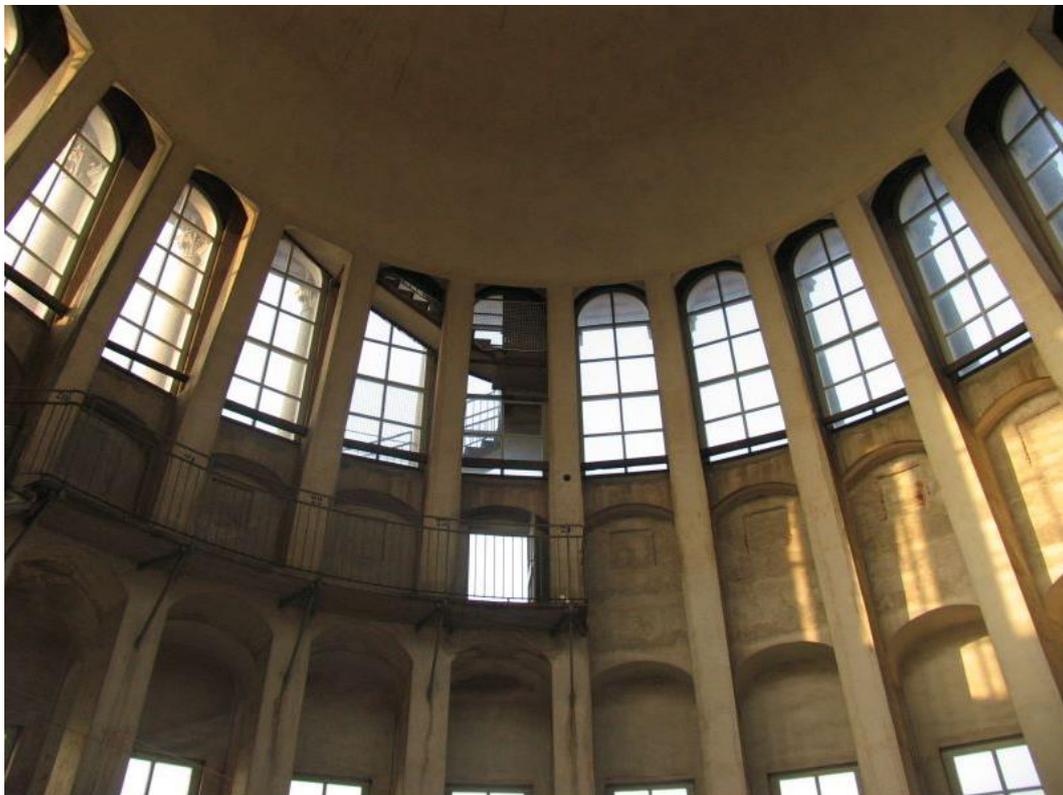


Figura 2.16 Interno della Gran Sala, dal livello 53m al livello 69m

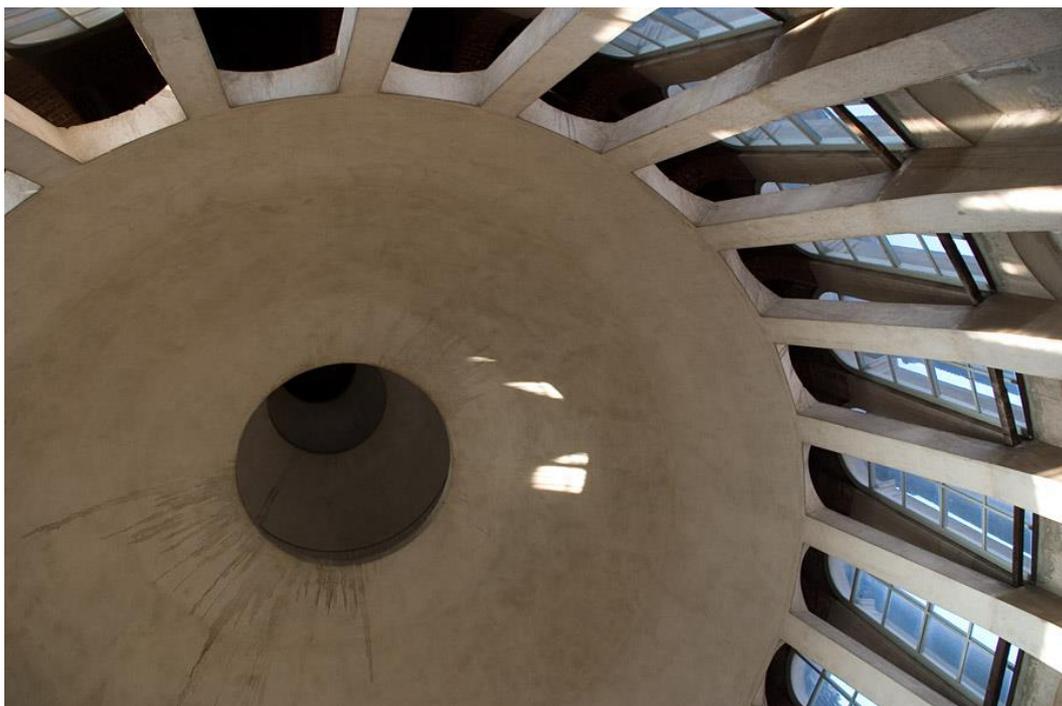


Figura 2.17 Seconda Cupola, Vista dal basso scattata dal pavimento della Gran Sala (livello 53m)

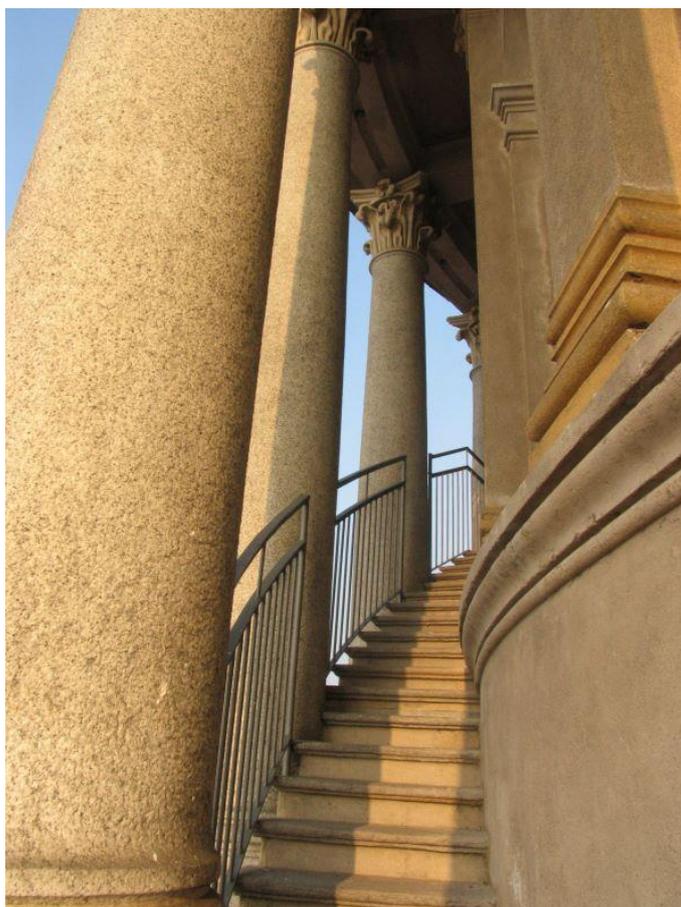


Figura 2.18 Vista esterna del Secondo Peristilio

2.5 Attico, Imbuto Antonelliano e Gran Tazza (67m – 84m)

La parte dell'attico, si trova a livello tra 66 e 70 m di quota, in cui presentano delle finestre tonde in circolazione. Esso è formato da 24 pilastri in muratura sui quali si impostano altrettanti costoloni verticali della Gran Tazza. Mentre tra i pilastri si collegano con le murature in cui presentano le finestre tonde circolazione come accennato prima.

Nella corona superiore dell'Attico, a quota 70 m, i pilastri inclinati dell'Imbuto Antonelliano si collegano con quelli verticali che sorreggono la Gran Tazza esterna a livello della prima delle tre cupolette interna dell'imbuto per mezzo di doppi archi (Figura 2.24).

La Gran Tazza è la cupola esterna che si erge tra 70 e 83 m costituita da sottili vele in muratura ad una testa, da 24 costoloni verticali a due teste e 3 orizzontali di irrigidimento. Sopra le costolature verticali se ne trovano altrettante in pietra di Luserna, che sostengono, incastrandosi con esse, le lastre di copertura.

Internamente, in questa zona, si trova l'Imbuto Antonelliano (Figura 2.19), che regge la maggior parte del peso del Cupolino. Il primo e il secondo ordine di pilastri dell'Imbuto (Figura 2.24) è costituito da 24 elementi, mentre nel terzo ordine questi riducono a 8.

I più recenti rilievi eseguiti dall'Ing. Germanino rivelano la presenza di numerose cerchiature in ferro sia nei costoloni orizzontali della Gran Tazza che nelle cupole dell'Imbuto.

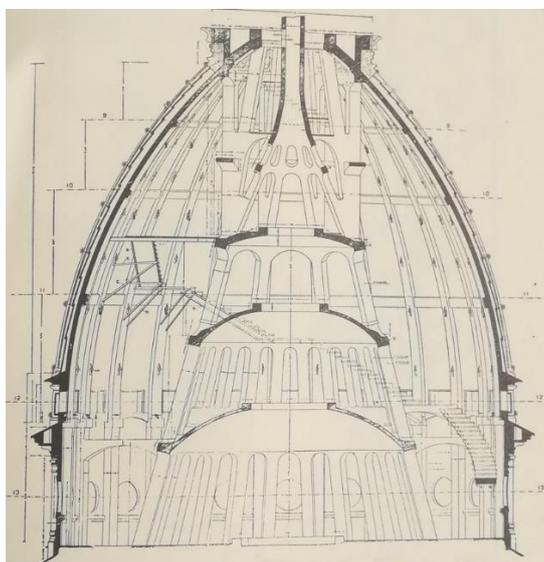


Figura 2.19 Sezione verticale dell'Imbuto Antonelliano, dell'Attico e della Gran Tazza (66m - 86m)



Figura 2.20 Seconda intercapedine interna intorno a Imbuto Antonelliano, vista da 66m



Figura 2.21 Gran Tazza vista verso l'alto da quota 74m



Figura 2.22 Sommità della Gran Tazza da quota 78m a 87m



Figura 2.23 Collegamenti tra Attico e Imbuto Antonelliano, vista verso l'alto dal livello 63m

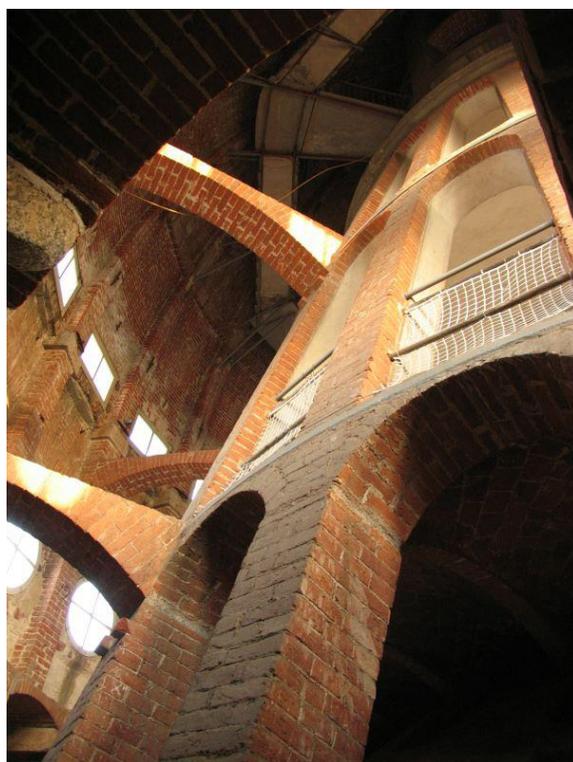


Figura 2.24 Vista esterna dell'Imbuto dal livello 63m a 78m



Figura 2.25 Gran Tazza, vista a quota tra 75m a 85m

2.6 Cupolino (84m – 118m)

Il Cupolino è la parte più alta della Cupola. Poggia sulla sommità dell'Imbuto Antonelliano, dove questo si congiunge alla Gran Tazza.

Il Cupolino si può suddividere, con evidente riferimento allo schema strutturale della Cupola, in varie sezioni; il Basamento è la parte che si raccorda esternamente con la Gran Tazza ed internamente con il l'Imbuto, quindi vengono il Primo Stilobate, il Primo Peristilio, il Secondo Stilobate e il Secondo Peristilio. L'elemento di chiusura è infine la Guglia

Inizialmente il Cupolino era costituito da un leggero tubo in muratura che sosteneva all'interno una scala a chiocciola e superiormente la cuspide, all'esterno due ordini di colonne in marmo ciascuno con relativo stilobate.

Il Danusso, a partire dal 1931, come sarà descritto nel capitolo successivo, fece ricostruire la cuspide in calcestruzzo armato, così come il tubo in muratura, mentre le colonne dell'Imbuto furono incamiciate con un getto di calcestruzzo.

Capitolo 3. I dissesti dell'opera

3.1 1844 – 1878 L'operato di Alessandro Antonelli

Prima di progettare la Cupola da imporre sulla Basilica di S. Gaudenzio, Alessandro Antonelli fece un esame minuzioso (che si rivelerà comunque non sufficiente) delle condizioni di stabilità in cui si trovavano i quattro grandi pilastri di crociera della Basilica stessa, sotto diversi aspetti: area della loro sezione orizzontale, natura del suolo su cui vennero fondati e qualità dei materiali laterizi e cementizi impiegati.

Stabilito un confronto fra le aree degli appoggi della Cupola e quelle degli edifici elevati più conosciuti, ne risultava per i sostegni dell'Opera Antonelliana, una superficie resistente capace di portare pesi enormi; di gran lunga superiori a quelli imposti.

La proporzione esistente fra la somma delle aree delle sezioni dei sostegni (pilastroni) e l'area della superficie totale sottostante alla Cupola di S. Gaudenzio, venne espressa da Antonelli mediante una frazione compresa fra $1/5$ ed $1/6$, cioè circa $2/11=0,182$. Tale frazione risultava minore di quelle che rappresentavano l'analoga proporzione per la cupola di S. Pietro ($1/3 \div 1/4$) e per S. Paolo di Londra ($1/4$), e maggiore relativamente agli edifici gotici in generale ($1/7 \div 1/8$).

Antonelli proseguì col notare che i pilastroni di crociera non avevano tutti la stessa forma di sezione e la stessa area (e quindi avevano diversa comprimibilità); tuttavia si poteva adottare il sostegno destro anteriore come “supporto tipo”. *Esso ha circa 30m² di area lorda, e circa 25m² di area netta, depurata dal vano circolare della scala a chiocciola.*

Inoltre, se si paragonano le dimensioni lineari del pilastro e quelle della corda degli archi sovrainposti, si ottenne un rapporto inferiore a quello delle omologhe dimensioni in basiliche simili.

Per quanto riguarda la natura del suolo su cui vennero fondati detti pilastroni, si osservò che le fondamenta dei pilastri *raggiungono una ragguardevole profondità trapassando il sottosuolo delle ordinarie fondazioni, che è di natura argillo-cretacea compatta, attraversata da radi e sottili strati di sabbia nelle prossimità del suolo, più resistente e tenace a maggior profondità.*

Infine, per quanto concerne la struttura dei pilastroni, l'Architetto notò che: *la loro struttura è sufficientemente diligentata specialmente nelle parti inferiori, la qualità dei mattoni è eccellente, adeguato il loro grado di cottura, di buona qualità le malte, sebbene non ne siano ben regolati gli strati.*

In realtà, come sarà tra poco esposto, i pilastri sostenenti la Cupola daranno non pochi problemi all'Antonelli, il quale li ritenne in un secondo tempo *mal costruiti, sia per tecnica che per materiali*.

Prima dell'inizio dei lavori di costruzione della Cupola, alcuni cedimenti avevano già avuto luogo, ma *i segni già evidenti e marcati di abbassamento uniforme avvenuto nei pilastri, lasciavano credere ad una omogeneità negli strati di fondazione e nella struttura di essi*.

Nondimeno, alcune delle considerazioni promosse dall'Antonelli prima dell'erezione della Cupola si verificarono esatte, infatti si verificò un abbassamento uniforme dei pilastri durante la costruzione dell'opera, *quasi insensibile, dopo osservazioni di lunghissima durata*.

Antonelli osserva che *La natura dei peli che da tanto tempo si osservano in grado quasi uguale, negli speroni o muri d'attacco dei pilastri, dimostra l'esclusiva inevitabile azione della compressione e l'azione insensibile delle spinte non verticali che sono state perfettamente elise mercé le disposizioni costruttive e le imbrigliature ferree degli archi e pennacchi*.

3.2 1881 – 1888 Primi cedimenti e consolidamenti

Autunno 1881. Iniziano i lavori di restauro, a seguito del cedimento del pilone destro del presbiterio (pilastro sud-est). Antonelli in tale occasione afferma che siffatto fenomeno non ha determinato danni alla Cupola, *come dimostrato da una lesione esistente su un muro adiacente, posta sotto controllo mediante apposizione di una striscia di carta, la quale non si è rotta*.

Durante la ripresa dei lavori di consolidamento, sempre nel 1881, si assiste però ad un peggioramento della situazione statica, tanto che si ruppero anche le lastre di pietra dell'ambone; fu anche a seguito di questo fatto che si mise mano ad una pressoché totale campagna di consolidamenti nella zona del danno.

Gennaio 1882. Il Presidente della Fabbrica Lapidea scrive all'Architetto: *Nella facciata del pilastro della Basilica di San Gaudenzio ultimamente sottomurato si sono manifestate alcune screpolature, le quali sebbene non presentino per ora alcun pericolo, pure possono generare qualche timore nella popolazione, e quindi è indispensabile che le medesime vengano fatte scomparire prima dell'imminente festa patronale*.

L'Architetto, essendo ammalato, manda sul luogo il figlio Ing. Costanzo, il quale *ha osservato non esservi il menomo pericolo, solo che occorrono le sottomurazioni ora intraprese, essendosi riconosciuto che un pilastro venne costruito con cattiva calce e*

sabbia, e deteriorato dal pulpito che venne al medesimo addossato. Il 20 gennaio, proprio prima della festa patronale, viene ordinata la chiusura della Basilica per poter dare ai lavori la maggiore estensione.

Febbraio 1882. L'Architetto presenta una dettagliata perizia dei lavori da eseguire al pilastro di Sud-Est, con due disegni e la descrizione esatta delle opere.

La perizia prevede la ricostruzione pressoché integrale del pilone e dei muri annessi. La ricostruzione dei vari archi e piedritti è prevista con la distribuzione di ligati di pietra.

La perizia comprende poi il computo (casellario) delle sezioni delle murature, della pietra per ligati, delle cubature per le murature, e del ferro di Aosta.

La muratura del pilone è in parte armata. La maggior quantità del ferro è infatti prevista per "collegamenti nel pilone nella parte perforata dal corridoio d'accesso all'ambone".

Nel riepilogo della perizia sono riassunte le misure delle opere da eseguire in Tabella 3.1.

Tabella 3.1 Computo rinforzo pilastro Sud-Est (1882)

A	Muratura del pilone	m ³	264
	Pietra per ligati	m ²	192
	Ferro per collegamenti	kg	957
B	Muratura della parete della sacrestia ed archivio parallela all'asse longitudinale	m ³	72
	Pietra per ligati	m ²	52
C	Muratura della parete ut sopra parallela all'asse trasversale della Basilica	m ³	65
	Pietra per ligati	m ²	14
D	Muratura dell'arco sopra l'organo	m ³	8
	Pietra per ligati	m ²	5
E	Muratura per nuovo volto progettato sopra il locale dell'archivio	m ³	23
	Ferro per le tre chiavi	kg	496

In questo periodo ritornò ad aleggiare una sorta di sfiducia che aveva caratterizzato per molto tempo l'operato di Antonelli per conto della Fabbrica Lapidea. Infatti, *il Consiglio incarica la Giunta, perché d'accordo con la Fabbrica Lapidea, faccia procedere per mezzo di una commissione agli studi sulla solidità dei pilastri che sostengono la Cupola, nel più breve termine possibile.*

Settembre 1882. La Giunta delibera di autorizzare la Direzione della Fabbrica Lapidea a proseguire i lavori da farsi per il consolidamento del secondo pilastro della Cupola (lato

Nord-Est). Entrambe le sottofondazioni dei pilastri lato Est della basilica sono realizzate costruendo archi rovesci in muratura la cui sezione verticale è mostrata in Figura 3.1 e la cui disposizione in pianta è visibile in Figura 3.2.

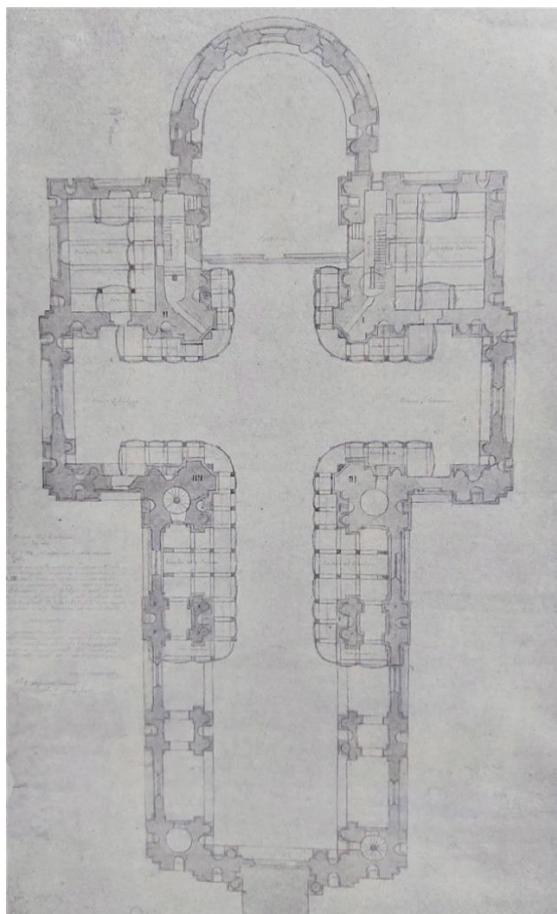


Figura 3.1 Fondazione e sottofondazione

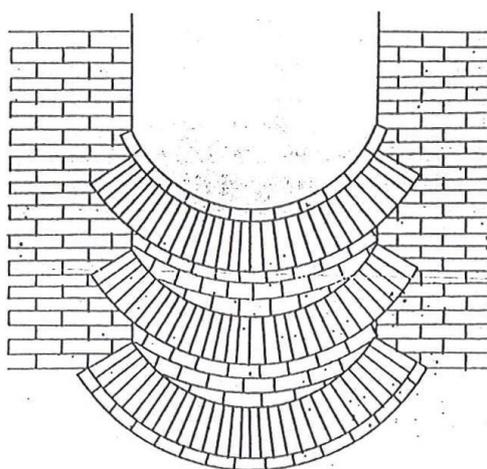


Figura 3.2 Archi rovesci di sottofondazione

Dicembre 1882. Il Consiglio Comunale istituisce una Commissione di esperti per controllare l'operato dell'Antonelli e verificare lo stato di sicurezza della Cupola. La relazione di tale commissione evidenzia quanto segue:

- 1. L'intera cupola di nuova realizzazione, dalla Cupola a Cassettoni a salire (da 41m in su) non presenta alcun segno di ammaloramento, fessurazione o cavillatura.*
- 2. Nella parte inferiore si notano invece delle lesioni che vanno aumentando dall'alto verso il basso. Parecchi screpoli, e sono davvero numerosissimi, si vedono nelle piattabande messe sopra i tre giri concentrici di sostegni verticali che formano l'ossame primo di appoggio del tamburo posto alla base della Cupola. Secondo la commissione questi screpoli danno indizio di qualche movimento avvenuto nell'uno dei tre giri di sostegni, ovvero di un ineguale cedimento rispettivo dei tre giri stessi, il che potrebbe benissimo essere stato dovuto ad ineguale assetto delle strutture, perché l'uno dei tre cerchi, quello più interno, si pianta solamente sopra le quattro grosse e moderne arcate a scarico che sono più basse; gli altri due cerchi invece hanno il loro piede messo sopra le altre quattro arcate moderne a scarico di maggiore saetta e più elevate. Il primo giro più interno è gravato dalla massima parte del peso della moderna e grandiosa costruzione, gli altri due portano senza dubbio un peso notabilmente più piccolo, sostenendo direttamente le ordinanze esteriori dei due tamburi sovrapposti, che si vedono di fuori e poco altro peso di tutta la complessa moderna costruzione interna, alla quale i due tamburi dianzi detti fanno di rincalzo anziché l'ufficio di sostegno. Secondo la commissione il maggior numero degli screpoli alle piattabande va attribuito alla circostanza che il primo giro consiste di colonne monolitiche di granito, gli altri due giri di pilastri costruiti per filari con pietre di piccole dimensioni; questi ultimi sebbene assai meno caricati, si saranno di sicuro molto più assestati.*
- 3. La presenza di vari screpoli verticali osservati nelle strutture di collegamento della parte inferiore, tra l'ambulacro al primo ordine e gli arconi, e nel tamburo sopra gli arconi superiori. Questi screpoli sono attribuiti ad un movimento prodottosi in uno o più dei quattro pilastri di base. Alcune fessure si osservano negli arconi inferiori: presso le impostature, negli arconi nord e sud, alla serraglia nell'arcone Est, nulla nell'arcone Ovest e negli arconi superiori. La mancanza di incrinature nell'arcone inferiore Ovest porta la commissione a pensare che i pilastri in cattivo stato erano siano i due verso Est.*

4. *Nelle volte adiacenti ai quattro arconi della crociera vi sono delle fessure, delle screpolature e delle fenditure anche ragguardevoli. Più notabili sono le lesioni della volta che copre il Presbiterio dove vi sono appunto delle fenditure di distacco sui due fianchi, nel luogo delle lunette, e giù fino alle impostature. Le fenditure sono più marcate nelle due volte simili trasverse sul lato est di ciascuna, e più lievi su quello Sud. Si riducono a cavillature nella quarta volta della navata maggiore, sempre nei fianchi e nelle impostature. Secondo i commissari è avvenuto un chiaro distacco: la pesante massa della costruzione a Cupola, si assesta e si abbassa sciogliendosi dal debole legame che la tiene alla rimanente parte dell'edificio che la circonda, lesionando le murature che ve la univano e alle quali si appoggiava.*
5. *Nel pilastrone sud-est si notano le lesioni maggiori. In passato erano infatti state fatte delle notevoli alterazioni nella sua struttura. Alcune aperture vi si erano praticate in maniera inopinata e contraria ad ogni regola più elementare dell'arte. Inoltre, in conseguenza dello stabilimento di alcune stanze di archivio sopra alla sacrestia si rifece per intero il muro di sprone diretto a Est. Ed inoltre presente un difetto di costruzione originaria: il vano cilindrico interiore per collocarvi la scala a chiocciola, ha la prima tratta inferiore dal sotterraneo in su in un posto, poi, si inclina da un lato per un breve tratto e continua in seguito ad innalzarsi verticale secondo un'altra direttrice verticale. Un altro difetto è la cattiva qualità dei mattoni e della malta e l'eccessivo spessore dei corsi di malta.
Le fondazioni di questo pilastrone scendono a soli 3m sotto il pavimento della Chiesa su un terreno piuttosto sciolto e di non buona capacità portante. Nel muro di sprone lungo la sacrestia vi è inoltre un pozzo, che ha il diametro di 2,44m e la profondità di 16m.*
6. *Nel pilastrone Nord-Est si notano una grande quantità di lesioni, molte delle quali recenti e riconducibili alla realizzazione della Cupola, durante la quale si spezzò la lastra di pietra della cantoria e l'architrave dell'apertura per l'accesso a quest'ultima. Anche questo pilastrone è affetto dalla non felice disposizione del vano della scala a chiocciola descritto nel punto precedente.*
7. *Nel pavimento del coro senatorio e nella balaustrata che separa questo dal resto della Basilica, si hanno segni di sensibili sconnessioni, indicanti che il terreno sotto i pilastri deve essersi affondato.*
8. *Un'altra grande crepa di ampiezza maggiore delle altre, sia per la lunghezza, che per la larghezza si trova nel mezzo del coro, la muratura di pianta tonda dell'abside o tribuna, dietro dell'altare maggiore. La fenditura scende dal*

cornicione esteriore con andamento verticale, dividendo la struttura murale, le corniciature e gli ornamenti fino a circa 3m dal piano stradale. Il distacco è largo in cima ed è via via di minore larghezza fino al suo termine inferiore.

9. *Fessure di minore entità si osservano nel pilastro di Nord-Ovest.*
10. *Il pilastro sud ovest è anche interessato da deboli fessurazioni come quello nord-ovest. Nel suo interno vi è una cavità cilindrica per la collocazione della quarta scala a chiocciola non ancora costruita. Le fondazioni di questo pilastro si posano sopra dei muraglioni che sono resti di antichissime costruzioni, e si trovano ad una piccola profondità. Uno scavo recente, eseguito nel vano interno di questo pilastro, ha mostrato che le sue fondazioni sono profonde soltanto da 2,60m a 2,80m su tre lati. Sul quarto lato, corrispondente alla superiore cappella attigua, manca completamente la struttura murale, essendosi trovata un'arcata poco sotto il pavimento della cappella. L'arcata è inoltre mal costruita, ed ha poca saetta. Alcune screpolature si vedono verso il piede di questo pilastro; esse sono dirette verticalmente e si trovano in uno dei piedistalli delle colonne che fanno l'ornamento della navata principale, precisamente in quello col quale la navata stessa termina e si unisce allo spazio coperto della Cupola.*
11. *È presente un fuori piombo della Cupola all'altezza di 107m pari a 21cm in direzione Est-Sud-Est. Tale misura, molto importante per capire l'entità del cedimento della struttura, è tuttavia difficilmente verificabile in quanto il riferimento al centro della crociera non può essere identificato con certezza.*

Dalle considerazioni fatte, la commissione conclude che le più probabili cause dei guasti esaminati siano due: in primo luogo i difetti di costruzione dei quattro pilastri e dei loro contrafforti, il secondo luogo la cedevolezza e la scioltezza del terreno.

Gennaio 1883. Antonelli presenta il progetto di rinforzo delle fondazioni del pilastro nord-est in analogia a quello proposto e in attuazione sul pilastro Sud-Est.

Marzo 1883. Si concludono i lavori di ripristino del pilastro Sud-Est. Sono in esecuzione i lavori di sottomurazione dei pilastri Sud-Est, nord-est e nord-ovest. Il fuori piombo di 21cm misurato a dicembre 1882 viene rimisurato e risulta invariato. Il sindaco, Ing. Ricca, trasmette al Prefetto una lettera in cui asserisce che la situazione statica della Cupola è sotto controllo e non ci sono rischi per l'incolumità della popolazione. In questa lettera aggiunge che, dai calcoli in suo possesso, i pilastri, tutto compreso, sono caricati con una

compressione media di 16kg/cm^2 (valore probabilmente corretto) e che campioni di muratura, testati presso l'Arsenale di Torino dal Generale Cavalli, sostengono sino a 70kg/cm^2 . Quest'ultimo dato invece non era corretto in quanto la media delle resistenze che si erano ottenute era di 120kg/cm^2 , mentre il valore massimo era stato di 143kg/cm^2 .

Aprile 1883. Dal verbale dell'adunanza della Giunta Municipale, Direzione della Fabbrica Lapidea e Commissione Edilizia, risulta che l'Arch. Antonelli, premesso non essere tanto facile, per non dire quasi impossibile il precisare preventivamente le opere da eseguirsi, quando trattasi, come nel caso in concreto, di riparazioni straordinarie e di consolidamento di un grandioso edificio, dichiara che a suo avviso, per dare una solida base alla Cupola, le opere di consolidamento, non devono essere limitate ai quattro pilastri della grande crociera, ma essere necessario di estenderle ai corpi annessi, che ne formano le otto ali di speronamento ampliandone le basi in senso trasversale coi muri delle Cappelle maggiori di S. Gaudenzio e di S. Adalgisio, e nel senso longitudinale coi muri ed arconi del Presbiterio per le orchestre e coi muri ed archi delle cappelle minori del Crocefisso e della Madonna.

Novembre 1885. Si annuncia la conclusione dei lavori di consolidamento e sottomurazione di tutti i quattro pilastri, restando a compiersi solo alcune opere secondarie.

L'Architetto propone ora il lavoro di riduzione dei quattro fascioni e pennacchi, costituiti dalla vecchia muratura della Basilica, che non interessano la nuova struttura.

Febbraio 1886. Il Consiglio Comunale approva la realizzazione di pennacchi e fascioni destinati a coordinare l'architettura della Chiesa di S. Gaudenzio con la Cupola soprastante.

22 gennaio 1888. L'opera è finita: la Basilica è riaperta al popolo per la festa di S. Gaudenzio. La spesa totale sostenuta dal Comune per i lavori straordinari di restauro al S. Gaudenzio dal 1882 al 1887 fu di lire 190 000 circa.

18 ottobre 1888. Muore a Torino, all'età di 90 anni, l'Architetto Alessandro Antonelli.

3.3 1889 – 1906 Interventi minori

Con il termine della campagna dei consolidamenti si chiuse la fase del cantiere e la costruzione godette di un periodo di relativa tranquillità, durante il quale non si registrarono né interventi edilizi significativi, né cedimenti, né allarmi particolari, come testimoniato

dall'assenza di precise notizie durante il periodo compreso tra quegli anni e la fine degli anni '20 del Novecento.

Nondimeno, si riporta il resoconto di alcuni episodi che in avvenire manifesteranno la loro influenza.

Maggio 1891. Nell'adunanza della Fabbrica Lapidea, il Presidente Ing. Massazza ed i membri Ing. Ricca, Ing. Camola, Avv. Magnani Ricotti, esaminano l'opportunità di far costruire due brevi tratti di scala per l'accesso alla Cupola, sostituendo le corrispondenti scale in legno «delle quali l'una trovasi all'entrata della Cupola, e l'altra alla sortita della cuspide superiormente». Viene incaricato del progetto l'Ing. Costanzo Antonelli, figlio dell'Architetto.

L'Ing. Costanzo aggiunge altre opere ancora mancanti per il completamento dell'edificio:

- un riparo in ferro al primo ballatoio esterno, all'origine del tamburo;
- una balaustrata in vivo sulla piattaforma al nascimento del cupolino ed un riparo in ferro alla piattaforma del cupolino da cui si eleva la parte ad un solo ordine di colonne;
- uno strato impermeabile in cemento sul lastrico di calce e mattone pesto nell'ambulacro del primo ordine esterno di colonne;
- dei telai in ferro alle aperture del cupolino con relative chiusure in vetro sull'esempio del simile lavoro eseguito proprio in quei tempi alla Mole di Torino dallo stesso Costanzo.

Tutte queste opere vennero eseguite negli anni seguenti, fino al 1896, a cura della Fabbrica Lapidea e con la direzione dell'Ing. Costanzo Antonelli e dell'Ing. Massazza.

Le opere di Costanzo relative alla scala interessarono la struttura del padre Alessandro, in quanto si resero necessarie alcune riduzioni della sezione dei piedritti attorno alla Cupola cassettonata, che determinarono in seguito significativi dissesti, sui quali interverrà Arturo Danusso.

21 gennaio 1893. Il Sindaco scrive al Presidente della Fabbrica Lapidea, Ing. Massazza, e chiede informazioni *essendo venuto in cognizione dalla voce pubblica essersi in questi giorni spezzata una delle chiavi a rinforzo degli arconi della Cupola.*

L'Ing. Massazza risponde: *Lo straordinario freddo della notte dal venerdì al sabato 20 e 21 corrente mese, spezzò una delle due chiavi all'imposta dell'arcone all'imbocco della*

navata dello Scuròlo. Verificata subito la causa di tale rottura si trovò che si ruppe in sito dove venne ribollita per l'unione dei due pezzi, e dove tale ribollitura venne fatta malamente per nascondere la congiunzione agli occhi d'Argo, del celebre Architetto Antonelli, per cui invece di farla rigonfiare, in quella località era ridotta della grossezza regolare di tutta la chiave. Del resto, la funzione di questa chiave nella località ove si trova è nulla, poiché è speronata dalle lunghezze dei muri laterali della navata principale e del coro.

3.4 1906 – 1926 Un tranquillo intermezzo

29 agosto 1907. Crolla il Santuario di Boca, costruito su progetto di Antonelli tra il 1830 ed il 1888. Questo disastro rinnova a Novara la paura per la Cupola.

Gennaio 1909. Il terremoto che distrugge Messina e Reggio il 28 dicembre 1908 rinnova la paura di alcuni novaresi che temono per la Cupola. Il terremoto padano del 13 gennaio 1909 porta alcuni abitanti delle case che si trovano in prossimità della Basilica di San Gaudenzio a interpellare il Sindaco per chiedere una verifica statica dell'opera. Una apposita commissione, dopo attento sopralluogo, non rileva alcun segno di allarme e chiude la questione.

1915. Si eseguono importanti restauri al campanile dell'Alfieri. Nell'interno del campanile viene collocata una colonna piezometrica dell'acquedotto municipale.

1912-1917. In questi anni numerosi operai lavorano a *levare lo zolfo sul cupolino; riparazione alle screpolature sul cupolino, levare lo zolfo e mettere il ceresit; sigillare le screpolature del zolfo sul cupolino.*

Nei giunti e nelle sedi dei legami in ferro all'interno degli elementi in granito della struttura del cupolino fu infatti eseguita durante la costruzione la saldatura con zolfo.

La prima relazione che mette in evidenza le condizioni di deterioramento delle strutture murarie della Cupola per effetto dello zolfo, risale al 1907; tuttavia in tale periodo non si fece nulla a riguardo.

Il cattivo stato delle parti in granito del cupolino non era da attribuirsi a materiale scadente o a fatale degradazione per l'azione delle intemperie attraverso il tempo. Il cupolino fu costruito con ottimo granito bianco del novarese il quale, empiricamente, era tra le pietre meno sensibili all'azione atmosferica. La causa della malattia del granito stava

essenzialmente nella presenza di residui di zolfo intorno ai punti ove si sono saldati in opera gli elementi di raccordo in ferro. Questi residui, con la pioggia, generano una soluzione solforica la quale lentamente, imbibendo in superficie il granito, indebolisce l'adesione dei granuli che lo compongono (quarzo, feldspato, mica).

In definitiva la fuga dello zolfo dalle sedi delle armature in ferro e la potente azione corrosiva sui ferri stessi, producono l'effetto di un certo slegamento nella struttura del cupolino.

È conservata inoltre memoria dei problemi suscitati dalla sostituzione del muro tra Basilica e campanile, con una cancellata (1920).

3.5 1927 – 1954 L'epoca Danusso

1927. La statua del Salvatore (posta in sommità della cuspide) viene colpita dalla scarica di un fulmine. Si riscontrano guasti al parafulmine. Dopo un lungo silenzio, si torna a parlare con una certa costanza della Cupola. Destano infatti allarme le condizioni di usura delle colonne granitiche dell'ultimo ordine del cupolino, al di sotto della cuspide conica.

Il prof. Danusso, luminare di Scienza delle Costruzioni presso il Politecnico di Milano, è incaricato dal Podestà di esaminare le condizioni della struttura nella parte alta della Cupola. Egli propone i seguenti interventi:

- la demolizione della cuspide ed il conseguente suo rifacimento in calcestruzzo armato;
- la realizzazione di una scorza in calcestruzzo sulla parte interna delle otto colonne dell'ultimo ordine del cupolino;
- la realizzazione di una trave di ripartizione dei carichi (aumentati per effetto delle nuove opere in calcestruzzo armato) nella zona del castello conico dove i pilastri inclinati si riducono da 24 a 8.

1928. Si osserva che la statua del Salvatore oscilla per effetto del vento. Le opere previste dal Danusso erano motivate dall'accertamento di uno stato di fessurazione preoccupante dei capitelli e delle basi delle colonne, e dalle verifiche statiche condotte sotto l'azione del vento, le quali facevano temere la rottura del materiale a causa delle pressioni troppo elevate alla base delle colonne sottovento.

1929. Un secondo fulmine colpisce la statua alla testa, asportandone una parte. Attraverso la breccia così costituitasi si infila l'acqua piovana, che scende fino nell'interno del cupolino, passando attraverso il tubo di sostegno della stessa statua. L'ultimo pezzo monolitico della cuspide, già spaccato dal fulmine, viene provvisoriamente serrato con staffe.

1930. Si decide di calare al suolo la statua del Salvatore per le necessarie riparazioni. Si costruisce un castello di legno alla sommità della cuspide. La statua è calata nell'ottobre del 1930 e viene trasferita a Milano per le riparazioni. Durante i lavori si osserva con maggior preoccupazione il cattivo stato di alcune parti in granito del cupolino, ma se ne attribuisce erroneamente la causa alle *“oscillazioni provocate alla sommità della Cupola dalla spinta del vento”* e alla *“gelività delle pietre vive esposte alla nebbia e al gelo per tutta l'altezza”*.

1931. Si avviano i lavori proposti dal prof. Danusso. Si eseguono le opere di demolizione della cuspide. Precisi ordini di Danusso impongono che occorre garantire la stabilità consolidando anzitutto la base del giro degli 8 pilastri inclinati a sostegno del cupolino, prima di continuare con il consolidamento delle 8 colonne dell'ultimo ordine.

Dopo l'esecuzione del primo lavoro in calcestruzzo armato, il prof. Danusso comunica in una relazione alla Fabbrica Lapidea quanto segue:

- Le otto colonne, che nascono a circa otto metri sotto l'imposta della cuspide, sono in parte deteriorate, e soprattutto tormentate dalle oscillazioni negli orli delle due basi. Traguardando all'appoggio del capitello sul fusto, si vede quello poggiare su questo in pochi punti. Computando gli effetti di un forte vento capace di generare una pressione di 15kg/m^2 , si riconosce che il granito può essere costretto a sopportare una pressione specifica dell'ordine di 200kg/cm^2 , pressione che l'usura degli spigoli può notevolmente rafforzare.
- Gli otto pilastri inclinati, in mattoni, impostati ad una trentina di metri sotto l'imposta della cuspide, sopportano per il solo peso della struttura circa 30kg/cm^2 di pressione; e se si aggiunge l'effetto del vento si sale facilmente a 45kg/cm^2 senza tener conto degli incrementi momentanei che questa pressione specifica può subire per l'effetto dinamico delle oscillazioni della struttura.
- Non si può lasciare senza rinforzo la zona corrispondente ai due ultimi ripiani e alla cuspide. Lo esigono sia le sollecitazioni, sia il cattivo stato di conservazione delle colonne.

- È vivamente consigliabile il rinforzo degli otto pilastri murari, almeno nel tratto tronco conico in cui essi sopportano, senza l'ausilio di pilastri minori, tutta la struttura.

Il rinforzo effettuato risponde ai criteri seguenti:

- a. Mantenere inalterato l'aspetto esterno della guglia.
- b. Demolire e rifare la cuspide conica, costituendola con una camicia in cemento armato, nel quale costole, balconcini e collegamenti siano ricondotti ad un unico sistema solidale, in cui la grande statua del Redentore trovi un sicuro ancoraggio.
- c. Proseguire in basso la scorza conica con una scorza cilindrica aderente alla parte interna delle otto colonne; e calcolare questa scorza a pressoflessione in modo che essa sia capace di reggere il peso della nuova e della vecchia struttura, e di contenere, legate a sé, le otto colonne supposte prive di qualunque efficienza statica; mantenute cioè a far mostra di sé, ma messe onorevolmente in pensione riguardo all'ufficio statico.
- d. Fondare la scorza cilindrica sul ripiano allargato, che separa la tratta ad otto colonne da quella a sedici mediante un piastrone a gradoni che, permettendo ancora l'accesso al balcone, distribuisca bene sulla struttura inferiore, che per ora appare stabile, gli sforzi provenienti per peso e vento da quella superiore. Concepita così la struttura, il calcolo che dalla concezione direttamente consegue, non ha per sé stesso alcun criterio di novità che meriti particolari riferimenti. Esso è stato condotto, come di dovere, col pieno rispetto delle norme ministeriali per le opere in cemento armato.

Maggio 1932. La statua del Salvatore, dorata a nuovo, ritorna al suo posto in cima alla Cupola.

Autunno 1934. Si notano alcune fratture recenti ai capitelli delle colonne interne del primo stilobate del cupolino. Questi capitelli reggono il peso della parte alta del cupolino, nella quale è stato eseguito nel 1932 il primo lavoro in calcestruzzo armato.

1934-1935. In questo lasso di tempo le preoccupanti fratture si allargano e si estendono a quasi tutti gli otto capitelli, che sono dunque provvisoriamente cerchiati con robuste staffe in ferro.

Si ha inoltre testimonianza di alcuni distacchi delle decorazioni interne in gesso, appartenenti alla Cupola Cassettonata.

Luglio 1935. L'Ingegnere Capo del Corpo Reale del Genio Civile relaziona su un sopralluogo effettuato con la commissione della Fabbrica Lapidea. Oltre alle varie opere di presidio resesi necessarie per prevenire danni a persone dovuti ai suddetti distacchi, si evidenzia il grave stato dei capitelli e delle giunzioni delle parti in granito. Si raccomanda la continuazione delle opere di consolidamento intraprese dal Danusso.

Febbraio 1937: Viene presentato alla Consulta Municipale il nuovo progetto di consolidamento di Arturo Danusso, relativo al primo ordine di colonne del cupolino. Si tratta di un progetto del tutto simile a quello studiato per la parte soprastante assieme alla quale, secondo le intenzioni del progettista, avrebbe dovuto condurre al generale riassetto statico del cupolino.

Durante questa fase viene previsto anche il consolidamento del giro degli otto pilastri inclinati dell'Imbuto Antonelliano su cui poggia il Cupolino, sul quale lo stesso Danusso aveva già operato parzialmente nel primo stadio del suo intervento.

Mentre il primo intervento danussiano fu eseguito in condizioni di urgenza ed in assenza di rilievi sufficienti, la seconda operazione segue ad una approfondita campagna di rilievi e ad un calcolo generale della stabilità della Cupola, a detta di Danusso.

Il progetto prevede, oltre all'incamiciatura interna della zona del primo ordine del cupolino, la realizzazione di una nuova scala (essa stessa integrata nella struttura portante), un sistema a gradoni in calcestruzzo armato per la ripartizione del carico sulla sottostante struttura dell'Imbuto, e l'incamiciatura degli 8 pilastri inclinati dell'ultimo tratto dell'Imbuto stesso, in prosecuzione delle opere già intraprese con il progetto del 1931 nella zona di passaggio della struttura da 24 a 8 ritti.

Settembre 1937. Mentre si stava ultimando il secondo intervento di Danusso si nota l'apparire di lievi screpoli in chiave all'arcone inferiore Ovest (limitati alla zona intorno allo spigolo della parte esterna inferiore). Questi screpoli si accentuano poi leggermente, con la caduta di frammenti di mattoni. Si collocano degli strumenti atti a misurare eventuali deformazioni della struttura muraria nella zona degli arconi.

Ha così inizio la fase di massimo allarme per la stabilità della Cupola (periodo della "Grande Paura").

Il 30 settembre 1937 si effettua un sopralluogo della Commissione della Fabbrica Lapidea che accerta alcuni cedimenti in atto attribuibili al pilone di destra del presbiterio, quello che già cedette nel 1882. La commissione osserva che alcune lesioni di antica formazione

si sono allargate e che altre si sono recentemente formate. Si registra inoltre uno strapiombo del Cupolino e l'incurvamento del bolzone delle catene diagonali degli arconi.

Viene esteso a Danusso l'incarico fino alla verifica fondazionale della costruzione.

Non ci è dato di sapere l'effettiva entità del quadro fessurativo riscontrato, dato che non esistono notizie certe sul tipo di strumenti impiegati e sulla posa in opera degli stessi, così come non è chiaro come fosse stato possibile osservare l'incurvamento di un bolzone, non essendovi riscontri sulla posizione dello stesso nelle epoche precedenti al presunto dissesto, al di là della memoria visiva di alcuni conoscitori della costruzione. È inoltre importante notare che molti degli strumenti impiegati erano vincolati a basi lignee, tutt'oggi visibili, e ciò consente di rafforzare l'ipotesi circa la scarsa attendibilità delle misurazioni eseguite.

Ottobre 1937. Durante un sopralluogo dovuto al progredire delle lesioni sugli arconi e sui pilastri, Arturo Danusso riscontra con sorpresa alcune pesanti demolizioni nella struttura verticale per consentire il passaggio della scala nella parte esterna attorno alla Cupola Cassettonata tra il 1891 e il 1896 e pertanto subito dopo la morte dell'Antonelli.

Si rilevarono nuovi aumenti del cedimento e la formazione di nuove lesioni in chiave e all'imposta dell'arcone Sud. Grazie a calcoli sommari eseguiti sul posto, Danusso ipotizza la necessità di effettuare un incatenamento degli arconi allo scopo di renderne indipendente l'eventuale cedimento fondale in atto. Egli sostiene la necessità di intervenire con il concatenamento preventivo, con una sezione complessiva di 300cm^2 , dato che probabilmente Antonelli aveva riposto una eccessiva fiducia nella capacità delle murature connesse ai pilastri per contrastare la spinta degli arconi.

Danusso specifica inoltre che è necessario anche il rivestimento in calcestruzzo armato dei pozzi dei pilastri, e che l'incremento di peso aggiunto in virtù delle opere sul Cupolino non supera il 4% del peso della struttura, e che pertanto non può essere ritenuto responsabile del dissesto.

Il riferimento di Danusso a proposito dell'incremento di peso dovuto al consolidamento è con ogni probabilità attribuibile ad un quesito postogli sulla base della posizione di Arialdo Daverio. La questione del peso aggiunto alimenterà in seguito un nutrito dibattito, fino alla metà degli anni 50, a conclusione del quale si ipotizzerà anche la demolizione del cupolino e la sua ricostruzione in forma antonelliana.

Il 28 ottobre l'Ing. Piero Locatelli, assistente del Danusso demandato alla lettura degli strumenti, scrive al Podestà che la situazione è grave, e che nonostante sia possibile che gli strumenti forniscano dati non corretti, nessuno di essi è in contraddizione con le letture fatte dagli altri, e che comunque l'allargarsi delle lesioni sugli arconi è visibile a occhio

nudo; pertanto, è opportuno mettere in atto immediatamente i necessari presidi per la sicurezza del monumento e dei cittadini.

Il 30 ottobre l'Autorità ordina lo sgombero integrale delle case circostanti e si dà inizio alla febbrile costruzione di quattro giganteschi castelli di puntellamento, impiegando molti operai a turni diurni e notturni.

Novembre 1937. Le condizioni statiche della Cupola di S. Gaudenzio permangono immutate mentre proseguono con ogni alacrità le opere di puntellamento.

Il 25 novembre si notano numerose screpolature all'intradosso degli arconi, oltre a nuovi movimenti registrati dagli strumenti. Il 26 novembre, in occasione di un forte vento, si forma una lunga lesione capillare al rene sinistro dell'arcone est.

La lettura dei documenti relativi alla grande crisi della struttura dell'autunno del 1937 ci consente di affermare che il quadro fessurativo oggi presente sugli arconi, solo in parte visibile, è da ricondursi a questo periodo.

Dicembre 1937. L'Ing. capo Biagini, anch'egli assistente del Danusso, nota una tendenza delle parti di struttura corrispondenti ai pennacchi a ruotare verso l'interno della Chiesa, e che l'elemento di congiunzione tra le chiavi degli arconi, nel quale è annegata la catena diagonale è di fatto una piattabanda che, inflettendosi, determina l'allungamento della catena e dunque l'azione dei bolzoni sulla muratura (le fratture che ne derivarono andranno poi continuando, manifestando una stasi nelle stagioni estive ed una ripresa negli inverni). I cedimenti più significativi si registrano nelle direzioni dei pennacchi, a dimostrazione che probabilmente in quella posizione l'appoggio delle strutture verticali è effettivamente più cedevole che non in chiave agli arconi. I pennacchi sono costituiti da archi che si impostano sugli arconi doppi e che in chiave raggiungevano la piattabanda di imposta del giro interno di colonne sotto la Cupola Cassettonata.

1938. Non esiste la possibilità di verificare oggi le constatazioni del Biagini, visto che, nel 1938, i pennacchi sono consolidati con muratura e calcestruzzo, rendendo di fatto impossibile l'ispezione del sistema progettato da Alessandro Antonelli.

Si eseguono le opere di base per la realizzazione del concatenamento degli arconi e sono collocate le nuove catene in ferro (Figura 3.3).

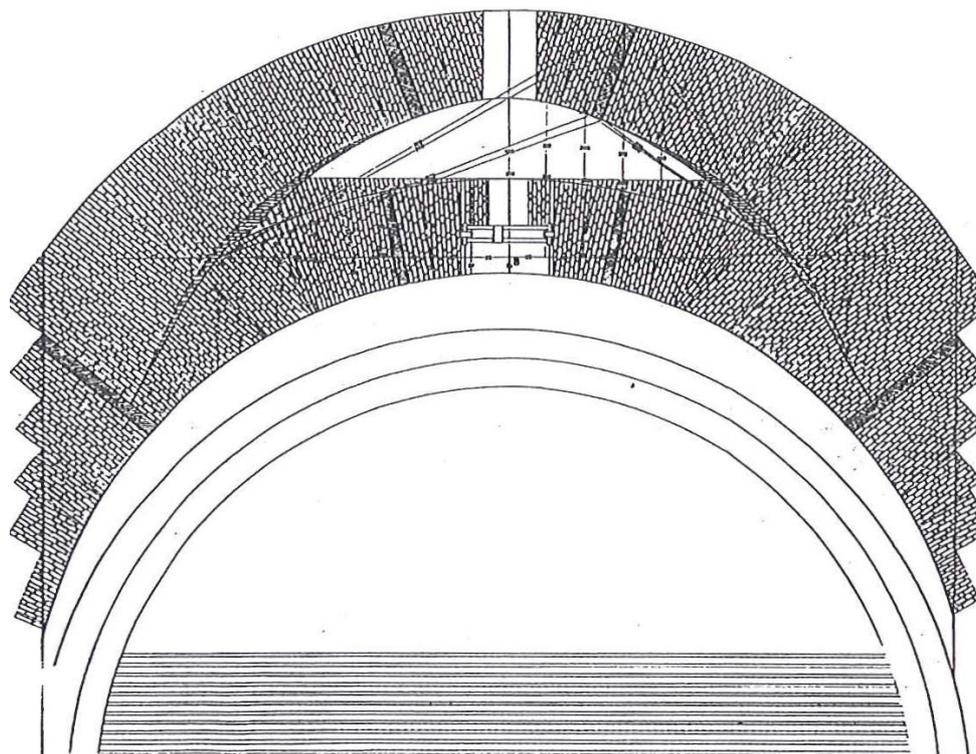


Figura 3.3 Incatenamento degli arconi del 1938

Arialdo Daverio critica pesantemente la decisione di Danusso in merito al concatenamento. Durante i lavori di concatenamento degli arconi i cedimenti continuano, come dimostrato da numerose letture effettuate, torna ad aleggiare una sorta di sfiducia nelle opere compiute. Ciò nonostante, si concludono i lavori di rinforzo previsti dal Danusso.

3.6 I giorni nostri

1985. La statua del Salvatore scende nuovamente dalla Cupola per essere ridorata. Le operazioni evidenziarono la necessità di un intervento radicale atto alla manutenzione generale dell'esterno della cupola. La doratura, eseguita per via elettrolitica, non risulta sufficientemente resistente ed il Salvatore viene riportato a terra poco dopo la sua ricollocazione sulla guglia.

1986. Viene affidato all'Ing. Ugo Perazzo, allora Presidente della Fabbrica Lapidea, l'incarico di verificare le condizioni statiche della Cupola, l'ingegnere esegue il primo rilievo di "epoca contemporanea" della Cupola.

Tale incarico prosegue con il nome di "Progetto Lapideo". In questo periodo non viene segnalato alcunché a riguardo del quadro fessurativo.

1997. È realizzata una copia in vetroresina dorata della statua del Salvatore, che viene ricollocata in cima alla Cuspide.

1996-1998. Viene affidato all'Ing. Germanino l'incarico "Diagnosi relativa alle condizioni statiche. Progetto del sistema di monitoraggio".

Si assume l'ipotesi che il quadro fessurativo rilevato negli anni 1997-1998, mutato rispetto a quello che aveva prodotto l'intervento di Arturo Danusso, potesse non essere presente all'epoca del Progetto Lapideo e che pertanto le lesioni riscontrate in particolare sulla cupola esterna e sul giro esterno dei sostegni della Cupola Cassettonata, possano essersi prodotte non prima del 1986.

L'installazione del nuovo sistema di monitoraggio è affidata all'Università di Trento.

Primavera 2000. L'Università di Trento esegue un rilievo del quadro fessurativo, che pone l'attenzione in particolare sulle fessure dei tre ordini di colonne alla base della Cupola, sulle piattabande radiali a quota 33,08metri, sui collegamenti tra parte interna ed esterna della struttura e infine sulla Gran Tazza.

Appena sopra gli arconi superiori a quota 28,2metri si nota il fenomeno fessurativo più preoccupante che si suppone recente: fessure orizzontali sono presenti su gran parte delle colonne di base della Cupola.

Nelle piattabande radiali, che collegano tra loro i tre giri di colonne, a quota 33,08metri, sono presenti vecchie fessure sub-verticali più volte documentate. All'interno delle piattabande si trovano, con ogni probabilità, dei rinforzi in ferro voluti dall'Antonelli; la scarsa aderenza tra muratura e ferro, permette che essi possano scorrere provocando fessurazioni.

Le lesioni tra i collegamenti sono anch'esse di vecchia data, l'ordine interno e quello intermedio di pilastri sono collegati da un arco a tutto sesto che presenta lesioni in chiave all'intradosso; l'ordine intermedio ed esterno sono collegati da una trave anch'essa lievemente lesionata nel bordo inferiore.

La Gran Tazza, formata dall'accoppiamento di elementi portanti verticali e di irrigidimento orizzontali e con tamponamenti in muratura ad una testa (le vele), presenta lesioni mai sistematicamente documentate che si possono così riassumere:

- fessure intorno ai bolzoni metallici dei costoloni verticali, dovute probabilmente alla dilatazione del ferro all'interno della muratura;
- fessure tra vele e costoloni orizzontali già riportate dall'Ing. Germanino nel 1996, da

imputarsi non solo allo scarso collegamento tra elemento strutturale e tamponamenti, ma soprattutto alla non simmetria dei carichi come il cedimento e il vento;

- lesioni nelle vele;
- lesioni che attraversano i costoloni orizzontali interrompendo il collegamento tra gli elementi portanti della Gran Tazza.

Tra i provvedimenti urgenti provvisori adottati dall'Ing. Germanino, sono state poste in opera due poligonali, che avrebbero dovuto essere pretensionate e che invece furono collocate scariche, alle quote di 35 e 39 metri, le quali hanno influenzato il comportamento deformativo della struttura, mentre non sono stati ancora affrontati i problemi che riguardano direttamente la Gran Tazza. Quest'ultima preoccupa soprattutto per alcuni costoloni verticali che presentano fessurazioni interne, così come quelle tra le vele e gli stessi costoloni.

Giugno - Dicembre 2000. L'Università di Trento esegue una caratterizzazione dinamica della Cupola, installando un sistema di accelerometri e rilevando la risposta della struttura sotto eccitazione ambientale (suono delle campane e vento).

2002. Viene affidato all' Ing. Vitti l'incarico "Studio generale della cupola della Basilica di San Gaudenzio".

2008. Un nuovo sistema di monitoraggio viene installato sulla cupola. Al momento non sono disponibili allo scrivente informazioni relative a tale sistema.

2018. Le imprese "Impresa Rossi s.r.l." e "Drone Arezzo s.r.l." eseguono un rilievo topografico, fotogrammetrico e con laser-scanner della Cupola. Viene creato il primo "digital-twin" geometrico della Cupola.

Le attività di monitoraggio strutturale eseguite dal 1997 in poi sono al momento sotto esame da parte dello scrivente e saranno analizzate con maggior dettaglio nella prossima versione del presente documento.

Capitolo 4. Modellazione della Cupola di S. Gaudenzio

La modellazione preliminare agli elementi finiti della cupola viene realizzata tramite software agli elementi finiti SAP2000 utilizzando prevalentemente elementi “frame” ed elementi “shell”.

Le caratteristiche degli elementi materiali impiegati nella struttura sono riportati in Tabella 4.1.

Tabella 4.1 Tabella di caratteristiche dei materiali

Materiale	Modulo elastico	Coeff.	Densità
	E [MPa]	di Poisson ν	ρ [kg/m ³]
Calcestruzzo	29420	0,20	2500
Granito	29420	0,14	2660
Muratura	2000	0,30	1800
Luserna	29420	0,14	3265
Ferro	196000	0,30	7500
Misto CLS e Muratura	17260	0,20	2800

In seguente figure rappresentano il modello completo realizzato tramite il software agli elementi finiti SAP2000 e software di disegni AutoCAD.

Tutto il modello si è stato creato dapprima in AutoCAD seguendo la sezione verticale, tracciandosi una linea di asse (linea “frame”) od un mesh dei singoli elementi strutturali (superficie “frame”). Una volta definito gli elementi strutturali si andrebbe trasferirli in SAP2000. In seguito, si è riportato il modello realizzato in AutoCAD e SAP2000.

Come mostrato in Figura 4.1 rappresenta la suddivisione degli elementi strutturali realizzato in AutoCAD, ed in Figura 4.2 rappresenta il modello completo realizzato in SAP2000.

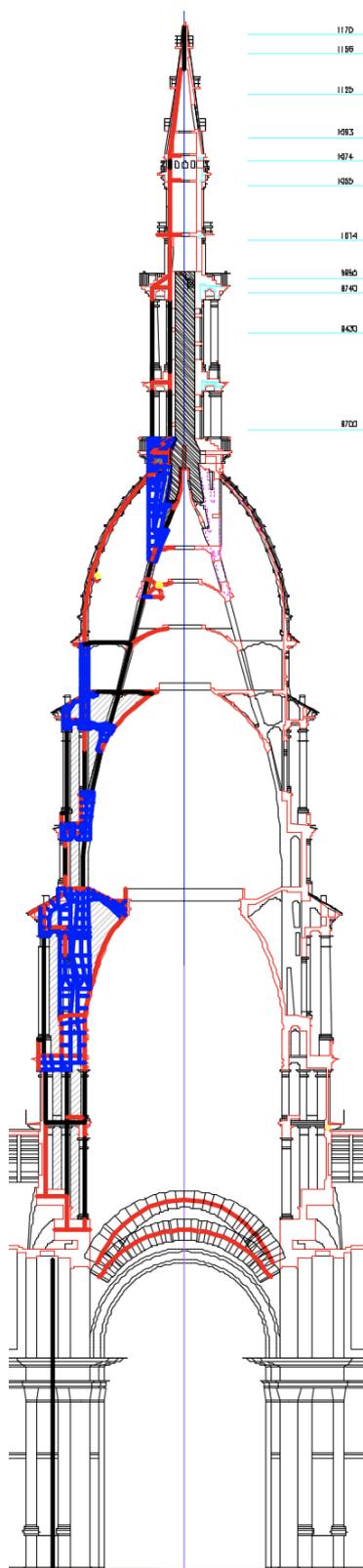


Figura 4.1 Sezione generale in verticale della
Cupola intera in AutoCAD

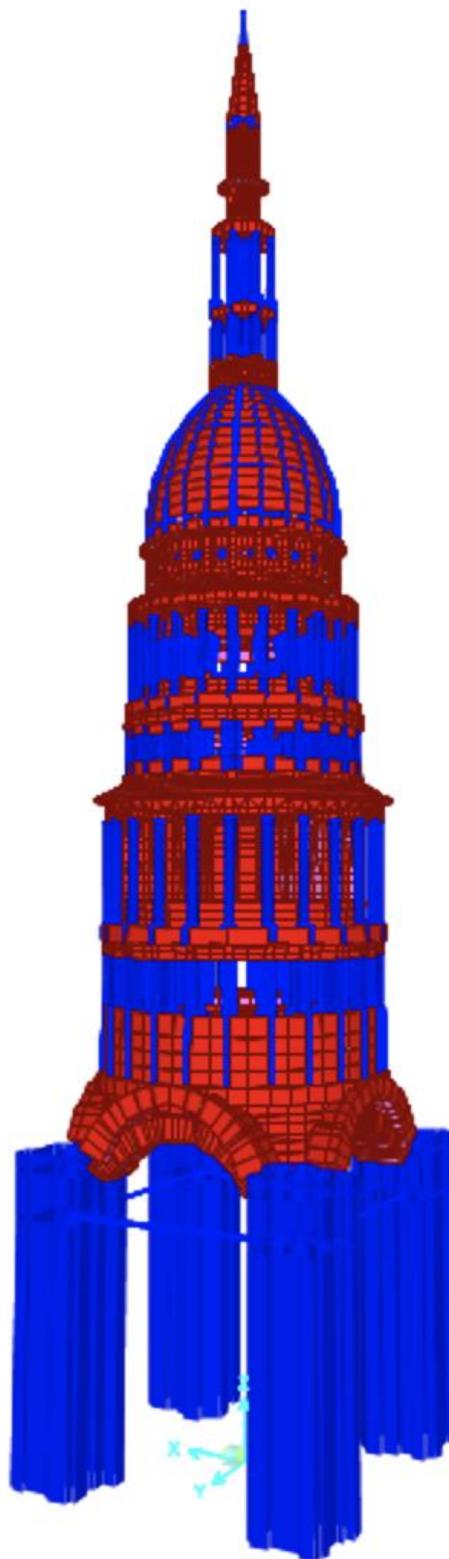


Figura 4.2 Modello completo in SAP2000

4.1 Modellazione dei pilastri sotto della Cupola di Basilica

Come accennato nel capitolo 2.2, tutta la struttura della Cupola di Basilica si è innalzata sugli arconi posizionati sui quattro pilastri a spigoli della Basilica. I pilastri formano un quadretto con i quattro lati orientati in corrispondenza a quattro direzioni geografiche. In conseguenza, tutta la modellazione è stata seguita con questo orientamento. In specifico, nel modello SAP2000 l'asse X coincide alla direzione Est che è l'asse longitudinale della Basilica, mentre l'asse Y coincide alla direzione Nord che è l'asse transetto della Basilica.

I quattro pilastri sono stati vincolati con l'incastro nella base dei pilastri, oltre l'incastro è stato vincolato anche bloccato nelle due direzioni orizzontali X e Y del modello in quota di 15,07m e 24,18m che corrispondono ai due livelli calpestabili della Basilica. Inoltre, questi pilastri sono modellati con elementi "frame" in muratura.

L'altezza modellata dei pilastri è pari a 24,18m dal 0m il piano pavimento della Basilica, in cui a quota di 18,9m si trovano le catene posizionate orizzontalmente collegando i pilastri. La distanza di ogni lato formato dai pilastri è pari a 18,80m, il centro di quadretto coincide al centro della Cupola di Basilica. Dal documento nota che per ogni lato le catene sono state messe con doppio filo, con la sezione di ciascun filo è pari a 80mm x 30mm. Per cui, la sezione delle catene è modellata con 80mm x 60mm con la lunghezza pari a 18,8m. Le catene sono state modellate con elementi "frame" in ferro senza peso specifico.

La sezione è semplificata per tutti pilastri con una forma particolare. In particolare, l'asse locali in direzione ortogonale all'altezza associa il centro della Cupola come indicato con la freccia in Figura 4.3.

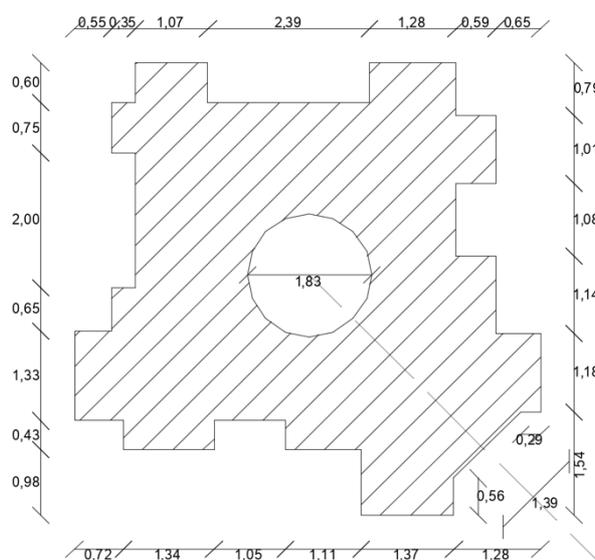


Figura 4.3 Sezione di pilastri sotto della Cupola di Basilica

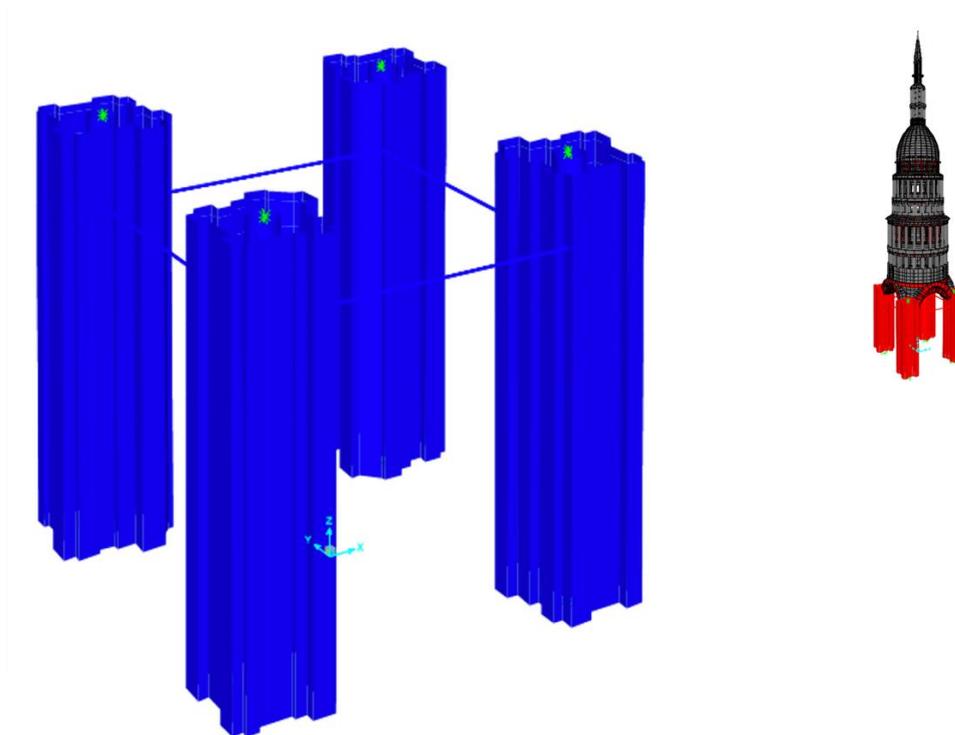


Figura 4.4 Pilastri sotto della Cupola di Basilica

4.2 Modellazione degli Arconi sotto la Cupola di Basilica

Il sistema strutturale degli arconi è costituito con i quattro arconi superiori; i quattro arconi inferiori; un anello superiore orizzontale; un anello inferiore orizzontale e due pareti verticali circonferenziali posizionate esterna ed interna. Gli elementi descritti sono modellati entrambi in “shell” con il materiale di muratura.

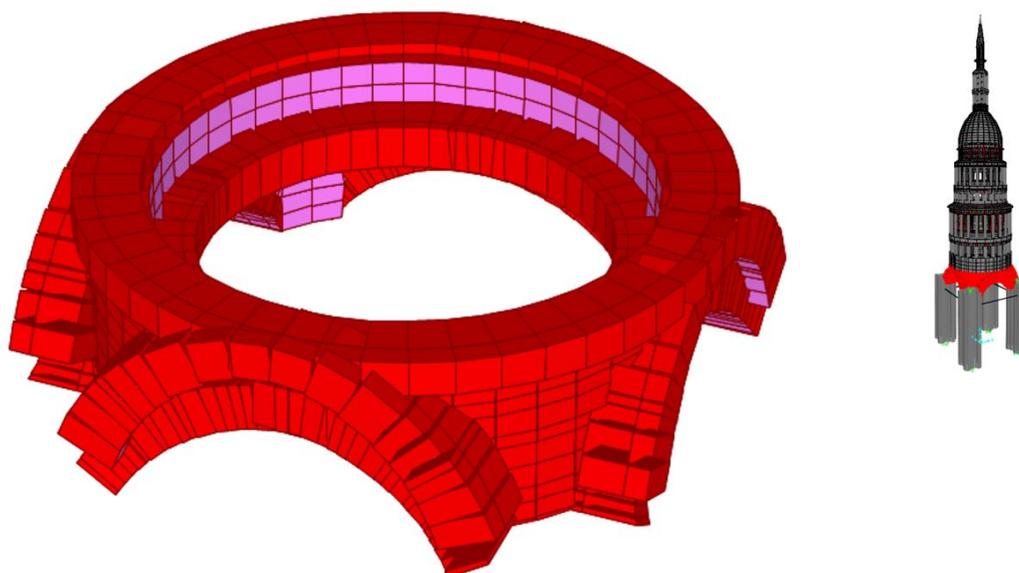


Figura 4.5 Arconi sotto il Basamento della Cupola

I due anelli orizzontali sono posizionati sotto ai pilastri del Basamento della cupola. Mentre le due pareti verticali in circonferenza sono posizionate in corrispondenza agli ordini dei pilastri esterni e intermedi della struttura sovrastante con il diametro di 10,44m e 8,92m rispettivamente al giro esterno e al giro interno. Le due estremità degli arconi superiori sono posizionate a quota 23,70m, invece degli arconi inferiori sono posizionate a quota di 22,41m. Gli elementi descritti sono indicati in rosso nella Figura 4.6.

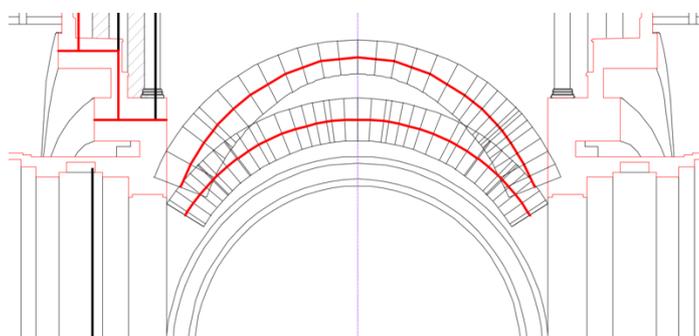


Figura 4.6 Sezione della parte degli Arconi della Cupola

L'anello orizzontale superiore è stato modellato in 48 parti per tutta circonferenza, con lo spessore in direzione verticale pari a 1,20m, la lunghezza in direzione radiale pari a 2,28m, mentre la larghezza in direzione circonferenziale pari a 1,18m lato interno e 1,47m lato esterno. L'anello orizzontale inferiore è stato modellato analogamente in 48 parti per tutta circonferenza, con lo spessore in direzione verticale pari a 1,60m, la lunghezza in direzione radiale pari a 2,70m, mentre la larghezza in direzione circonferenziale pari a 0,93m lato interno e 1,29m lato esterno. I due anelli sono riportati in Figura 4.7

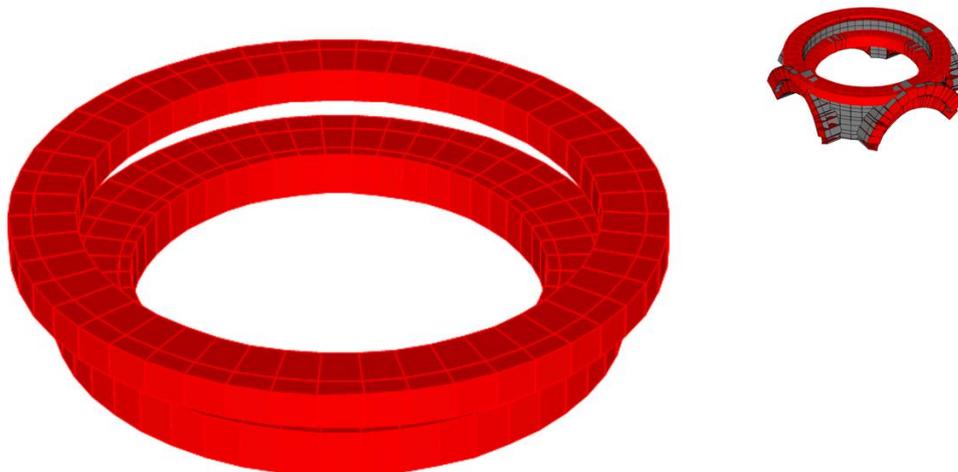


Figura 4.7 Anello superiore ed inferiore della Cupola

I quattro arconi superiori supportano l'anello superiore, che collegano l'anello in cima degli arconi, mentre le parte resti supportano la parete esterna circonferenziale. Gli spessori in direzione verticale sono via via decrescenti dall'estremità alla cima sono: 2,09m; 2,04m; 1,97m; 1,94m; 1,88m; 1,79m; 1,63m; 1,40m e 1,30m, la larghezza in direzione radiale per ogni arcone è pari a 2,28m, la distanza tra due estremità di arconi è pari a 13,23m. I quattro arconi inferiori supportano l'anello inferiore, che collegano l'anello in cima degli arconi, mentre le parte resti supportano la parete interna circonferenziale. Lo spessore in direzione verticale è pari a 1,61 m, la distanza tra due estremità di arconi è pari a 12,88m. I due arconi sono riportati in Figura 4.8

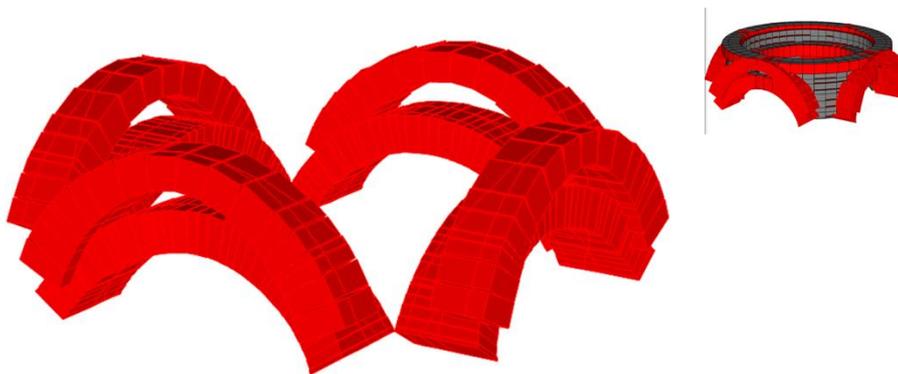


Figura 4.8 Arconi superiori e inferiori della Cupola

La parete verticale esterna è modellata con lo spessore in direzione radiale pari a 0,40m. La parete verticale interna è modellata con lo spessore in direzione radiale pari a 0,60m. I due giri della parte verticali sono riportati in Figura 4.9.

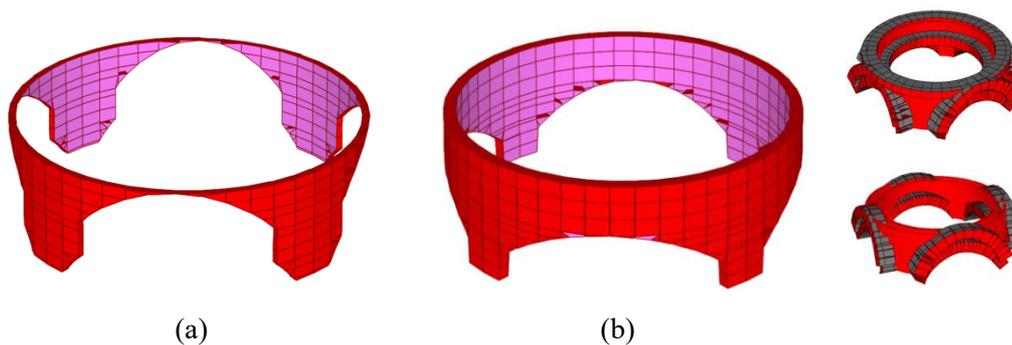


Figura 4.9 Pareti verticali nella parte di Arconi della Cupola: esterna (a) e interna (b)

I collegamenti tra gli otto arconi e i quattro pilastri sono stati modellati attraverso con l'assegnazione del "constraints" di tipo "body" fornendo dei nodi rigidi in due livelli diversi, in corrispondenza di 22,41m e 22,70m. Il nodo "constraints" a quota di 22,41m chiamati "22,41m arconi pilastri" è stato assegnato con i nodi di arconi inferiori dei due lati ortogonali e i nodi dei due giri di pareti in tale quota. Mentre a quota di 22,70m chiamati "22,70m arconi pilastri" è stato assegnato con i nodi di arconi superiori dei due lati ortogonali in tale quota. Inoltre, per ogni livello è stato assegnato con i quattro nodi "constraints". I nodi "constraints" a diverse quote sono riportati in Figura 4.10 e Figura 4.11.

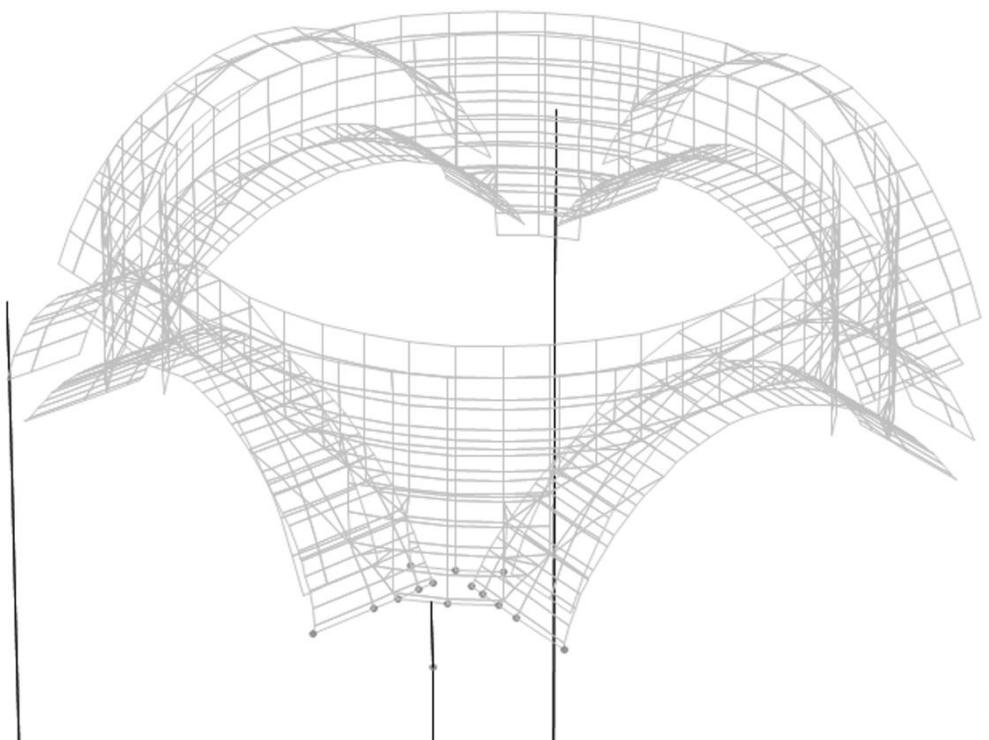


Figura 4.10 Assegnazione di "constraints" a quota di 22,41m

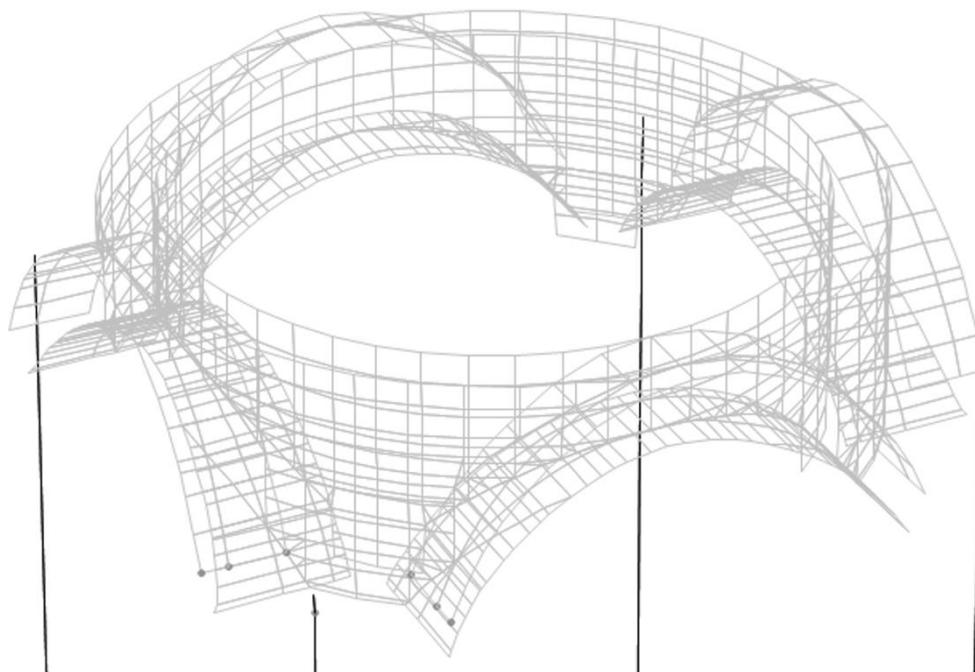


Figura 4.11 Assegnazione di “constraints” a quota di 23,70m

4.3 Modellazione del Basamento della Cupola di Basilica

In questa parte, la struttura di Basamento della Cupola appoggiando ad anello circolare, il Basamento supporta tutti i carichi della struttura di Cupola trasferendoli alla Basilica. Questa parte è quello unica parte innestata nella Basilica.

Il Basamento della Cupola (24,16 m – 33,95 m) è analogamente diviso in tre giri distinti. Per tutti i tre giri delle colonne la parte inferiore sono progettati ai diversi livelli, in cui il giro interno la parte inferiore delle colonne si trova alla quota di 26,82m; il giro intermedio si trova alla quota di 27,80m; il giro esterno si trova alla quota di 29,10m.

I materiali utilizzati in questa parte di struttura sono:

- Granito
- Muratura

Il modello completo di f.e.m. è riportato in seguente Figura 4.12

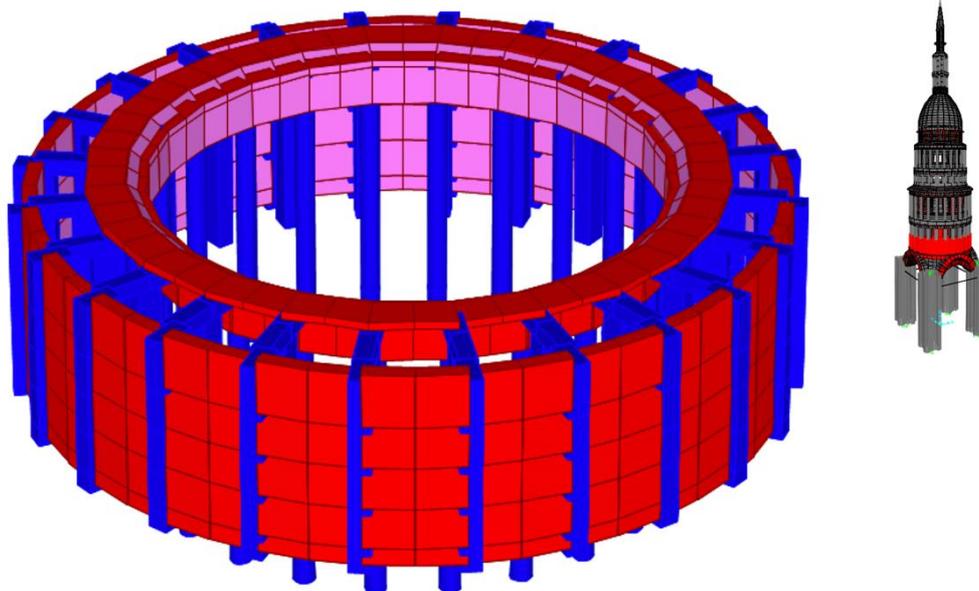


Figura 4.12 Modello di Basamento della Cupola di Basilica

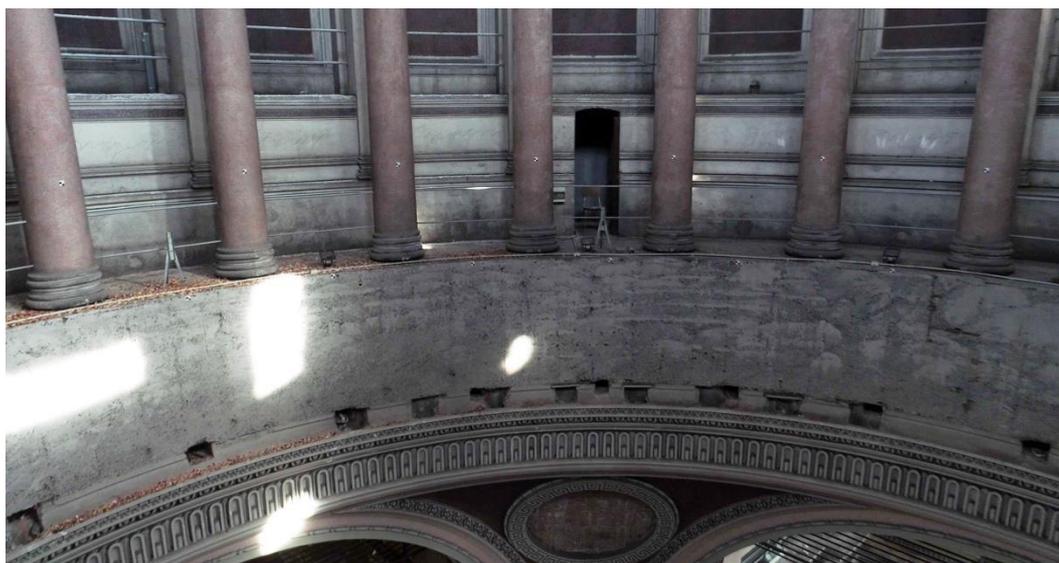


Figura 4.13 Vista interna di Basamento della Cupola a quota di circa 25m

Gli elementi indicati neri in Figura 4.14 (a) sono modellati in “frame”, in particolare, il materiale utilizzato per le colonne dell’interno giro è di granito, mentre per gli altri due giri dei pilastri i materiali utilizzati sono di muratura. Invece per le travi orizzontali posizionate in radiale alla sommità delle colonne sono state modellate in materiale di muratura di sezione $0,50\text{m} \times 0,44\text{m}$ con la lunghezza in direzione radiale pari a $2,89\text{m}$. Tutti gli elementi descritti in “frame” sono stati modellati con 24 setti per la circonferenza della Cupola.

La sezione delle colonne dei tre giri procedendo verso ad esterno è:

- Diametro di 0,59m con altezza di 6,99m
- 0,50m x 0,70m con altezza di 5,56m
- 0,58m x 1,12m con altezza di 5,07m

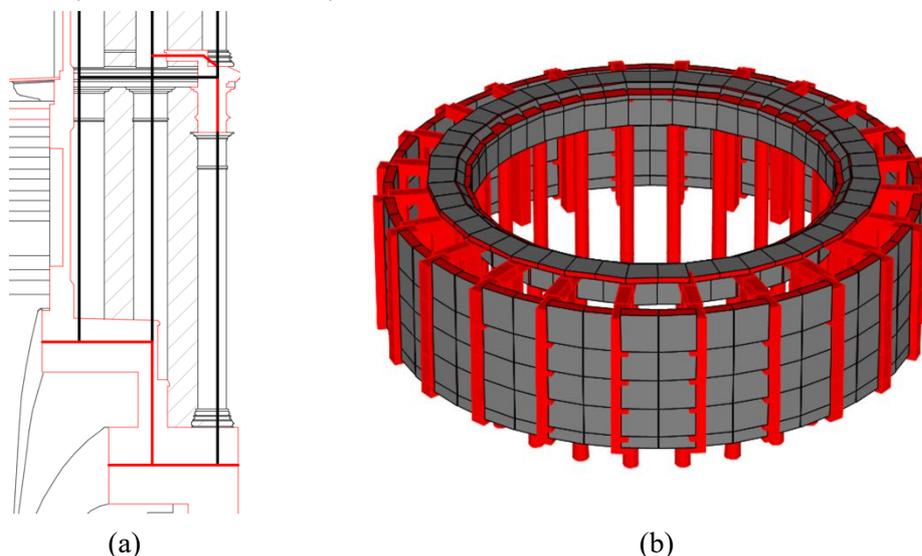


Figura 4.14 Basamento della Cupola di Basilica elemento frame: sezione (a) e f.e.m. (b)

Gli elementi indicati rossi in Figura 4.15 (a) sono modellati in “shell” con il materiale di muratura. Per ognuno setto di parete la divisione è presentato come in Figura 4.15 (b).

Lo spessore in direzione radiale delle pareti esterni è pari a 0,40m, mentre la larghezza di un singolo setto è pari a 2,76m e l'altezza pari a 5,63m. Lo spessore, in direzione radiale delle pareti interni è pari a 0,59m con l'altezza di 1,16m e la larghezza di un singolo setto è pari a 1,97m. Mentre per gli elementi ad intermedio lo spessore in direzione di altezza è stato modellato con 0.22m per entrambi elementi (orizzontali e inclinati). La larghezza in direzione circonferenziale di un setto è 1,97m, mentre la lunghezza in direzione radiale è pari a 1,07m e 0,67m rispettivamente agli elementi orizzontali e inclinati. Inoltre, la l'inclinazione degli elementi inclinati è 36°.

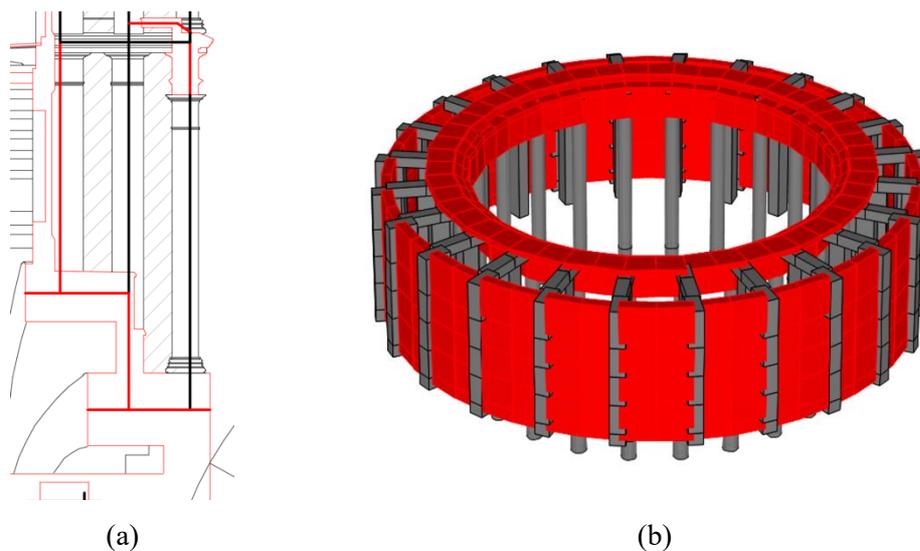


Figura 4.15 Basamento della Cupola di Basilica elemento shell: sezione (a) e f.e.m. (b)

4.4 Modellazione del Primo Stilobate della Cupola di Basilica

Il sistema strutturale del primo Stilobate (33,95 m – 38,40 m) è stato diviso in tre parti per il modello, che sono:

- Elementi portanti verticali dei pilastri in elementi “frame”
- Elementi portanti di architravi in elementi “shell”
- Elementi portanti circolari in elementi “shell”

I materiali nella parte di primo Stilobate sono utilizzati in seguenti:

- Muratura

Il modello completo di Primo Stilobate è riportato in seguente Figura 4.16.

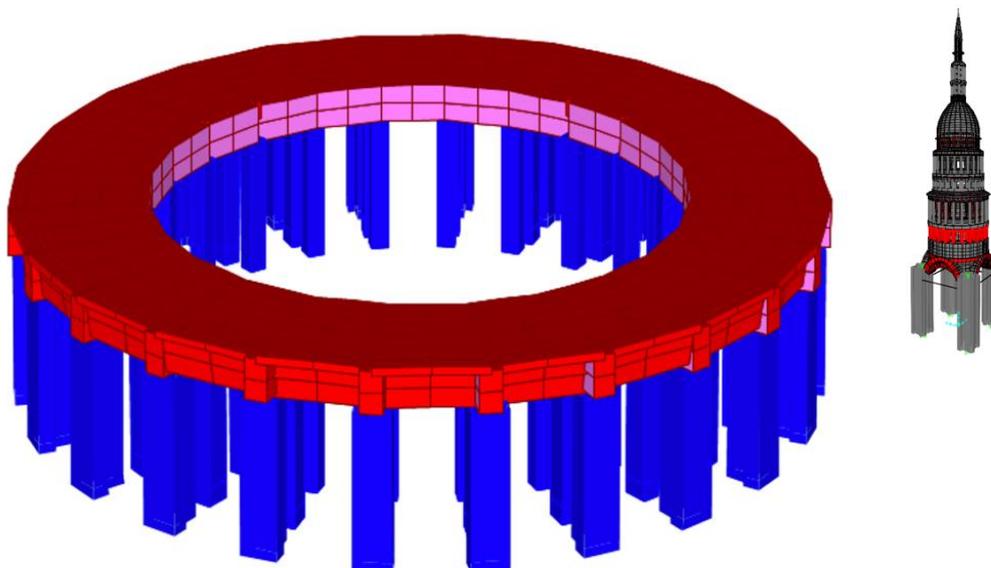


Figura 4.16 Modello di Primo Stilobate della Cupola di Basilica

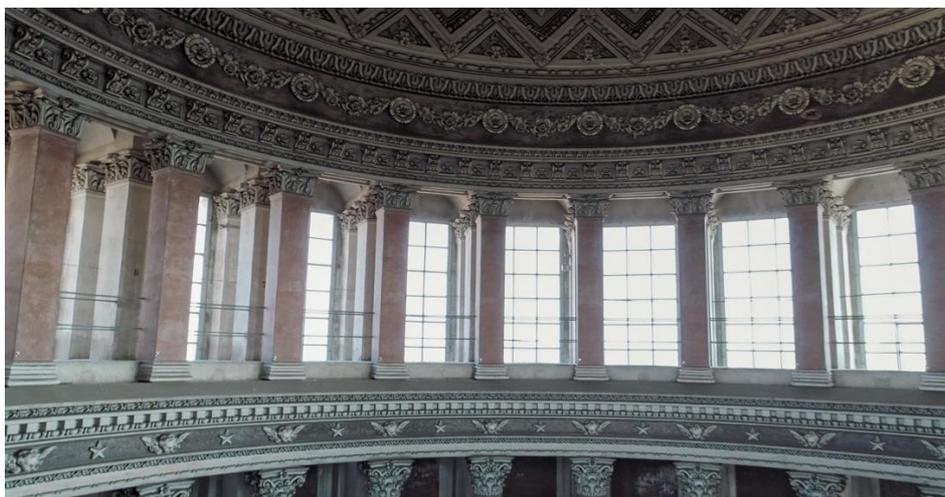


Figura 4.17 Vista interna di Primo Stilobate a quota di circa 33m

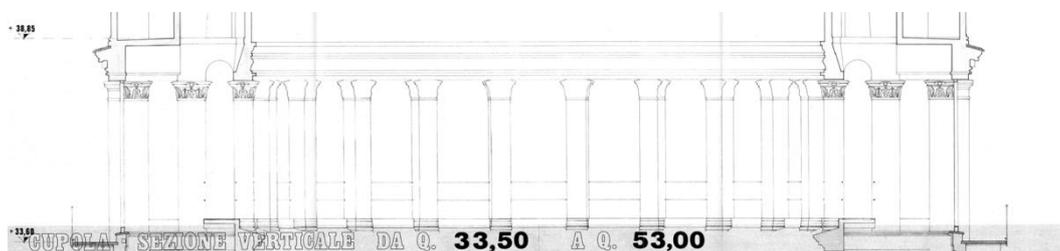


Figura 4.18 Rilievo della parte di Primo Stilobate¹

¹ Tavola 5, Basilica di S. Gaudenzio “Intervento e conservativo esterno di cupola” Rilievo di Ing. Perazzo 1986.



Figura 4.19 Vista esterna di Primo Stilobate presa da Sud-Ovest a quota di 36,8m

4.4.1 Elementi portanti verticali dei pilastri in “frame”

Come mostrato in Figura 4.21 (a), gli elementi neri sono i pilastri dei tre ordini, modellati in “frame” con il materiale di muratura. Inoltre, per ogni ordine rappresentano con 24 pilastri in circonferenza, l’asse longitudinale delle sezioni dei 24 pilastri ad ogni ordine associa al centro di circonferenza in distribuzione radiale. Tutti gli elementi descritti in “frame” sono stati modellati con una altezza di 4,02m

Le sezioni dei pilastri dei tre ordini procedendo verso ad esterno è:

- 0,50m x 0,50m
- 0,50m x 0,65m
- Sezione dei pilastri esterni è stata definita tramite comando “Section designer”, le dimensioni della sezione è riportata in Figura 4.20, si ricorda che la parte piena di larghezza 0,98m è la parte esterna.

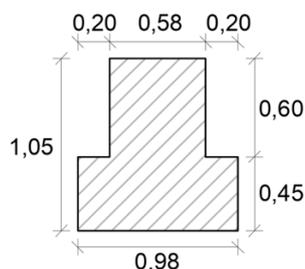


Figura 4.20 Sezione dei pilastri esterni di Primo Stilobate a quota di 34m

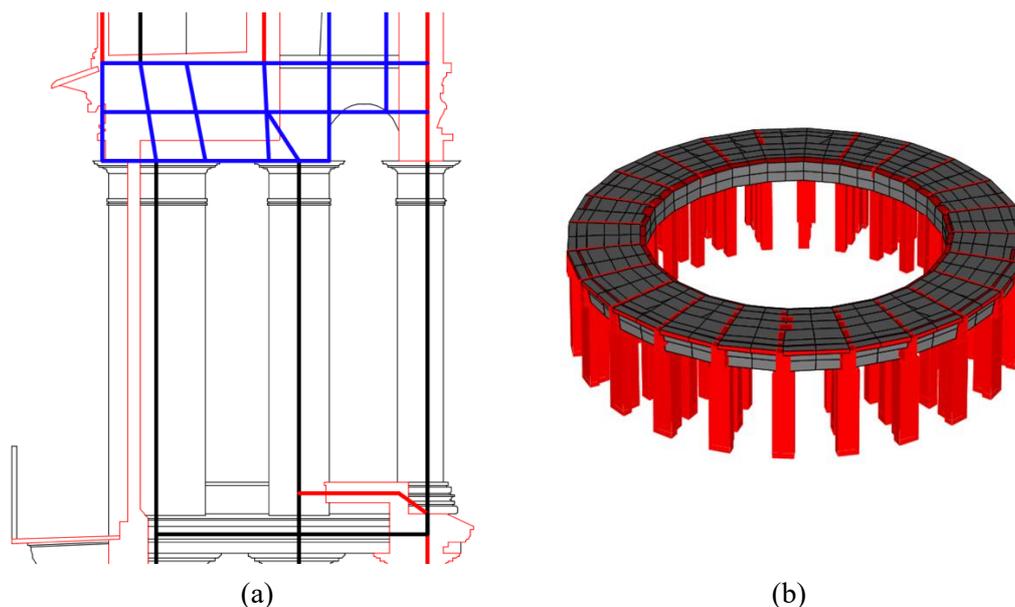


Figura 4.21 Elementi di pilastri dei tre ordini di Primo Stilobate: sezione (a) e f.e.m. (b)

4.4.2 Elementi portanti di architravi in “shell”

Come accennato nel Capitolo 2.3, sulla cima dei pilastri si presentano una cornice architravata in 24 per tutta la circonferenza della Cupola. Questi architravi legano i pilastri dei tre ordini. Le cui sono state modellate con gli elementi “shell” in materiale di muratura, con lo spessore in direzione circonferenziale è di 0,58m, mentre la lunghezza in direzione radiale è pari a 3,47m, l’altezza è pari a 0,52m a lato interno e 1.05m a lato esterno. La suddivisione dei singoli mesh mostrati in Figura 4.22 (a) si sono state divise in ragione degli andamenti di trasferimenti dei carichi e delle geometrie strutturali.

Inoltre, come cerchiato nella Figura 4.23, ad ogni nodo alla cima del pilastro di ordine esterno ed intermedio, si è stato assegnato un “constraint” di tipologia “body” in modo di creare un unico nodo tra ogni intersezione degli elementi “shell” e “frame”. Per la funzione del comando di “constraints”, si dovrebbe assegnare tanti nodi indipendenti dei pilastri quanti “joints constraints” di diverse definizioni di “constraints”. Pertanto, a questa quota di Primo Stilobate, si sono stati assegnati in 24 più 24 “constraints”, in cui i primi 24 chiamati con “38m esterno” ed altri 24 chiamati con “38m interno”.

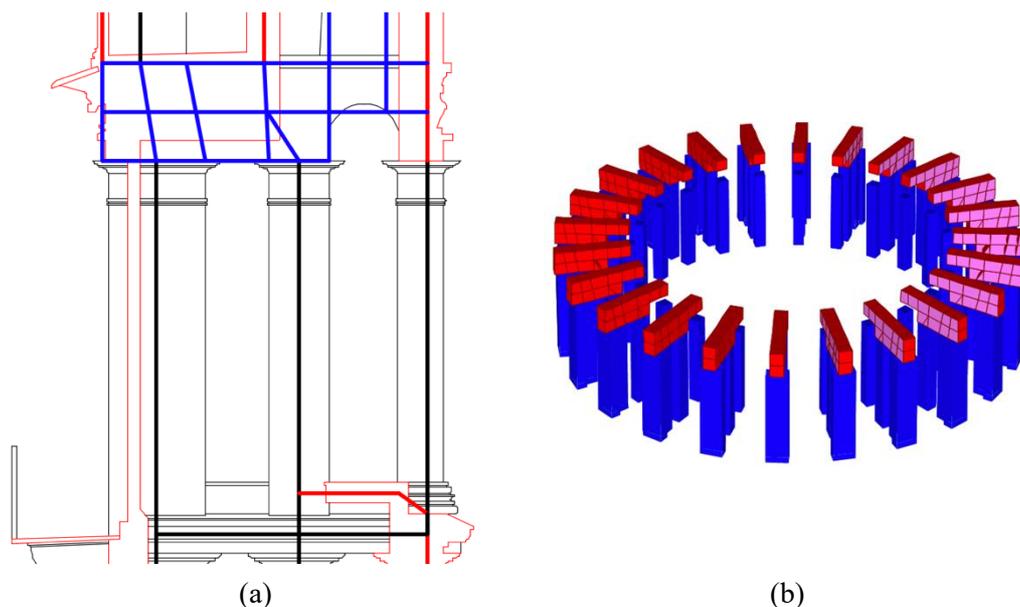


Figura 4.22 Elementi di architravi di Primo Stilobate: sezione (a) e f.e.m. (b)

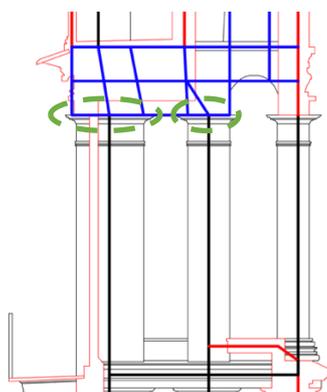


Figura 4.23 Assegnazione dei constraints dei nodi della parte di Primo Stilobate

4.4.3 Elementi portanti circolarmente in “shell”

Come mostrato in Figura 4.24 (a), gli elementi rossi sono le pareti esterne ed interni; i pavimenti orizzontali, che sono stati modellati in “shell” con il materiale di muratura.

Le pareti esterne posizionate sopra dei pilastri esterni sono state modellate con uno spessore in direzione radiale di 0,36m, mentre la larghezza in direzione circonferenziale del singolo setto è 2,73m e l’altezza è 1,05m. Le pareti interni posizionate sopra dei pilastri interni sono state modellate con uno spessore in direzione radiale di 0,49m, mentre la larghezza in direzione circonferenziale del singolo setto è 1,92m e l’altezza è 1,05m. Invece per i pavimenti orizzontali sono stati modellati con uno spessore in direzione di altezza di 0,20m. La lunghezza in direzione radiale è pari a 3,47m, mentre la larghezza di un singolo setto è pari a 1,92m lato interno e 2,73 lato esterno.

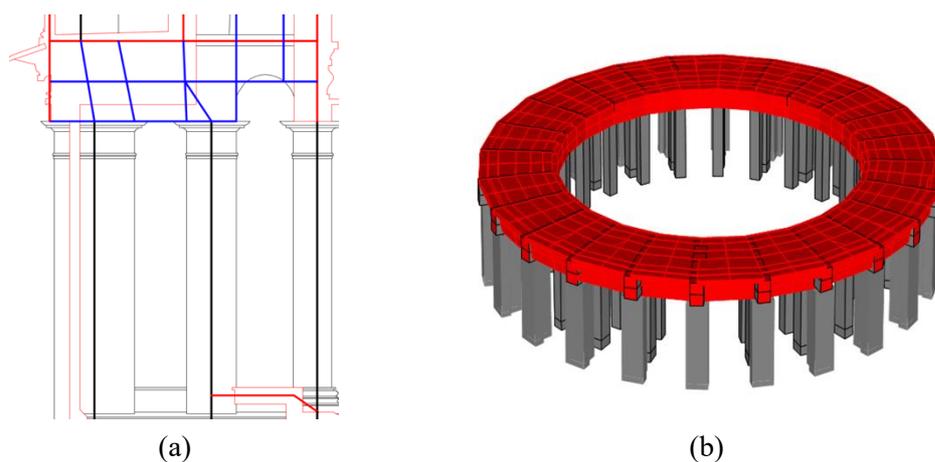


Figura 4.24 Elementi circolari di Primo Stilobate (pareti e pavimenti): sezione (a) e f.e.m. (b)

Oltre delle pareti e pavimenti, si presenta anche dei 24 elementi archi in direzione circonferenziale posizionati alla sommità dei pilastri di ordine esterno ed intermedio, ovvero la lunghezza in direzione radiale dell'arco 1,52m. Inoltre, l'altezza degli archi è stata modellata 1,05m. Come presentato in Figura 4.25, sono stati modellati tramite elementi "shell" in materiale di muratura, con uno spessore di 0,20m.



Figura 4.25 Foto dettagliato delle volte circolari di Primo Stilobate

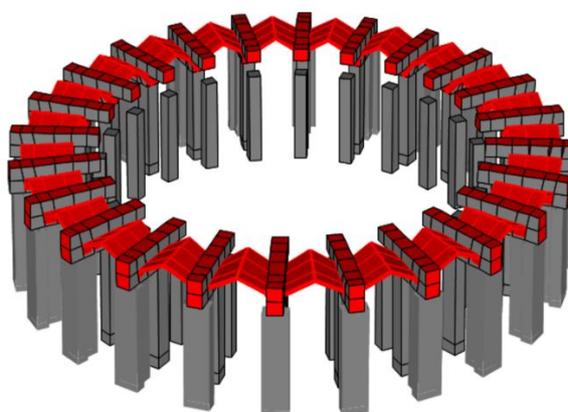


Figura 4.26 Modello delle volte circolari di Primo Stilobate

4.5 Modellazione del Primo Peristilio e della Prima Cupola Cassettonata

Il sistema strutturale del primo Peristilio (38,40 m – 48,46 m) è analogamente come le strutture descritte precedenti. È stato diviso in quattro parti per il modello, che sono:

- Elementi portanti verticali di pilastri in elementi “frame”
- Elementi portanti verticali di pilastri in “shell”
- Elementi portanti circolari in elementi “shell”
- Prima Cupola Cassettonata

I materiali nella parte di primo Peristilio sono utilizzati in seguenti:

- Granito
- Muratura

Il modello completo è riportato in Figura 4.27.

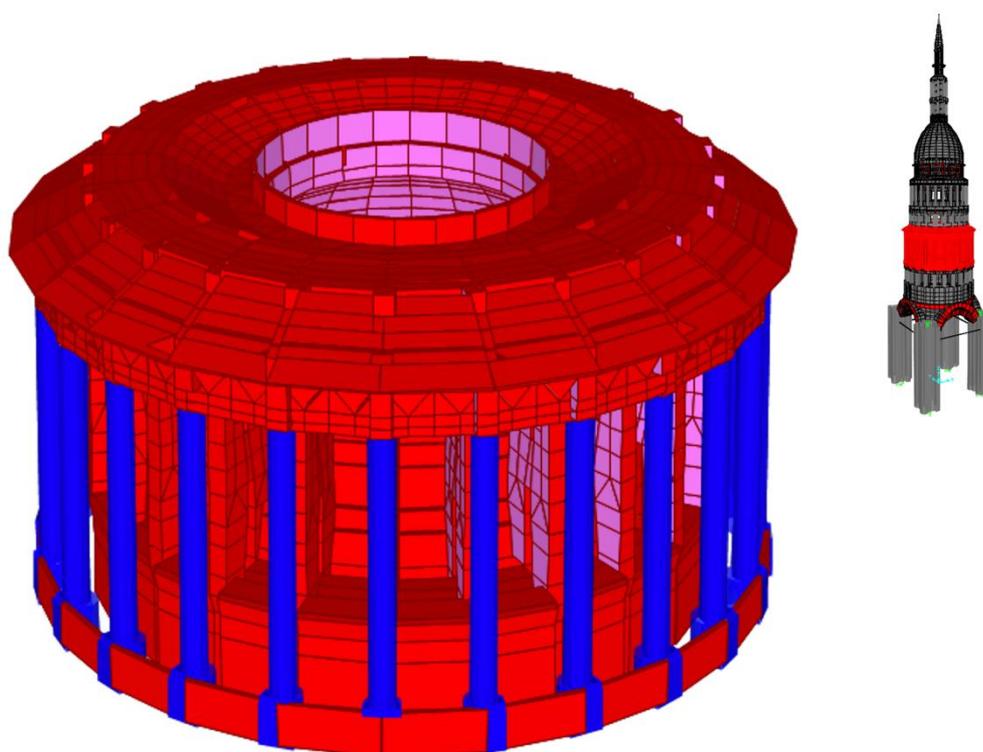


Figura 4.27 Modello completo del Primo Peristilio e della Prima Cupola Cassettonata



Figura 4.28 Vista esterna di Primo Peristilio presa da Est a quota di 44,6m

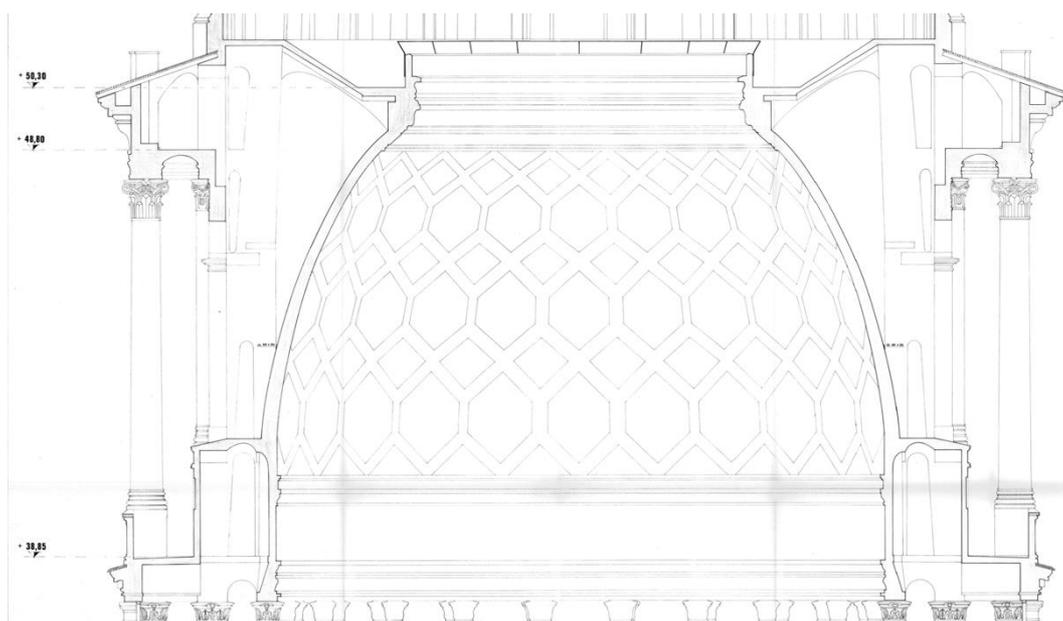


Figura 4.29 Rilievo della parte di Primo Peristilio²

² Tavola 5, Basilica di S. Gaudenzio “Intervento e conservativo esterno di cupola” Rilievo di Ing. Perazzo 1986.

4.5.1 Elementi portanti verticali di pilastri in “frame”

Come accennato nel capitolo 2.3 nella parte di Primo Peristilio il sistema strutturale portante è costituito da tre giri di pilastri, in cui le 24 colonne del giro esterno sono stati modellati in elementi “frame” con il materiale di granito. In seguito, si presentano 24 basamento sotto dei pilastri sono anche modellati in materiale granito, la sezione dei basamenti sotto delle colonne è disegnata con una forma toroide a sezione quadrata come riportata nella Figura 4.30. Inoltre, l’altezza dei 24 basamenti è di 1,24m.

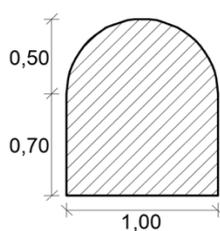


Figura 4.30 Sezioni delle basi dei pilastri esterni di Primo Peristilio

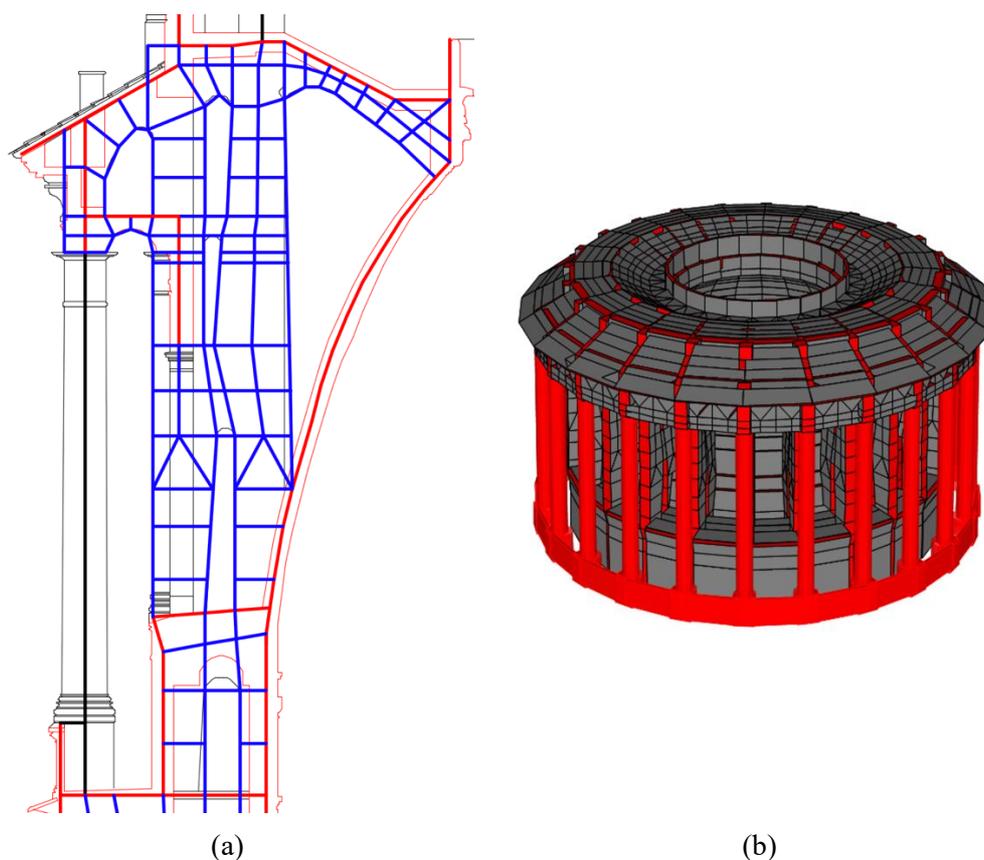


Figura 4.31 Elementi portanti pilastri di giro esterno: sezione (a) e f.e.m. (b)

Come illustrato nella Figura 4.31 (a) gli elementi portanti verticali dei pilastri di Primo Peristilio sono presentati in nero con il materiale di granito sia per i pilastri che per le basi dei pilastri. In particolare, sulla parte superiore delle basi dei pilastri si presentano dei link che legano le basi e muretto circolare con la sezione di 1,00m x 0,20m, con una lunghezza in direzione radiale pari a 0,40, assegnando il materiale con la rigidità infinita e senza peso specifico di esso, in ragione di simulare il collegamento tra il muretto circolare e i 24 basamenti delle colonne. L'orientamento delle basi si è seguito la direzione radiale associando al centro della Cupola, e lato piano è messo verso esterno.

La sezione dei 24 pilastri esterni è di diametro 0,78m con una l'altezza di 7,98m. Mentre l'elemento muretto è stato modellato con gli elementi shell con lo spessore in direzione radiale pari a 0,14m, con la larghezza in direzione circonferenziale pari a 2,88m e con l'altezza pari a 1,24m.

4.5.2 Elementi portanti verticali di pilastri in “shell”

Analogamente come quelle architravi in Primo Stilobate, i pilastri del giro intermedio e interno sono stati modellati tramite gli elementi “shell” in ragione della sua particolare forma e riunendo tra di due giri. Unendo i due giri interni i carichi provenienti dalla Seconda Cupola potrebbero trasferire parzialmente il peso stesso dal giro interno al giro intermedio. è riportato in Figura 4.32.

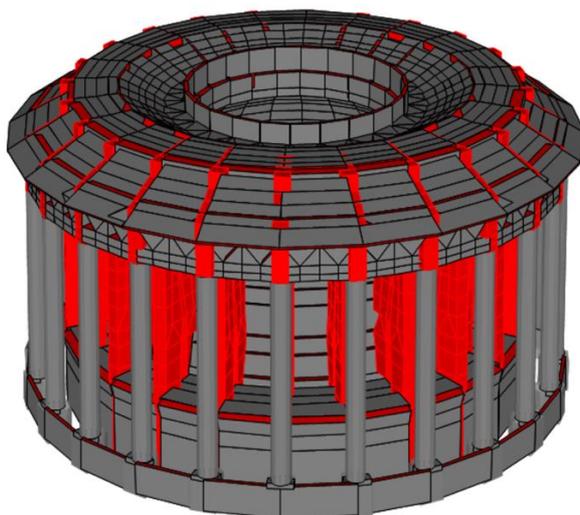


Figura 4.32 Elementi portanti verticali dei pilastri di giri interni in “shell” del Primo Peristilio

Come descritto in precedente, i pilastri di giri interni sono modellati con gli elementi “shell”, per la circonferenza vi sono presenti con 24 pilastri modellati. Inoltre, la suddivisione dei

singoli pilastri è mostrata come disegnati in blu in Figura 4.33 (a). Tutti gli elementi “shell” sono stati modellati con il materiale di muratura e lo spessore in direzione circonferenziale di 0,58m. Poiché la modellazione dei pilastri formando una configurazione irregolare, la larghezza in direzione radiale è pari a circa 1,90m a parte inferiore, 3,76m a parte dove si presentano il piano orizzontale e 2,34m a parte superiore. Mentre l’altezza dei pilastri è pari a 12,73m.

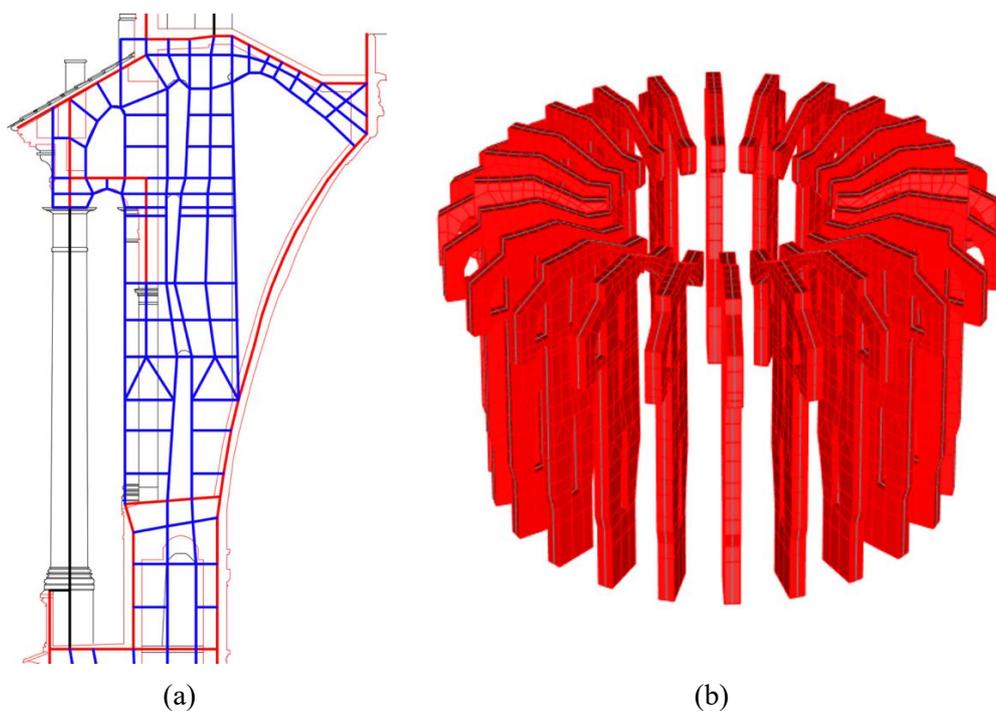


Figura 4.33 Pilastri interni di Primo Peristilio con gli elementi "shell": sezione (a) e f.e.m. (b)

Vedendo dalla sezione dei pilastri Figura 4.33(a), si nota che ad estremità superiore si presentano dei collegamenti tra i pilastri e la Prima Cupola Cassettonata, fatti con gli archi. Questi 24 archi sono stato modellati analogamente come quei pilastri interni, con gli elementi “shell” e lo spessore in direzione circonferenziale di 0,58m, mentre la lunghezza assiale in direzione radiale è pari a 3,29m e l’altezza è pari circa 1,30m a lato della Prima Cupola Cassettonata e 0,96m a lato dei pilastri. Inoltre, questi archi sorregge il piano di pavimento posizionato sopra della Prima Cupola Cassettonata.

Inoltre, si sono assegnati anche i “joints constraints” di tipo “body” ai nodi indicati in Figura 4.34, in funzione analogamente come quelli inferiori a livello di 38m. Pertanto, in questa parte di Primo Peristilio vi sono assegnati con 3 nodi distinti con i numeri di assegnazione di 24 più 24 più 24 chiamati con “48m” “52m esterno e “52m interno”.

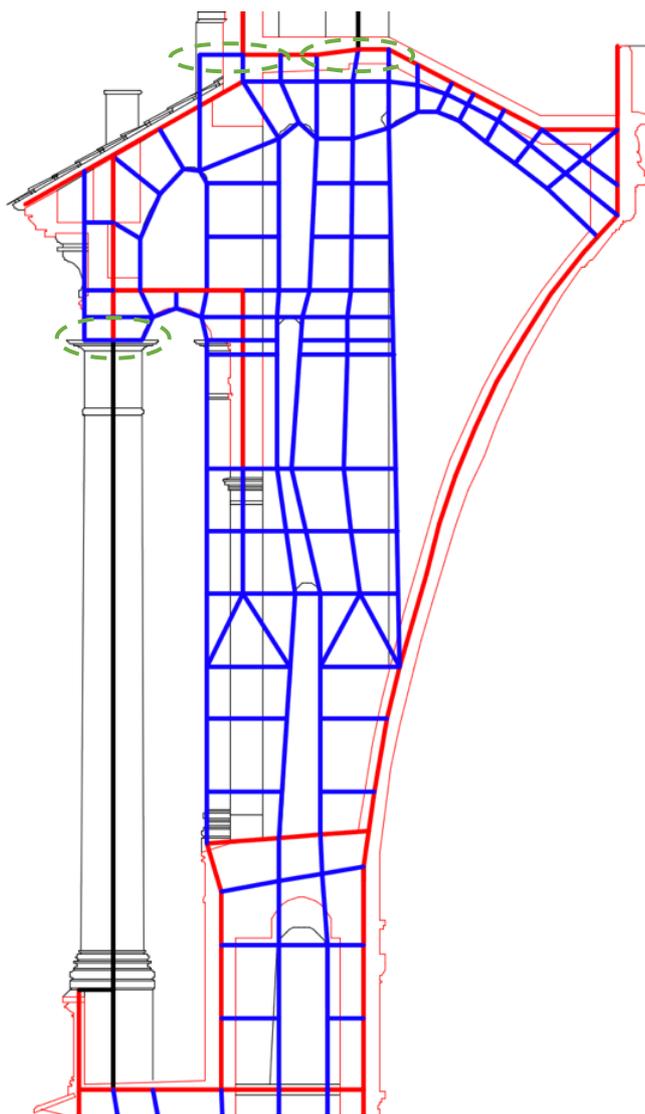


Figura 4.34 Assegnazione dei constraints dei nodi della parte di Primo Peristilio

4.5.3 Elementi portanti circolariferenziali in “shell”

Come mostrato in Figura 4.35, in questa parte degli elementi portanti circolariferenziali si è divisi in due livelli distinti: livello di circa 40m e livello di circa 53m. Tutti gli elementi circolariferenziali descritti sono modellati con elementi “shell” in materiale di muratura. Inoltre, gli spessori di vari elementi sono in seguito.

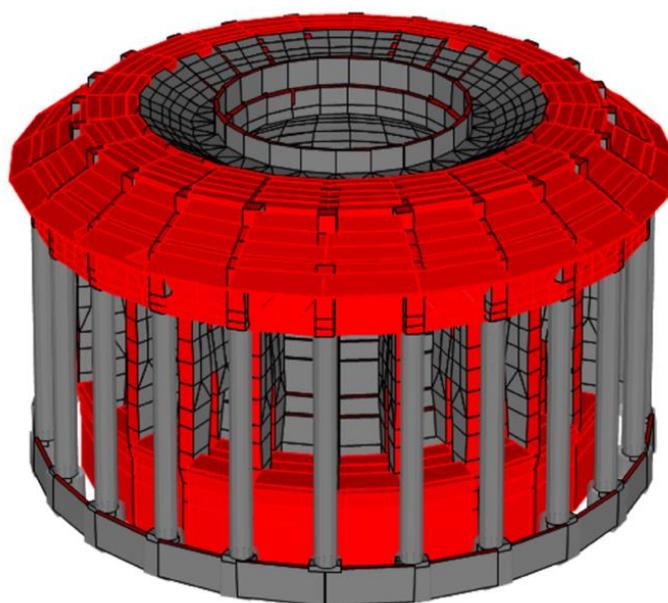


Figura 4.35 Elementi portanti circolari del Primo Peristilio

A livello di circa 40m gli elementi circolari sono stati modellati e posizionati come illustrato in Figura 4.36 (a) in rosso con 24 setti in circolazione della Cupo ad ogni singolo setto è stato diviso dei mesh mostrati in Figura 4.36 (b). Lo spessore in direzione radiale di pareti intermedie è pari 0,36m, la larghezza in direzione circonferenziale è pari a 2,43m, l'altezza da piano orizzontale inferiore a quello piano inclinato superiore è pari a circa 3,03m. Mentre quelle pareti interne lo spessore modellato in direzione radiale è pari a 0,49m, la larghezza in direzione circonferenziale è pari a 1,97m, l'altezza è pari a 2,75m. Invece lo spessore in direzione di altezza di pavimenti posizionati sopra delle pareti intermedie e interne sono di 0,29m, la lunghezza in direzione radiale è pari a circa 1,96m, la larghezza è pari a 1,97m a lato interno e 2,43m a lato intermedio.

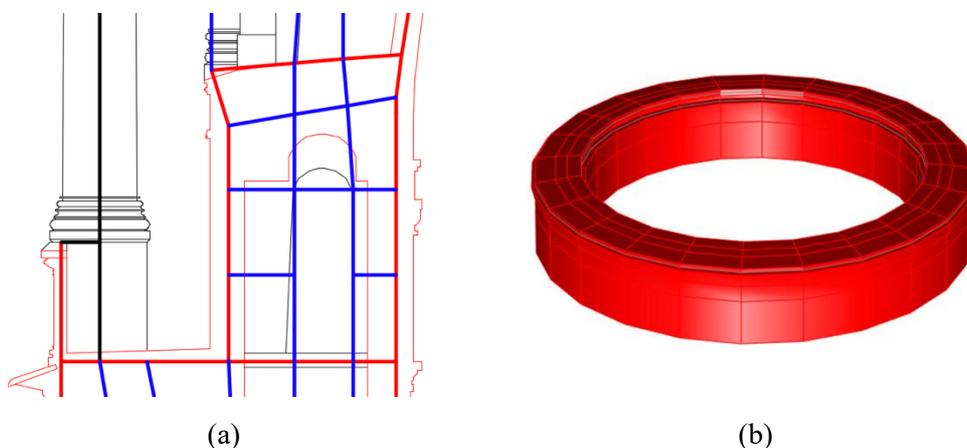


Figura 4.36 Elementi circolari di Primo Peristilio parte inferiore: sezione (a) e f.e.m. (b)

A livello di circa 53m elementi circolarziali sono stati modellati e posizionati illustrati con rosso in Figura 4.37 (a). Vedendo dalla Figura 4.28 si nota che tra i pilastri intermedi si presentano con i 24 archi a tutto sesto; pertanto, a tale posizione è stato modellato con gli elementi “shell” mantenendo la stessa forma di essi, con lo spessore in direzione radiale di 0,38m, la larghezza in direzione circolarziale è pari a 2,36m, l’altezza della parte vuota degli archi è pari a 0,94m, l’altezza totale delle pareti intermedi è pari a 1,72m.

Procedendo verso in alto, si trova un piano orizzontale modellato con lo spessore in direzione di altezza pari a 0,20m, la lunghezza in direzione radiale è pari a 1,59m, la larghezza in direzione circolarziale è pari a 2,36m lato intermedio e 2,72m lato esterno. A lato esterno di questo piano orizzontale si presenta una parete circolare poggiato sopra delle colonne esterne descritte in precedente, con uno spessore in direzione radiale di 0,56m, la larghezza in direzione circolarziale è pari a 2,72m, mentre l’altezza è 0,60m parte sotto di piano orizzontale e 1,66m parte sopra di piano orizzontale. Tale parete insieme con i pilastri interni sorregge la copertura con lo spessore in direzione di altezza di 0,12m in materiale di muratura, la larghezza circolarziale è pari a 3,05 lato esterno e 2,36m lato intermedio, la lunghezza in direzione radiale è pari a 3,06m, inoltre l’inclinazione è pari 29° . In fine quello piano orizzontale posizionato sopra dei pilastri intermedi e interni è stato modellato con lo spessore in direzione di altezza di 0,32m, la larghezza circolarziale è pari a 1,90 lato interno e 2,36m lato intermedio, la lunghezza in direzione radiale è pari a 1,39m. Mentre quelle pareti in circolarziale verticali tra la copertura inclinata e il piano orizzontale sono state modellate con lo spessore in direzione radiale di 0,48m, la larghezza circolarziale è pari a 2,36m, e l’altezza è pari a 0,34m

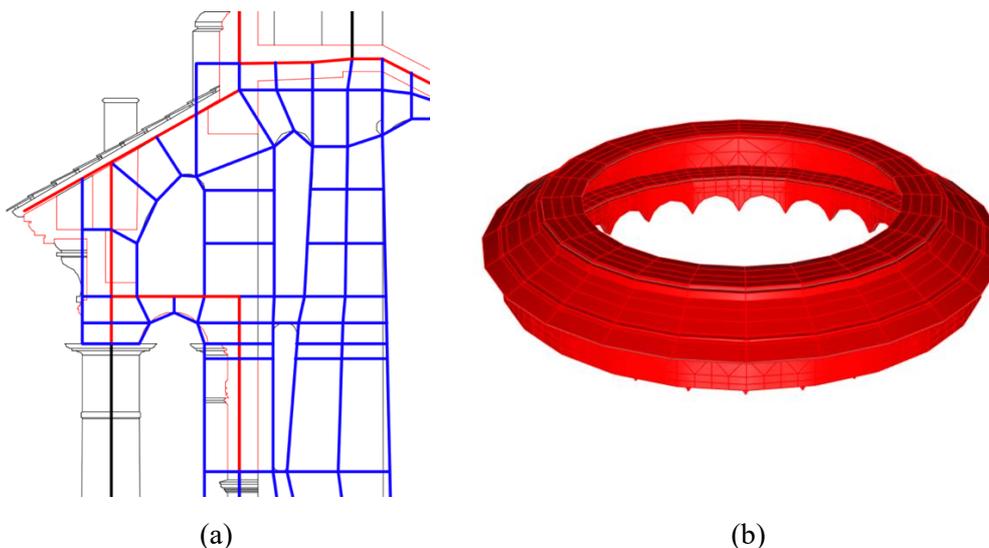


Figura 4.37 Elementi circolarziali di Primo Peristilio parte superiore: sezione (a) e f.e.m. (b)

4.5.4 Prima Cupola Cassettonata di Basilica

Il sistema strutturale della Prima Cupola Cassettonata riportato in Figura 4.38, che è stata modellata in “shell” con il materiale di muratura. È presente un foro circolare al centro di diaframma con il diametro pari a 8,75m. Per l’involucro della cupola, procedendo verso il basso la descrizione, si trovano la cupola a spessore variabile (quota 42,00m – 52,10m), gli involucri della Prima Cupola Cassettonata sono riportati nel software con degli spessori pari a:

- 0,25m	- 0,32m
- 0,25m	- 0,31m
- 0,27m	- 0,31m
- 0,30m	- 0,29m
- 0,34m	- 0,29m
- 0,36m	- 0,29m
- 0,31m	- 0,29m

L’involucro di Prima Cupola Cassettonata è stato posizionato a quota tra 41,99m e 50,00m.

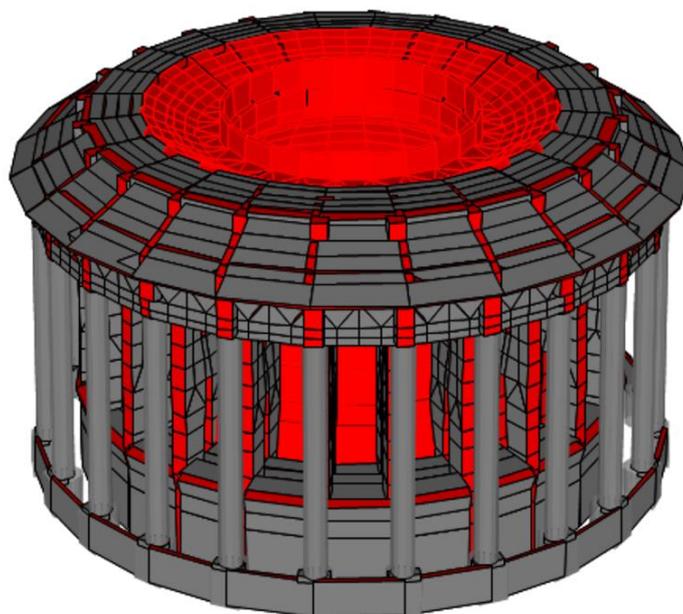


Figura 4.38 Prima Cupola Cassettonata di Basilica

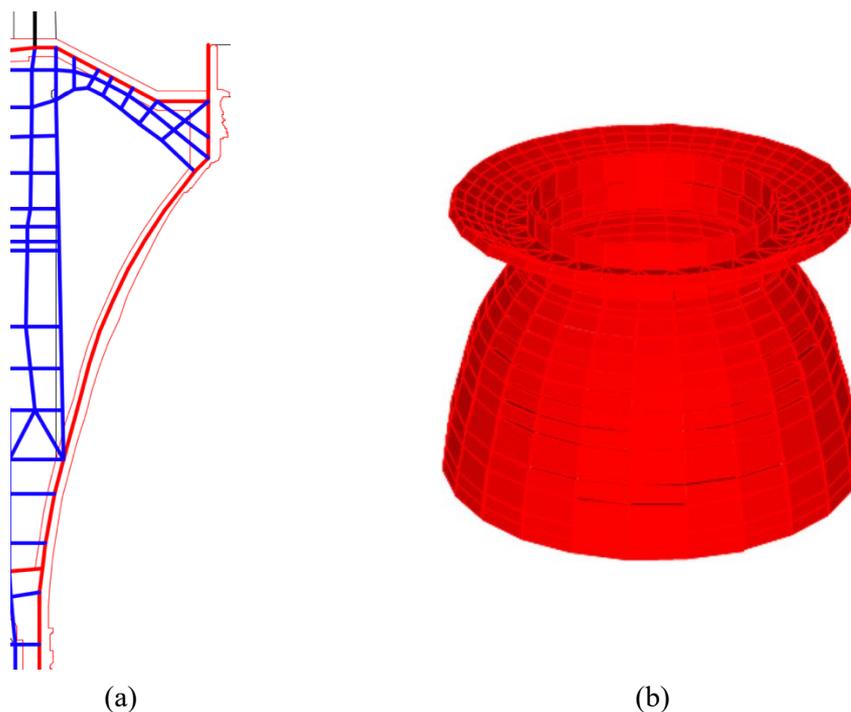


Figura 4.39 Prima Cupola Cassettonata: sezione (a) e f.e.m. (b)

Come mostrato in Figura 4.39, oltre gli elementi di Prima Cupola Cassettonata, si presentano anche gli altri elementi modellati in “shell” con il materiale di muratura. Le dimensioni dei vari elementi sono:

- Spessore in direzione di altezza è pari 0,34m al piano inclinato sopra degli archi descritti in precedente, la lunghezza in direzione radiale è pari a 2,10m, la larghezza in direzione circonferenziale pari a 1,41m a lato interno e 1,90 a lato esterno
- Spessore in direzione di altezza è pari 0,35m al piano orizzontale sopra dei archi descritti in precedente, la lunghezza in direzione radiale è pari a 0,93m, la larghezza in direzione circonferenziale pari a 1,16m a lato interno e 1,41 a lato esterno
- Spessore in direzione radiale è pari 0,60m chiusura verticale della Prima Cupola Cassettonata, l'altezza è pari a 1,05m, la larghezza in direzione circonferenziale è 1,16m
- Spessore in direzione radiale è pari 0,15m cornicione verticale sopra della Prima Cupola Cassettonata, l'altezza è pari a 1,03m, la larghezza in direzione circonferenziale è 1,16m

Inoltre, questa parte descritta è costituita la Gran Sala come accennato nel capitolo 2.4.

4.6 Modellazione del Secondo Stilobate

In quota di secondo Stilobate (48,46 m – 56,35 m), il modello si è diviso in tre parti:

- Elementi portanti verticali dei pilastri in “frame”
- Elementi portanti di architravi in “shell”
- Elementi portanti circolari in “shell”

Come accennato nel capitolo 2.4, gli elementi portanti dei pilastri del Secondo Stilobate riducono a due ordini rispetto quelli inferiori, che sono appoggiati su quelli pilastri di giri interni del Primo Peristilio.

I materiali impiegati nella parte di secondo Peristilio sono utilizzati in seguenti:

- Granito
- Muratura

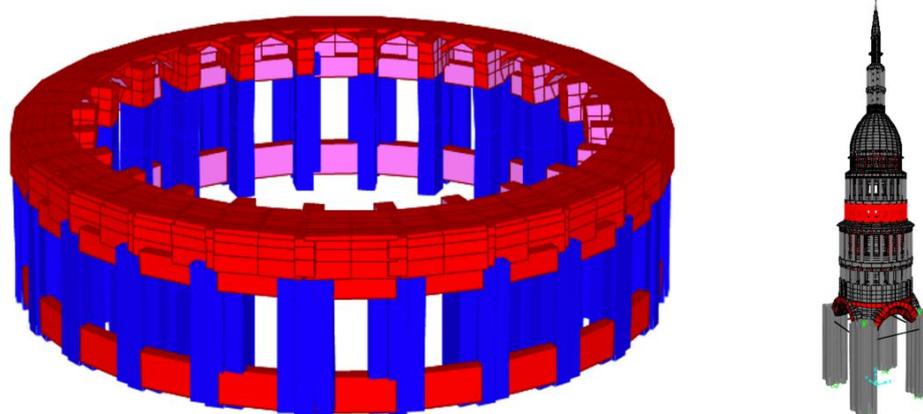


Figura 4.40 Modello completo del Secondo Stilobate



Figura 4.41 Vista interna di Gran Sala a posizione di Secondo Stilobate quota di 53m



Figura 4.42 Vista esterna del Secondo Stilobate da Nord-Ovest a quota di 52,5m

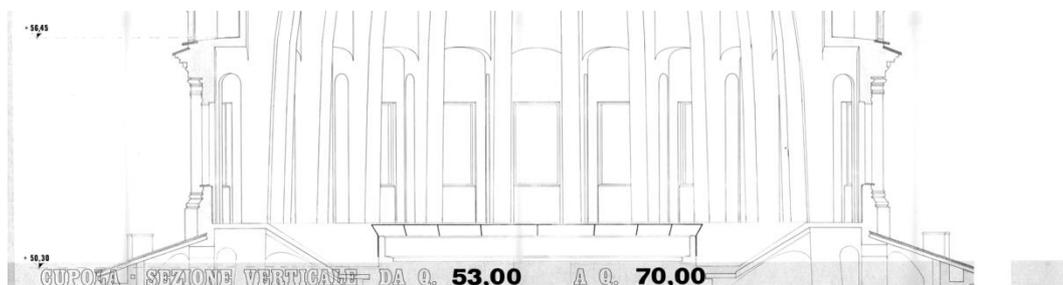


Figura 4.43 Rilievo del Secondo Stilobate³

4.6.1 Elementi portanti verticali dei pilastri in “frame”

Il sistema strutturale della parte di Secondo Stilobate è appoggiato sugli ordini intermedi e interni del Primo Peristilio. Pertanto, da questa quota verso in alto, gli ordini dei pilastri riducono a due fino alla cima del Secondo Peristilio.

Ogni ordine dei pilastri consiste analogamente con 24 pilastri, l'asse longitudinale delle sezioni dei 24 pilastri ad ogni ordine associa al centro di circonferenza in distribuzione radiale. Inoltre, l'altezza di pilastri dei due giri è in entrambi di 3,87m Le sezioni dei pilastri di due ordini sono:

- Sezione particolare mostrato in Figura 4.44 per i pilastri esteri, nota che la piccola parte sporgente è messo verso ad esterno
- Sezione costante della parte inferiore di pilastro interno, di 0,77m x 0,50m fino a

³ Tavola 4, Basilica di S. Gaudenzio “Intervento e conservativo esterno di cupola” Rilievo di Ing. Perazzo 1986.

lunghezza dei pilastri di 2,34m. Sezione variabile della parte superiore di pilastro interno modellato tramite il comando “nonprismatic” con la lunghezza del tratto di 1,46m, sezione inferiore del tratto 0,77m x 0,50m e sezione superiore del tratto 0,88m x 0,50m.

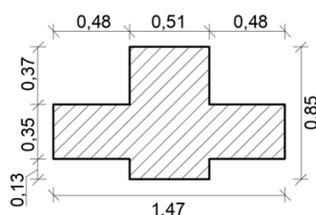


Figura 4.44 Sezione particolare dei pilastri esterni del Secondo Stilobate

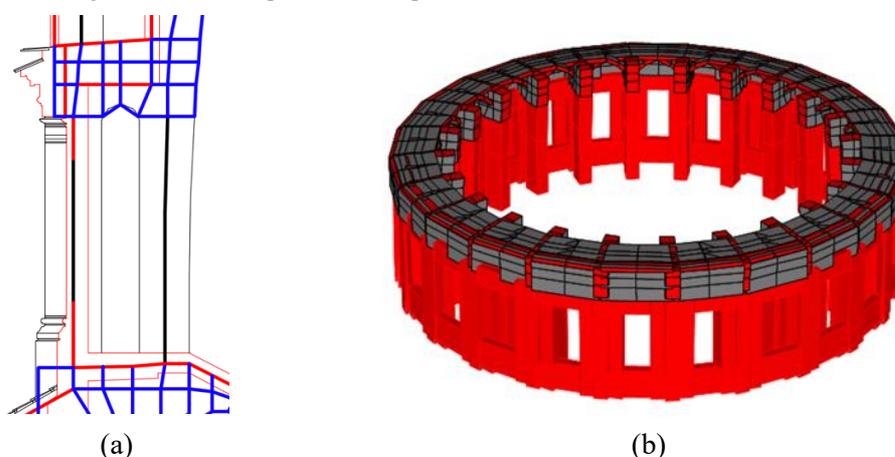


Figura 4.45 Elementi portanti verticali del Secondo Stilobate: sezione (a) e f.e.m. (b)

Gli elementi portanti verticali dei pilastri di due ordini sono indicati in nero Figura 4.45 (a), dove si nota che tra ogni due pilastri esterni vi presentano con le grandi finestre da (Figura 4.41 vista interna e Figura 4.42 vista esterna). Per cui le 24 finestre sono state presente con i vuoti a tale posto aggiungendo due fasce di muro superiore e inferiore, come mostrato in Figura 4.45 (b). Queste fasce sono modellate in elementi “shell” con il materiale di muratura, lo spessore in direzione radiale delle fasce è ugualmente per tutte le fasce pari a 0,32m. le altezze delle fasce superiori e inferiori sono rispettivamente pari a 1,00m e 0,65m, mentre la larghezza circonferenziale è di 2,36m.

4.6.2 Elementi portanti di architravi in “shell”

Analogamente come gli architravi del Primo Stilobate, sulla cima dei pilastri. Del Secondo Stilobate si presentano una cornice architravata in 24 per tutto circonferenza della Cupola. Questi architravi legano i pilastri dei due ordini. Le cui sono state modellate con gli elementi “shell” in materiale di muratura, con lo spessore in direzione circonferenziale di 0,50m, mentre la larghezza in direzione radiale è pari a 2,16m e l’altezza di circa 1,16m.

La suddivisione dei singoli mesh mostrato in Figura 4.46 (a) si sono state divise in ragione degli andamenti di trasferimenti dei carichi e delle geometrie strutturali.

Nota che, all'intersezione tra gli architravi e i due giri di pilastro vi presente un cambiamento degli elementi "frame" e "shell", pertanto si dovrebbe anche assegnare i "constraints" di tipo "body" come quelli nodi del livello inferiore. È stato assegnato a due nodi per singolo settore, chiamati con "55m esterno" e "55m interno", come mostrato in Figura 4.47.

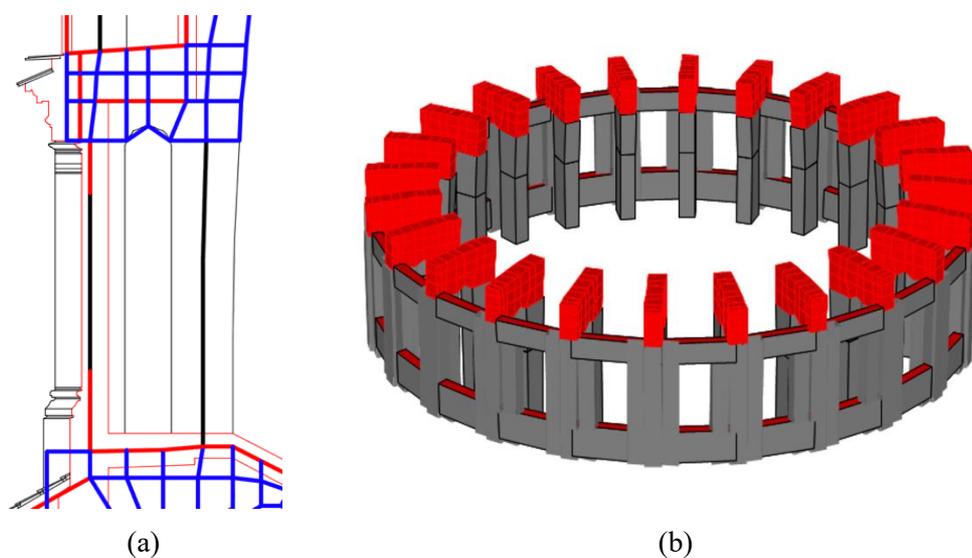


Figura 4.46 Architravi del Secondo Stilobate: sezione (a) e f.e.m. (b)

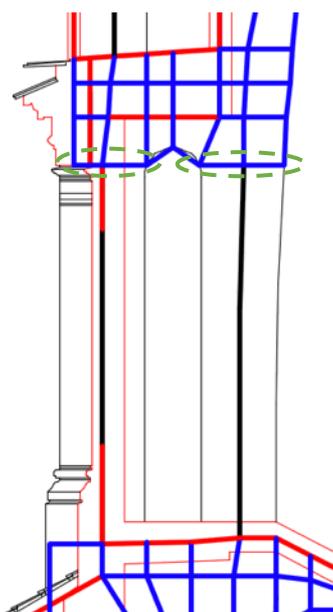


Figura 4.47 Assegnazione di "constraints" del Secondo Stilobate

4.6.3 Elementi portanti circolariferenziali in “shell”

Come mostrato in Figura 4.48 (b) tutti gli elementi portanti circolariferenziali sono modellati con gli elementi “shell” con il materiale di muratura, essi posizionati al superiore degli architravi che si discutono nel paragrafo successivo. Gli elementi “shell” sono indicati in Figura 4.48 (a).

Le dimensioni degli elementi sono descritte in seguito:

- Lo spessore in direzione radiale è pari 0,66m, l'altezza è di 1,09m, la larghezza in direzione circolariferenziale è pari a 2,39m per le parete esterna in circolare.
- Lo spessore in direzione di altezza è pari 0,15m, la larghezza in direzione circolariferenziale è pari a 2,05m a lato interno e 2,43m a lato esterno, la lunghezza in direzione radiale è pari a 1,48m per i pavimenti in circolare appoggiati sulle 24 architravi.

Il tratto orizzontale rosso posizionato tra i due ordini dei pilastri è la posizione di partenza delle volte a tutto sesto come mostrato in Figura 4.41.

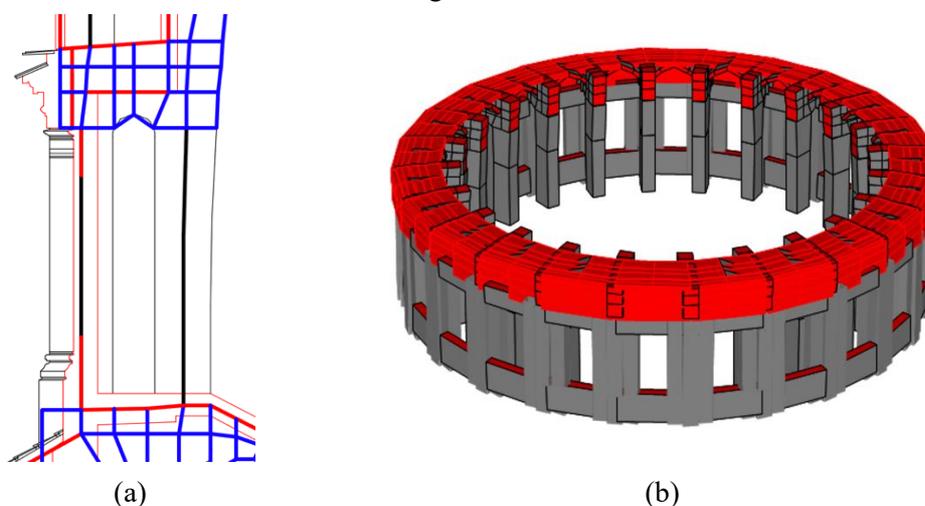


Figura 4.48 Elementi portanti circolariferenziali del Secondo Stilete: sezione (a) e f.e.m. (b)

Le volte a tutto sesto sono state modellate con gli elementi “shell” con lo spessore di 0,15m, che sorregge una porzione dei carichi provenienti dai pavimenti orizzontali descritti in precedente. È riportato in Figura 4.49.

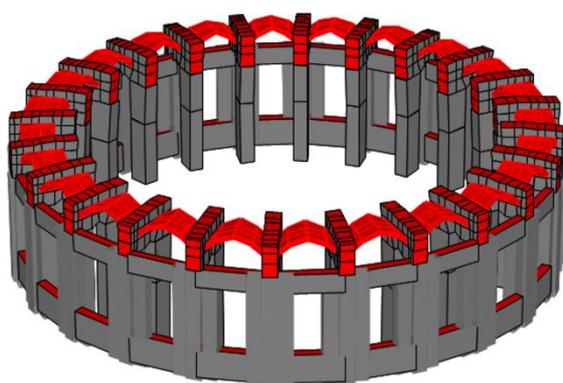


Figura 4.49 Volte a tutto sesto del Secondo Stilobate

4.7 Modellazione del Secondo Peristilio e della Seconda Cupola

In quota di Secondo Peristilio (56,35m – 66,90m) riportato in Figura 4.50, da questa quota in poi, si inizia l’Imbuto Antonelliano che appoggia agli elementi portanti del giro interno del Secondo Peristilio, si approfondisce nei paragrafi successivi. Il modello si è diviso in parti:

- Elementi portanti dei pilastri e degli archi in “frame”
- Elementi portanti di pilastri in “shell”
- Elementi portanti circolari in “shell”
- Seconda Cupola di Basilica

I materiali impiegati nella parte di Secondo Peristilio sono utilizzati in seguenti:

- Granito
- Luserna
- Muratura

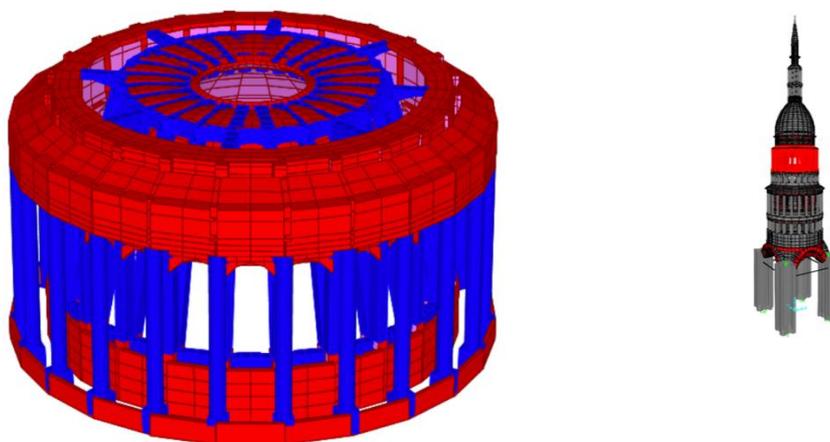


Figura 4.50 Modello completo del Secondo Peristilio e della Seconda Cupola



Figura 4.51 Vista interna del Secondo Peristilio a quota circa 63m



Figura 4.52 Vista esterna del Secondo Peristilio da Sud-Ovest a quota 61,5m

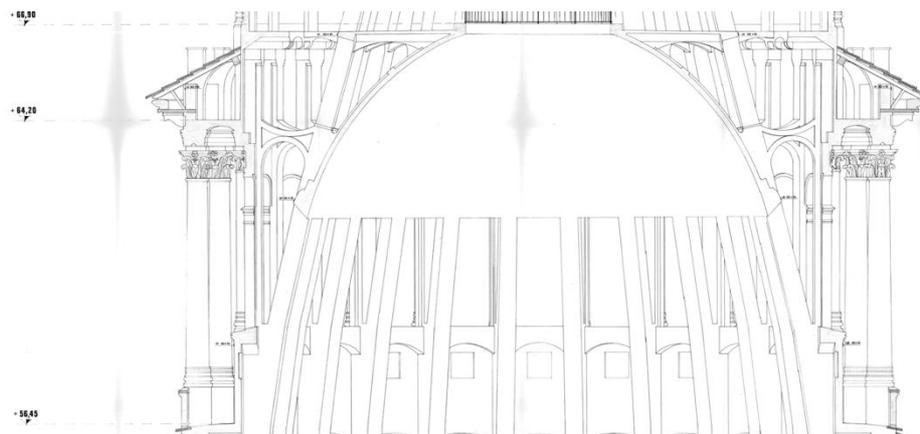


Figura 4.53 Rilievo di Secondo Peristilio⁴

⁴ Tavola 4, Basilica di S. Gaudenzio “Intervento e conservativo esterno di cupola” Rilievo di Ing. Perazzo 1986.

4.7.1 Elementi portanti dei pilastri e degli archi in “frame”

Gli elementi portanti dei pilastri del Secondo Peristilio sono analogamente come descritto nella parte di Primo Peristilio, che sono: le 24 colonne in granito del giro esterno; i 24 pilastri in muratura del giro interno e i 24 pilastri inclinati di Imbuto Antonelliano. Mentre gli elementi degli archi in questa parte si sono divisi in due diversi orientamenti: in direzione radiale e in circolazione.

- Archi radiali legano:
 - La Seconda Cupola a parte superiore e i pilastri di Imbuto Antonelliano, i cui sono in 24 archi, chiamati nel modello “69m archi interni”
 - I pilastri di Imbuto Antonelliano e i pilastri del giro interno di Secondo Peristilio, i cui sono in 8 archi, chiamati nel modello “69m archi esterni”.
- Archi in circolazione nella parte di Secondo Peristilio legano i pilastri di Imbuto Antonelliano e i pilastri di Secondo Peristilio a diversi livelli. Nel livello inferiore di 59m gli archi sono posizionati in verticali, mentre nel livello superiore di 67m gli archi sono orientati con una inclinazione rispetto all’orizzonte di 74° . Tutti i due livelli di archi sono costituiti da 24 archi.

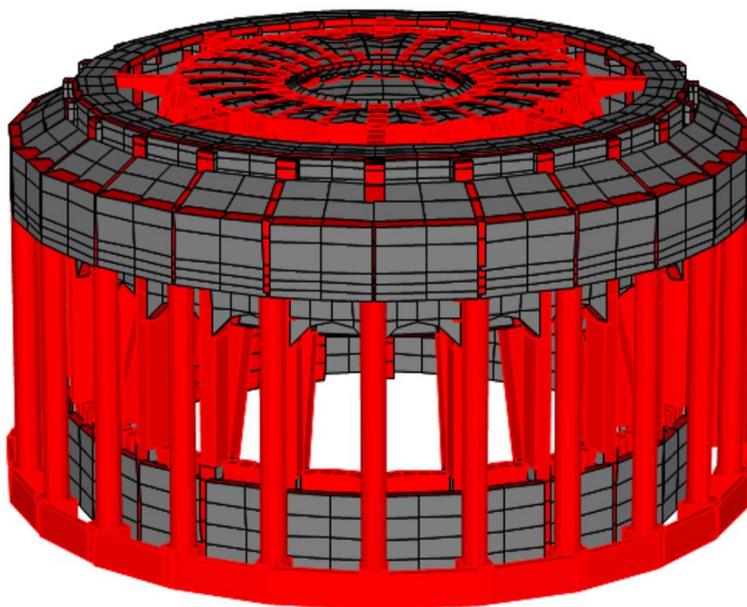


Figura 4.54 Elementi portanti in "frame" del Secondo Peristilio

Come riportato in Figura 4.55 (a) i pilastri sono stati indicati in nero. In particolari, la linea dei pilastri interni indicati è stata indicata con nero e rosso fino alla quota inferiore dei mesh indicati con blu, in ragione del posto di rosso si presentano anche gli elementi “shell” in circolferenziali.

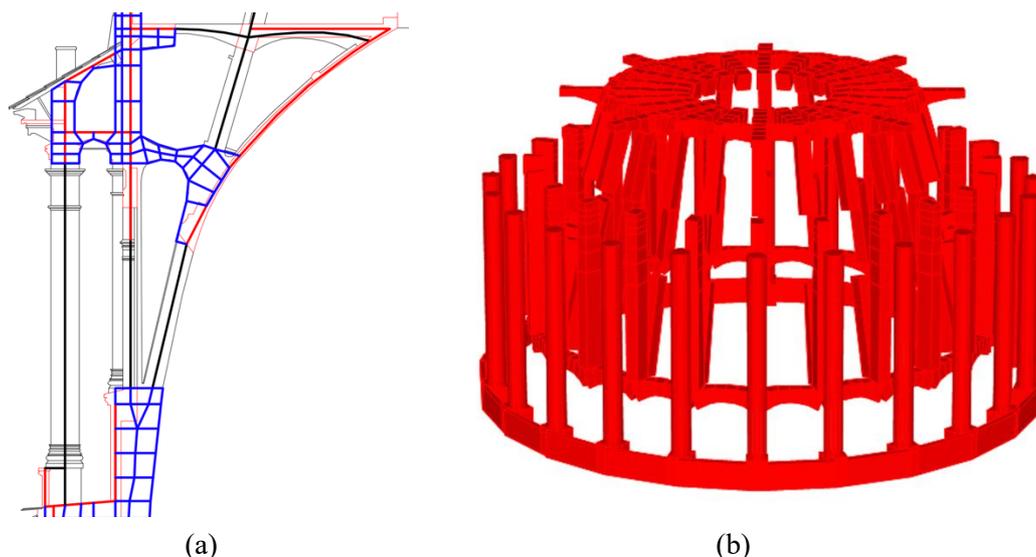


Figura 4.55 Elementi portanti modellati in "frame" del Secondo Peristilio: sezione (a) e f.e.m. (b)

Le sezioni e le altezze e i materiali dei vari pilastri del Secondo Peristilio sono:

- Diametro di 0,60m con l'altezza 6,48m di per le 24 colonne esterni in materiale di granito
- 0,75m x 0,65m con l'altezza 0,80m per le 24 basi sotto le colonne esterni in materiale di granito
- 0,40m x 0,60m con l'altezza 4,79m per le 24 pilastri interni in materiale di muratura
- 0,40m x 0,50m per le 24 pilastri di Imbuto Antonelliano sia inferiore che superiore in materiale muratura, mentre l'altezza inclinata di 3,15m per quelli inferiori e 2,47m per quelli superiori. L'inclinazione dei pilastri di Imbuto Antonelliano è pari a 74°.

A sommità esterna delle basi sotto le colonne esterne si è modellato una fascia di muretto in elementi "shell" con il materiale di muratura che copre le basi, lo spessore di essa è di 0,14m. Nella parte superiore del muretto e 24 basi delle colonne è stato modellato con i 24 link senza peso specifico e infinitamente rigido analogo come quelli del Primo Peristilio. I link hanno una sezione di 0,65m x 0,20m.

La modellazione degli archi è stata costituita con diversi tratti seguendo la linea d'asse degli archi, in ragione di assegnare con diverse sezioni "nonprismatic" per ogni tratto. Tutti gli elementi archi sono modellati in materiale di muratura. La seguente descrizione delle sezioni dei tratti degli archi è indicata procedendo verso ad esterno:

- Archi in direzione radiale:
 - “69m archi esterni” disegnati in 3 tratti con la lunghezza totale assiale in direzione radiale 1,57m
 - ⇒ 0,45m x 0,59m – 0,45m x 0,39m
 - ⇒ 0,45m x 0,39m – 0,45m x 0,24m
 - ⇒ 0,45m x 0,24m – 0,45m x 0,22m

 - “69m archi interni” disegnati in 5 tratti con la lunghezza totale assiale in direzione radiale 2,59m
 - ⇒ 0,45m x 0,59m – 0,45m x 0,44m
 - ⇒ 0,45m x 0,44m – 0,45m x 0,30m
 - ⇒ 0,45m x 0,30m – 0,45m x 0,34m
 - ⇒ 0,45m x 0,34m – 0,45m x 0,44m
 - ⇒ 0,45m x 0,44m – 0,45m x 0,59m

- Archi in direzione circonferenziale:
 - Archi del livello 59m disegnati in 6 tratti simmetrici con la lunghezza totale assiale in direzione circonferenziale 2,01m, pertanto le sezioni dei 3 tratti a lato dell’asse di simmetria sono:
 - ⇒ 0,36m x 0,66m – 0,36m x 0,52m
 - ⇒ 0,36m x 0,52m – 0,36m x 0,45m
 - ⇒ 0,36m x 0,45m – 0,36m x 0,42m

 - Archi del livello 67m disegnati in 6 tratti simmetrici con la lunghezza totale assiale in direzione circonferenziale 1,35m, pertanto le sezioni dei 3 tratti a lato dell’asse di simmetria sono:
 - ⇒ 0,50m x 0,53m – 0,50m x 0,37m
 - ⇒ 0,50m x 0,37m – 0,50m x 0,29m
 - ⇒ 0,50m x 0,29m – 0,50m x 0,27m

4.7.2 Elementi portanti di pilastri in “shell”

Analogamente come quelli pilastri in Primo peristilio, i pilastri del giro interno sono stati modellati tramite gli elementi “shell” parzialmente, in ragione della sua particolare forma. In particolare, in questa parte è stato modellato con gli “shell” in due diversi livelli. In cui

il livello inferiore unisce i pilastri del giro interno di Secondo Peristilio e i pilastri di Imbuto Antonelliano. Il modello è riportato in Figura 4.56.

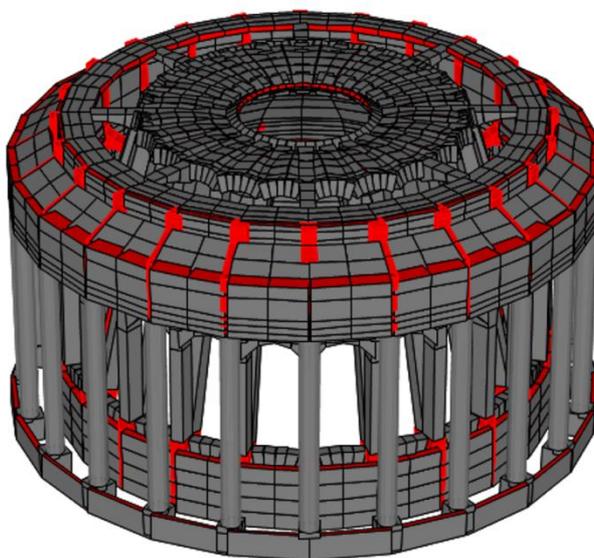


Figura 4.56 Elementi portanti verticali dei pilastri di giri interni in “shell” del Secondo Peristilio

Come descritto in precedente, i pilastri interni sono modellati con gli elementi “shell”, per la circonferenza vi sono presenti con 24 pilastri modellati. Inoltre, la suddivisione dei singoli pilastri è mostrata come mostrato in Figura 4.57 (a). Tutti gli elementi “shell” in due livelli diversi sono stati modellati con il materiale di muratura e lo spessore in direzione circonferenziale pari a 0,45m.

A sommità dei pilastri si trova degli elementi di mensole modellati anche in “shell” come mostrato in Figura 4.57 (a) fatto in Luserna. Lo spessore in direzione circonferenziale è pari a 0,20m, la lunghezza in direzione radiale è 0,70m e l’altezza è pari a circa 0,40m.

Vedendo dalla sezione dei pilastri Figura 4.57 (a), si nota che ad estremità superiore dei pilastri interni in “frame” si presentano dei collegamenti tra i pilastri interni di Secondo Peristilio e i pilastri di Imbuto Antonelliano, fatti con gli archi. Questi 24 archi sono stato modellati analogamente come quei pilastri interni, con gli elementi “shell” e lo spessore in direzione circonferenziale pari a 0,45m.

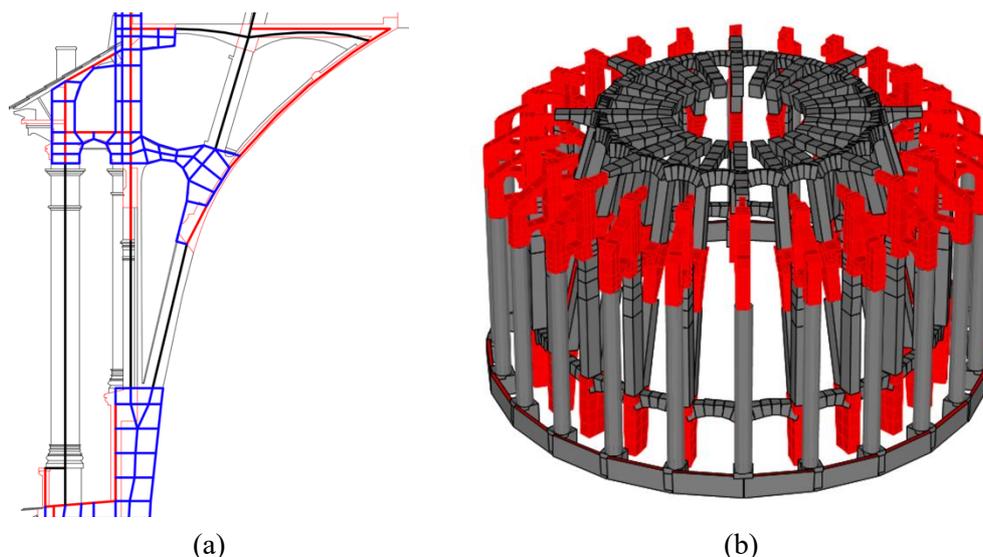


Figura 4.57 Pilastri interni di Secondo Peristilio con gli elementi "shell": sezione (a) e f.e.m. (b)

Inoltre, si sono assegnati anche i "joints constraints" di tipo "body" ai nodi indicati in Figura 4.58, in funzione analogamente come quelli inferiori. Pertanto, in questa parte di Secondo Peristilio vi sono assegnati con 3 nodi distinti con i numeri di assegnazione di 24 più 24 più 24 chiamati con "59m" "64m esterno" e "64m interno".

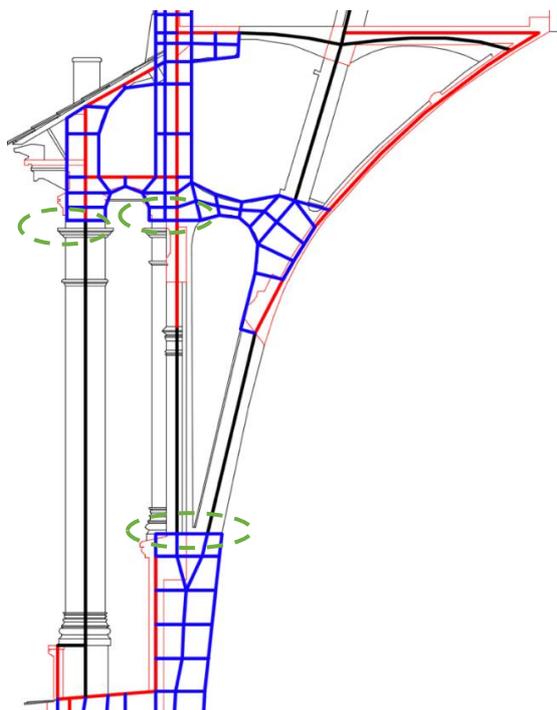


Figura 4.58 Assegnazione dei constraints dei nodi della parte di Secondo Peristilio

4.7.3 Elementi portanti circolari in "shell"

Come mostrato in Figura 4.59, in questa parte degli elementi portanti circolari si è divisi in due livelli distinti: livello di circa 58m e livello di circa 65m. Tutti gli elementi

circonferenziali descritti sono modellati con elementi “shell” in materiale di muratura. Inoltre, gli spessori di vari elementi sono in seguito.

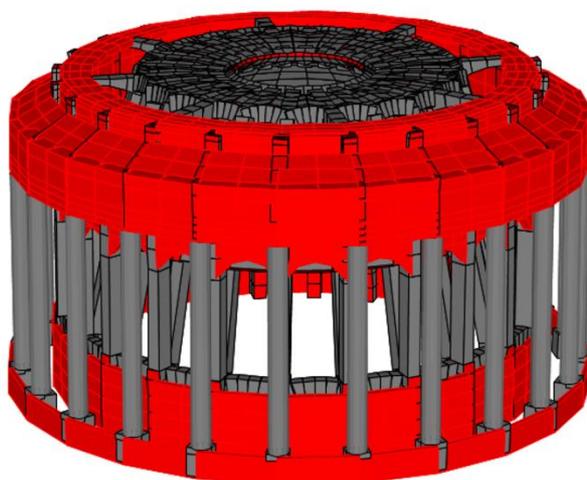


Figura 4.59 Elementi portanti circolari del Secondo Peristilio

A livello di circa 58m gli elementi circolari sono stati modellati e posizionati come illustrato in Figura 4.60 (a) in rosso. Le pareti interne sono state modellate con lo spessore in direzione radiale di 0,23m, la larghezza in direzione circonferenziale di 2,05m e l'altezza di 2,07m.

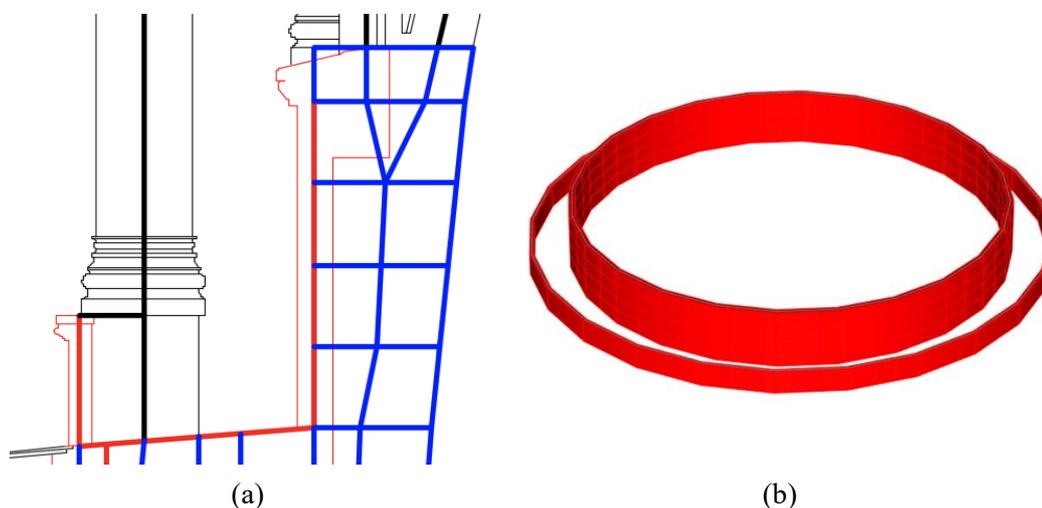


Figura 4.60 Elementi circolari di Secondo Peristilio parte inferiore: sezione (a) e f.e.m. (b)

A livello di circa 65m elementi circolari sono stati modellati e posizionati illustrati con rosso in Figura 4.61 (a). Vedendo dalla Figura 4.28 si nota che tra i pilastri intermedi si presentano con gli archi a tutto sesto; pertanto, a tale posizione è stato modellato con gli elementi “shell” mantenendo la stessa forma di essi, con lo spessore in direzione radiale di 0,30m, la larghezza in direzione circonferenziale di 1,96m e l'altezza di 1,82m (l'altezza

dell'arco è di 0,64m) fino alla quota dove si trova un piano orizzontale. Mentre quella parete posizionata sopra di parete con l'arco è stata modellata con lo spessore in direzione radiale di 0,18m, la larghezza in direzione circonferenziale di 1,96m e l'altezza di 2,20m. Procedendo verso in alto, si trova un piano orizzontale modellato con lo spessore in direzione di altezza di 0,14m, la larghezza in direzione circonferenziale è di 1,72 lato interno e 1,96m lato esterno e la lunghezza in direzione radiale è di 0,92m.

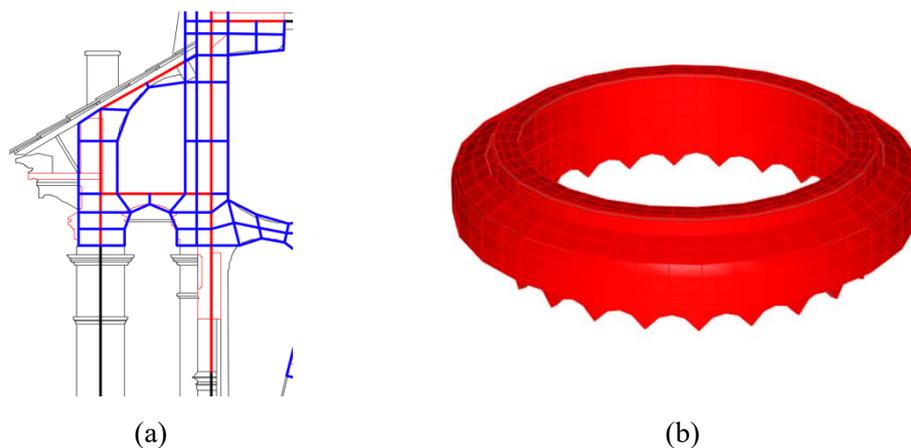


Figura 4.61 Elementi circonferenziali di Secondo Peristilio parte superiore: sezione (a) e f.e.m. (b)

A lato esterno di questo livello si presenta una parete esterna circolare poggiato sopra delle colonne esterne descritte in precedente, con uno spessore in direzione radiale di 0,58m, la larghezza in direzione circonferenziale di 2,32m e l'altezza di 1,73m. Tale parete insieme con le colonne esterne sorregge la copertura inclinata con lo spessore di altezza pari a 0,14m, la larghezza in direzione circonferenziale è 1,96m lato interno e 2,32m lato esterno e la lunghezza in direzione radiale è pari a 1,23m, mentre l'inclinazione della copertura è di 30°. In fine quello piano orizzontale posizionato sopra dei pilastri interni è stato modellato con lo spessore di altezza pari a 0,20m, la larghezza in direzione circonferenziale è 1,96m lato interno e 2,32m lato esterno e la lunghezza in direzione radiale è pari a 1,39m.

4.7.4 Seconda Cupola di Basilica

Il sistema strutturale della seconda Cupola (quota 62,52m – 67,07m) indicando in Figura 4.62 è analogamente come la Prima Cupola Cassettonata descritta in precedenza, che è stata modellata in “shell” con il materiale di muratura. È presente un foro circolare al centro di diaframma con il diametro pari a 3,80m. Per l'involucro della cupola, procedendo verso il basso la descrizione, si trovano la Cupola a spessore variabile, gli involucri della Seconda Cupola sono riportati nel software con degli spessori in crescenti pari a:

- 0,12m		- 0,12m
- 0,12m		- 0,35m

L'involucro di Seconda Cupola è stato posizionato a quota tra 62,50m e 67,08m.

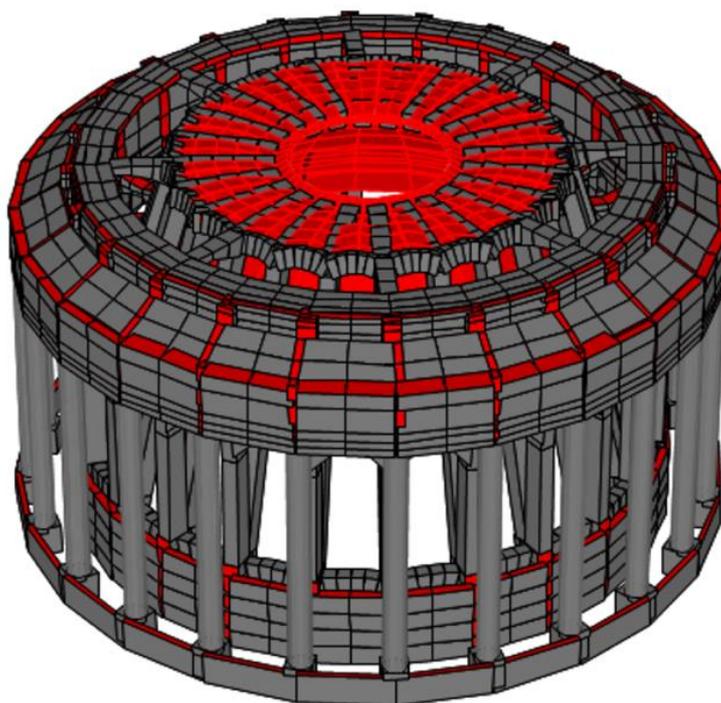


Figura 4.62 Seconda Cupola di Basilica

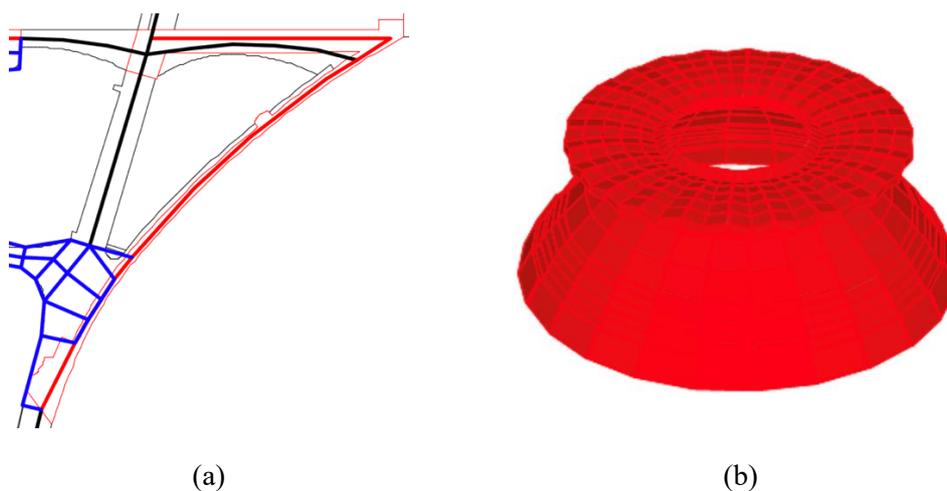


Figura 4.63 Seconda Cupola di Basilica: sezione (a) e f.e.m. (b)

Come mostrato in Figura 4.63 (a), oltre gli elementi di Seconda Cupola, si presentano anche del piano circonferenziale orizzontale modellato in “shell” con il materiale di muratura. Lo

spesso in direzione di altezza è di 0,28m, la larghezza in direzione circonferenziale è 0,64m lato interno e 1,75 lato esterno e la lunghezza in direzione radiale è pari a circa 2,80m.

Inoltre, si sono assegnati anche i “joints constraints” di tipo “body” ai nodi indicati in Figura 4.58, in funzione analogamente come quelli inferiori. Pertanto, in questa parte di Secondo Peristilio vi sono assegnati con un nodo con i numeri di assegnazione di 24 chiamati con “67m”.

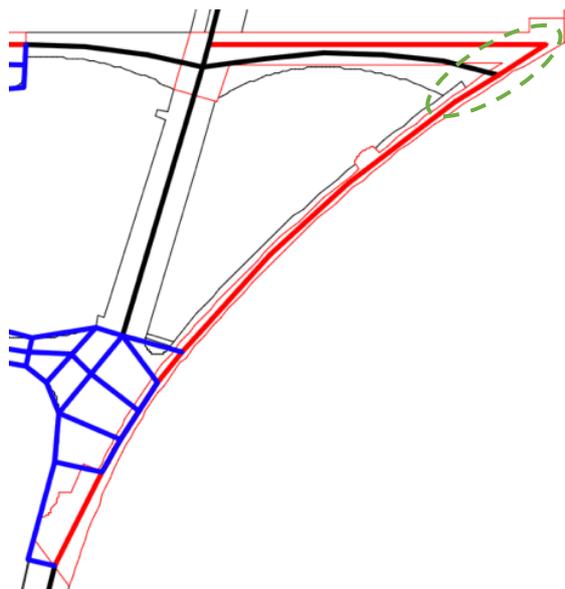


Figura 4.64 Assegnazione dei constraints dei nodi della parte di Seconda Cupola

4.8 Modellazione dell'Attico e della Terza Cupola

In quota di Attico (66,89m – 70,57m), il modello si è diviso in parti:

- Elementi portanti dei pilastri e degli archi in “frame”
- Elementi portanti dei pilastri in “shell”
- Elementi portanti circonferenziali in “shell”
- Terza Cupola di Basilica

I materiali impiegati nella parte di Attico sono utilizzati in seguenti:

- Granito
- Muratura

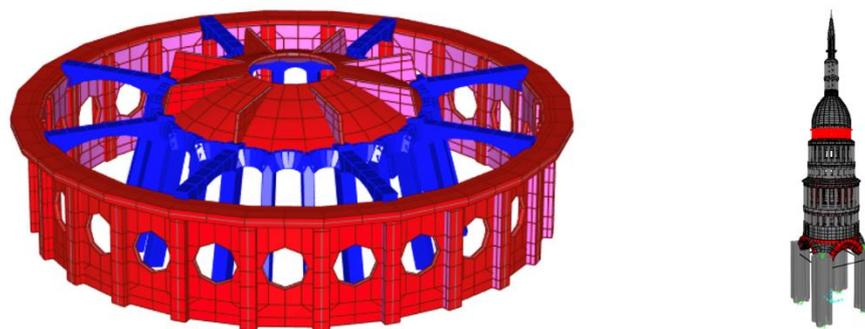


Figura 4.65 Modello completo dell'Attico e della Terza Cupola



Figura 4.66 Vista interna dell'Attico a quota di 68,7m



Figura 4.67 Vista esterna dell'Attico da Nord a quota di 69,8m

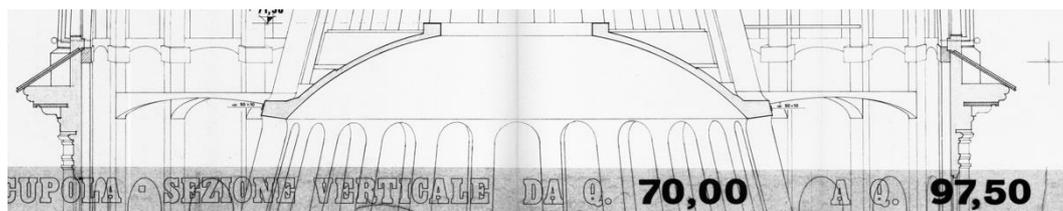


Figura 4.68 Rilievo dell'Attico parte superiore⁵

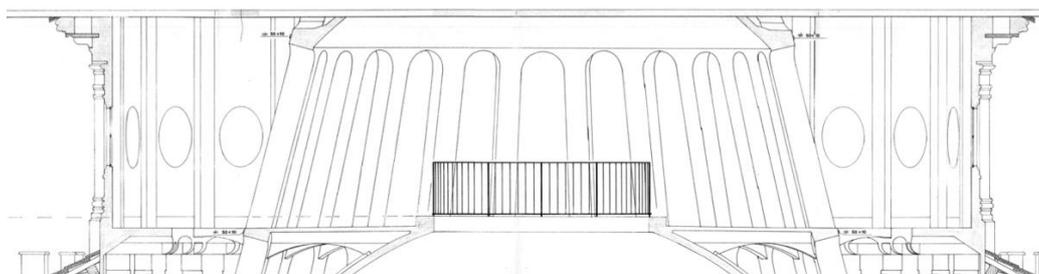


Figura 4.69 Rilievo dell'Attico parte inferiore⁶

4.8.1 Elementi portanti dei pilastri e degli archi in “frame”

Gli elementi portanti dei pilastri nella parte dell'Attico (Figura 4.70) modellati in “frame” sono stati considerati solo quelli pilastri di Imbuto Antonelliano, mentre quei pilastri esterni sono stati modellati in elementi “shell”. In particolare, le sezioni dei pilastri di imbuto antonelliano non abbiano una stessa sezione in circolazione da questa quota alla quota intersezione tra la Quarta Cupola e i pilastri di Imbuti Antonelliani. In specifico, le sezioni sono divise in due diverse dimensioni, in cui otto pilastri abbiano una sezione grande e, 16 pilastri abbiano una sezione piccola. Tutti gli elementi sono stati modellati in muratura.

⁵ Tavola 4, Basilica di S. Gaudenzio “Intervento e conservativo esterno di cupola” Rilievo di Ing. Perazzo 1986.

⁶ Tavola 3, Basilica di S. Gaudenzio “Intervento e conservativo esterno di cupola” Rilievo di Ing. Perazzo 1986.

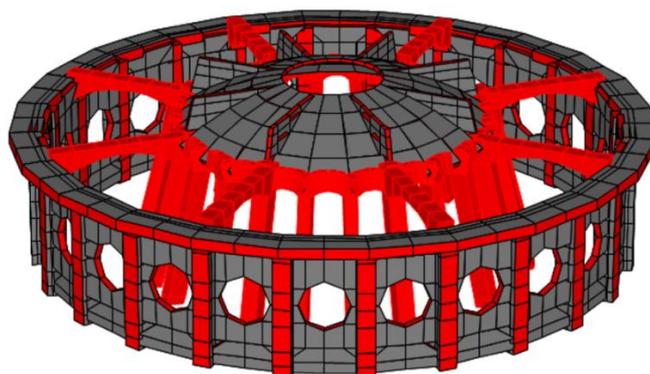


Figura 4.70 Elementi portanti dei pilastri e degli archi di Attico in "frame"

Come mostrato in Figura 4.71 (a), i pilastri e gli archi sono stati indicati con nero.

Le sezioni dei 24 pilastri sono:

- 0,40m x 0,50m otto pilastri posizionati dove si presentano gli otto archi
- 0,30m x 0,50m 16 pilastri, in cui ogni due pilastri sono stati posizionati tra due pilastri con la sezione grande.

Mentre l'altezza inclinata dei pilastri è in entrambi di 3,60m, inclinazione dei pilastri è pari a 76°.

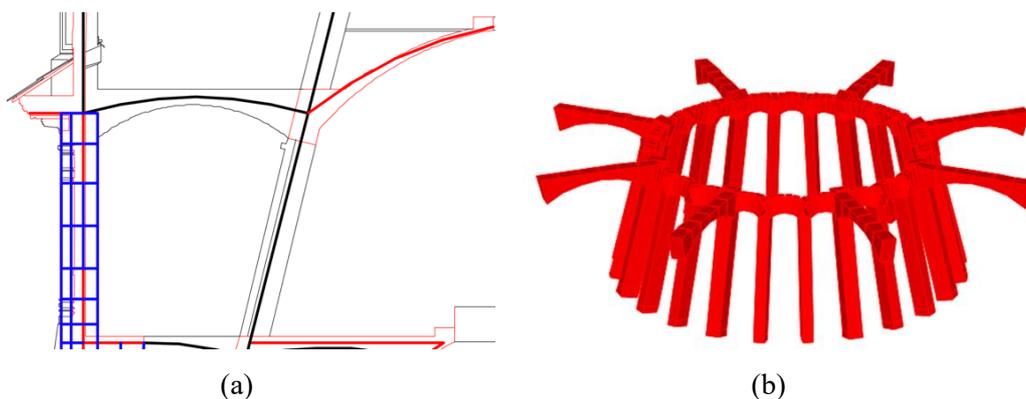


Figura 4.71 Elementi portanti dei pilastri e degli archi di Attico: sezione (a) e f.e.m. (b)

Vedendo Figura 4.71 (b), si nota che gli archi sono suddivisi in due diverse direzioni, una di direzione radiale incluso con otto archi ed una di direzione circonferenziale incluso con 24 archi.

Analogamente come la parti inferiore descritti in Secondo Peristilio, la modellazione degli archi è stata costituita con diversi tratti seguendo la linea d'asse degli archi, in ragione di assegnare con diverse sezioni "nonprismatic" per ogni tratto. Tutti gli elementi archi sono modellati in materiale di muratura. La seguente descrizione delle sezioni dei tratti degli archi è indicata procedendo verso ad esterno:

- Archi in direzione radiale disegnati in 6 tratti simmetrici con la lunghezza totale assiale

in direzione radiale 3,35m, pertanto le sezioni su un lato dell'asse simmetria sono:

- 0,40m x 0,75m – 0,40m x 0,45m
 - 0,40m x 0,45m – 0,40m x 0,29m
 - 0,40m x 0,29m – 0,40m x 0,24m
- Archi in direzione circonferenziale disegnati in 6 tratti simmetrici con la lunghezza totale assiale in direzione radiale 1,12m, pertanto le sezioni su un lato dell'asse simmetria sono:
 - 0,50m x 0,58m – 0,50m x 0,35m
 - 0,50m x 0,35m – 0,50m x 0,25m
 - 0,50m x 0,25m – 0,50m x 0,23m

Inoltre, gli archi in direzione circonferenziale sono stati modellati con una inclinazione rispetto ad orizzonte di 76° .

4.8.2 Elementi portanti dei pilastri in “shell”

Gli elementi portanti dei pilastri esterni dell'Attico sono stati modellati in “shell” con il materiale di muratura.

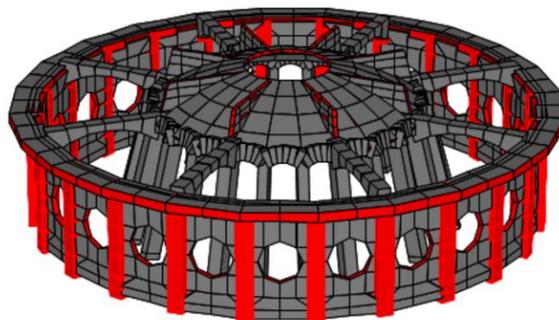


Figura 4.72 Elementi portanti dei pilastri dell'Attico in "shell"

La suddivisione dei pilastri modellati in “shell” sono riportati in Figura 4.73 (a). Lo spessore in direzione circonferenziale degli elementi “shell” è pari a 0,45m, la larghezza in direzione radiale è pari a 0,52m e, l'altezza pari a 3,50m.

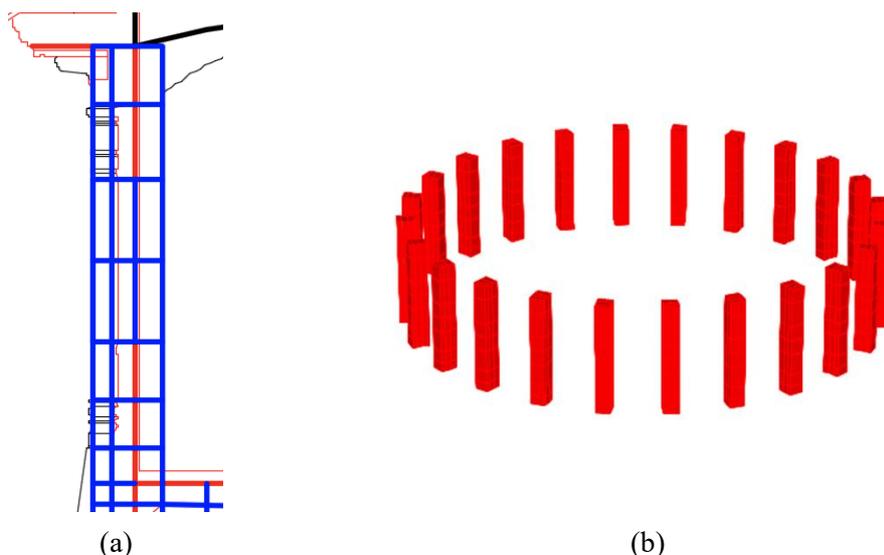


Figura 4.73 Elementi portanti dei pilastri dell'Attico in "shell": sezione (a) e f.e.m. (b)

4.8.3 Elementi portanti circolari in "shell"

Come mostrato in Figura 4.75 (b) tutti gli elementi portanti circolari sono modellati con gli elementi "shell" con il materiale di muratura. Vedendo dalla Figura 4.66 (vista interna) e Figura 4.67 (vista esterna) si nota che sulle pareti circolari si presentano con le finestre tonde con il diametro di circa 1,30m. tutti gli elementi sono stati modellati con il materiale di muratura.

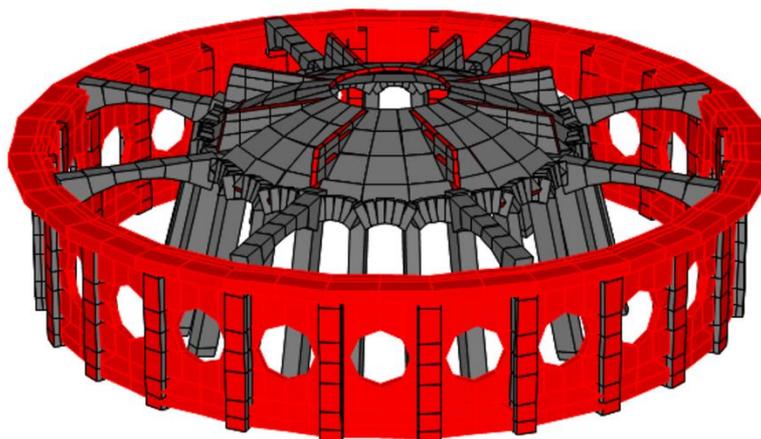


Figura 4.74 Elementi portanti circolari dell'Attico

Inoltre, le dimensioni di vari elementi sono in seguito:

- Spessore in direzioni radiali pari 0,17m, la larghezza in direzione di circonferenziale pari a 1,96m e, l'altezza di 3,50m per la parete verticale con l'apertura di finestre tonde

- Spessore in direzione di altezza pari 0,28m, la lunghezza in direzione radiale pari a 0,82m e, la larghezza in direzione circonferenziale pari 1,96m lato interno e 2,17m lato esterno per il mesorrino orizzontale.

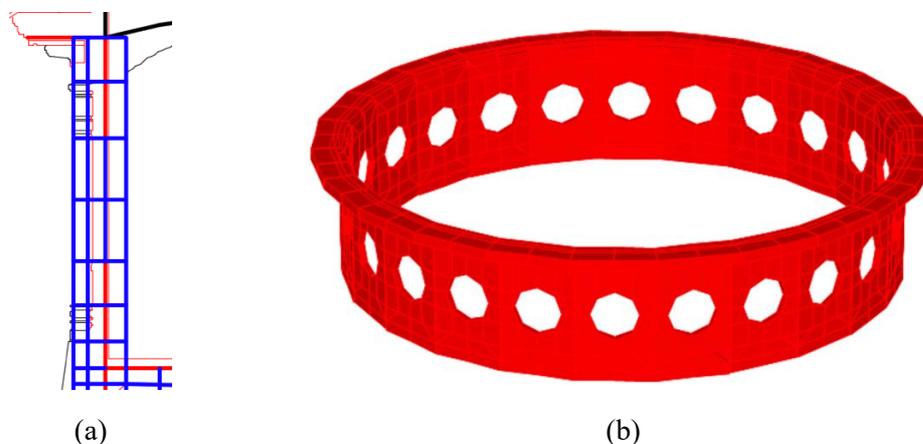


Figura 4.75 Elementi portanti circonferenziali dell'Attico in "shell": sezione (a) e f.e.m. (b)

4.8.4 Terza Cupola di Basilica

Il sistema strutturale della Terza Cupola (quota 70,57m – 71,89m) indicato in Figura 4.76 è analogamente come le Cupole inferiori descritte in precedente che è stata modellata in "shell" con il materiale di muratura. È presente un foro circolare al centro di diaframma con il diametro pari a 2,63m. Per l'involucro della Cupola, procedendo verso il basso la descrizione, si trovano la cupola a spessore variabile, gli involucri della Terza Cupola sono riportati nel software con degli spessori in crescenti pari a:

- 0.10m
- 0.10m
- 0.10m
- 0.15m

L'involucro di Terza Cupola è stato posizionato a quota tra 70,57m e 71,89m.

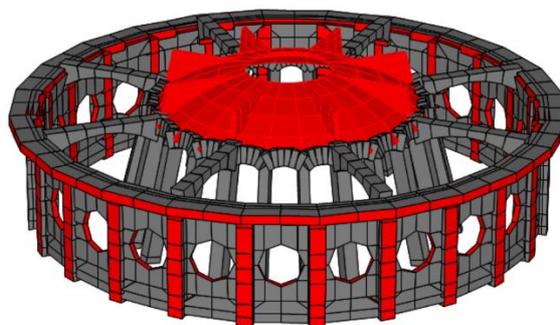


Figura 4.76 Terza Cupola di Basilica

Inoltre, si presenta anche delle otto nervature, posizionati dove presentano i otto pilastri con la sezione grande, che leggano la Terza Cupola e Imbuti Antonelliani. Esse sono state modellate in “shell” con il materiale di muratura. Lo spessore delle nervature è pari a 0,12m. Le dimensioni delle nervature sono: 1,36m la lunghezza inclinata a lato dei pilastri di Imbuto Antonelliano con la inclinazione seguendo dei pilastri, 3,12m la lunghezza a lato seguendo l’involucro della Terza Cupola e, 2,47m a talo orizzontale.

4.9 Modellazione del Gran Tazza e dell’Imbuto Antonelliano

In quota di Grand Tazza e di Imbuto Antonelliano (70,57m – 84,10m) il modello si divide in:

- Elementi di Gran Tazza
- Elementi di Imbuto Antonelliano
- Quarta Cupola e Quinta Cupola di Basilica

I materiali impiegati nella parte di Grand Tazza sono utilizzati in seguenti:

- Misto CLS e muratura
- Muratura

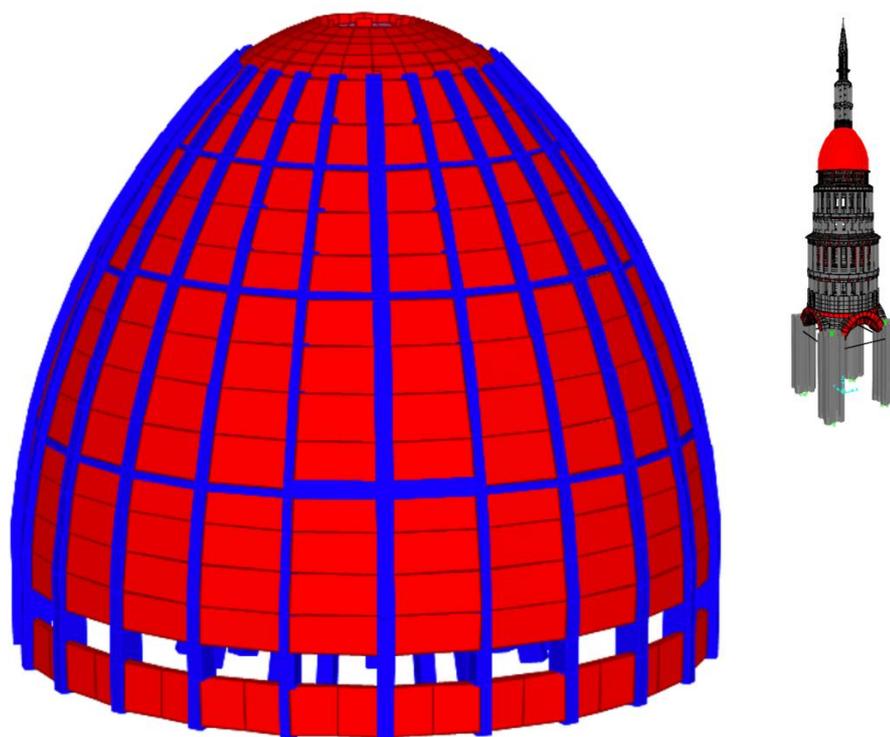


Figura 4.77 Modello completo di Gran Tazza e di Imbuto Antonelliano

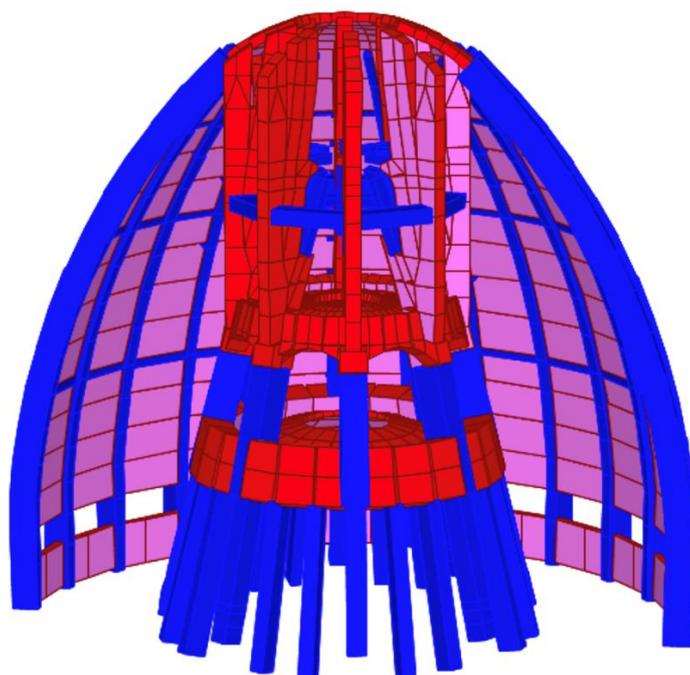


Figura 4.78 Modello completo di Gran Tazza e di Imbuto Antonelliano a vista tagliata

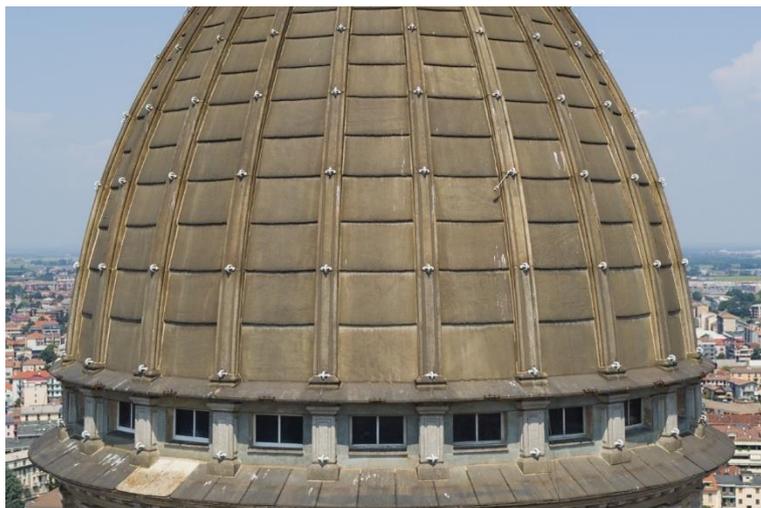


Figura 4.79 Vista esterna di Gran Tazza da Sud a quota di 71,8m

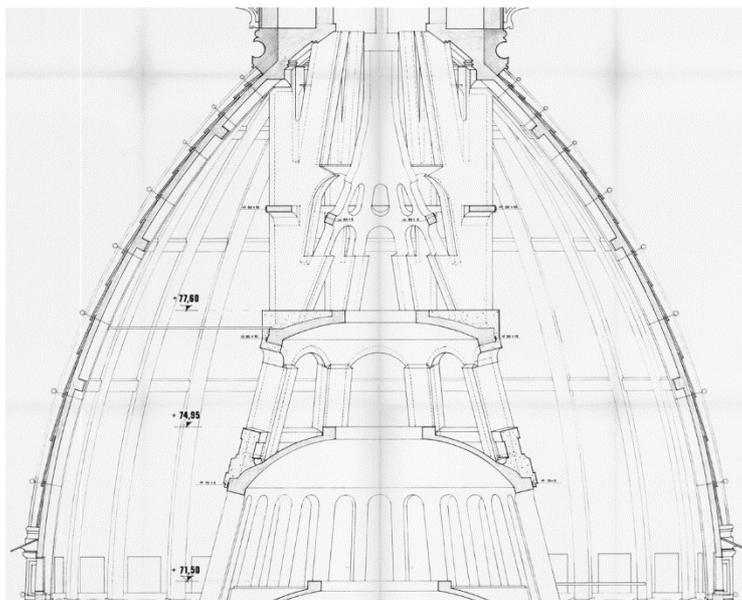


Figura 4.80 Rilievo di Gran Tazza e di Imbuto Antonelliano⁷

4.9.1 Elementi di Gran Tazza

Gli elementi di Gran Tazza sono costituiti da costoloni verticali; travi paralleli orizzontali e involucri di Gran Tazza. Sono riportati in Figura 4.81 e Figura 4.82. I materiali utilizzati di questi elementi sono tutti con la muratura. I costoloni e i paralleli sono stati modellati in elementi “frame” e, gli involucri sono stati modellati in elementi “shell”.

Le dimensioni degli elementi descritti sono in seguenti:

- 0,30m x 0,60m è la sezione dei costoloni verticali di Gran Tazza, 11,96m è la lunghezza totale dei costoloni.
- 0,20m x 0,25m; 0,30m x 0,25m e 0,35m x 0,25m sono le sezioni dei paralleli in corrispondenza di livelli diversi. Le quote di questi 3 livelli di paralleli sono: 1° livello 81,78m; 2° livello 79,37m e 3° livello 75,71m. Inoltre, ad ogni livello il parallelo è inclinato diversamente rispetto ad orizzonte, che sono: 1° livello 52°; 2° livello 62° e 3° livello 76°. Mentre per ogni livello dei paralleli è stato modellato con 24 tratti, per ogni tratto le lunghezze dei paralleli sono: 1,08m, 1,49m e 1,85m rispettivamente al 1° livello, 2° livello e 3° livello.
- 0,15m è lo spessore degli involucri di Gran Tazza fino ad altezza dei costoloni. In

⁷ Tavola 3, Basilica di S. Gaudenzio “Intervento e conservativo esterno di cupola” Rilievo di Ing. Perazzo 1986.

particolare, nella parte inferiore degli involucri è stato modellata con una striscia vuota che rappresenta la finestra di quella parte.

- 0,20m è lo spessore gli involucri di Gran Tazza parte superiore, posizionato ad interno di basamento del Secondo Stilobate del Cupolino

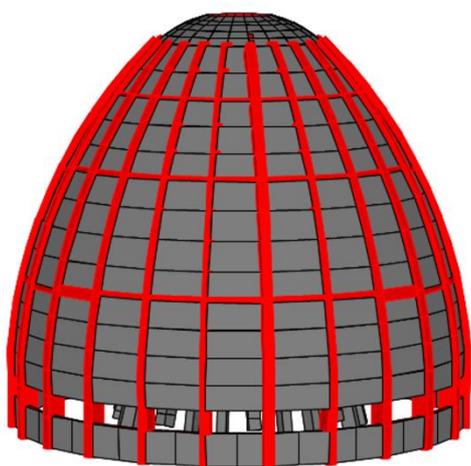


Figura 4.81 Costoloni e Paralleli di Gran Tazza



Figura 4.82 Involucri di Gran Tazza

Inoltre, come mostrato in Figura 4.82 la parte inferiore dell'involucro di Gran Tazza si presenta con le 24 fasce vuote, che rappresentano le finestre a tale posto. La dimensione della singola finestra è 1,96m per la larghezza e 0,72m per l'altezza.

4.9.2 Elementi di Imbuto Antonelliano

Come accennato nel capitolo 2.5, gli elementi di Imbuti Antonelliano sorreggono tutti i carichi di pesi stessi della struttura provenienti dalla parte di cupolino, e le ultime due Cupole nascoste dalla vista esterna. Le dimensioni di vari elementi sono state modellate con quelle misure dopo il consolidamento negli anni di fine Ottocento.

I pilastri di Imbuto Antonelliano indicati in Figura 4.83 sono stati modellati in due diversi tipi di elemento. In cui sotto l'ultima Cupola i pilastri sono stati modellati in "frame", mentre i pilastri resti sono stati modellati in "shell".

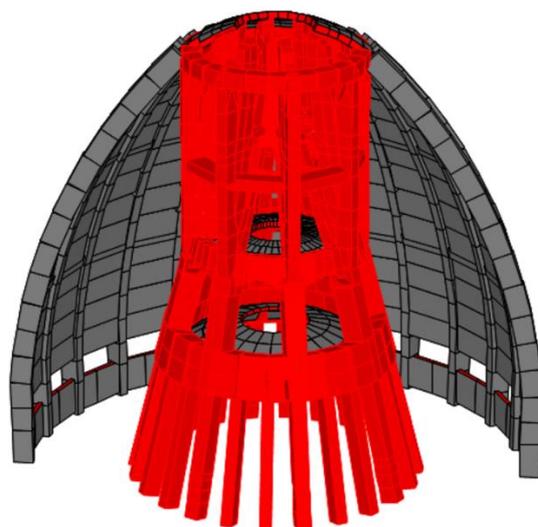


Figura 4.83 Elementi dei pilasti di Imbuto Antonelliano

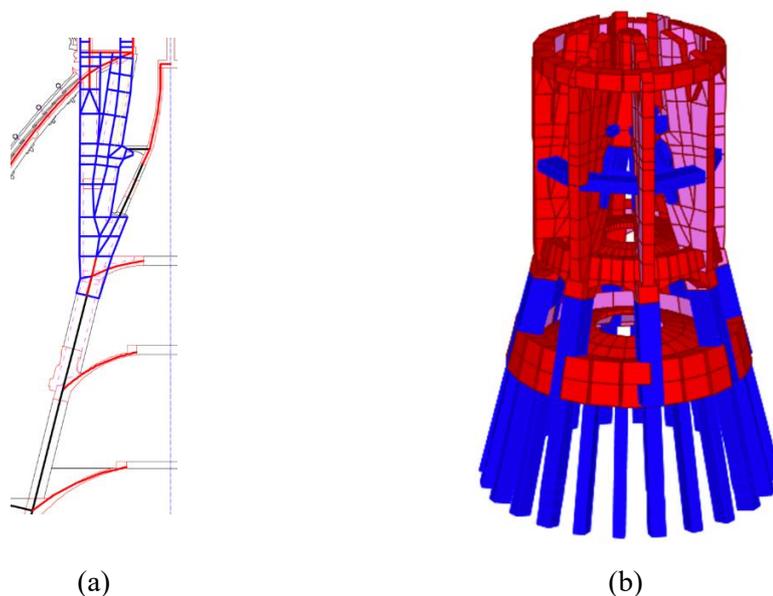


Figura 4.84 Elementi dei pilastri e delle travi di Imbuto Antonelliano: sezione (a) e f.e.m. (b)

Gli elementi pilastri modellati in “frame” sono divisi in due livelli diversi come descritti in precedente, che sono posizionati sotto l’ultima Cupola di Basilica. Le sezioni e i materiali utilizzati sono:

- 24 pilastri sotto la Quarta Cupola di Basilica modellati in materiale di muratura con una l’altezza di 3,73m:
 - 0,40m x 0,50m otto pilastri posizionati seguendo dalla stessa sezione dei pilastri di Imbuto Antonelliano nella parte di Attico
 - 0,30m x 0,50m 16 pilastri, in cui ogni due pilastri sono stati posizionati tra due pilastri con la sezione grande.

- Otto pilastri sotto la Quinta Cupola di Basilica modellati in materiale di misto CLS e muratura con una l'altezza di 3,51m. La sezione è pari a 0,56m x 0,65m.

Si nota che in questa parte il numero di pilastri è stato ridotto da 24 pilastri a otto pilastri. Al livello di collegamento questi due livelli di pilastri si presenta una trave circonferenziale per distribuire i carichi provenienti da otto pilastri a 24 pilastri.

Questa trave è stata modellata in "shell" con il materiale di misto CLS e muratura, lo spessore della trave in direzione radiale è pari a 0,65m, la larghezza in direzione circonferenziale pari a 0,80m e l'altezza pari a 1,27m. Inoltre, la trave è inclinata con 76° rispetto ad orizzonte.

Come mostrato in Figura 4.84 (a) nota che i pilastri modellati in elementi "shell" con il materiale di misto CLS e muratura sono stati dividi dalla presenza dell'ultima Cupola di Basilica. Gli spessori degli elementi "shell" sono pertanto modellati con diversi spessori, che sono:

- 0,56m gli spessori in direzione circonferenziale degli elementi sotto la Quinta Cupola di Basilica con una larghezza in direzione radiale pari a 0,65m e l'altezza inclinata pari a 0,58m.
- 0,33m gli spessori in direzione circonferenziale degli elementi sopra la Quinta Cupola di Basilica, poiché questi pilastri modellati con una forma particolare in "shell", l'altezza totale dei pilastri è di circa 5,70m e la larghezza in direzione radiale è di circa 1,20m. La suddivisione dei singoli "mesh" si presenta in Figura 4.84 (a).

Alla stessa quota di intersezione tra la Quinta Cupola di Basilica e i pilastri di Imbutto Antonelliano si presenta degli archi modellati in "shell" con il materiale di misto CLS e muratura, lo spessore in direzione radiale è pari a 0,44m, la larghezza in direzione circonferenziale pari a 1,80m e, l'altezza totale degli elementi pari a 1,21m, in cui l'altezza di arco pari a 0,53m. Questi archi sono inclinati seguendo la inclinazione dei pilastri di Imbutto Antonelliano, che è 76° rispetto ad orizzonte.

Andando pochi metri sopra si trova un cono appoggiano al dente dei pilastri di Imbutto Antonelliano. Un dettaglio di questo cono è riportato in Figura 4.80, dal rilievo si nota che nella parte inferiore presentano dei vuoti ad alleggerire la struttura. Pertanto, la modellazione di questo cono è fatta come mostra in Figura 4.85. Gli elementi del cono sono stati modellati con il materiale di muratura.

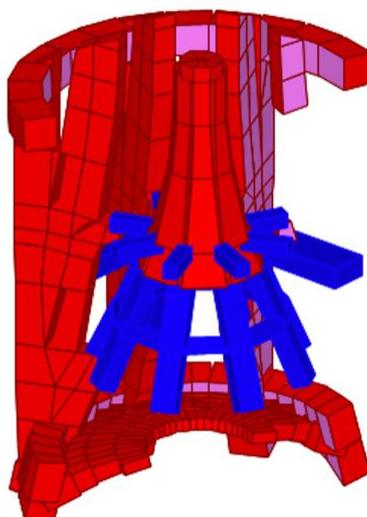


Figura 4.85 Cono posizionato sulla cima di Imbuto Antonelliano

le dimensioni degli elementi di cono procedendo verso ad alto sono:

- Sezione di 0,33m x 0,25m e l'altezza di 0,92m per i otto pilastri inclinati modellati in "frame" appoggiati sui denti inferiori degli elementi "shell" dei pilastri di Imbuto Antonelliano
- Sezione di 0,21m x 0,21m e lunghezza in direzione circonferenziale pari a 0,88m per i otto collegamenti orizzontali, modellati in "frame" che collegano gli otto pilastri appena descritti
- Sezione di 0,33m x 0,19m e l'altezza di 0,82m per i otto pilastri inclinati, modellati in "frame" posizionati sopra degli otto pilastri appena descritti
- 0,19m lo spessore in direzione radiale di involucro inferiore modellato in "shell" del cono posizionato sotto degli otto travi orizzontali, esso è stato modellato in "shell", mentre l'altezza pari a 0,82m e la larghezza in direzione circonferenziale pari 0,76m
- Sezione di 0,20m x 0,20m otto travi orizzontali, modellati in "frame" che collegano i pilastri di Imbuto Antonelliano e il cono, mentre la lunghezza in direzione circonferenziale pari a 0,68m
- 0,15m lo spessore in direzione radiale di involucro superiore modellato in "shell" del cono posizionato sopra degli otto travi orizzontali, con questo spessore di 0,15m l'involucro è stato modellato con 3 elementi "shell" in altezza degli otto setti. Per cui la larghezza in direzione circonferenziale di ogni livello è pari a 0,39m, 0,26m e 0,23m, mentre l'altezza totale insieme dei 3 elementi in altezza è pari a circa 2,56m

- 0,20m lo spessore in direzione di altezza di involucro orizzontale modellato in “shell”, mentre questo piano forma una circonferenza con il diametro di 0,61m
Dalla Figura 4.84 (b) nota che nella parte superiore si presentano otto travi orizzontali in circolazione modellati in “frame” che collegano gli otto pilastri di Imbuto Antonelliano, il materiale utilizzate è misto CLS e muratura. La sezione di queste otto travi orizzontali è pari a 0,60m x 0,30m, e la lunghezza in direzione circonferenziale pari a 1,77m.

Posto degli otto pilastri di Imbuto Antonelliano modellato in “frame” e in “shell” è stato assegnato con otto nodi di “constraints” di tipo Body” in circolazione chiamati con “77m”. Invece, nei nodi di intersezione tra gli otto pilastri e otto travi sono stati anche assegnati i “constraints” di tipo “body” chiamati con “79m”, per la stessa ragione dei nodi inferiori descritti in precedenza. I nodi assegnati i “constraints” sono indicati in Figura 4.86.

L’ultimo elemento modellato è una trave in “shell” posizionata alla cima dei pilastri di Imbuto Antonelliano. Questa trave circolare è stata modellata con il materiale di muratura, lo spessore in direzione radiale di esso è pari a 0,46m, la larghezza in direzione circonferenziale di 0,63m modellati in 24 elementi e, l’altezza pari a 0,48m.

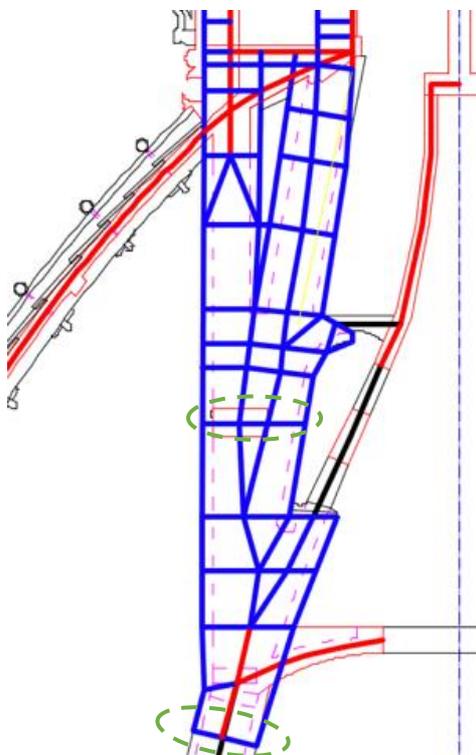


Figura 4.86 Assegnazione dei constraints dei nodi della parte di Imbuto Antonelliano

4.9.3 Quarta Cupola e Quinta Cupola di Basilica

Il sistema strutturale della Quarta Cupola (quota 74,19m – 75,32m) e della Quinta Cupola (quota 77,60m – 78.00m) indicando in Figura 4.87 è analogamente come le Cupole inferiori descritte in precedente che le due Cupole sono state modellate in “shell” con il materiale di muratura.

Ognuno Copula è presente un foro circolare al centro di diaframma:

- con il diametro pari a 2,00m per la Quarta Cupola di Basilica
- con il diametro pari a 1,60m per la Quinta Cupola di Basilica

Per l’involucro della cupola, procedendo verso il basso la descrizione, si trovano la cupola a spessore variabile, gli involucri della seconda cupola sono riportati nel software con degli spessori in crescenti pari a:

Quarta Cupola di Basilica	Quinta Cupola di Basilica
- 0,11m	- 0,17m
- 0,11m	- 0,24m
- 0,11m	- 0,30m
- 0,20m	- 0,37m

L’involucro di Quarta Cupola è stato posizionato a quota tra 74,19m e 75,32m.

L’involucro di Quinta Cupola è stato posizionato a quota tra 77,60 e 78,00m.

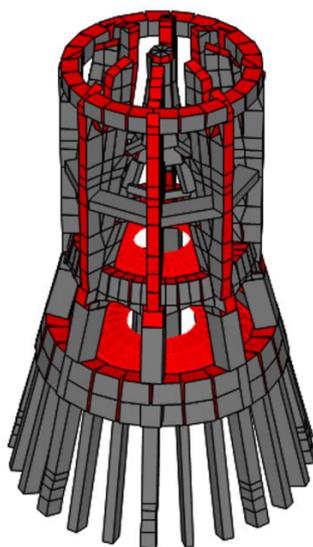


Figura 4.87 Quarta e Quinta Cupola di Basilica

4.10 Modellazione del Cupolino della Cupola di Basilica

Il sistema strutturale del Cupolino (quota di 84,10 m – 117,65 m) è l'ultima parte strutturale della Cupola San Gaudenzio. Come accennato nel capitolo 2.6, l'intera struttura poggia alla sommità di Imbuto Antonelliano. La divisione strutturale del Cupolino è identica come la Cupola principale.

I materiali impiegati nella parte di Cupolino sono utilizzati in seguenti:

- Calcestruzzo
- Granito
- Muratura

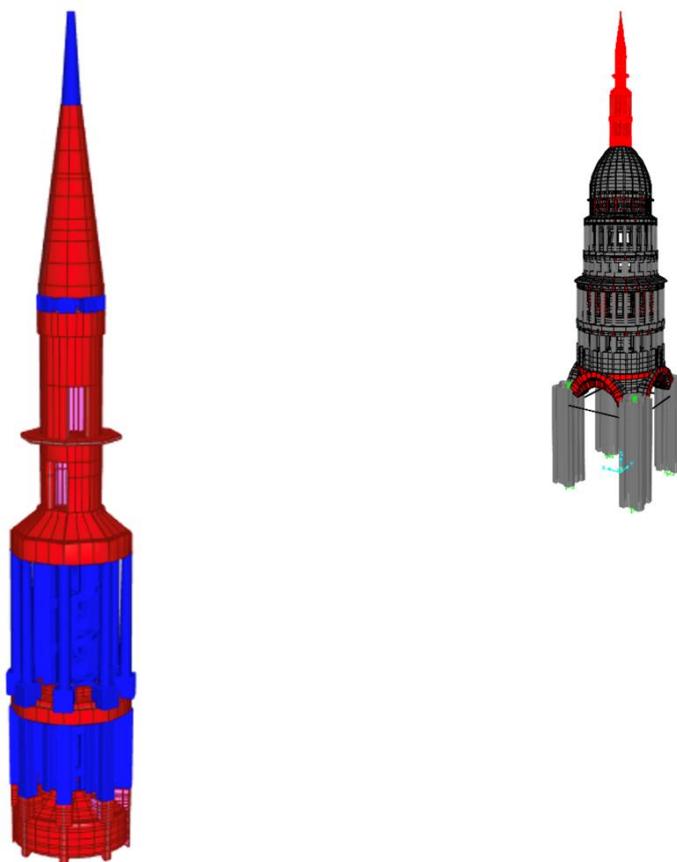


Figura 4.88 Modello Completo di Cupolino



Figura 4.89 Vista esterna di Primo Stilobate di Cupolino da Sud a quota di 84.2m



Figura 4.90 Vista esterna di Primo Peristilio di Cupolino da Sud-Est a quota di circa 94m



Figura 4.91 Vista esterna di Secondo Stilobate di Cupolino da Sud-Ovest a quota di 100m



Figura 4.92 Vista esterna di Secondo Peristilio di Cupolino da Sud-Est a quota di 101,2m

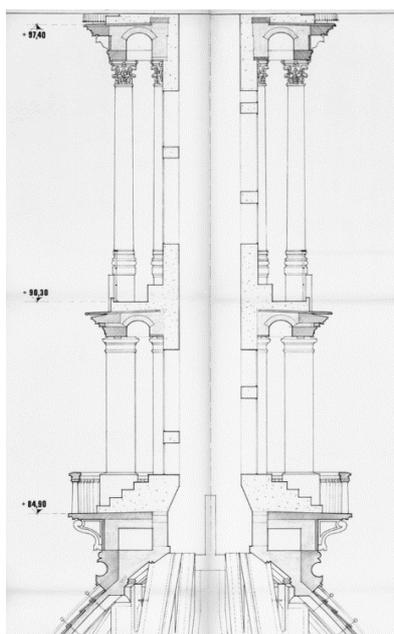


Figura 4.93 Rilievo di Cupolino parte inferiore⁸

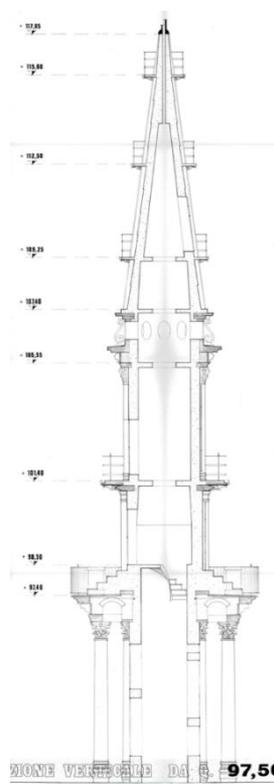


Figura 4.94 Rilievo di Cupolino parte superiore⁹

⁸ Tavola 3, Basilica di S. Gaudenzio “Intervento e conservativo esterno di cupola” Rilievo di Ing. Perazzo 1986.

⁹ Tavola 2, Basilica di S. Gaudenzio “Intervento e conservativo esterno di cupola” Rilievo di Ing. Perazzo 1986.

4.10.1 Basamento e Primo Stilobate del Cupolino

Gli elementi modellati del sistema di Basamento del Cupolino sono totalmente modellati in elementi “shell” con il materiale di muratura. La configurazione del sistema di Basamento di Cupolino è riportata in Figura 4.95.

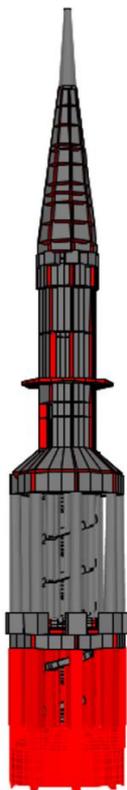


Figura 4.95 Modello di Basamento e di Primo Stilobate di Cupolino

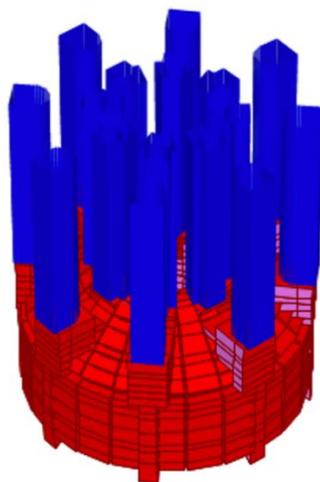


Figura 4.96 Modello di Basamento e di Primo Stilobate di Cupolino

In sistema strutturale di Basamento di Cupolino è stato modellato totalmente con gli elementi “shell” con il materiale di muratura, come mostrato in Figura 4.96. Inoltre, il modello è diviso in due parti:

- Elementi portanti radiali in “shell”
- Elementi portanti circonferenziale in “shell”

Gli elementi portanti radiali nella circonferenza sono stati modellati con otto setti seguendo dei pilastri sovrastanti.

La divisione degli elementi “shell” in direzione radiale è presentata in blu nella Figura 4.97 (a), in particolare, la divisione del singolo mesh è stato modellato seguendo da quella parete verticale interna che collega ai gradini della scala interna di Cupolino. Dalla Figura 4.97 (a) nota che nella parte superiore degli elementi “shell” è stato evidenziato tre blocchi con lo spessore della linea diverso, in ragione di diversi spessori rispetto quelli inferiori.

Pertanto,

- Il blocco esterno è quelli otto basamenti sotto dei pilastri esterni di Primo Stilobate di Cupolino. Le dimensioni di esso sono: lo spessore in direzione circonferenziale pari a 0,72m, la larghezza in direzione radiale pari a 0,75m, mentre l'altezza pari a 1,04m.
- Il blocco intermedio, le dimensioni degli elementi intermedi sono: lo spessore in direzione circonferenziale pari a 0,70m, la larghezza in direzione radiale pari a 0,45m, mentre l'altezza pari a 0,80m.
- Il blocco interno è quelli otto basamenti sotto dei pilastri interni di Primo Stilobate di Cupolino. Le dimensioni degli elementi interni sono: lo spessore in direzione circonferenziale pari a 0,68m, la larghezza in direzione radiale pari a 0,68m lato superiore e 0,35m lato inferiore, mentre l'altezza pari a 1,04m.

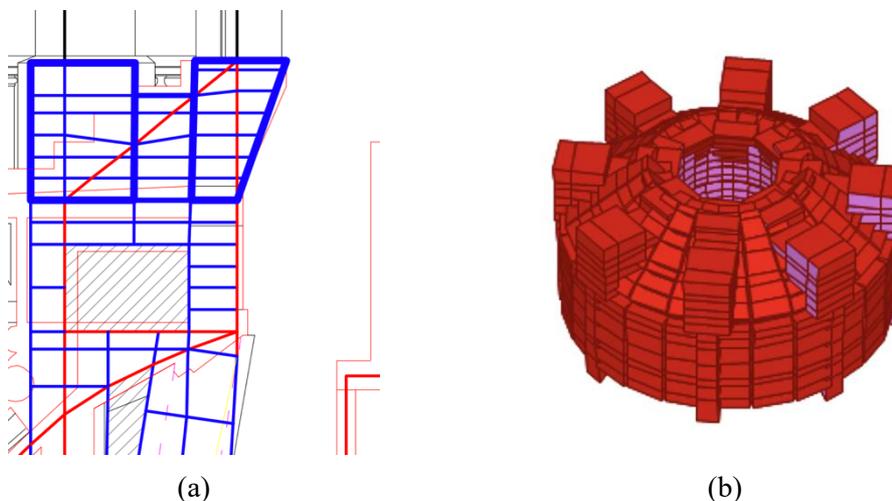


Figura 4.97 Elementi di Basamento di Cupolino: sezione (a) e f.e.m. (b)

Gli elementi “shell” sotto di quelli tre blocchi appena descritti sono stati modellati con lo spessore in direzione circonferenziale pari a 0,33m, la larghezza in direzione radiale pari a 1,55m e, l'altezza pari a circa 1,40m. In mezzo di questi elementi presenta un vuoto indicando con la campitura, la larghezza in direzione radiale pari a 0,93m e, l'altezza pari a 0,66m.

Gli elementi portanti circonferenziali disegnati in rosso nella Figura 4.97 (a), le dimensioni dei vari elementi sono:

- Piano orizzontale inferiore, lo spessore in direzione verticale pari a 0,41m, la lunghezza in direzione radiale pari a 1,29m e, la larghezza in direzione circonferenziale pari a 1,45m
- Piano orizzontale superiore, lo spessore in direzione verticale pari a 0,44m, la lunghezza in direzione radiale pari a 1,29m e, la larghezza in direzione circonferenziale pari a 1,45m
- Piano verticale esterno, lo spessore in direzione radiale pari a 0,46m, la larghezza in direzione circonferenziale pari a 2,05m e, l'altezza pari a 1,61m
- Piano verticale interni parte sotto dei basamenti interni descritti in precedente, lo spessore in direzione radiale pari a 0,40m, la larghezza in direzione circonferenziale pari a 0,86m e, l'altezza pari a 0,99m
- Piano verticale interni parte dove posizionati dei basamenti interni descritti in precedente, lo spessore in direzione radiale pari a 0,46m, la larghezza in direzione circonferenziale pari a 0,86m e, l'altezza pari a 1,04m

Posto dei due basamenti sotto di pilasti di Primo Stilobate di Cupolino è stato assegnato con otto più otto nodi di “constraints” di tipo Body” in circolazione chiamati con “86m esterno” e “86m” interno, per la stessa ragione dei nodi inferiori descritti in precedenza. I nodi assegnati i “constraints” sono indicati in Figura 4.86.



Figura 4.98 Assegnazione dei nodi "constraints" del Basamenti di Cupolino

Il Primo stilobate è formato da due giri concentrici di colonne mostrato in nero nella Figura 4.100 (a). Il giro esterno presenta analogamente otto colonne in granito di altezza pari a 3,40 m, poggiate su basamenti. La sezione delle colonne sono riportate in Figura 4.99. Inoltre, il lato piano dei pilastri è messo verso esterno.

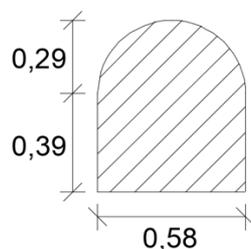


Figura 4.99 Sezione dei pilastri esterni di Primo Stilobate di Cupolino

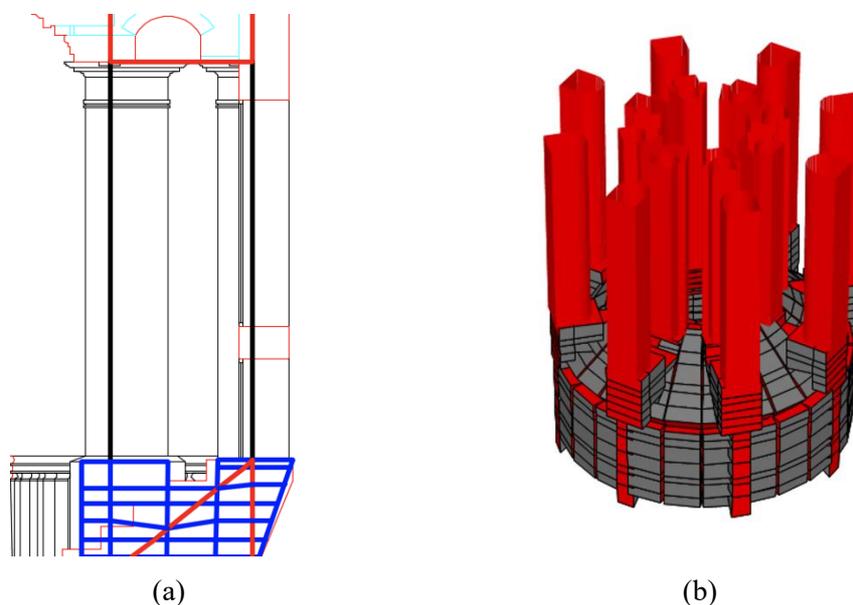


Figura 4.100 Primo Stilobate di Cupolino: sezione (a) e f.e.m. (b)

Il giro interno del primo stilobate è formato da otto colonne alte 3,60 m e aventi una sezione mista in granito e calcestruzzo, riportata in Figura 4.101. In particolare, alla parte più esterna in granito si aggiunge un rinforzo in calcestruzzo più interno. Inoltre, il lato piano dei pilastri è messo verso esterno.

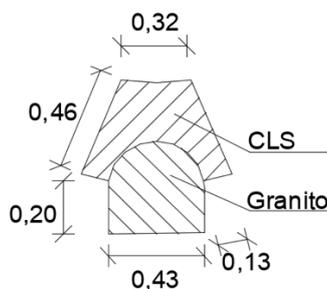


Figura 4.101 Sezione di pilastri interni di Primo Stilobate di Cupolino

4.10.2 Primo Peristilio del Cupolino

Come accennato in precedenza, questa parte della struttura (89,94m – 96,92m) è formata da due giri concentrici di colonne: quello esterno che realizzato con otto colonne granitiche, e quello interno, formato da otto pilastri fatti in misto di granito e di calcestruzzo.

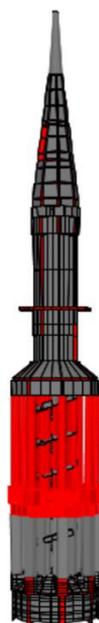


Figura 4.102 Modello di Primo Peristilio di Cupolino

Il giro di otto colonne esterno presenta una sezione variabile da diametro di 0,56 m della base fino a diametro di 0,45 m sulla sommità, per un'altezza di 5,40 m. I basamenti del giro esterno di colonne hanno una sezione quadrata 0,80m x 0,80m con l'altezza di 0,95m. Le otto colonne del giro interno sono alte 5,62 m e presentano una sezione particolare, formata da una parte circolare più esterna in granito, di diametro pari a 0,38m, e un rinforzo interno in calcestruzzo, le cui dimensioni sono riportate in cm in Figura 4.103. In Figura 4.104 (a) sono indicati gli elementi "frame" in nero.

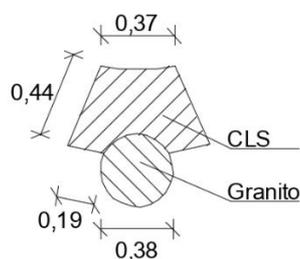


Figura 4.103 Sezione delle colonne interne di Primo Peristilio di Cupolino

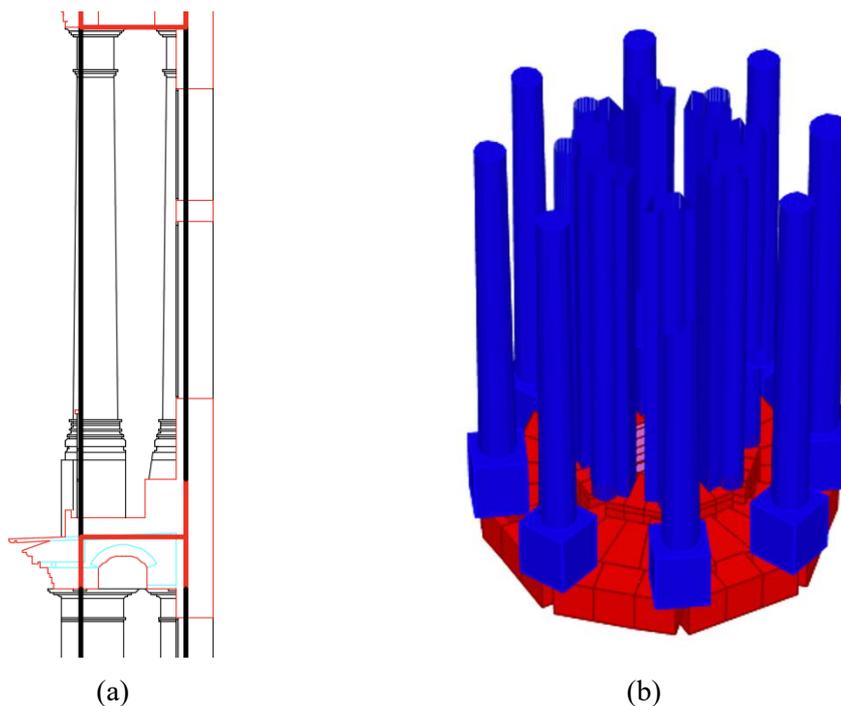


Figura 4.104 Elementi strutturali di Primo Peristilio di Cupolino: sezione (a) e f.e.m. (b)

I due giri di colonne sono posizionati sugli archi sottostanti che collegano il Primo Peristilio del Cupolino al Primo Stilobate del Cupolino. Gli elementi archi sono stato semplificati con un piano orizzontale modellato con elementi “shell” orizzontali in granito, con lo spessore in direzione verticale di 0,46m, la larghezza in direzione circonferenziale pari a 1,85m a lato esterno e 0,86m a lato interno e, la lunghezza in direzione radiale pari a 1,29m. Le pareti verticali interni sono modellate con “shell” in granito di spessore in direzione radiale pari a 0,80 m, la larghezza in direzione circonferenziale pari a 0,86m e, l’altezza pari a 1,36m. Le pareti sottostanti ai basamenti sono modellate con elementi “shell” in granito, con lo spessore in direzione radiale di 0,58m, con la larghezza in direzione circonferenziale di 1,85m. In Figura 4.104 (a) sono indicati gli elementi “shell” in rosso.

4.10.3 Secondo Stilobate di Cupolino

Nella parte di Secondo Stilobate di Cupolino (96,92m – 101,72m) presente un’apertura a lato Nord del Cupolino quota di 98,50m con l’altezza di 2,13m e la larghezza in direzione circonferenziale di 0,86m. A questo livello dà accesso alla scalinata che porta all’area esterna. Inoltre, da questo livello la struttura stringe di nuovo a solo un ordine di giro.

In tutta la parte di Secondo Stilobate di Cupolino è stato modellato con gli elementi “shell” in granito. Ad ogni elemento descritto in successivo sarà modellato in otto setti per intera circonferenza.

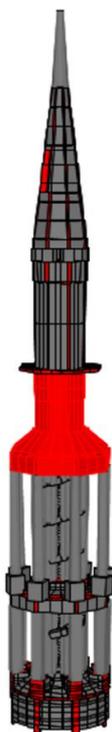


Figura 4.105 Modello di Secondo Stilobate di Cupolino

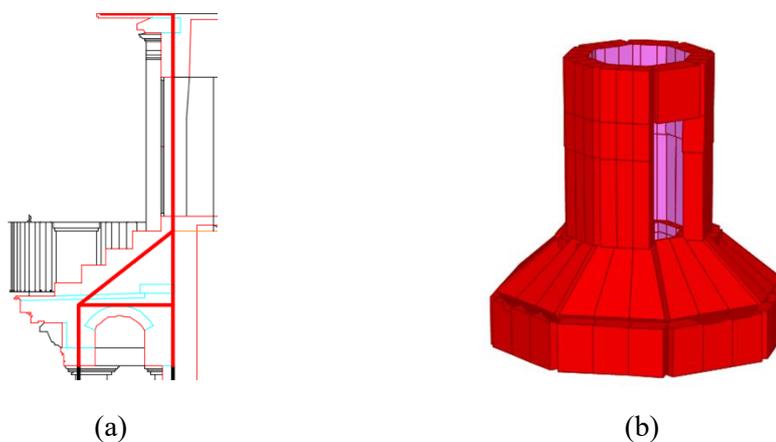


Figura 4.106 Secondo Stilobate di Cupolino: sezione (a) e f.e.m. (b)

Come mostrato in Figura 4.106 (a) la parte inferiore del Secondo Stilobate presenta una scalinata che è semplificata con un piano inclinato modellato con “shell” in granito, lo spessore in direzione radiale pari a 0,35m, la larghezza in direzione circonferenziale pari a 0,86m lato superiore e 1,85m lato inferiore, mentre la lunghezza inclinata pari a 1,66m con l’inclinazione 39° . Le pareti sottostanti al piano inclinato esterno sono state modellate con “shell” in granito con lo spessore in direzione radiale pari a 0,44m, la larghezza in direzione circonferenziale pari a 1,85m e, l’altezza pari a 0,83m. Le pareti sottostanti al piano inclinato interno sono state modellate con “shell” in granito con lo spessore in direzione

radiale pari a 0,72m, la larghezza in direzione circonferenziale pari a 0,86m e, l'altezza pari a 1,87m.

Tra le due pareti verticali presentano degli archi, che sono stati semplificati con piano orizzontale modellato con "shell" in granito, lo spessore in direzione verticale pari a 0,38m, la larghezza in direzione circonferenziale pari a 0,86m lato interno e 1,85m lato esterno e, la lunghezza in direzione radiale pari a 1,29m.

Le pareti dell'involucro di Secondo Stilobate analogamente sono state modellate con "shell" in granito. Partendo da baso, le pareti di Secondo Stilobate di Cupolino sono stati modellati con due diversi spessori in direzione radiale che sono: 0,35m la parte inferiore con l'altezza di 1,51m; 0,38m la parte superiore con l'altezza di 1,51m.

4.10.4 Scala interna del Cupolino

La scala interna del cupolino occupa la zona centrale, campita, di Figura 4.108. Parte da quota 81,48m e si estende verso l'alto fino a quota 99,00 m, formando una tipica struttura a "chiocciola. La scala presenta 12 gradini per ogni giro completo della "chiocciola". La scala si è modellata con elementi "frame" con diverse sezioni, e funzioni, come illustrato in Figura 4.109. Nello specifico: fascia esterna in viola, link in bianco, gradino in rosso e nucleo in verde.

I materiali impiegati per questi elementi sono: la fascia esterna in calcestruzzo, i gradini in muratura, il nucleo in muratura, mentre i link sono elementi fittizi, privi di peso, di collegamento tra le fasce esterne e i nuclei. Hanno la funzione di ricreare la rigidezza in direzione orizzontale della scala. Le sezioni di vari elementi sono: fasce esterni 0,45m x 0,30m con una lunghezza inclinata in direzione circonferenziale di singolo tratto 0,60m, gradini 0,70m x 0,15m posizionati con una forma elisse orientato in circonferenziale con una lunghezza inclinata in direzione circonferenziale di 0,29m, link orientati in radiale 0,70m x 0,15m con una lunghezza in direzione radiale di 1,05m e nucleo diametro di 0,20m con l'altezza totale di nucleo pari a 14,85m.



Figura 4.107 Modello della Scala interna di Cupolino

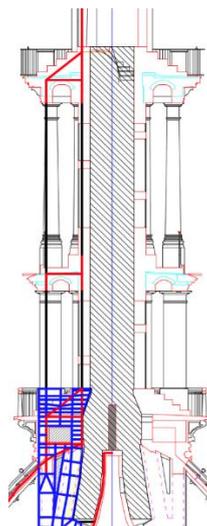
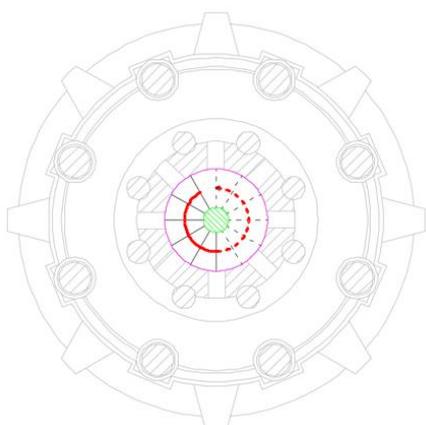
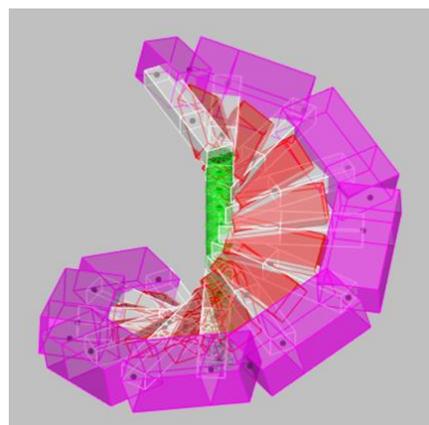


Figura 4.108 Posizione della scala interna del Cupolino



(a)



(b)

Figura 4.109 Scala interna del Cupolino: sezione orizzontale quota di 94,00m (a) e f.e.m. (b)

I gradini della Scala interna del Cupolino sono stati modellati collegando con le diverse parti della struttura di Cupolino, che sono in seguente:

- Lato interno i gradini sono stati collegati al “frame” di nucleo
- Lato esterni i gradini sono stati collegati con diverse parti strutturali, che sono:
 - Le pareti interni del Basamento e del Primo Stilobate del Cupolino
 - Le pareti interni del Primo Peristilio del Cupolino
 - Le colonne del giro interno di Primo Stilobate e di Primo Peristilio del Cupolino
 - Le pareti interni del Secondo Stilobate del Cupolino

Gli elementi “shell” delle varie pareti accennate in precedente sono suddivisi in 24 elementi in orizzontale e di tanti livelli quanti sono i gradini incrociati in verticale, come mostrato in Figura 4.110. Tale suddivisione permette di collegare in maniera regolare la Scala alla struttura del Cupolino. Il numero 24 serve per avere corrispondenza a livello del basamento dell'intero cupolino, zona in cui avviene il collegamento tra Cupolino e la porzione di struttura sottostante della Cupola. Questo perché la Gran Tazza, che termina in corrispondenza del basamento del cupolino, è divisa in 24 porzioni, delineate da altrettanti costoloni. Le porzioni del Primo Peristilio e del Secondo Stilobate di Cupolino abbiano una forma di un ottagono. Ogni lato dell'ottagono è suddiviso orizzontalmente in 3 porzioni uguali come mostrato in Figura 4.110.

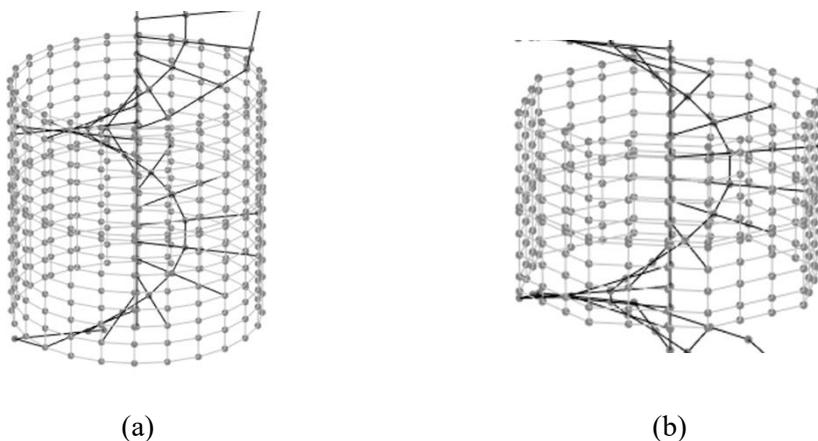


Figura 4.110 Intersecazione dei gradini: Primo Stilobate (a) e Primo Peristilio (b) di Cupolino

Il collegamento tra la scala e la struttura del Cupolino e muratura si presenta come in Figura 4.110. Avendo la scala 12 gradini per un giro completo ed essendo la struttura suddivisa orizzontalmente in 24 elementi, il collegamento, per ogni gradino, avviene orizzontalmente ogni due elementi “shell”.

4.10.5 Secondo Peristilio di Cupolino

Le pareti del Secondo Peristilio di Cupolino (mostrato in Figura 4.112) sono state rappresentate con elementi “shell” in granito di spessore pari a 0,34m in direzione radiale, la larghezza in direzione circonferenziale pari a 0,86m e, l'altezza pari a 4,11m. Analogamente come il Secondo Stilobate di Cupolino, le pareti presenta un'apertura che dà accesso all'area esterna. L'apertura è stata modellata con 0,86m la larghezza in direzione circonferenziale e, 2,16m l'altezza.

L'apertura è posizionata a lato Nord della struttura.

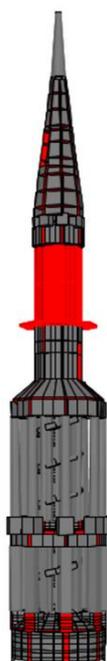


Figura 4.111 Modello di Secondo Peristilio di Cupolino

Alla base del secondo peristilio è presente un diaframma interno con un'apertura circolare avente diametro di 0,73 m, ed un balcone esterno, al quale si accede attraverso l'apertura ricavata negli elementi "shell" del secondo peristilio. Sia il diaframma che il balcone sono rappresentati con elementi "shell" in granito di spessore in direzione verticale pari rispettivamente a 0,17m e 0,14m, la larghezza in direzione circonferenziale pari rispettivamente a 0,57m e 1,24m, mentre la lunghezza in direzione circonferenziale pari rispettivamente a 0,71m e 0,92m. Inoltre, il materiale impiegato per il balcone è di granito, mentre per il diaframma è di calcestruzzo.

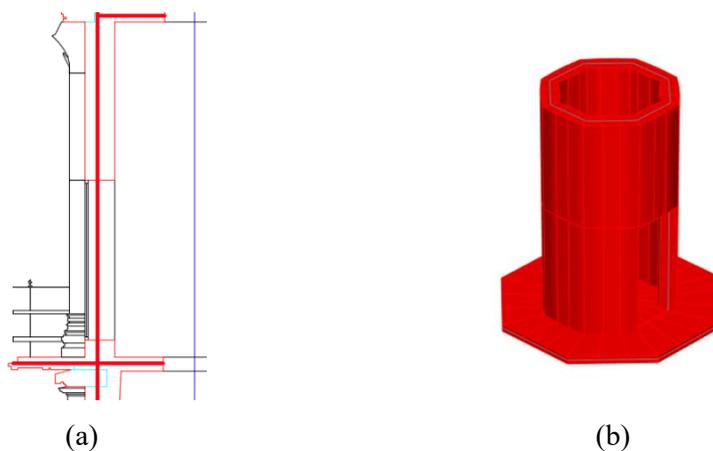


Figura 4.112 Secondo Peristilio del Cupolino: sezione (a) e f.e.m (b)

4.10.6 Attico del Cupolino

Le pareti circolari sono rappresentate con elementi “shell” in granito, indicati in rosso nella Figura 4.114 (a), aventi spessore in direzione radiale di 0,45 m e 0,55 m rispettivamente per la porzione superiore e inferiore rispetto alle finestre. La larghezza delle otto pareti in direzione circonferenziale è pari a 0,86m e, l’altezza pari a 0,44m porzione superiore e 0,92m porzione inferiore.

Nell’attico del cupolino sono presenti otto finestre tonde. Per rappresentarle in modo semplificato, sono state utilizzati degli elementi “frame” in granito, disegnati in nero in Figura 4.114 (a), in modo tale che i fori di sezione quadrata che si vengono a creare abbiano area equivalente ai fori tondi delle finestre. La sezione degli elementi “frame” è pari a 0,58m x 0,45m con l’altezza di 0,56m.

Il diaframma di piano, con spessore in direzione verticale di 0,18m la larghezza in direzione circonferenziale è pari a 0,26m lato interno e 0,86m lato esterno, presenta un foro circolare di diametro pari a 0.68 m ed è stato rappresentato con elementi “shell” in calcestruzzo.

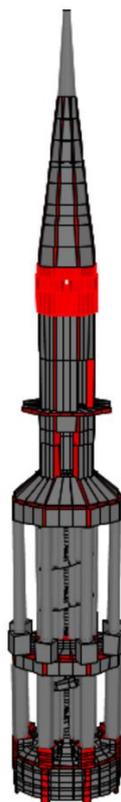


Figura 4.113 Modello Attico di Cupolino

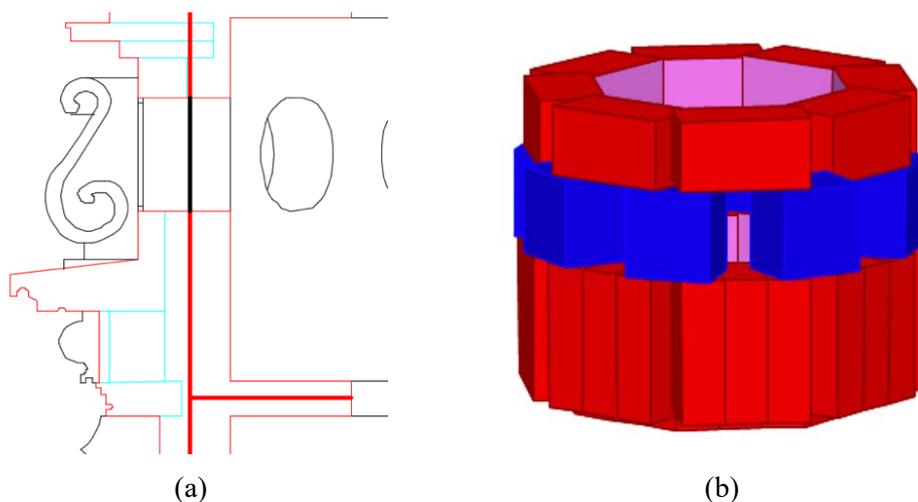


Figura 4.114 Attico del Cupolino: sezione (a) e f.e.m. (b)

4.10.7 Modellazione della Cuspide di Cupolino

Come mostrato in rosso nella Figura 4.116 (a) alla quota di 107,40 m è presente un diaframma modellato con elementi “shell” in calcestruzzo, avente spessore in direzione verticale di 0,13m, la larghezza in direzione circonferenziale pari a 0,26m lato interno e 0,86m lato esterno e, la lunghezza in direzione radiale pari a 0,78m. È presente un foro circolare al centro del diaframma di diametro pari a 0,68 m. Anche in questo caso sono stati utilizzati elementi “shell”.

Procedendo verso l’alto nella descrizione, si trovano le pareti inclinate a sezione variabile (quota 107,40m – 114,05m). Le pareti sono riportate nel SAP2000 con gli elementi “shell” di spessore in direzione radiale via via crescente, pari a:

- | | | |
|---------|--|---------|
| - 0,39m | | - 0,29m |
| - 0,36m | | - 0,26m |
| - 0,34m | | - 0,24m |
| - 0,31m | | - 0,21m |

In particolare, a quota tra 109,90m e 117,77m si trova una finestra messo in Sud-Est della struttura, che è semplificata con il vuoto. La larghezza in direzione circonferenziale pari a 0,66m lato inferiore e 0,48m lato superiore.



Figura 4.115 Modello di Cuspide di Cupolino

Nella parte terminale, la guglia, si presenta come una porzione quasi solida con un volume conico forato (quota 107,79m – 117,75m). Quindi è stato modellato come un elemento verticale a sezione variabile, mantenendo il foro (con diametro di 0,10m) al centro del cono. Le sezioni superiore e inferiore sono di diametro rispettivamente pari a 0,30m e 0,78m, l'altezza pari a 3,21m. In SAP2000 è stata assegnata all'elemento "frame" in calcestruzzo una sezione variabile attraverso il comando "nonprismatic". L'elemento "frame" è rappresentato in nero nella Figura 4.116 (a). A posto di intersezione tra gli elementi "shell" e elemento "frame" è stato assegnato "constraints" di tipo "body" chiamato "link rigidi 117m". Tale nodo di "constraints" è indicato in Figura 4.117 (a).

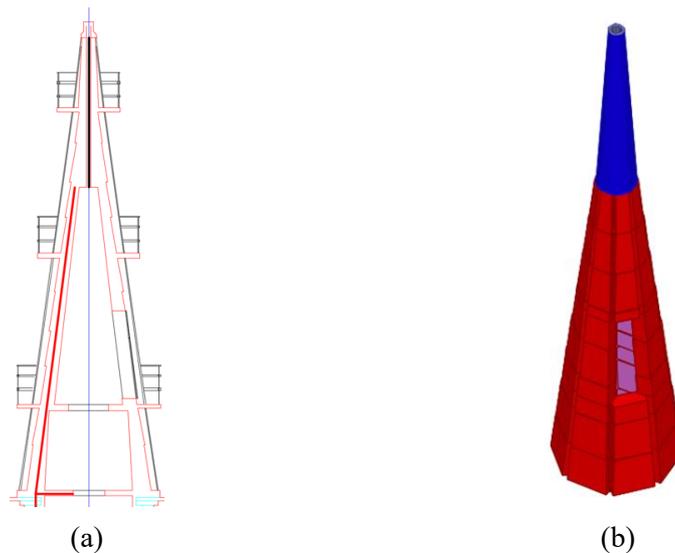


Figura 4.116 Cuspide di Cupolino: sezione (a) e f.e.m. (b)

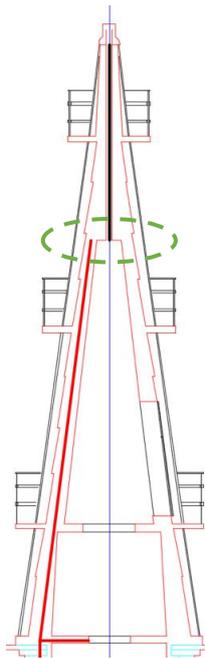


Figura 4.117 Assegnazione di "constraints" alla parte superiore do Cuspide di Cupolino

Capitolo 5. Sollecitazioni sotto ai carichi di peso strutturale

5.1 Introduzione

In questo capitolo verrà riportato tutte le sollecitazioni dovute ai carichi di peso proprio della struttura, confrontando con le sollecitazioni dovute ai carichi di peso proprio della struttura con i cedimenti assegnati sulle basi dei pilastri.

L'unità di misura delle varie sollecitazioni è:

- Lo sforzo assiale [kN]
- Il momento flettente 2-2 [kNm]
- La Tensione superficiale [Mpa] e/o [N/mm²]

Per lo sforzo assiale e il momento flettente verrà presentato con il diagramma per tutti gli elementi "frame". Mentre per le varie tensioni sono riferite agli elementi "shell".

Si nota che per giro completo è stato modellato con 24 o 8 setti del sistema di pilastri, intera struttura mantenga una buona simmetria, pertanto, in seguito si è riportato i diagrammi per gli elementi "frame" uno dei 24 o 8 setti.

Le configurazioni degli elementi "shell" sono state modellate in tre diversi sistemi dell'asse locale. In specifico, i tre sistemi dell'asse locale sono:

- Elementi "shell" dei pilastri in verticali, mostrato in Figura 5.1:
 - Asse principale "Asse 1" (rosso) orientato in direzione radiale associando al centro della Cupola;
 - Asse secondario "Asse 2" (verde) orientato in direzione verticale verso in alto;
 - Asse normale "Asse 3" (blu) orientato in direzione ortogonale degli elementi verso antiorario;
- Elementi "shell" circolari in direzione orizzontale mostrato, in Figura 5.2:
 - Asse principale "Asse 1" (rosso) orientato in direzione circolare in verso antiorario;
 - Asse secondario "Asse 2" (verde) orientato in direzione radiale associando al centro della Cupola;
 - Asse normale "Asse 3" (blu) orientato in direzione ortogonale degli elementi verso in alto;
- Elementi "shell" di Cupole e di circolari in direzione inclinata, mostrato in Figura 5.8:

- Asse principale “Asse 1” (rosso) orientato in direzione circonferenziale in verso antiorario;
 - Asse secondario “Asse 2” (verde) orientato in direzione tangenziale sul piano radiale associando al centro della Cupola;
 - Asse normale “Asse 3” (blu) orientato in direzione ortogonale degli elementi verso esterno (per gli elementi di Cupola) e in alto (per elementi circonferenziali inclinati);
- Elementi “shell” di circonferenziali in verticali mostrato in Figura 5.4:
- Asse principale “Asse 1” (rosso) orientato in direzione circonferenziale in verso antiorario;
 - Asse secondario “Asse 2” (verde) orientato in direzione verticale verso in alto;
 - Asse normale “Asse 3” (blu) in direzione ortogonale degli elementi verso esterno.

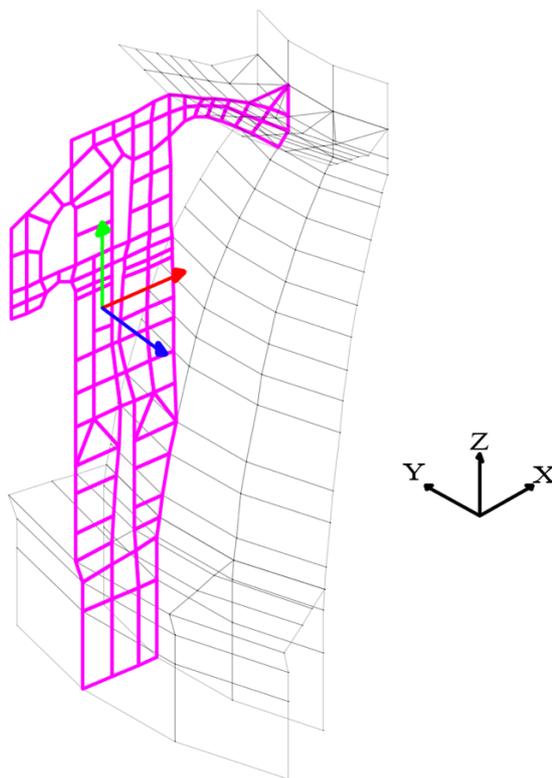


Figura 5.1 Assi locali per gli elementi "shell" dei pilastri

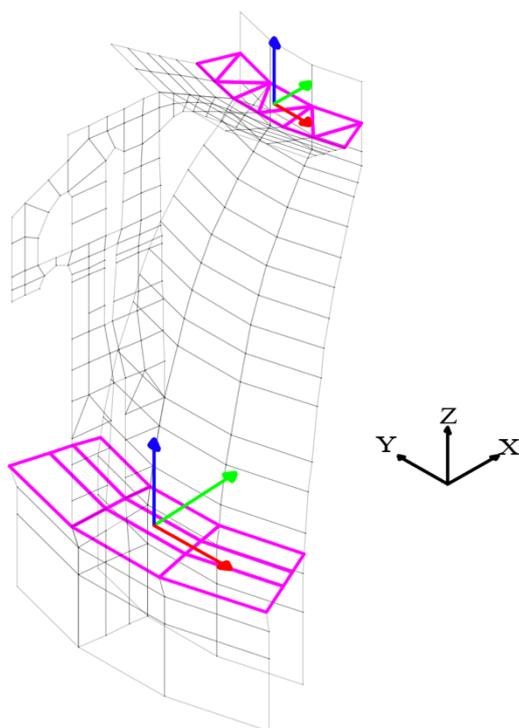


Figura 5.2 Assi locali elementi "shell" circolarziali in direzione orizzontale

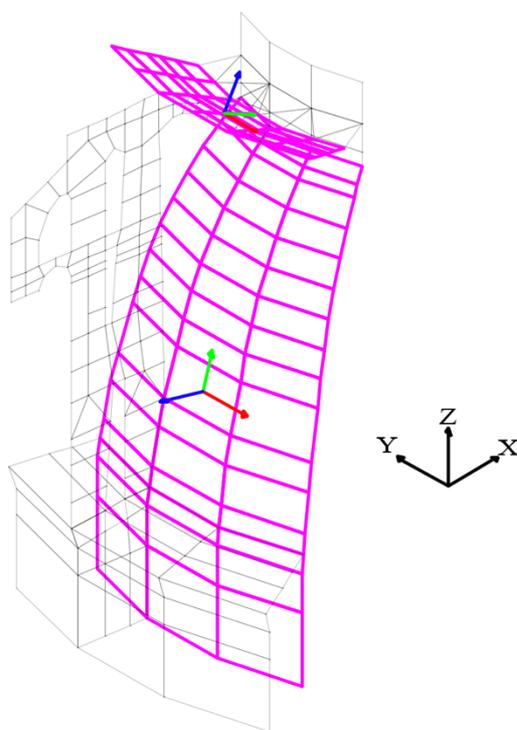


Figura 5.3 Assi locali elementi "shell" di Cupole e di circolarziali in direzione inclinata

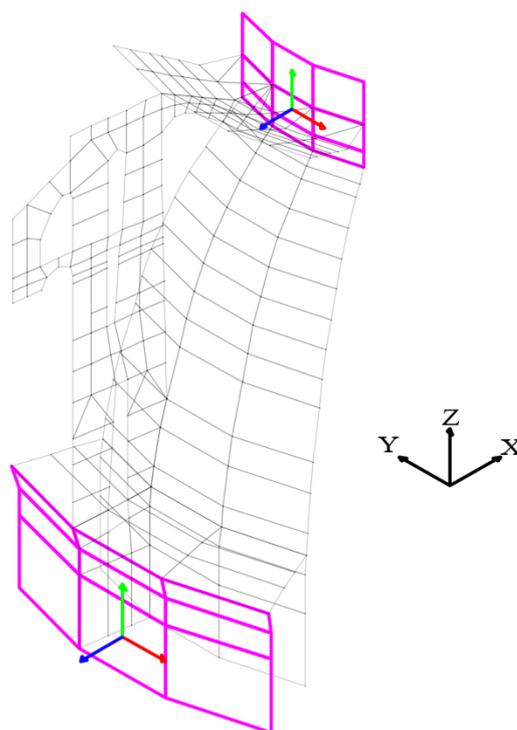


Figura 5.4 Assi locali elementi “shell” di circonferenziali in verticali

Nota che su tutte le figure sovrastanti di assi locali si è presentato anche l’asse globale del modello disegnato in nero.

Come accennato nel paragrafo 3.2, in dicembre 1882 [...] È presente un fuori piombo della Cupola all’altezza di 107m pari a 21cm in direzione Est-Sud-Est [...]. Pertanto, il modello completo della Cupola di San Gaudenzio è anche stato simulato tale meccanismo, applicando con dei cedimenti sulle basi dei pilastroni. Visto lo spostamento a quota di 107m è ricavato in direzione Est-Sud-Est ($112,5^\circ$ rispetto al Nord), i cedimenti verranno applicati sui pilastroni di Sud-Est e Nord-Est. Attraverso con il metodo interattivo i cedimenti stimati sulle basi dei pilastroni sono:

Tabella 5.1 Cedimenti stimati sui pilastroni della Basilica

Cedimenti stimati sui pilastroni della Basilica	
Pilastrone Sud-Est	5,5cm
Pilastrone Nord-Est	2,3cm
Pilastrone Sud-Ovest	0
Pilastrone Nord-Ovest	0

Avendo applicato i cedimenti sui pilastri lo spostamento a quota di 107,80m della Cupola di San Gaudenzio è riportato in Figura 5.5.

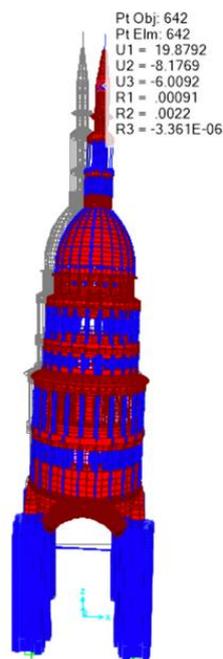


Figura 5.5 Spostamento a quota di 107m della Cupola di San Gaudenzio

Dove la direzione Est è indicata con U1, e la direzione Nord è indicata con U2. Pertanto, lo spostamento dovuto i cedimenti applicati sui pilastri è 21,5cm con 112,36° rispetto al Nord.

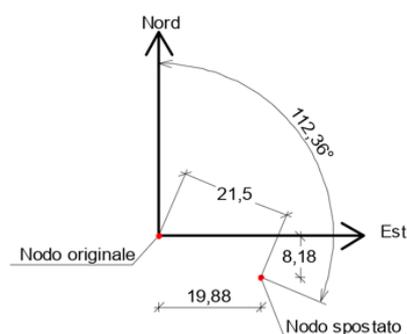


Figura 5.6 Spostamento del punto di centro del diaframma a quota 107,80m di Cupola

Inoltre, avendo applicato i cedimenti descritti in precedenza, le sollecitazioni sugli elementi strutturali verranno essere diversi tra la condizione di senza cedimenti e con cedimenti. Pertanto, è essenziale ricavare la differenza delle sollecitazioni (soprattutto gli sforzi normali) sotto le due condizioni.

Come mostrato in Figura 5.7, è stato numerato dei pilastri, i quali stano sotto del Cupolino.

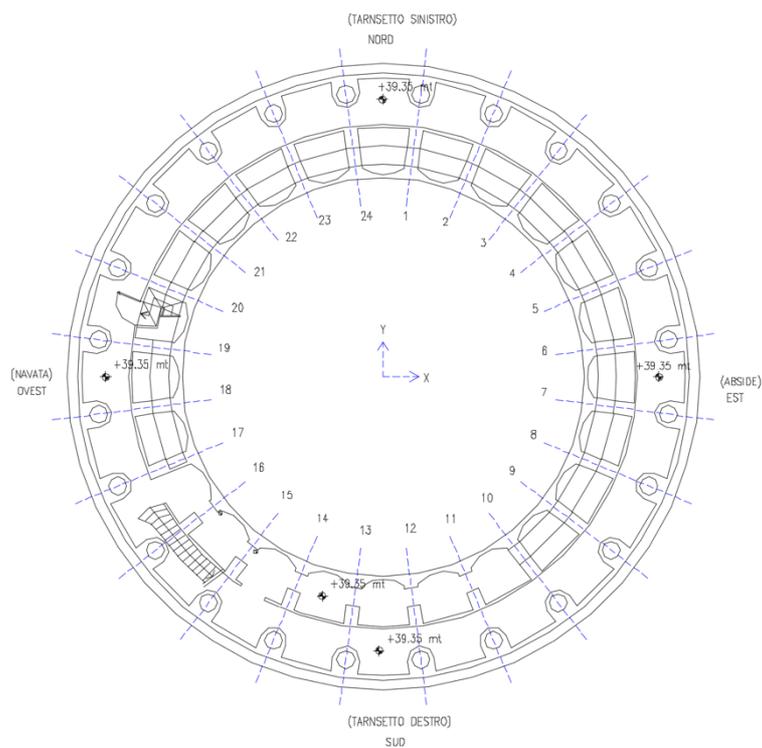


Figura 5.7 Numerazione dei pilastri della Cupola di Basilica

Nei successivi paragrafi verranno riportati i diagrammi di sollecitazioni sugli elementi “frame” e le tensioni sugli elementi “shell” sotto la condizione di carichi di peso proprio della struttura senza cedimenti applicati sulla base dei pilastri e di carichi di peso proprio della struttura con i cedimenti applicati sulla base dei pilastri.

Inoltre, verranno riportati il rapporto di differenza degli sforzi normali sugli elementi “frame” sotto due condizioni.

5.2 Pilastrini sotto la Cupola della Basilica

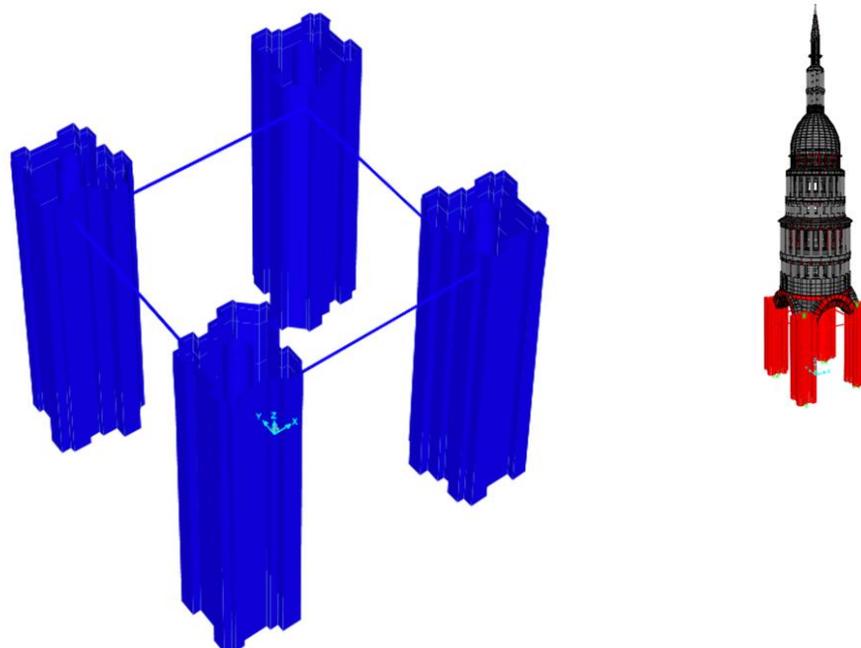


Figura 5.8 Pilastrini sotto della Cupola di Basilica

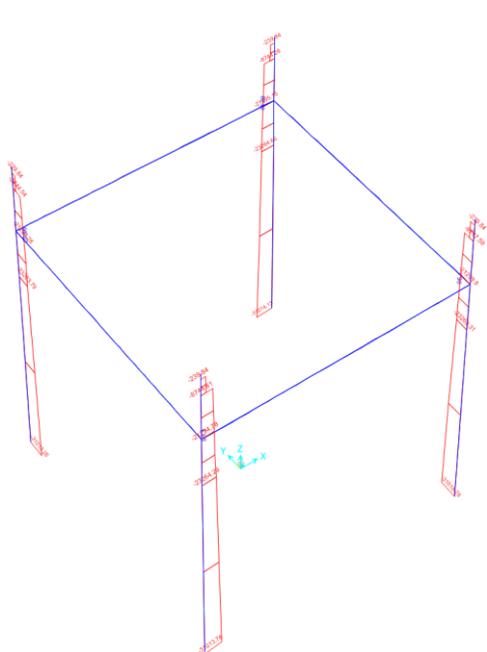


Figura 5.9 Sforzo assiale dei pilastroni sotto la Cupola di Basilica senza cedimenti

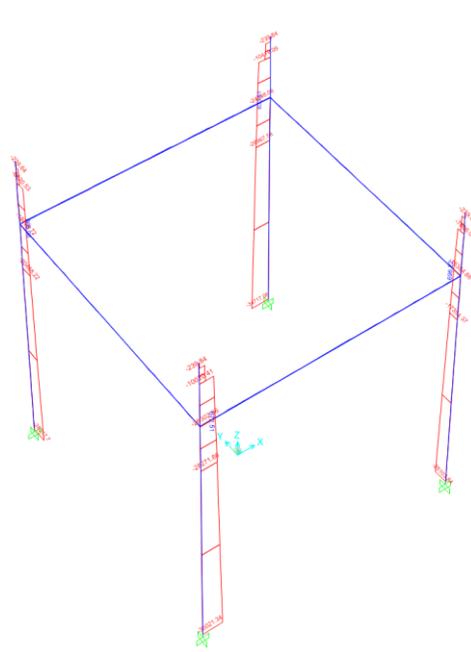


Figura 5.10 Sforzo assiale dei pilastroni sotto la Cupola di Basilica con cedimenti

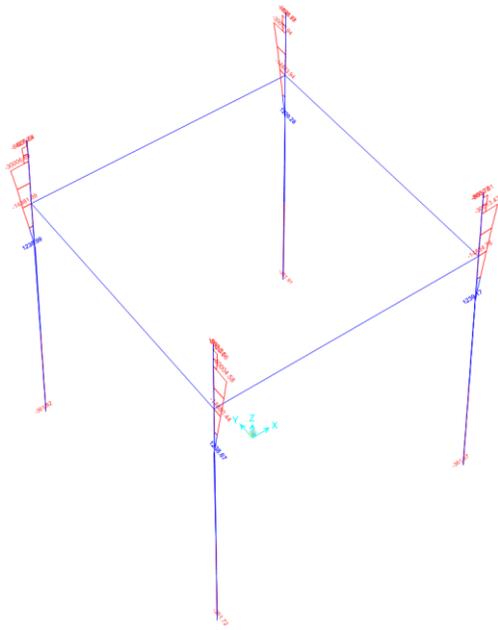


Figura 5.11 Momento flettente 2-2 in direzione antiorario senza cedimenti

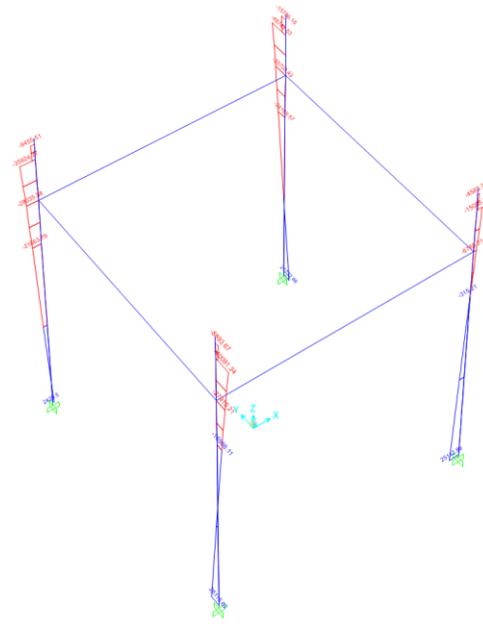


Figura 5.12 Momento flettente 2-2 in direzione antiorario con cedimenti

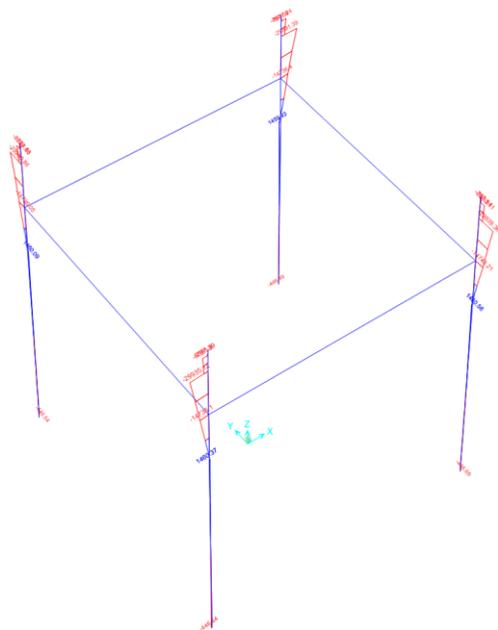


Figura 5.13 Momento flettente 3-3 in direzione orario senza cedimenti

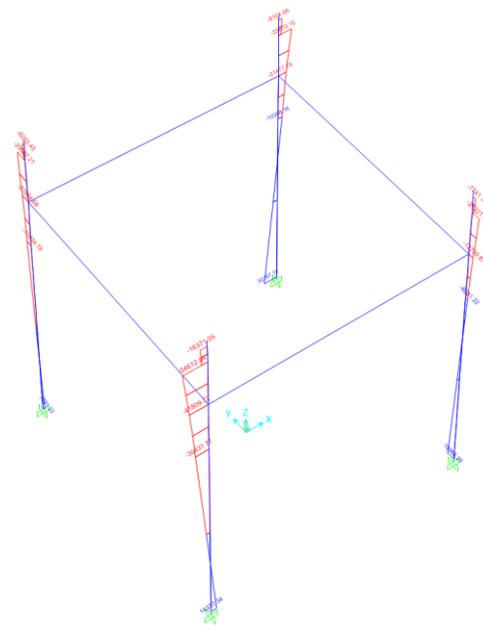


Figura 5.14 Momento flettente 3-3 in direzione orario con cedimenti

Tabella 5.2 Sforzi assiali dei pilastri ed il rapporto tra due condizioni

	Sforzo Assiale nodo basso dei pilastri [kN]		
	Senza cedimenti	Con cedimenti	Rapporto
Nord- Est	-31014.13	-34717.06	112%
Sud-Est	-31018.78	-25103.85	81%
Sud-Ovest	-31013.76	-36021.34	116%
Nord-Ovest	-31013.26	-28217.70	91%

5.3 Arconi sotto la Cupola di Basilica

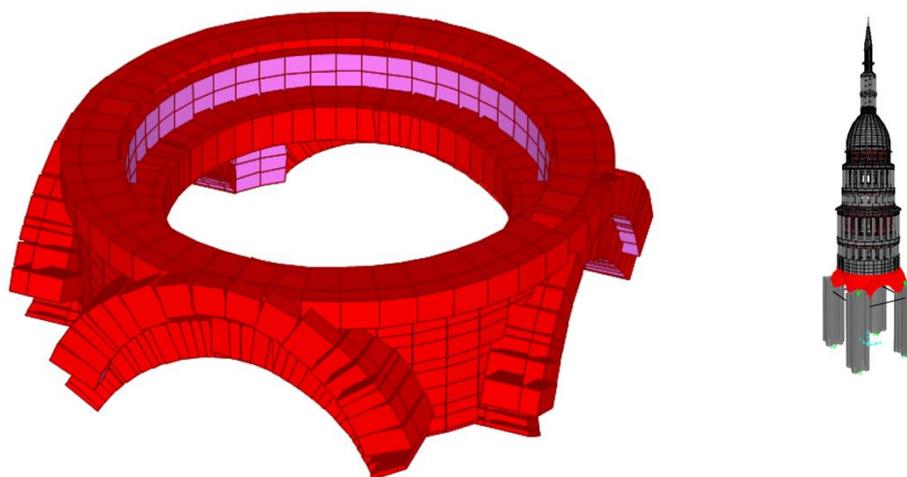


Figura 5.15 Arconi sotto il Basamento della Cupola

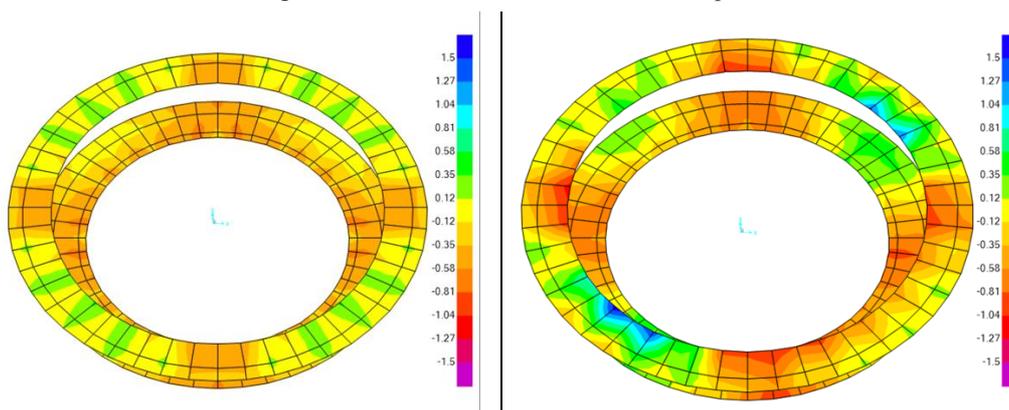


Figura 5.16 Tensione S1-1 Top Face di Anelli orizzontali in direzione circonferenziale senza cedimenti

Figura 5.17 Tensione S1-1 Top Face di Anelli orizzontali in direzione circonferenziale con cedimenti

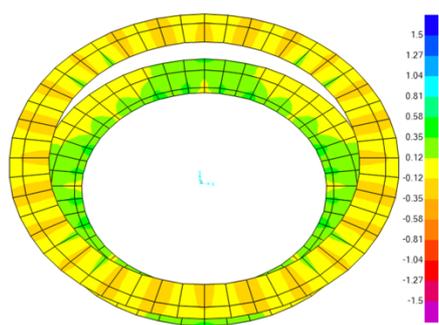


Figura 5.18 Tensioni S1-1 Bottom Face di Anelli orizzontali in direzione circonferenziale senza cedimenti

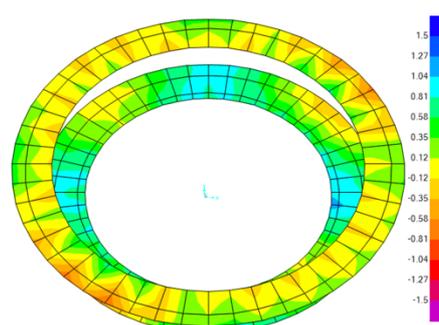


Figura 5.19 Tensioni S1-1 Bottom Face di Anelli orizzontali in direzione circonferenziale con cedimenti

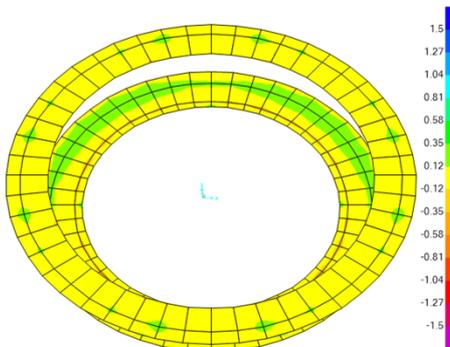


Figura 5.20 Tensioni S2-2 Top Face di Anelli orizzontali in direzione radiale senza cedimenti

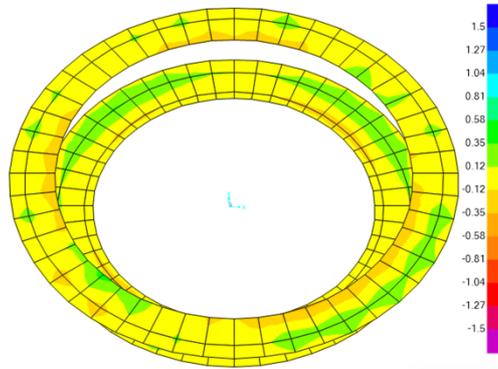


Figura 5.21 Tensioni S2-2 Top Face di Anelli orizzontali in direzione radiale con cedimenti

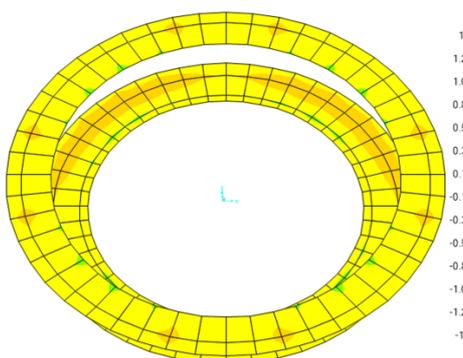


Figura 5.22 Tensioni S2-2 Bottom Face di Anelli orizzontali in direzione radiale senza cedimenti

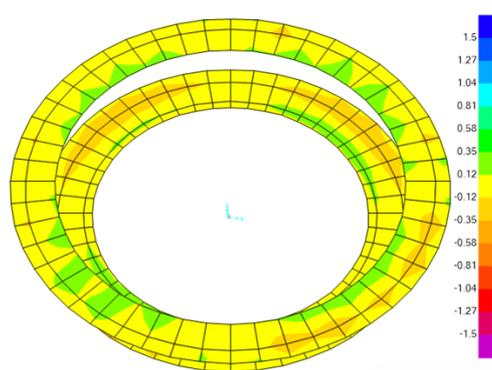


Figura 5.23 Tensioni S2-2 Bottom Face di Anelli orizzontali in direzione radiale con cedimenti

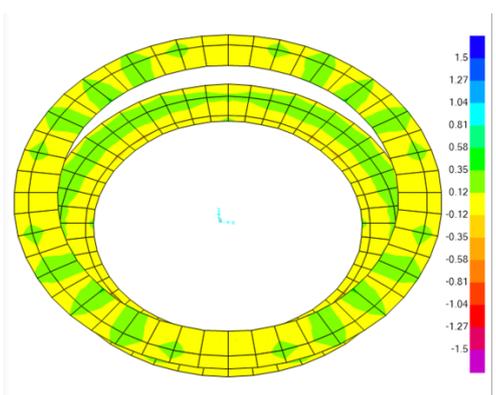


Figura 5.24 Tensione S-Max Top Face Anelli orizzontali senza cedimenti

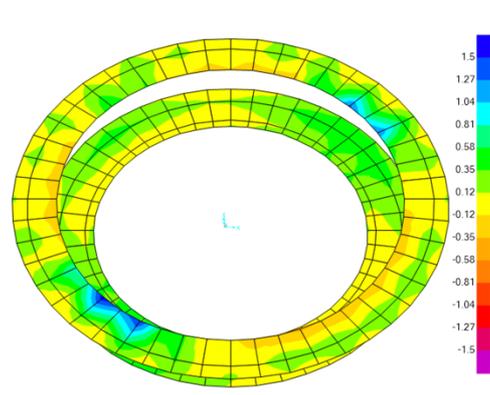


Figura 5.25 Tensione S-Max Top Face Anelli orizzontali con cedimenti

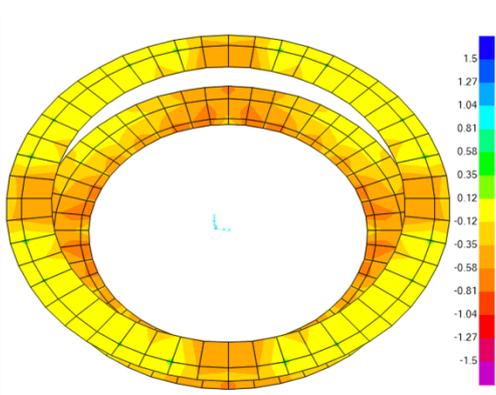


Figura 5.26 Tensioni S-Min Top Face di Anelli orizzontali senza cedimenti

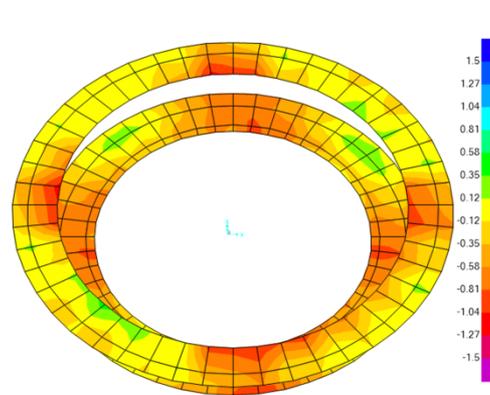


Figura 5.27 Tensioni S-Min Top Face. di Anelli orizzontali con cedimenti

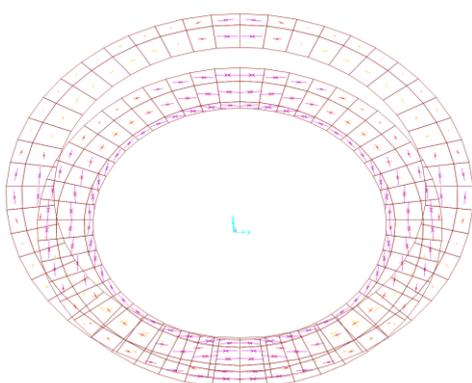


Figura 5.28 Direzioni delle tensioni principali (S-Max e S-Min) Top Face di Anelli orizzontali senza cedimenti

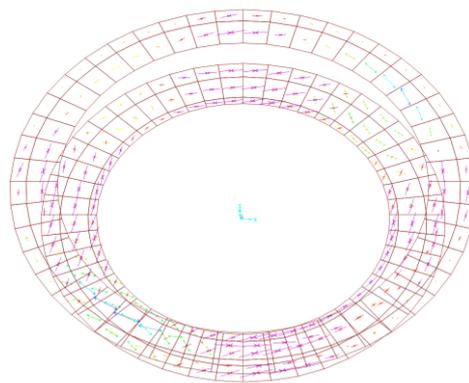


Figura 5.29 Direzioni delle tensioni principali (S-Max e S-Min) Top Face di Anelli orizzontali con cedimenti

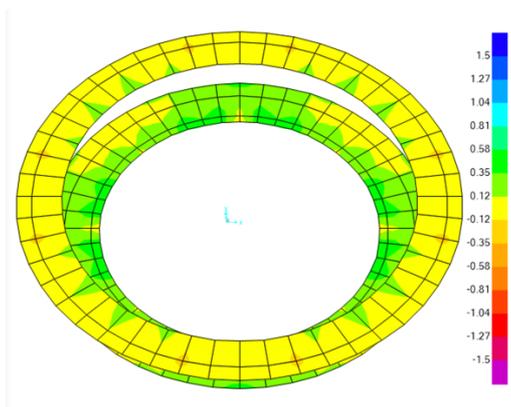


Figura 5.30 Tensioni S-Max Bottom Face di Anelli orizzontali senza cedimenti

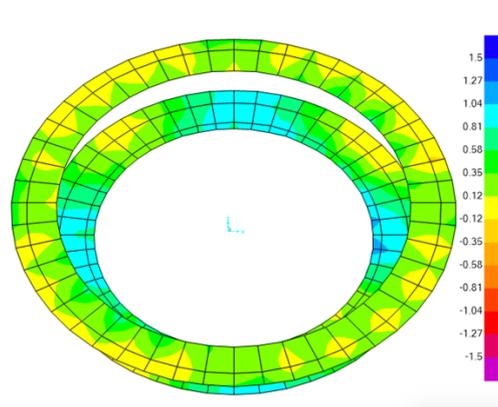


Figura 5.31 Tensioni S-Max Bottom Face di Anelli orizzontali con cedimenti

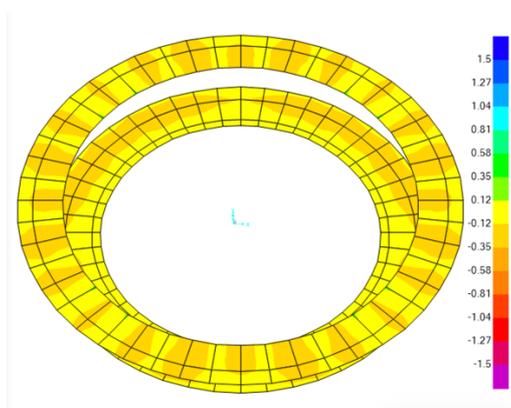


Figura 5.32 Tensioni S-Min Bottom Face di Anelli orizzontali senza cedimenti

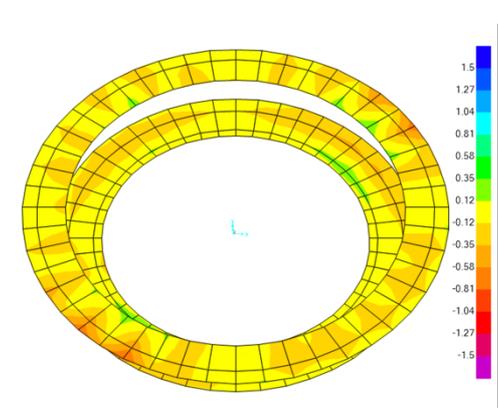


Figura 5.33 Tensioni S-Min Bottom Face di Anelli orizzontali con cedimenti

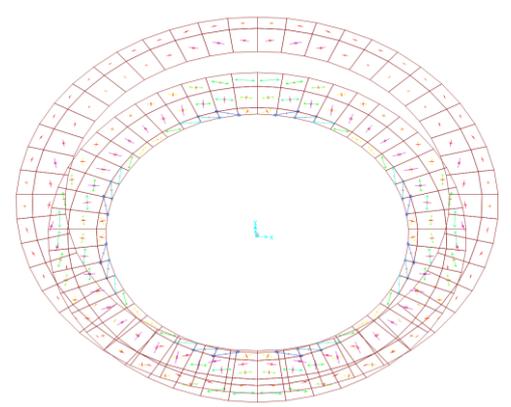


Figura 5.34 Direzioni delle tensioni principali (S-Max e S-Min) Bottom Face di Anelli orizzontali con cedimenti

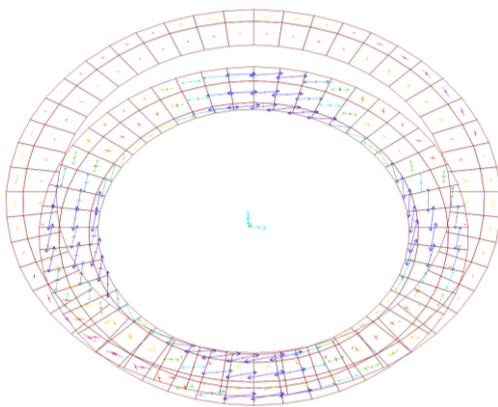


Figura 5.35 Direzioni delle tensioni principali (S-Max e S-Min) Bottom Face di Anelli orizzontali con cedimenti

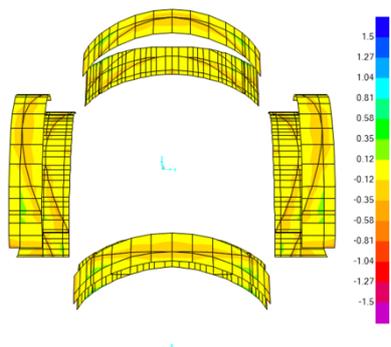


Figura 5.36 Tensione S1-1 Top Face di Arconi in direzione trasversale di asse degli arconi senza cedimenti

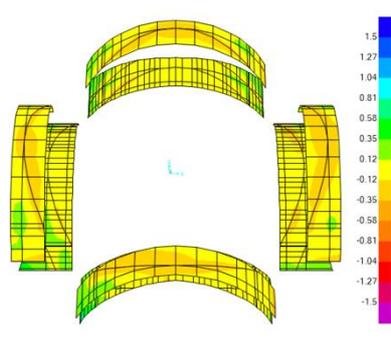


Figura 5.37 Tensione S1-1 Top Face di Arconi in direzione trasversale di asse degli arconi con cedimenti

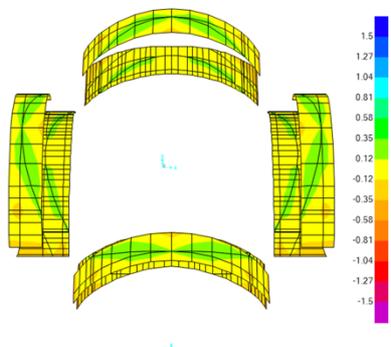


Figura 5.38 Tensioni S1-1 Bottom Face di Arconi in direzione trasversale di asse degli arconi senza cedimenti

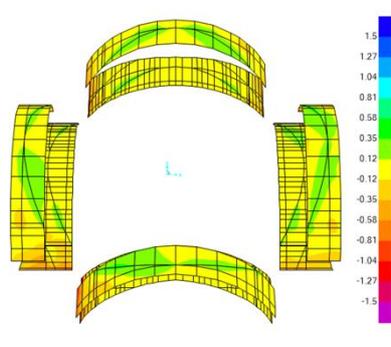


Figura 5.39 Tensioni S1-1 Bottom Face di Arconi in direzione trasversale di asse degli arconi con cedimenti

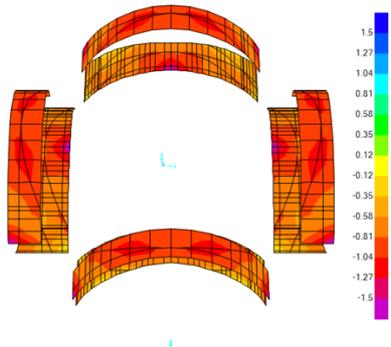


Figura 5.40 Tensioni S2-2 Top Face di Arconi in direzione longitudinale di asse degli arconi senza cedimenti

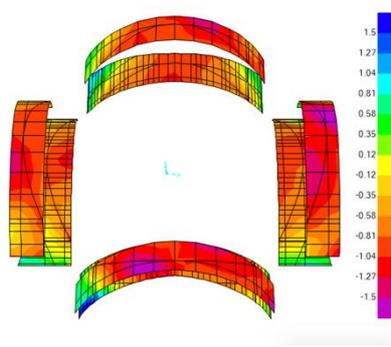


Figura 5.41 Tensioni S2-2 Top Face di Arconi in direzione longitudinale di asse degli arconi con cedimenti

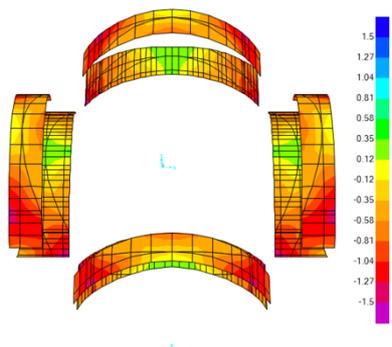


Figura 5.42 Tensioni S2-2 Bottom Face di Arconi in direzione longitudinale di asse degli arconi senza cedimenti

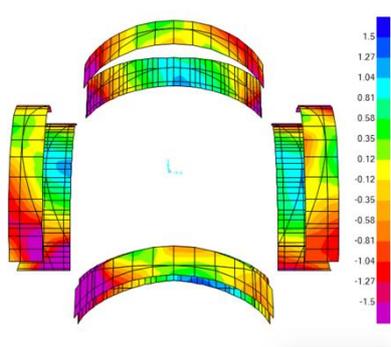


Figura 5.43 Tensioni S2-2 Bottom Face di Arconi in direzione longitudinale di asse degli arconi con cedimenti

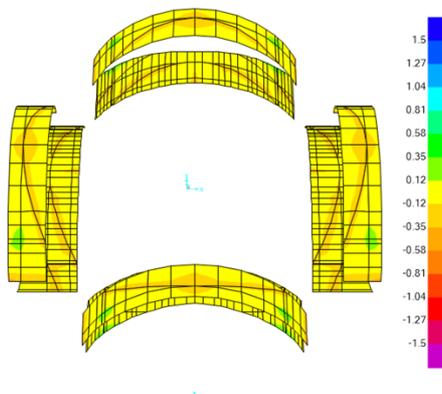


Figura 5.44 Tensione S-Max Top Face di Arconi senza cedimenti

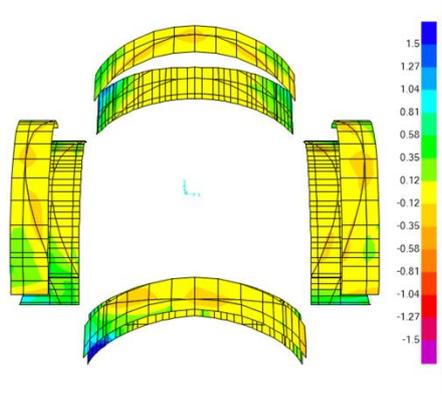


Figura 5.45 Tensione S-Max Top Face di Arconi con cedimenti

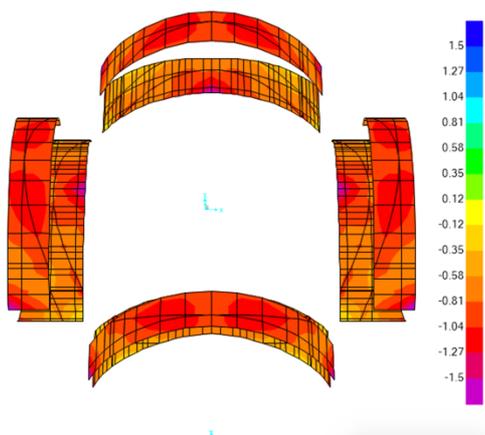


Figura 5.46 Tensioni S-Min Top Face di Arconi senza cedimenti

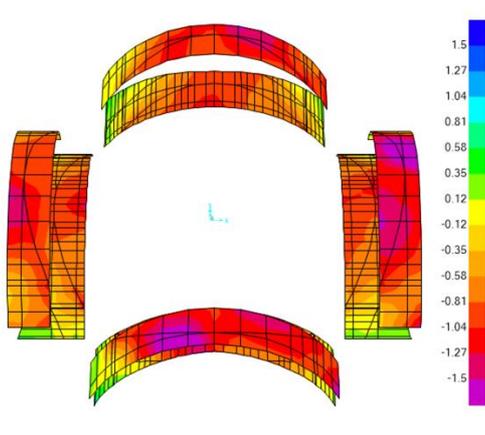


Figura 5.47 Tensioni S-Min Top Face di Arconi con cedimenti

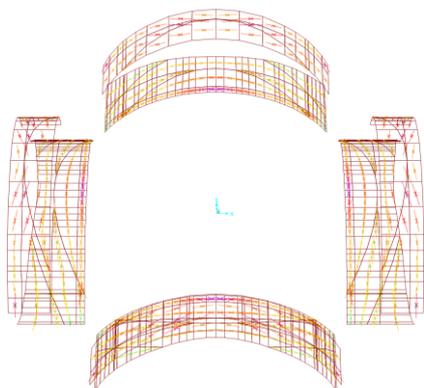


Figura 5.48 Direzioni delle tensioni principali (S-Max e S-Min) Top Face di Arconi senza cedimenti

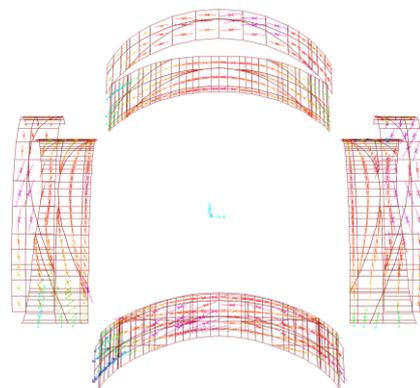


Figura 5.49 Direzioni delle tensioni principali (S-Max e S-Min) Top Face di Arconi con cedimenti

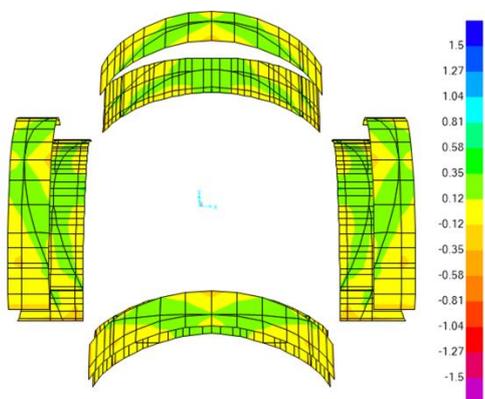


Figura 5.50 Tensioni S-Max Bottom Face di Arconi senza cedimenti

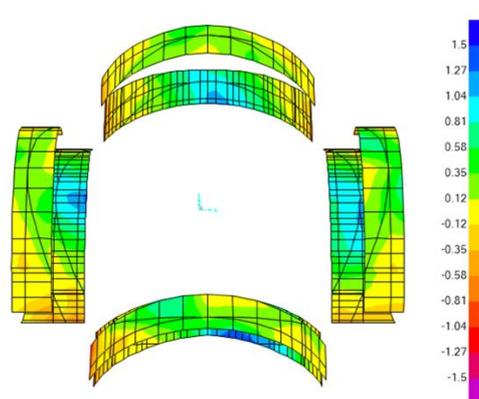


Figura 5.51 Tensioni S-Max Bottom Face di Arconi con cedimenti

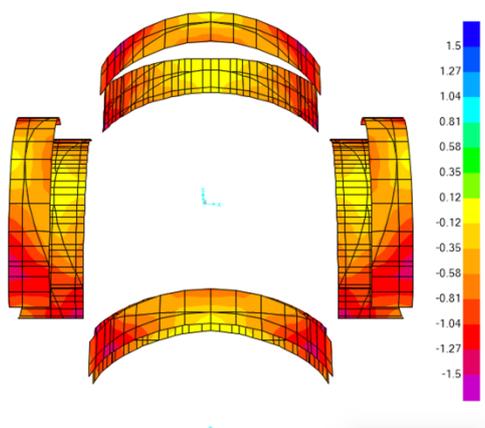


Figura 5.52 Tensioni S-Min Bottom Face di Arconi senza cedimenti

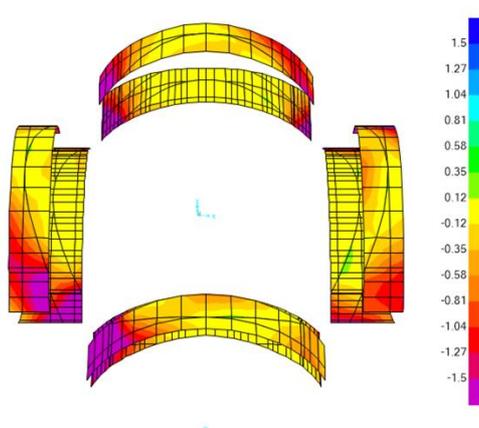


Figura 5.53 Tensioni S-Min Bottom Face di Arconi con cedimenti

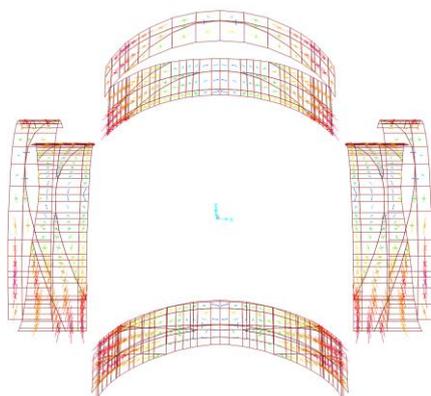


Figura 5.54 Direzioni delle tensioni principali (S-Max e S-Min) Bottom Face di Arconi senza cedimenti

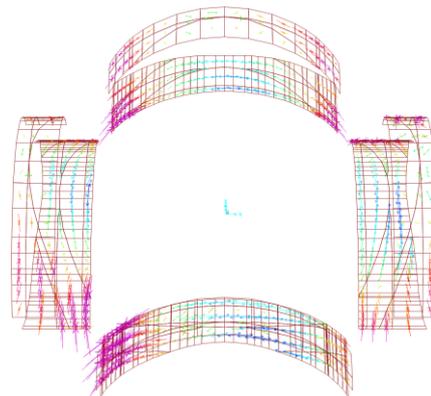


Figura 5.55 Direzioni delle tensioni principali (S-Max e S-Min) Bottom Face di Arconi con cedimenti

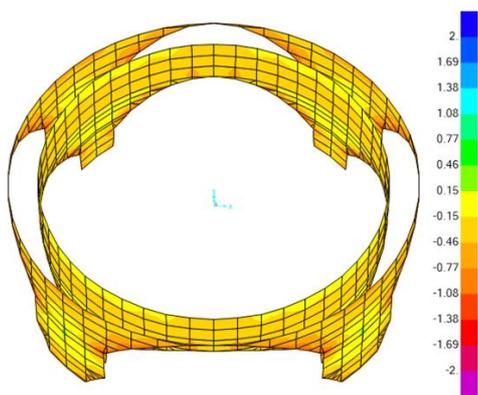


Figura 5.56 Tensione S1-1 Top Face di pareti in direzione circonferenziale senza cedimenti

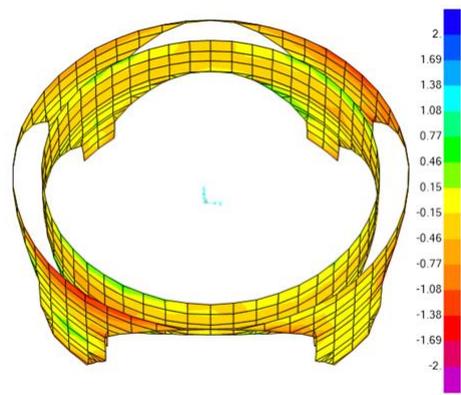


Figura 5.57 Tensione S1-1 Top Face di pareti in direzione circonferenziale con cedimenti

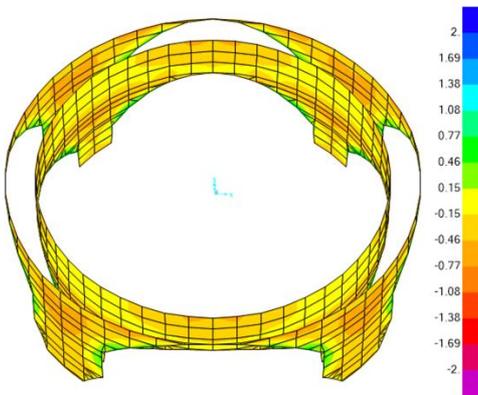


Figura 5.58 Tensioni S1-1 Bottom Face di pareti in direzione circonferenziale senza cedimenti

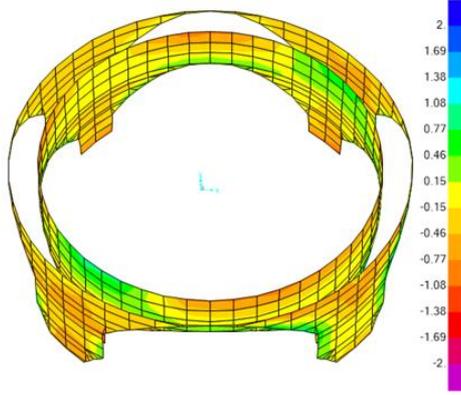


Figura 5.59 Tensioni S1-1 Bottom Face di pareti in direzione circonferenziale con cedimenti

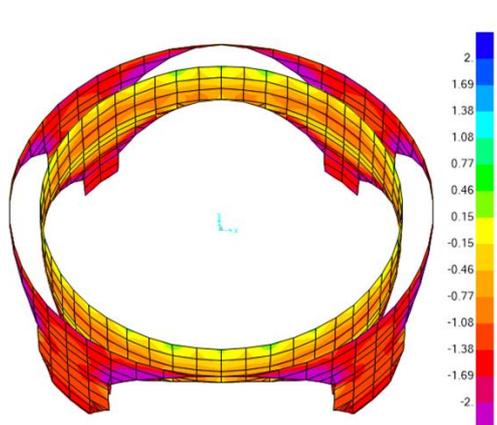


Figura 5.60 Tensioni S2-2 Top Face di pareti in direzione radiale senza cedimenti

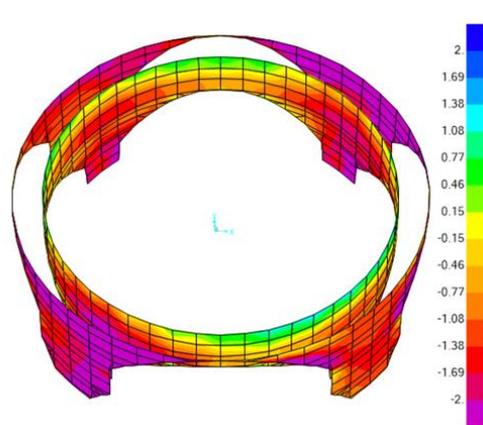


Figura 5.61 Tensioni S2-2 Top Face di pareti in direzione radiale con cedimenti

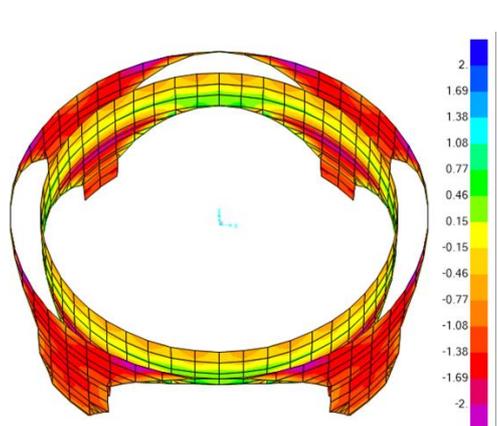


Figura 5.62 Tensioni S2-2 Bottom Face di pareti in direzione radiale senza cedimenti

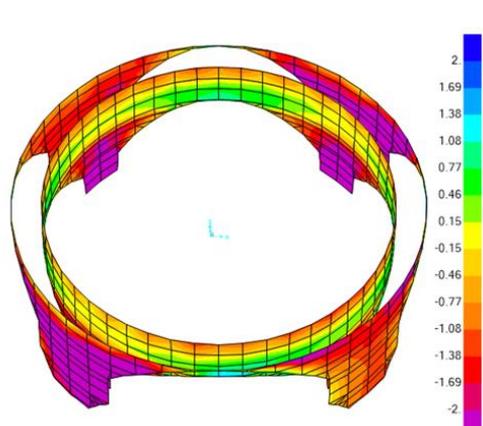


Figura 5.63 Tensioni S2-2 Bottom Face di pareti in direzione radiale con cedimenti

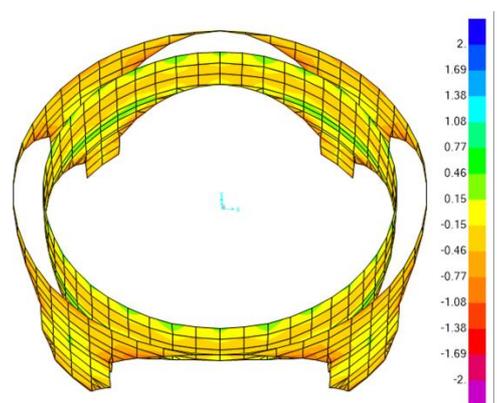


Figura 5.64 Tensione S-Max Top Face di pareti senza cedimenti

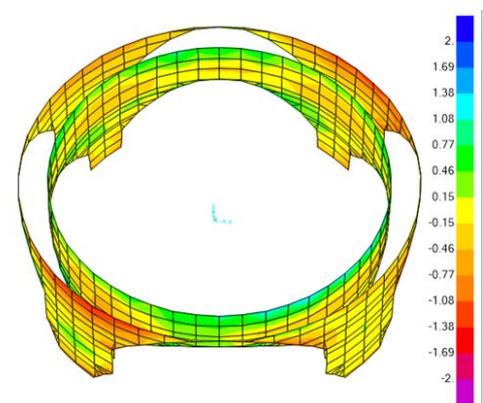


Figura 5.65 Tensione S-Max Top Face di pareti con cedimenti

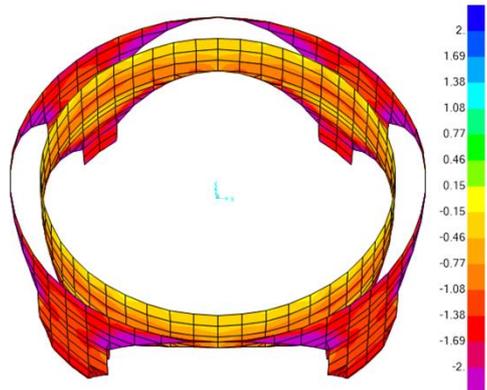


Figura 5.66 Tensioni S-Min Top Face di pareti senza cedimenti

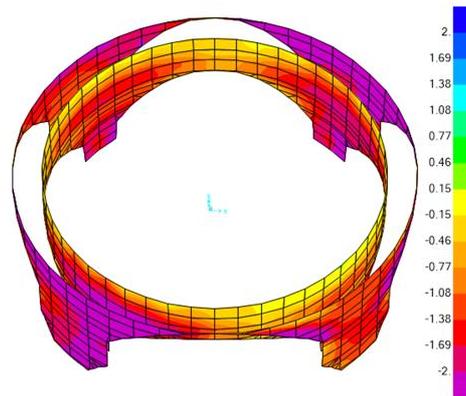


Figura 5.67 Tensioni S-Min Top Face di pareti con cedimenti

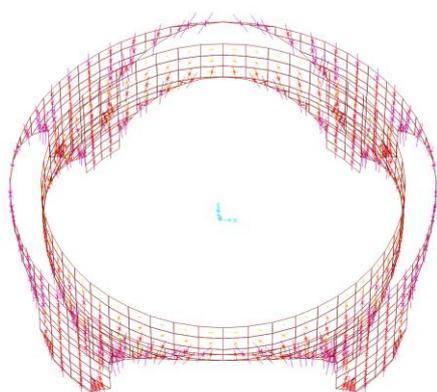


Figura 5.68 Direzioni delle tensioni principali (S-Max e S-Min) Top Face di pareti senza cedimenti

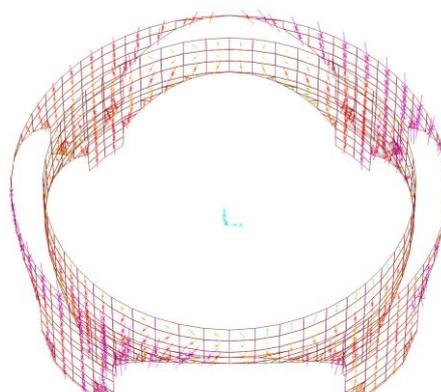


Figura 5.69 Direzioni delle tensioni principali (S-Max e S-Min) Top Face di pareti con cedimenti

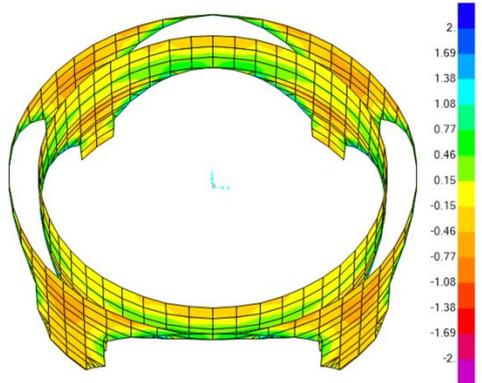


Figura 5.70 Tensioni S-Max Bottom Face di pareti senza cedimenti

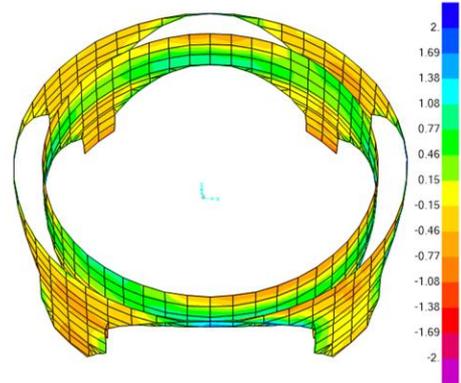


Figura 5.71 Tensioni S-Max Bottom Face di pareti con cedimenti

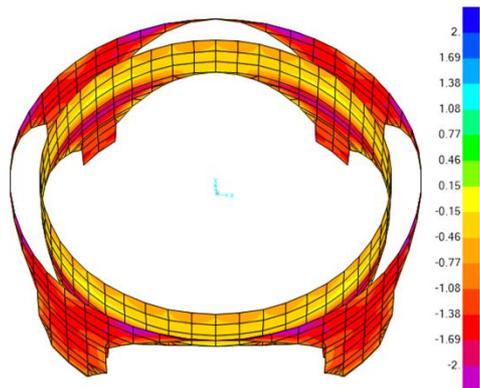


Figura 5.72 Tensioni S-Min Bottom Face di pareti senza cedimenti

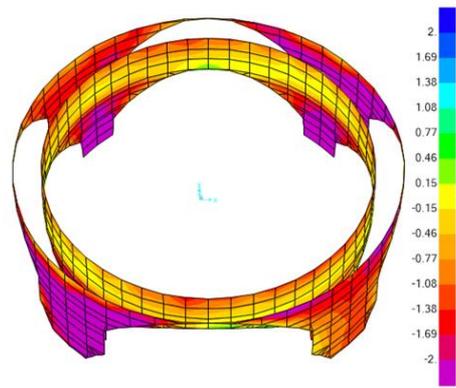


Figura 5.73 Tensioni S-Min Bottom Face di pareti con cedimenti

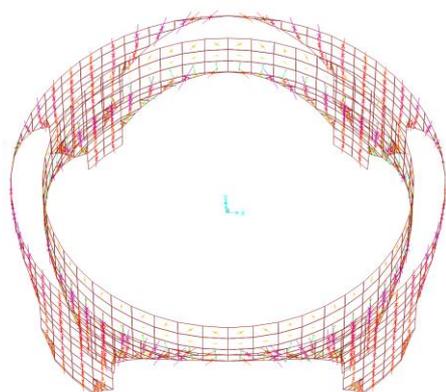


Figura 5.74 Direzioni delle tensioni principali (S-Max e S-Min) Bottom Face di pareti senza cedimenti

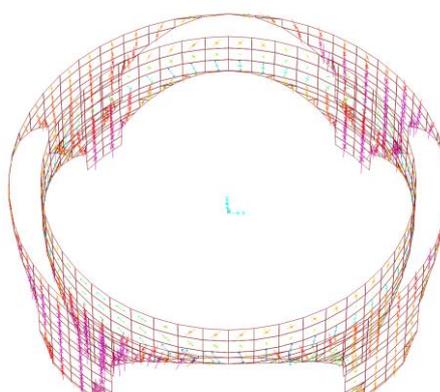


Figura 5.75 Direzioni delle tensioni principali (S-Max e S-Min) Bottom Face di pareti con cedimenti

5.4 Basamento della Cupola di Basilica

5.4.1 Elementi portanti di pilastri in “frame”

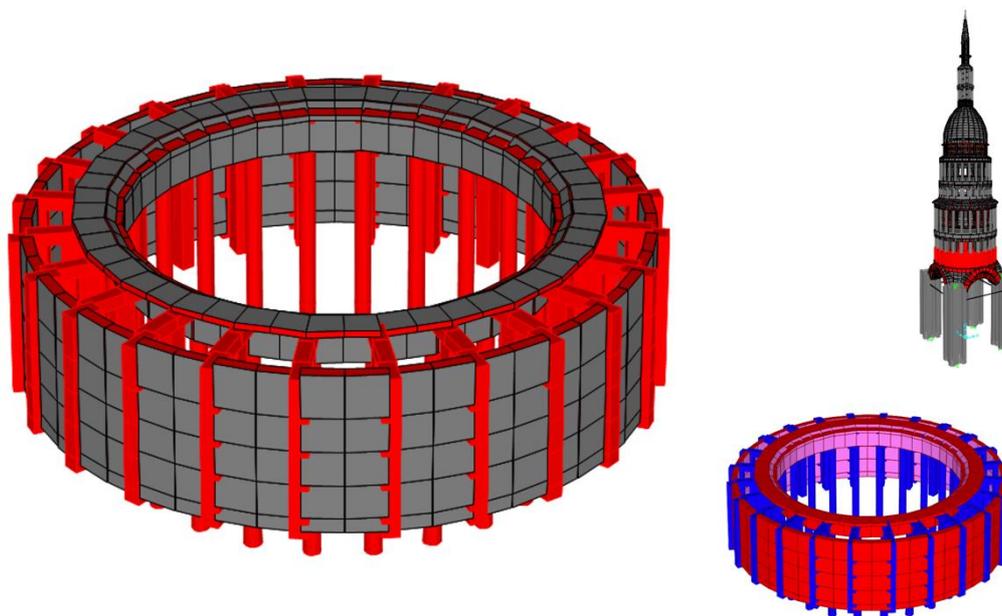


Figura 5.76 Modello di Basamento della Cupola: elementi “frame” indicato in basso destro

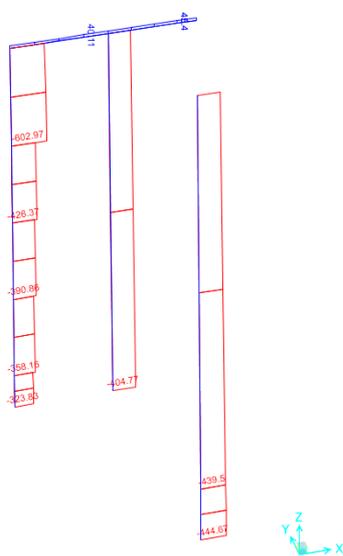


Figura 5.77 Sforzo assiale sui pilastri di Basamento della Cupola di Basilica senza cedimenti

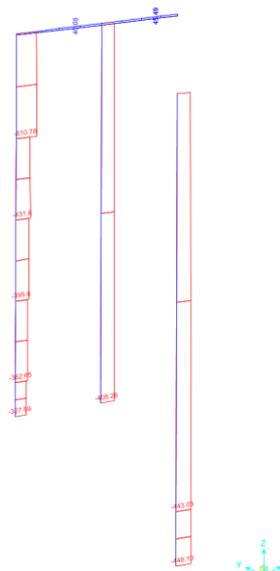


Figura 5.78 Sforzo assiale sui pilastri di Basamento della Cupola di Basilica con cedimenti

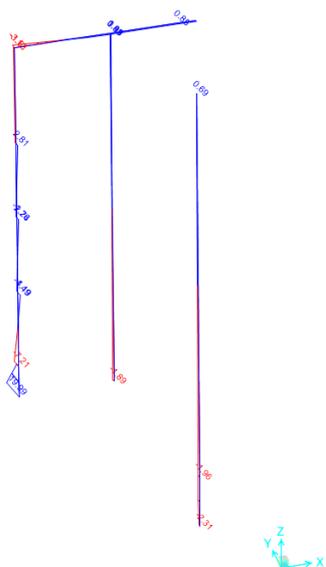


Figura 5.79 Momento flettente 2-2 in direzione circonferenziale sui pilastri di Basamento della Cupola di Basilica senza cedimenti

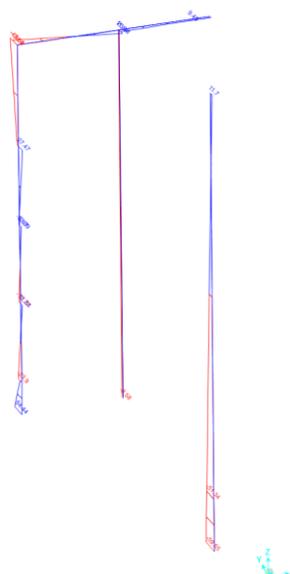


Figura 5.80 Momento flettente 2-2 in direzione circonferenziale sui pilastri di Basamento della Cupola di Basilica con cedimenti

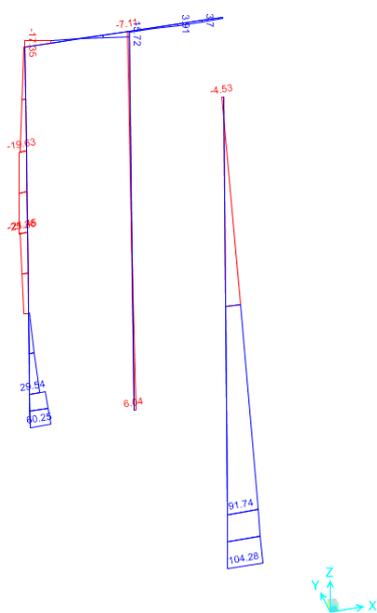


Figura 5.81 Momento flettente 3-3 in direzione radiale sui pilastri di Basamento della Cupola di Basilica senza cedimenti

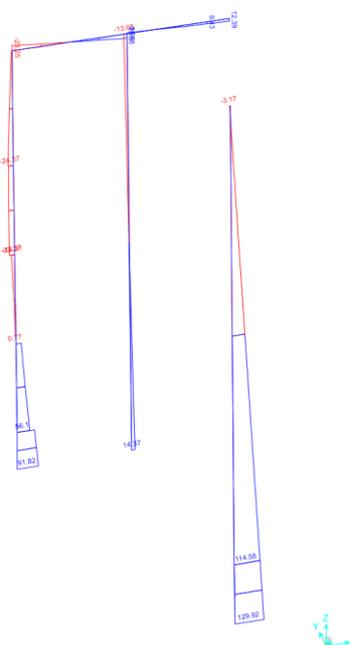


Figura 5.82 Momento flettente 3-3 in direzione radiale sui pilastri di Basamento della Cupola di Basilica senza cedimenti

Tabella 5.3 Sforzi assiali dei pilastri interni del Basamento di Cupola ed il rapporto tra due condizioni

	Sforzo Assiale dei pilastri [kN]			
	Senza cedimenti	Con cedimenti	Rapporto	
Nord a Est (orario)	1	-439.58	-293.86	67%
	2	-448.43	-383.35	85%
	3	-490.87	-516.98	105%
	4	-491.00	-556.45	113%
	5	-448.72	-457.59	102%
	6	-439.83	-311.57	71%

	Sforzo Assiale dei pilastri [kN]			
	Senza cedimenti	Con cedimenti	Rapporto	
Est a Sud (orario)	7	-439.67	-220.48	50%
	8	-448.36	-262.48	59%
	9	-490.66	-323.20	66%
	10	-490.71	-306.97	63%
	11	-448.43	-231.97	52%
	12	-439.61	-213.22	49%

	Sforzo Assiale dei pilastri [kN]			
	Senza cedimenti	Con cedimenti	Rapporto	
Sud a Ovest (orario)	13	-439.56	-339.42	77%
	14	-448.31	-498.82	111%
	15	-490.57	-609.24	124%
	16	-490.54	-570.82	116%
	17	-448.27	-426.67	95%
	18	-439.50	-323.04	74%

	Sforzo Assiale dei pilastri [kN]			
	Senza cedimenti	Con cedimenti	Rapporto	
Ovest a Nord (orario)	19	-439.47	-281.79	64%
	20	-448.22	-333.26	74%
	21	-490.52	-435.15	89%
	22	-490.59	-451.76	92%
	23	-448.34	-364.39	81%
	24	-439.56	-288.93	66%

Tabella 5.4 Sforzi assiali dei pilastri intermedi del Basamento di Cupola ed il rapporto tra due condizioni

	Sforzo Assiale dei pilastri [kN]			
	Senza cedimenti	Con cedimenti	Rapporto	
Nord a Est (orario)	1	-408.33	-370.14	91%
	2	-440.55	-466.58	106%
	3	-463.49	-560.89	121%
	4	-463.58	-592.09	128%
	5	-440.75	-531.60	121%
	6	-408.48	-410.29	100%

	Sforzo Assiale dei pilastri [kN]			
	Senza cedimenti	Con cedimenti	Rapporto	
Est a Sud (orario)	7	-408.37	-337.31	83%
	8	-440.49	-331.93	75%
	9	-463.33	-336.37	73%
	10	-463.37	-323.48	70%
	11	-440.56	-304.99	69%
	12	-408.33	-320.36	78%

	Sforzo Assiale dei pilastri [kN]			
	Senza cedimenti	Con cedimenti	Rapporto	
Sud a Ovest (orario)	13	-408.27	-411.95	101%
	14	-440.42	-555.04	126%
	15	-463.28	-630.81	136%
	16	-463.35	-600.77	130%
	17	-440.52	-492.18	112%
	18	-408.29	-373.27	91%

	Sforzo Assiale dei pilastri [kN]			
	Senza cedimenti	Con cedimenti	Rapporto	
Ovest a Nord (orario)	19	-408.26	-326.62	80%
	20	-440.42	-363.62	83%
	21	-463.28	-417.30	90%
	22	-463.34	-430.34	93%
	23	-440.54	-390.66	89%
	24	-408.34	-342.98	84%

Tabella 5.5 Sforzi assiali dei pilastri esterni del Basamento di Cupola ed il rapporto tra due condizioni

	Sforzo Assiale dei pilastri [kN]		
	Senza cedimenti	Con cedimenti	Rapporto
Nord a Est (orario)	1	-362.64	92%
	2	-495.79	121%
	3	-500.98	146%
	4	-501.27	165%
	5	-496.37	158%
	6	-362.92	120%

	Sforzo Assiale dei pilastri [kN]		
	Senza cedimenti	Con cedimenti	Rapporto
Est a Sud (orario)	7	-362.72	64%
	8	-495.91	76%
	9	-501.10	80%
	10	-501.37	72%
	11	-496.42	61%
	12	-362.91	52%

	Sforzo Assiale dei pilastri [kN]		
	Senza cedimenti	Con cedimenti	Rapporto
Sud a Ovest (orario)	13	-362.60	117%
	14	-495.79	161%
	15	-501.16	171%
	16	-501.67	152%
	17	-496.71	124%
	18	-362.99	89%

	Sforzo Assiale dei pilastri [kN]		
	Senza cedimenti	Con cedimenti	Rapporto
Ovest a Nord (orario)	19	-362.65	46%
	20	-495.79	67%
	21	-500.99	87%
	22	-501.30	95%
	23	-496.40	83%
	24	-362.93	58%

5.4.2 Elementi portanti circolari in “shell”

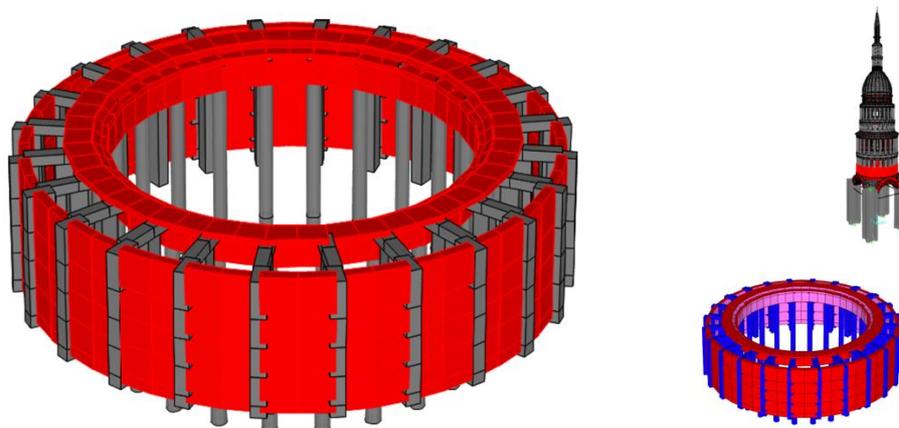


Figura 5.83 Modello di Basamento della Cupola: elementi “shell” indicato in basso destro

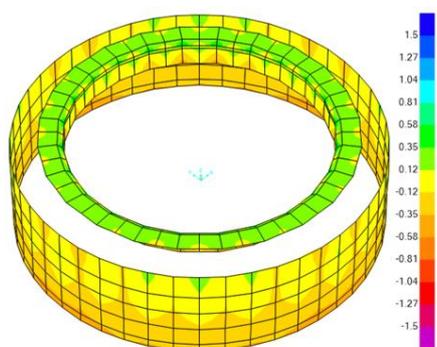


Figura 5.84 Tensione S1-1 Top Face di pareti e pavimento del Basamento in direzione circonferenziale senza cedimenti

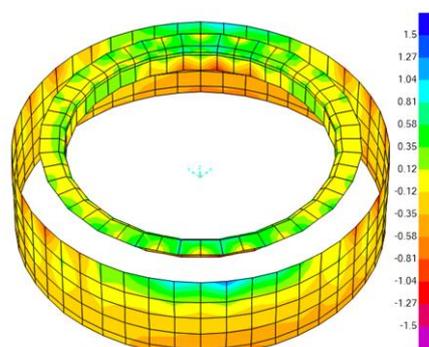


Figura 5.85 Tensione S1-1 Top Face di pareti e pavimento del Basamento in direzione circonferenziale con cedimenti

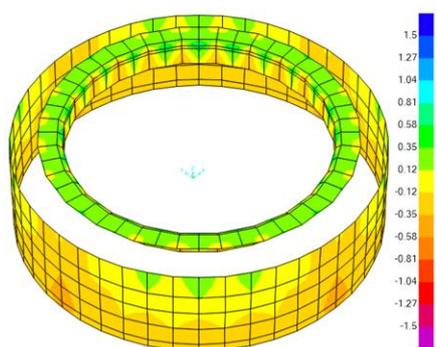


Figura 5.86 Tensioni S1-1 Bottom Face di pareti e pavimento del Basamento in direzione circonferenziale senza cedimenti

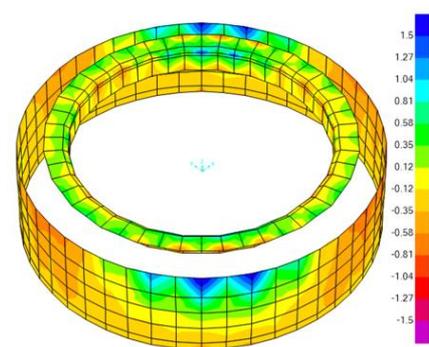


Figura 5.87 Tensioni S1-1 Bottom Face di pareti e pavimento del Basamento in direzione circonferenziale con cedimenti

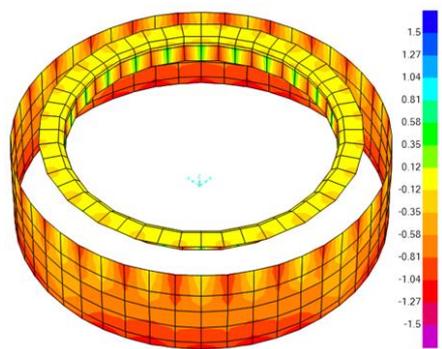


Figura 5.88 Tensioni S2-2 Top Face di pareti del Basamento in direzione verticali e pavimento in direzione radiale senza cedimenti

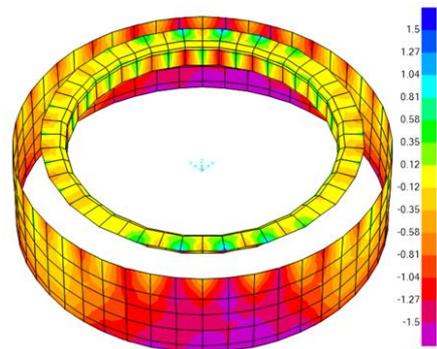


Figura 5.89 Tensioni S2-2 Top Face di pareti del Basamento in direzione verticali e pavimento in direzione radiale con cedimenti

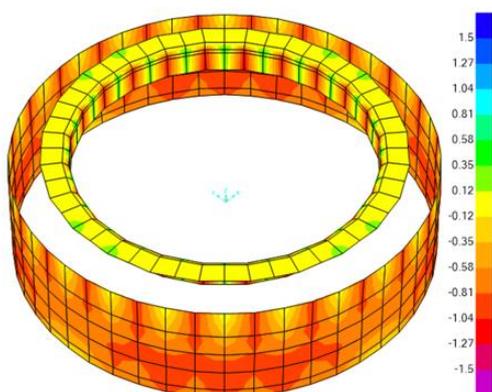


Figura 5.90 Tensioni S2-2 Bottom Face di pareti del Basamento in direzione verticali e pavimento in direzione radiale senza cedimenti

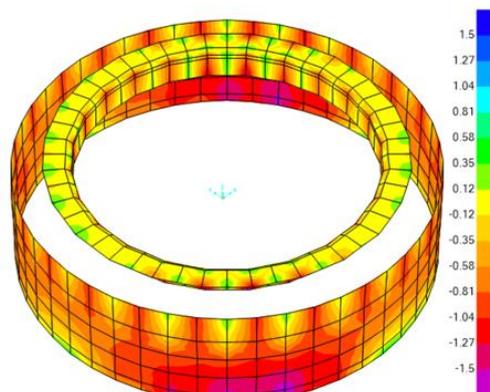


Figura 5.91 Tensioni S2-2 Bottom Face di pareti del Basamento in direzione verticali e pavimento in direzione radiale con cedimenti

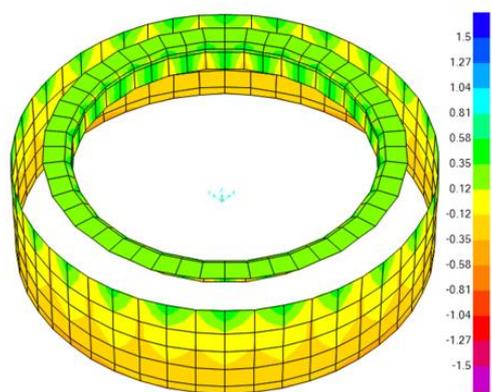


Figura 5.92 Tensione S-Max Top Face di pareti e pavimenti del Basamento senza cedimenti

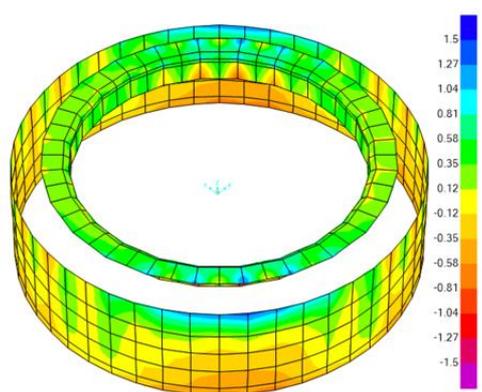


Figura 5.93 Tensione S-Max Top Face di pareti e pavimenti del Basamento con cedimenti

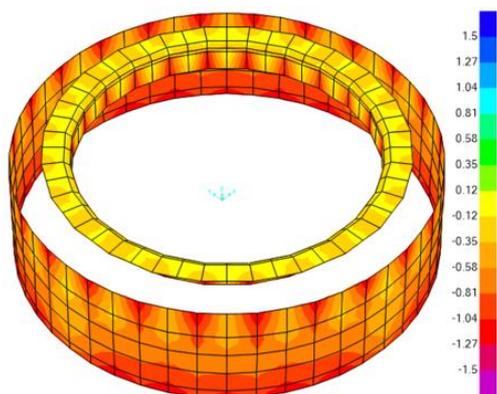


Figura 5.94 Tensioni S-Min Top Face di pareti e pavimenti del Basamento senza cedimenti

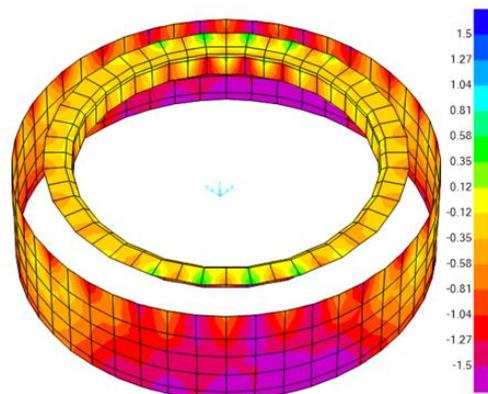


Figura 5.95 Tensioni S-Min Top Face di pareti e pavimenti del Basamento con cedimenti

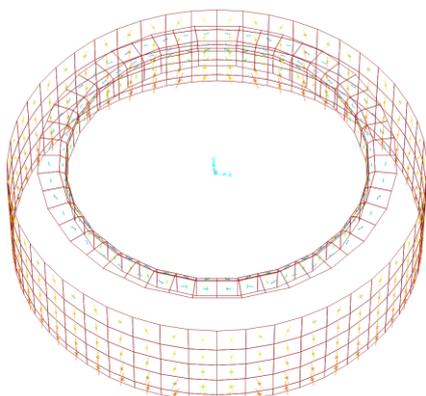


Figura 5.96 Direzioni delle tensioni principali (S-Max e S-Min) Top Face di pareti e pavimenti del Basamento senza cedimenti

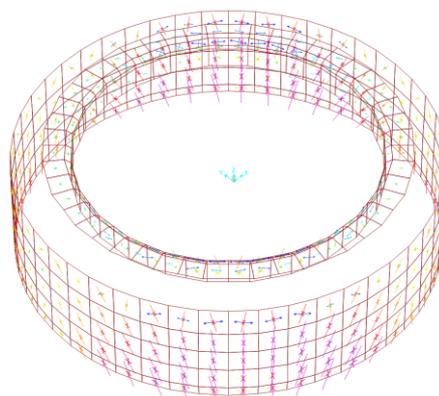


Figura 5.97 Direzioni delle tensioni principali (S-Max e S-Min) Top Face di pareti e pavimenti del Basamento con cedimenti

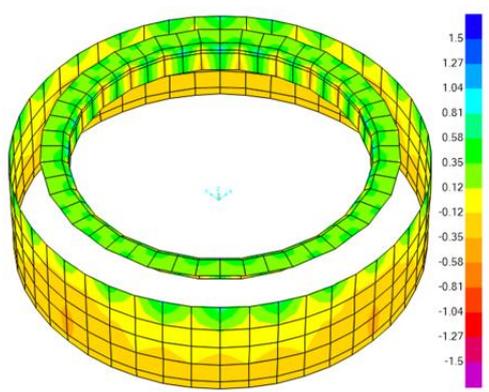


Figura 5.98 Tensioni S-Max Bottom Face di pareti e pavimenti del Basamento senza cedimenti

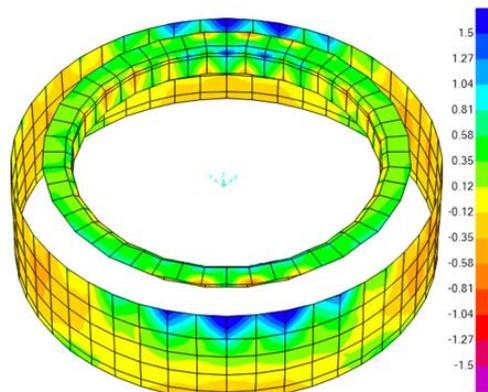


Figura 5.99 Tensioni S-Max Bottom Face di pareti e pavimenti del Basamento con cedimenti

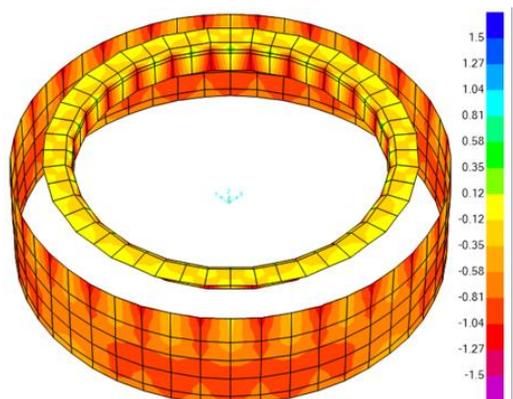


Figura 5.100 Tensioni S-Min Bottom Face di pareti e pavimenti del Basamento senza cedimenti

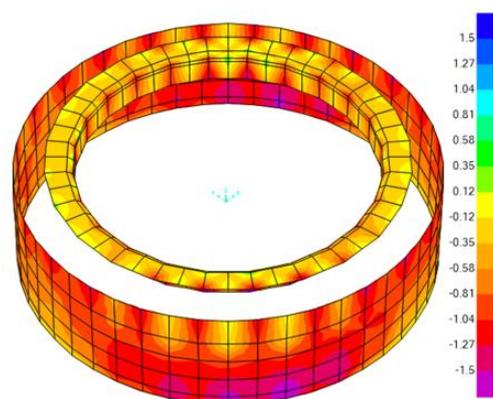


Figura 5.101 Tensioni S-Min Bottom Face di pareti e pavimenti del Basamento con cedimenti

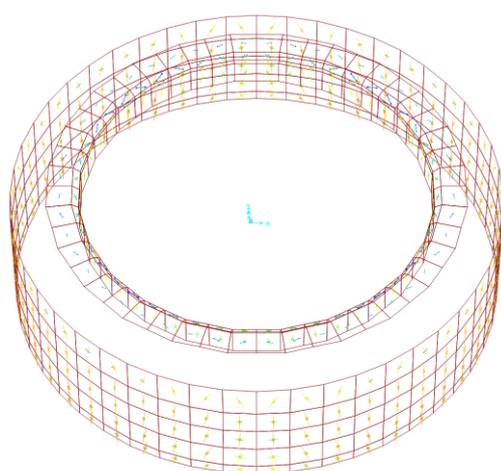


Figura 5.102 Direzioni delle tensioni principali (S-Max e S-Min) Bottom Face di pareti e pavimenti del Basamento senza cedimenti

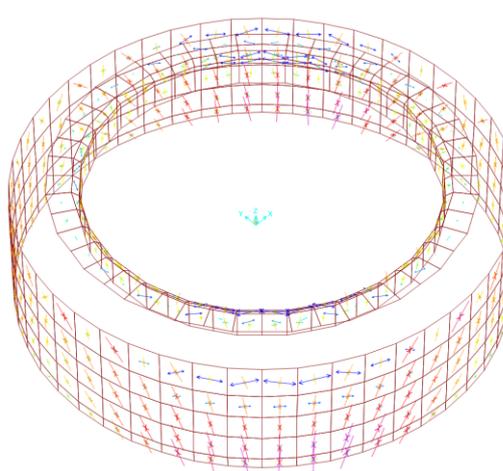


Figura 5.103 Direzioni delle tensioni principali (S-Max e S-Min) Bottom Face di pareti e pavimenti del Basamento con cedimenti

5.5 Primo Stilobate della Cupola di Basilica

5.5.1 Elementi portanti verticali dei pilastri in “frame”

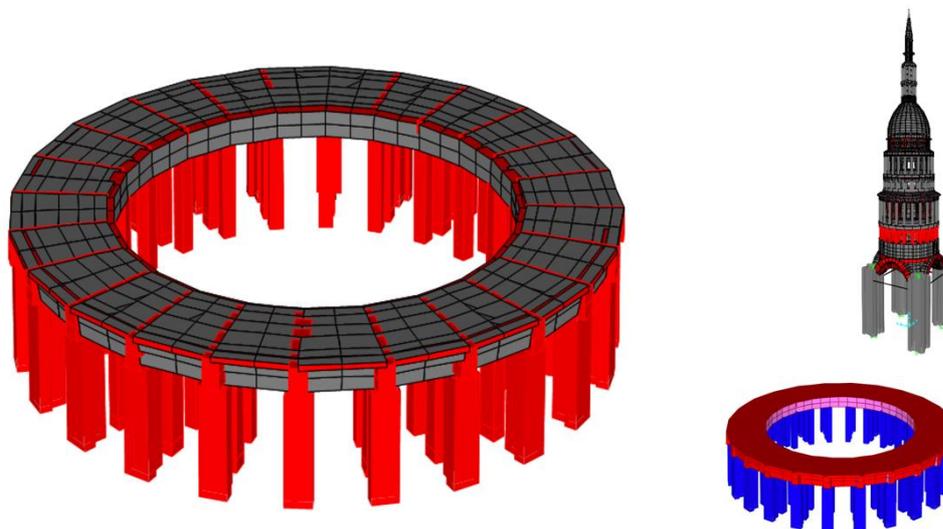


Figura 5.104 Modello di Primo Stilobate della Cupola: elementi “Frame” indicato in basso destro

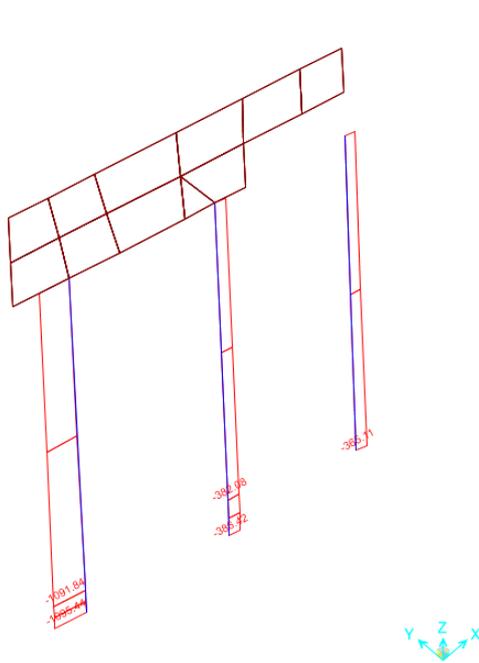


Figura 5.105 Sforzo assiale sui pilastri di Primo Stilobate della Cupola senza cedimenti

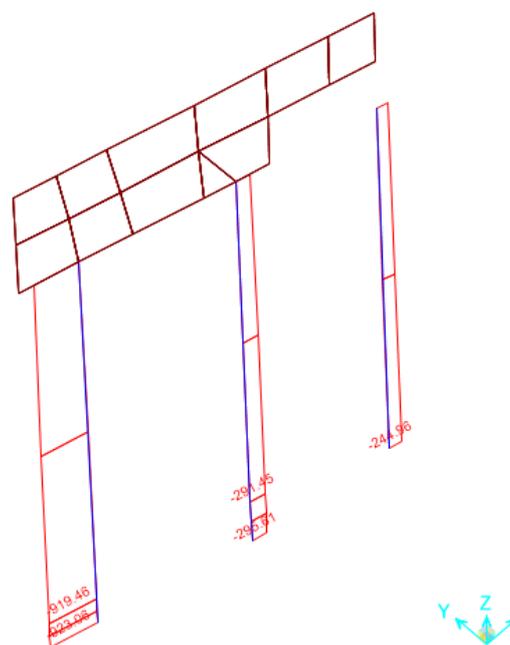


Figura 5.106 Sforzo assiale sui pilastri di Primo Stilobate della Cupola con cedimenti

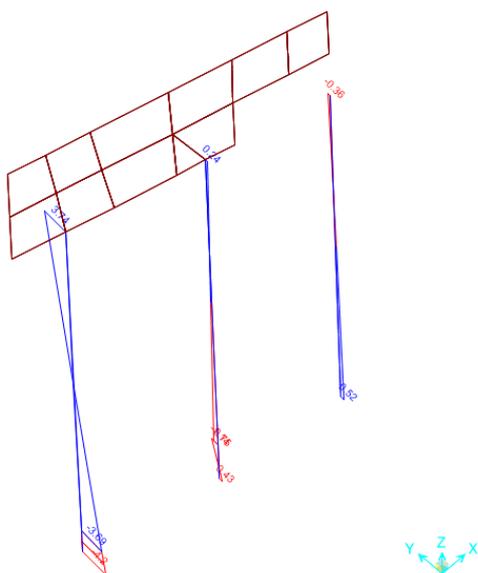


Figura 5.107 Momento flettente 2-2 in direzione circonferenziale sui pilastri di Primo Stilobate della Cupola senza cedimenti

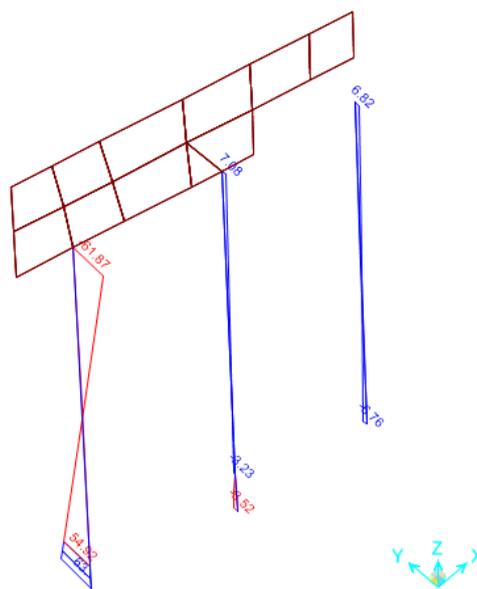


Figura 5.108 Momento flettente 2-2 in direzione circonferenziale sui pilastri di Primo Stilobate della Cupola con cedimenti

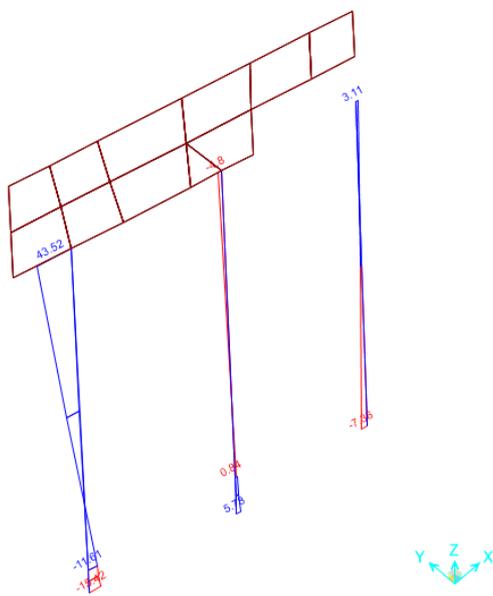


Figura 5.109 Momento flettente 3-3 in direzione radiale sui pilastri di Primo Stilobate della Cupola senza cedimenti

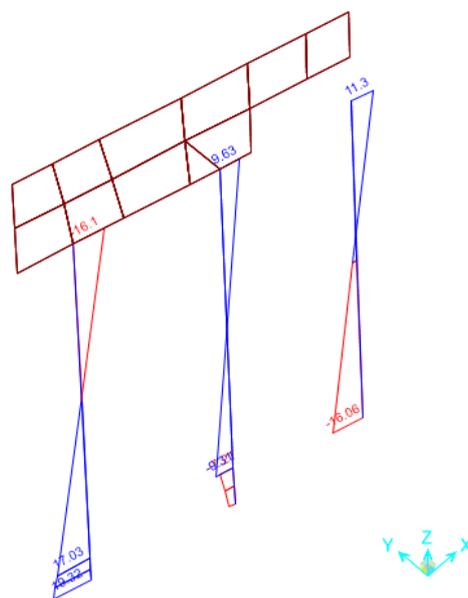


Figura 5.110 Momento flettente 3-3 in direzione radiale sui pilastri di Primo Stilobate della Cupola con cedimenti

Tabella 5.6 Sforzi assiali dei pilastri interni del Primo Stilobate di Cupola ed il rapporto tra due condizioni

	Sforzo Assiale dei pilastri [kN]			
	Senza cedimenti	Con cedimenti	Rapporto	
Nord a Est (orario)	1	-365.22	-269.44	74%
	2	-380.85	-347.54	91%
	3	-399.73	-434.87	109%
	4	-399.84	-459.52	115%
	5	-381.10	-394.85	104%
	6	-365.45	-287.21	79%

	Sforzo Assiale dei pilastri [kN]			
	Senza cedimenti	Con cedimenti	Rapporto	
Est a Sud (orario)	7	-365.31	-212.77	58%
	8	-380.77	-204.33	54%
	9	-399.50	-218.60	55%
	10	-399.53	-208.48	52%
	11	-380.80	-184.85	49%
	12	-365.24	-205.27	56%

	Sforzo Assiale dei pilastri [kN]			
	Senza cedimenti	Con cedimenti	Rapporto	
Sud a Ovest (orario)	13	-365.19	-302.93	83%
	14	-380.71	-430.45	113%
	15	-399.44	-506.87	127%
	16	-399.42	-482.94	121%
	17	-380.68	-384.68	101%
	18	-365.15	-286.40	78%

	Sforzo Assiale dei pilastri [kN]			
	Senza cedimenti	Con cedimenti	Rapporto	
Ovest a Nord (orario)	19	-365.11	-244.96	67%
	20	-380.61	-272.30	72%
	21	-399.36	-323.22	81%
	22	-399.41	-333.55	84%
	23	-380.71	-292.05	77%
	24	-365.19	-252.11	69%

Tabella 5.7 Sforzi assiali dei pilastri intermedi del Primo Stilobate di Cupola ed il rapporto tra due condizioni

	Sforzo Assiale dei pilastri [kN]			
	Senza cedimenti	Con cedimenti	Rapporto	
Nord a Est (orario)	1	-385.64	-337.00	87%
	2	-414.97	-435.41	105%
	3	-437.66	-533.41	122%
	4	-437.76	-565.76	129%
	5	-415.19	-502.49	121%
	6	-385.81	-378.86	98%

	Sforzo Assiale dei pilastri [kN]			
	Senza cedimenti	Con cedimenti	Rapporto	
Est a Sud (orario)	7	-385.69	-301.37	78%
	8	-414.89	-296.13	71%
	9	-437.48	-304.43	70%
	10	-437.52	-291.08	67%
	11	-414.97	-268.36	65%
	12	-385.65	-283.72	74%

	Sforzo Assiale dei pilastri [kN]			
	Senza cedimenti	Con cedimenti	Rapporto	
Sud a Ovest (orario)	13	-385.59	-381.12	99%
	14	-414.81	-526.00	127%
	15	-437.37	-603.65	138%
	16	-437.40	-572.59	131%
	17	-414.83	-461.25	111%
	18	-385.56	-340.83	88%

	Sforzo Assiale dei pilastri [kN]			
	Senza cedimenti	Con cedimenti	Rapporto	
Ovest a Nord (orario)	19	-385.56	-291.49	76%
	20	-414.84	-327.09	79%
	21	-437.44	-382.69	87%
	22	-437.49	-396.22	91%
	23	-414.95	-355.01	86%
	24	-385.65	-308.56	80%

Tabella 5.8 Sforzi assiali dei pilastri esterni del Primo Stilobate di Cupola ed il rapporto tra due condizioni

	Sforzo Assiale dei pilastri [kN]		
	Senza cedimenti	Con cedimenti	Rapporto
Nord a Est (orario)	1	-1107.51	103%
	2	-1160.31	120%
	3	-1195.69	135%
	4	-1195.96	142%
	5	-1160.92	137%
	6	-1107.99	119%

	Sforzo Assiale dei pilastri [kN]		
	Senza cedimenti	Con cedimenti	Rapporto
Est a Sud (orario)	7	-1107.68	98%
	8	-1160.31	87%
	9	-1195.61	83%
	10	-1195.73	80%
	11	-1160.48	80%
	12	-1107.45	92%

	Sforzo Assiale dei pilastri [kN]		
	Senza cedimenti	Con cedimenti	Rapporto
Sud a Ovest (orario)	13	-1107.10	115%
	14	-1159.95	136%
	15	-1196.17	144%
	16	-1197.81	137%
	17	-1162.43	120%
	18	-1108.04	99%

	Sforzo Assiale dei pilastri [kN]		
	Senza cedimenti	Con cedimenti	Rapporto
Ovest a Nord (orario)	19	-1107.15	83%
	20	-1159.75	80%
	21	-1195.21	83%
	22	-1195.51	86%
	23	-1195.51	86%
	24	-1160.43	87%

5.5.2 Elementi portanti di architravi in “shell”

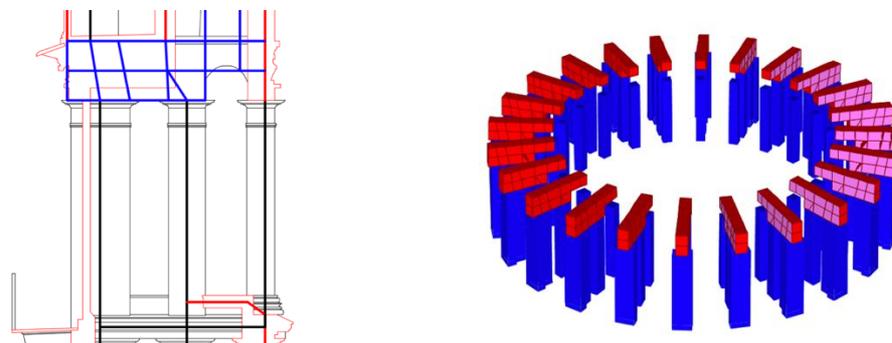


Figura 5.111 Elementi di architravi di Primo Stilobate con elemento "shell"

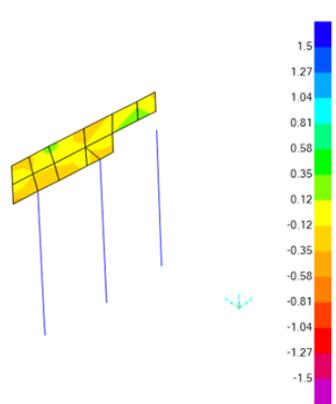


Figura 5.112 Tensione S1-1 Top Face di Architravi del Primo Stilobate in direzione radiale senza cedimenti

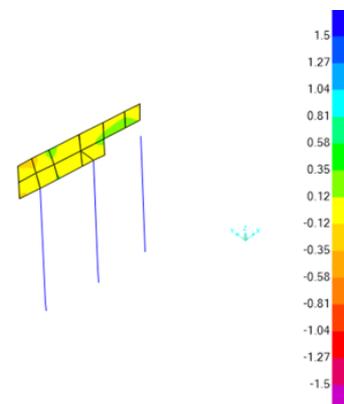


Figura 5.113 Tensione S1-1 Top Face di Architravi del Primo Stilobate in direzione radiale con cedimenti

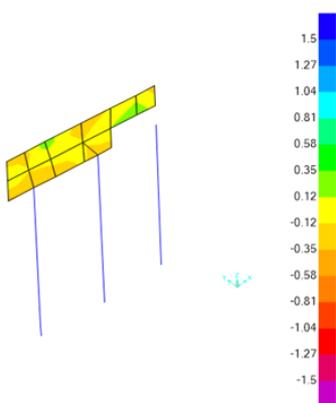


Figura 5.114 Tensioni S1-1 Bottom Face di Architravi del Primo Stilobate in direzione radiale senza cedimenti

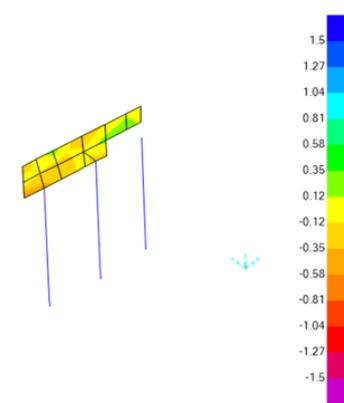


Figura 5.115 Tensioni S1-1 Bottom Face di Architravi del Primo Stilobate in direzione radiale con cedimenti

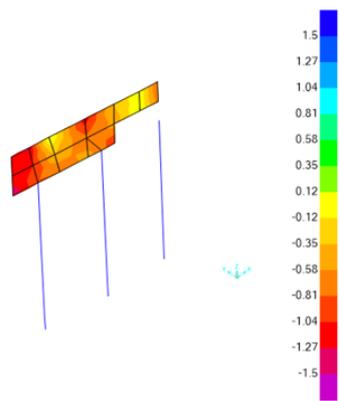


Figura 5.116 Tensioni S2-2 Top Face di Architravi del Primo Stilobate in direzione verticale senza cedimenti

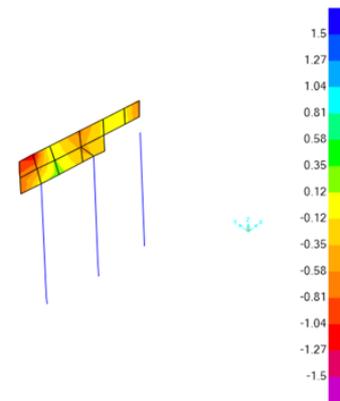


Figura 5.117 Tensioni S2-2 Top Face di Architravi del Primo Stilobate in direzione verticale con cedimenti

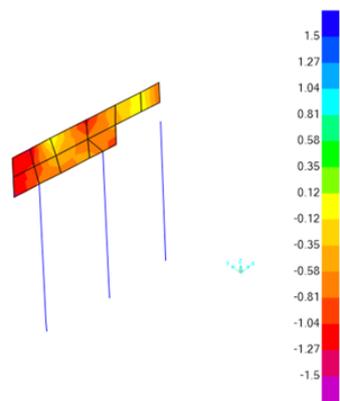


Figura 5.118 Tensioni S2-2 Bottom Face di Architravi del Primo Stilobate in direzione verticale senza cedimenti

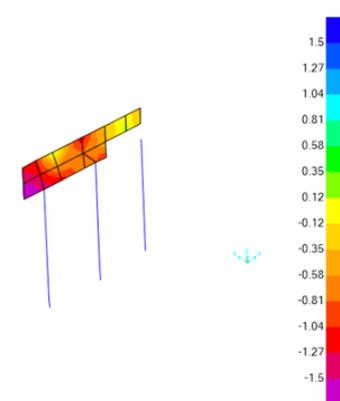


Figura 5.119 Tensioni S2-2 Bottom Face di Architravi del Primo Stilobate in direzione verticale con cedimenti

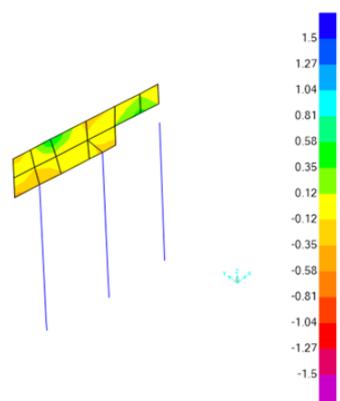


Figura 5.120 Tensione S-Max Top Face di Architravi del Primo Stilobate senza cedimenti

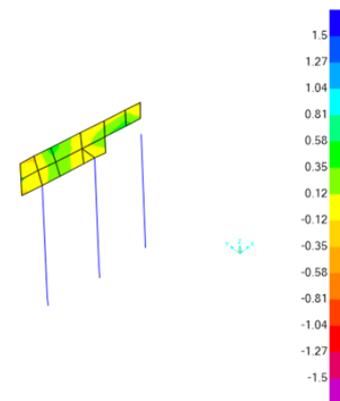


Figura 5.121 Tensione S-Max Top Face di Architravi del Primo Stilobate con cedimenti

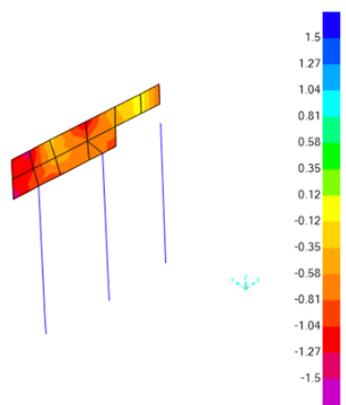


Figura 5.122 Tensioni S-Min Top Face di Architravi del Primo Stilobate senza cedimenti

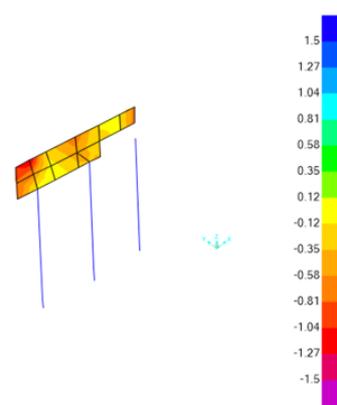


Figura 5.123 Tensioni S-Min Top Face di Architravi del Primo Stilobate con cedimenti

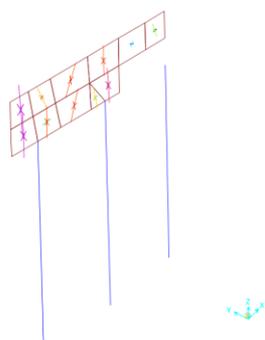


Figura 5.124 Direzioni delle tensioni principali (S-Max e S-Min) Top Face di Architravi del Primo Stilobate senza cedimenti

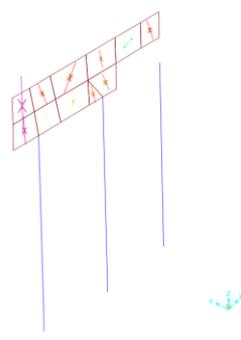


Figura 5.125 Direzioni delle tensioni principali (S-Max e S-Min) Top Face di Architravi del Primo Stilobate con cedimenti

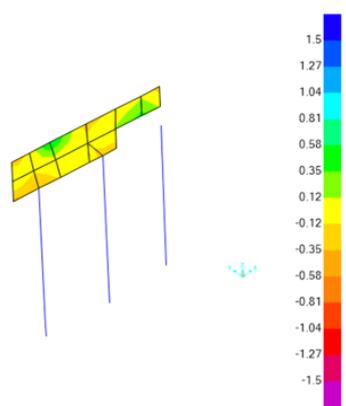


Figura 5.126 Tensioni S-Max Bottom Face di Architravi del Primo Stilobate senza cedimenti

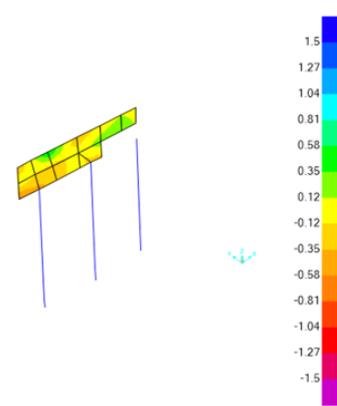


Figura 5.127 Tensioni S-Max Bottom Face di Architravi del Primo Stilobate con cedimenti

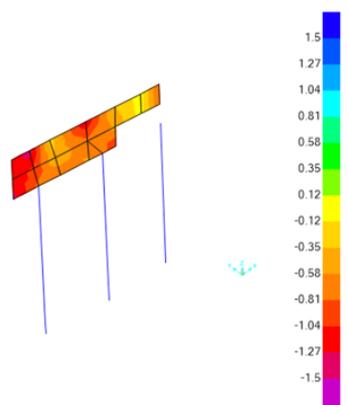


Figura 5.128 Tensioni S-Min Bottom Face di Architravi del Primo Stilobate senza cedimenti

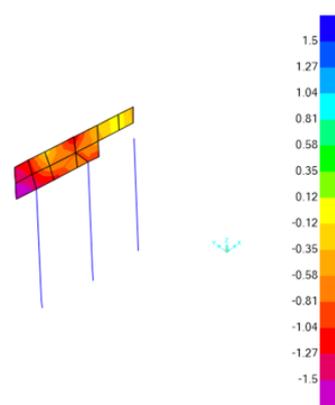


Figura 5.129 Tensioni S-Min Bottom Face di Architravi del Primo Stilobate cedimenti

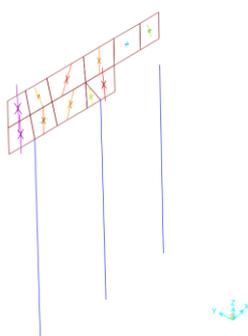


Figura 5.130 Direzioni delle tensioni principali (S-Max e S-Min) Bottom Face di Architravi del Primo Stilobate senza cedimenti

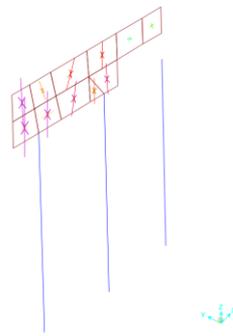


Figura 5.131 Direzioni delle tensioni principali (S-Max e S-Min) Bottom Face di Architravi del Primo Stilobate con cedimenti

5.5.3 Elementi portanti circolari in “shell”

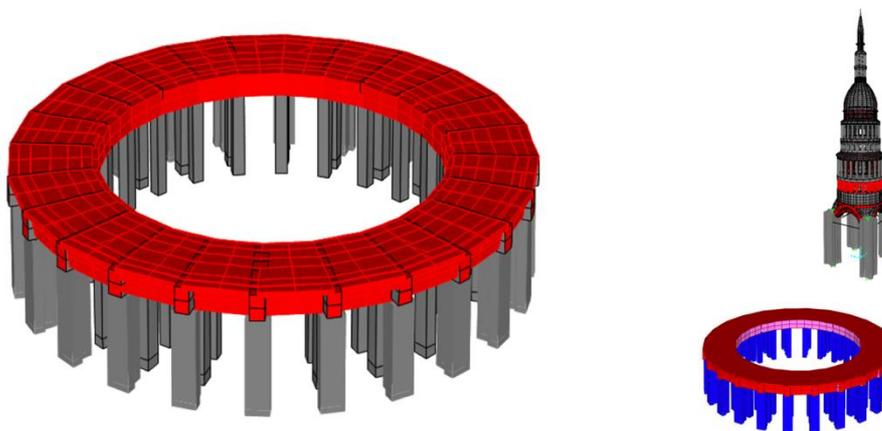


Figura 5.132 Elementi circolari di Primo Stilobate (pareti e pavimenti)

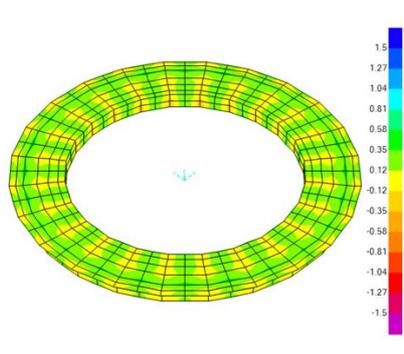


Figura 5.133 Tensione S1-1 Top Face di pareti e pavimento del Primo Stilobate in direzione circonferenziale senza cedimenti

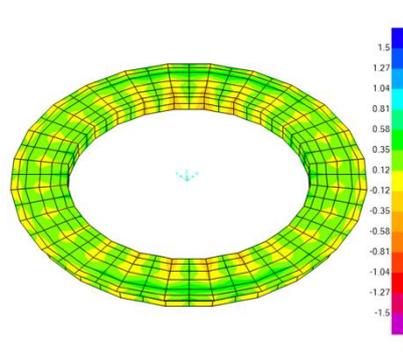


Figura 5.134 Tensione S1-1 Top Face di pareti e pavimento del Primo Stilobate in direzione circonferenziale con cedimenti

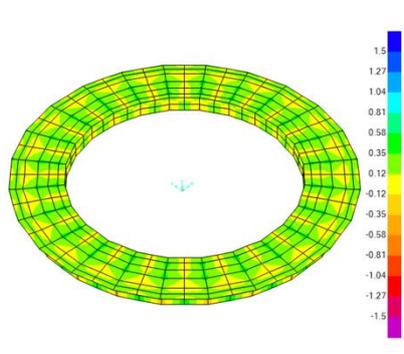


Figura 5.135 Tensioni S1-1 Bottom Face di pareti e pavimento del Primo Stilobate in direzione circonferenziale senza cedimenti

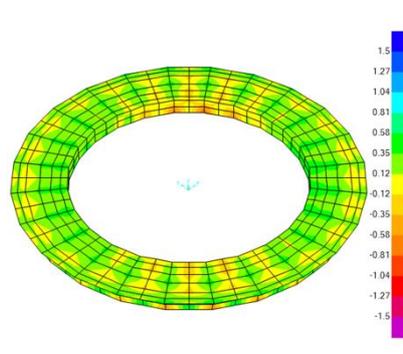


Figura 5.136 Tensioni S1-1 Bottom Face di pareti e pavimento del Primo Stilobate in direzione circonferenziale con cedimenti

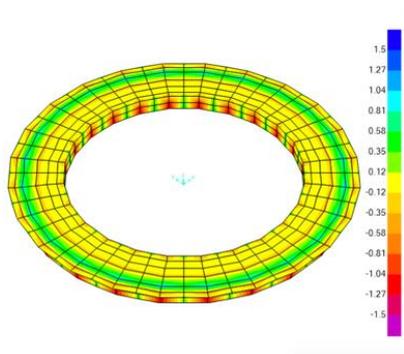


Figura 5.137 Tensioni S2-2 Top Face di pareti del Primo Stilobate in direzione verticali e pavimento in direzione radiale senza cedimenti

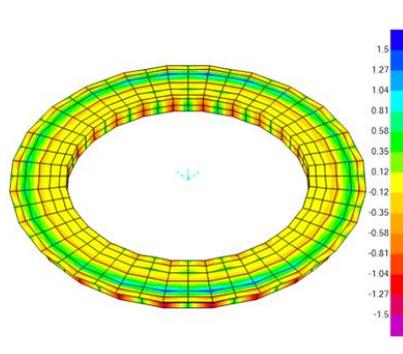


Figura 5.138 Tensioni S2-2 Top Face di pareti del Primo Stilobate in direzione verticali e pavimento in direzione radiale con cedimenti

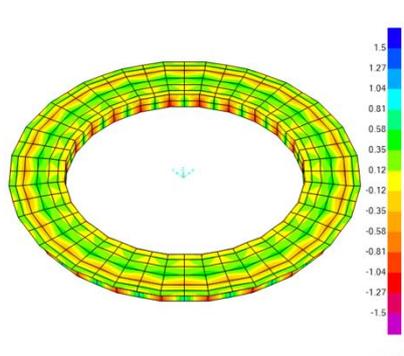


Figura 5.139 Tensioni S2-2 Bottom Face di pareti del Primo Stilobate in direzione verticali e pavimento in direzione radiale senza cedimenti

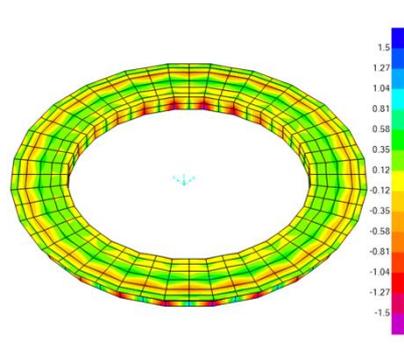


Figura 5.140 Tensioni S2-2 Bottom Face di pareti del Primo Stilobate in direzione verticali e pavimento in direzione radiale con cedimenti

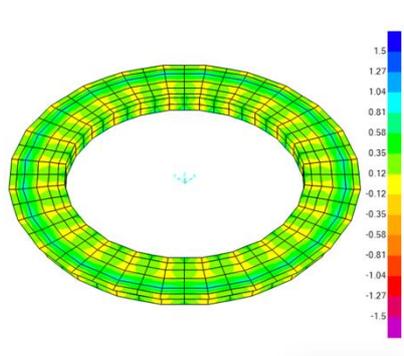


Figura 5.141 Tensione S-Max Top Face pareti e pavimento del Primo Stilobate senza cedimenti

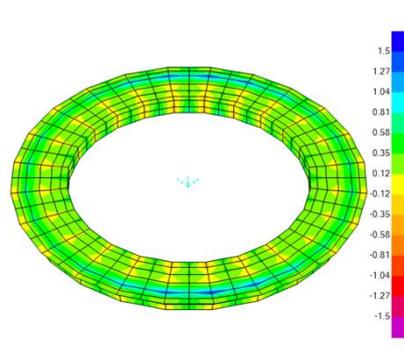


Figura 5.142 Tensione S-Max Top Face di pareti e pavimento del Primo Stilobate con cedimenti

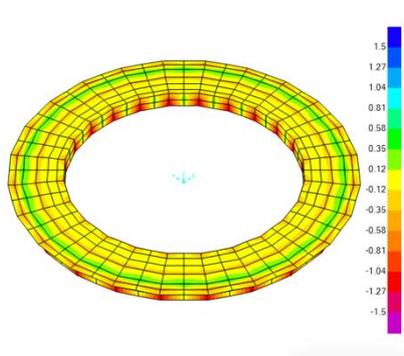


Figura 5.143 Tensioni S-Min Top Face di pareti e pavimento del Primo Stilobate senza cedimenti

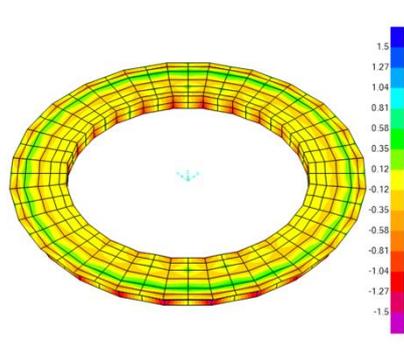


Figura 5.144 Tensioni S-Min Top Face di pareti e pavimento del Primo Stilobate con cedimenti

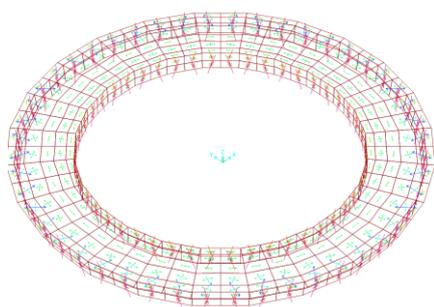


Figura 5.145 Direzioni delle tensioni principali (S-Max e S-Min) Top Face di pareti e pavimento del Primo Stilobate senza cedimenti

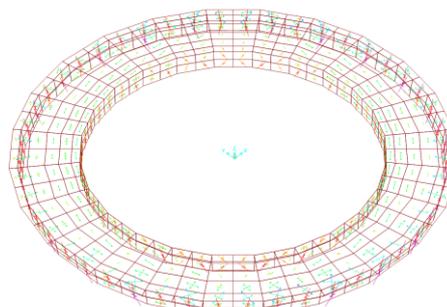


Figura 5.146 Direzioni delle tensioni principali (S-Max e S-Min) Top Face di pareti e pavimento del Primo Stilobate con cedimenti

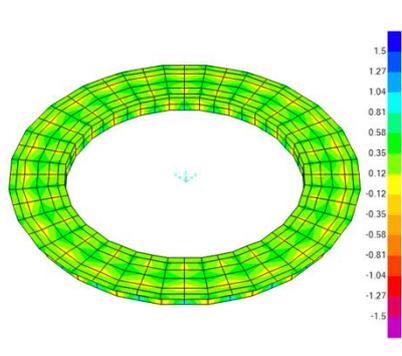


Figura 5.147 Tensioni S-Max Bottom Face di pareti e pavimento del Primo Stilobate senza cedimenti

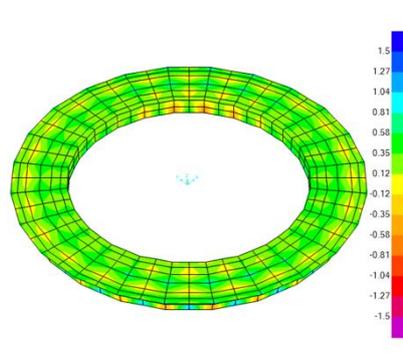


Figura 5.148 Tensioni S-Max Bottom Face di pareti e pavimento del Primo Stilobate con cedimenti

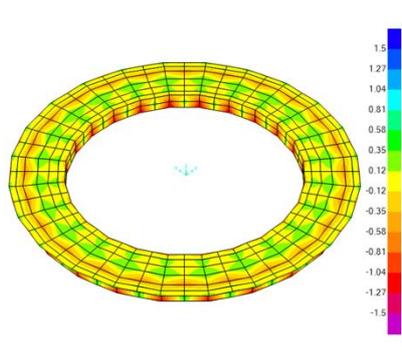


Figura 5.149 Tensioni S-Min Bottom Face di pareti e pavimento del Primo Stilobate senza cedimenti

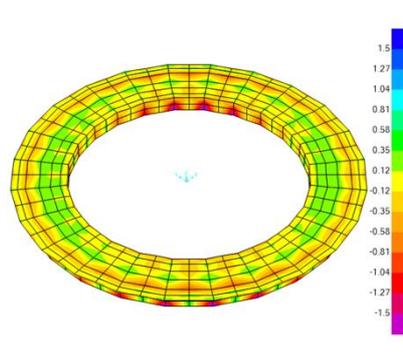


Figura 5.150 Tensioni S-Min Bottom Face di pareti e pavimento del Primo Stilobate con cedimenti

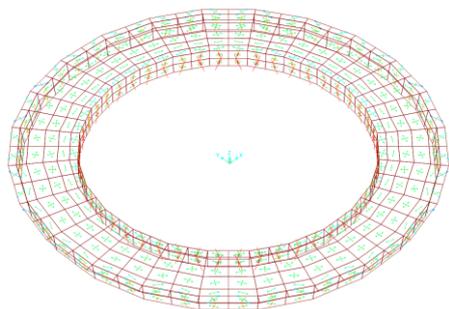


Figura 5.151 Direzioni delle tensioni principali (S-Max e S-Min) Bottom Face di pareti e pavimento del Primo Stilobate senza cedimenti

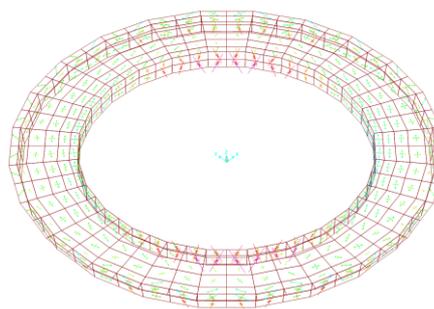


Figura 5.152 Direzioni delle tensioni principali (S-Max e S-Min) Bottom Face di pareti e pavimento del Primo Stilobate con cedimenti

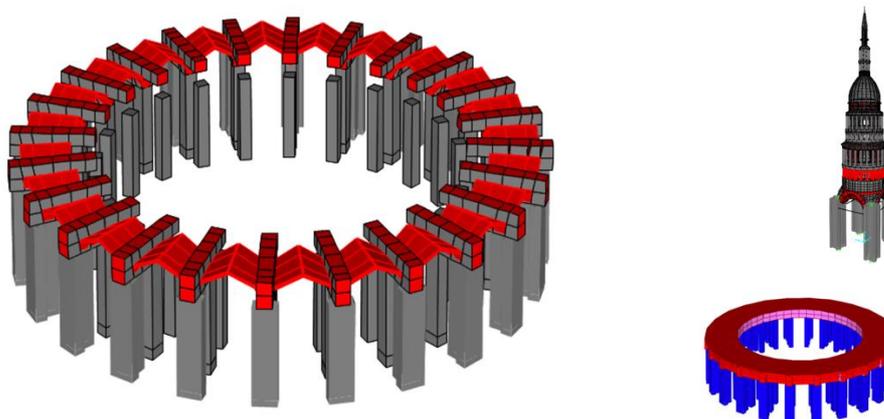


Figura 5.153 Modello delle volte circolari di Primo Stilobate

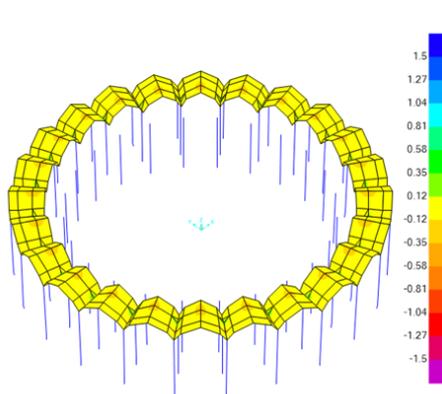


Figura 5.154 Tensione S1-1 Top Face di volte circolari del Primo Stilobate in direzione circonferenziale senza cedimenti

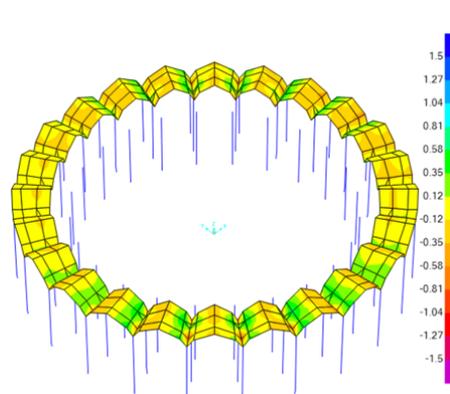


Figura 5.155 Tensione S1-1 Top Face di volte circolari del Primo Stilobate in direzione circonferenziale con cedimenti

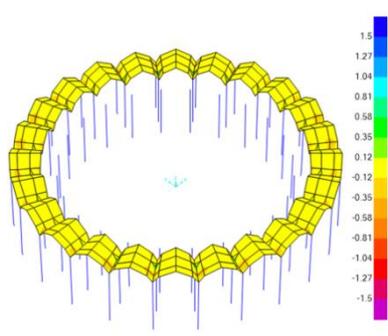


Figura 5.156 Tensioni S1-1 Bottom Face di volte circolarferenziali del Primo Stilobate in direzione circonferenziale senza cedimenti

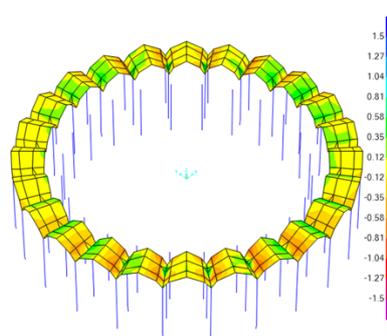


Figura 5.157 Tensioni S1-1 Bottom Face di volte circolarferenziali del Primo Stilobate in direzione circonferenziale con cedimenti

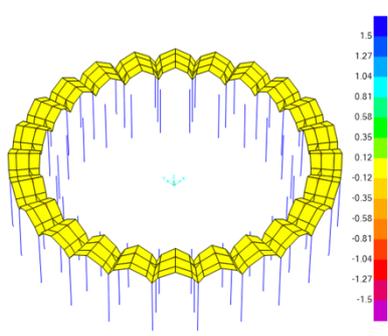


Figura 5.158 Tensioni S2-2 Top Face di volte circolarferenziali del Primo Stilobate in direzione radiale senza cedimenti

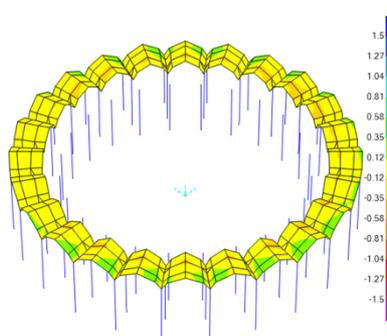


Figura 5.159 Tensioni S2-2 Top Face di volte circolarferenziali del Primo Stilobate in direzione radiale con cedimenti

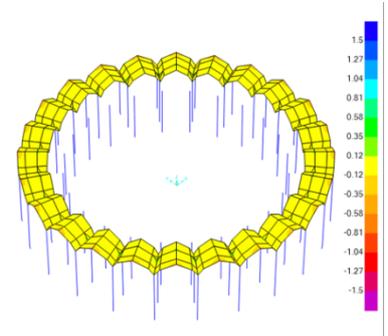


Figura 5.160 Tensioni S2-2 Bottom Face di volte circolarferenziali del Primo Stilobate in direzione radiale senza cedimenti

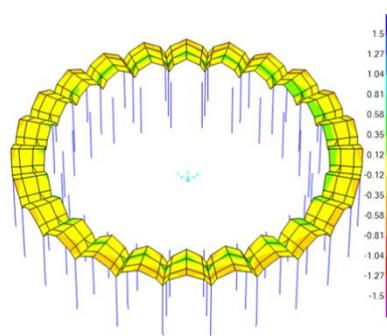


Figura 5.161 Tensioni S2-2 Bottom Face di pareti verticali del Primo Stilobate in direzione radiale con cedimenti

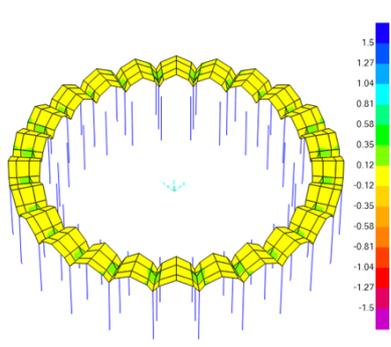


Figura 5.162 Tensione S-Max Top Face di volte circolari del Primo Stilobate senza cedimenti

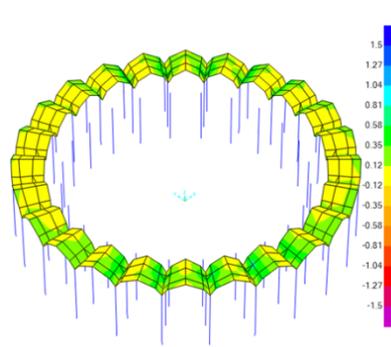


Figura 5.163 Tensione S-Max Top Face di volte circolari del Primo Stilobate con cedimenti

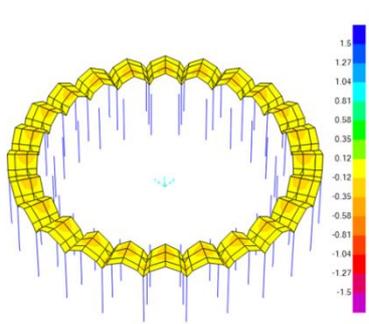


Figura 5.164 Tensioni S-Min Top Face di volte circolari del Primo Stilobate senza cedimenti

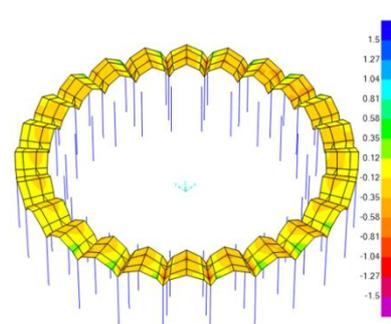


Figura 5.165 Tensioni S-Min Top Face di volte circolari del Primo Stilobate con cedimenti

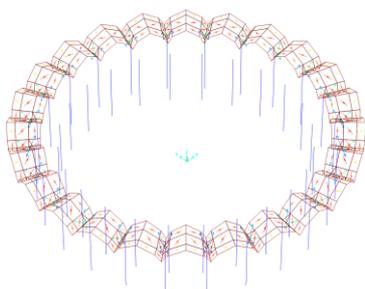


Figura 5.166 Direzioni delle tensioni principali (S-Max e S-Min) Top Face di volte circolari del Primo Stilobate senza cedimenti

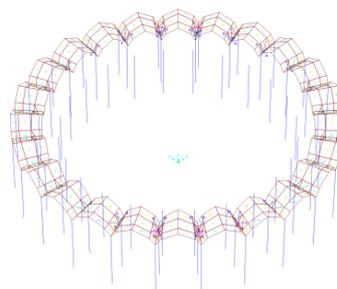


Figura 5.167 Direzioni delle tensioni principali (S-Max e S-Min) Top Face di volte circolari del Primo Stilobate con cedimenti

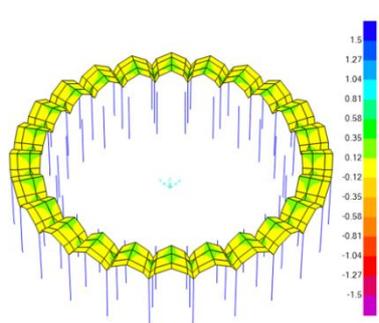


Figura 5.168 Tensioni S-Max Bottom Face di volte circolari del Primo Stilobate senza cedimenti

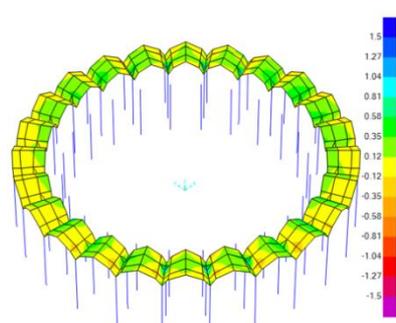


Figura 5.169 Tensioni S-Max Bottom Face di volte circolari del Primo Stilobate con cedimenti

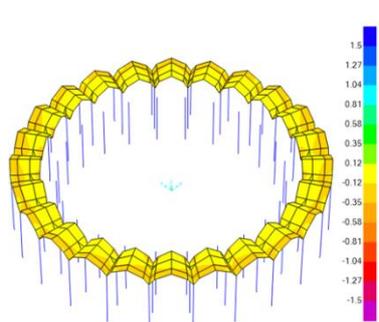


Figura 5.170 Tensioni S-Min Bottom Face di volte circolari del Primo Stilobate senza cedimenti

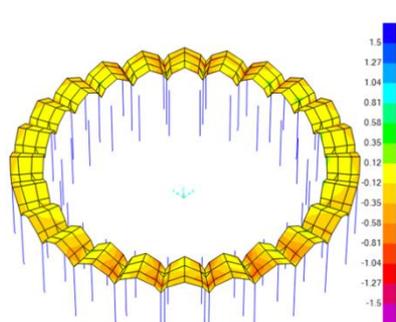


Figura 5.171 Tensioni S-Min Bottom Face di volte circolari del Primo Stilobate con cedimenti

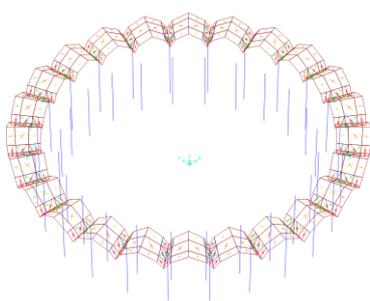


Figura 5.172 Direzioni delle tensioni principali (S-Max e S-Min) Bottom Face di volte circolari del Primo Stilobate senza cedimenti

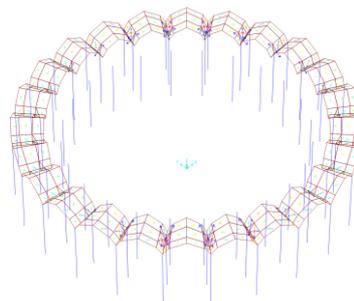


Figura 5.173 Direzioni delle tensioni principali (S-Max e S-Min) Bottom Face di volte circolari del Primo Stilobate con cedimenti

5.6 Primo Peristilio e Prima Cupola Cassettonata della Cupola di Basilica

5.6.1 Elementi portanti verticali di pilastri in “frame”

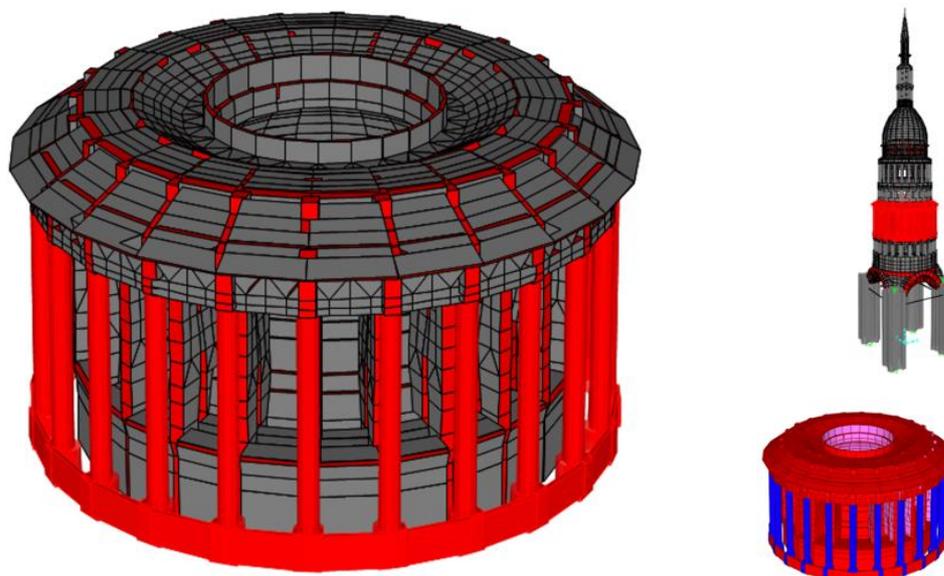


Figura 5.174 Elementi portanti pilastri di Primo Peristilio della Cupola

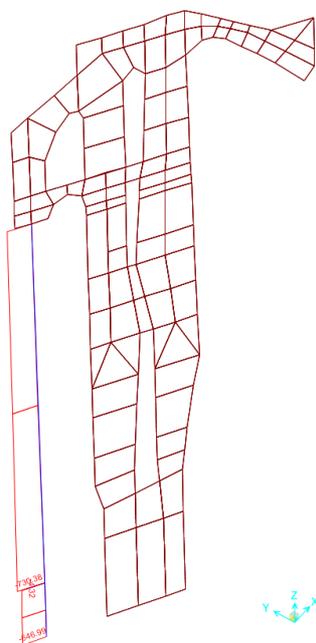


Figura 5.175 Sforzo assiale su singolo pilastro di Primo Peristilio della Cupola senza cedimenti

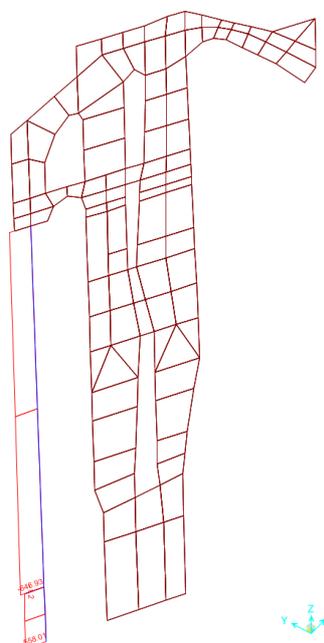


Figura 5.176 Sforzo assiale su singolo pilastro di Primo Peristilio della Cupola con cedimenti

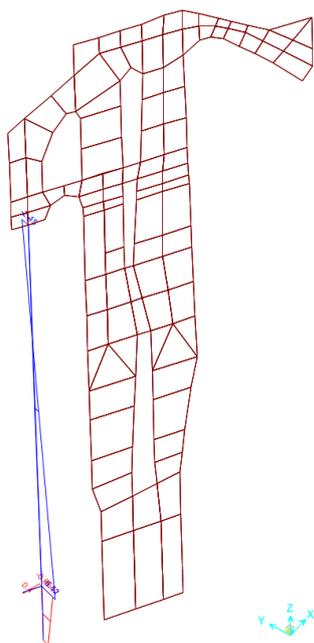


Figura 5.177 Momento flettente 2-2 in direzione circonferenziale su singolo pilastro di Primo Peristilio della Cupola

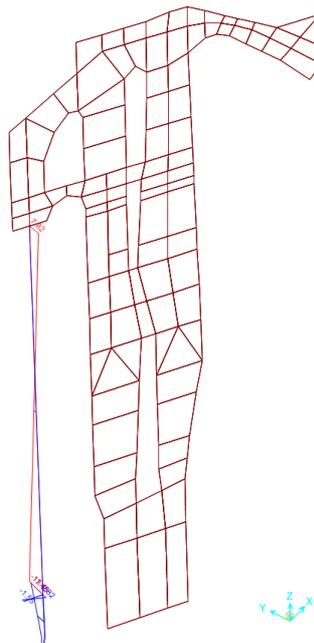


Figura 5.178 Momento flettente 2-2 i. direzione circonferenziale su singolo pilastro di Primo Peristilio della Cupola

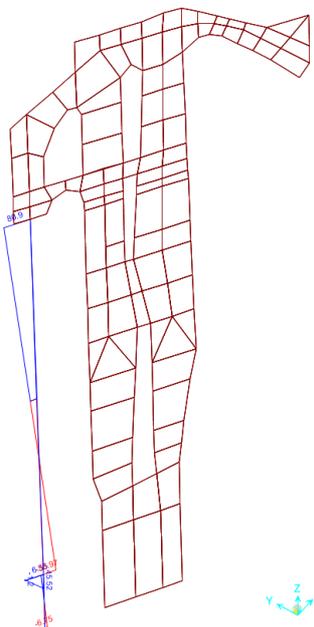


Figura 5.179 Momento flettente 3-3 in direzione radiale su singolo pilastro di Primo Peristilio della Cupola

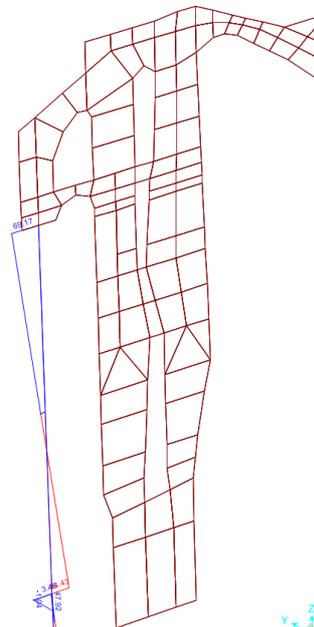


Figura 5.180 Momento flettente 3-3 in direzione radiale su singolo pilastro di Primo Peristilio della Cupola

Tabella 5.9 Sforzi assiali dei pilastri esterni del Primo Peristilio di Cupola ed il rapporto tra due condizioni

	Sforzo Assiale dei pilastri [kN]			
	Senza cedimenti	Con cedimenti		
Nord a Est (orario)	1	-705.96	-718.26	102%
	2	-729.81	-824.41	113%
	3	-747.92	-922.66	123%
	4	-748.54	-960.88	128%
	5	-732.69	-911.93	124%
	6	-707.91	-795.23	112%

	Sforzo Assiale dei pilastri [kN]			
	Senza cedimenti	Con cedimenti		
Est a Sud (orario)	7	-707.40	-705.67	100%
	8	-731.61	-686.34	94%
	9	-747.57	-684.14	92%
	10	-747.45	-668.68	89%
	11	-731.26	-651.61	89%
	12	-706.59	-673.10	95%

	Sforzo Assiale dei pilastri [kN]			
	Senza cedimenti	Con cedimenti		
Sud a Ovest (orario)	13	-706.38	-775.89	110%
	14	-731.41	-907.03	124%
	15	-749.58	-966.06	129%
	16	-754.00	-936.20	124%
	17	-736.05	-827.90	112%
	18	-707.10	-701.63	99%

	Sforzo Assiale dei pilastri [kN]			
	Senza cedimenti	Con cedimenti		
Ovest a Nord (orario)	19	-706.21	-632.38	90%
	20	-730.38	-646.93	89%
	21	-746.59	-686.45	92%
	22	-746.78	-701.80	94%
	23	-730.73	-680.97	93%
	24	-706.28	-662.85	94%

5.6.2 Elementi portanti verticali di pilastri in "shell"

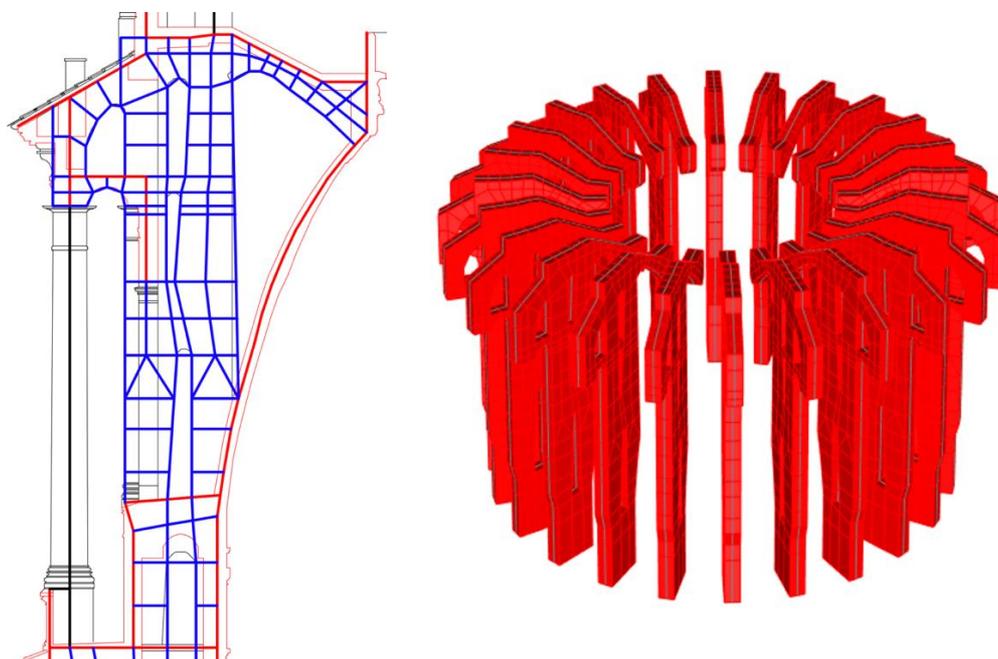


Figura 5.181 Pilastri interni di Primo Peristilio con gli elementi "shell"

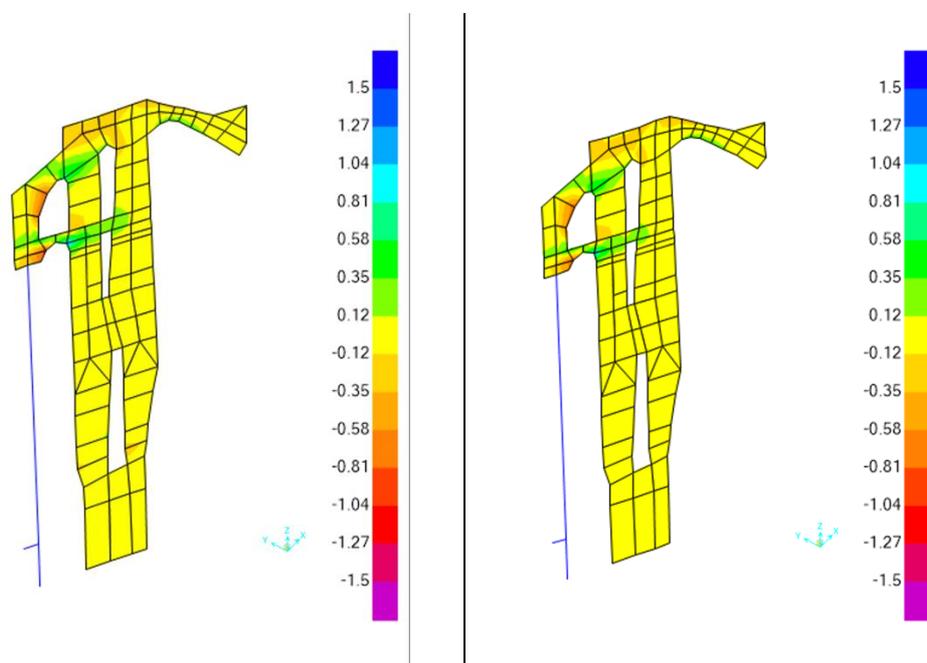


Figura 5.182 Tensione S1-1 Top Face di Pilastri interni di Primo Peristilio in direzione radiale senza cedimenti

Figura 5.183 Tensione S1-1 Top Face di Pilastri interni di Primo Peristilio in direzione radiale con cedimenti

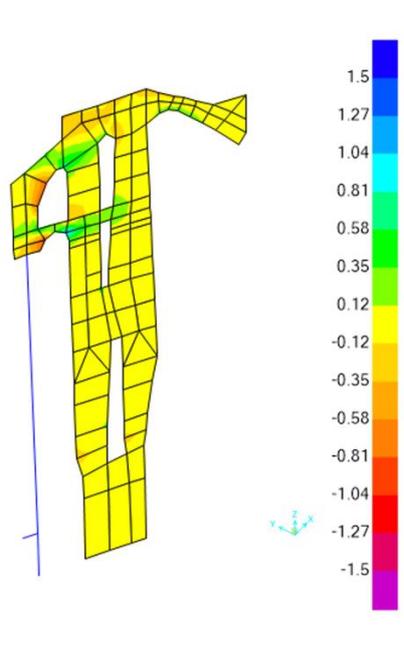


Figura 5.184 Tensioni S1-1 Bottom Face di Pilastrini interni di Primo Peristilio in direzione radiale senza cedimenti

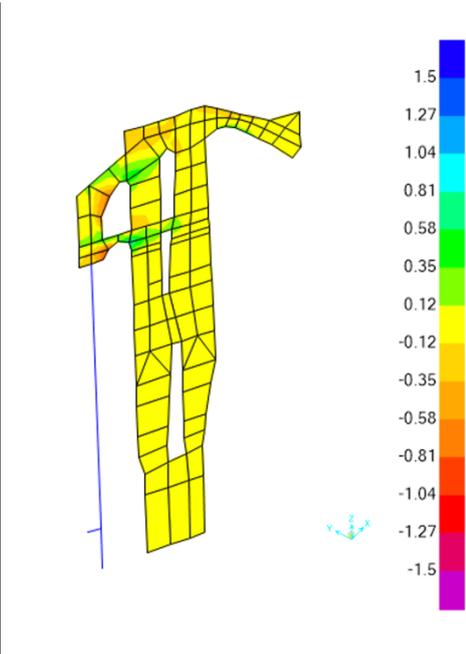


Figura 5.185 Tensioni S1-1 Bottom Face di Pilastrini interni di Primo Peristilio in direzione radiale con cedimenti

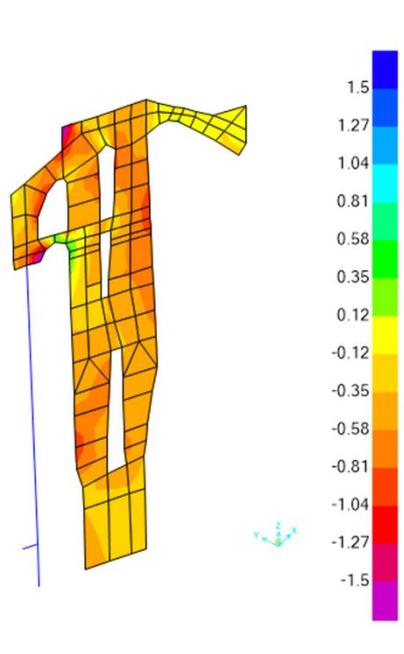


Figura 5.186 Tensioni S2-2 Top Face di Pilastrini interni di Primo Peristilio in direzione verticale senza cedimenti

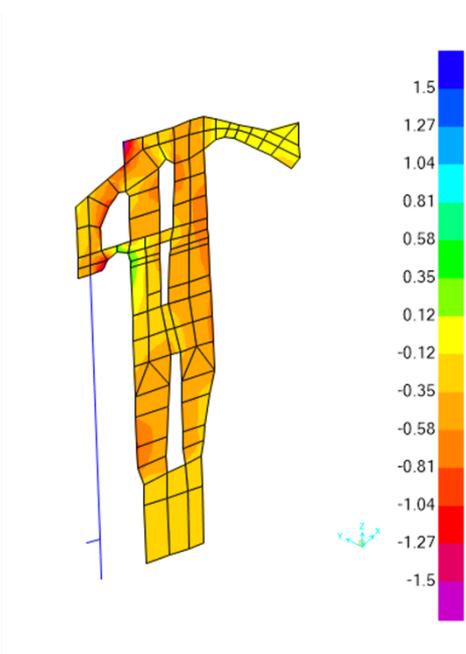


Figura 5.187 Tensioni S2-2 Top Face di Pilastrini interni di Primo Peristilio in direzione verticale con cedimenti

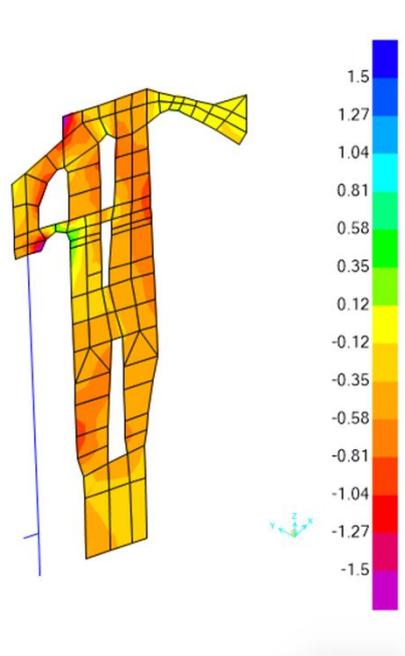


Figura 5.188 Tensioni S2-2 Bottom Face di Pilastri interni di Primo Peristilio in direzione verticale senza cedimenti

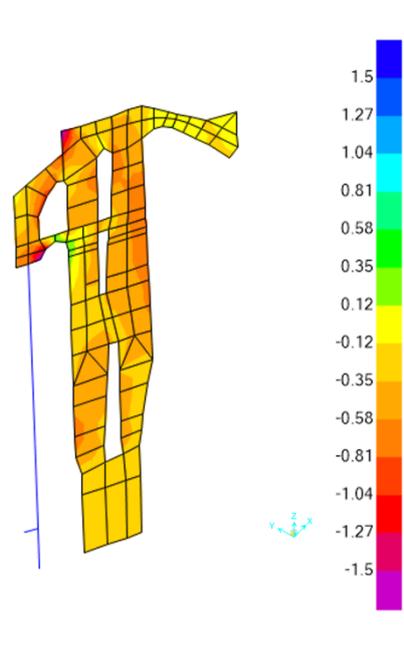


Figura 5.189 Tensioni S2-2 Bottom Face di Pilastri interni di Primo Peristilio in direzione verticale con cedimenti

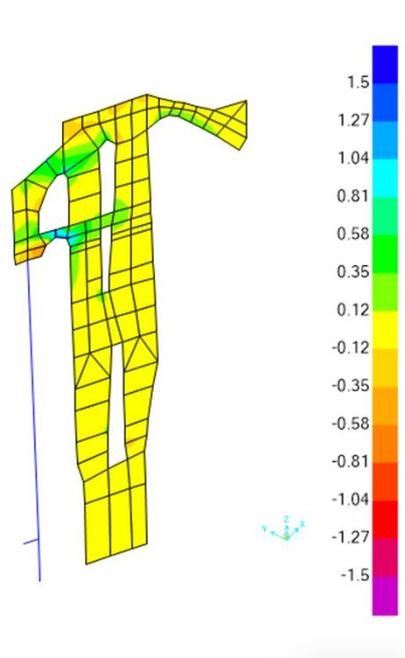


Figura 5.190 Tensione S-Max Top Face di Pilastri interni di Primo Peristilio senza cedimenti

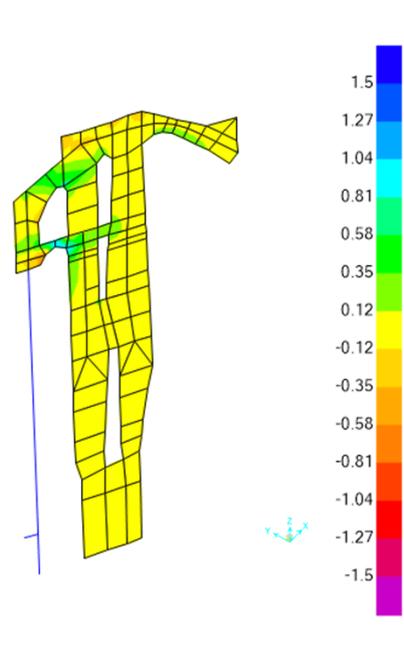


Figura 5.191 Tensione S-Max Top Face di Pilastri interni di Primo Peristilio con cedimenti

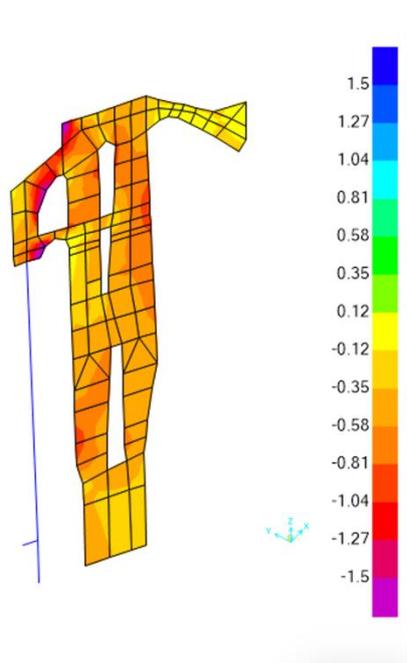


Figura 5.192 Tensioni S-Min Top Face di Pilastrini interni di Primo Peristilio senza cedimenti

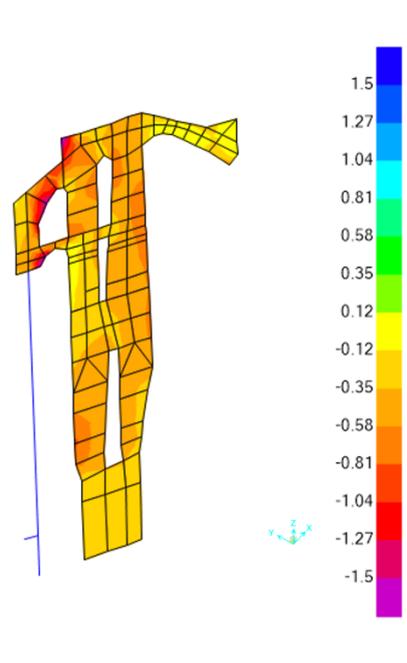


Figura 5.193 Tensioni S-Min Top Face di Pilastrini interni di Primo Peristilio con cedimenti

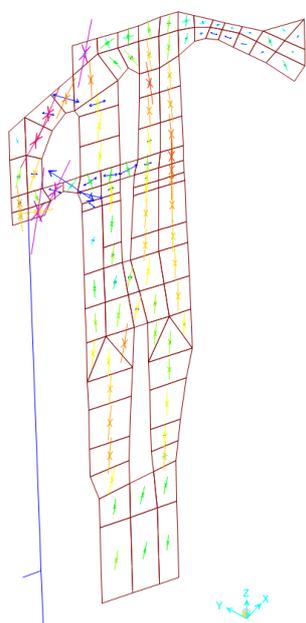


Figura 5.194 Direzioni delle tensioni principali (S-Max e S-Min) Top Face di Pilastrini interni del Primo Peristilio senza cedimenti

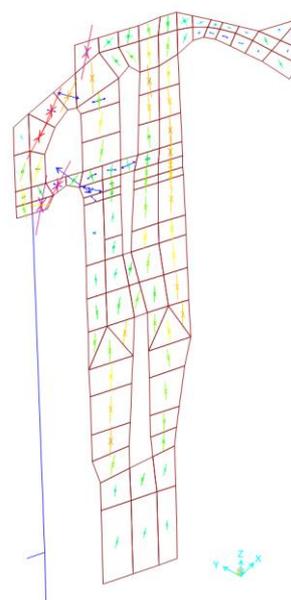


Figura 5.195 Direzioni delle tensioni principali (S-Max e S-Min) Top Face di Pilastrini interni del Primo Peristilio con cedimenti

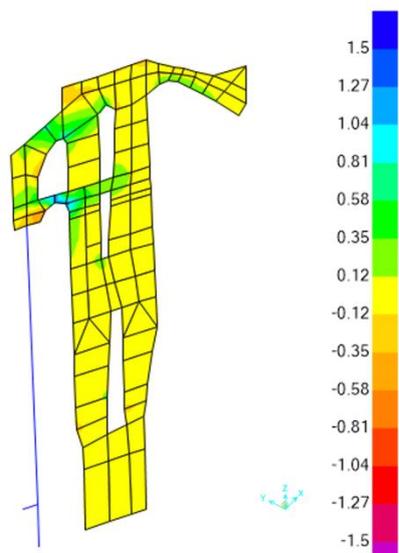


Figura 5.196 Tensioni S-Max Bottom Face di Pilastri interni di Primo Peristilio senza cedimenti

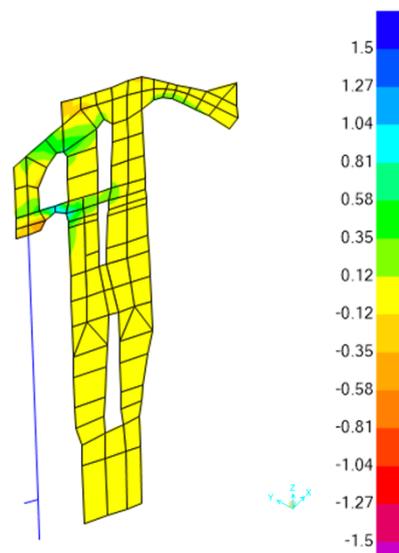


Figura 5.197 Tensioni S-Max Bottom Face di Pilastri interni di Primo Peristilio con cedimenti

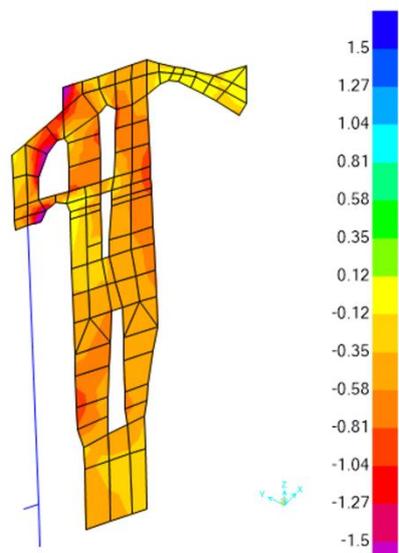


Figura 5.198 Tensioni S-Min Bottom Face di Pilastri interni di Primo Peristilio senza cedimenti

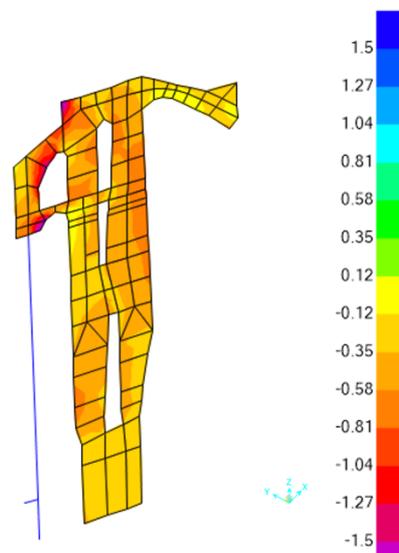


Figura 5.199 Tensioni S-Min Bottom Face di Pilastri interni di Primo Peristilio con cedimenti

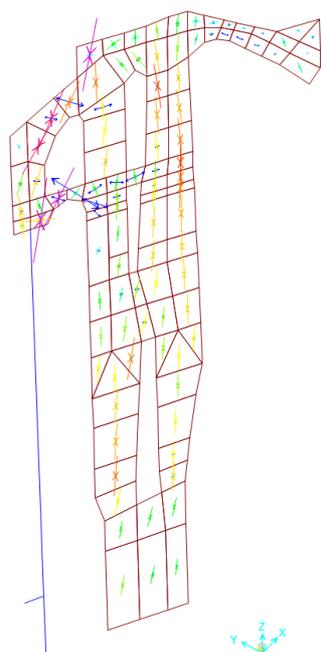


Figura 5.200 Direzioni delle tensioni principali (S-Max e S-Min) Bottom Face di Pilastrini interni del Primo Peristilio senza cedimenti

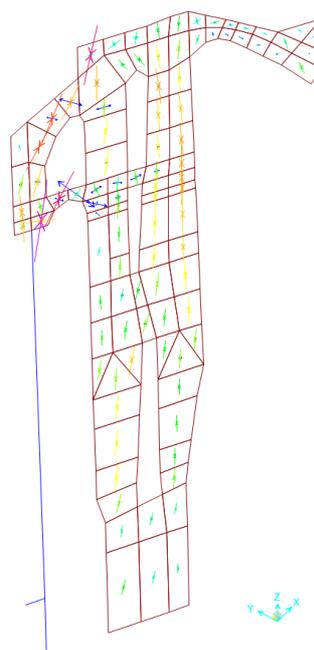


Figura 5.201 Direzioni delle tensioni principali (S-Max e S-Min) Bottom Face di Pilastrini interni del Primo Peristilio con cedimenti

5.6.3 Elementi portanti circolari in “shell”

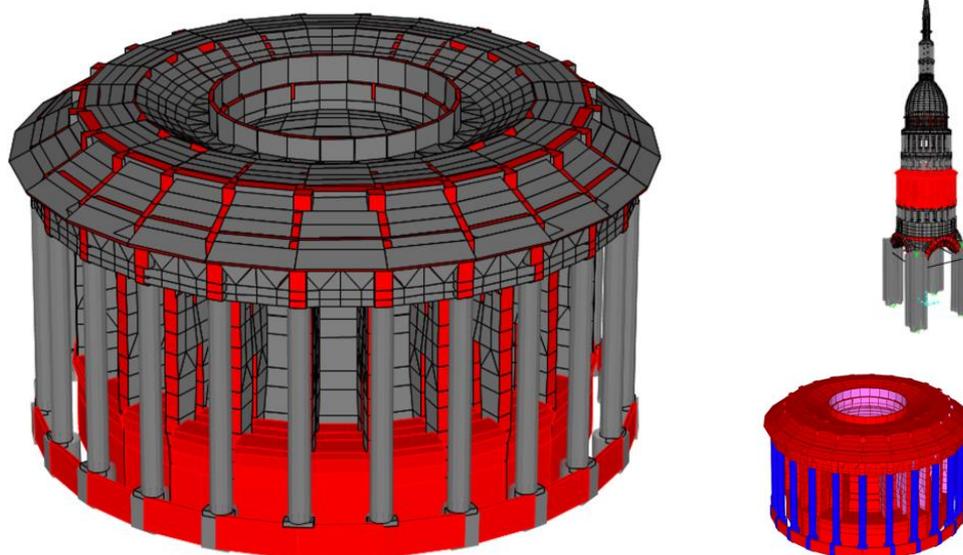


Figura 5.202 Elementi circolari di Primo Peristilio parte inferiore

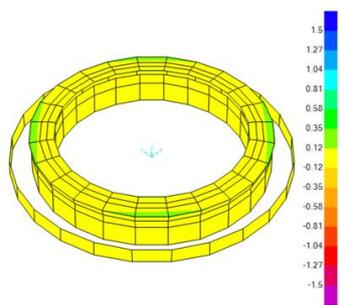


Figura 5.203 Tensione S1-1 Top Face di pareti verticali inferiori e pavimento orizzontali inferiori del Primo Peristilio in direzione circonferenziale senza cedimenti

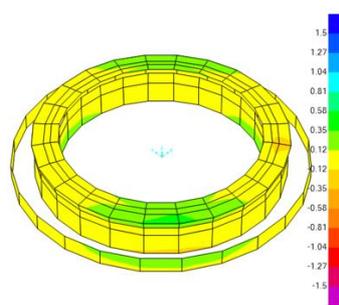


Figura 5.204 Tensione S1-1 Top Face di pareti verticali inferiori e pavimento orizzontali inferiori del Primo Peristilio in direzione circonferenziale con cedimenti

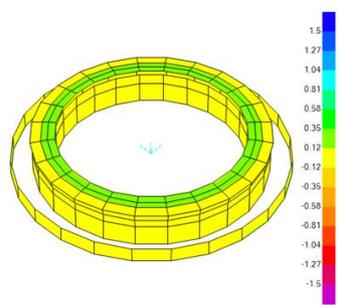


Figura 5.205 Tensioni S1-1 Bottom Face di pareti verticali inferiori e pavimento orizzontali inferiori del Primo Peristilio in direzione circonferenziale senza cedimenti

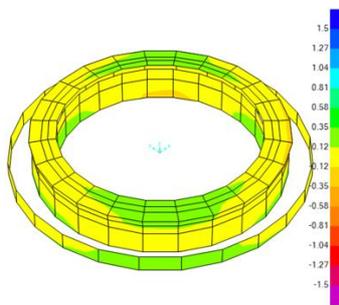


Figura 5.206 Tensioni S1-1 Bottom Face di pareti verticali inferiori e pavimento orizzontali inferiori del Primo Peristilio in direzione circonferenziale con cedimenti

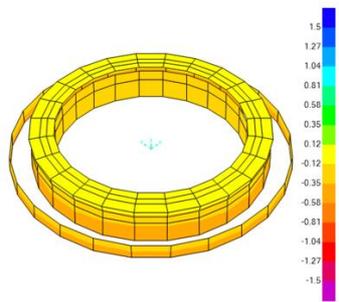


Figura 5.207 Tensioni S2-2 Top Face di pareti inferiori del Primo Peristilio in direzione verticali e pavimento inferiori in direzione radiale senza cedimenti

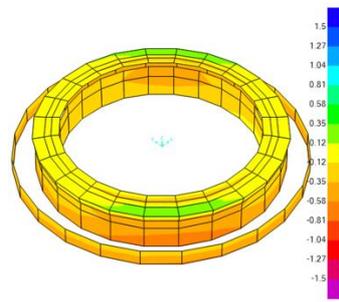


Figura 5.208 Tensioni S2-2 Top Face di pareti inferiori del Primo Peristilio in direzione verticali e pavimento inferiori in direzione radiale con cedimenti

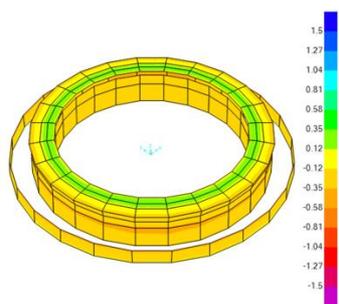


Figura 5.209 Tensioni S2-2 Bottom Face di pareti inferiori del Primo Peristilio in direzione verticali e pavimento inferiori in direzione radiale senza cedimenti

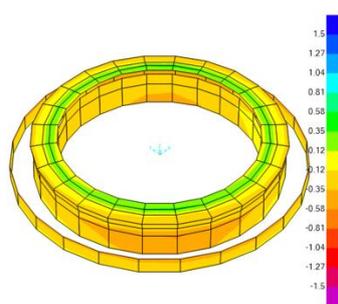


Figura 5.210 Tensioni S2-2 Bottom Face di pareti verticali del Primo Peristilio in direzione verticali e pavimento orizzontali in direzione radiale con cedimenti

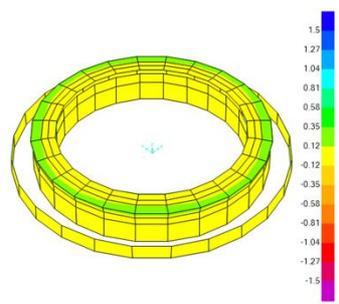


Figura 5.211 Tensione S-Max Top Face di pareti e pavimenti inferiori del Primo Peristilio senza cedimenti

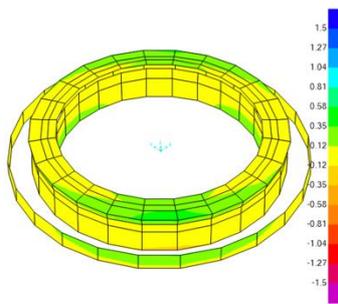


Figura 5.212 Tensione S-Max Top Face di pareti e pavimenti inferiori del Primo Peristilio con cedimenti

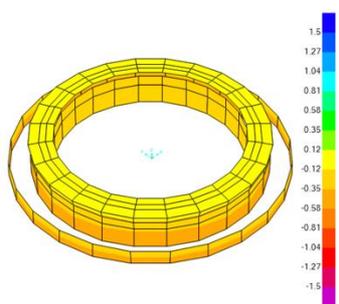


Figura 5.213 Tensioni S-Min Top Face di pareti e pavimenti inferiori del Primo Peristilio senza cedimenti

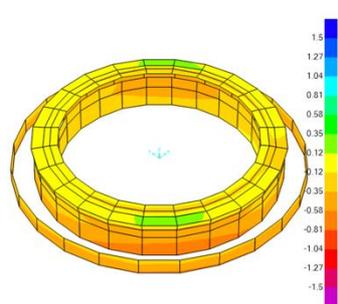


Figura 5.214 Tensioni S-Min Top Face di pareti e pavimenti inferiori del Primo Peristilio con cedimenti

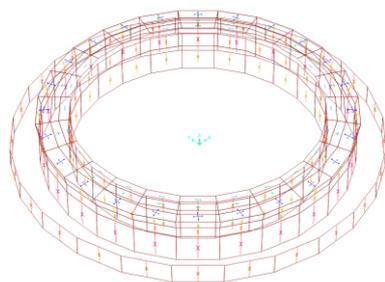


Figura 5.215 Direzioni delle tensioni principali (S-Max e S-Min) Top Face di pareti e pavimenti inferiori del Primo Peristilio senza cedimenti

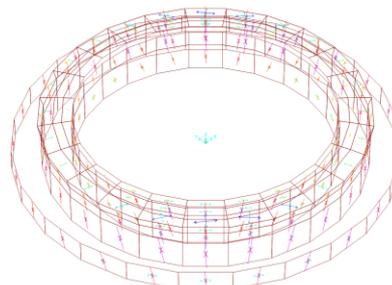


Figura 5.216 Direzioni delle tensioni principali (S-Max e S-Min) Top Face di pareti e pavimenti inferiori del Primo Peristilio con cedimenti

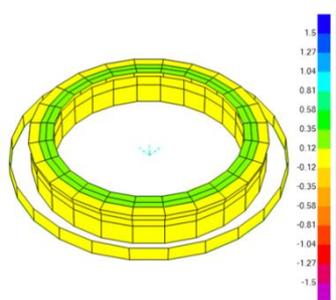


Figura 5.217 Tensioni S-Max Bottom Face di pareti e pavimenti inferiori del Primo Peristilio senza cedimenti

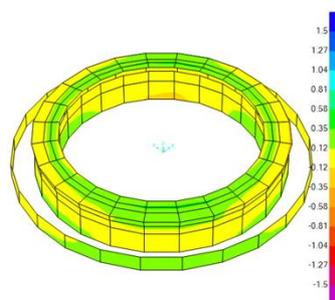


Figura 5.218 Tensioni S-Max Bottom Face di pareti e pavimenti inferiori del Primo Peristilio con cedimenti

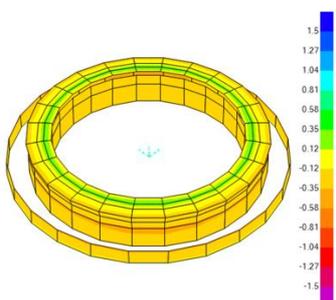


Figura 5.219 Tensioni S-Min Bottom Face di pareti e pavimenti inferiori del Primo Peristilio senza cedimenti

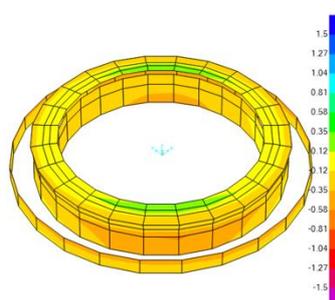


Figura 5.220 Tensioni S-Min Bottom Face di pareti e pavimenti inferiori del Primo Peristilio con cedimenti

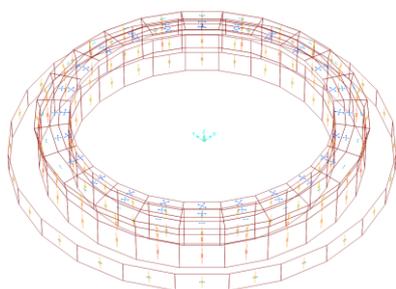


Figura 5.221 Direzioni delle tensioni principali (S-Max e S-Min) Bottom Face di pareti e pavimenti inferiori del Primo Peristilio senza cedimenti

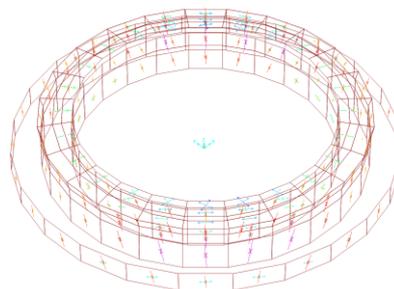


Figura 5.222 Direzioni delle tensioni principali (S-Max e S-Min) Bottom Face di pareti e pavimenti inferiori del Primo Peristilio con cedimenti

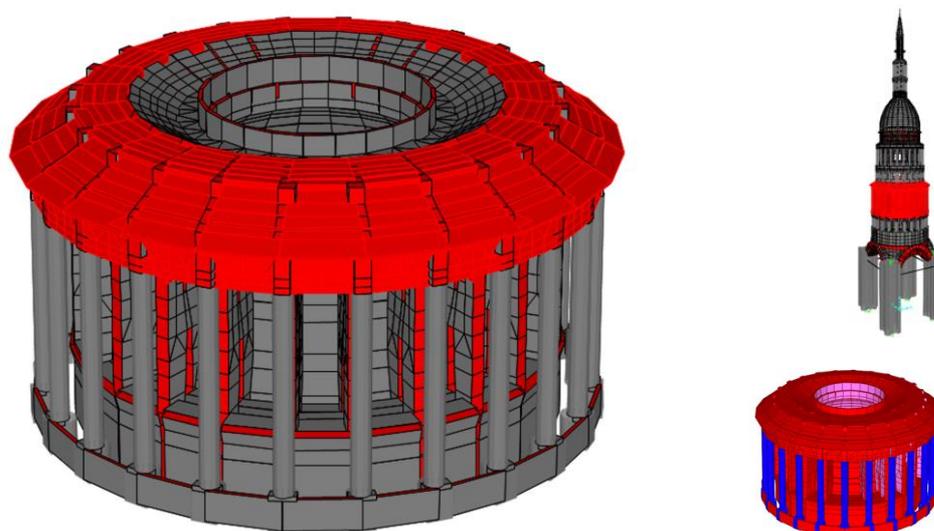


Figura 5.223 Elementi circolari di Primo Peristilio parte superiore

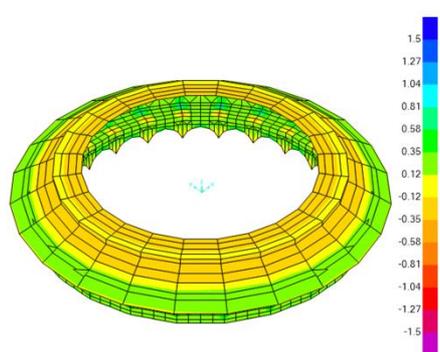


Figura 5.224 Tensione S1-1 Top Face di pareti superiori e pavimento superiori del Primo Peristilio in direzione circonferenziale senza cedimenti

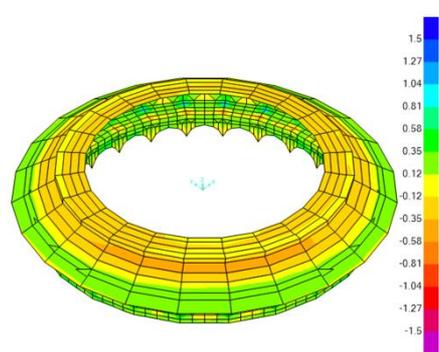


Figura 5.225 Tensione S1-1 Top Face di pareti superiori e pavimento superiori del Primo Peristilio in direzione circonferenziale con cedimenti

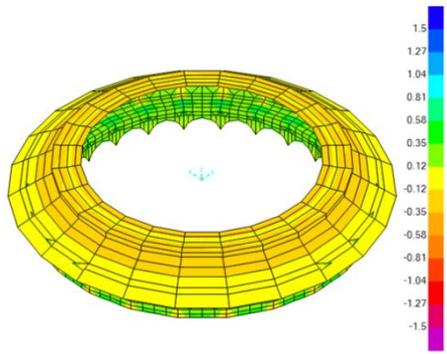


Figura 5.226 Tensioni S1-1 Bottom Face di pareti superiori e pavimento superiori del Primo Peristilio in direzione circonferenziale senza cedimenti

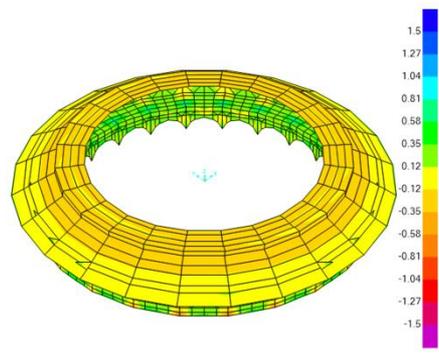


Figura 5.227 Tensioni S1-1 Bottom Face di pareti superiori e pavimento superiori del Primo Peristilio in direzione circonferenziale con cedimenti

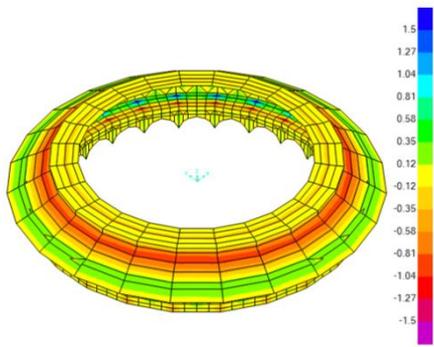


Figura 5.228 Tensioni S2-2 Top Face di pareti superiori del Primo Peristilio in direzione verticali e pavimento superiori in direzione radiale senza cedimenti

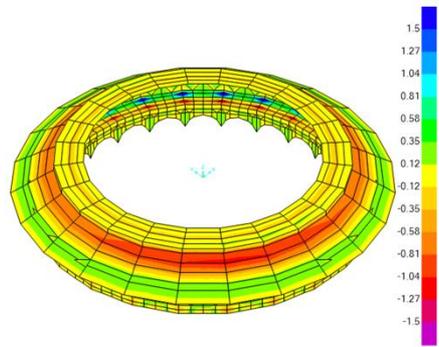


Figura 5.229 Tensioni S2-2 Top Face di pareti superiori del Primo Peristilio in direzione verticali e pavimento superiori in direzione radiale con cedimenti

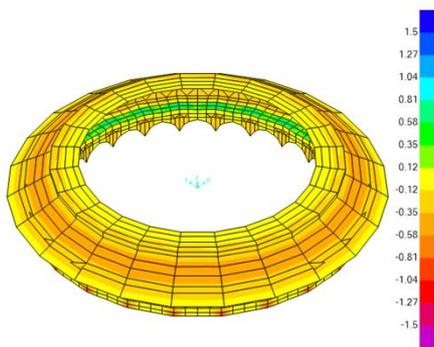


Figura 5.230 Tensioni S2-2 Bottom Face di pareti superiori del Primo Peristilio in direzione verticali e pavimento superiori in direzione radiale senza cedimenti

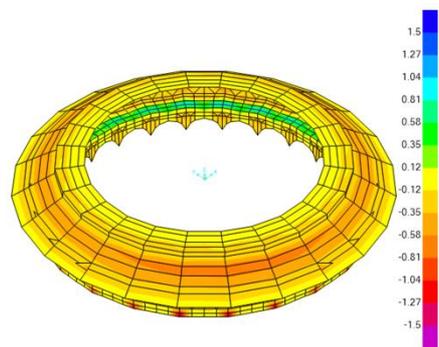


Figura 5.231 Tensioni S2-2 Bottom Face di pareti superiori del Primo Peristilio in direzione verticali e pavimento superiori in direzione radiale con cedimenti

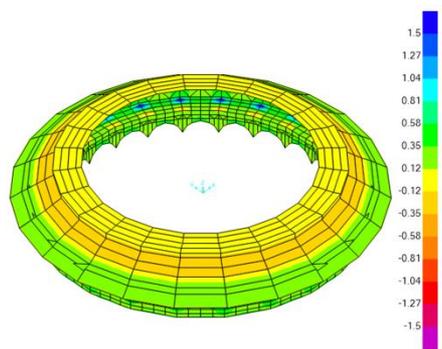


Figura 5.232 Tensione S-Max Top Face di pareti e pavimenti superiori del Primo Peristilio senza cedimenti

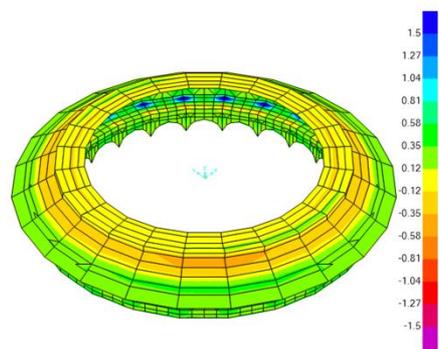


Figura 5.233 Tensione S-Max Top Face di pareti e pavimenti superiori del Primo Peristilio con cedimenti

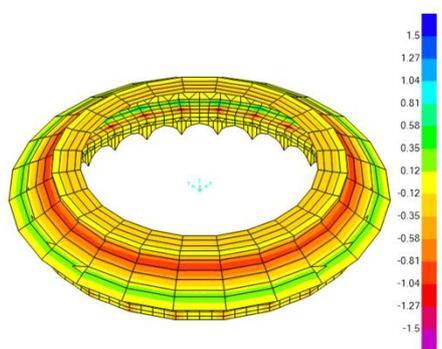


Figura 5.234 Tensioni S-Min Top Face di pareti verticali e pavimenti superiori del Primo Peristilio senza cedimenti

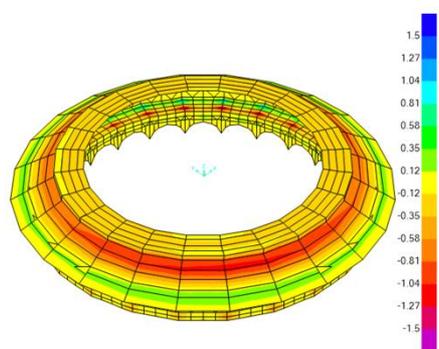


Figura 5.235 Tensioni S-Min Top Face di pareti e pavimenti superiori del Primo Peristilio con cedimenti

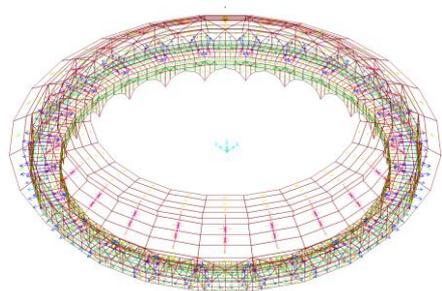


Figura 5.236 Direzioni delle tensioni principali (S-Max e S-Min) Top Face di pareti e pavimenti superiori del Primo Peristilio senza cedimenti

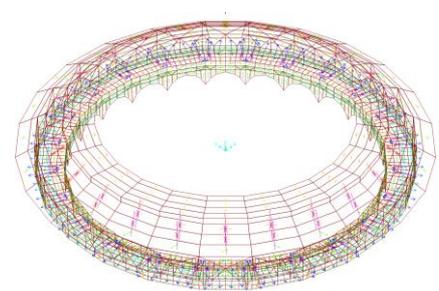


Figura 5.237 Direzioni delle tensioni principali (S-Max e S-Min) Top Face di pareti e pavimenti superiori del Primo Peristilio con cedimenti

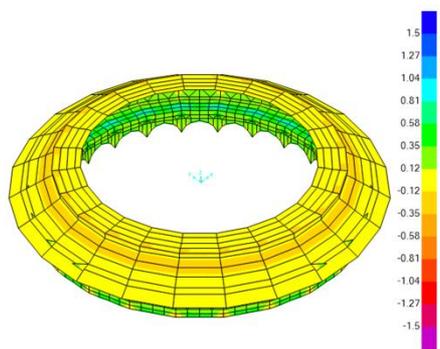


Figura 5.238 Tensioni S-Max Bottom Face di pareti e pavimenti del Primo Peristilio senza cedimenti

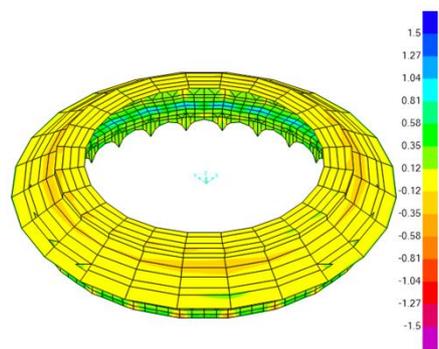


Figura 5.239 Tensioni S-Max Bottom Face di pareti e pavimenti del Primo Peristilio con cedimenti

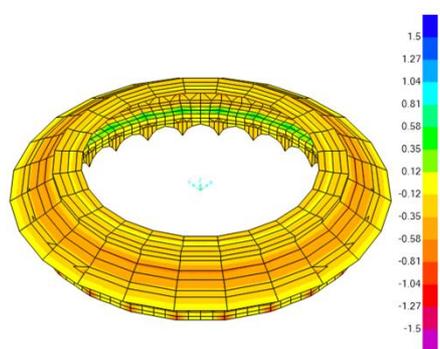


Figura 5.240 Tensioni S-Min Bottom Face di pareti e pavimenti superiori del Primo Peristilio senza cedimenti

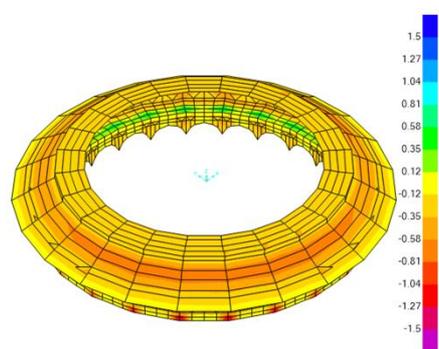


Figura 5.241 Tensioni S-Min Bottom Face di pareti e pavimenti superiori del Primo Peristilio con cedimenti

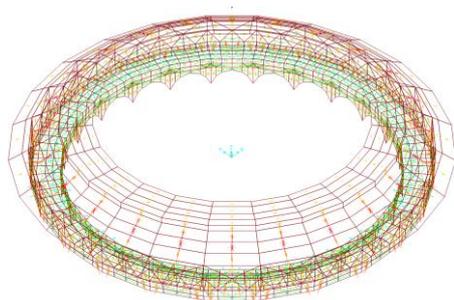


Figura 5.242 Direzioni delle tensioni principali (S-Max e S-Min) Bottom Face di pareti e pavimenti superiori del Primo Peristilio senza cedimenti

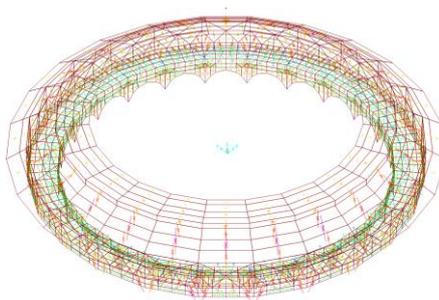


Figura 5.243 Direzioni delle tensioni principali (S-Max e S-Min) Bottom Face di pareti e pavimenti superiori del Primo Peristilio con cedimenti

5.6.4 Prima Cupola Cassettonata di Basilica

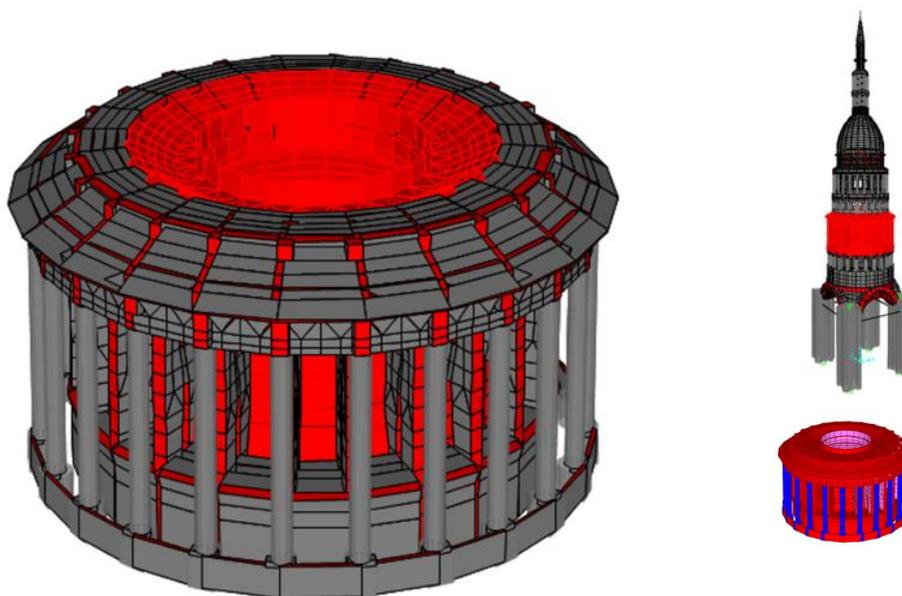


Figura 5.244 Prima Cupola Cassettonata di Basilica

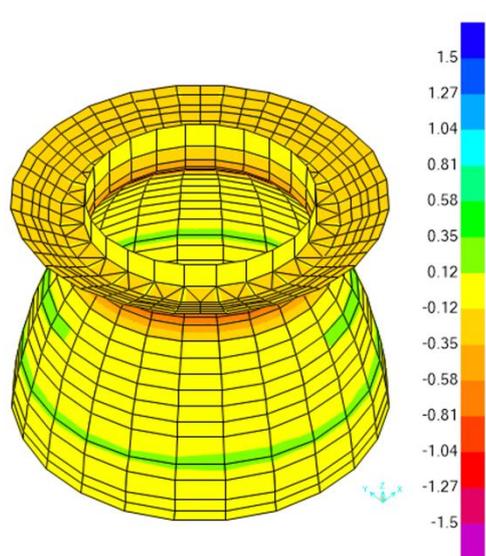


Figura 5.245 Tensione S1-1 Top Face di Prima Cupola Cassettonata e pavimento in direzione circonferenziale senza cedimenti

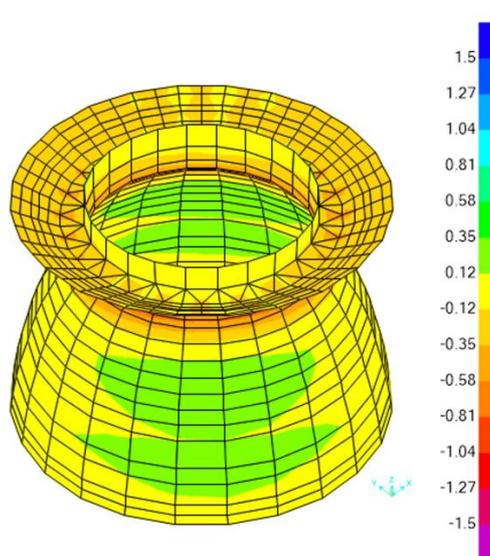


Figura 5.246 Tensione S1-1 Top Face di Prima Cupola Cassettonata e pavimento in direzione circonferenziale con cedimenti

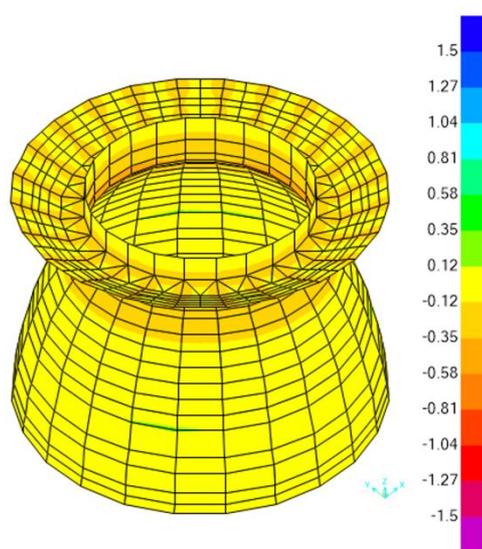


Figura 5.247 Tensioni S1-1 Bottom Face di Prima Cupola Cassettonata e pavimento in direzione circonferenziale senza cedimenti

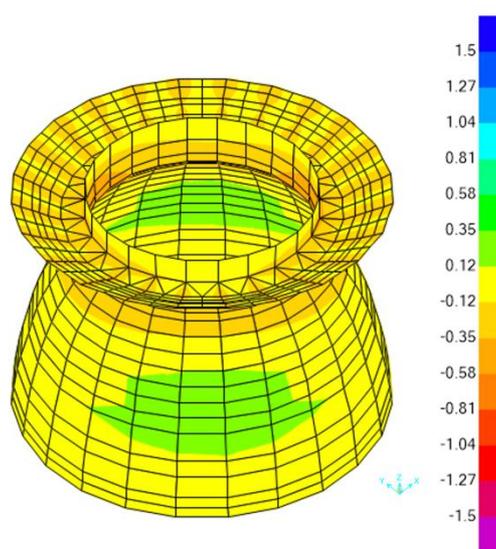


Figura 5.248 Tensioni S1-1 Bottom Face di Prima Cupola Cassettonata e pavimento in direzione circonferenziale con cedimenti

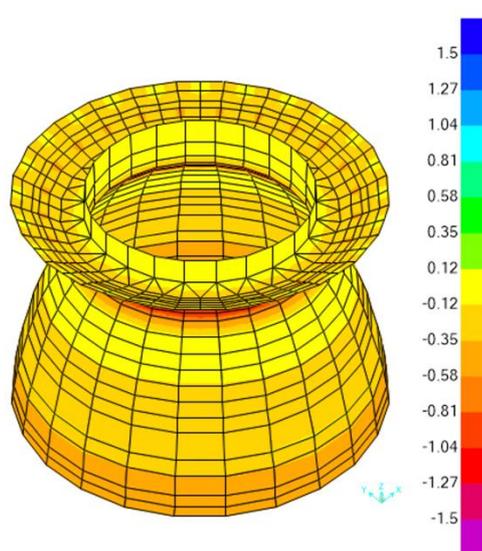


Figura 5.249 Tensioni S2-2 Top Face di Prima Cupola Cassettonata in direzione inclinati verso al centro di asse verticale di Cupola e pavimento in direzione radiale senza cedimenti

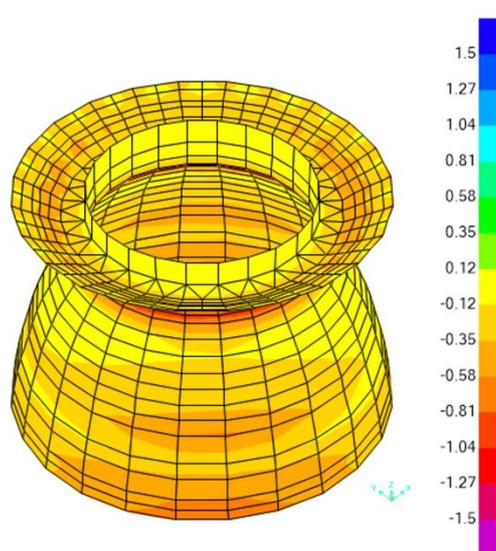


Figura 5.250 Tensioni S2-2 Top Face di Prima Cupola Cassettonata in direzione inclinati verso al centro di asse verticale di Cupola e pavimento in direzione radiale con cedimenti

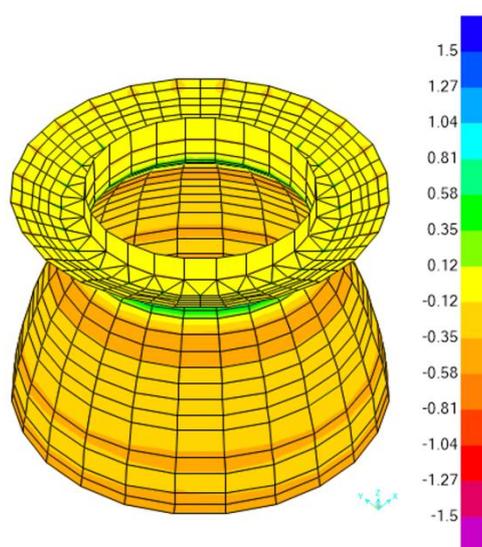


Figura 5.251 Tensioni S2-2 Bottom Face di Prima Cupola Cassettonata in direzione inclinati verso al centro di asse verticale di Cupola e pavimento in direzione radiale senza cedimenti

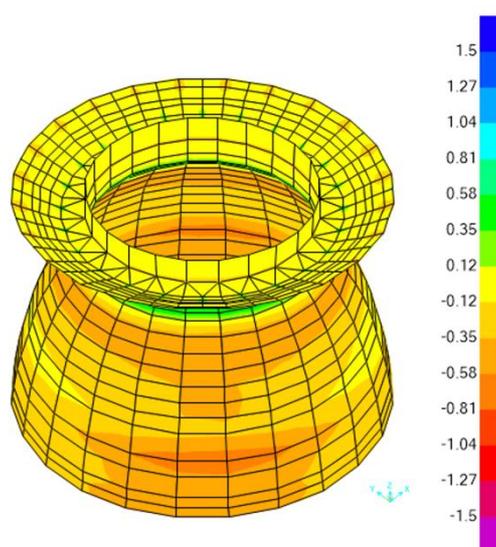


Figura 5.252 Tensioni S2-2 Bottom Face di Prima Cupola Cassettonata in direzione inclinati verso al centro di asse verticale di Cupola e pavimento in direzione radiale con cedimenti

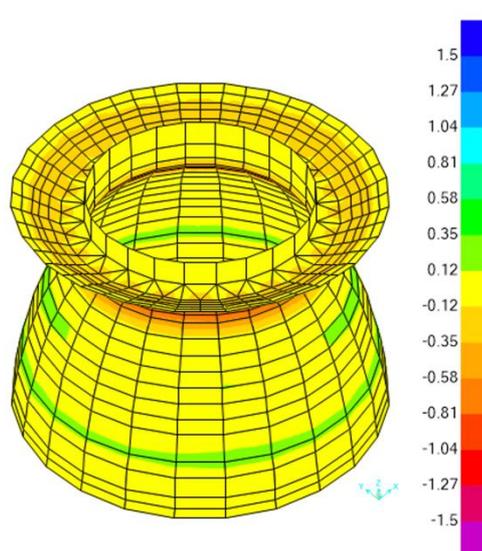


Figura 5.253 Tensione S-Max Top Face di Prima Cupola Cassettonata e pavimento senza cedimenti

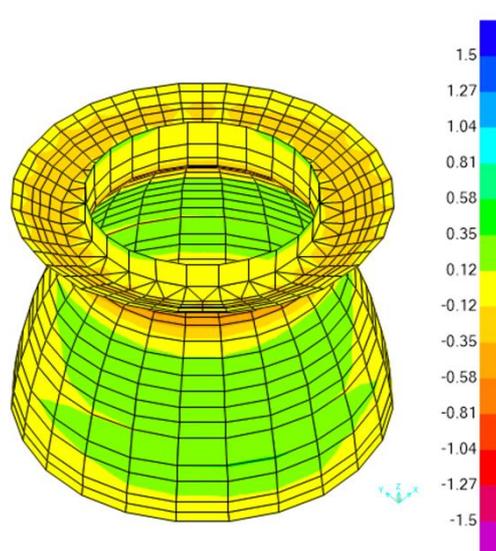


Figura 5.254 Tensione S-Max Top Face di Prima Cupola Cassettonata e pavimento con cedimenti

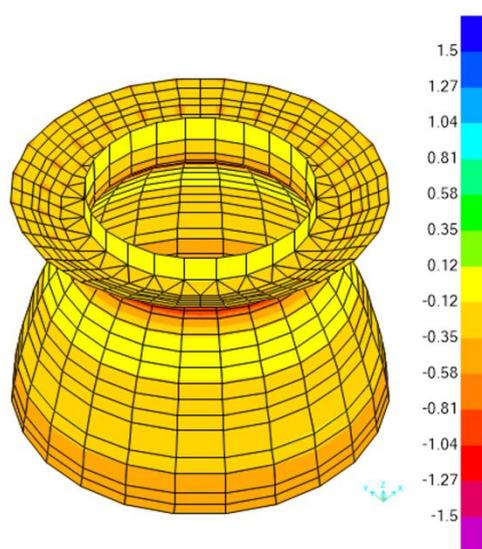


Figura 5.255 Tensioni S-Min Top Face di Prima Cupola Cassettonata e pavimento senza cedimenti

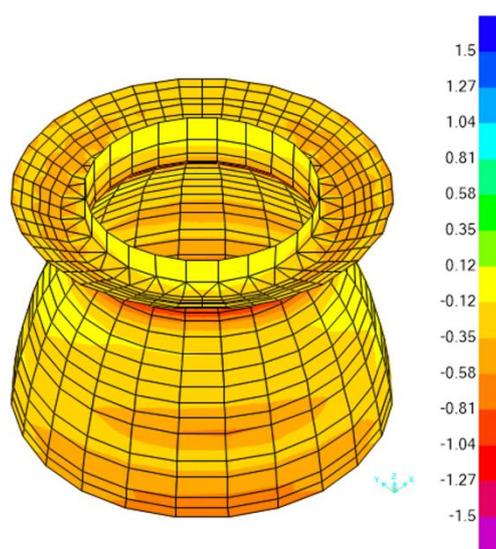


Figura 5.256 Tensioni S-Min Top Face di Prima Cupola Cassettonata e pavimento con cedimenti

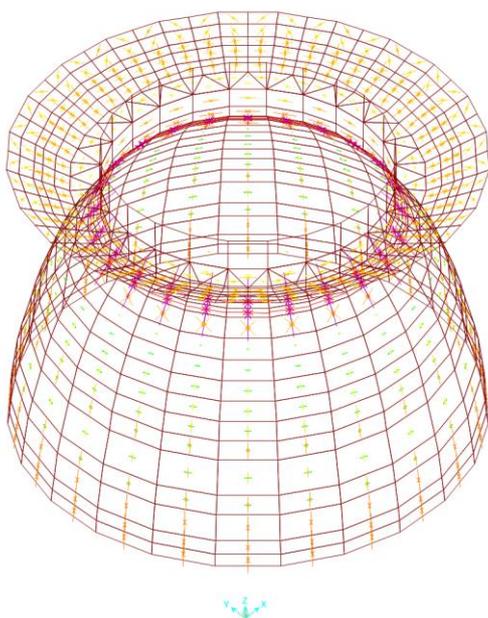


Figura 5.257 Direzioni delle tensioni principali (S-Max e S-Min) Top Face di Prima Cupola Cassettonata e pavimento senza cedimenti

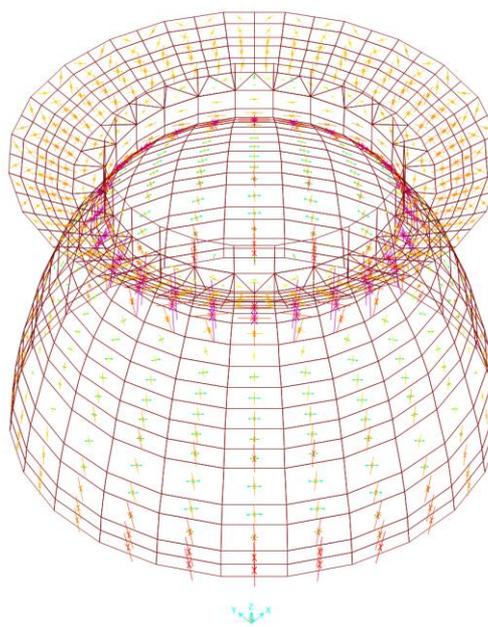


Figura 5.258 Direzioni delle tensioni principali (S-Max e S-Min) Top Face di Prima Cupola Cassettonata e pavimento con cedimenti

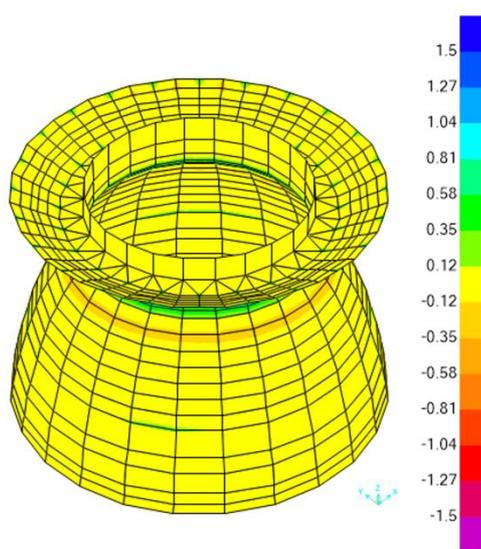


Figura 5.259 Tensioni S-Max Bottom Face di Prima Cupola Cassettonata e pavimento senza cedimenti

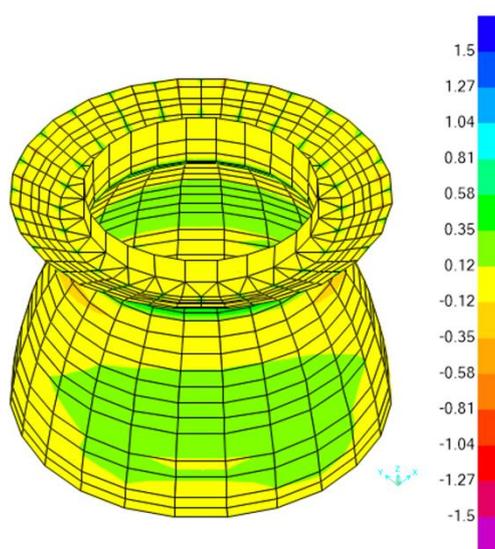


Figura 5.260 Tensioni S-Max Bottom Face di Prima Cupola Cassettonata e pavimento con cedimenti

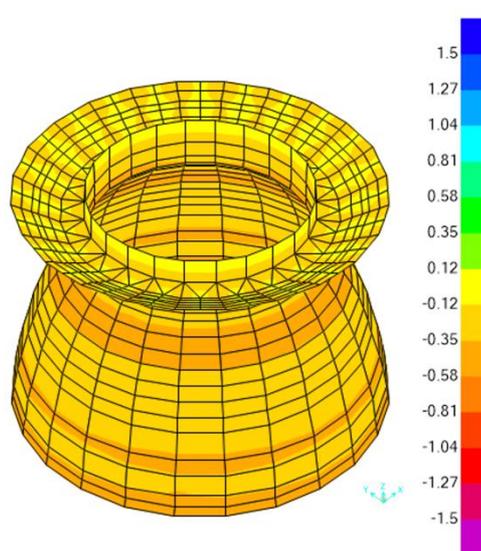


Figura 5.261 Tensioni S-Min Bottom Face di Prima Cupola Cassettonata e pavimento senza cedimenti

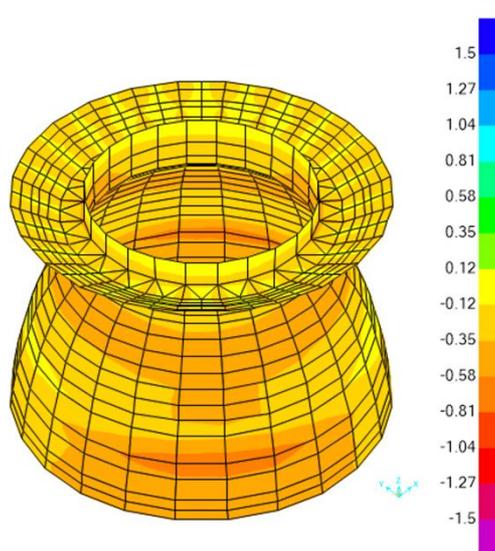


Figura 5.262 Tensioni S-Min Bottom Face di Prima Cupola Cassettonata e pavimento con cedimenti

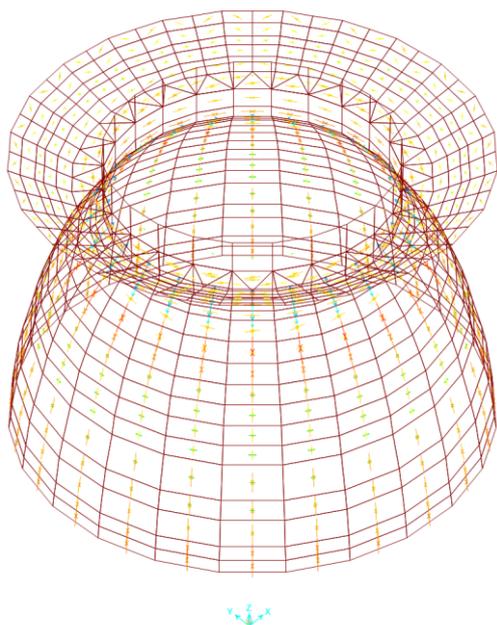


Figura 5.263 Direzioni delle tensioni principali (S-Max e S-Min) Bottom Face di Prima Cupola Cassettonata e pavimento senza cedimenti

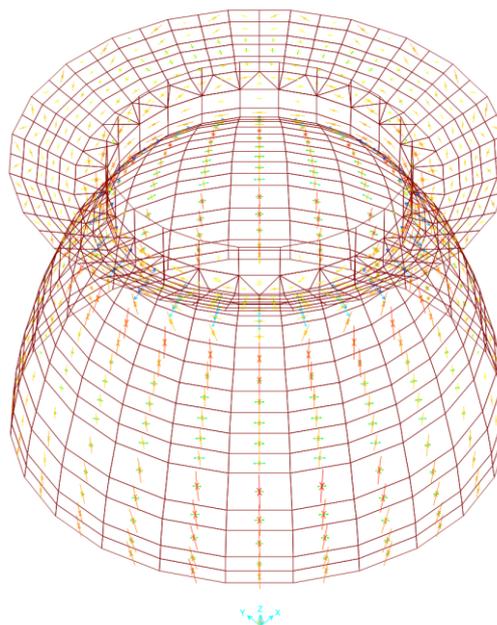


Figura 5.264 Direzioni delle tensioni principali (S-Max e S-Min) Top Face di Prima Cupola Cassettonata e pavimento con cedimenti

5.7 Secondo Stilobate della Cupola Di Basilica

5.7.1 Elementi portanti verticali dei pilastri in “frame”

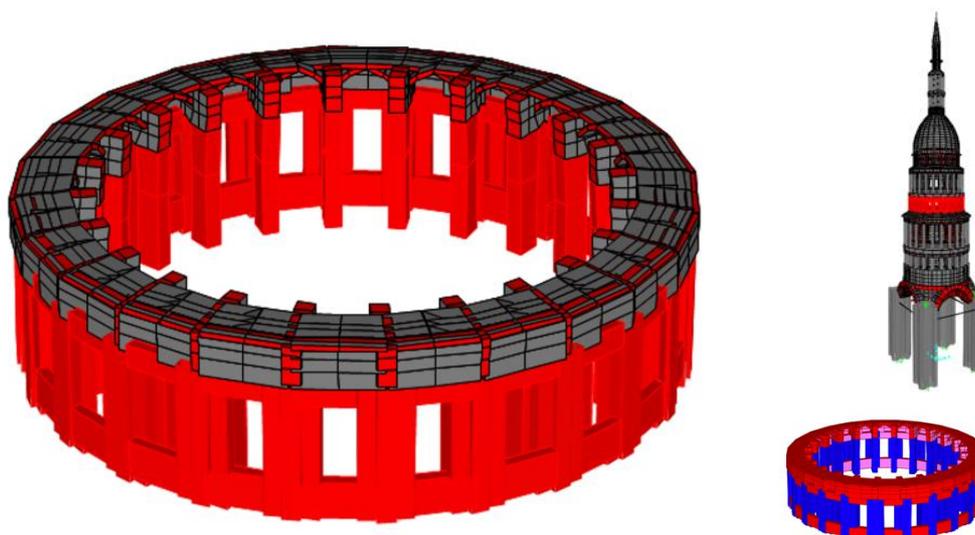


Figura 5.265 Elementi portanti verticali del Secondo Stilobate

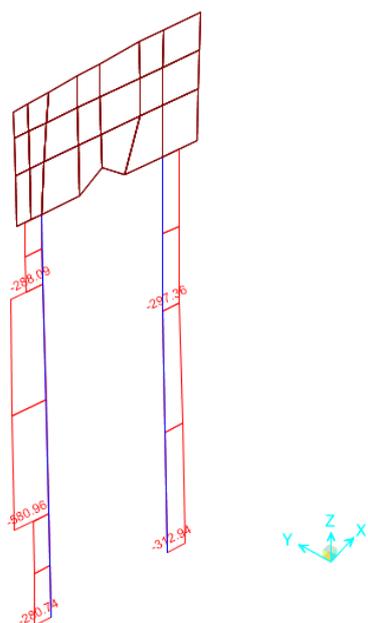


Figura 5.266 Sforzo assiale sui pilastri esterni ed interni di Secondo Stilobate della Cupola senza cedimenti

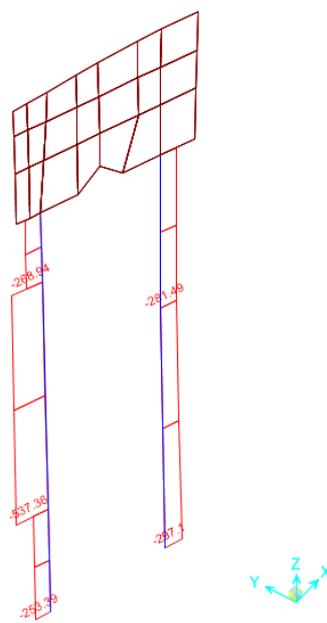


Figura 5.267 Sforzo assiale sui pilastri esterni ed interni di Secondo Stilobate della Cupola con cedimenti

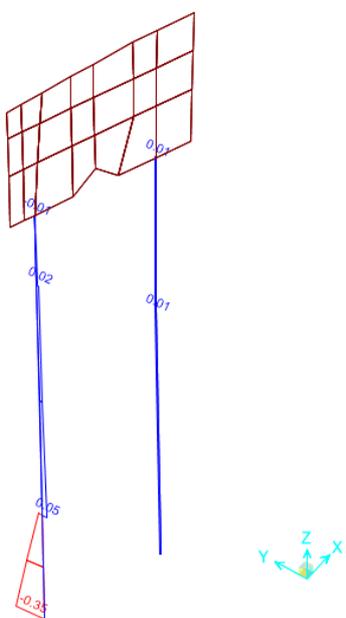


Figura 5.268 Momento flettente 2-2 in direzione circonferenziale sui pilastri esterni ed interni di Secondo Stilobate della Cupola

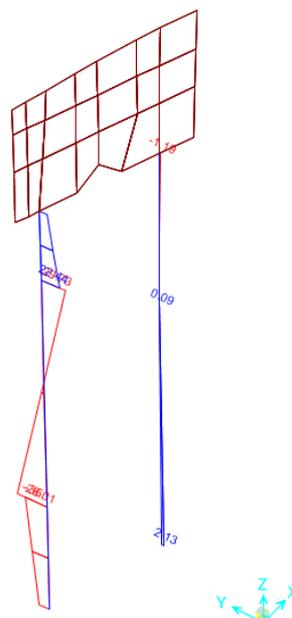


Figura 5.269 Momento flettente 2-2 in direzione circonferenziale sui pilastri esterni ed interni di Secondo Stilobate della Cupola

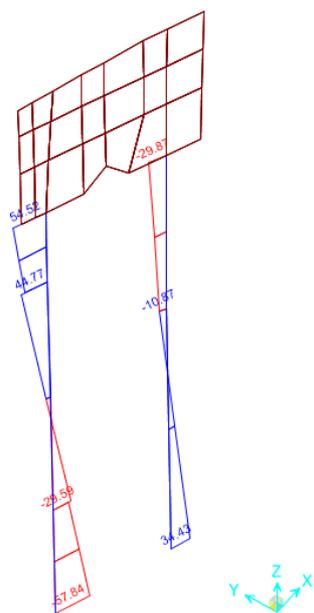


Figura 5.270 Momento flettente 3-3 in direzione radiale sui pilastri esterni ed interni di Secondo Stilobate della Cupola

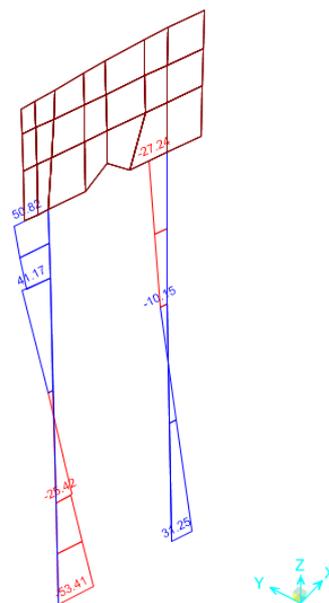


Figura 5.271 Momento flettente 3-3 in direzione radiale sui pilastri esterni ed interni di Secondo Stilobate della Cupola

Tabella 5.10 Sforzi assiali dei pilastri interni del Secondo Stilobate di Cupola ed il rapporto tra due condizioni

	Sforzo Assiale dei pilastri [kN]			
	Senza cedimenti	Con cedimenti	Rapporto	
Nord a Est (orario)	1	-311.33	-311.13	100%
	2	-308.74	-319.77	104%
	3	-292.48	-311.69	107%
	4	-292.44	-315.08	108%
	5	-309.13	-327.95	106%
	6	-312.32	-317.53	102%

	Sforzo Assiale dei pilastri [kN]			
	Senza cedimenti	Con cedimenti	Rapporto	
Est a Sud (orario)	7	-312.29	-299.56	96%
	8	-314.29	-286.04	91%
	9	-316.24	-278.58	88%
	10	-316.02	-276.67	88%
	11	-314.52	-282.13	90%
	12	-313.24	-296.49	95%

	Sforzo Assiale dei pilastri [kN]			
	Senza cedimenti	Con cedimenti	Rapporto	
Sud a Ovest (orario)	13	-312.75	-317.15	101%
	14	-314.34	-338.12	108%
	15	-316.78	-349.78	110%
	16	-317.89	-346.12	109%
	17	-316.28	-331.81	105%
	18	-313.80	-312.80	100%

	Sforzo Assiale dei pilastri [kN]			
	Senza cedimenti	Con cedimenti	Rapporto	
Ovest a Nord (orario)	19	-312.94	-297.10	95%
	20	-314.44	-289.60	92%
	21	-316.23	-288.66	91%
	22	-315.66	-289.84	92%
	23	-314.00	-293.20	93%
	24	-312.24	-300.06	96%

Tabella 5.11 Sforzi assiali dei pilastri esterni del Secondo Stilobate di Cupola ed il rapporto tra due condizioni

	Sforzo Assiale dei pilastri [kN]		
	Senza cedimenti	Con cedimenti	Rapporto
Nord a Est (orario)	1	-577.17	102%
	2	-589.48	111%
	3	-625.56	116%
	4	-627.70	119%
	5	-593.17	116%
	6	-579.34	107%

	Sforzo Assiale dei pilastri [kN]		
	Senza cedimenti	Con cedimenti	Rapporto
Est a Sud (orario)	7	-578.86	97%
	8	-584.26	89%
	9	-590.60	84%
	10	-589.64	83%
	11	-584.67	87%
	12	-580.29	95%

	Sforzo Assiale dei pilastri [kN]		
	Senza cedimenti	Con cedimenti	Rapporto
Sud a Ovest (orario)	13	-579.47	106%
	14	-584.88	116%
	15	-591.04	121%
	16	-591.12	119%
	17	-586.04	111%
	18	-580.47	101%

	Sforzo Assiale dei pilastri [kN]		
	Senza cedimenti	Con cedimenti	Rapporto
Ovest a Nord (orario)	19	-579.28	93%
	20	-584.67	88%
	21	-590.47	87%
	22	-589.35	88%
	23	-583.74	90%
	24	-579.02	95%

5.7.2 Elementi portanti di architravi in “shell”

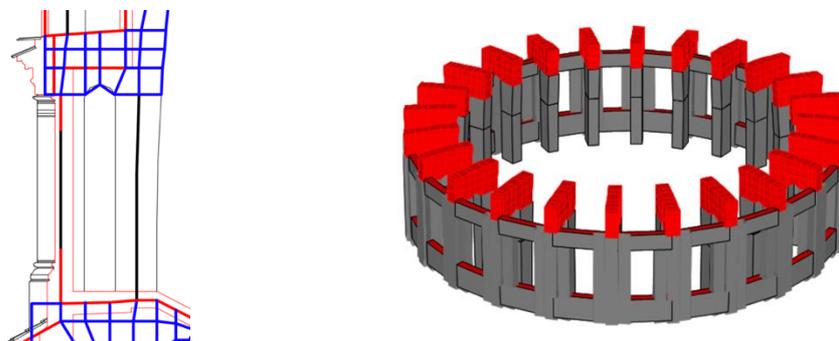


Figura 5.272 Architravi del Secondo Stilobate

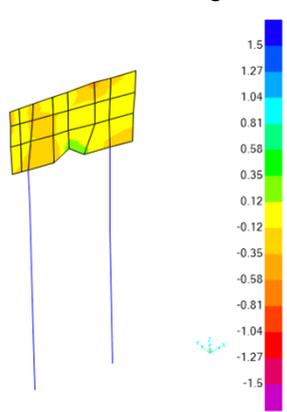


Figura 5.273 Tensione S1-1 Top Face di Architravi del Secondo Stilobate in direzione radiale senza cedimenti

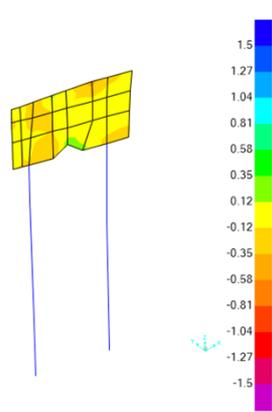


Figura 5.274 Tensione S1-1 Top Face di Architravi del Secondo Stilobate in direzione radiale con cedimenti

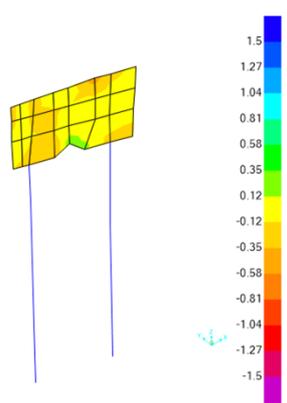


Figura 5.275 Tensioni S1-1 Bottom Face di Architravi del Secondo Stilobate in direzione radiale senza cedimenti

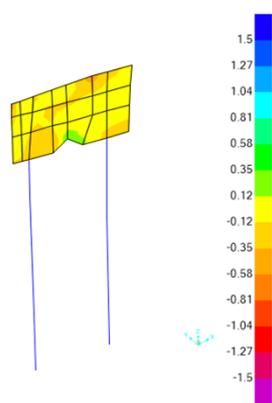


Figura 5.276 Tensioni S1-1 Bottom Face di Architravi del Secondo Stilobate in direzione radiale con cedimenti

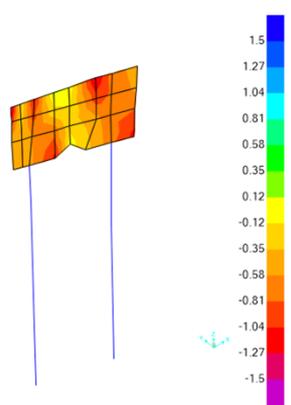


Figura 5.277 Tensioni S2-2 Top Face di Architravi del Secondo Stilobate in direzione verticale senza cedimenti

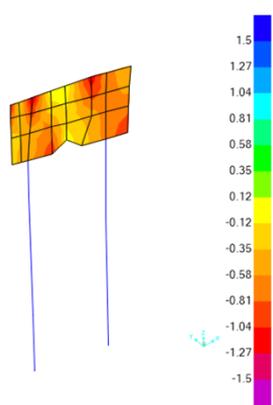


Figura 5.278 Tensioni S2-2 Top Face di Architravi del Secondo Stilobate in direzione verticale con cedimenti

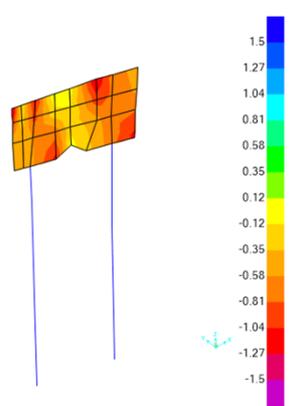


Figura 5.279 Tensioni S2-2 Bottom Face di Architravi del Secondo Stilobate in direzione verticale senza cedimenti

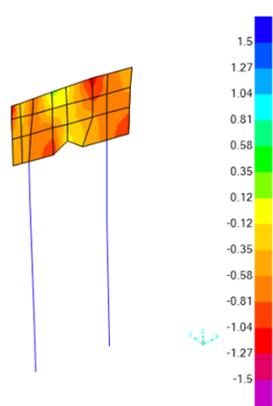


Figura 5.280 Tensioni S2-2 Bottom Face di Architravi del Secondo Stilobate in direzione verticale con cedimenti

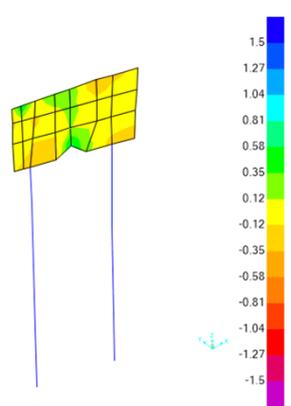


Figura 5.281 Tensione S-Max Top Face di Architravi del Secondo Stilobate senza cedimenti

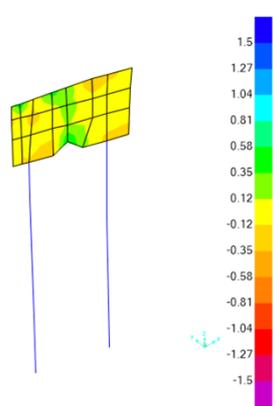


Figura 5.282 Tensione S-Max Top Face di Architravi del Secondo Stilobate con cedimenti

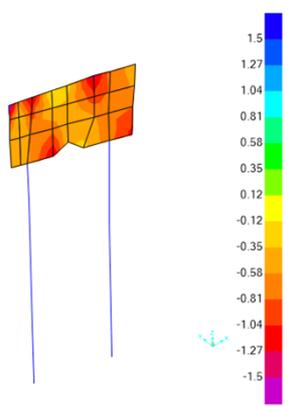


Figura 5.283 Tensioni S-Min Top Face di Architravi del Secondo Stilobate senza cedimenti

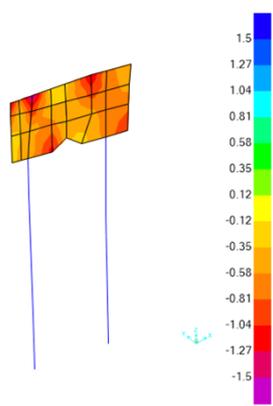


Figura 5.284 Tensioni S-Min Top Face di Architravi del Secondo Stilobate con cedimenti

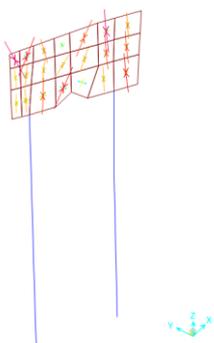


Figura 5.285 Direzioni delle tensioni principali (S-Max e S-Min) Top Face di Architravi del Secondo Stilobate senza cedimenti

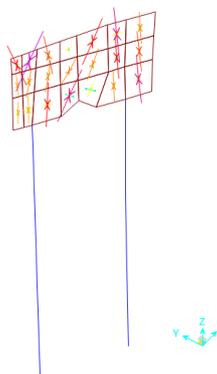


Figura 5.286 Direzioni delle tensioni principali (S-Max e S-Min) Top Face di Architravi del Secondo Stilobate con cedimenti

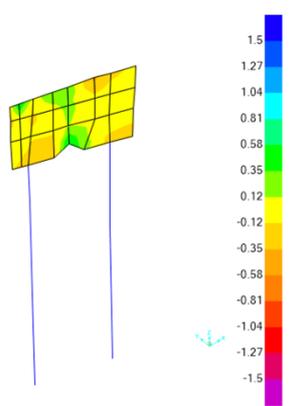


Figura 5.287 Tensioni S-Max Bottom Face di Architravi del Secondo Stilobate senza cedimenti

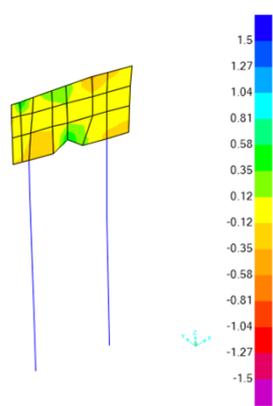


Figura 5.288 Tensioni S-Max Bottom Face di Architravi del Secondo Stilobate con cedimenti

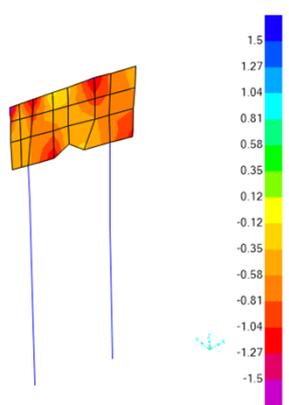


Figura 5.289 Tensioni S-Min Bottom Face di Architravi del Secondo Stilobate senza cedimenti

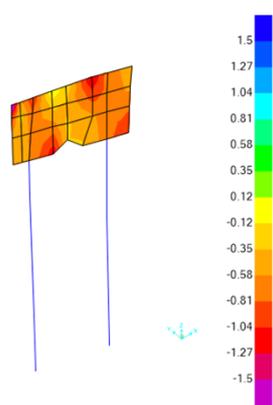


Figura 5.290 Tensioni S-Min Bottom Face di Architravi del Secondo Stilobate cedimenti

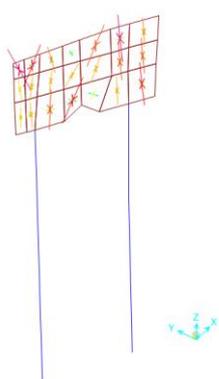


Figura 5.291 Direzioni delle tensioni principali (S-Max e S-Min) Bottom Face di Architravi del Secondo Stilobate senza cedimenti

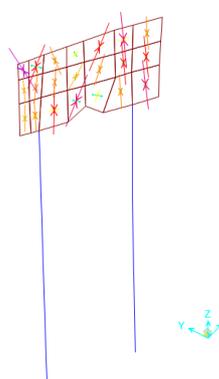


Figura 5.292 Direzioni delle tensioni principali (S-Max e S-Min) Bottom Face di Architravi del Secondo Stilobate con cedimenti

5.7.3 Elementi portanti circolari in “shell”

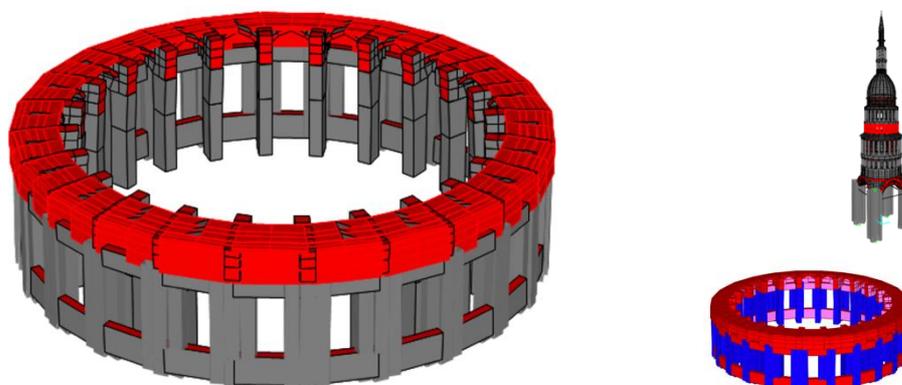


Figura 5.293 Elementi portanti circolari del Secondo Stilobate

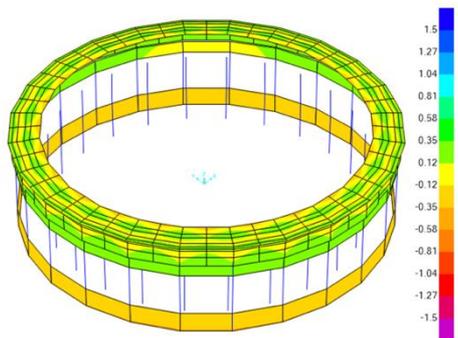


Figura 5.294 Tensione S1-1 Top Face di pareti e pavimento del Secondo Stilobate in direzione circonferenziale senza cedimenti

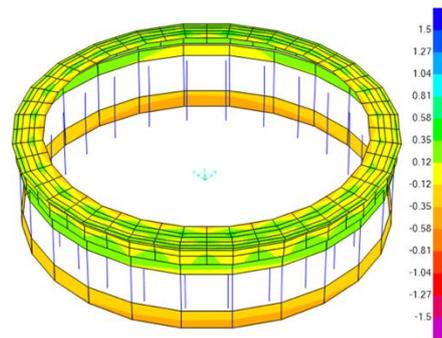


Figura 5.295 Tensione S1-1 Top Face di pareti e pavimento del Secondo Stilobate in direzione circonferenziale con cedimenti

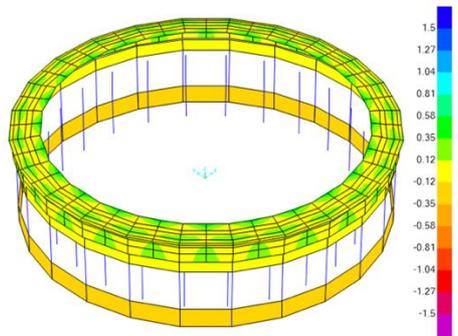


Figura 5.296 Tensioni S1-1 Bottom Face di pareti e pavimento del Secondo Stilobate in direzione circonferenziale senza cedimenti

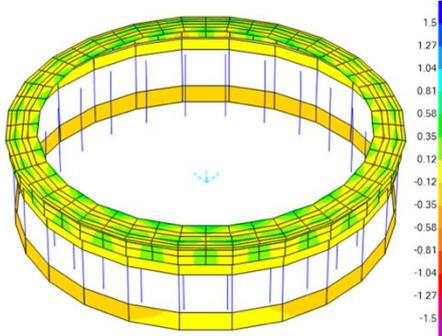


Figura 5.297 Tensioni S1-1 Bottom Face di pareti e pavimento del Secondo Stilobate in direzione circonferenziale con cedimenti

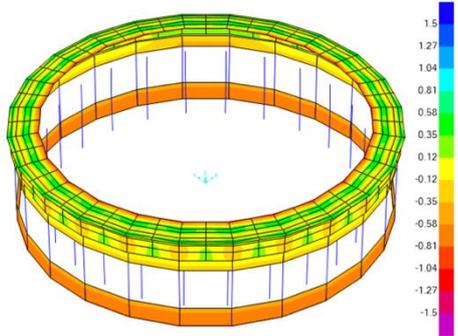


Figura 5.298 Tensioni S2-2 Top Face di pareti del Secondo Stilobate in direzione verticali e pavimento in direzione radiale senza cedimenti

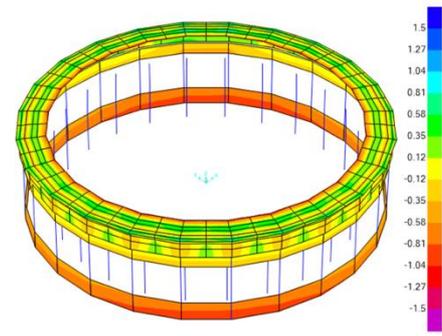


Figura 5.299 Tensioni S2-2 Top Face di pareti del Secondo Stilobate in direzione verticali e pavimento in direzione radiale con cedimenti

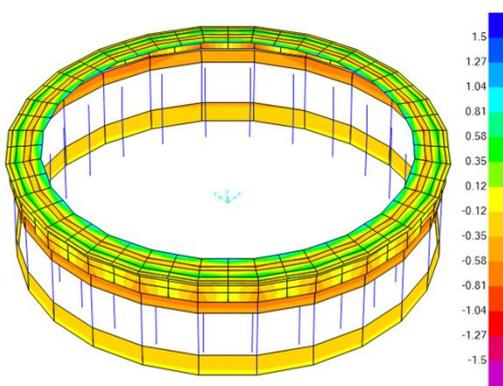


Figura 5.300 Tensioni S2-2 Bottom Face di pareti del Secondo Stilobate in direzione verticali e pavimento in direzione radiale senza cedimenti

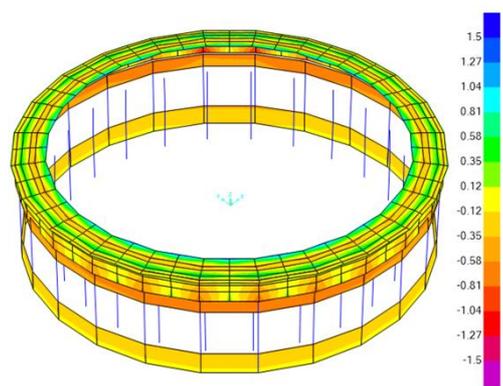


Figura 5.301 Tensioni S2-2 Bottom Face di pareti del Secondo Stilobate in direzione verticali e pavimento in direzione radiale con cedimenti

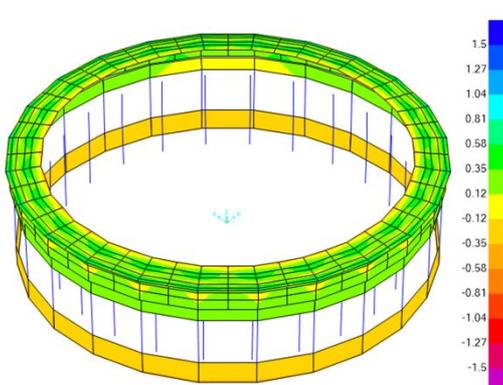


Figura 5.302 Tensione S-Max Top Face di pareti e pavimento del Secondo Stilobate senza cedimenti

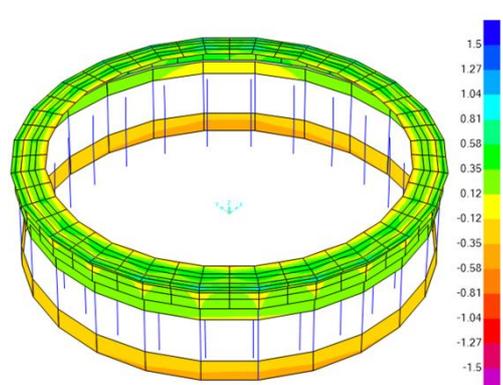


Figura 5.303 Tensione S-Max Top Face di pareti e pavimento del Secondo Stilobate con cedimenti

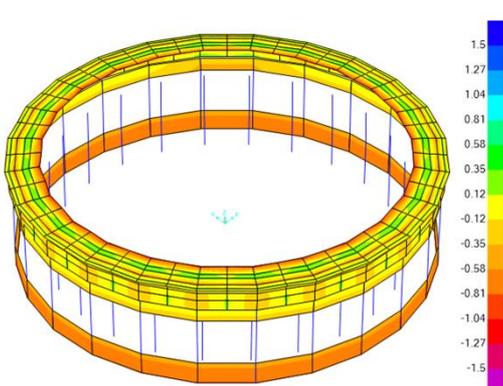


Figura 5.304 Tensioni S-Min Top Face pareti e pavimento del Secondo Stilobate senza cedimenti

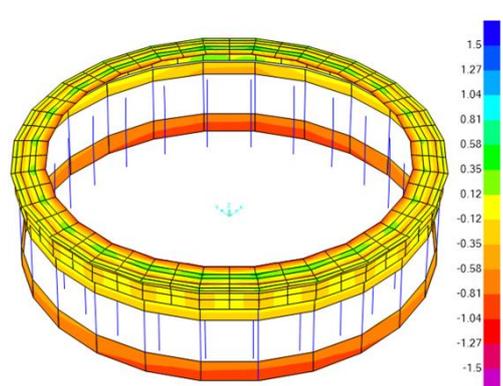


Figura 5.305 Tensioni S-Min Top Face di pareti e pavimento del Secondo Stilobate con cedimenti

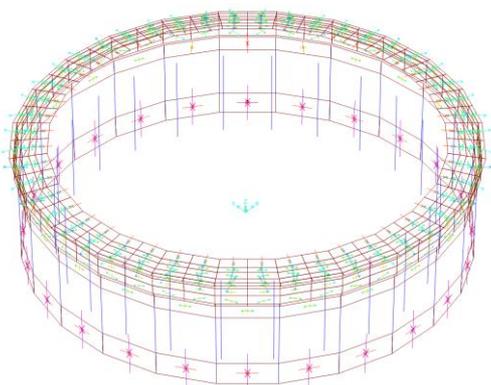


Figura 5.306 Direzioni delle tensioni principali (S-Max e S-Min) Top Face di pareti e pavimento del Secondo Stilobate senza cedimenti

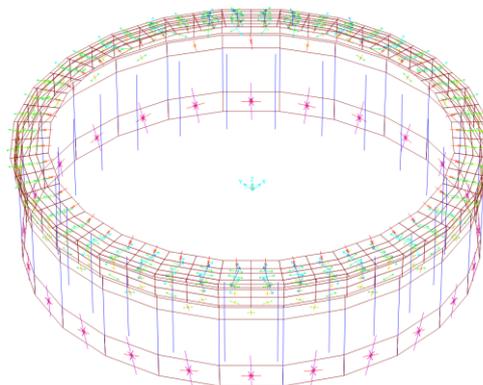


Figura 5.307 Direzioni delle tensioni principali (S-Max e S-Min) Top Face di pareti e pavimento del Secondo Stilobate con cedimenti

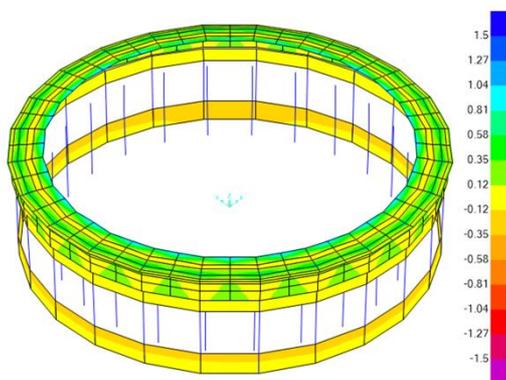


Figura 5.308 Tensioni S-Max Bottom Face di pareti e pavimento del Secondo Stilobate senza cedimenti

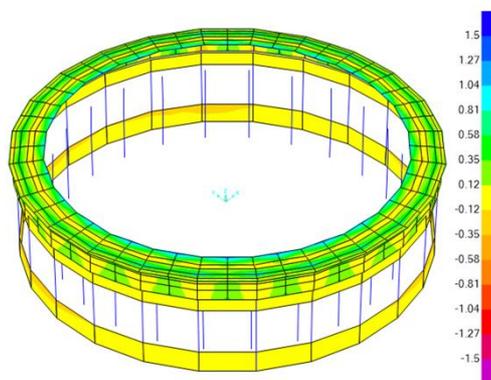


Figura 5.309 Tensioni S-Max Bottom Face di pareti e pavimento del Secondo Stilobate con cedimenti

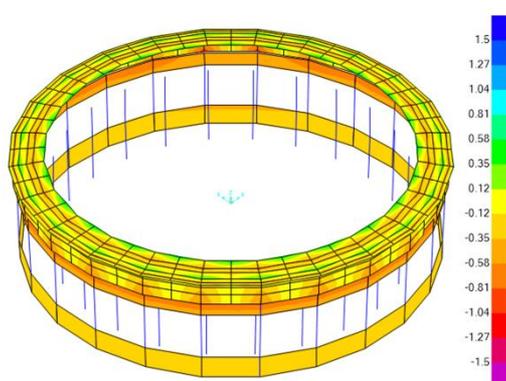


Figura 5.310 Tensioni S-Min Bottom Face di pareti e pavimento del Secondo Stilobate senza cedimenti

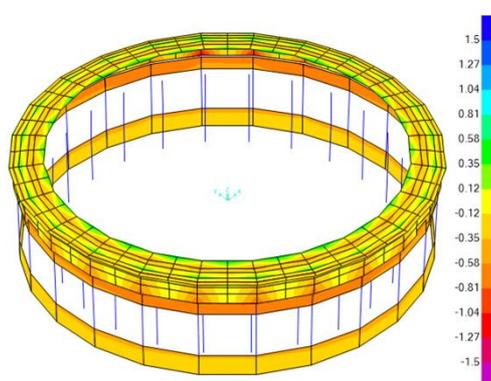


Figura 5.311 Tensioni S-Min Bottom Face di pareti e pavimento del Secondo Stilobate con cedimenti

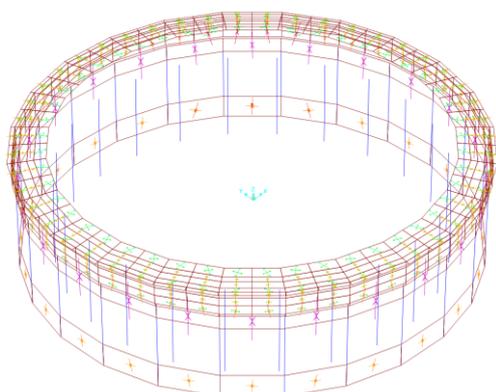


Figura 5.312 Direzioni delle tensioni principali (S-Max e S-Min) Bottom Face di pareti e pavimento del Secondo Stilobate senza cedimenti

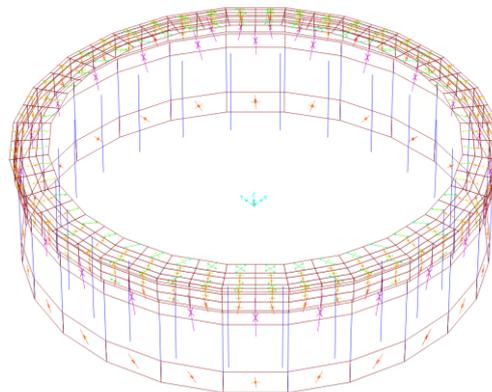


Figura 5.313 Direzioni delle tensioni principali (S-Max e S-Min) Bottom Face di pareti e pavimento del Secondo Stilobate con cedimenti

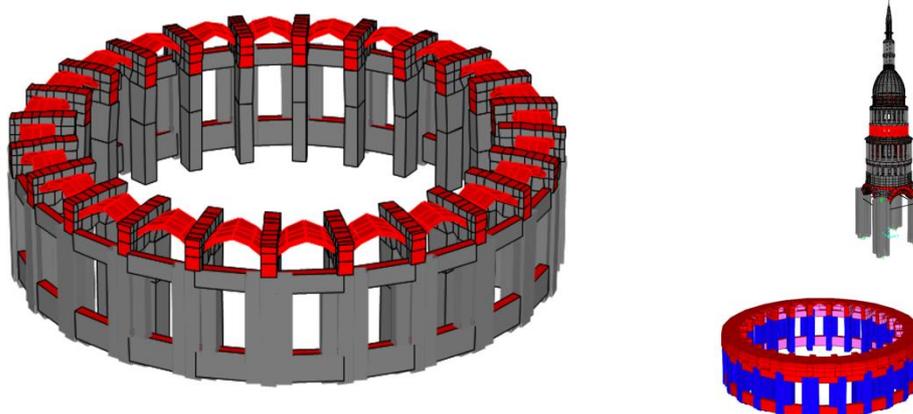


Figura 5.314 Modello delle volte circolari di Secondo Stilobate

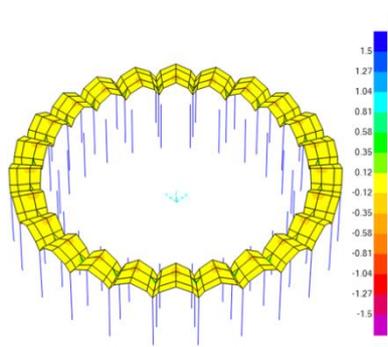


Figura 5.315 Tensione S1-1 Top Face di volte circolari del Secondo Stilobate in direzione circonferenziale senza cedimenti

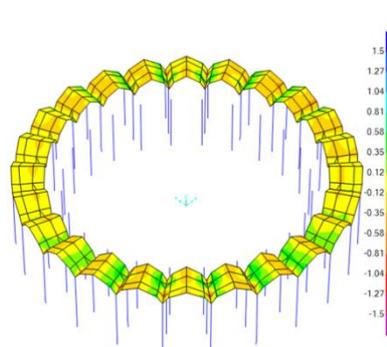


Figura 5.316 Tensione S1-1 Top Face di volte circolari del Secondo Stilobate in direzione circonferenziale con cedimenti

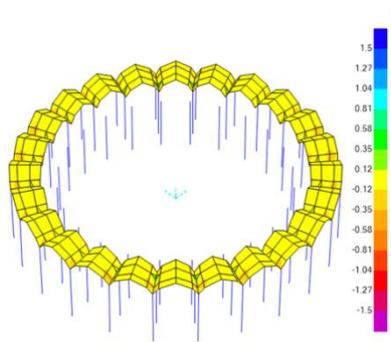


Figura 5.317 Tensioni S1-1 Bottom Face di volte circolarferenziali del Secondo Stilobate in direzione circolarferenziale senza cedimenti

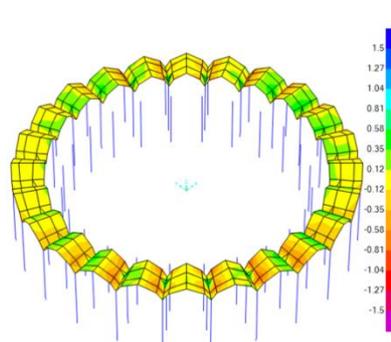


Figura 5.318 Tensioni S1-1 Bottom Face di volte circolarferenziali del Secondo Stilobate in direzione circolarferenziale con cedimenti

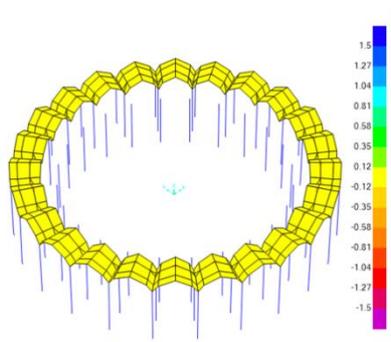


Figura 5.319 Tensioni S2-2 Top Face di volte circolarferenziali del Secondo Stilobate in direzione radiale senza cedimenti

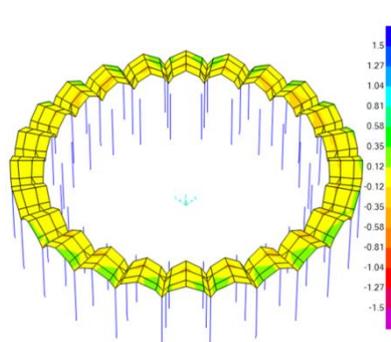


Figura 5.320 Tensioni S2-2 Top Face di volte circolarferenziali del Secondo Stilobate in direzione radiale con cedimenti

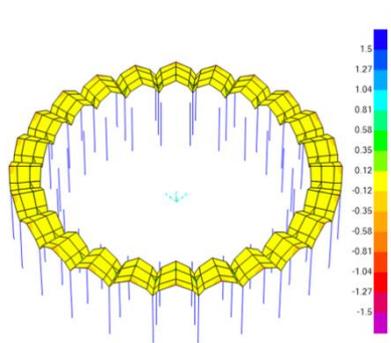


Figura 5.321 Tensioni S2-2 Bottom Face di volte circolarferenziali del Secondo Stilobate in direzione radiale senza cedimenti

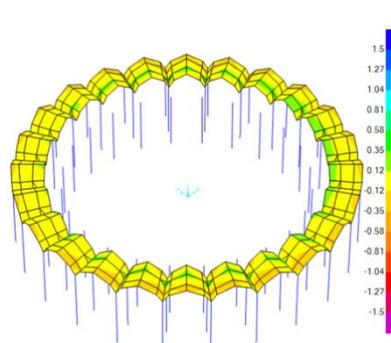


Figura 5.322 Tensioni S2-2 Bottom Face di pareti verticali del Secondo Stilobate in direzione radiale con cedimenti

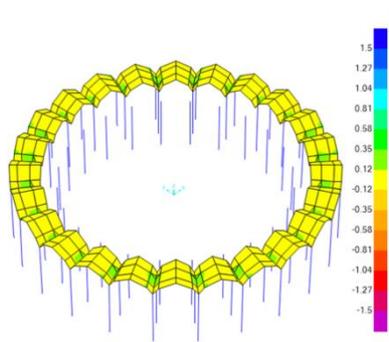


Figura 5.323 Tensione S-Max Top Face di volte circolarferenziali del Secondo Stilobate senza cedimenti

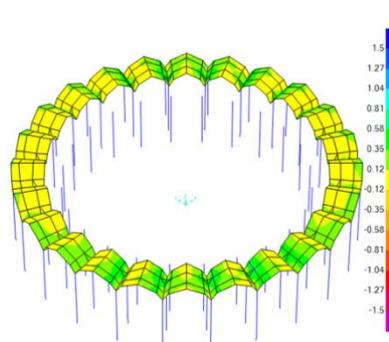


Figura 5.324 Tensione S-Max Top Face volte circolarferenziali del Secondo Stilobate con cedimenti

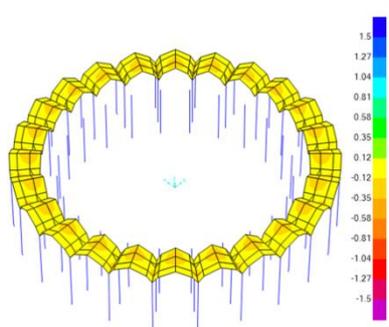


Figura 5.325 Tensioni S-Min Top Face di volte circolarferenziali del Secondo Stilobate senza cedimenti

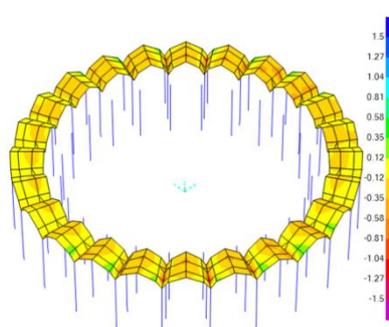


Figura 5.326 Tensioni S-Min Top Face di volte circolarferenziali del Secondo Stilobate con cedimenti

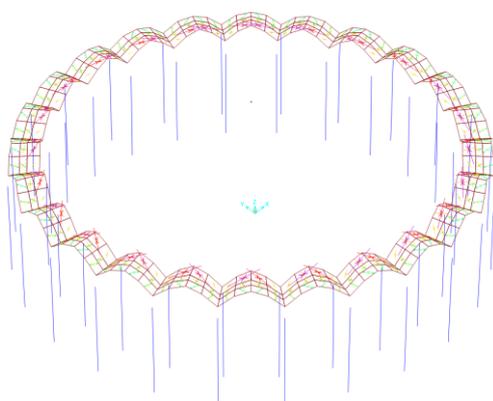


Figura 5.327 Direzioni delle tensioni principali (S-Max e S-Min) Top Face di volte circolarferenziali del Secondo Stilobate senza cedimenti

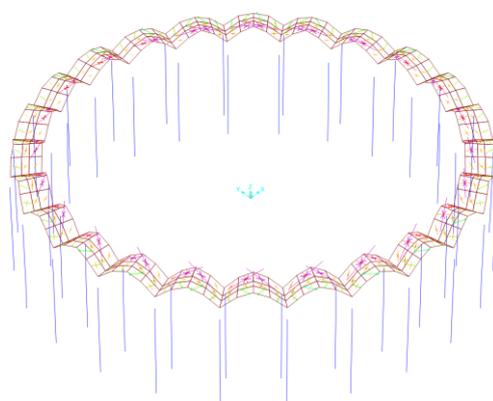


Figura 5.328 Direzioni delle tensioni principali (S-Max e S-Min) Top Face di volte circolarferenziali del Secondo Stilobate con cedimenti

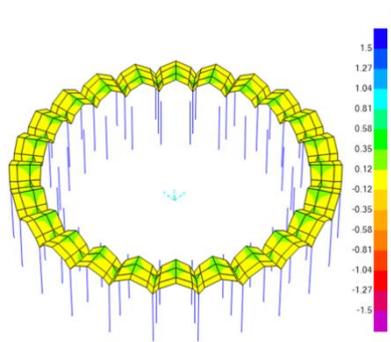


Figura 5.329 Tensioni S-Max Bottom Face di volte circolarferenziali del Secondo Stilobate senza cedimenti

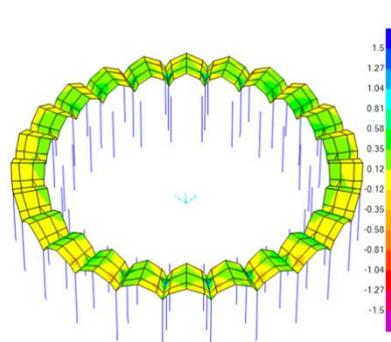


Figura 5.330 Tensioni S-Max Bottom Face di volte circolarferenziali del Secondo Stilobate con cedimenti

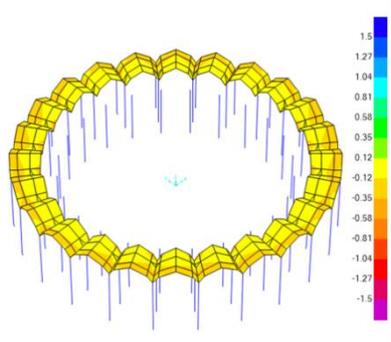


Figura 5.331 Tensioni S-Min Bottom Face di volte circolarferenziali del Secondo Stilobate senza cedimenti

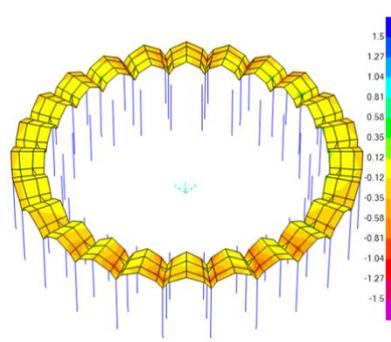


Figura 5.332 Tensioni S-Min Bottom Face di volte circolarferenziali del Secondo Stilobate con cedimenti

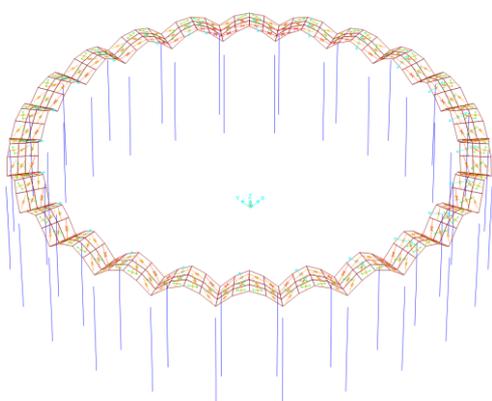


Figura 5.333 Direzioni delle tensioni principali (S-Max e S-Min) Bottom Face di volte circolarferenziali del Secondo Stilobate senza cedimenti

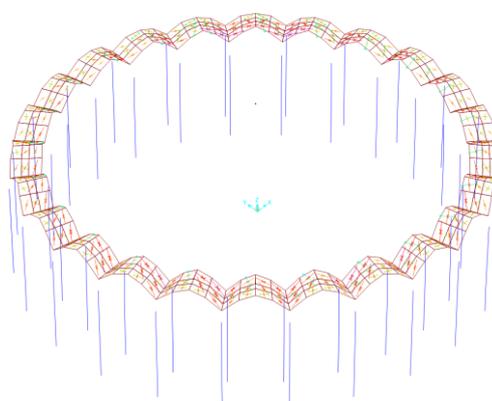


Figura 5.334 Direzioni delle tensioni principali (S-Max e S-Min) Bottom Face di volte circolarferenziali del Secondo Stilobate con cedimenti

5.8 Secondo Peristilio e della Seconda Cupola di Basilica

5.8.1 Elementi portanti dei pilastri e degli archi in "frame"

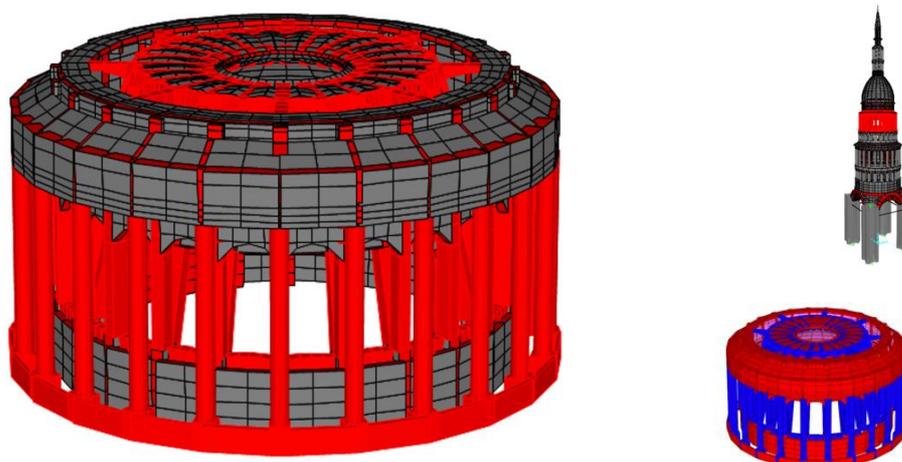


Figura 5.335 Elementi portanti in "frame" del Secondo Peristilio

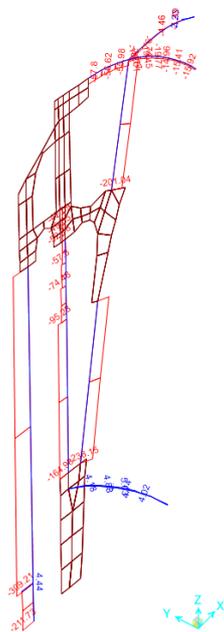


Figura 5.336 Sforzo assiale sui pilastri e sugli archi di Secondo Peristilio della Cupola senza cedimenti

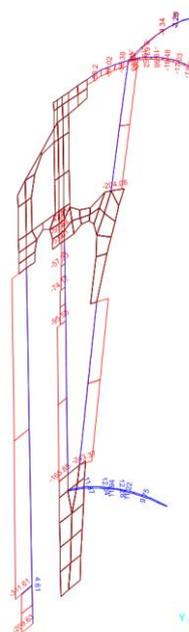


Figura 5.337 Sforzo assiale sui pilastri e sugli archi di Secondo Peristilio della Cupola con cedimenti

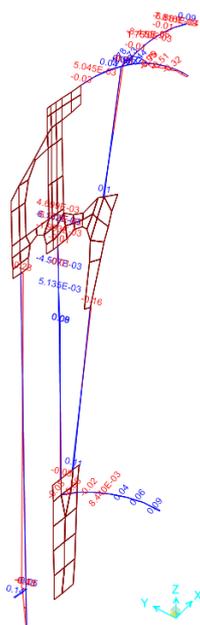


Figura 5.338 Momento flettente 2-2 sui pilastri e archi radiali in direzione circonferenziale e sugli archi circonferenziali in direzione orizzontale di Secondo Peristilio della Cupola

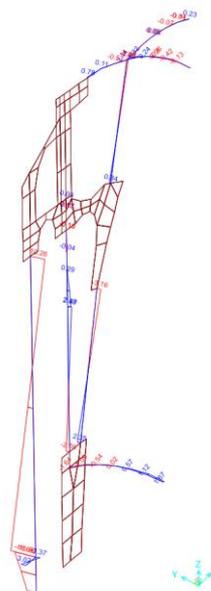


Figura 5.339 Momento flettente 2-2 sui pilastri e archi radiali in direzione circonferenziale e sugli archi circonferenziali in direzione orizzontale di Secondo Peristilio della Cupola

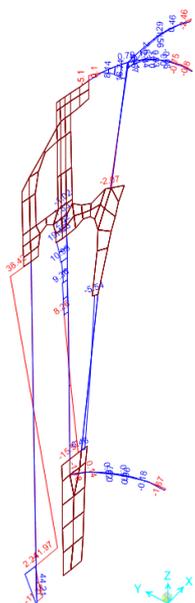


Figura 5.340 Momento flettente 3-3 sui pilastri e archi radiali in direzione radiale e sugli archi circonferenziali in direzione verticale di Secondo Peristilio della Cupola

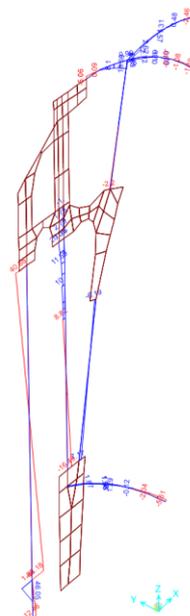


Figura 5.341 Momento flettente 3-3 sui pilastri e archi radiali in direzione radiale e sugli archi circonferenziali in direzione verticale di Secondo Peristilio della Cupola

Tabella 5.12 Sforzi assiali dei pilastri esterni del Secondo Peristilio di Cupola ed il rapporto tra due condizioni

	Sforzo Assiale dei pilastri [kN]			
	Senza cedimenti	Con cedimenti	Rapporto	
Nord a Est (orario)	1	-306.51	-309.51	101%
	2	-308.82	-327.14	106%
	3	-302.56	-337.02	111%
	4	-298.56	-333.40	112%
	5	-308.10	-335.12	109%
	6	-310.13	-322.07	104%

	Sforzo Assiale dei pilastri [kN]			
	Senza cedimenti	Con cedimenti	Rapporto	
Est a Sud (orario)	7	-305.43	-298.23	98%
	8	-307.19	-283.46	92%
	9	-312.19	-278.32	89%
	10	-309.35	-274.00	89%
	11	-307.88	-279.78	91%
	12	-309.37	-297.35	96%

	Sforzo Assiale dei pilastri [kN]			
	Senza cedimenti	Con cedimenti	Rapporto	
Sud a Ovest (orario)	13	-306.34	-316.66	103%
	14	-307.97	-339.25	110%
	15	-312.62	-354.57	113%
	16	-309.81	-347.14	112%
	17	-308.02	-330.10	107%
	18	-309.21	-311.61	101%

	Sforzo Assiale dei pilastri [kN]			
	Senza cedimenti	Con cedimenti	Rapporto	
Ovest a Nord (orario)	19	-306.02	-291.26	95%
	20	-307.66	-282.46	92%
	21	-312.21	-283.68	91%
	22	-308.78	-282.57	92%
	23	-306.86	-286.54	93%
	24	-308.10	-297.38	97%

Tabella 5.13 Sforzi assiali dei pilastri esterni del Secondo Peristilio di Cupola ed il rapporto tra due condizioni

	Sforzo Assiale dei pilastri [kN]			
	Senza cedimenti	Con cedimenti	Rapporto	
Nord a Est (orario)	1	-165.47	-164.40	99%
	2	-167.75	-176.45	105%
	3	-173.68	-190.83	110%
	4	-173.71	-191.80	110%
	5	-167.73	-179.08	107%
	6	-165.42	-167.48	101%

	Sforzo Assiale dei pilastri [kN]			
	Senza cedimenti	Con cedimenti	Rapporto	
Est a Sud (orario)	7	-165.49	-159.03	96%
	8	-166.23	-153.42	92%
	9	-166.93	-150.68	90%
	10	-167.04	-150.57	90%
	11	-166.51	-153.52	92%
	12	-165.86	-159.88	96%

	Sforzo Assiale dei pilastri [kN]			
	Senza cedimenti	Con cedimenti	Rapporto	
Sud a Ovest (orario)	13	-165.80	-168.80	102%
	14	-166.34	-177.26	107%
	15	-167.05	-181.63	109%
	16	-167.46	-180.30	108%
	17	-166.95	-174.00	104%
	18	-165.86	-165.64	100%

	Sforzo Assiale dei pilastri [kN]			
	Senza cedimenti	Con cedimenti	Rapporto	
Ovest a Nord (orario)	19	-165.53	-158.82	96%
	20	-166.03	-155.10	93%
	21	-166.62	-153.91	92%
	22	-166.70	-153.95	92%
	23	-166.11	-154.83	93%
	24	-165.44	-157.77	95%

Tabella 5.14 Sforzi assiali degli Imbuti Antonelliani inferiori del Secondo Peristilio di Cupola ed il rapporto tra due condizioni

	Sforzo Assiale dei pilastri [kN]			
	Senza cedimenti	Con cedimenti	Rapporto	
Nord a Est (orario)	1	-236.33	-243.31	103%
	2	-237.98	-260.82	110%
	3	-244.73	-277.58	113%
	4	-242.94	-278.06	114%
	5	-238.24	-266.02	112%
	6	-238.62	-250.78	105%

	Sforzo Assiale dei pilastri [kN]			
	Senza cedimenti	Con cedimenti	Rapporto	
Est a Sud (orario)	7	-236.68	-228.93	97%
	8	-237.10	-211.18	89%
	9	-239.32	-201.94	84%
	10	-237.25	-198.78	84%
	11	-236.47	-207.23	88%
	12	-237.62	-226.04	95%

	Sforzo Assiale dei pilastri [kN]			
	Senza cedimenti	Con cedimenti	Rapporto	
Sud a Ovest (orario)	13	-235.91	-245.98	104%
	14	-236.80	-265.87	112%
	15	-239.51	-278.78	116%
	16	-237.53	-274.69	116%
	17	-236.55	-261.46	111%
	18	-238.37	-244.23	102%

	Sforzo Assiale dei pilastri [kN]			
	Senza cedimenti	Con cedimenti	Rapporto	
Ovest a Nord (orario)	19	-236.94	-223.66	94%
	20	-237.48	-210.26	89%
	21	-239.69	-205.96	86%
	22	-237.65	-205.74	87%
	23	-236.89	-213.54	90%
	24	-238.08	-228.47	96%

Tabella 5.15 Sforzi assiali degli Imbuti Antonelliani superiori del Secondo Peristilio di Cupola ed il rapporto tra due condizioni

	Sforzo Assiale dei pilastri [kN]			
	Senza cedimenti	Con cedimenti	Rapporto	
Nord a Est (orario)	1	-184.41	-187.43	102%
	2	-184.66	-194.78	105%
	3	-202.53	-219.33	108%
	4	-185.91	-200.87	108%
	5	-185.37	-196.66	106%
	6	-201.94	-207.59	103%

	Sforzo Assiale dei pilastri [kN]			
	Senza cedimenti	Con cedimenti	Rapporto	
Est a Sud (orario)	7	-185.24	-182.11	98%
	8	-185.24	-174.49	94%
	9	-201.77	-184.33	91%
	10	-184.50	-169.17	92%
	11	-183.68	-172.44	94%
	12	-199.71	-194.77	98%

	Sforzo Assiale dei pilastri [kN]			
	Senza cedimenti	Con cedimenti	Rapporto	
Sud a Ovest (orario)	13	-183.06	-186.91	102%
	14	-183.48	-194.92	106%
	15	-200.79	-218.63	109%
	16	-182.99	-199.21	109%
	17	-179.86	-194.71	108%
	18	-200.79	-205.22	102%

	Sforzo Assiale dei pilastri [kN]			
	Senza cedimenti	Con cedimenti	Rapporto	
Ovest a Nord (orario)	19	-185.70	-180.77	97%
	20	-185.83	-174.66	94%
	21	-202.49	-186.28	92%
	22	-185.51	-171.92	93%
	23	-185.07	-175.24	95%
	24	-201.35	-196.78	98%

5.8.2 Elementi portanti di pilastri in "shell"

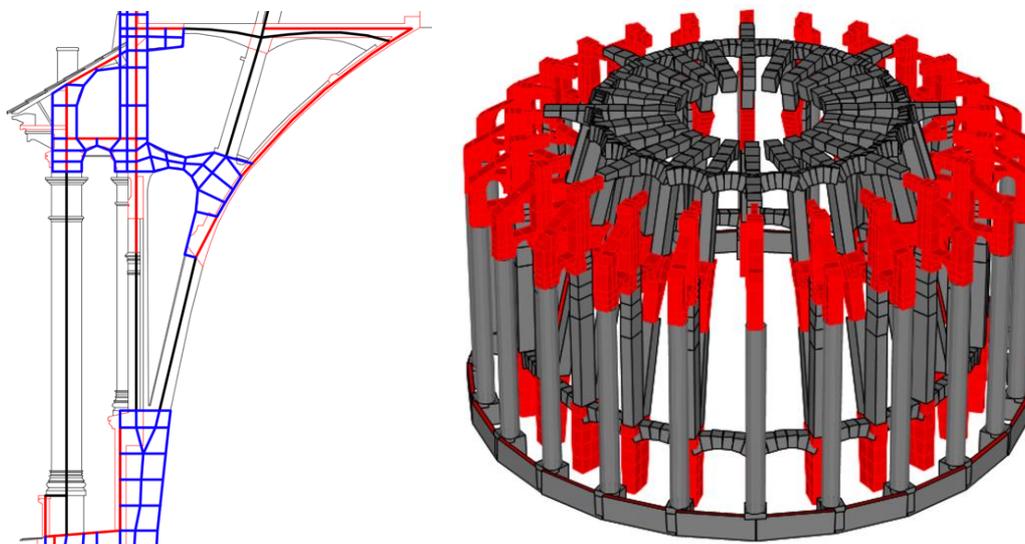


Figura 5.342 Pilastri interni di Secondo Peristilio con gli elementi "shell"

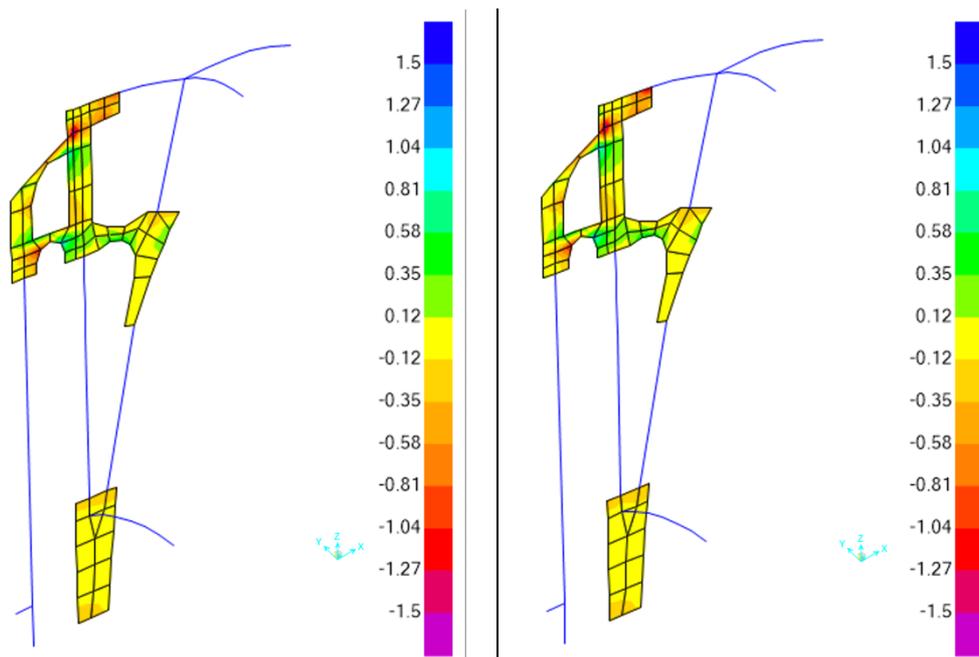


Figura 5.343 Tensione S1-1 Top Face di Pilastri interni di Secondo Peristilio in direzione radiale senza cedimenti

Figura 5.344 Tensione S1-1 Top Face di Pilastri interni di Secondo Peristilio in direzione radiale con cedimenti

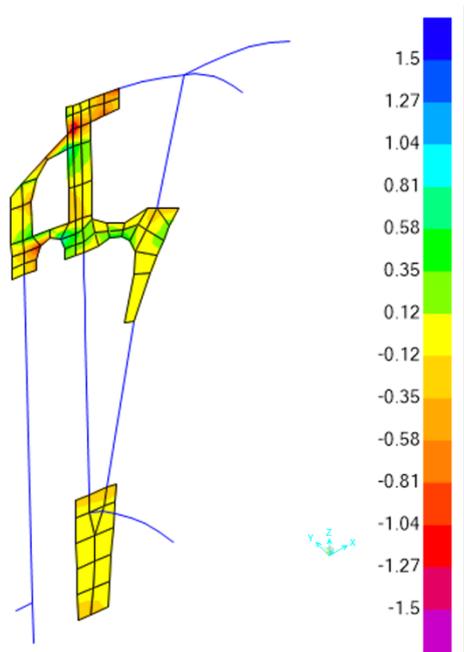


Figura 5.345 Tensioni S1-1 Bottom Face di Pilastri interni di Secondo Peristilio in direzione radiale senza cedimenti

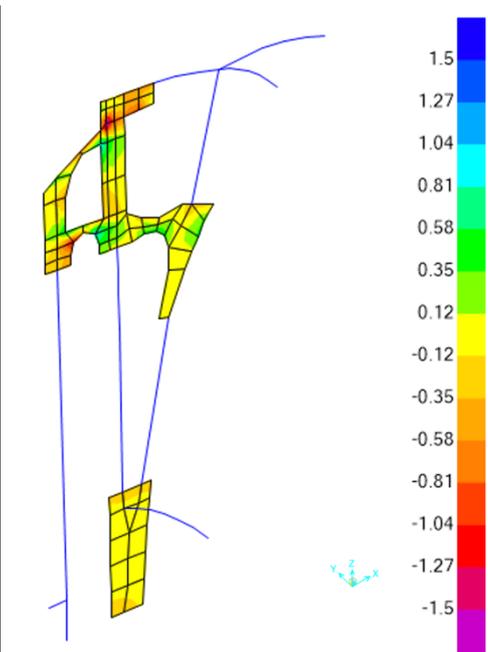


Figura 5.346 Tensioni S1-1 Bottom Face di Pilastri interni di Secondo Peristilio in direzione radiale con cedimenti

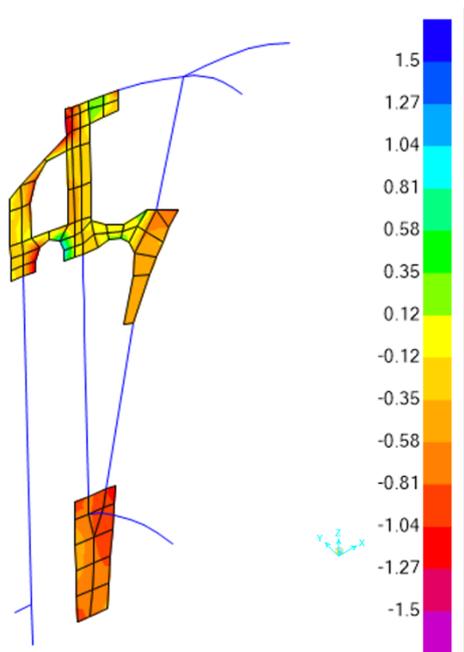


Figura 5.347 Tensioni S2-2 Top Face di Pilastri interni di Secondo Peristilio in direzione verticale senza cedimenti

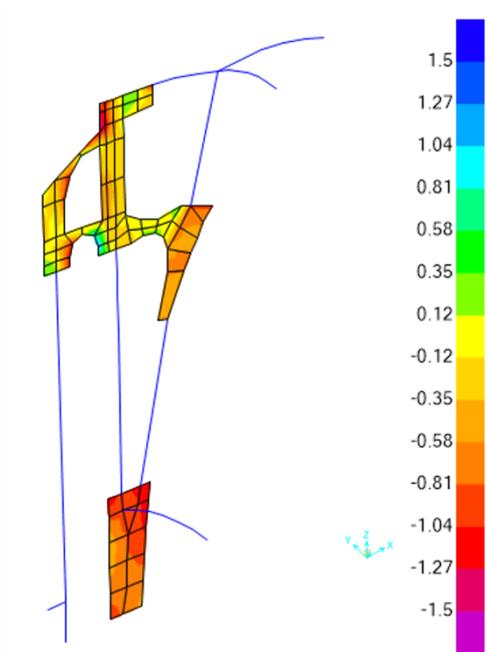


Figura 5.348 Tensioni S2-2 Top Face di Pilastri interni di Secondo Peristilio in direzione verticale con cedimenti

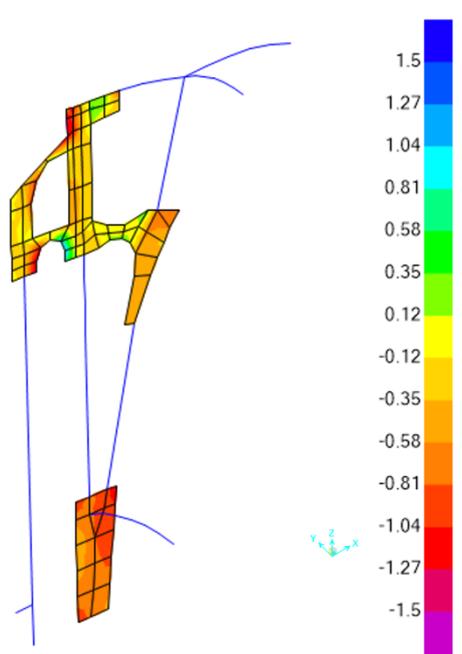


Figura 5.349 Tensioni S2-2 Bottom Face di Pilastri interni di Secondo Peristilio in direzione verticale senza cedimenti

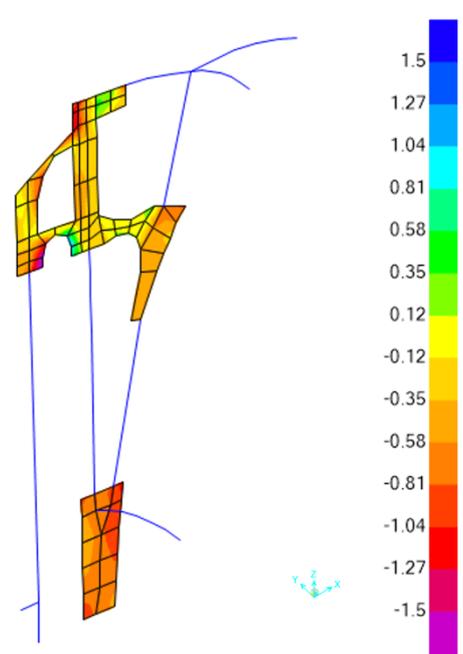


Figura 5.350 Tensioni S2-2 Bottom Face di Pilastri interni di Secondo Peristilio in direzione verticale con cedimenti

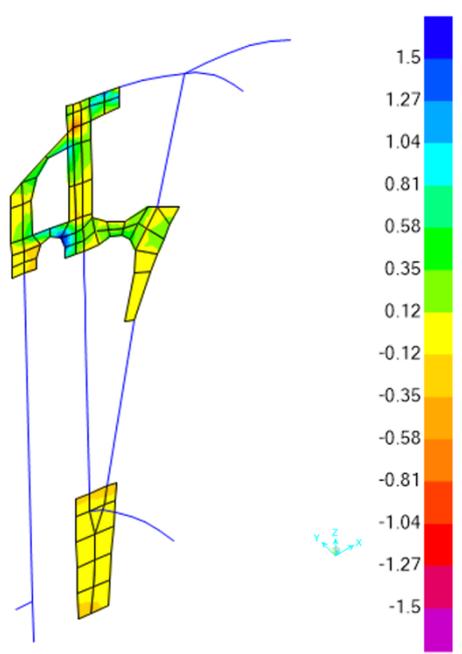


Figura 5.351 Tensione S-Max Top Face di Pilastri interni di Secondo Peristilio senza cedimenti

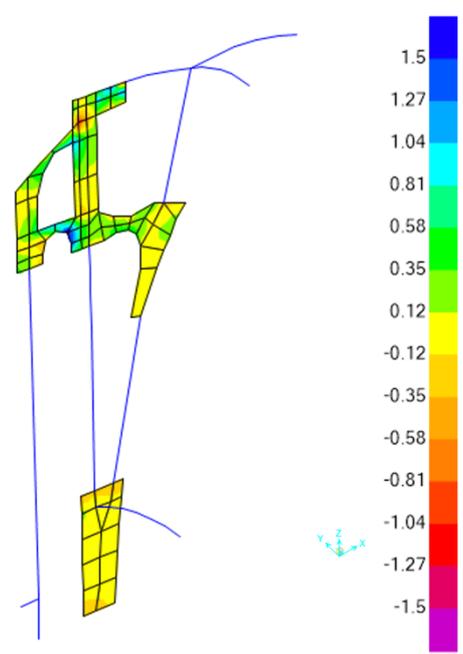


Figura 5.352 Tensione S-Max Top Face di Pilastri interni di Secondo Peristilio con cedimenti

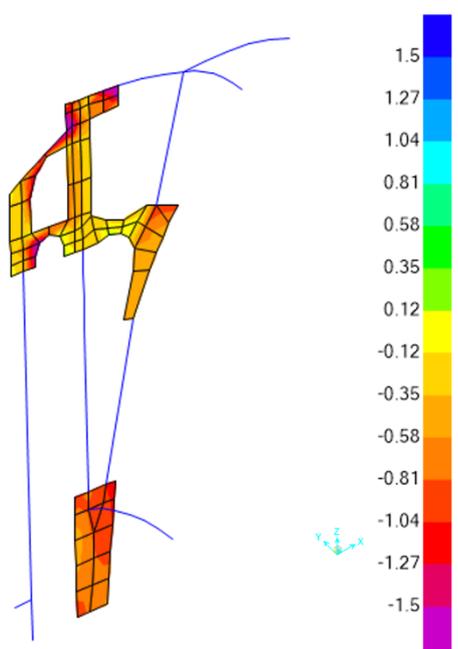


Figura 5.353 Tensioni S-Min Top Face di Pilastrini interni di Secondo Peristilio senza cedimenti

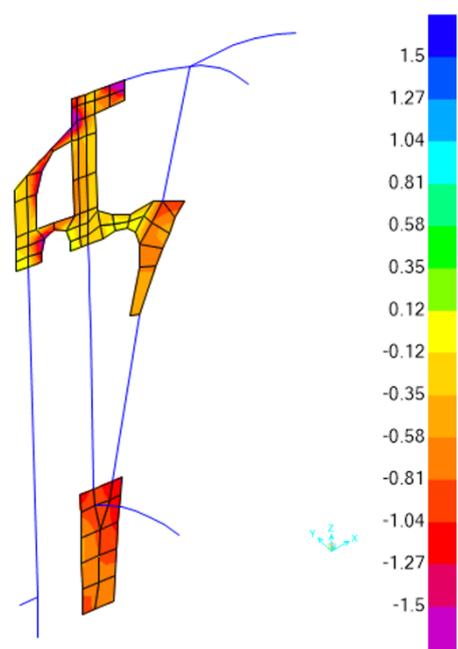


Figura 5.354 Tensioni S-Min Top Face di Pilastrini interni di Secondo Peristilio con cedimenti

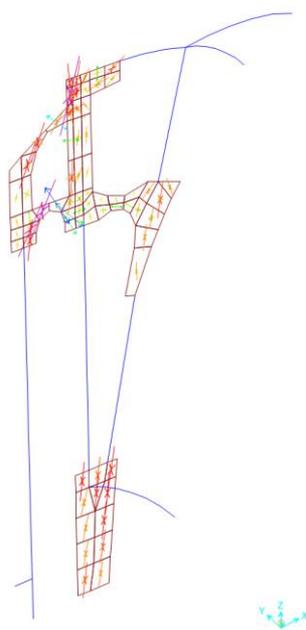


Figura 5.355 Direzioni delle tensioni principali (S-Max e S-Min) Top Face di Pilastrini interni di Secondo Peristilio senza cedimenti

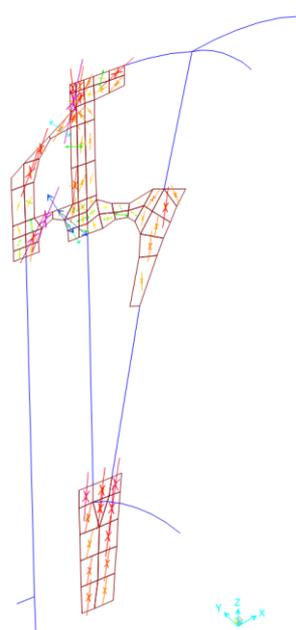


Figura 5.356 Direzioni delle tensioni principali (S-Max e S-Min) Top Face di Pilastrini interni di Secondo Peristilio con cedimenti

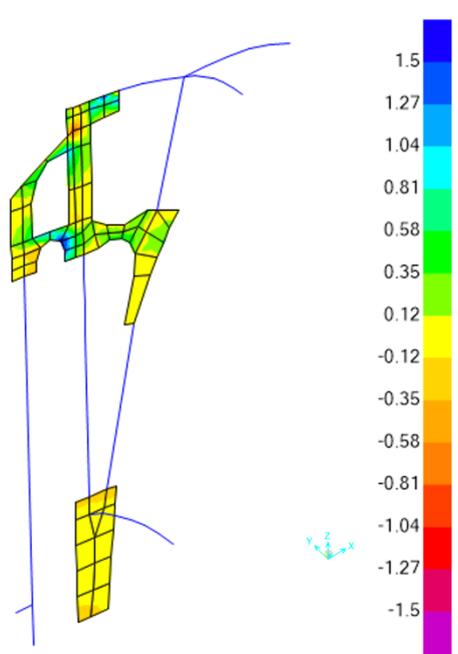


Figura 5.357 Tensioni S-Max Bottom Face di Pilastri interni di Secondo Peristilio senza cedimenti

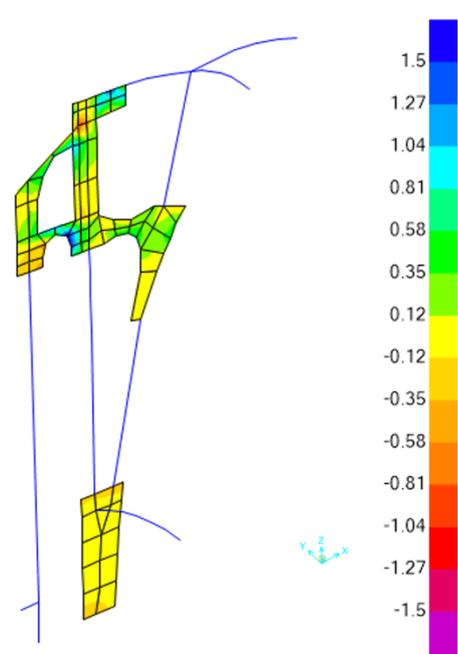


Figura 5.358 Tensioni S-Max Bottom Face di Pilastri interni del Secondo Peristilio con cedimenti

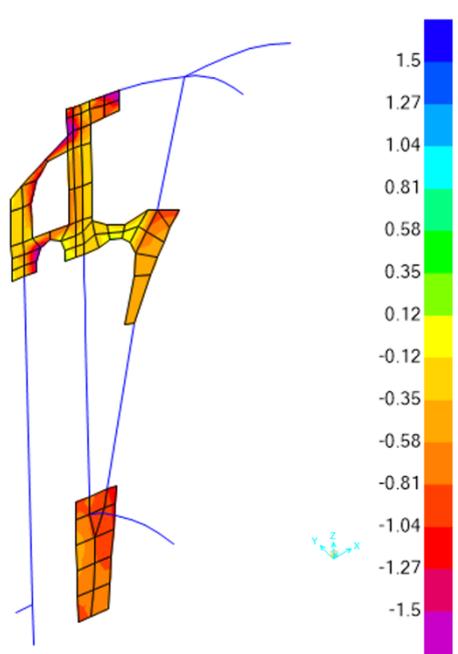


Figura 5.359 Tensioni S-Min Bottom Face di Pilastri interni di Secondo Peristilio senza cedimenti

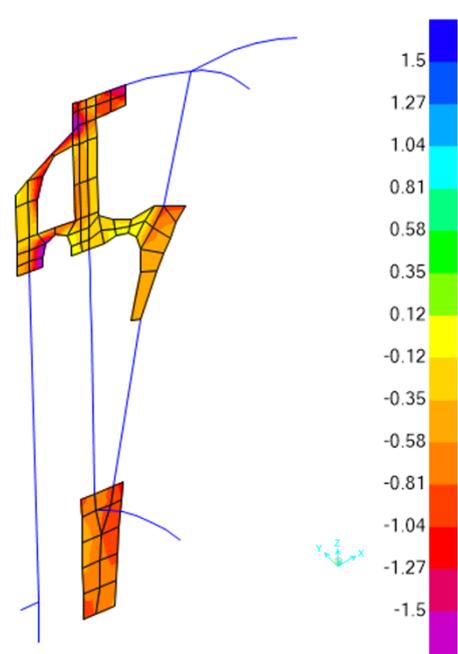


Figura 5.360 Tensioni S-Min Bottom Face di Pilastri interni di Secondo Peristilio con cedimenti

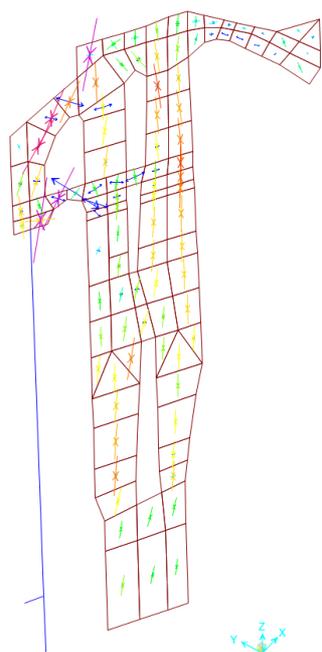


Figura 5.361 Direzioni delle tensioni principali (S-Max e S-Min) Bottom Face di Pilastrini interni di Secondo Peristilio senza cedimenti

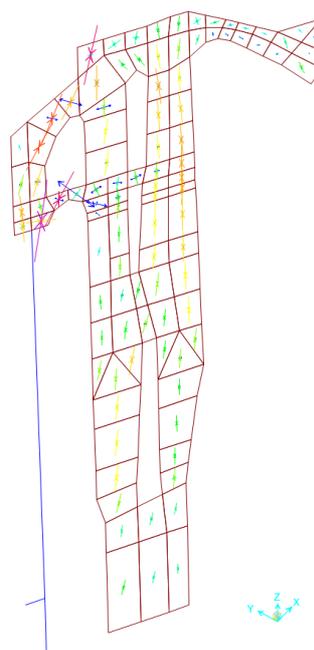


Figura 5.362 Direzioni delle tensioni principali (S-Max e S-Min) Bottom Face di Pilastrini interni di Secondo Peristilio con cedimenti

5.8.3 Elementi portanti circolari in “shell”

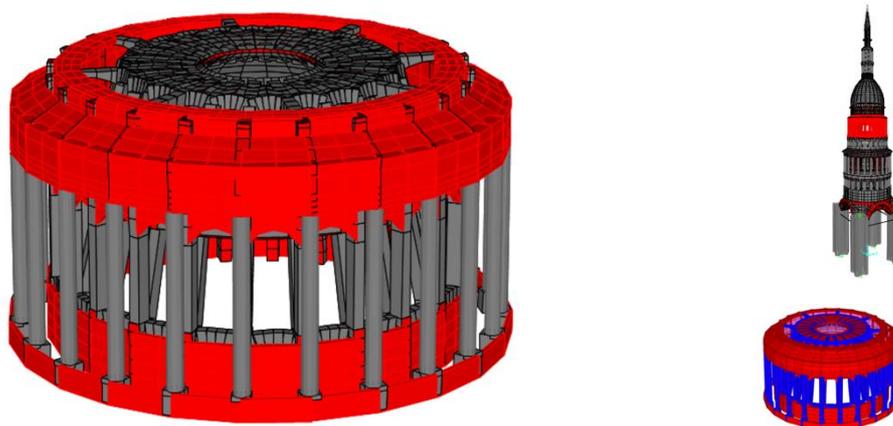


Figura 5.363 Elementi portanti circolari del Secondo Peristilio

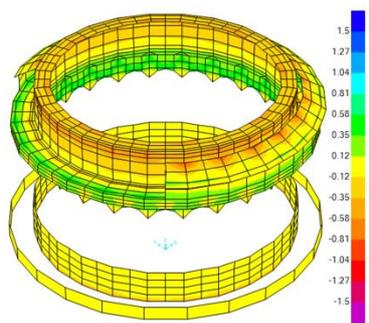


Figura 5.364 Tensione S1-1 Top Face di pareti e pavimento del Secondo Peristilio in direzione circonferenziale senza cedimenti

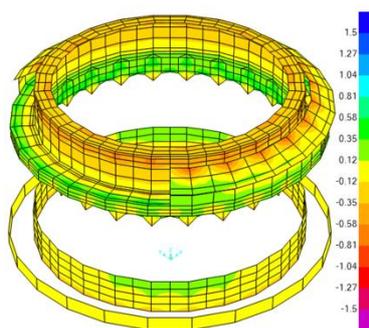


Figura 5.365 Tensione S1-1 Top Face di pareti e pavimento del Secondo Peristilio in direzione circonferenziale con cedimenti

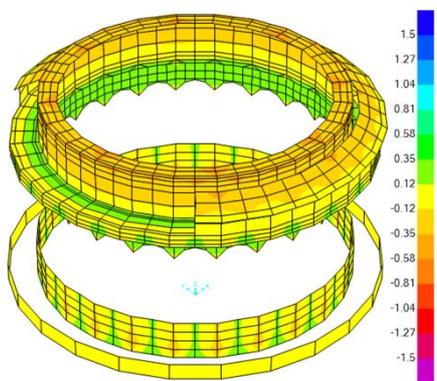


Figura 5.366 Tensioni S1-1 Bottom Face di pareti e pavimento del Secondo Peristilio in direzione circonferenziale senza cedimenti

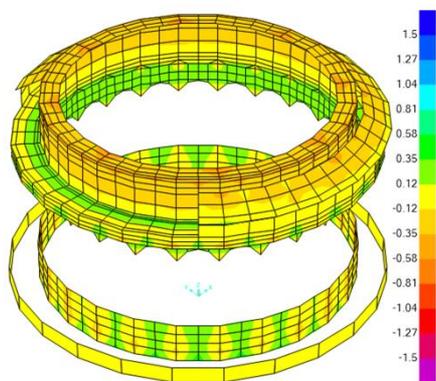


Figura 5.367 Tensioni S1-1 Bottom Face di pareti e pavimento del Secondo Peristilio in direzione circonferenziale con cedimenti

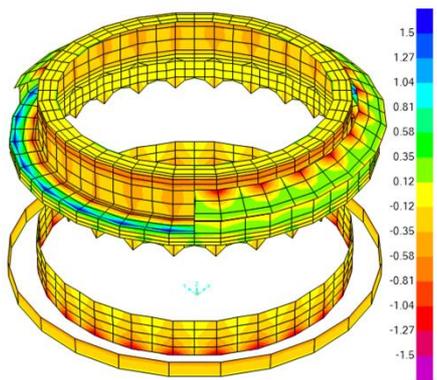


Figura 5.368 Tensioni S2-2 Top Face di pareti del Secondo Peristilio in direzione verticali e pavimento in direzione radiale senza cedimenti

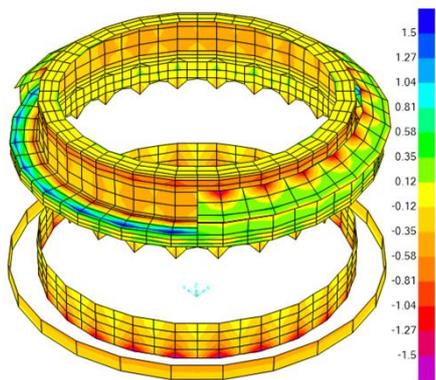


Figura 5.369 Tensioni S2-2 Top Face di pareti del Secondo Peristilio in direzione verticali e pavimento in direzione radiale con cedimenti

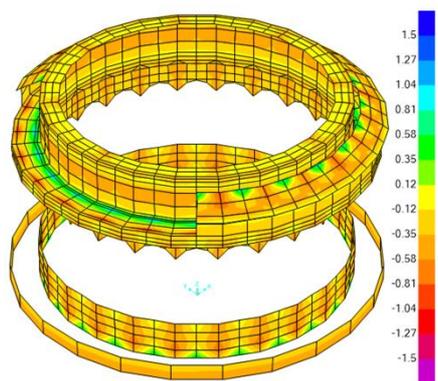


Figura 5.370 Tensioni S2-2 Bottom Face di pareti del Secondo Peristilio in direzione verticali e pavimento in direzione radiale senza cedimenti

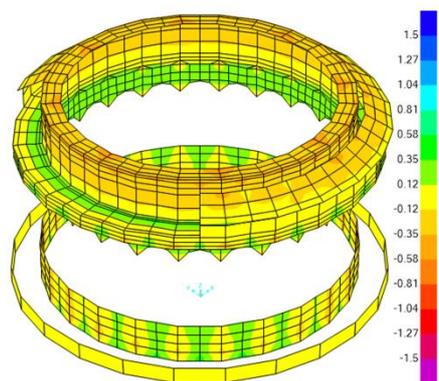


Figura 5.371 Tensioni S2-2 Bottom Face di pareti del Secondo Peristilio in direzione verticali e pavimento in direzione radiale con cedimenti

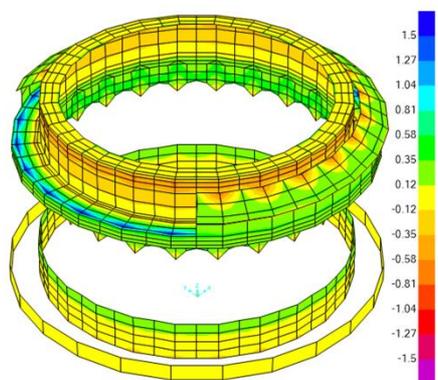


Figura 5.372 Tensione S-Max Top Face di pareti e pavimento del Secondo Peristilio senza cedimenti

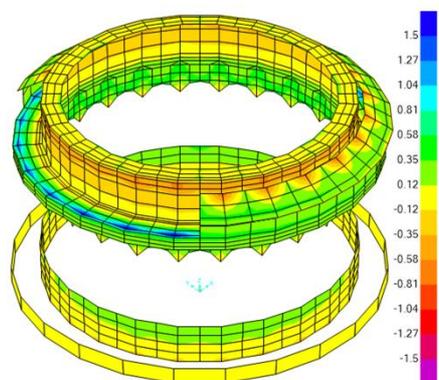


Figura 5.373 Tensione S-Max Top Face di pareti e pavimento del Secondo Peristilio con cedimenti

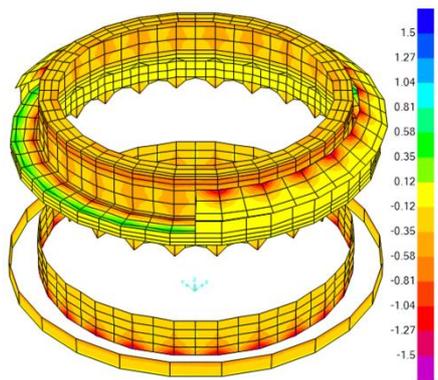


Figura 5.374 Tensioni S-Min Top Face pareti e pavimento del Secondo Peristilio senza cedimenti

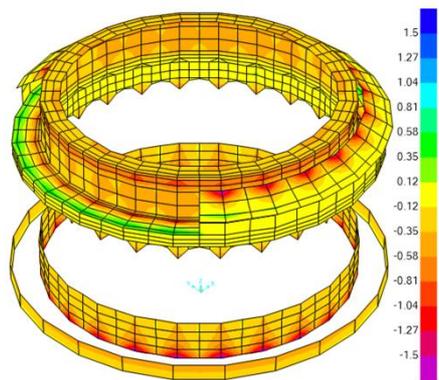


Figura 5.375 Tensioni S-Min Top Face di pareti e pavimento del Secondo Peristilio con cedimenti

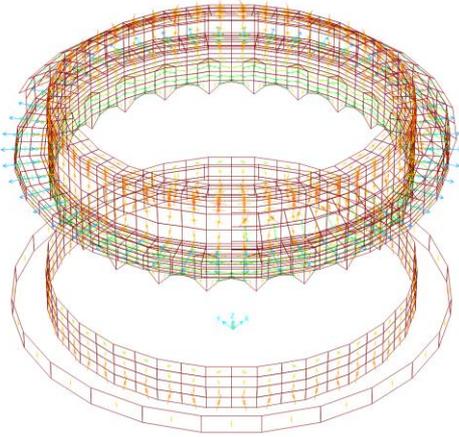


Figura 5.376 Direzioni delle tensioni principali (S-Max e S-Min) Top Face di pareti e pavimento del Secondo Peristilio senza cedimenti

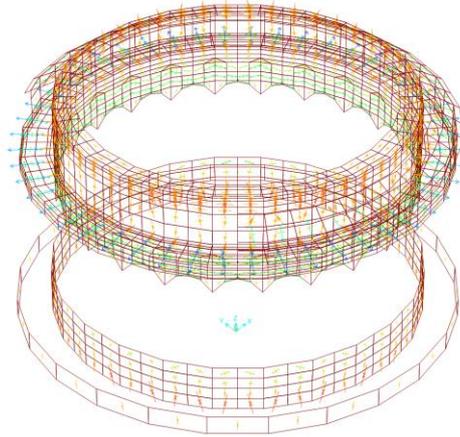


Figura 5.377 Direzioni delle tensioni principali (S-Max e S-Min) Top Face di pareti e pavimento del Secondo Peristilio con cedimenti

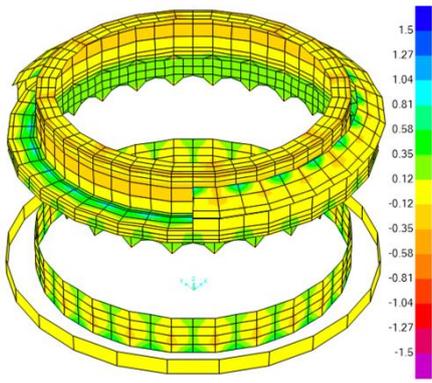


Figura 5.378 Tensioni S-Max Bottom Face di pareti e pavimento del Secondo Peristilio senza cedimenti

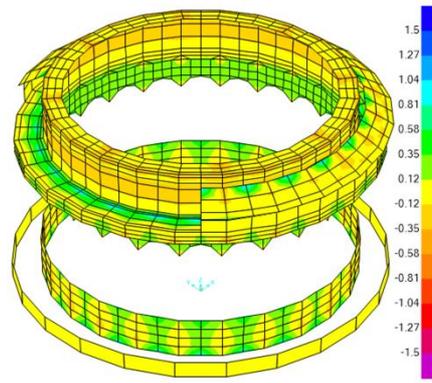


Figura 5.379 Tensioni S-Max Bottom Face di pareti e pavimento del Secondo Peristilio con cedimenti

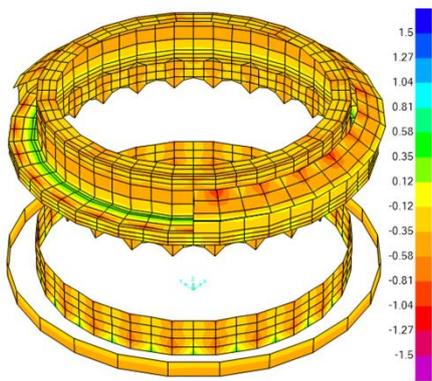


Figura 5.380 Tensioni S-Min Bottom Face di pareti e pavimento del Secondo Peristilio senza cedimenti

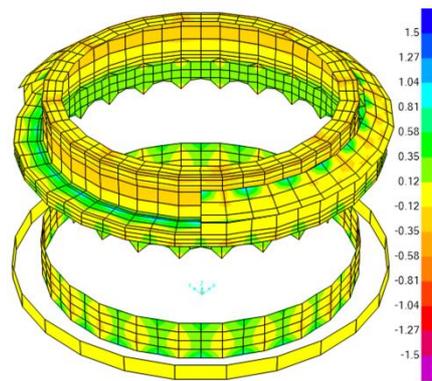


Figura 5.381 Tensioni S-Min Bottom Face di pareti e pavimento del Secondo Peristilio con cedimenti

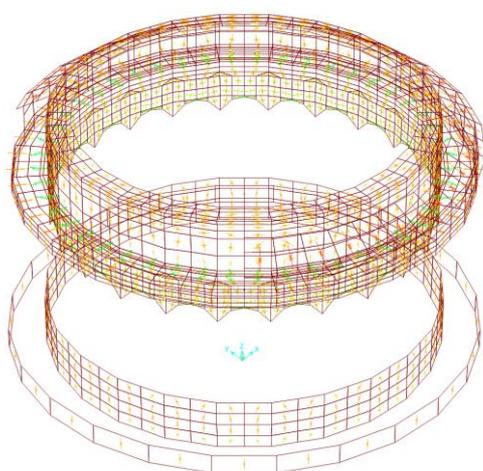


Figura 5.382 Direzioni delle tensioni principali (S-Max e S-Min) Bottom Face di pareti e pavimento del Secondo Stilobate senza cedimenti

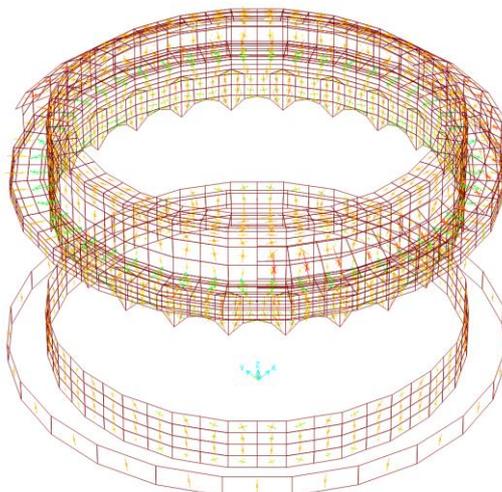


Figura 5.383 Direzioni delle tensioni principali (S-Max e S-Min) Bottom Face di pareti e pavimento del Secondo Stilobate con cedimenti

5.8.4 Seconda Cupola di Basilica

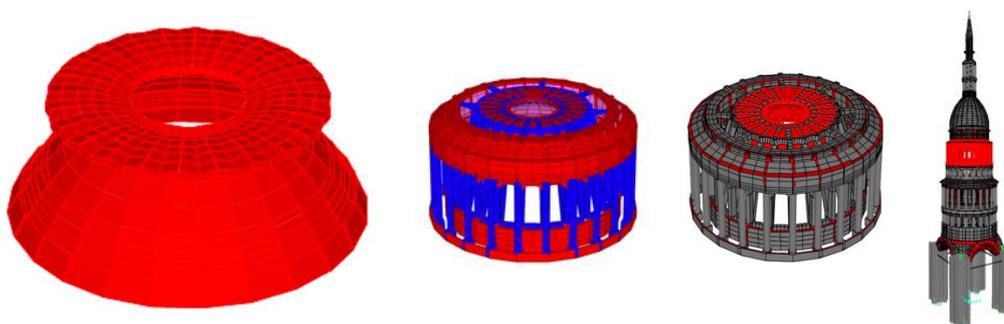


Figura 5.384 Seconda Cupola di Basilica

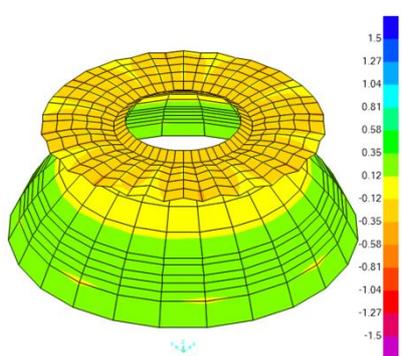


Figura 5.385 Tensione S1-1 Top Face di Seconda Cupola e pavimento in direzione circonferenziale senza cedimenti

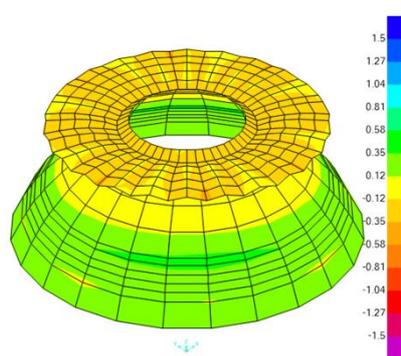


Figura 5.386 Tensione S1-1 Top Face di Seconda Cupola e pavimento in direzione circonferenziale con cedimenti

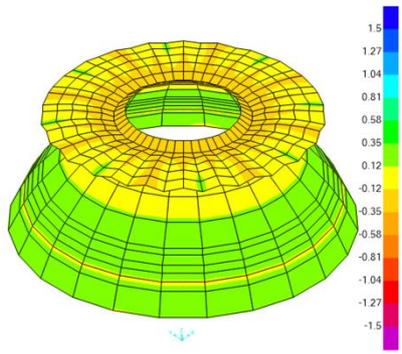


Figura 5.387 Tensioni S1-1 Bottom Face di Seconda Cupola e pavimento in direzione circonferenziale senza cedimenti

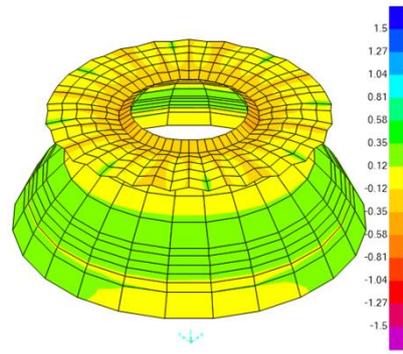


Figura 5.388 Tensioni S1-1 Bottom Face di Seconda Cupola e pavimento in direzione circonferenziale con cedimenti

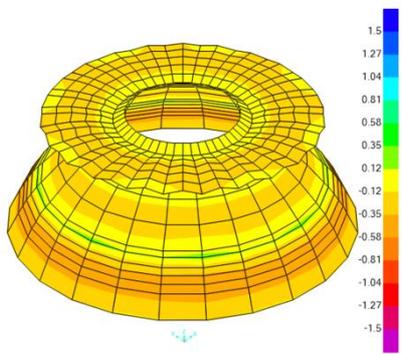


Figura 5.389 Tensioni S2-2 Top Face di Seconda Cupola in direzione inclinati verso al centro di asse verticale di Cupola e pavimento in direzione radiale senza cedimenti

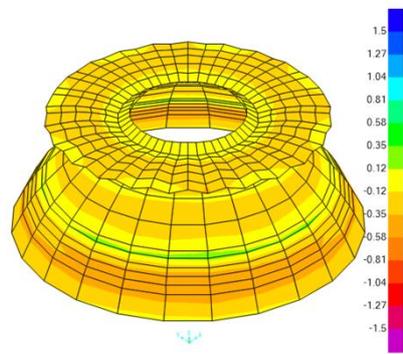


Figura 5.390 Tensioni S2-2 Top Face di Seconda Cupola in direzione inclinati verso al centro di asse verticale di Cupola e pavimento in direzione radiale con cedimenti

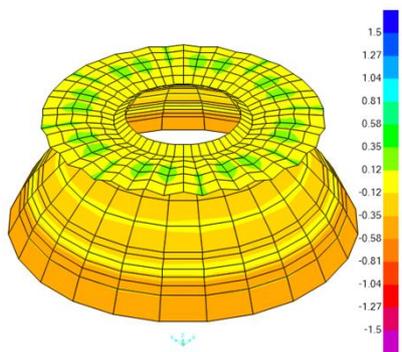


Figura 5.391 Tensioni S2-2 Bottom Face di Seconda Cupola in direzione inclinati verso al centro di asse verticale di Cupola e pavimento in direzione radiale senza cedimenti

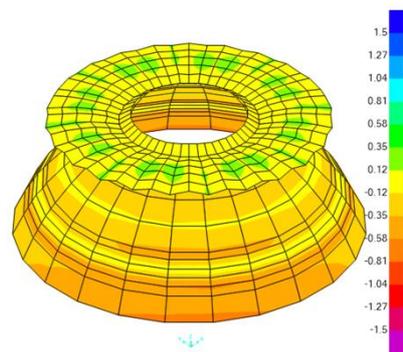


Figura 5.392 Tensioni S2-2 Bottom Face di Seconda Cupola in direzione inclinati verso al centro di asse verticale di Cupola e pavimento in direzione radiale con cedimenti

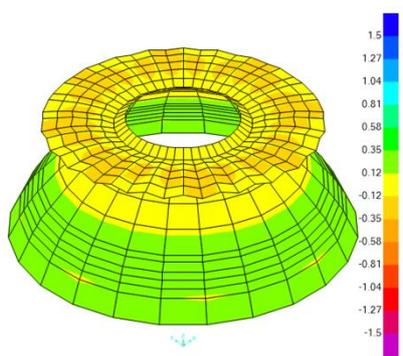


Figura 5.393 Tensione S-Max Top Face di Seconda Cupola e pavimento senza cedimenti

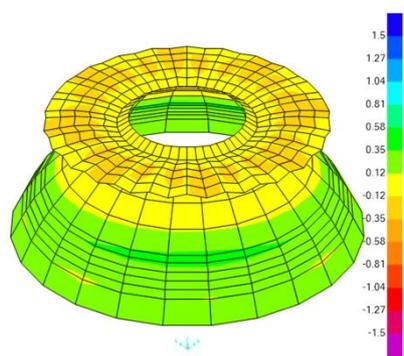


Figura 5.394 Tensione S-Max Top Face di Seconda Cupola e pavimento con cedimenti

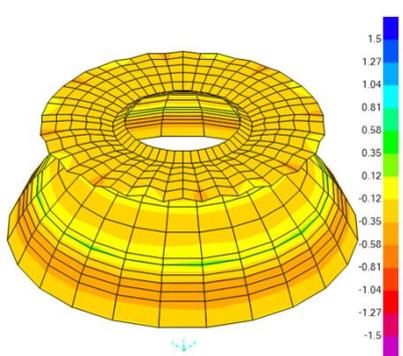


Figura 5.395 Tensioni S-Min Top Face di Seconda Cupola e pavimento senza cedimenti

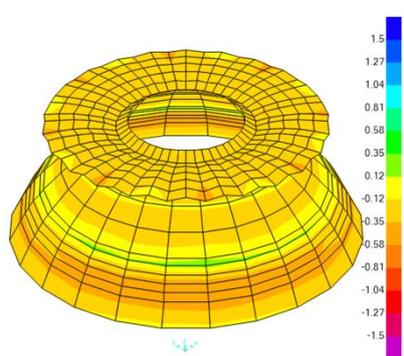


Figura 5.396 Tensioni S-Min Top Face di Seconda Cupola e pavimento con cedimenti

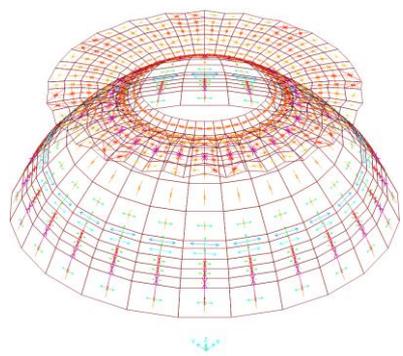


Figura 5.397 Direzioni delle tensioni principali (S-Max e S-Min) Top Face di Seconda Cupola e pavimento senza cedimenti

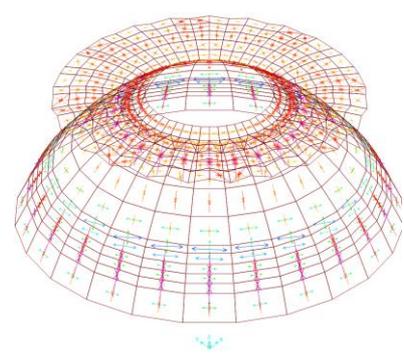


Figura 5.398 Direzioni delle tensioni principali (S-Max e S-Min) Top Face di Seconda Cupola e pavimento con cedimenti

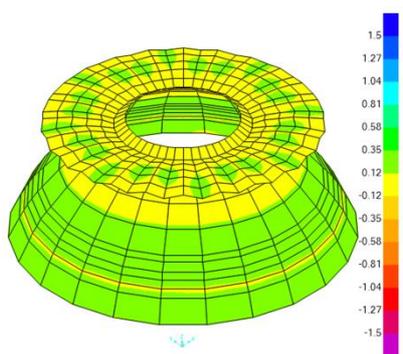


Figura 5.399 Tensioni S-Max Bottom Face di Seconda Cupola e pavimento senza cedimenti

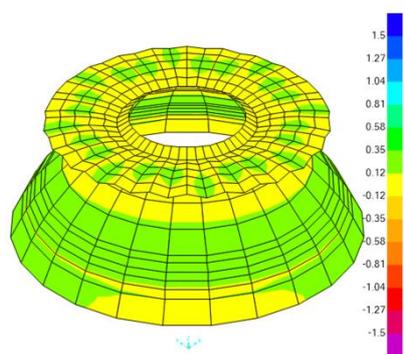


Figura 5.400 Tensioni S-Max Bottom Face di Seconda Cupola e pavimento con cedimenti

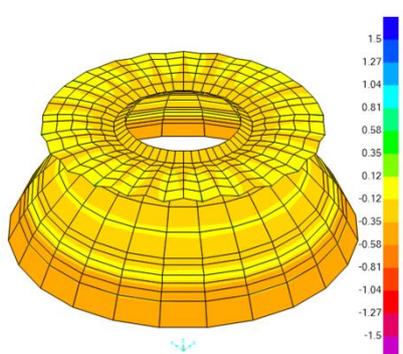


Figura 5.401 Tensioni S-Min Bottom Face di Seconda Cupola e pavimento senza cedimenti

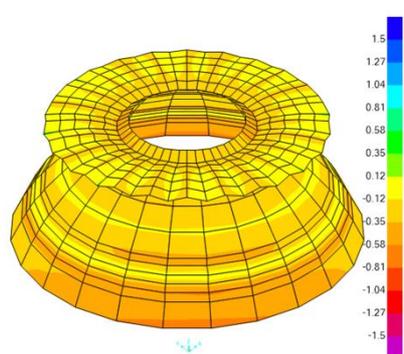


Figura 5.402 Tensioni S-Min Bottom Face Seconda Cupola e pavimento con cedimenti

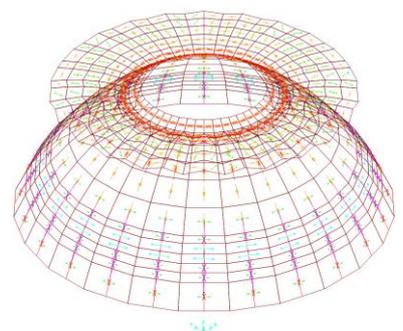


Figura 5.403 Direzioni delle tensioni principali (S-Max e S-Min) Bottom Face di Seconda Cupola e pavimento senza cedimenti

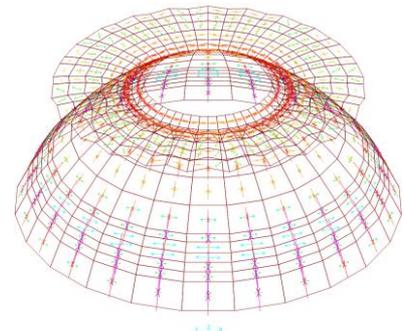


Figura 5.404 Direzioni delle tensioni principali (S-Max e S-Min) Top Face di Seconda Cupola e pavimento con cedimenti

5.9 Attico e della Terza Cupola di Basilica

5.9.1 Elementi portanti dei pilastri e degli archi in "frame"

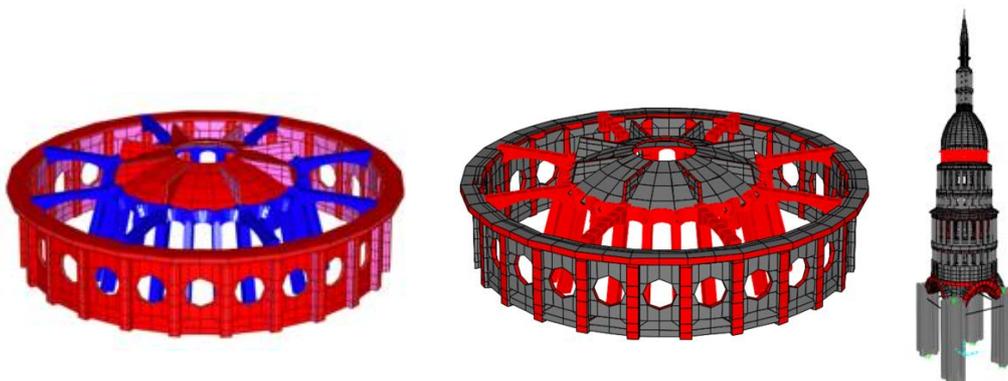


Figura 5.405 Elementi portanti dei pilastri e degli archi di Attico in "frame"

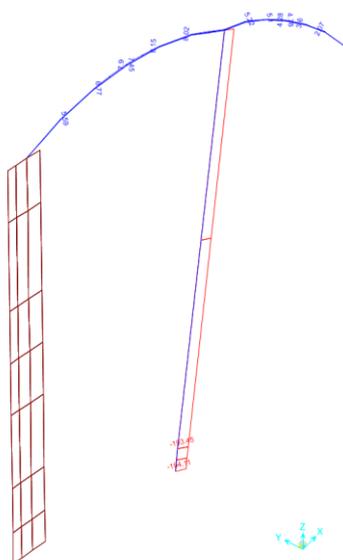


Figura 5.406 Sforzo assiale sui pilastri e sugli archi di Attico della Cupola senza cedimenti

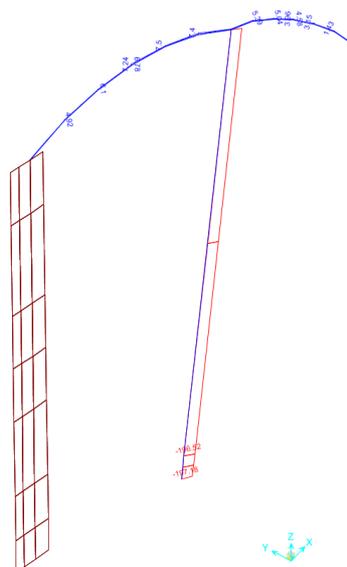


Figura 5.407 Sforzo assiale sui pilastri e sugli archi di Attico della Cupola con cedimenti

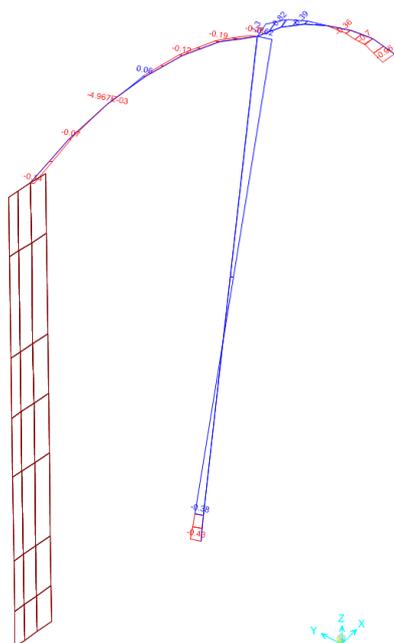


Figura 5.408 Momento flettente 2-2 sui pilastri e archi radiali in direzione circonferenziale e sugli archi circonferenziali in direzione orizzontale di Attico della Cupola

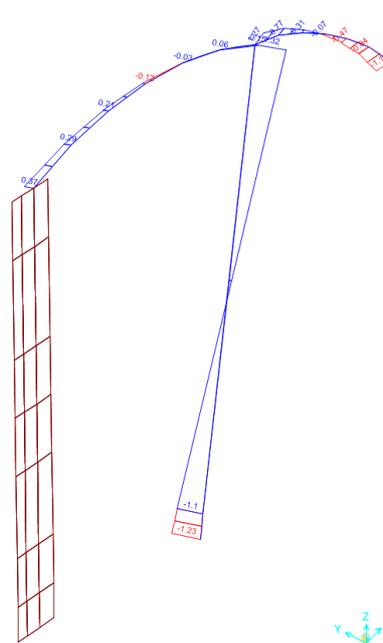


Figura 5.409 Momento flettente 2-2 sui pilastri e archi radiali in direzione circonferenziale e sugli archi circonferenziali in direzione orizzontale di Attico della Cupola

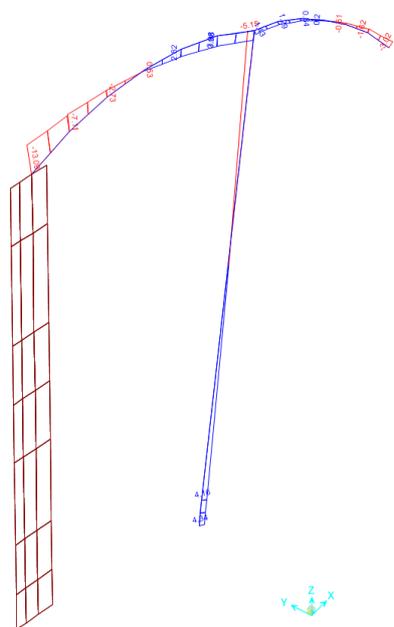


Figura 5.410 Momento flettente 3-3 sui pilastri e archi radiali in direzione radiale e sugli archi circonferenziali in direzione verticale di Attico della Cupola

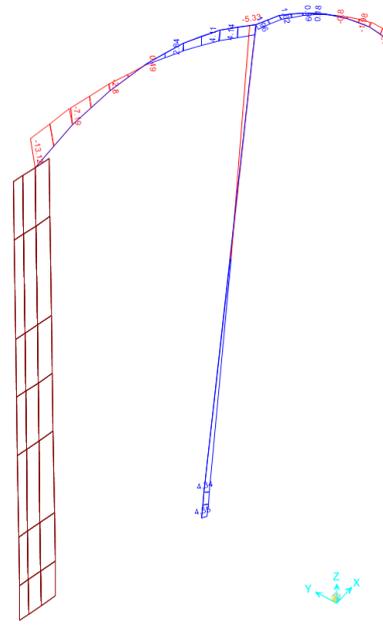


Figura 5.411 Momento flettente 3-3 sui pilastri e archi radiali in direzione radiale e sugli archi circonferenziali in direzione verticale di Attico della Cupola

Tabella 5.16 Sforzi assiali degli Imbuti Antonelliani dell'Attico di Cupola ed il rapporto tra due condizioni

	Sforzo Assiale dei pilastri [kN]			
	Senza cedimenti	Con cedimenti	Rapporto	
Nord a Est (orario)	1	-153.70	-156.57	102%
	2	-153.91	-162.93	106%
	3	-193.84	-209.53	108%
	4	-154.86	-168.29	109%
	5	-154.69	-164.91	107%
	6	-193.99	-199.01	103%

	Sforzo Assiale dei pilastri [kN]			
	Senza cedimenti	Con cedimenti	Rapporto	
Est a Sud (orario)	7	-154.60	-151.42	98%
	8	-154.54	-144.75	94%
	9	-193.56	-176.88	91%
	10	-153.63	-139.67	91%
	11	-152.84	-142.51	93%
	12	-191.04	-186.37	98%

	Sforzo Assiale dei pilastri [kN]			
	Senza cedimenti	Con cedimenti	Rapporto	
Sud a Ovest (orario)	13	-152.07	-155.87	102%
	14	-152.31	-162.76	107%
	15	-191.78	-208.71	109%
	16	-153.51	-166.88	109%
	17	-154.06	-163.12	106%
	18	-193.79	-196.90	102%

	Sforzo Assiale dei pilastri [kN]			
	Senza cedimenti	Con cedimenti	Rapporto	
Ovest a Nord (orario)	19	-154.60	-150.29	97%
	20	-154.71	-144.87	94%
	21	-194.16	-178.74	92%
	22	-154.56	-142.15	92%
	23	-154.24	-145.10	94%
	24	-193.17	-188.69	98%

5.9.2 Elementi portanti dei pilastri in "shell"

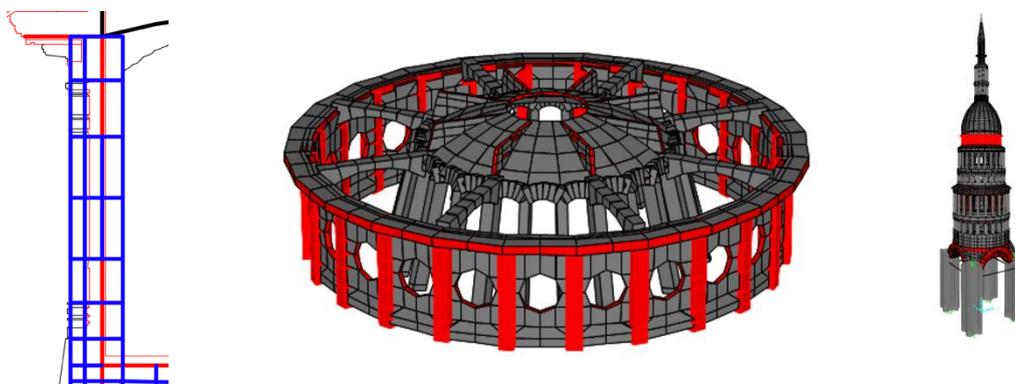


Figura 5.412 Elementi portanti dei pilastri dell'Attico in "shell"

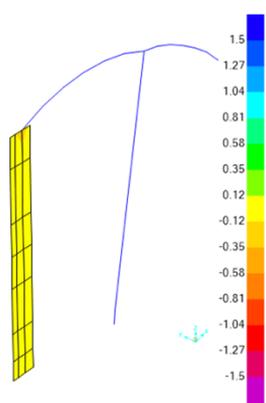


Figura 5.413 Tensione S1-1 Top Face di Pilastri interni di Attico in direzione radiale senza cedimenti

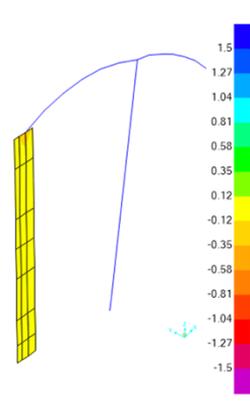


Figura 5.414 Tensione S1-1 Top Face di Pilastri interni di Attico in direzione radiale con cedimenti

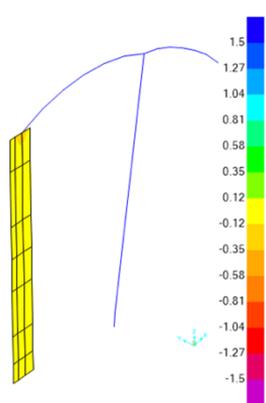


Figura 5.415 Tensioni S1-1 Bottom Face di Pilastri interni di Attico in direzione radiale senza cedimenti

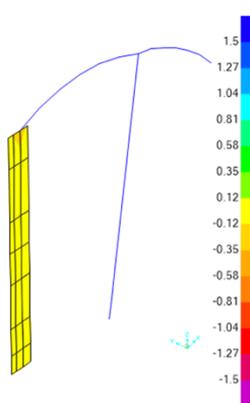


Figura 5.416 Tensioni S1-1 Bottom Face di Pilastri interni di Attico in direzione radiale con cedimenti

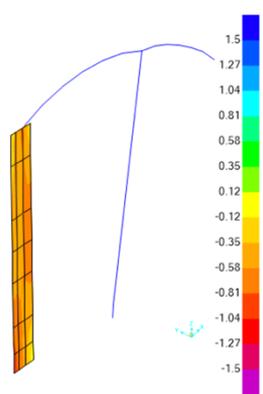


Figura 5.417 Tensioni S2-2 Top Face di Pilastri interni di Attico in direzione verticale senza cedimenti

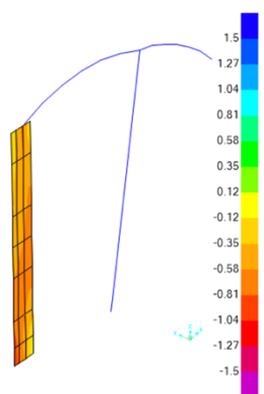


Figura 5.418 Tensioni S2-2 Top Face di Pilastri interni di Attico in direzione verticale con cedimenti

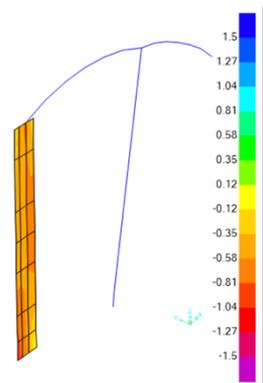


Figura 5.419 Tensioni S2-2 Bottom Face di Pilastri interni di Attico in direzione verticale senza cedimenti

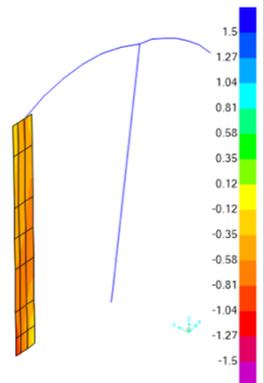


Figura 5.420 Tensioni S2-2 Bottom Face di Pilastri interni di Attico in direzione verticale con cedimenti

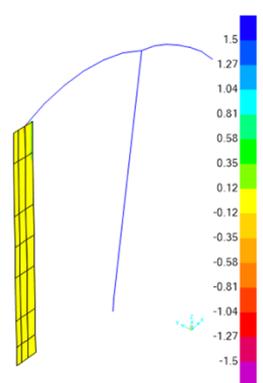


Figura 5.421 Tensione S-Max Top Face di Pilastri interni di Attico senza cedimenti

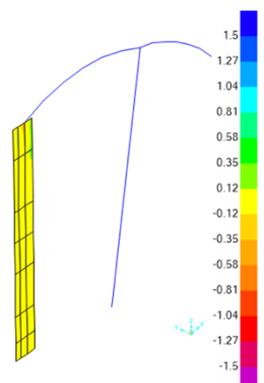


Figura 5.422 Tensione S-Max Top Face di Pilastri interni di Attico con cedimenti

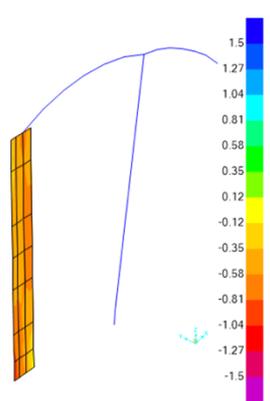


Figura 5.423 Tensioni S-Min Top Face di Pilastri interni di Attico senza cedimenti

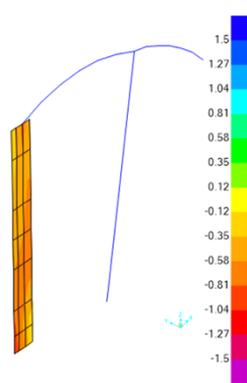


Figura 5.424 Tensioni S-Min Top Face di Pilastri interni di Attico con cedimenti

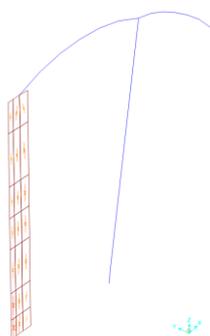


Figura 5.425 Direzioni delle tensioni principali (S-Max e S-Min) Top Face di Pilastri interni di Attico senza cedimenti

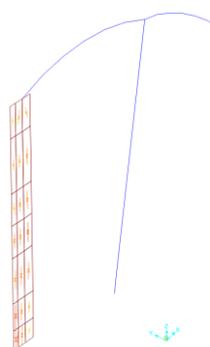


Figura 5.426 Direzioni delle tensioni principali (S-Max e S-Min) Top Face di Pilastri interni di Attico con cedimenti

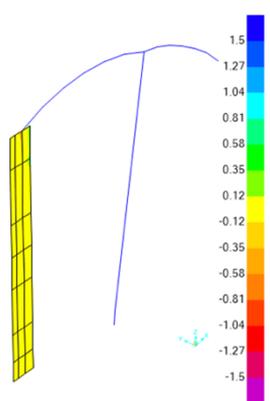


Figura 5.427 Tensioni S-Max Bottom Face di Pilastri interni di Attico senza cedimenti

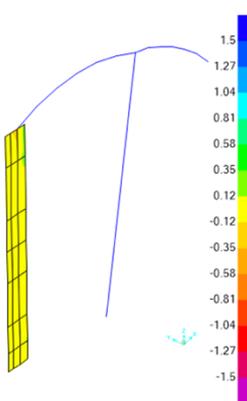


Figura 5.428 Tensioni S-Max Bottom Face di Pilastri interni del Attico con cedimenti

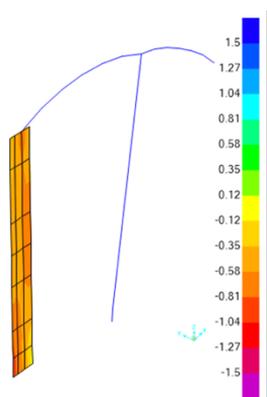


Figura 5.429 Tensioni S-Min Bottom Face di Pilastrini interni di Attico senza cedimenti

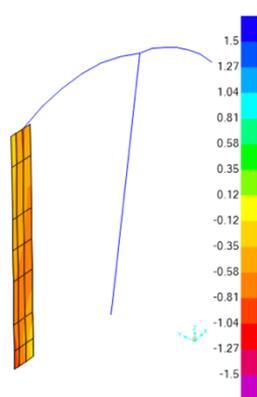


Figura 5.430 Tensioni S-Min Bottom Face di Pilastrini interni di Attico con cedimenti

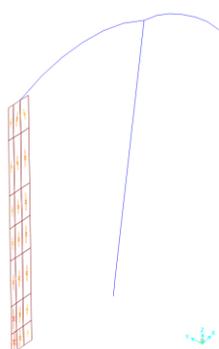


Figura 5.431 Direzioni delle tensioni principali (S-Max e S-Min) Bottom Face di Pilastrini interni di Attico senza cedimenti

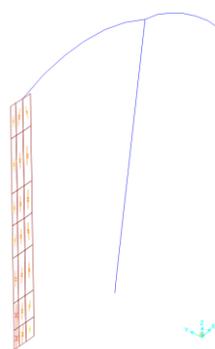


Figura 5.432 Direzioni delle tensioni principali (S-Max e S-Min) Bottom Face di Pilastrini interni di Attico con cedimenti

5.9.3 Elementi portanti circolari in "shell"

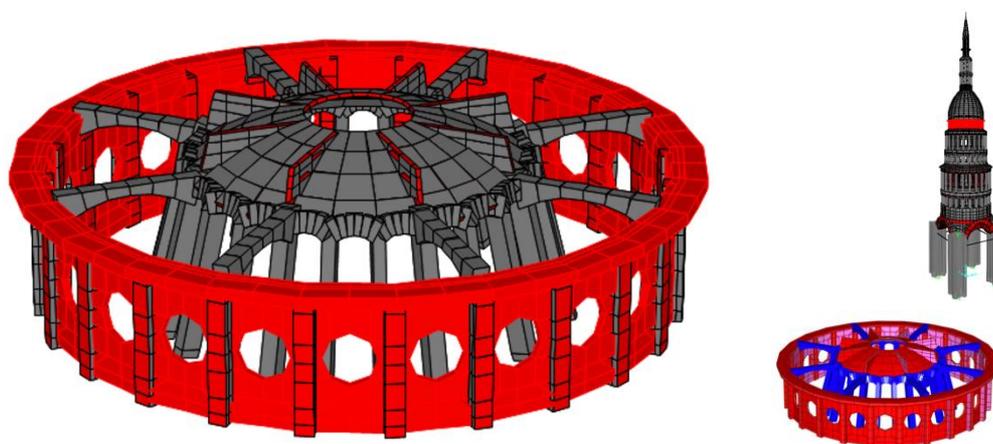


Figura 5.433 Elementi portanti circolari dell'Attico in "shell"

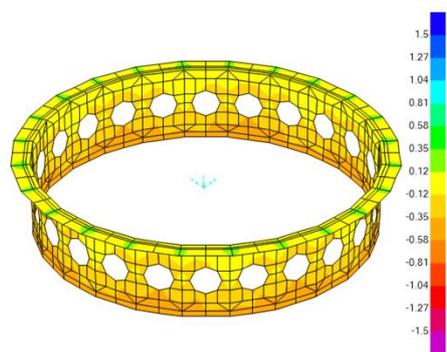


Figura 5.434 Tensione S1-1 Top Face di pareti e pavimento di Attico in direzione circonferenziale senza cedimenti

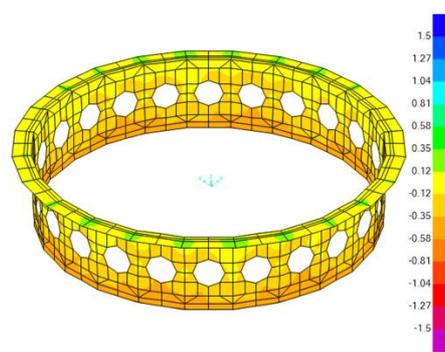


Figura 5.435 Tensione S1-1 Top Face di pareti e pavimento di Attico in direzione circonferenziale con cedimenti

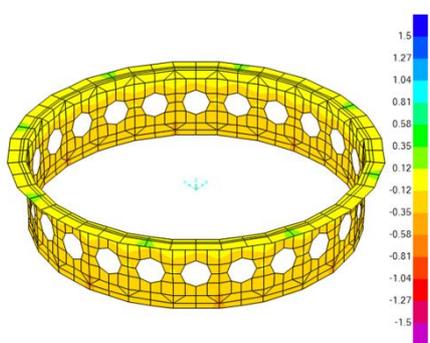


Figura 5.436 Tensioni S1-1 Bottom Face di pareti e pavimento di Attico in direzione circonferenziale senza cedimenti

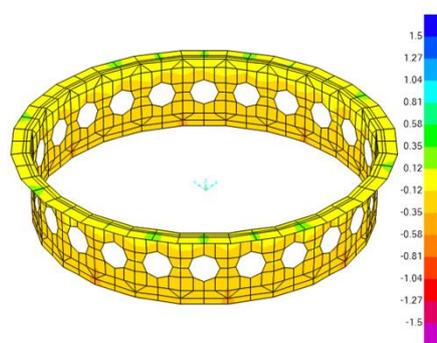


Figura 5.437 Tensioni S1-1 Bottom Face di pareti e pavimento di Attico in direzione circonferenziale con cedimenti

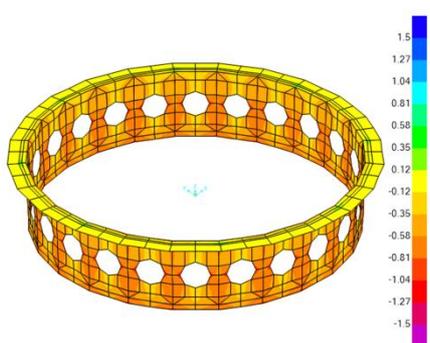


Figura 5.438 Tensioni S2-2 Top Face di pareti di Attico in direzione verticali e pavimento in direzione radiale senza cedimenti

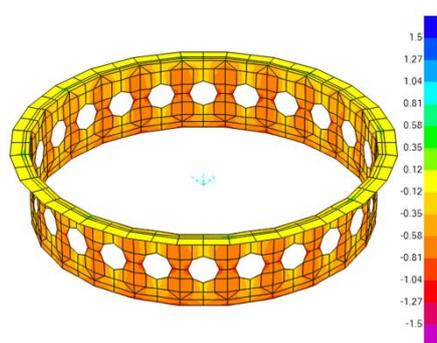


Figura 5.439 Tensioni S2-2 Top Face di pareti di Attico in direzione verticali e pavimento in direzione radiale con cedimenti

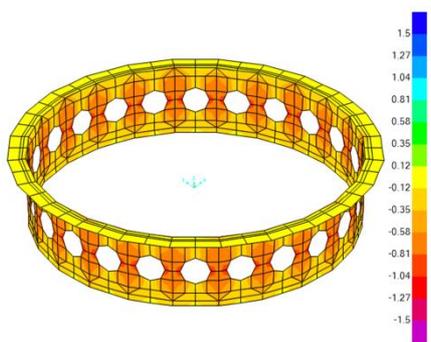


Figura 5.440 Tensioni S2-2 Bottom Face di pareti di Attico in direzione verticali e pavimento in direzione radiale senza cedimenti

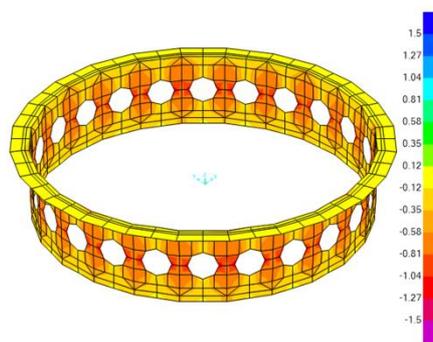


Figura 5.441 Tensioni S2-2 Bottom Face di pareti di Attico in direzione verticali e pavimento in direzione radiale con cedimenti

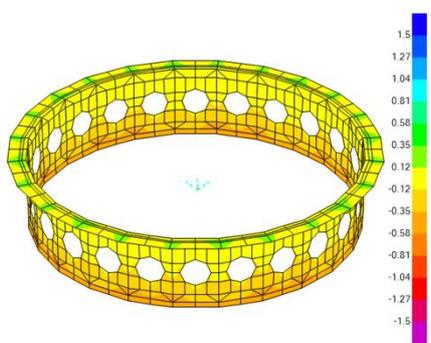


Figura 5.442 Tensione S-Max Top Face di pareti e pavimento di Attico senza cedimenti

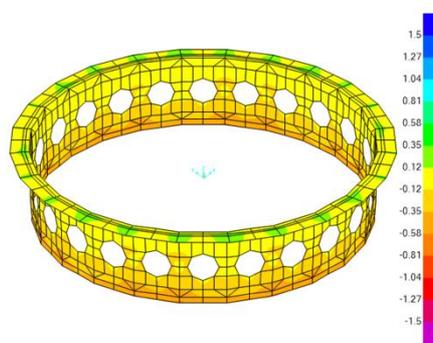


Figura 5.443 Tensione S-Max Top Face di pareti e pavimento di Attico con cedimenti

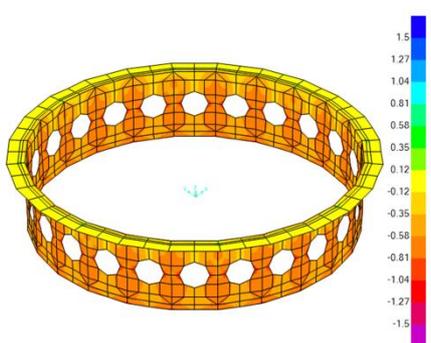


Figura 5.444 Tensioni S-Min Top Face pareti e pavimento di Attico senza cedimenti

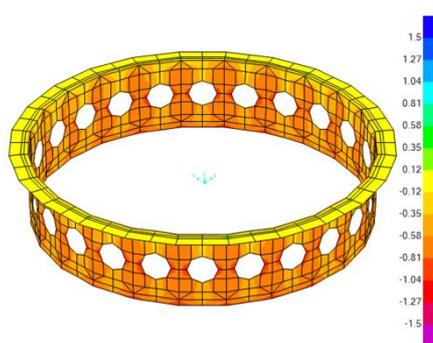


Figura 5.445 Tensioni S-Min Top Face di pareti e pavimento di Attico con cedimenti

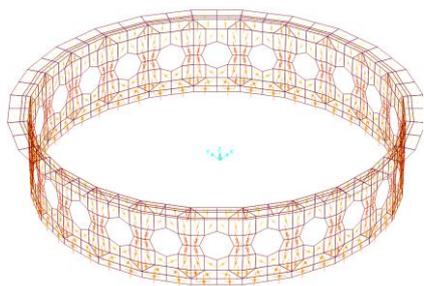


Figura 5.446 Direzioni delle tensioni principali (S-Max e S-Min) Top Face di pareti e pavimento di Attico senza cedimenti

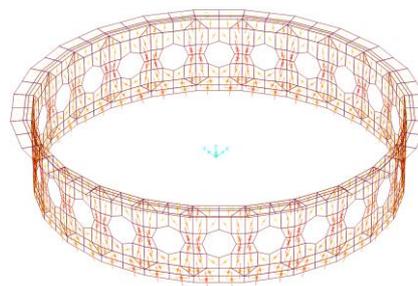


Figura 5.447 Direzioni delle tensioni principali (S-Max e S-Min) Top Face di pareti e pavimento di Attico con cedimenti

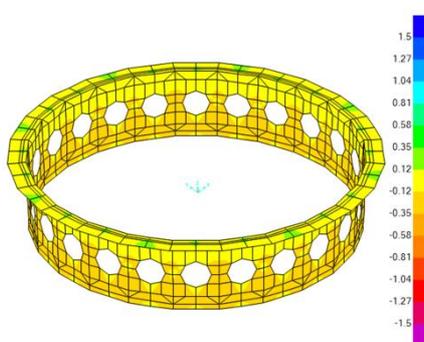


Figura 5.448 Tensioni S-Max Bottom Face di pareti e pavimento di Attico senza cedimenti

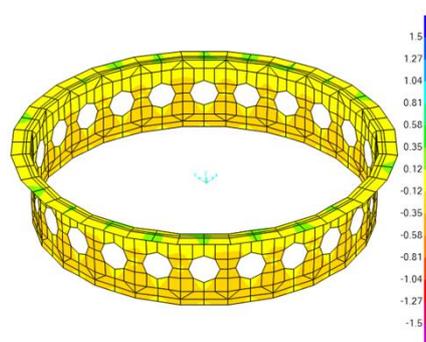


Figura 5.449 Tensioni S-Max Bottom Face di pareti e pavimento di Attico con cedimenti

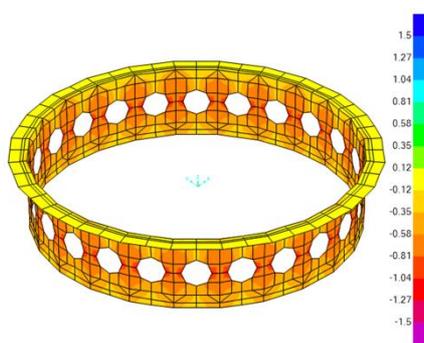


Figura 5.450 Tensioni S-Min Bottom Face di pareti e pavimento di Attico senza cedimenti

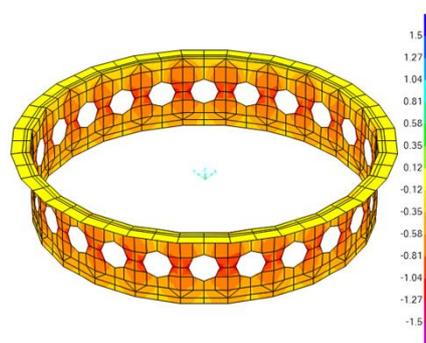


Figura 5.451 Tensioni S-Min Bottom Face di pareti e pavimento di Attico con cedimenti

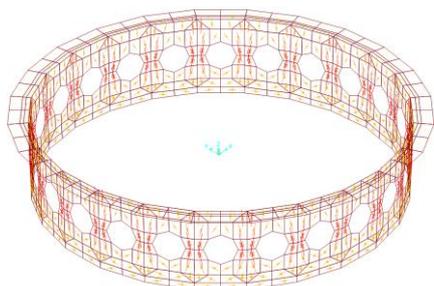


Figura 5.452 Direzioni delle tensioni principali (S-Max e S-Min) Bottom Face di pareti e pavimento di Attico senza cedimenti

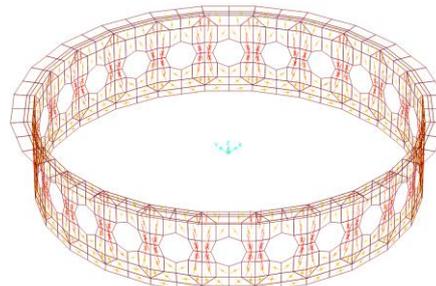


Figura 5.453 Direzioni delle tensioni principali (S-Max e S-Min) Bottom Face di pareti e pavimento di Attico con cedimenti

5.9.4 Terza Cupola di Basilica

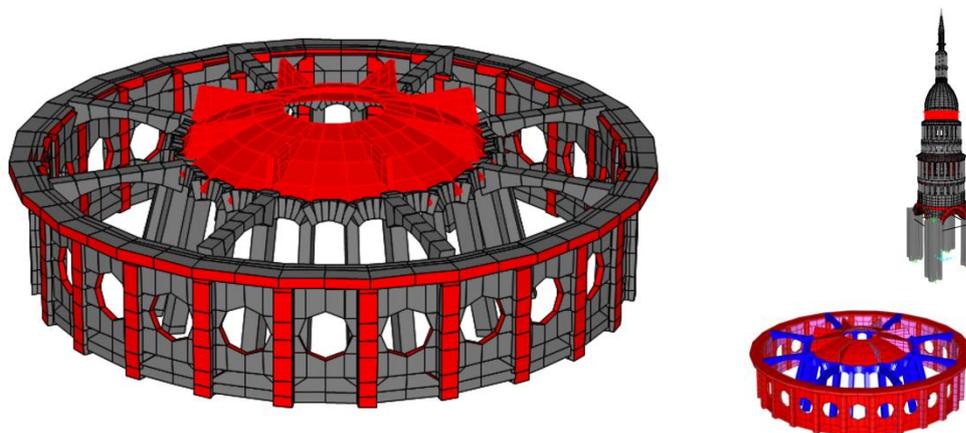


Figura 5.454 Terza Cupola di Basilica

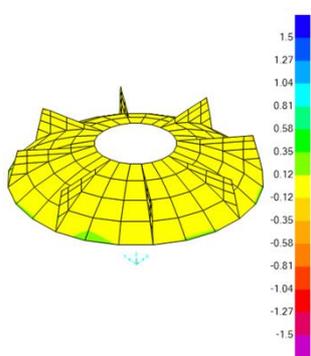


Figura 5.455 Tensione S1-1 Top Face di Terza Cupola in direzione circonferenziale e nervature in direzione radiale senza cedimenti

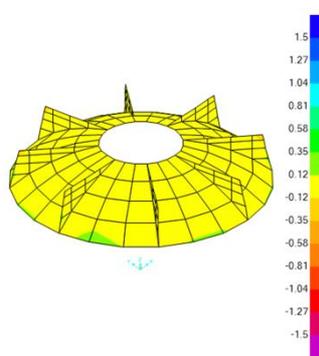


Figura 5.456 Tensione S1-1 Top Face di Terza Cupola in direzione circonferenziale e nervature in direzione radiale con cedimenti

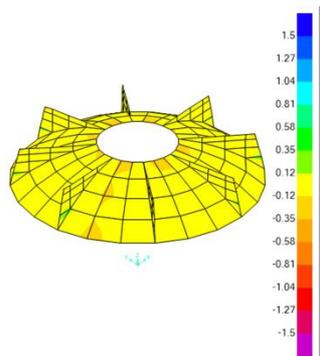


Figura 5.457 Tensioni S1-1 Bottom Face di Terza Cupola in direzione circonferenziale e nervature in direzione radiale senza cedimenti

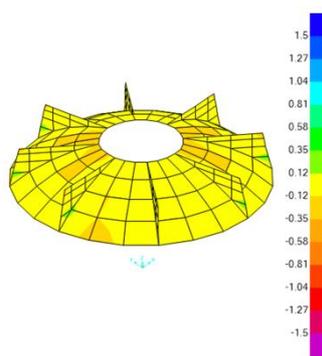


Figura 5.458 Tensioni S1-1 Bottom Face di Terza Cupola in direzione circonferenziale e nervature in direzione radiale con cedimenti

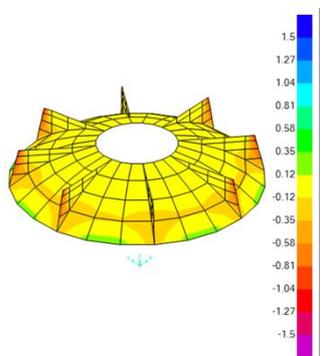


Figura 5.459 Tensioni S2-2 Top Face di Terza Cupola in direzione inclinati verso al centro di asse verticale di Cupola e nervature in direzione verticale senza cedimenti

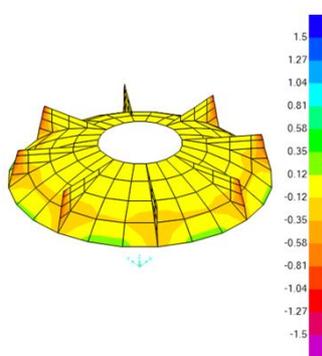


Figura 5.460 Tensioni S2-2 Top Face di Terza Cupola in direzione inclinati verso al centro di asse verticale di Cupola e nervature in direzione verticale con cedimenti

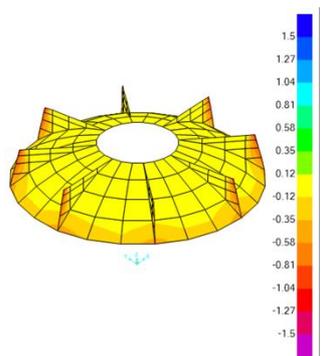


Figura 5.461 Tensioni S2-2 Bottom Face di Terza Cupola in direzione inclinati verso al centro di asse verticale di Cupola e nervature in direzione verticale senza cedimenti

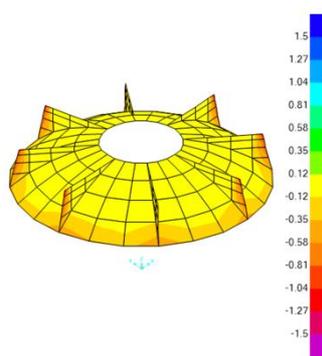


Figura 5.462 Tensioni S2-2 Bottom Face di Terza Cupola in direzione inclinati verso al centro di asse verticale di Cupola e nervature in direzione verticale con cedimenti

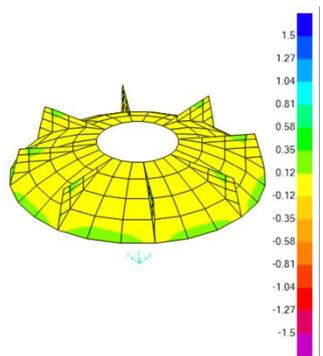


Figura 5.463 Tensione S-Max Top Face di Terza Cupola e nervature senza cedimenti

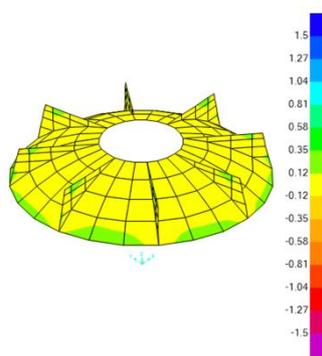


Figura 5.464 Tensione S-Max Top Face di Terza Cupola e nervature con cedimenti

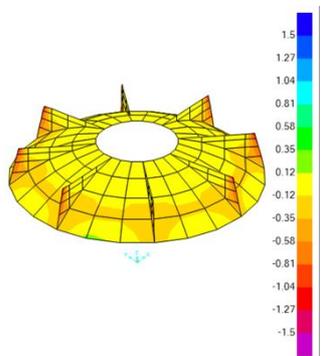


Figura 5.465 Tensioni S-Min Top Face di Terza Cupola e nervature senza cedimenti

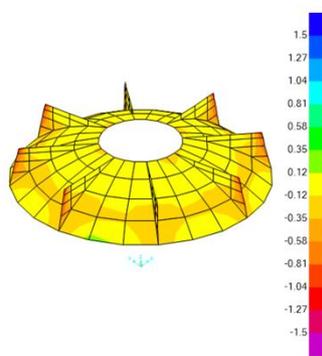


Figura 5.466 Tensioni S-Min Top Face di Terza Cupola e nervature con cedimenti

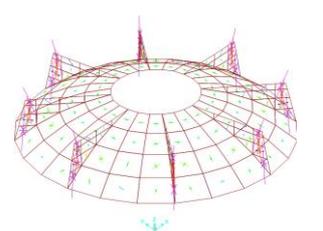


Figura 5.467 Direzioni delle tensioni principali (S-Max e S-Min) Top Face di Terza Cupola e nervature senza cedimenti

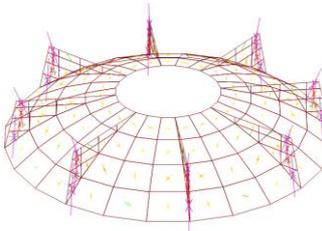


Figura 5.468 Direzioni delle tensioni principali (S-Max e S-Min) Top Face di Terza Cupola e nervature con cedimenti

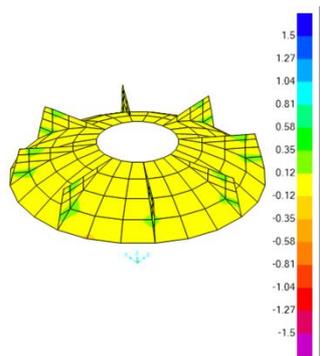


Figura 5.469 Tensioni S-Max Bottom Face di Terza Cupola e nervature senza cedimenti

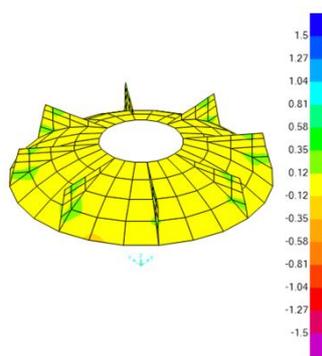


Figura 5.470 Tensioni S-Max Bottom Face di Terza Cupola e nervature con cedimenti

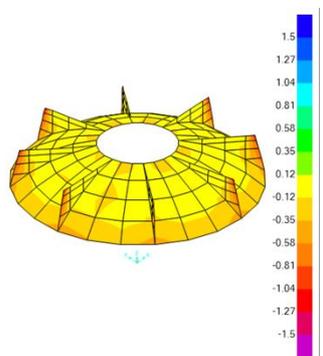


Figura 5.471 Tensioni S-Min Bottom Face di Terza Cupola e nervature senza cedimenti

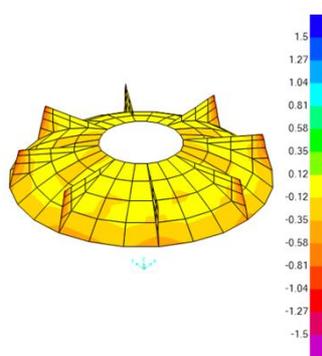


Figura 5.472 Tensioni S-Min Bottom Face Terza Cupola e nervature con cedimenti

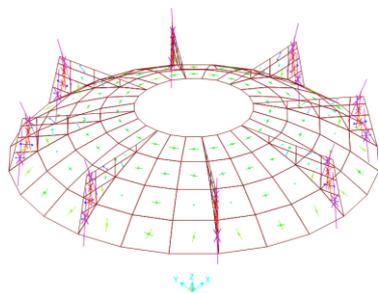


Figura 5.473 Direzioni delle tensioni principali (S-Max e S-Min) Bottom Face di Terza Cupola e nervature senza cedimenti

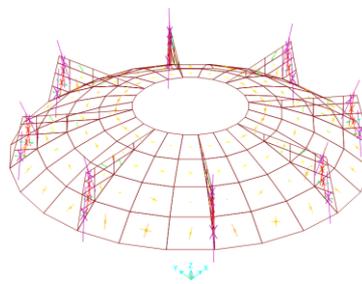


Figura 5.474 Direzioni delle tensioni principali (S-Max e S-Min) Top Face di Terza Cupola e nervature con cedimenti

5.10 Gran Tazza, Imbuto Antonelliano Quarta Cupola e Quinta Cupola

5.10.1 Gran Tazza

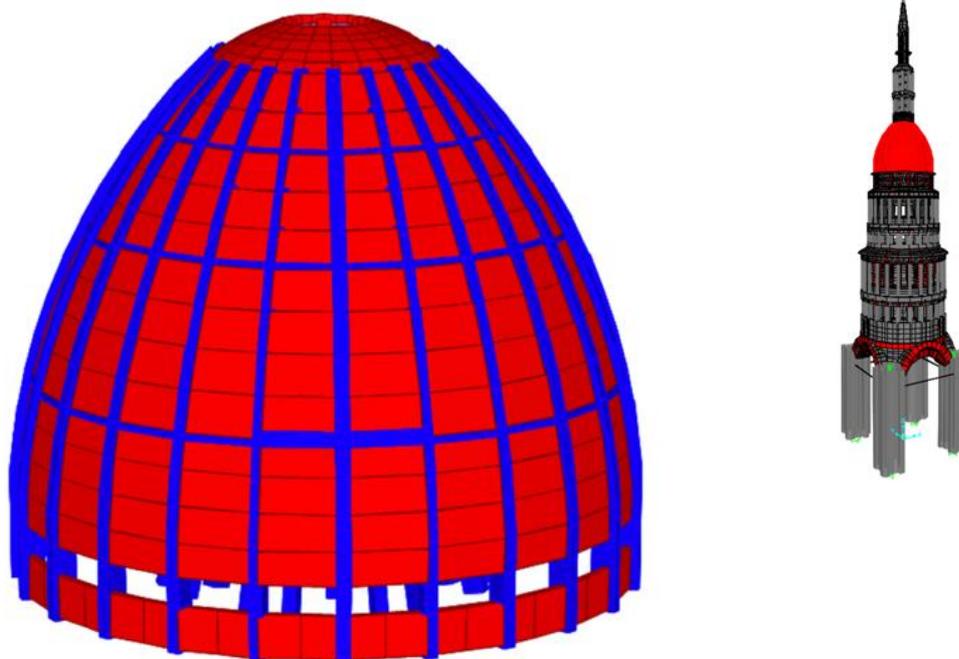


Figura 5.475 Elementi di Gran Tazza "frame" e "shell"

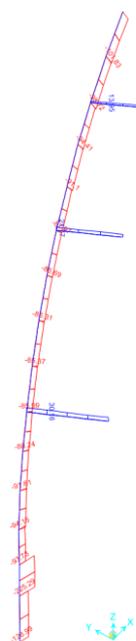


Figura 5.476 Sforzo assiale sui Costoloni e sui Paralleli di Gran Tazza senza cedimenti

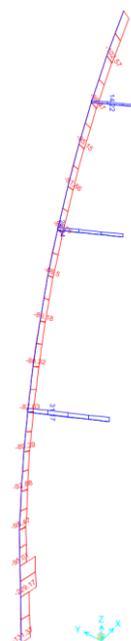


Figura 5.477 Sforzo assiale sui Costoloni e sui Paralleli di Gran Tazza con cedimenti

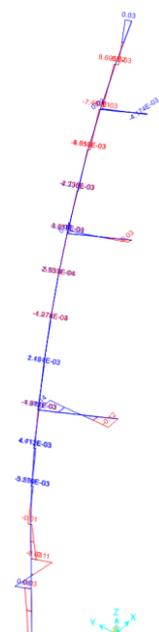


Figura 5.478 Momento flettente 2-2 sui Costoloni in direzione circonferenziale e sui Paralleli in direzione orizzontale di Gran Tazza senza cedimenti

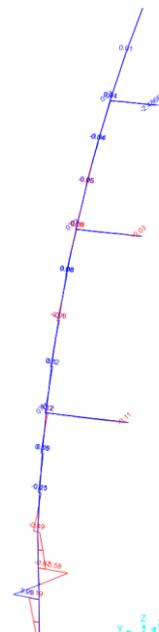


Figura 5.479 Momento flettente 2-2 sui Costoloni in direzione circonferenziale e sui Paralleli in direzione orizzontale di Gran Tazza con cedimenti

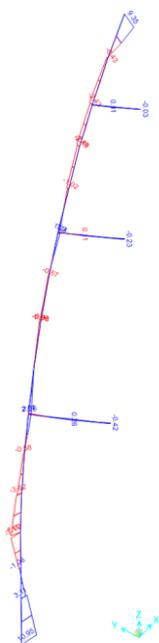


Figura 5.480 Momento flettente 3-3 sui Costoloni in direzione radiale e sui Paralleli in direzione verticale di Gran Tazza senza cedimenti

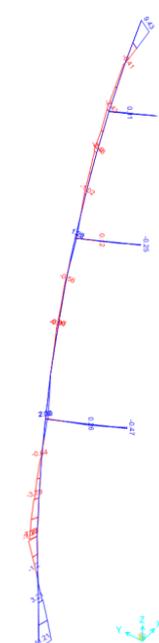


Figura 5.481 Momento flettente 3-3 sui Costoloni in direzione radiale e sui Paralleli in direzione verticale di Gran Tazza con cedimenti

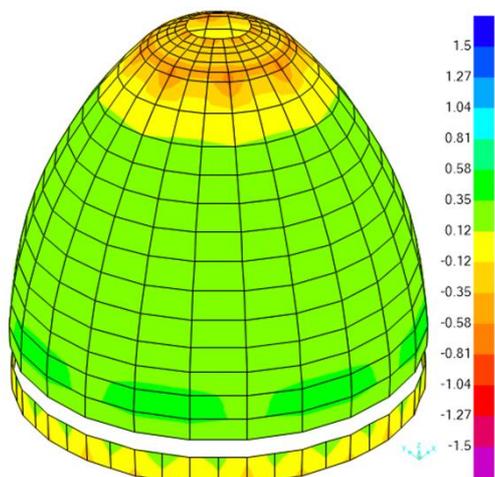


Figura 5.482 Tensione S1-1 Top Face di involucro del Gran Tazza in direzione circonferenziale senza cedimenti

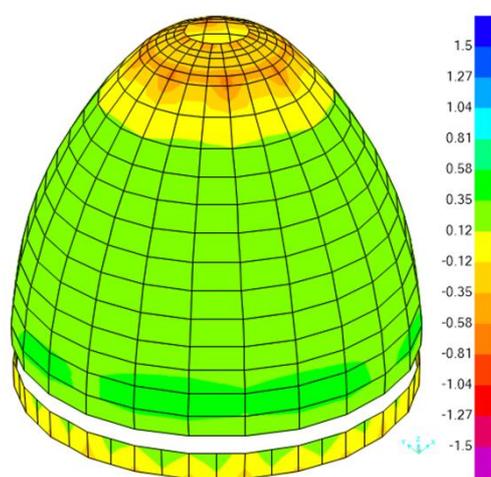


Figura 5.483 Tensione S1-1 Top Face di involucro del Gran Tazza in direzione circonferenziale con cedimenti

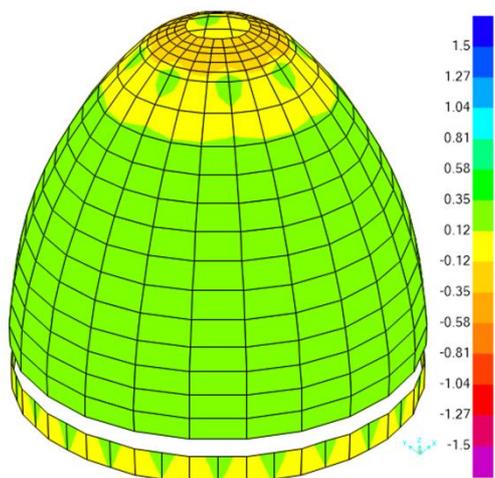


Figura 5.484 Tensioni S1-1 Bottom Face di involucro del Gran Tazza in direzione circonferenziale senza cedimenti

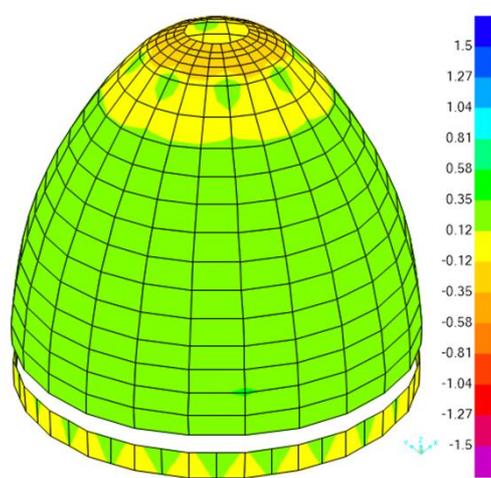


Figura 5.485 Tensioni S1-1 Bottom Face di involucro del Gran Tazza in direzione circonferenziale con cedimenti

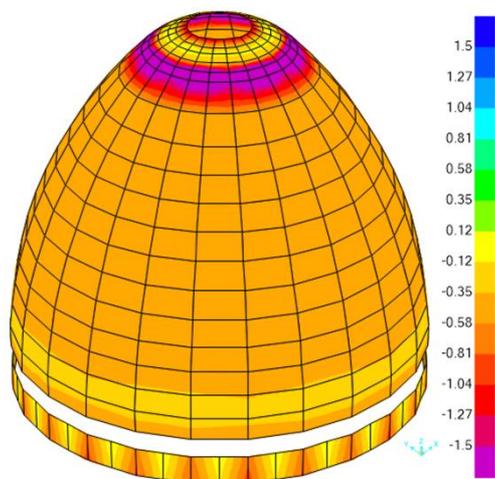


Figura 5.486 Tensioni S2-2 Top Face di involucro del Gran Tazza in direzione inclinati verso al centro di asse verticale di Cupola senza cedimenti

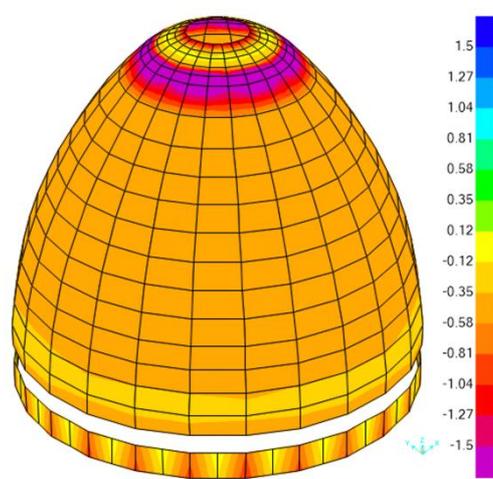


Figura 5.487 Tensioni S2-2 Top Face di involucro del Gran Tazza in direzione inclinati verso al centro di asse verticale di Cupola con cedimenti

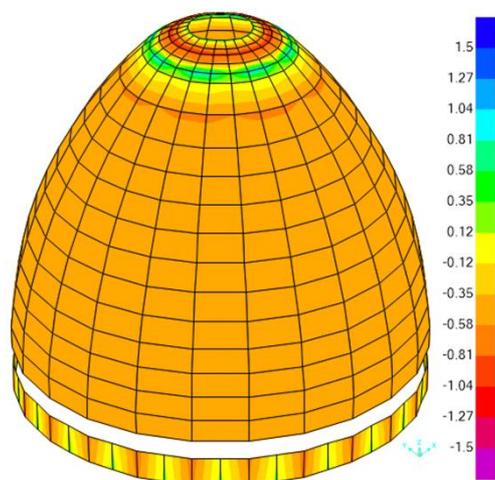


Figura 5.488 Tensioni S2-2 Bottom Face di involucro del Gran Tazza in direzione inclinati verso al centro di asse verticale di Cupola senza cedimenti

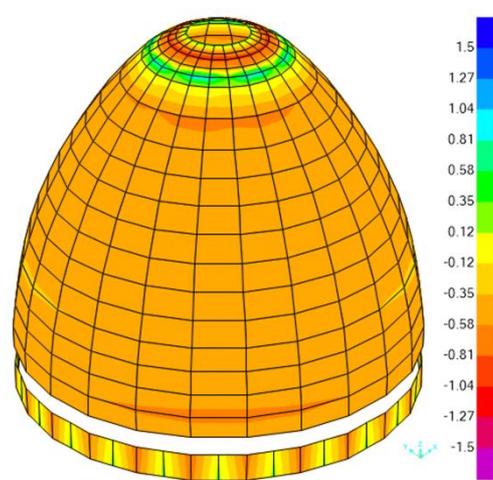


Figura 5.489 Tensioni S2-2 Bottom Face di involucro del Gran Tazza in direzione inclinati verso al centro di asse verticale di Cupola con cedimenti

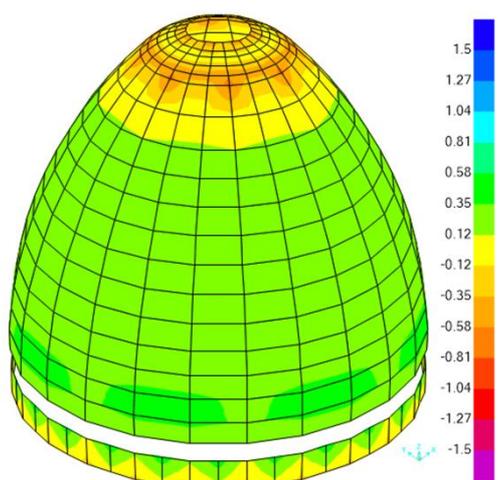


Figura 5.490 Tensione S-Max Top Face di involucro del Gran Tazza senza cedimenti

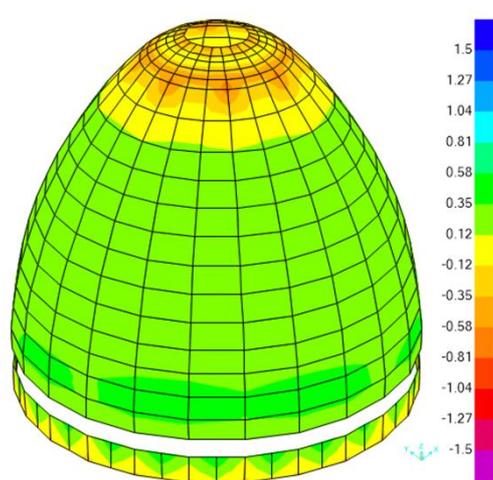


Figura 5.491 Tensione S-Max Top Face di involucro del Gran Tazza con cedimenti

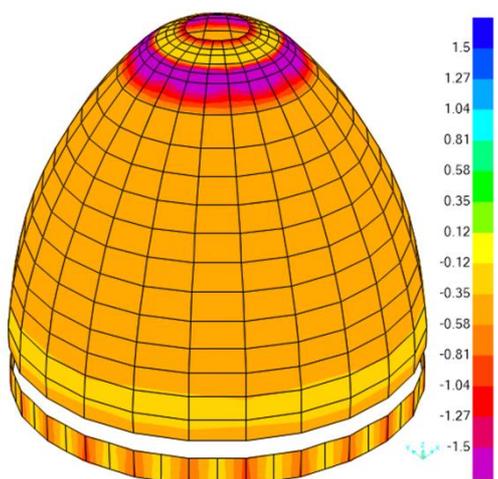


Figura 5.492 Tensioni S-Min Top Face di involucro del Gran Tazza senza cedimenti

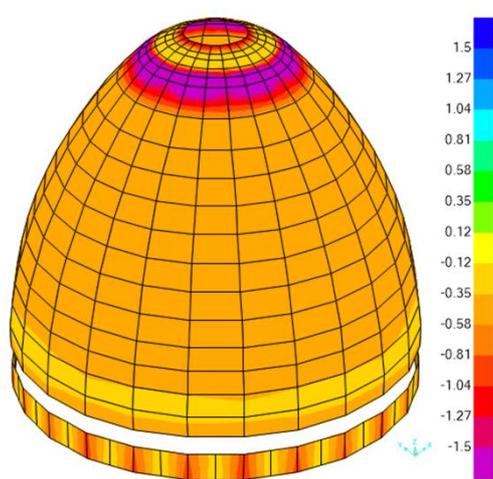


Figura 5.493 Tensioni S-Min Top Face di involucro del Gran Tazza con cedimenti

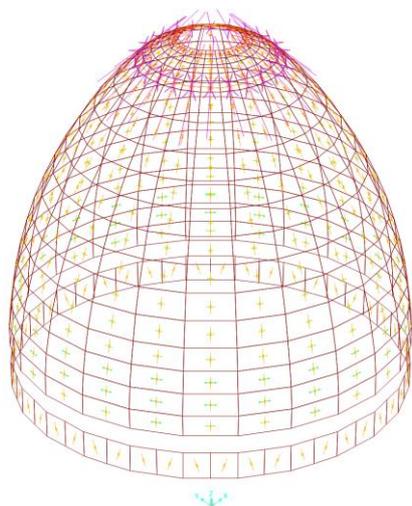


Figura 5.494 Direzioni delle tensioni principali (S-Max e S-Min) Top Face di involucro del Gran Tazza senza cedimenti

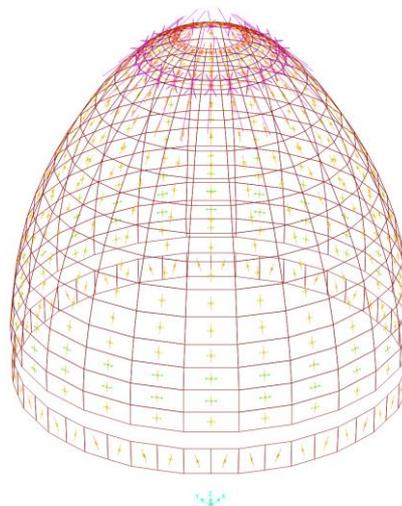


Figura 5.495 Direzioni delle tensioni principali (S-Max e S-Min) Top Face di involucro del Gran Tazza con cedimenti

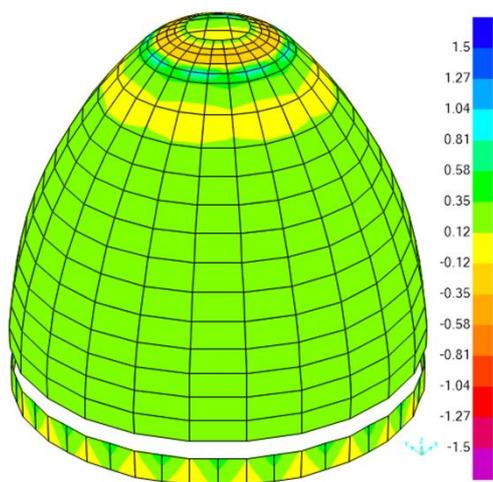


Figura 5.496 Tensioni S-Max Bottom Face di involucro del Gran Tazza senza cedimenti

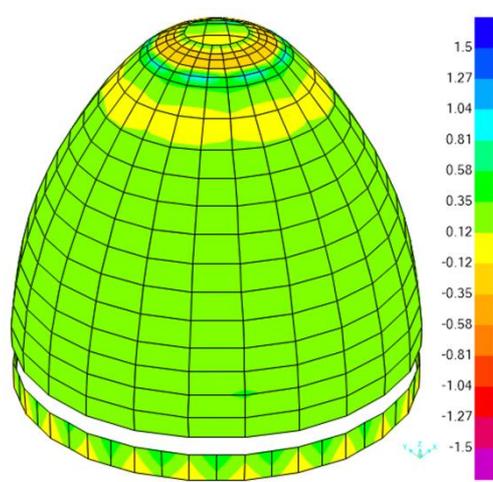


Figura 5.497 Tensioni S-Max Bottom Face di involucro del Gran Tazza con cedimenti

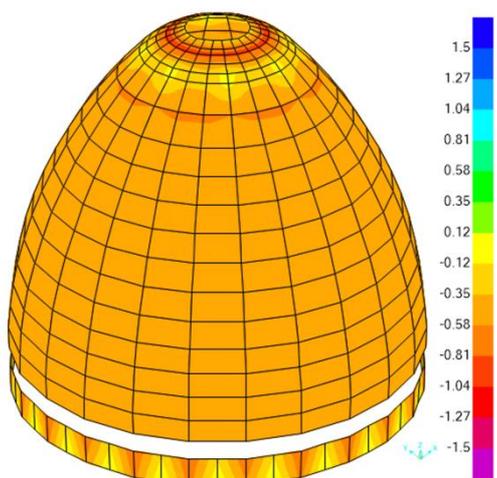


Figura 5.498 Tensioni S-Min Bottom Face di involucro del Gran Tazza senza cedimenti

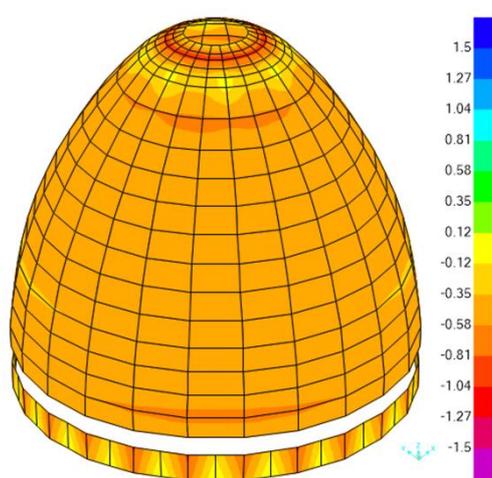


Figura 5.499 Tensioni S-Min Bottom Face involucro del Gran Tazza con cedimenti

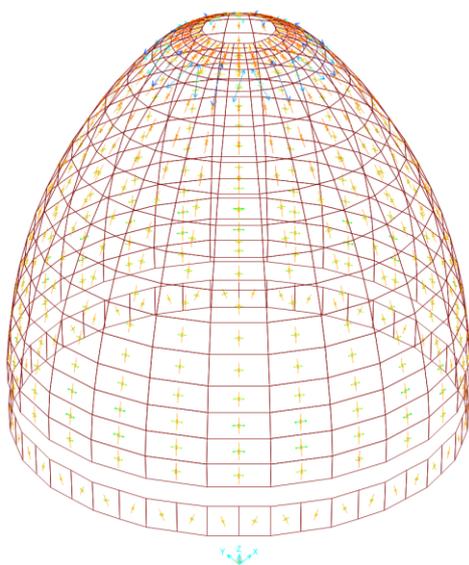


Figura 5.500 Direzioni delle tensioni principali (S-Max e S-Min) Bottom Face di involucro del Gran Tazza senza cedimenti

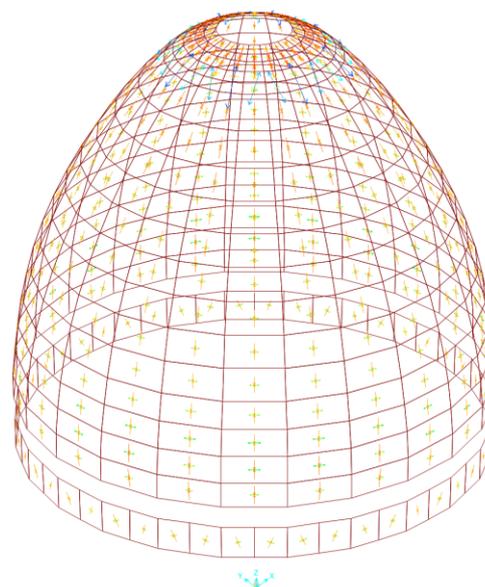


Figura 5.501 Direzioni delle tensioni principali (S-Max e S-Min) Top Face di involucro del Gran Tazza con cedimenti

5.10.2 Imbuto Antonelliano di Gran Tazza, Quarta Cupola e Quinta Cupola

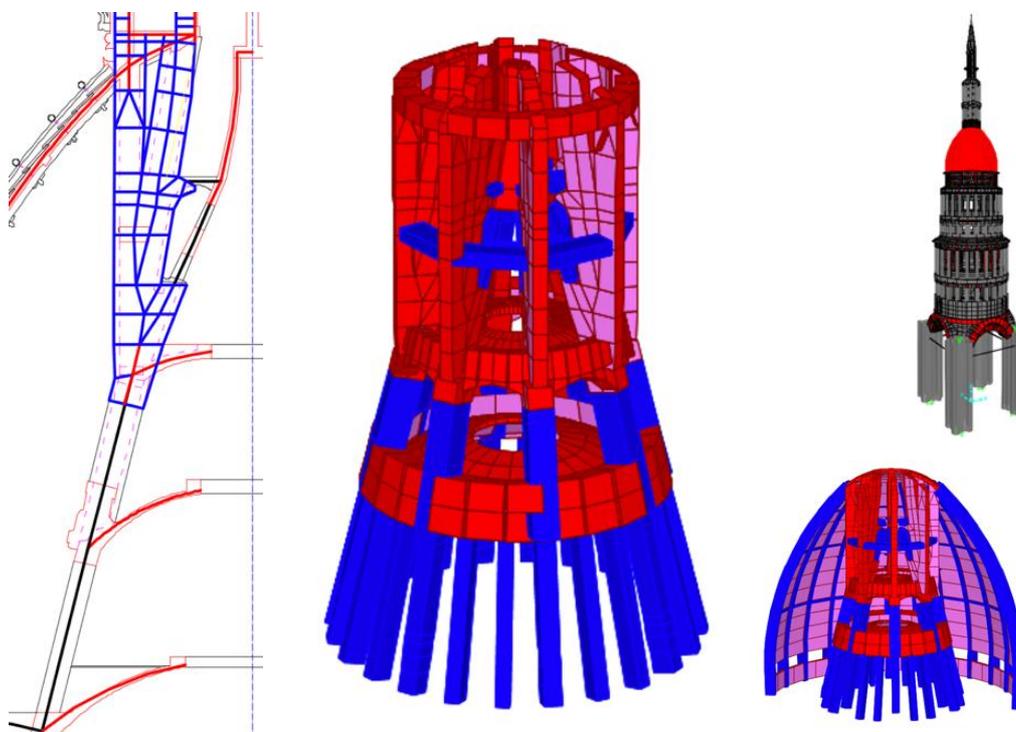


Figura 5.502 Imbuto Antonelliano, Quarta Cupola e Quinta Cupola

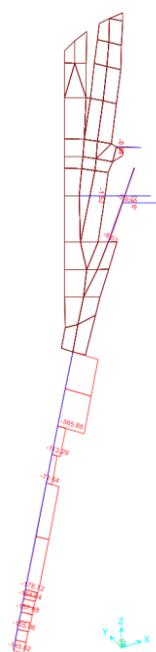


Figura 5.503 Sforzo assiale sui pilastri di Imbuto Antonelliano senza cedimenti

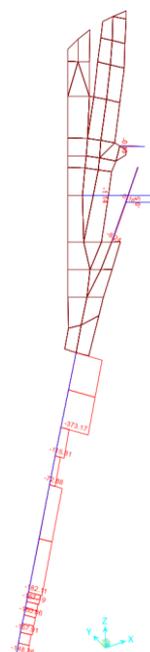


Figura 5.504 Sforzo assiale sui pilastri di Imbuto Antonelliano con cedimenti

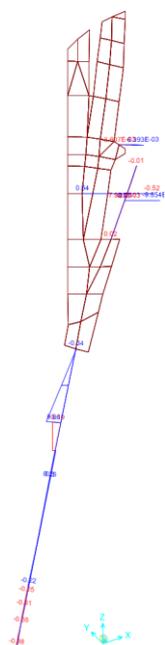


Figura 5.505 Momento flettente 2-2 sui pilastri di Imbuto Antonelliano in direzione circonferenziale e sugli altri elementi trascurabili senza cedimenti

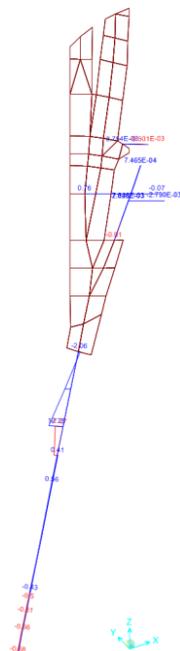


Figura 5.506 Momento flettente 2-2 sui pilastri di Imbuto Antonelliano in direzione circonferenziale e sugli altri elementi trascurabili con cedimenti

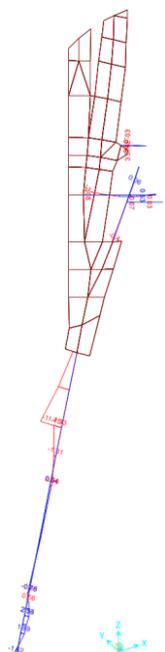


Figura 5.507 Momento flettente 3-3 sui pilastri di Imbuto Antonelliano in direzione radiale e sugli altri elementi trascurabili senza cedimenti

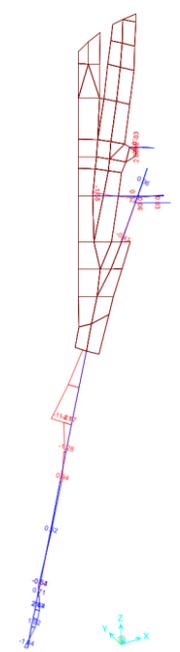


Figura 5.508 Momento flettente 3-3 sui pilastri di Imbuto Antonelliano in direzione radiale e sugli altri elementi trascurabili con cedimenti

Tabella 5.17 Sforzi assiali dei pilastri superiori dell'Imbuto Antonelliano ed il rapporto tra due condizioni

	Sforzo Assiale dei pilastri [kN]		
	Senza cedimenti	Con cedimenti	Rapporto
Nord	-373.13	-370.22	99%
Nord-Est	-267.30	-284.22	106%
Est	-366.06	-374.56	102%
Sud-Est	-363.55	-340.11	94%

	Sforzo Assiale dei pilastri [kN]		
	Senza cedimenti	Con cedimenti	Rapporto
Sud	-302.32	-300.36	99%
Sud-Ovest	-302.88	-319.05	105%
Ovest	-368.63	-376.15	102%
Nord-Ovest	-318.34	-296.23	93%

Tabella 5.18 Sforzi assiali dei pilastri inferiori dell'Imbuto Antonelliano ed il rapporto tra due condizioni

	Sforzo Assiale dei pilastri [kN]			
	Senza cedimenti	Con cedimenti	Rapporto	
Nord a Est (orario)	1	-126.72	-129.59	102%
	2	-126.84	-134.55	106%
	3	-173.74	-188.40	108%
	4	-127.63	-139.36	109%
	5	-127.69	-136.87	107%
	6	-174.51	-179.14	103%

	Sforzo Assiale dei pilastri [kN]			
	Senza cedimenti	Con cedimenti	Rapporto	
Est a Sud (orario)	7	-127.74	-124.60	98%
	8	-127.66	-119.31	93%
	9	-173.94	-158.40	91%
	10	-126.60	-114.42	90%
	11	-125.89	-116.58	93%
	12	-171.04	-166.73	97%

	Sforzo Assiale dei pilastri [kN]			
	Senza cedimenti	Con cedimenti	Rapporto	
Sud a Ovest (orario)	13	-125.02	-128.70	103%
	14	-125.24	-134.12	107%
	15	-171.73	-187.38	109%
	16	-126.50	-138.10	109%
	17	-127.08	-135.34	107%
	18	-174.22	-177.27	102%

	Sforzo Assiale dei pilastri [kN]			
	Senza cedimenti	Con cedimenti	Rapporto	
Ovest a Nord (orario)	19	-127.73	-123.69	97%
	20	-127.77	-119.30	93%
	21	-174.51	-159.99	92%
	22	-127.57	-116.68	91%
	23	-127.36	-119.09	94%
	24	-173.49	-169.36	98%

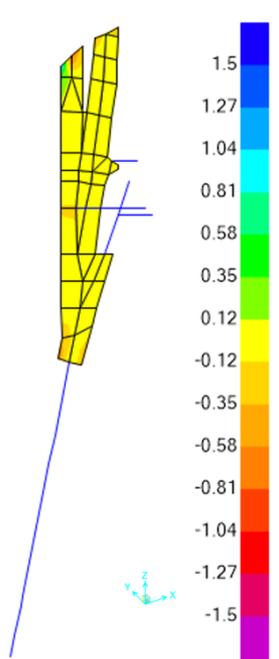


Figura 5.509 Tensione S1-1 Top Face di pilastri di Imbuto Antonelliano in direzione radiale senza cedimenti

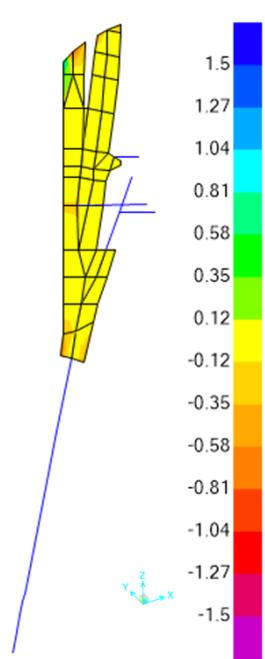


Figura 5.510 Tensione S1-1 Top Face di pilastri di Imbuto Antonelliano in direzione radiale con cedimenti

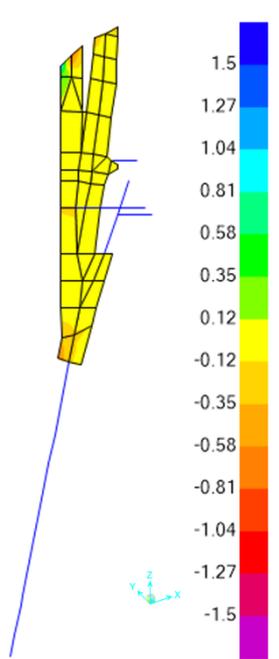


Figura 5.511 Tensioni S1-1 Bottom Face di pilastri di Imbuto Antonelliano in direzione radiale senza cedimenti

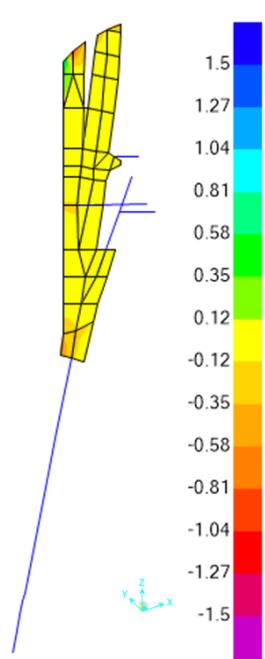


Figura 5.512 Tensioni S1-1 Bottom Face di pilastri di Imbuto Antonelliano in direzione radiale con cedimenti

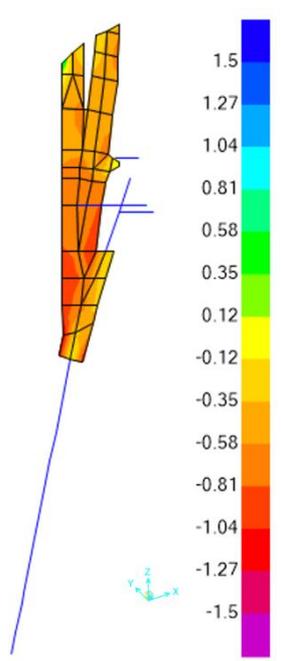


Figura 5.513 Tensioni S2-2 Top Face di pilastri di Imbuto Antonelliano in direzione verticale senza cedimenti

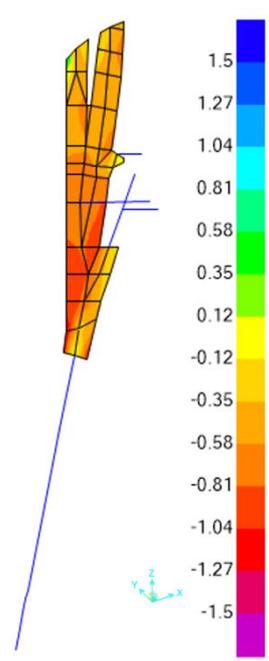


Figura 5.514 Tensioni S2-2 Top Face di pilastri di Imbuto Antonelliano in direzione verticale con cedimenti

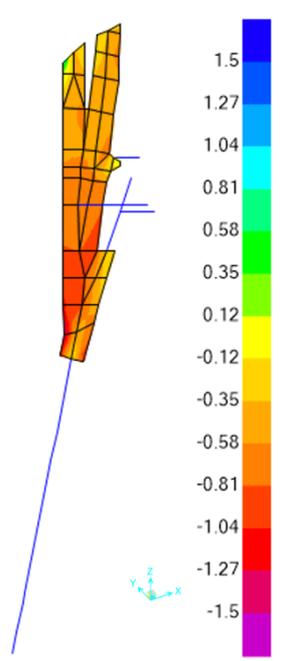


Figura 5.515 Tensioni S2-2 Bottom Face di pilastri di Imbuto Antonelliano in direzione verticale senza cedimenti

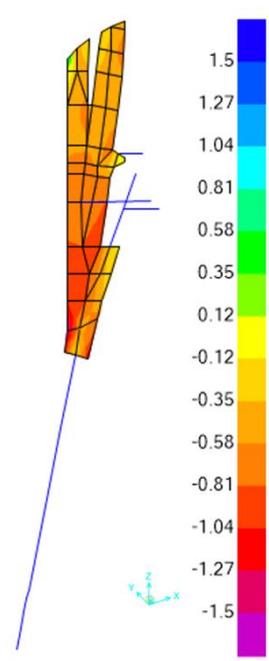


Figura 5.516 Tensioni S2-2 Bottom Face di pilastri di Imbuto Antonelliano in direzione verticale con cedimenti

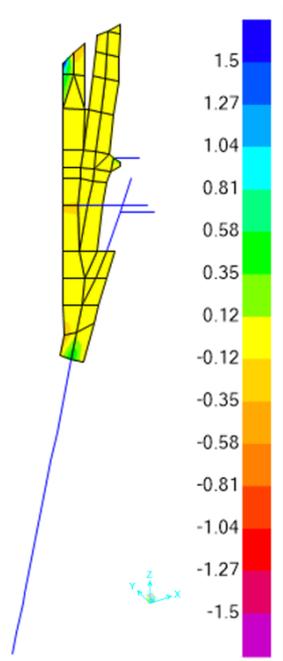


Figura 5.517 Tensione S-Max Top Face di pilastri di Imbuto Antonelliano senza cedimenti

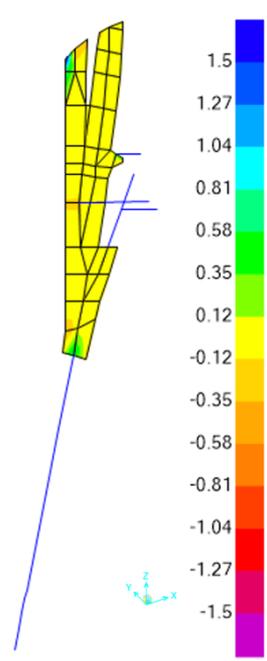


Figura 5.518 Tensione S-Max Top Face di pilastri di Imbuto Antonelliano con cedimenti

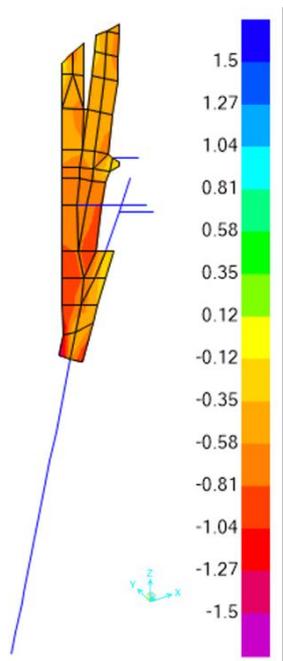


Figura 5.519 Tensioni S-Min Top Face di pilastri di Imbuto Antonelliano senza cedimenti

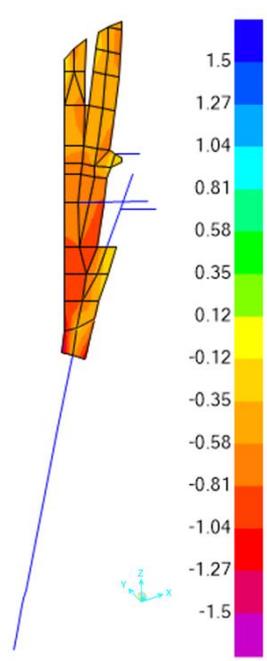


Figura 5.520 Tensioni S-Min Top Face di pilastri di Imbuto Antonelliano con cedimenti

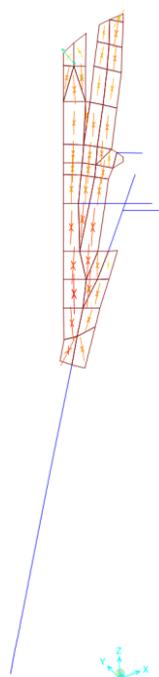


Figura 5.521 Direzioni delle tensioni principali (S-Max e S-Min) Top Face di pilastri di Imbuto Antonelliano senza cedimenti

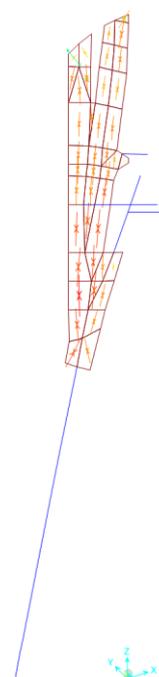


Figura 5.522 Direzioni delle tensioni principali (S-Max e S-Min) Top Face di pilastri di Imbuto Antonelliano con cedimenti

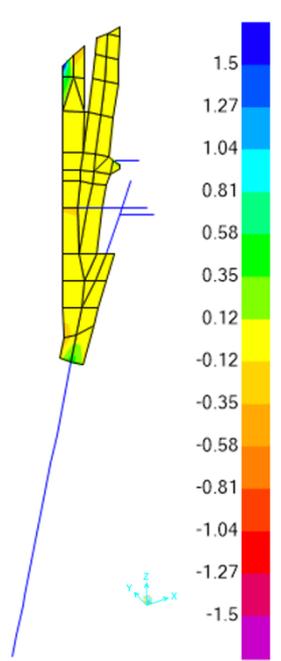


Figura 5.523 Tensioni S-Max Bottom Face di pilastri di Imbuto Antonelliano senza cedimenti

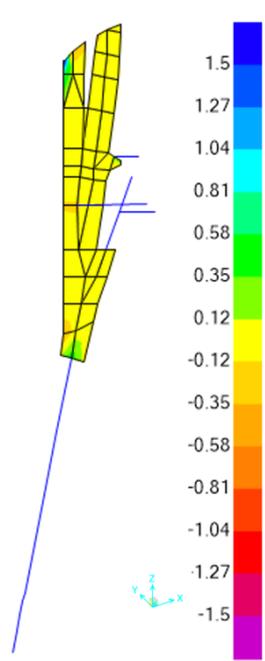


Figura 5.524 Tensioni S-Max Bottom Face di pilastri di Imbuto Antonelliano con cedimenti

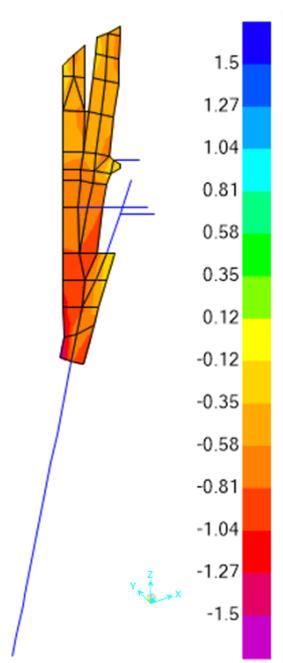


Figura 5.525 Tensioni S-Min Bottom Face di pilastri di Imbuto Antonelliano senza cedimenti

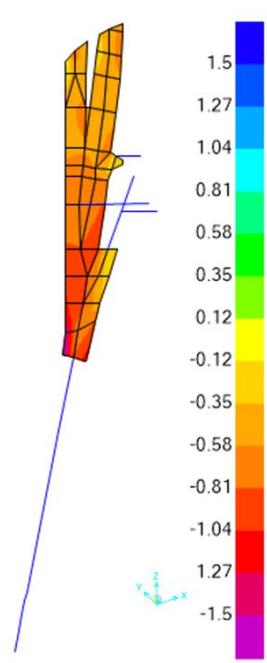


Figura 5.526 Tensioni S-Min Bottom Face di pilastri di Imbuto Antonelliano con cedimenti

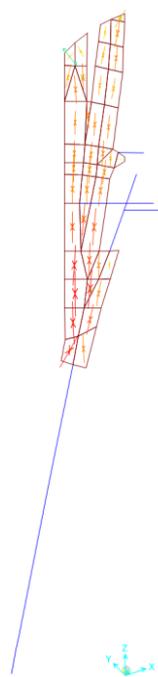


Figura 5.527 Direzioni delle tensioni principali (S-Max e S-Min) Bottom Face di pilastri di Imbuto Antonelliano senza cedimenti

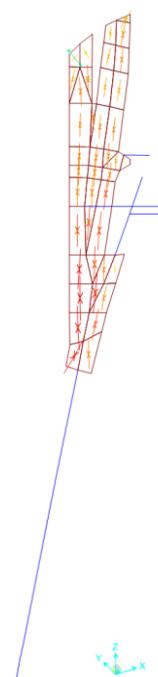


Figura 5.528 Direzioni delle tensioni principali (S-Max e S-Min) Bottom Face di pilastri di Imbuto Antonelliano con cedimenti

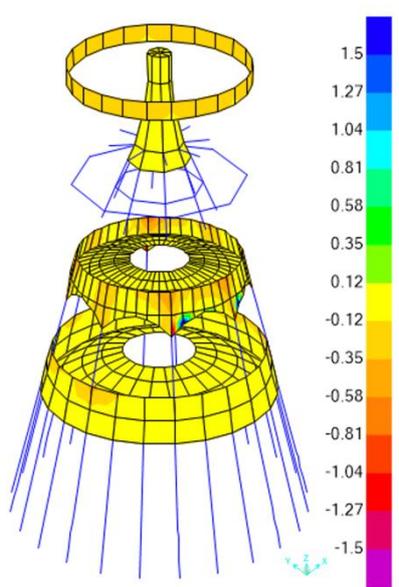


Figura 5.529 Tensione S1-1 Top Face di travi di Imbuto Antonelliano, Quarta Cupola e Quinta Cupola in direzione circonferenziale senza cedimenti

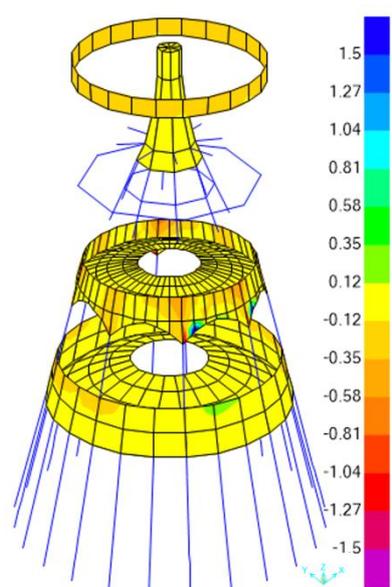


Figura 5.530 Tensione S1-1 Top Face di travi di Imbuto Antonelliano, Quarta Cupola e Quinta Cupola in direzione circonferenziale con cedimenti

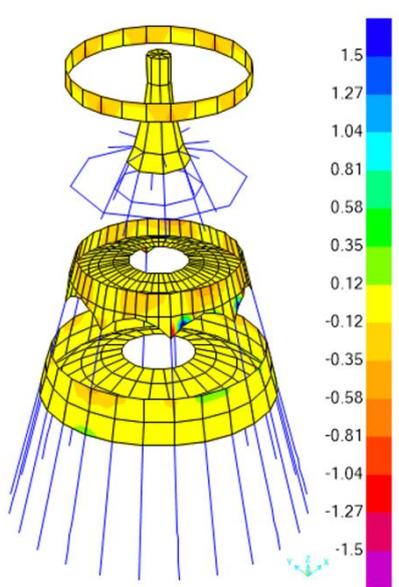


Figura 5.531 Tensioni S1-1 Bottom Face di travi di Imbuto Antonelliano, Quarta Cupola e Quinta Cupola in direzione circonferenziale senza cedimenti

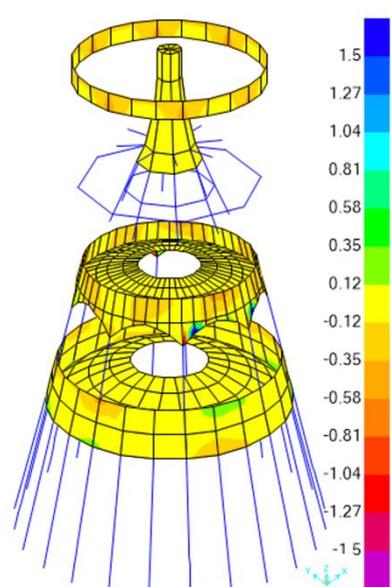


Figura 5.532 Tensioni S1-1 Bottom Face di travi di Imbuto Antonelliano, Quarta Cupola e Quinta Cupola in direzione circonferenziale con cedimenti

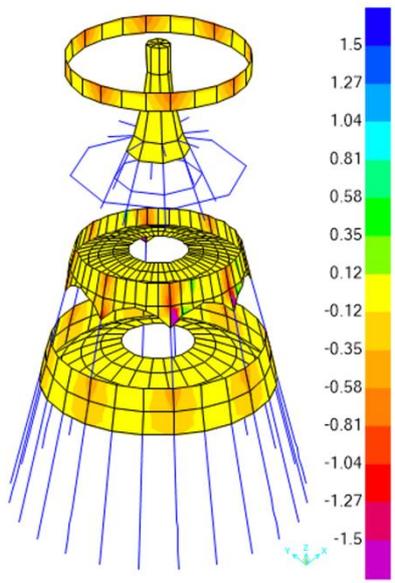


Figura 5.533 Tensioni S2-2 Top Face di travi di Imbuto Antonelliano in direzione verticale, Quarta Cupola e Quinta Cupola in direzione inclinati verso al centro di asse verticale di Cupola senza cedimenti

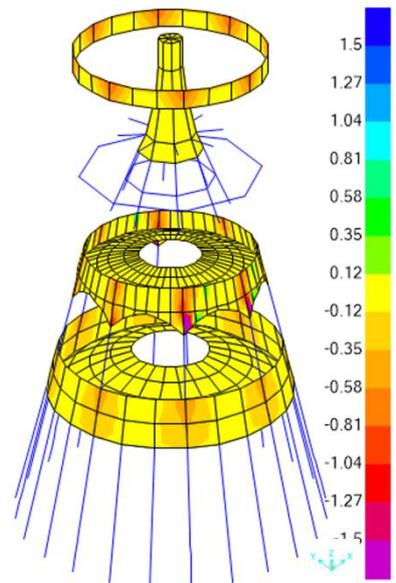


Figura 5.534 Tensioni S2-2 Top Face di travi di Imbuto Antonelliano in direzione verticale, Quarta Cupola e Quinta Cupola in direzione inclinati verso al centro di asse verticale di Cupola con cedimenti

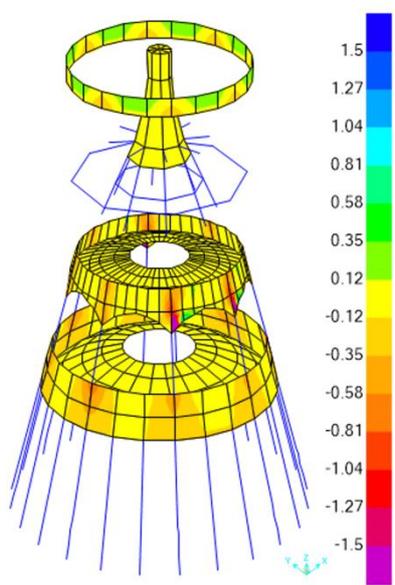


Figura 5.535 Tensioni S2-2 Bottom Face di travi di Imbuto Antonelliano in direzione verticale, Quarta Cupola e Quinta Cupola in direzione inclinati verso al centro di asse verticale di Cupola senza cedimenti

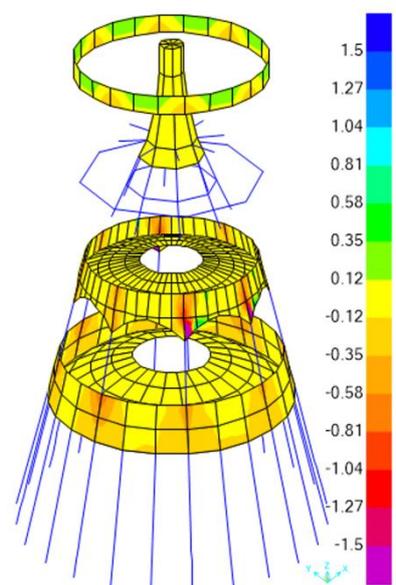


Figura 5.536 Tensioni S2-2 Bottom Face di travi di Imbuto Antonelliano in direzione verticale, Quarta Cupola e Quinta Cupola in direzione inclinati verso al centro di asse verticale di Cupola con cedimenti

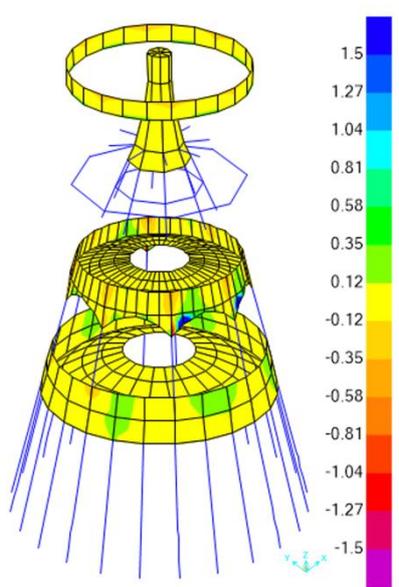


Figura 5.537 Tensione S-Max Top Face di travi di Imbuto Antonelliano, Quarta Cupola e Quinta Cupola senza cedimenti

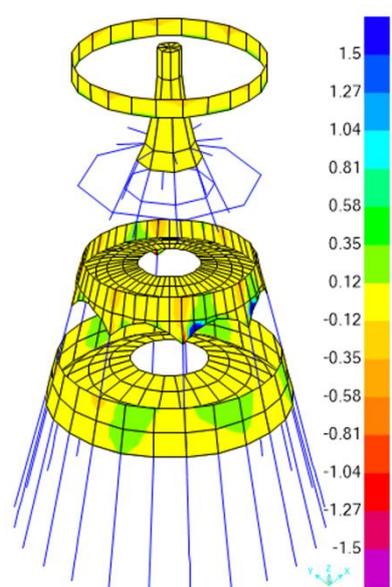


Figura 5.538 Tensione S-Max Top Face di travi di Imbuto Antonelliano, Quarta Cupola e Quinta Cupola con cedimenti

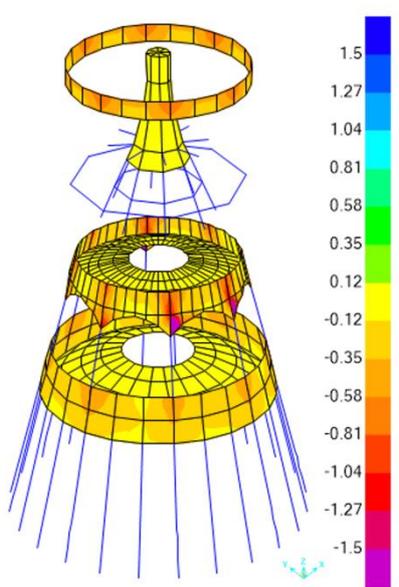


Figura 5.539 Tensioni S-Min Top Face di travi di Imbuto Antonelliano, Quarta Cupola e Quinta Cupola senza cedimenti

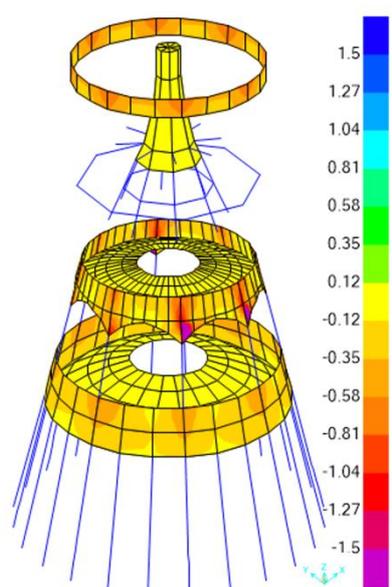


Figura 5.540 Tensioni S-Min Top Face di travi di Imbuto Antonelliano, Quarta Cupola e Quinta Cupola con cedimenti

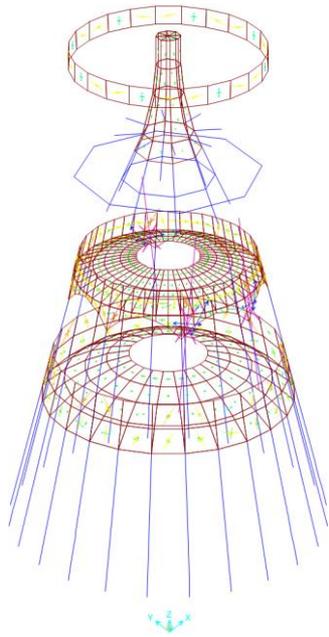


Figura 5.541 Direzioni delle tensioni principali (S-Max e S-Min) Top Face di travi di Imbuto Antonelliano, Quarta Cupola e Quinta Cupola senza cedimenti

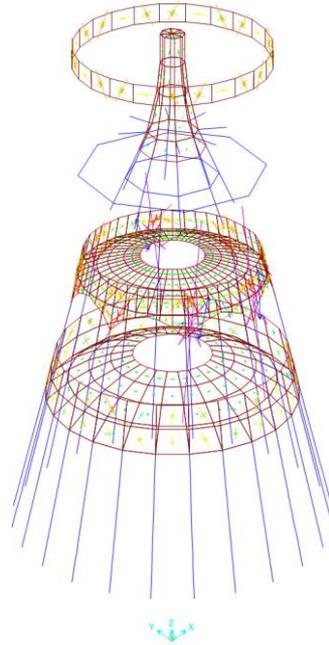


Figura 5.542 Direzioni delle tensioni principali (S-Max e S-Min) Top Face di travi di Imbuto Antonelliano, Quarta Cupola e Quinta Cupola con cedimenti

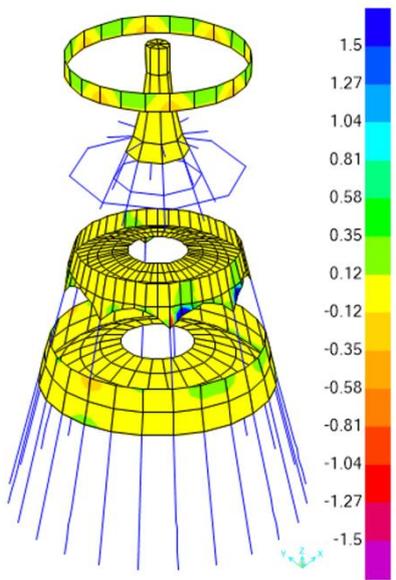


Figura 5.543 Tensioni S-Max Bottom Face di travi di Imbuto Antonelliano, Quarta Cupola e Quinta Cupola senza cedimenti

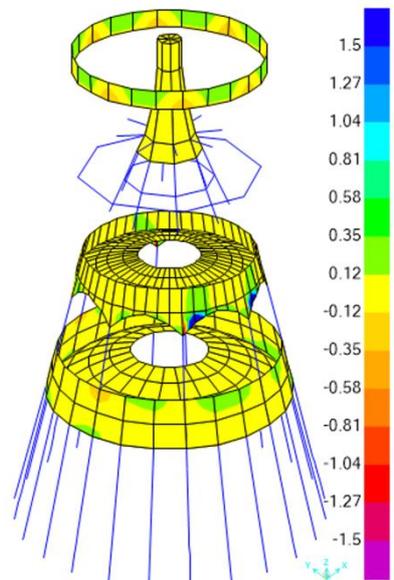


Figura 5.544 Tensioni S-Max Bottom Face di travi di Imbuto Antonelliano, Quarta Cupola e Quinta Cupola con cedimenti

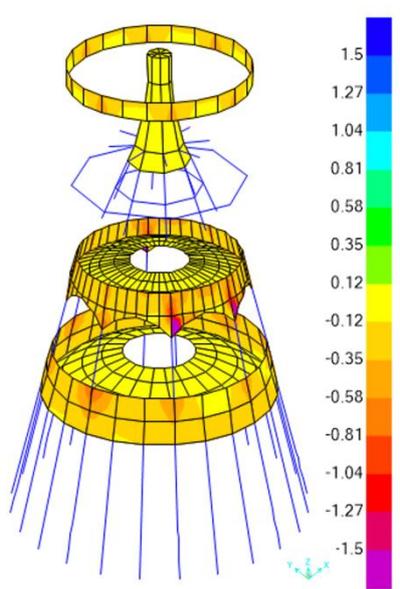


Figura 5.545 Tensioni S-Min Bottom Face di travi di Imbuto Antonelliano, Quarta Cupola e Quinta Cupola senza cedimenti

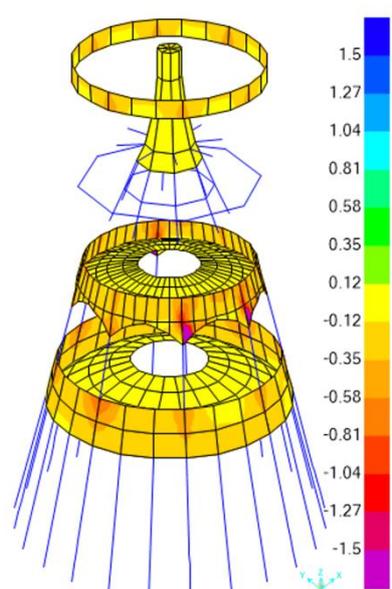


Figura 5.546 Tensioni S-Min Bottom Face travi di Imbuto Antonelliano, Quarta Cupola e Quinta Cupola con cedimenti

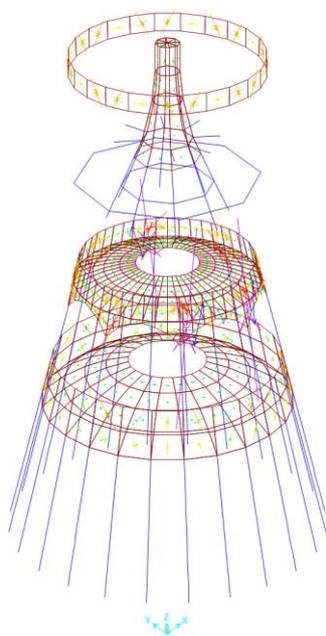


Figura 5.547 Direzioni delle tensioni principali (S-Max e S-Min) Bottom Face di travi di Imbuto Antonelliano, Quarta Cupola e Quinta Cupola senza cedimenti

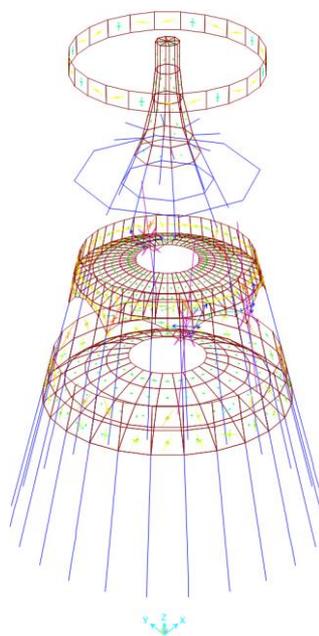


Figura 5.548 Direzioni delle tensioni principali (S-Max e S-Min) Top Face di travi di Imbuto Antonelliano, Quarta Cupola e Quinta Cupola con cedimenti

5.11 Cupolino della Cupola di Basilica

5.11.1 Basamento e Primo Stilobate del Cupolino

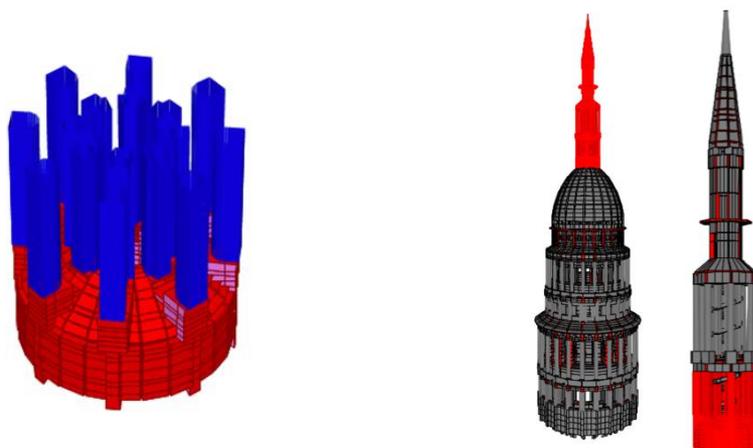


Figura 5.549 Basamento e Primo Stilobate di Cupolino di Basilica

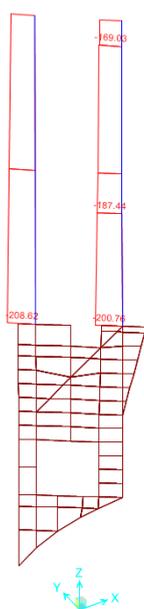


Figura 5.550 Sforzo assiale sui pilastri di Primo Stilobate di Cupolino senza cedimenti

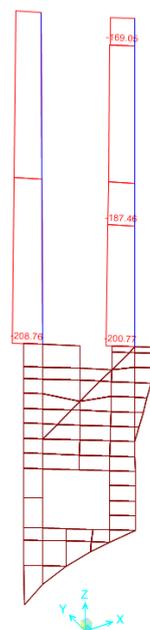


Figura 5.551 Sforzo assiale sui pilastri di Primo Stilobate di Cupolino con cedimenti

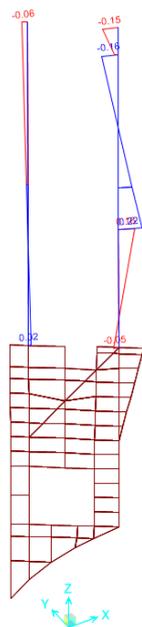


Figura 5.552 Momento flettente 2-2 sui pilastri di Primo Stilobate di Cupolino in direzione circonferenziale senza cedimenti

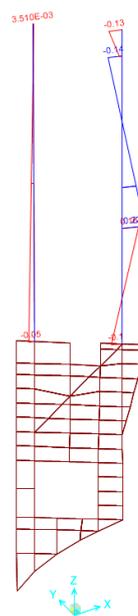


Figura 5.553 Momento flettente 2-2 sui pilastri di Primo Stilobate di Cupolino in direzione circonferenziale con cedimenti

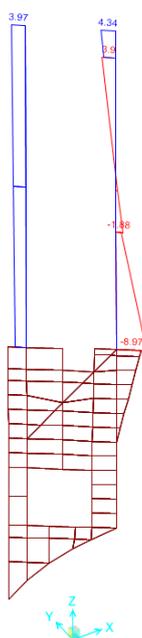


Figura 5.554 Momento flettente 3-3 sui pilastri di Primo Stilobate di Cupolino in direzione radiale e senza cedimenti



Figura 5.555 Momento flettente 3-3 sui pilastri di Primo Stilobate di Cupolino in direzione radiale e con cedimenti

Tabella 5.19 Sforzi assiali dei pilastri esterni del Primo Stilobate di Cupolino ed il rapporto tra due condizioni

	Sforzo Assiale dei pilastri [kN]		
	Senza cedimenti	Con cedimenti	Rapporto
Nord	-212.15	-212.01	100%
Nord-Est	-205.35	-205.88	100%
Est	-208.00	-208.15	100%
Sud-Est	-211.03	-210.47	100%

	Sforzo Assiale dei pilastri [kN]		
	Senza cedimenti	Con cedimenti	Rapporto
Sud	-209.98	-209.86	100%
Sud-Ovest	-208.86	-209.41	100%
Ovest	-208.62	-208.76	100%
Nord-Ovest	-208.28	-207.73	100%

Tabella 5.20 Sforzi assiali dei pilastri interni del Primo Stilobate di Cupolino ed il rapporto tra due condizioni

	Sforzo Assiale dei pilastri [kN]		
	Senza cedimenti	Con cedimenti	Rapporto
Nord	-199.50	-199.92	100%
Nord-Est	-199.62	-200.19	100%
Est	-200.97	-201.43	100%
Sud-Est	-199.19	-199.51	100%

	Sforzo Assiale dei pilastri [kN]		
	Senza cedimenti	Con cedimenti	Rapporto
Sud	-199.94	-200.30	100%
Sud-Ovest	-200.26	-200.79	100%
Ovest	-200.34	-200.81	100%
Nord-Ovest	-200.16	-200.49	100%

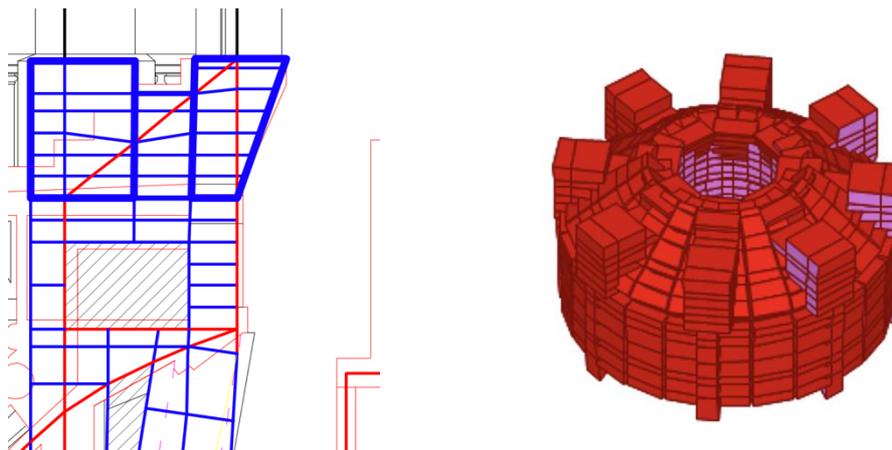


Figura 5.556 Elementi di Basamento di Cupolino in "shell

Da questo livello in su, l'intervallo delle tensioni verrà cambiato a $[-1\text{Mpa} \div 1\text{Mpa}]$

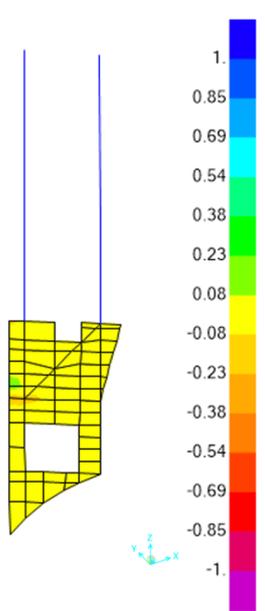


Figura 5.557 Tensione S1-1 Top Face di pilastri Primo Stilobate di Cupolino in direzione radiale senza cedimenti

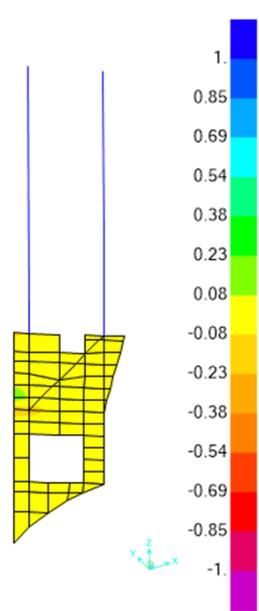


Figura 5.558 Tensione S1-1 Top Face di pilastri Primo Stilobate di Cupolino in direzione radiale con cedimenti

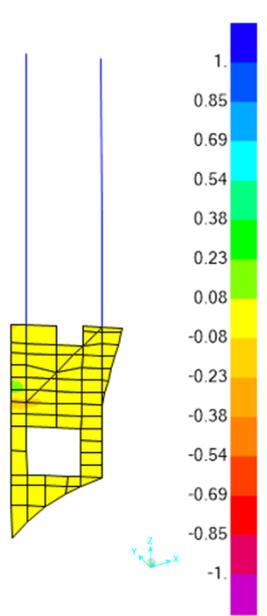


Figura 5.559 Tensioni S1-1 Bottom Face di pilastri di Primo Stilobate di Cupolino in direzione radiale senza cedimenti

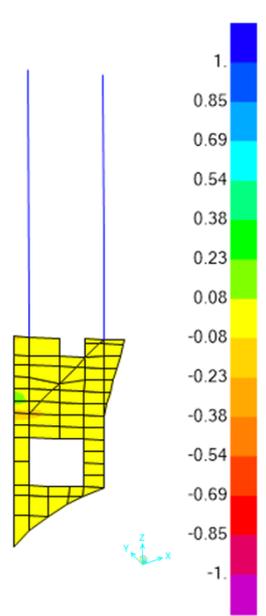


Figura 5.560 Tensioni S1-1 Bottom Face di pilastri di Primo Stilobate di Cupolino in direzione radiale con cedimenti

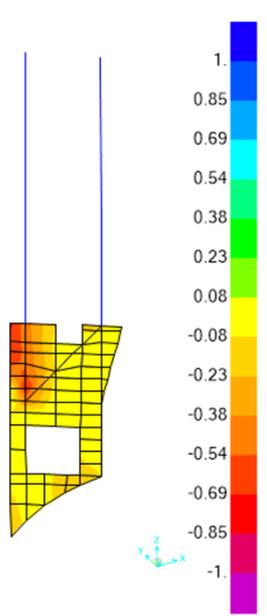


Figura 5.561 Tensioni S2-2 Top Face di pilastri di Primo Stilobate di Cupolino in direzione verticale senza cedimenti

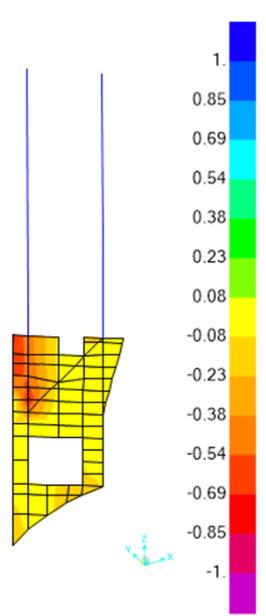


Figura 5.562 Tensioni S2-2 Top Face di pilastri di Primo Stilobate di Cupolino in direzione verticale con cedimenti

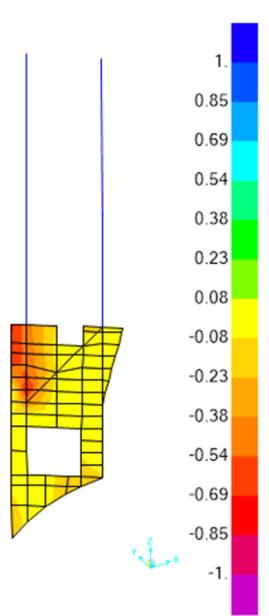


Figura 5.563 Tensioni S2-2 Bottom Face di pilastri di Primo Stilobate di Cupolino in direzione verticale senza cedimenti

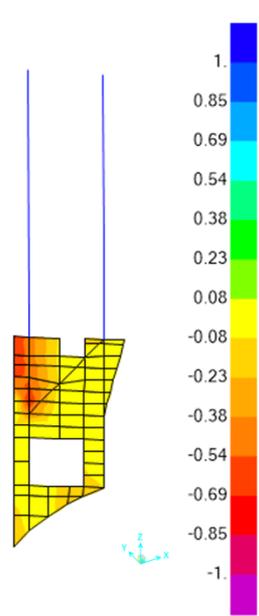


Figura 5.564 Tensioni S2-2 Bottom Face di pilastri di Primo Stilobate di Cupolino in direzione verticale con cedimenti

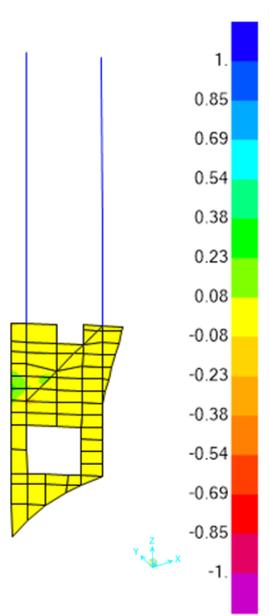


Figura 5.565 Tensione S-Max Top Face di pilastri di Primo Stilobate di Cupolino senza cedimenti

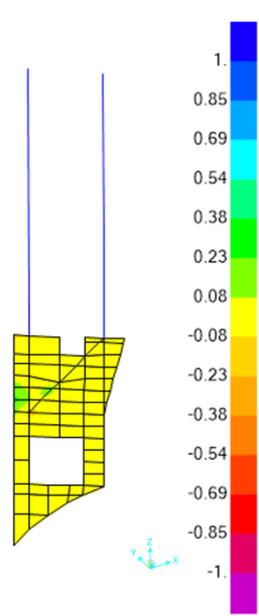


Figura 5.566 Tensione S-Max Top Face di pilastri di Primo Stilobate di Cupolino con cedimenti

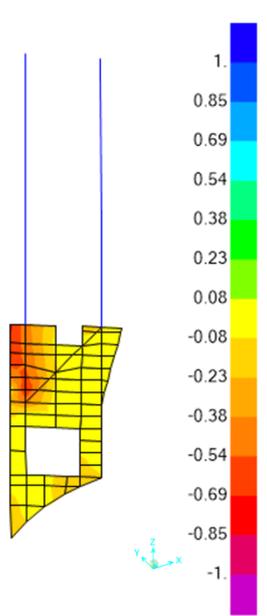


Figura 5.567 Tensioni S-Min Top Face di pilastri di Primo Stilobate di Cupolino senza cedimenti

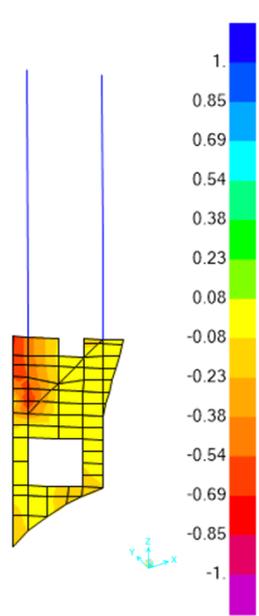


Figura 5.568 Tensioni S-Min Top Face di pilastri di Primo Stilobate di Cupolino con cedimenti

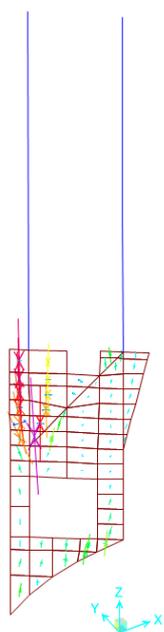


Figura 5.569 Direzioni delle tensioni principali (S-Max e S-Min) Top Face di pilastri di Primo Stilobate di Cupolino senza cedimenti

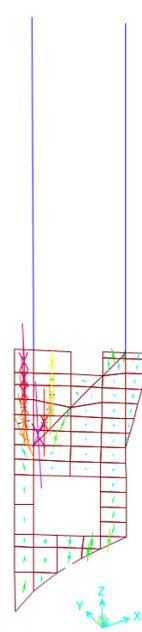


Figura 5.570 Direzioni delle tensioni principali (S-Max e S-Min) Top Face di pilastri di Primo Stilobate di Cupolino con cedimenti

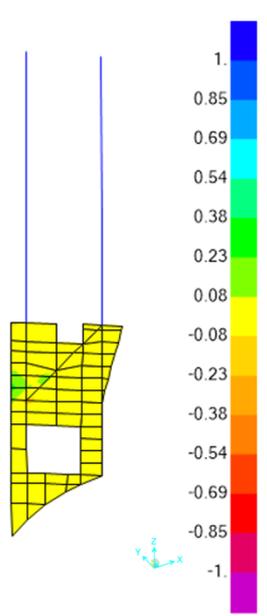


Figura 5.571 Tensioni S-Max Bottom Face di pilastri di Primo Stilobate di Cupolino senza cedimenti

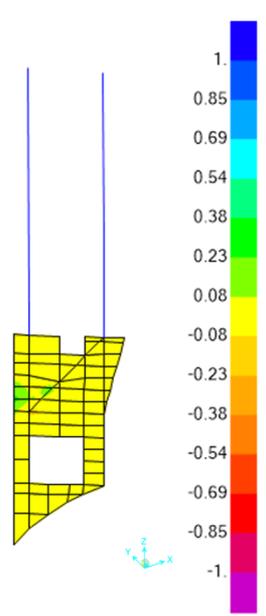


Figura 5.572 Tensioni S-Max Bottom Face di pilastri di Primo Stilobate di Cupolino con cedimenti

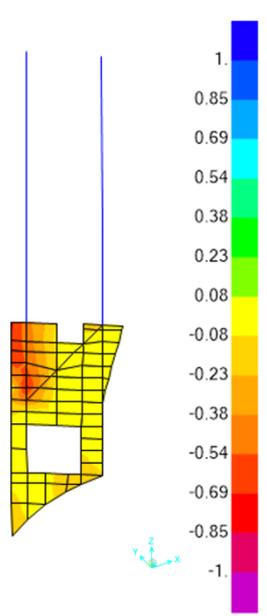


Figura 5.573 Tensioni S-Min Bottom Face di pilastri di Primo Stilobate di Cupolino senza cedimenti

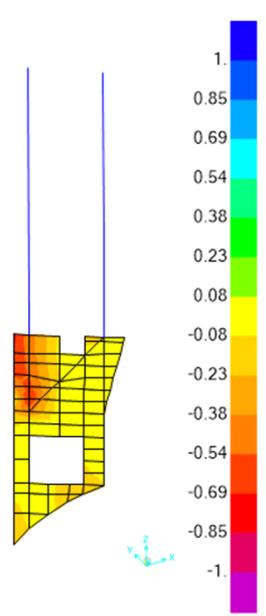


Figura 5.574 Tensioni S-Min Bottom Face di pilastri di Primo Stilobate di Cupolino con cedimenti

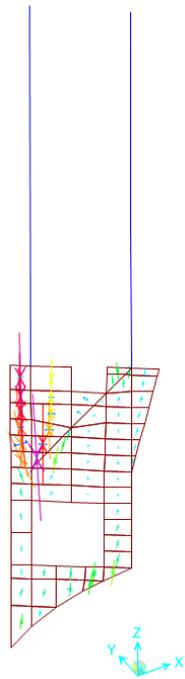


Figura 5.575 Direzioni delle tensioni principali (S-Max e S-Min) Bottom Face di pilastri di Primo Stilobate di Cupolino senza cedimenti

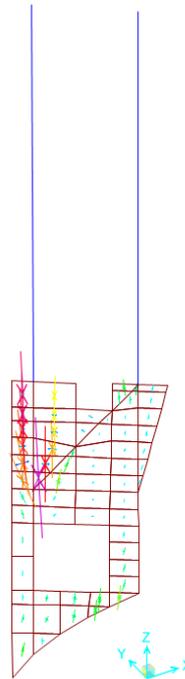


Figura 5.576 Direzioni delle tensioni principali (S-Max e S-Min) Bottom Face di pilastri di Primo Stilobate di Cupolino con cedimenti

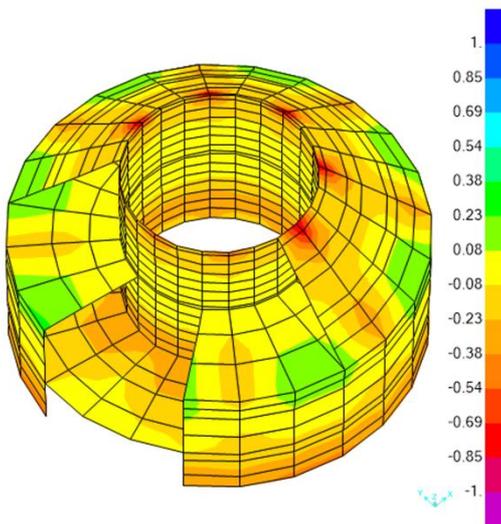


Figura 5.577 Tensione S1-1 Top Face di elemento "shell" di Basamento del Cupolino in direzione circonferenziale senza cedimenti

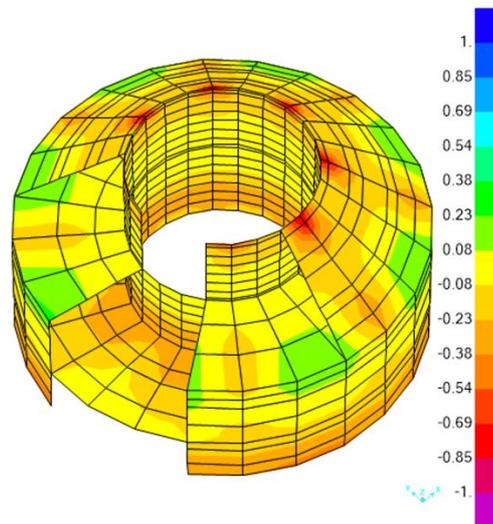


Figura 5.578 Tensione S1-1 Top Face di elemento "shell" di Basamento del Cupolino in direzione circonferenziale con cedimenti

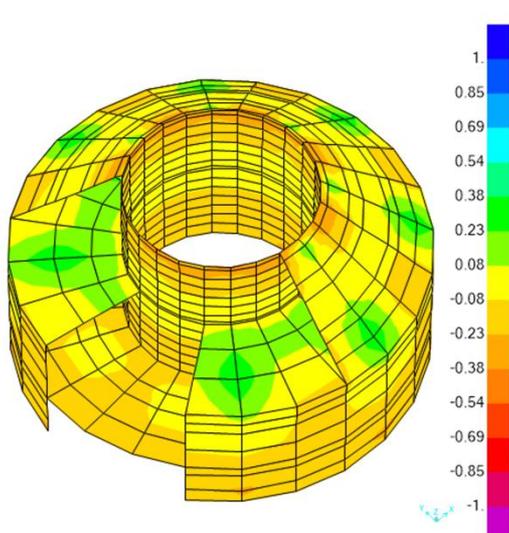


Figura 5.579 Tensioni S1-1 Bottom Face di elemento "shell" di Basamento del Cupolino in direzione circonferenziale senza cedimenti

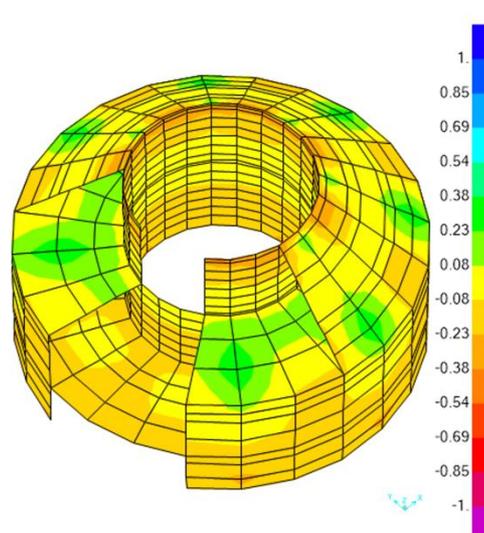


Figura 5.580 Tensioni S1-1 Bottom Face di elemento "shell" di Basamento del Cupolino in direzione circonferenziale con cedimenti

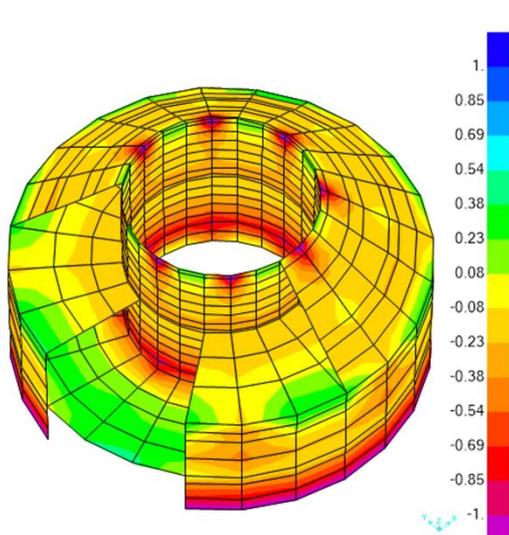


Figura 5.581 Tensioni S2-2 Top Face di elementi verticali e inclinati di Basamento di Cupolino in direzione verticali ed elemento orizzontali in direzione radiale senza cedimenti

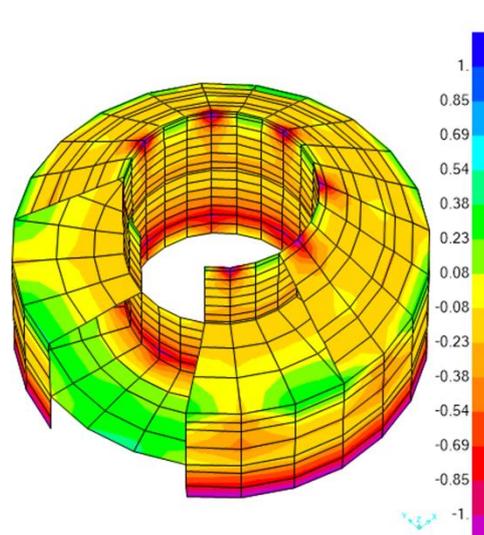


Figura 5.582 Tensioni S2-2 Top Face di elementi verticali e inclinati di Basamento di Cupolino in direzione verticali ed elemento orizzontali in direzione radiale con cedimenti

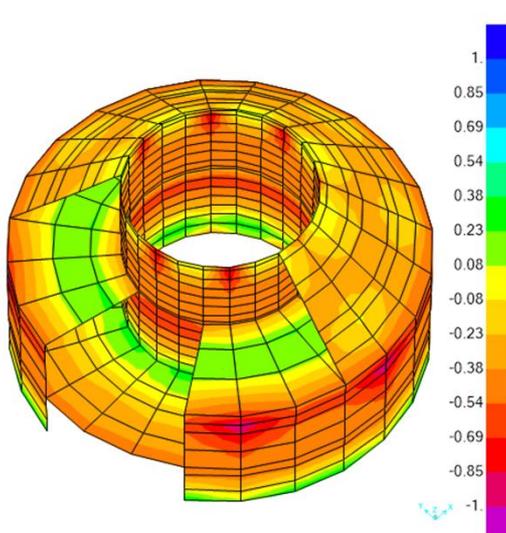


Figura 5.583 Tensioni S2-2 Bottom Face di elementi verticali e inclinati di Basamento di Cupolino in direzione verticali ed elemento orizzontali in direzione radiale senza cedimenti

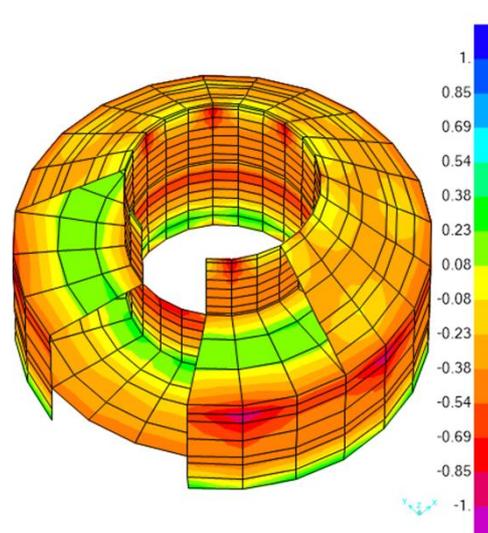


Figura 5.584 Tensioni S2-2 Bottom Face di elementi verticali e inclinati di Basamento di Cupolino in direzione verticali ed elemento orizzontali in direzione radiale con cedimenti

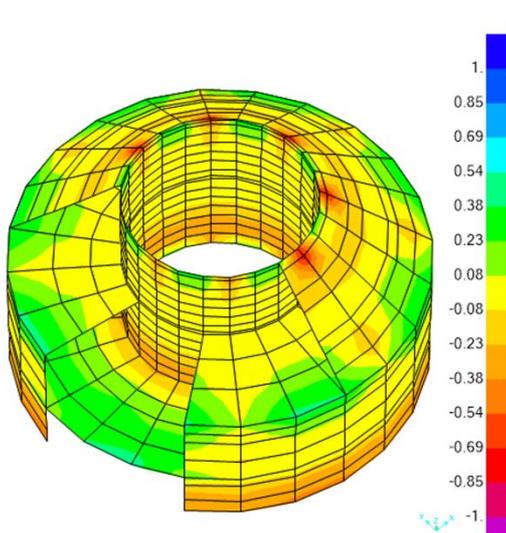


Figura 5.585 Tensione S-Max Top Face di elemento "shell" di Basamento del Cupolino senza cedimenti

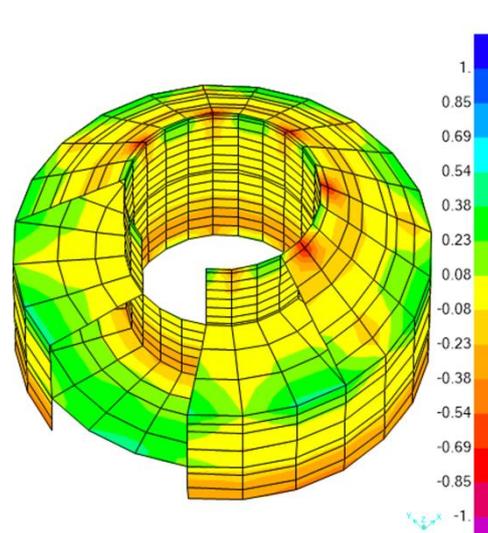


Figura 5.586 Tensione S-Max Top Face di elemento "shell" di Basamento del Cupolino con cedimenti

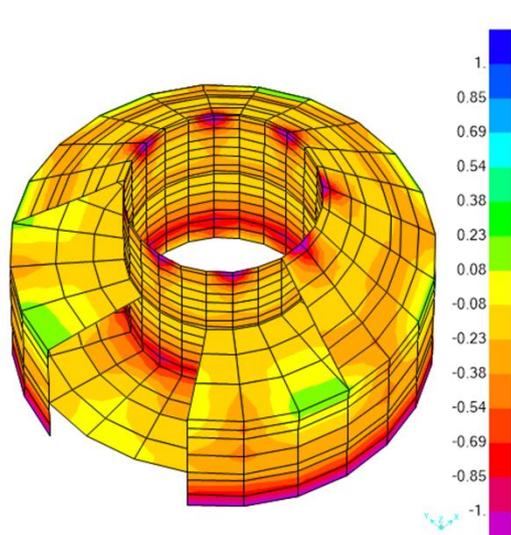


Figura 5.587 Tensioni S-Min Top Face elemento "shell" di Basamento del Cupolino senza cedimenti

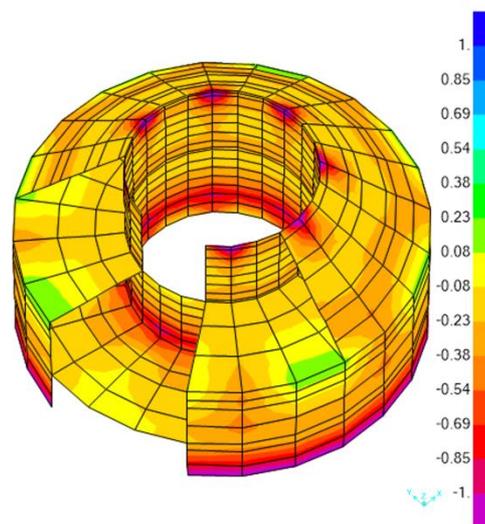


Figura 5.588 Tensioni S-Min Top Face di elemento "shell" di Basamento del Cupolino con cedimenti

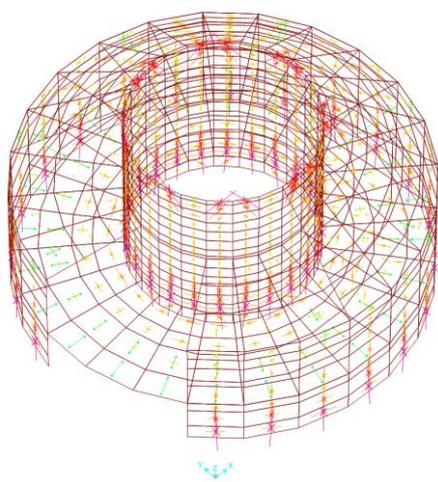


Figura 5.589 Direzioni delle tensioni principali (S-Max e S-Min) Top Face di elemento "shell" di Basamento del Cupolino senza cedimenti

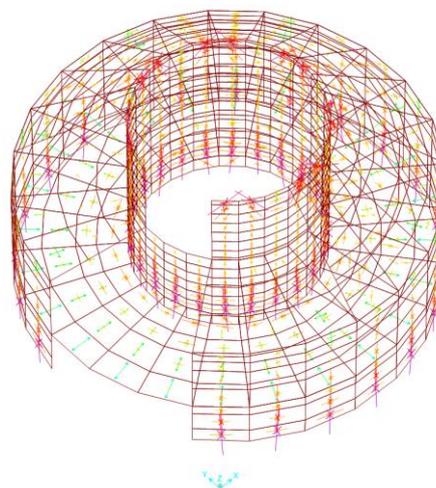


Figura 5.590 Direzioni delle tensioni principali (S-Max e S-Min) Top Face di elemento "shell" di Basamento del Cupolino con cedimenti

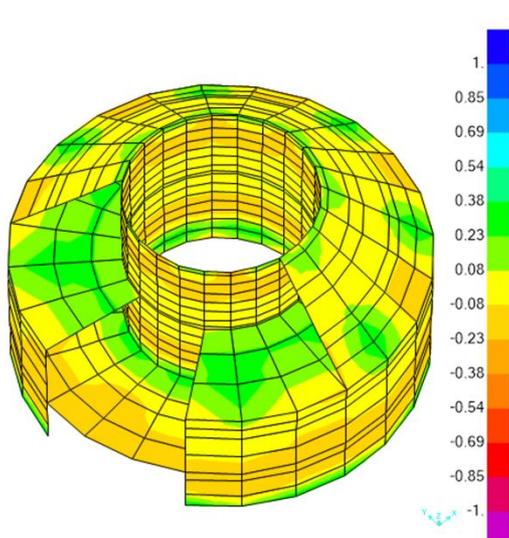


Figura 5.591 Tensioni S-Max Bottom Face di elemento "shell" di Basamento del Cupolino senza cedimenti

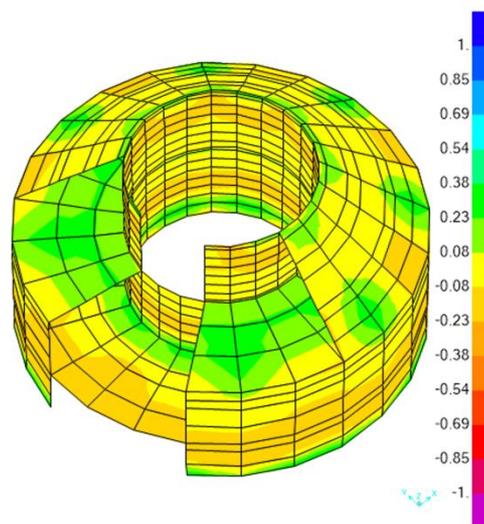


Figura 5.592 Tensioni S-Max Bottom Face di elemento "shell" di Basamento del Cupolino con cedimenti

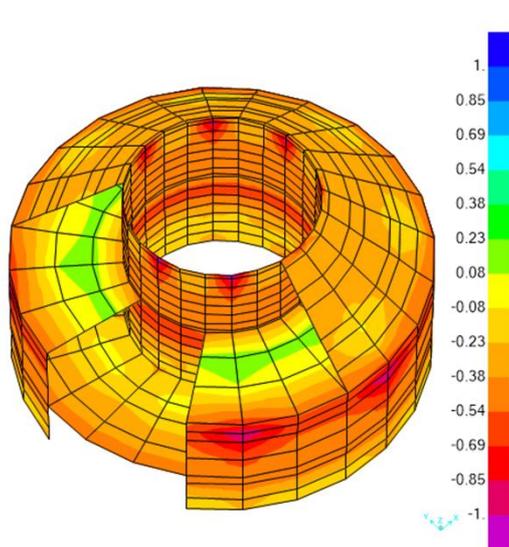


Figura 5.593 Tensioni S-Min Bottom Face di elemento "shell" di Basamento del Cupolino senza cedimenti

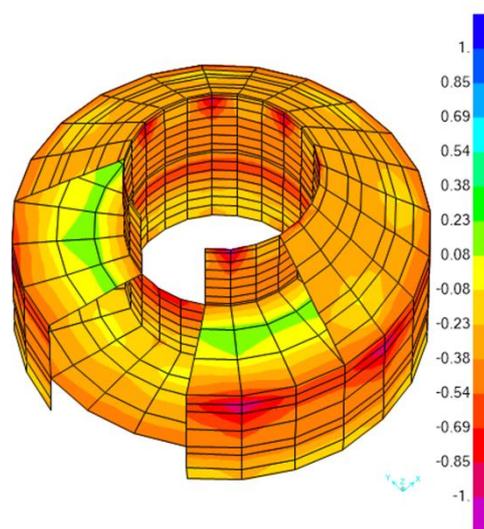


Figura 5.594 Tensioni S-Min Bottom Face di elemento "shell" di Basamento del Cupolino con cedimenti

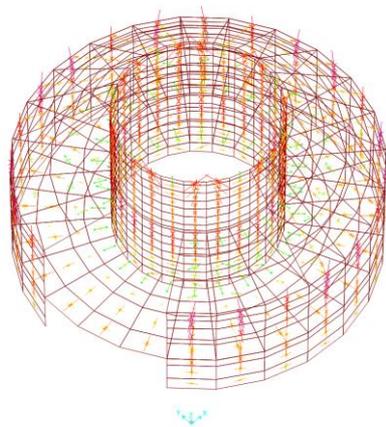


Figura 5.595 Direzioni delle tensioni principali (S-Max e S-Min) Bottom Face di elemento "shell" di Basamento del Cupolino senza cedimenti

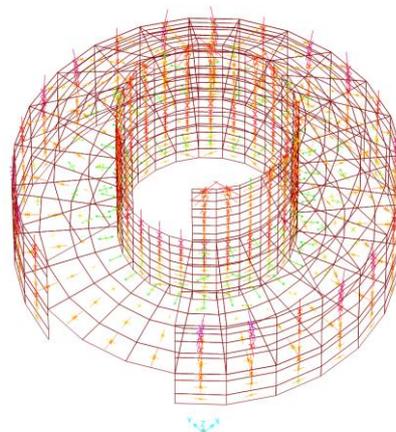


Figura 5.596 Direzioni delle tensioni principali (S-Max e S-Min) Bottom Face di elemento "shell" di Basamento del Cupolino con cedimenti

5.11.2 Primo Peristilio del Cupolino

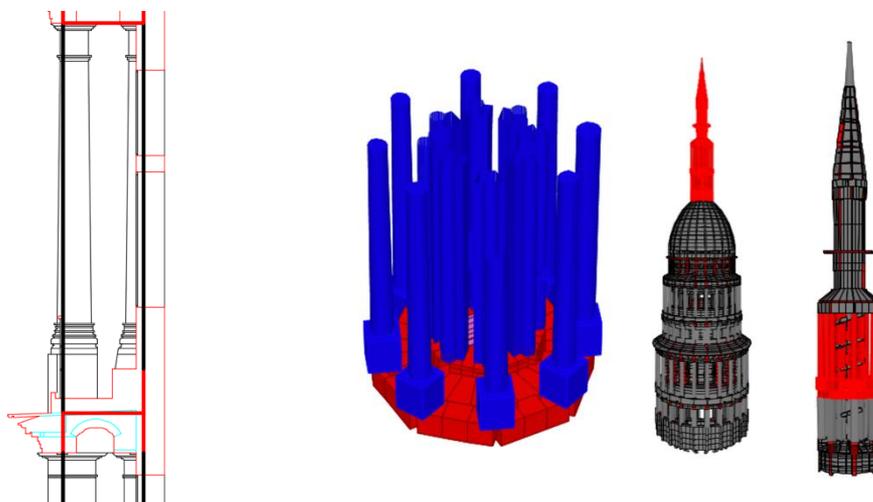


Figura 5.597 Primo Peristilio del Cupolino di Basilica

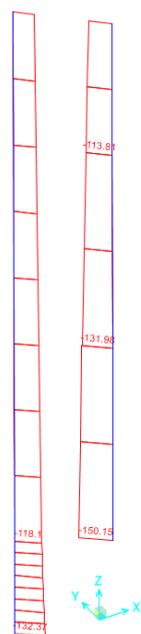


Figura 5.598 Sforzo assiale sui pilastri di Primo Peristilio di Cupolino senza cedimenti

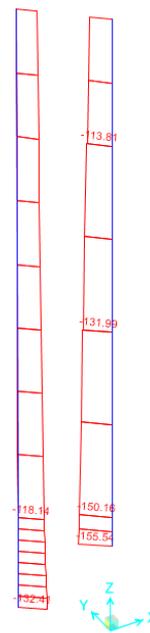


Figura 5.599 Sforzo assiale sui pilastri di Primo Peristilio di Cupolino con cedimenti

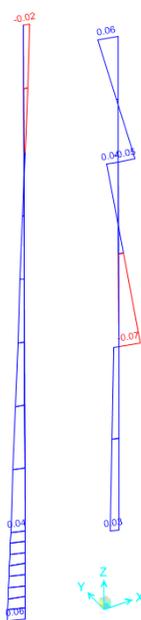


Figura 5.600 Momento flettente 2-2 sui pilastri di Primo Peristilio di Cupolino in direzione circonferenziale senza cedimenti

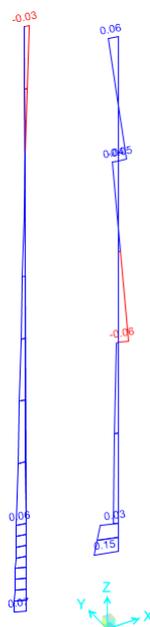


Figura 5.601 Momento flettente 2-2 sui pilastri di Primo Peristilio di Cupolino in direzione circonferenziale con cedimenti

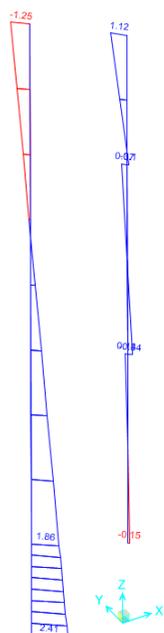


Figura 5.602 Momento flettente 3-3 sui pilastri di Primo Peristilio di Cupolino in direzione radiale e senza cedimenti

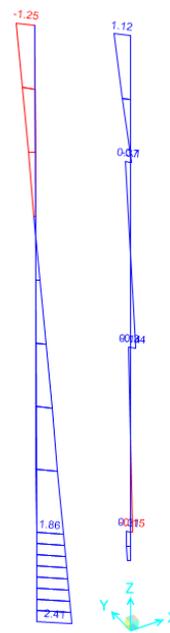


Figura 5.603 Momento flettente 3-3 sui pilastri di Primo Peristilio di Cupolino in direzione radiale e con cedimenti

Tabella 5.21 Sforzi assiali dei pilastri esterni del Primo Peristilio di Cupolino ed il rapporto tra due condizioni

	Sforzo Assiale dei pilastri [kN]		
	Senza cedimenti	Con cedimenti	Rapporto
Nord	-127.05	-127.01	100%
Nord-Est	-113.20	-113.35	100%
Est	-118.03	-118.07	100%
Sud-Est	-120.02	-119.87	100%

	Sforzo Assiale dei pilastri [kN]		
	Senza cedimenti	Con cedimenti	Rapporto
Sud	-119.27	-119.23	100%
Sud-Ovest	-118.38	-118.53	100%
Ovest	-118.10	-118.14	100%
Nord-Ovest	-115.07	-114.92	100%

Tabella 5.22 Sforzi assiali dei pilastri esterni del Primo Peristilio di Cupolino ed il rapporto tra due condizioni

	Sforzo Assiale dei pilastri [kN]		
	Senza cedimenti	Con cedimenti	Rapporto
Nord	-149.90	-150.09	100%
Nord-Est	-151.61	-151.85	100%
Est	-154.59	-154.82	100%
Sud-Est	-156.48	-156.70	100%

	Sforzo Assiale dei pilastri [kN]		
	Senza cedimenti	Con cedimenti	Rapporto
Sud	-156.40	-156.65	100%
Sud-Ovest	-155.98	-156.28	100%
Ovest	-155.26	-155.55	100%
Nord-Ovest	-150.66	-150.82	100%

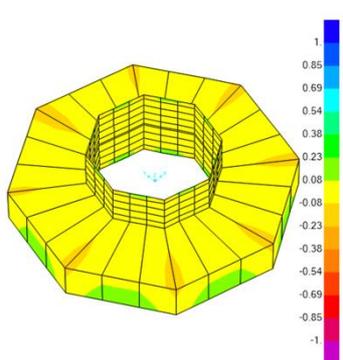


Figura 5.604 Tensione S1-1 Top Face di pareti e pavimento del Primo Peristilio di Cupolino in direzione circonferenziale senza cedimenti

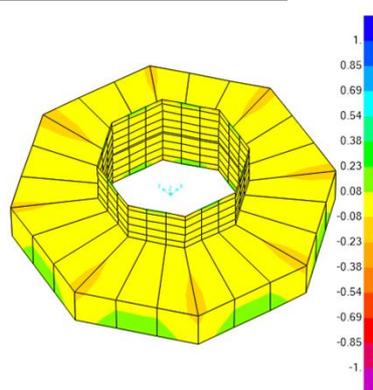


Figura 5.605 Tensione S1-1 Top Face di pareti e pavimento del Primo Peristilio di Cupolino in direzione circonferenziale con cedimenti

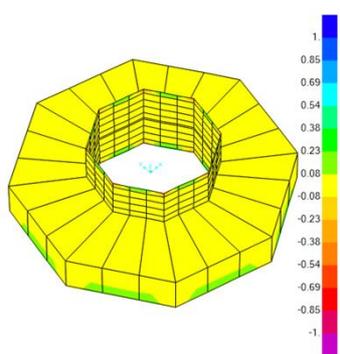


Figura 5.606 Tensioni S1-1 Bottom Face di pareti e pavimento del Primo Peristilio di Cupolino in direzione circonferenziale senza cedimenti

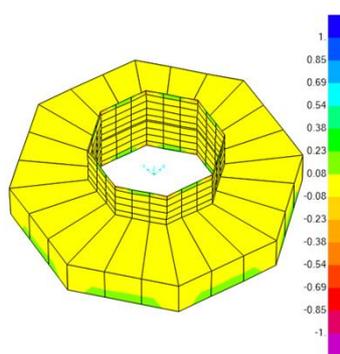


Figura 5.607 Tensioni S1-1 Bottom Face di pareti e pavimento del Primo Peristilio di Cupolino in direzione circonferenziale con cedimenti

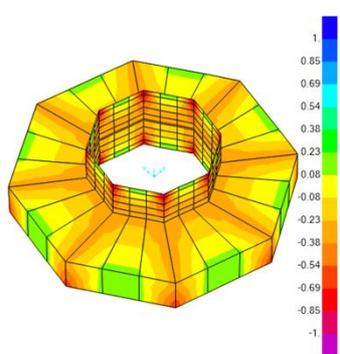


Figura 5.608 Tensioni S2-2 Top Face di pareti del Primo Peristilio di Cupolino in direzione verticali e pavimento in direzione radiale senza cedimenti

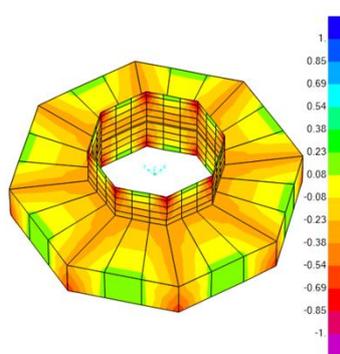


Figura 5.609 Tensioni S2-2 Top Face di pareti del Primo Peristilio di Cupolino in direzione verticali e pavimento in direzione radiale con cedimenti

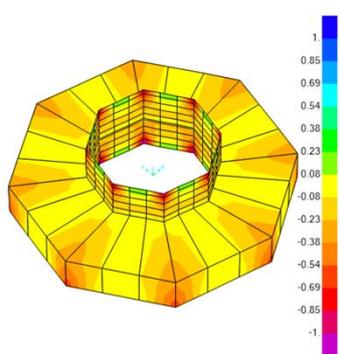


Figura 5.610 Tensioni S2-2 Bottom Face di pareti del Primo Peristilio di Cupolino in direzione verticali e pavimento in direzione radiale senza cedimenti

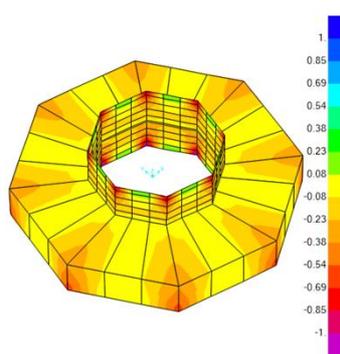


Figura 5.611 Tensioni S2-2 Bottom Face di pareti del Primo Peristilio di Cupolino in direzione verticali e pavimento in direzione radiale con cedimenti

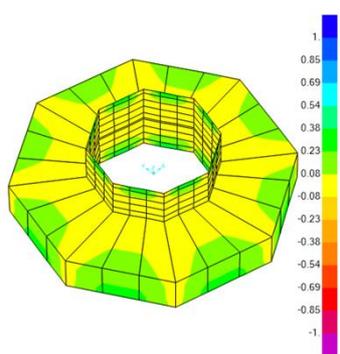


Figura 5.612 Tensione S-Max Top Face pareti e pavimento del Primo Peristilio di Cupolino senza cedimenti

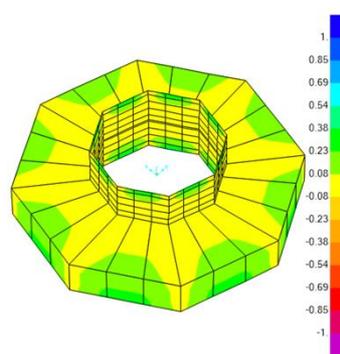


Figura 5.613 Tensione S-Max Top Face di pareti e pavimento del Primo Peristilio di Cupolino con cedimenti

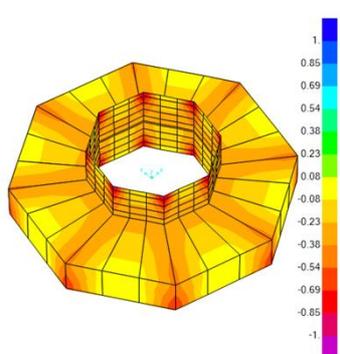


Figura 5.614 Tensioni S-Min Top Face di pareti e pavimento del Primo Peristilio di Cupolino senza cedimenti

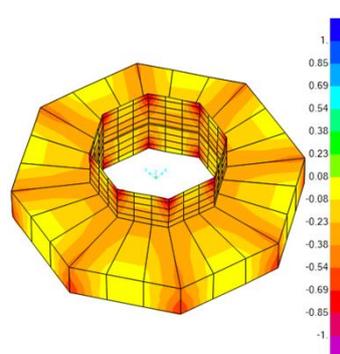


Figura 5.615 Tensioni S-Min Top Face di pareti e pavimento del Primo Peristilio di Cupolino con cedimenti

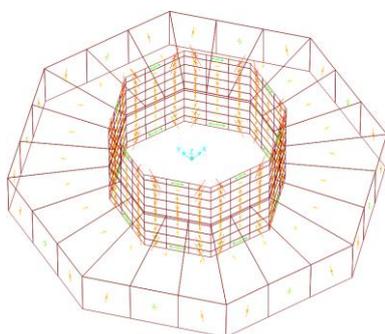


Figura 5.616 Direzioni delle tensioni principali (S-Max e S-Min) Top Face di pareti e pavimento del Primo Peristilio di Cupolino senza cedimenti

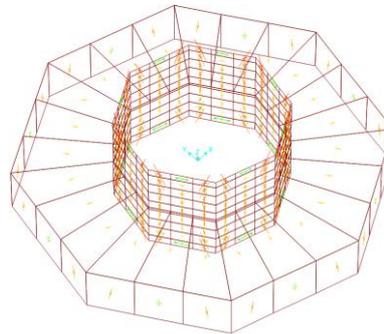


Figura 5.617 Direzioni delle tensioni principali (S-Max e S-Min) Top Face di pareti e pavimento del Primo Peristilio di Cupolino con cedimenti

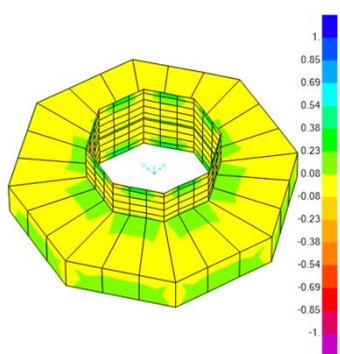


Figura 5.618 Tensioni S-Max Bottom Face di pareti e pavimento del Primo Peristilio di Cupolino senza cedimenti

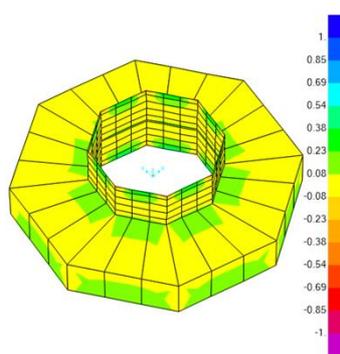


Figura 5.619 Tensioni S-Max Bottom Face di pareti e pavimento del Primo Peristilio di Cupolino con cedimenti

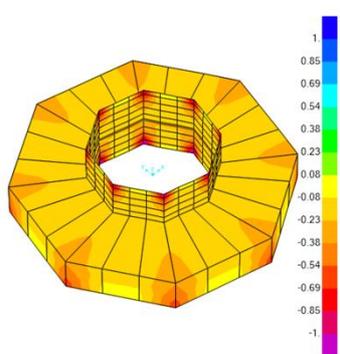


Figura 5.620 Tensioni S-Min Bottom Face di pareti e pavimento del Primo Peristilio di Cupolino senza cedimenti

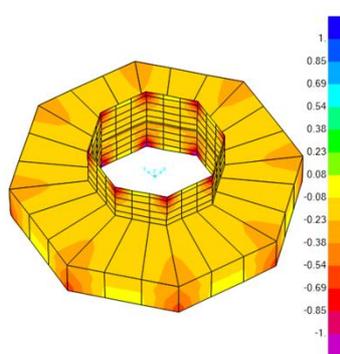


Figura 5.621 Tensioni S-Min Bottom Face di pareti e pavimento del Primo Peristilio di Cupolino con cedimenti

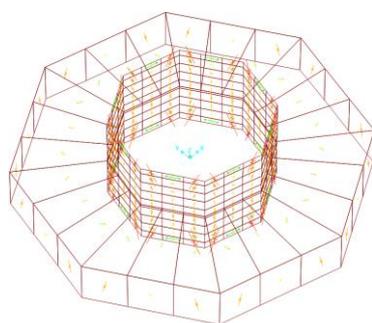


Figura 5.622 Direzioni delle tensioni principali (S-Max e S-Min) Bottom Face di pareti e pavimento del Primo Peristilio di Cupolino senza cedimenti

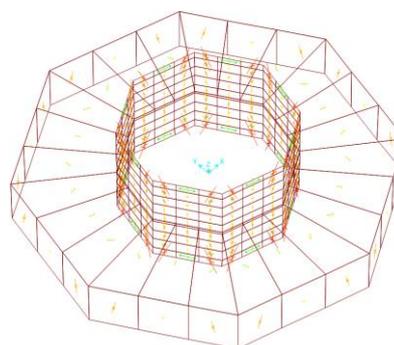


Figura 5.623 Direzioni delle tensioni principali (S-Max e S-Min) Bottom Face di pareti e pavimento del Primo Peristilio di Cupolino con cedimenti

5.11.3 Secondo Stilobate di Cupolino

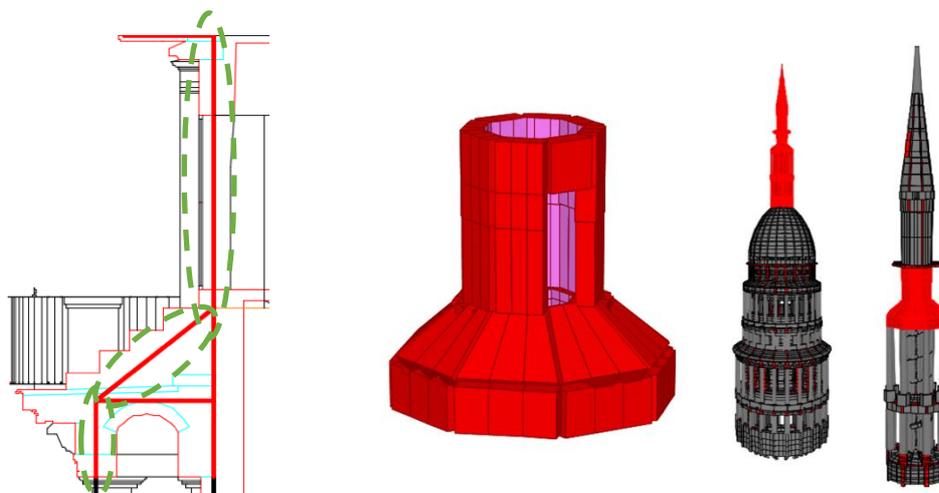


Figura 5.624 Secondo Stilobate di Cupolino

In questa di Seconda Stilobate di Cupolino, i diagrammi delle tensioni delle varie parti verranno presentate in due parti, in cui la prima parte è indicata in Figura 5.624. Dove l'apertura della porta è stato messo verso il Nord.

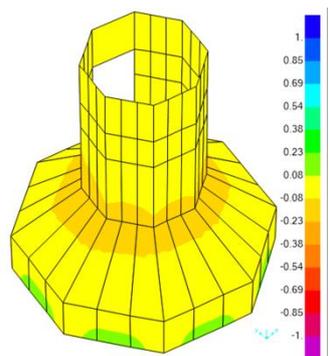


Figura 5.625 Tensione S1-1 Top Face di elementi shell esterni di Secondo Stilobate di Cupolino in direzione circonferenziale senza cedimenti

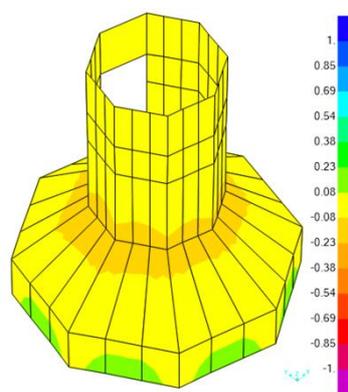


Figura 5.626 Tensione S1-1 Top Face di elementi shell esterni di Secondo Stilobate di Cupolino in direzione circonferenziale con cedimenti

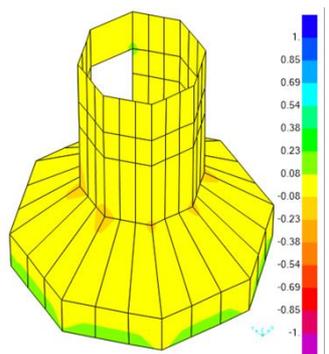


Figura 5.627 Tensioni S1-1 Bottom Face di elementi shell esterni di Secondo Stilobate di Cupolino in direzione circonferenziale senza cedimenti

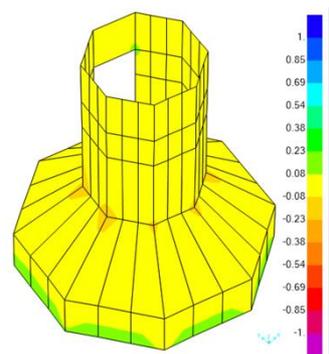


Figura 5.628 Tensioni S1-1 Bottom Face di elementi shell esterni di Secondo Stilobate di Cupolino in direzione circonferenziale con cedimenti

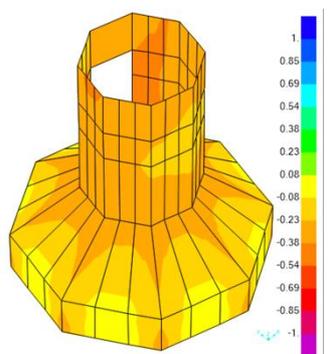


Figura 5.629 Tensioni S2-2 Top Face di pareti esterni del Secondo Stilobate di Cupolino in direzione verticali senza cedimenti

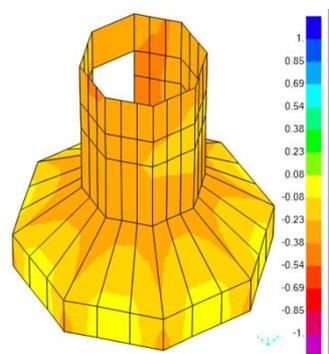


Figura 5.630 Tensioni S2-2 Top Face di pareti esterni del Secondo Stilobate di Cupolino in direzione verticali con cedimenti

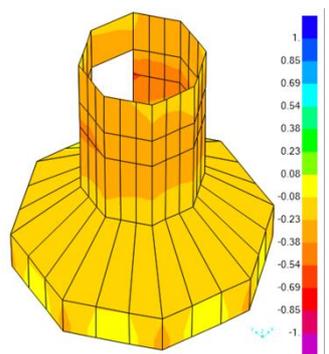


Figura 5.631 Tensioni S2-2 Bottom Face di pareti esterni del Secondo Stilobate di Cupolino in direzione verticali senza cedimenti

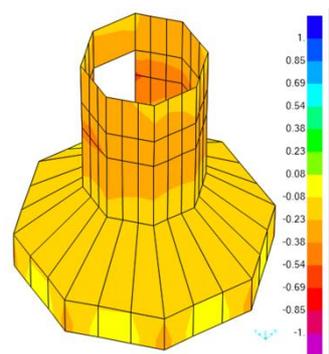


Figura 5.632 Tensioni S2-2 Bottom Face di pareti esterni del Secondo Stilobate di Cupolino in direzione verticali con cedimenti

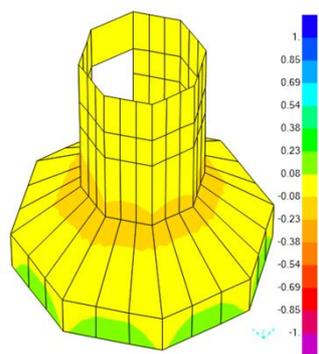


Figura 5.633 Tensione S-Max Top Face elementi shell esterni di Secondo Stilobate di Cupolino senza cedimenti

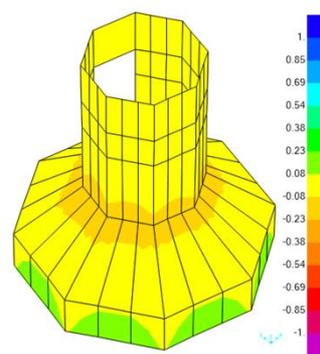


Figura 5.634 Tensione S-Max Top Face di elementi shell esterni di Secondo Stilobate di Cupolino con cedimenti

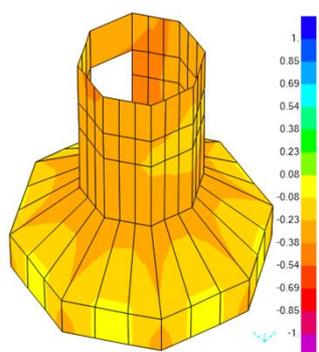


Figura 5.635 Tensioni S-Min Top Face di elementi shell esterni di Secondo Stilobate di Cupolino senza cedimenti

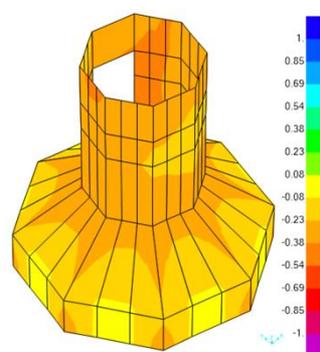


Figura 5.636 Tensioni S-Min Top Face di elementi shell esterni di Secondo Stilobate di Cupolino con cedimenti

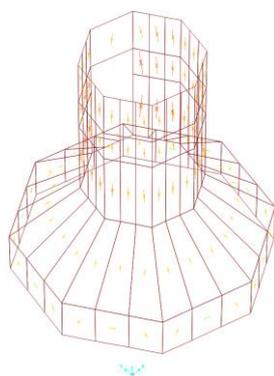


Figura 5.637 Direzioni delle tensioni principali (S-Max e S-Min) Top Face di elementi shell esterni di Secondo Stilobate di Cupolino senza cedimenti

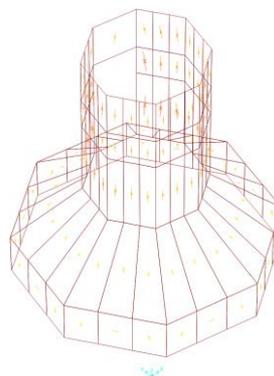


Figura 5.638 Direzioni delle tensioni principali (S-Max e S-Min) Top Face di elementi shell esterni di Secondo Stilobate di Cupolino con cedimenti

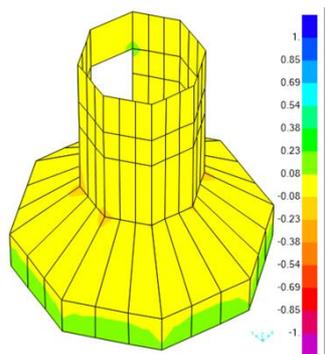


Figura 5.639 Tensioni S-Max Bottom Face di elementi shell esterni di Secondo Stilobate di Cupolino senza cedimenti

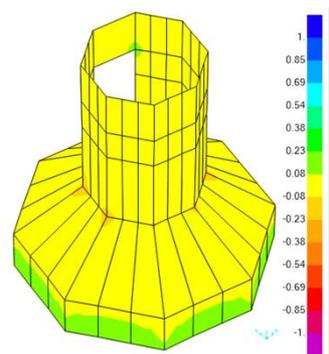


Figura 5.640 Tensioni S-Max Bottom Face di elementi shell esterni di Secondo Stilobate di Cupolino con cedimenti

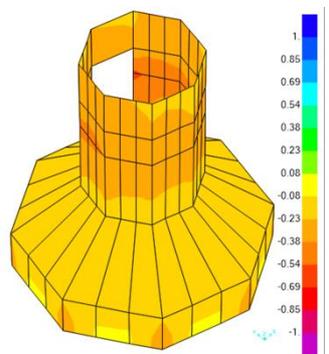


Figura 5.641 Tensioni S-Min Bottom Face di elementi shell esterni di Secondo Stilobate di Cupolino senza cedimenti

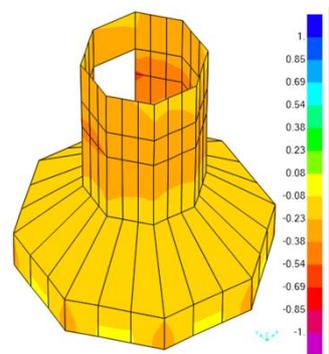


Figura 5.642 Tensioni S-Min Bottom Face di elementi shell esterni di Secondo Stilobate di Cupolino con cedimenti

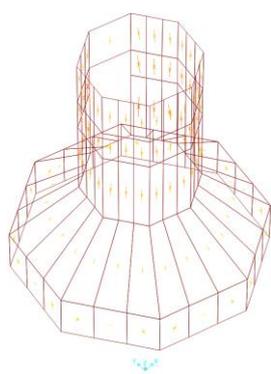


Figura 5.643 Direzioni delle tensioni principali (S-Max e S-Min) Bottom Face di elementi shell esterni di Secondo Stilobate di Cupolino senza cedimenti

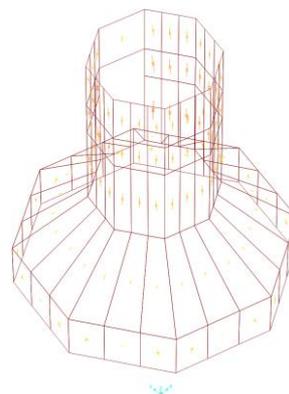


Figura 5.644 Direzioni delle tensioni principali (S-Max e S-Min) Bottom Face di elementi shell esterni di Secondo Stilobate di Cupolino con cedimenti

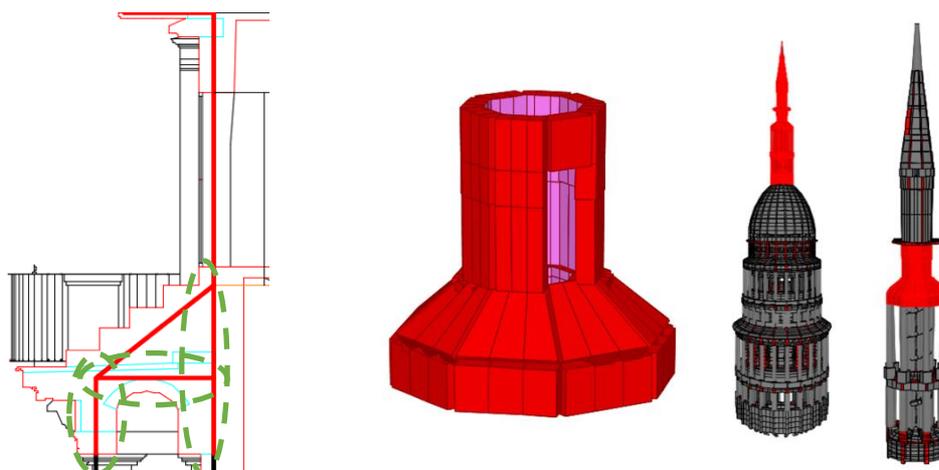


Figura 5.645 Secondo Stilobate di Cupolino

La seconda parte dei diagrammi delle tensioni è indicata in Figura 5.645.

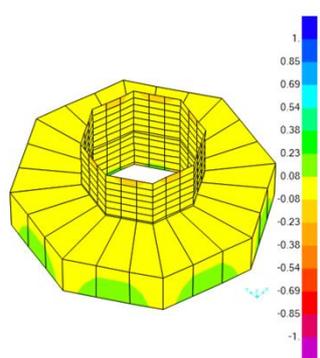


Figura 5.646 Tensione S1-1 Top Face di elementi shell interni di Secondo Stilobate di Cupolino in direzione circonferenziale senza cedimenti

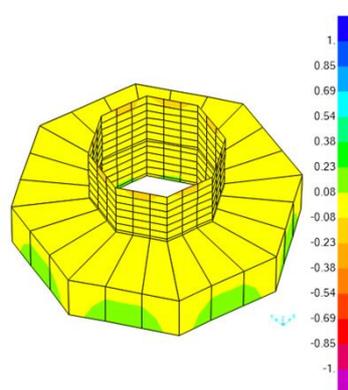


Figura 5.647 Tensione S1-1 Top Face di elementi shell interni di Secondo Stilobate di Cupolino in direzione circonferenziale con cedimenti

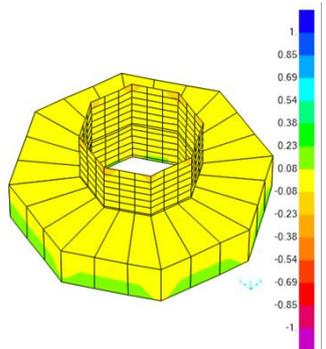


Figura 5.648 Tensioni S1-1 Bottom Face di elementi shell interni di Secondo Stilobate di Cupolino in direzione circonferenziale senza cedimenti

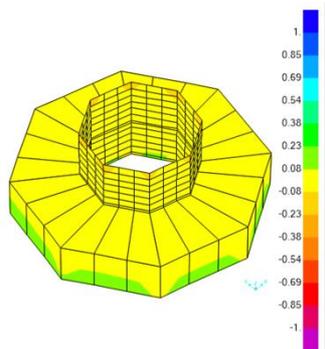


Figura 5.649 Tensioni S1-1 Bottom Face di elementi shell interni di Secondo Stilobate di Cupolino in direzione circonferenziale con cedimenti

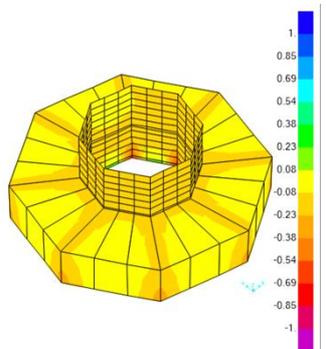


Figura 5.650 Tensioni S2-2 Top Face di pareti interni del Secondo Stilobate di Cupolino in direzione verticali senza cedimenti

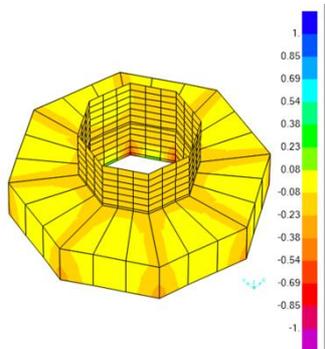


Figura 5.651 Tensioni S2-2 Top Face di pareti interni del Secondo Stilobate di Cupolino in direzione verticali con cedimenti

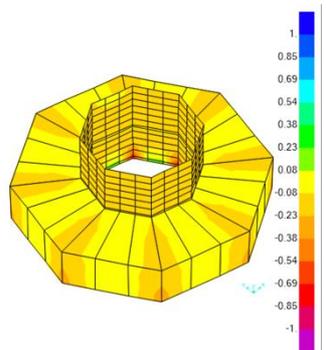


Figura 5.652 Tensioni S2-2 Bottom Face di pareti interni del Secondo Stilobate di Cupolino in direzione verticali senza cedimenti

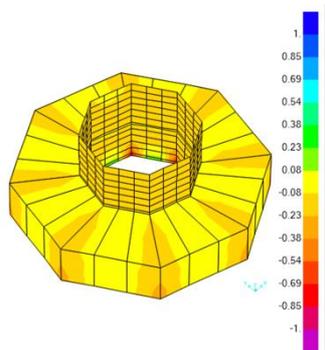


Figura 5.653 Tensioni S2-2 Bottom Face di pareti interni del Secondo Stilobate di Cupolino in direzione verticali con cedimenti

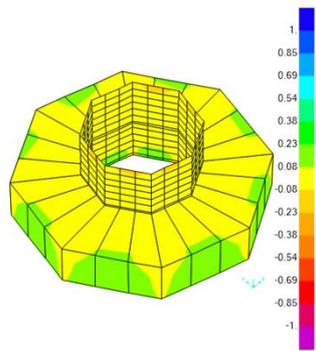


Figura 5.654 Tensione S-Max Top Face elementi shell interni di Secondo Stilobate di Cupolino senza cedimenti

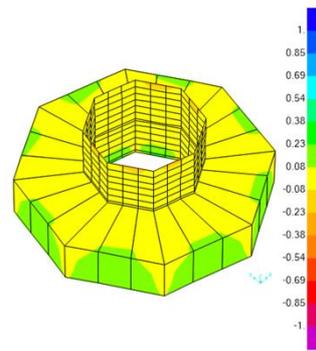


Figura 5.655 Tensione S-Max Top Face di elementi shell interni di Secondo Stilobate di Cupolino con cedimenti

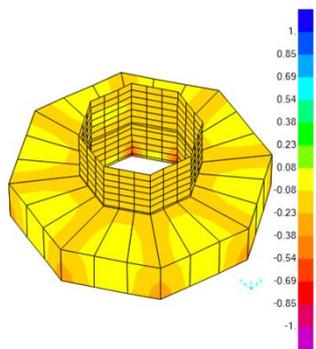


Figura 5.656 Tensioni S-Min Top Face di elementi shell interni di Secondo Stilobate di Cupolino senza cedimenti

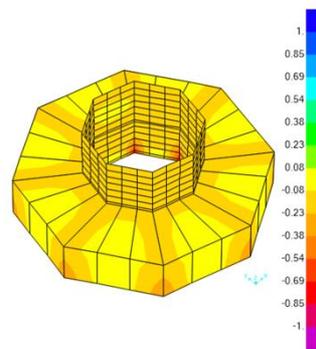


Figura 5.657 Tensioni S-Min Top Face di elementi shell interni di Secondo Stilobate di Cupolino con cedimenti

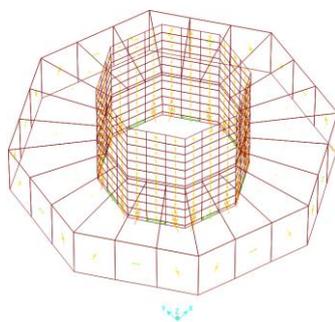


Figura 5.658 Direzioni delle tensioni principali (S-Max e S-Min) Top Face di elementi shell interni di Secondo Stilobate di Cupolino senza cedimenti

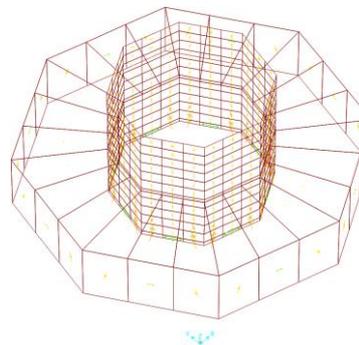


Figura 5.659 Direzioni delle tensioni principali (S-Max e S-Min) Top Face di elementi shell interni di Secondo Stilobate di Cupolino con cedimenti

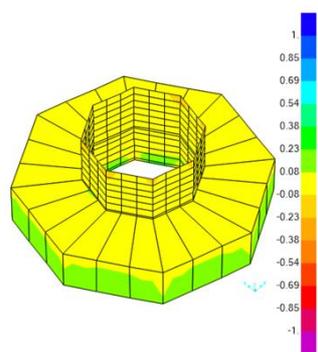


Figura 5.660 Tensioni S-Max Bottom Face di elementi shell interni di Secondo Stilobate di Cupolino senza cedimenti

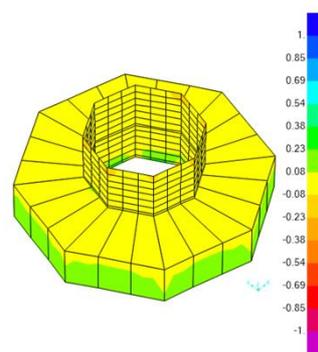


Figura 5.661 Tensioni S-Max Bottom Face di elementi shell interni di Secondo Stilobate di Cupolino con cedimenti

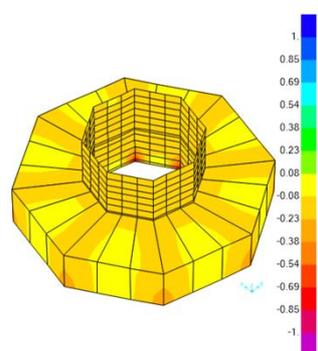


Figura 5.662 Tensioni S-Min Bottom Face di elementi shell interni di Secondo Stilobate di Cupolino senza cedimenti

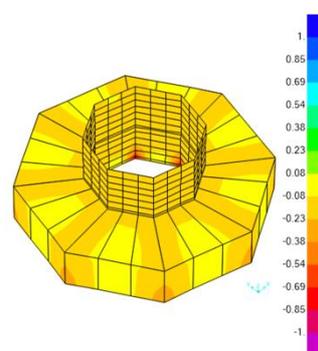


Figura 5.663 Tensioni S-Min Bottom Face di elementi shell interni di Secondo Stilobate di Cupolino con cedimenti

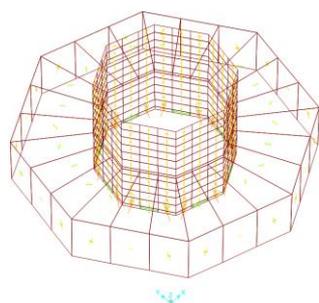


Figura 5.664 Direzioni delle tensioni principali (S-Max e S-Min) Bottom Face di elementi shell interni di Secondo Stilobate di Cupolino senza cedimenti

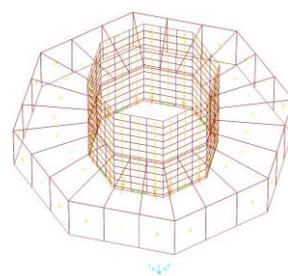


Figura 5.665 Direzioni delle tensioni principali (S-Max e S-Min) Bottom Face di elementi shell interni di Secondo Stilobate di Cupolino con cedimenti

5.11.4 Secondo Peristilio di Cupolino

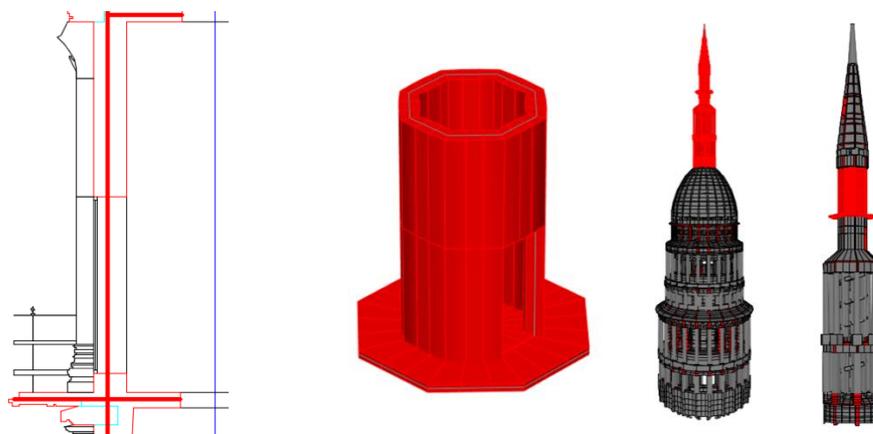


Figura 5.666 Secondo Peristilio del Cupolino

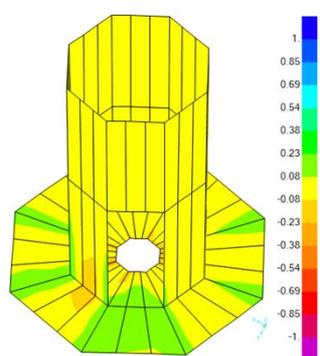


Figura 5.667 Tensione S1-1 Top Face di elementi shell interni di Secondo Peristilio di Cupolino in direzione circonferenziale senza cedimenti

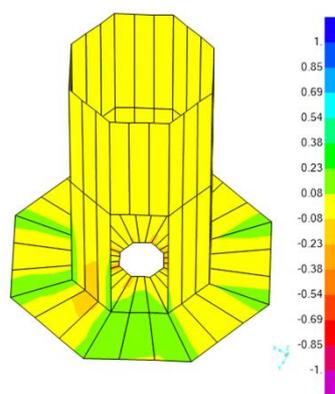


Figura 5.668 Tensione S1-1 Top Face di elementi shell interni di Secondo Peristilio di Cupolino in direzione circonferenziale con cedimenti

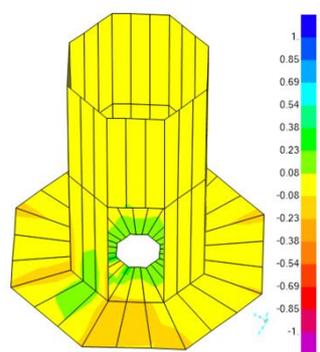


Figura 5.669 Tensioni S1-1 Bottom Face di elementi shell interni di Secondo Peristilio di Cupolino in direzione circonferenziale senza cedimenti

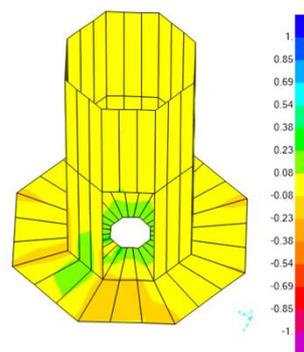


Figura 5.670 Tensioni S1-1 Bottom Face di elementi shell interni di Secondo Peristilio di Cupolino in direzione circonferenziale con cedimenti

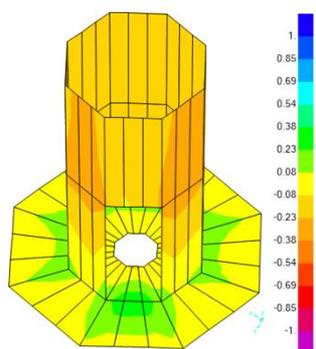


Figura 5.671 Tensioni S2-2 Top Face di pareti interni del Secondo Peristilio di Cupolino in direzione verticali senza cedimenti

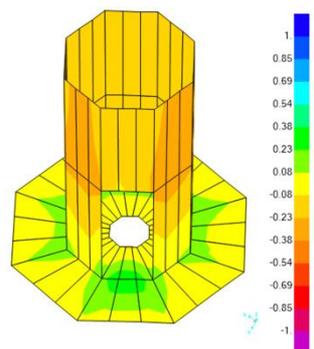


Figura 5.672 Tensioni S2-2 Top Face di pareti interni del Secondo Peristilio di Cupolino in direzione verticali con cedimenti

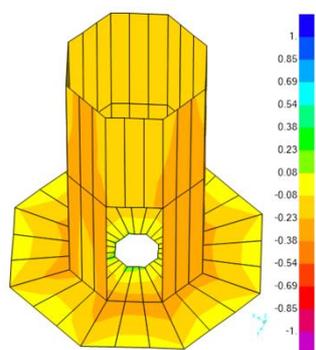


Figura 5.673 Tensioni S2-2 Bottom Face di pareti interni del Secondo Peristilio di Cupolino in direzione verticali senza cedimenti

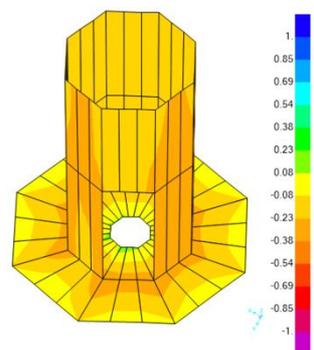


Figura 5.674 Tensioni S2-2 Bottom Face di pareti interni del Secondo Peristilio di Cupolino in direzione verticali con cedimenti

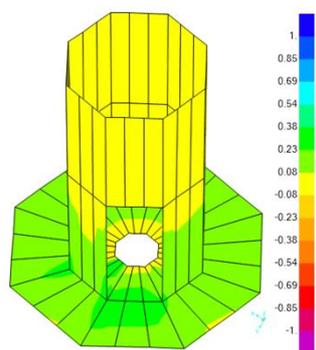


Figura 5.675 Tensione S-Max Top Face elementi shell interni di Secondo Peristilio di Cupolino senza cedimenti

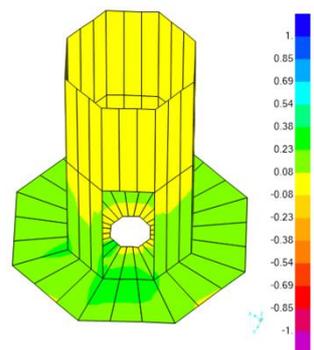


Figura 5.676 Tensione S-Max Top Face elementi shell interni di Secondo Peristilio di Cupolino con cedimenti

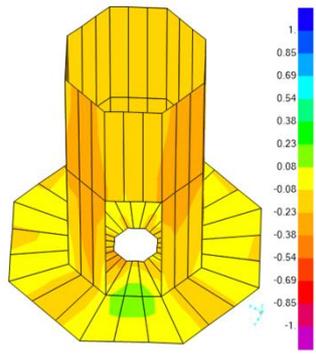


Figura 5.677 Tensioni S-Min Top Face di elementi shell interni di Secondo Peristilio di Cupolino senza cedimenti

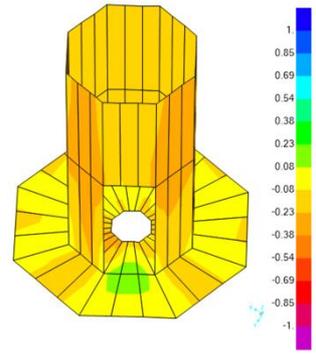


Figura 5.678 Tensioni S-Min Top Face di elementi shell interni di Secondo Peristilio di Cupolino con cedimenti

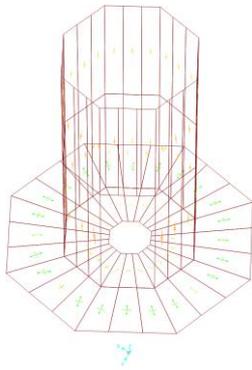


Figura 5.679 Direzioni delle tensioni principali (S-Max e S-Min) Top Face di elementi shell interni di Secondo Peristilio di Cupolino senza cedimenti

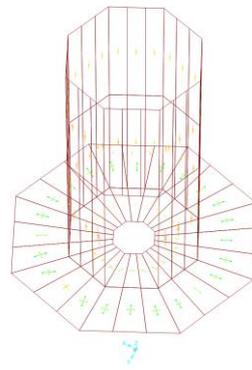


Figura 5.680 Direzioni delle tensioni principali (S-Max e S-Min) Top Face di elementi shell interni di Secondo Peristilio di Cupolino con cedimenti

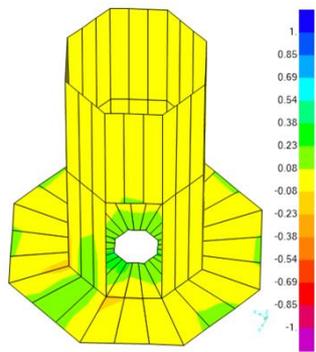


Figura 5.681 Tensioni S-Max Bottom Face di elementi shell interni di Secondo Peristilio di Cupolino senza cedimenti

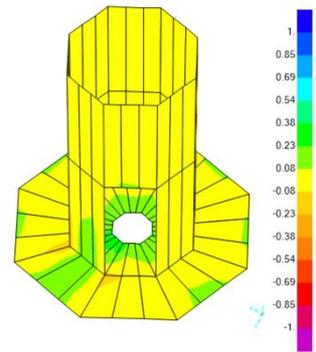


Figura 5.682 Tensioni S-Max Bottom Face di elementi shell interni di Secondo Peristilio di Cupolino con cedimenti

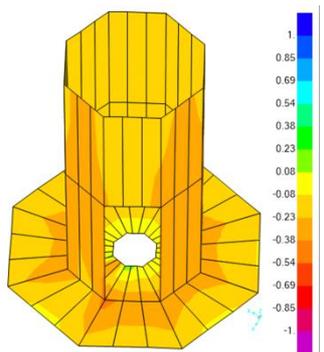


Figura 5.683 Tensioni S-Min Bottom Face di elementi shell interni di Secondo Peristilio di Cupolino senza cedimenti

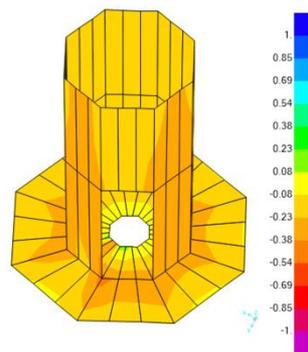


Figura 5.684 Tensioni S-Min Bottom Face di elementi shell interni di Secondo Peristilio di Cupolino con cedimenti

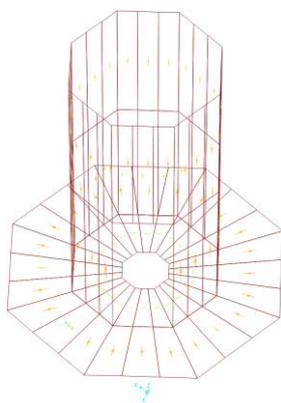


Figura 5.685 Direzioni delle tensioni principali (S-Max e S-Min) Bottom Face di elementi shell interni di Secondo Peristilio di Cupolino senza cedimenti

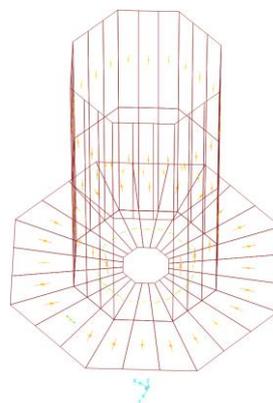


Figura 5.686 Direzioni delle tensioni principali (S-Max e S-Min) Bottom Face di elementi shell interni di Secondo Peristilio di Cupolino con cedimenti

5.11.5 Attico del Cupolino

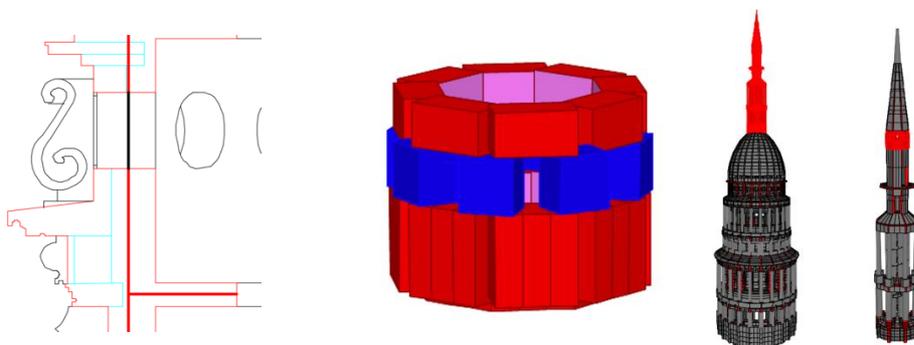


Figura 5.687 Attico del Cupolino

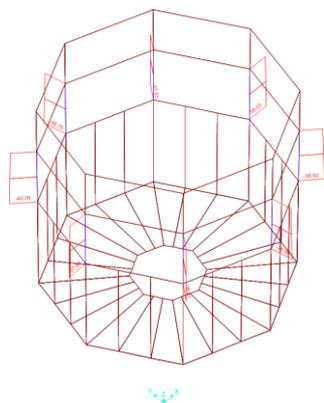


Figura 5.688 Sforzo assiale sugli elementi “frame” di Attico di Cupolino senza cedimenti

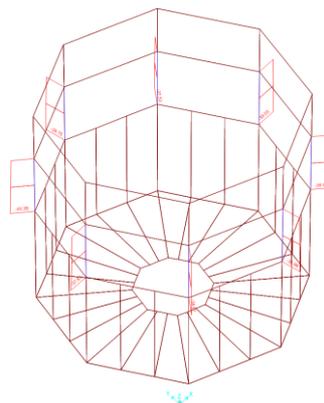


Figura 5.689 Sforzo assiale sugli elementi “frame” di Attico di Cupolino con cedimenti

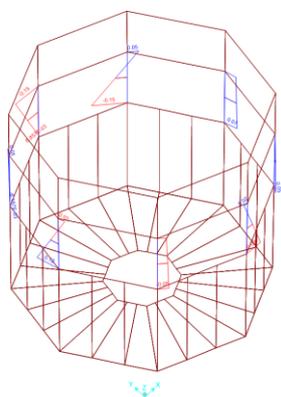


Figura 5.690 Momento flettente 2-2 sugli elementi “frame” di Attico di Cupolino in direzione circonferenziale senza cedimenti

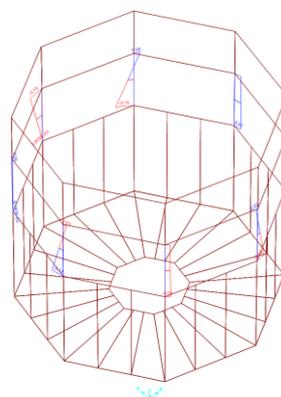


Figura 5.691 Momento flettente 2-2 sugli elementi “frame” di Attico di Cupolino in direzione circonferenziale con cedimenti

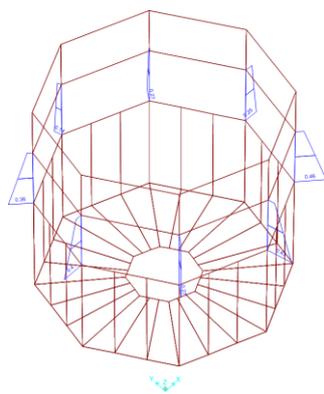


Figura 5.692 Momento flettente 3-3 sugli elementi “frame” di Attico di Cupolino in direzione radiale e senza cedimenti

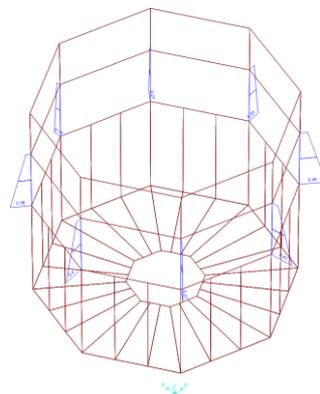


Figura 5.693 Momento flettente 3-3 sugli elementi “frame” di Attico di Cupolino in direzione radiale e con cedimenti

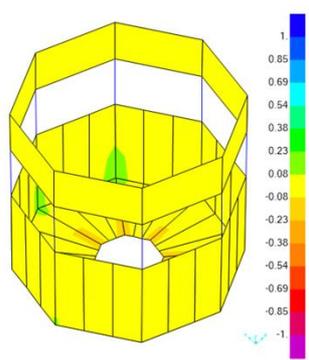


Figura 5.694 Tensione S1-1 Top Face di elementi shell dell'Attico di Cupolino in direzione circonferenziale senza cedimenti

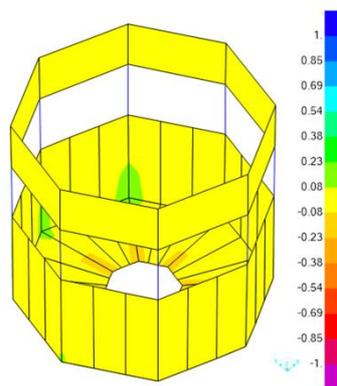


Figura 5.695 Tensione S1-1 Top Face di elementi shell dell'Attico di Cupolino in direzione circonferenziale con cedimenti

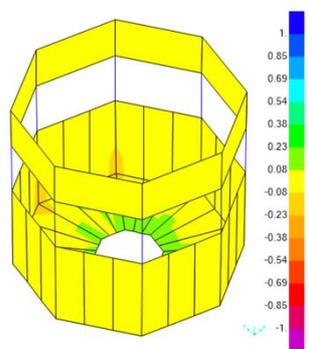


Figura 5.696 Tensioni S1-1 Bottom Face di elementi shell dell'Attico di Cupolino in direzione circonferenziale senza cedimenti

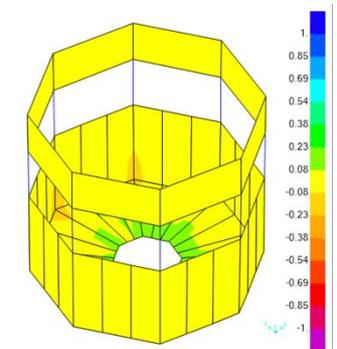


Figura 5.697 Tensioni S1-1 Bottom Face di elementi shell dell'Attico di Cupolino in direzione circonferenziale con cedimenti

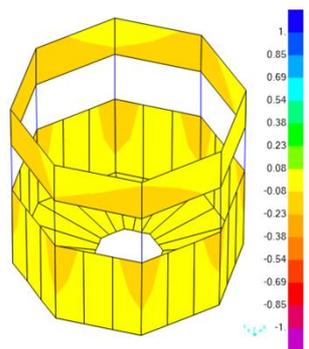


Figura 5.698 Tensioni S2-2 Top Face di pareti dell'Attico di Cupolino in direzione verticali e pavimenti in direzione radiale senza cedimenti

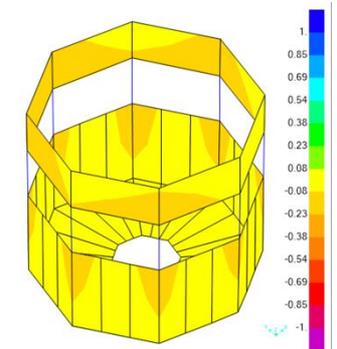


Figura 5.699 Tensioni S2-2 Top Face di pareti dell'Attico di Cupolino in direzione verticali e pavimenti in direzione radiale con cedimenti

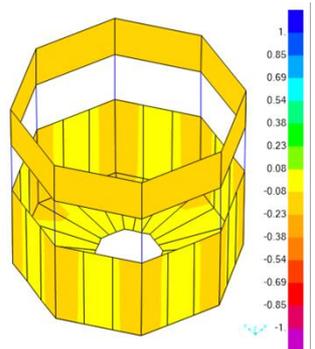


Figura 5.700 Tensioni S2-2 Bottom Face di pareti dell'Attico di Cupolino in direzione verticali e pavimenti in direzione radiale senza cedimenti

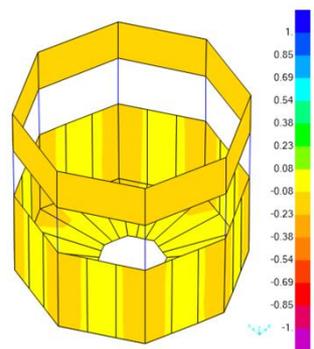


Figura 5.701 Tensioni S2-2 Bottom Face di pareti dell'Attico di Cupolino in direzione verticali e pavimenti in direzione radiale con cedimenti

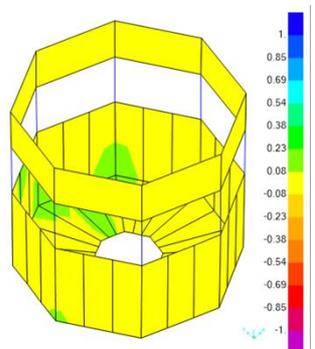


Figura 5.702 Tensione S-Max Top Face elementi shell dell'Attico di Cupolino senza cedimenti

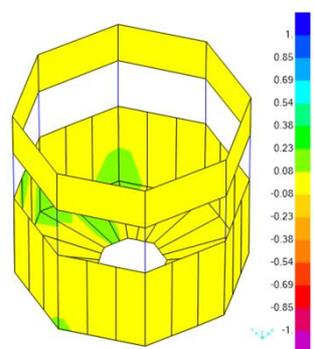


Figura 5.703 Tensione S-Max Top Face di elementi shell dell'Attico di Cupolino con cedimenti

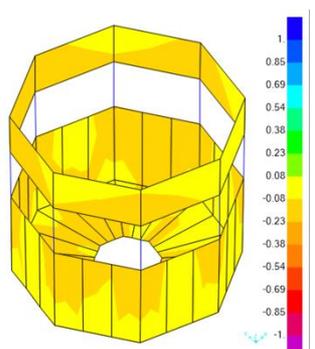


Figura 5.704 Tensioni S-Min Top Face di elementi shell dell'Attico di Cupolino senza cedimenti

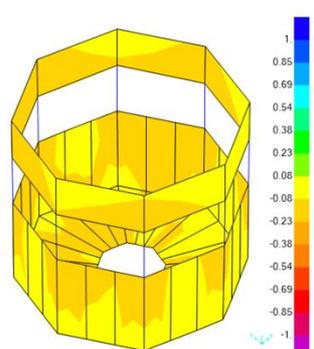


Figura 5.705 Tensioni S-Min Top Face di elementi shell dell'Attico di Cupolino con cedimenti

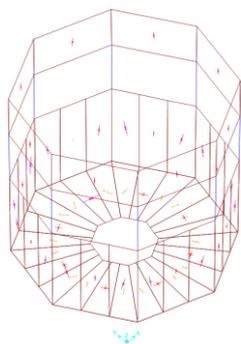


Figura 5.706 Direzioni delle tensioni principali (S-Max e S-Min) Top Face di elementi shell dell'Attico di Cupolino senza cedimenti

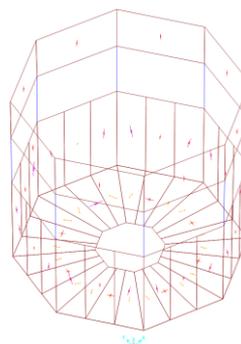


Figura 5.707 Direzioni delle tensioni principali (S-Max e S-Min) Top Face di elementi shell dell'Attico di Cupolino con cedimenti

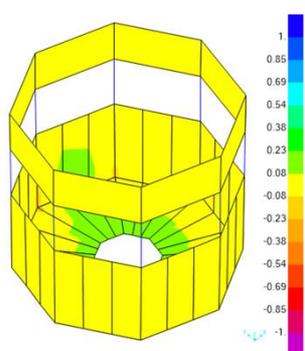


Figura 5.708 Tensioni S-Max Bottom Face di elementi shell dell'Attico di Cupolino senza cedimenti

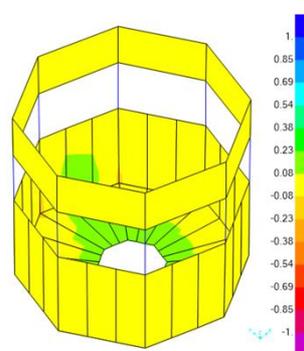


Figura 5.709 Tensioni S-Max Bottom Face di elementi shell dell'Attico di Cupolino con cedimenti

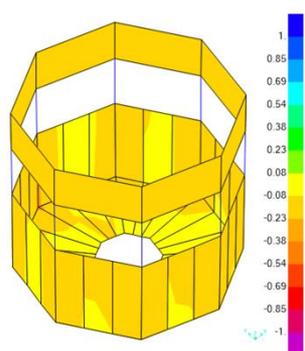


Figura 5.710 Tensioni S-Min Bottom Face di elementi shell dell'Attico di Cupolino senza cedimenti

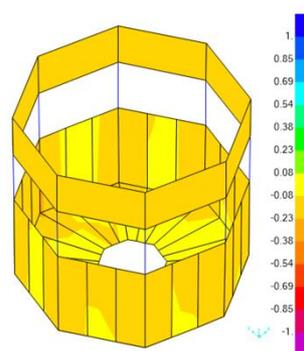


Figura 5.711 Tensioni S-Min Bottom Face di elementi shell dell'Attico di Cupolino con cedimenti

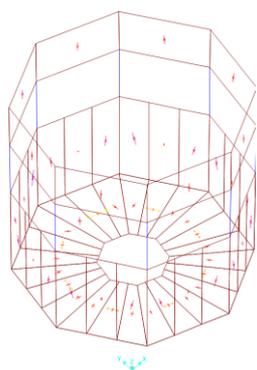


Figura 5.712 Direzioni delle tensioni principali (S-Max e S-Min) Bottom Face di elementi shell dell'Attico di Cupolino senza cedimenti

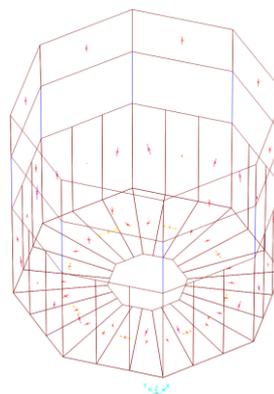


Figura 5.713 Direzioni delle tensioni principali (S-Max e S-Min) Bottom Face di elementi shell dell'Attico di Cupolino con cedimenti

5.11.6 Cuspide di Cupolino

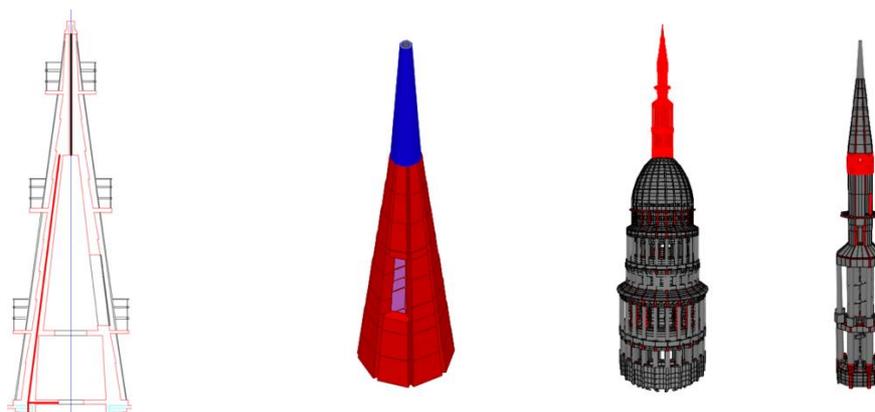


Figura 5.714 Cuspide di Cupolino



Figura 5.715 Sforzo assiale sugli elementi "frame" di Cuspide di Cupolino senza e/o con cedimenti

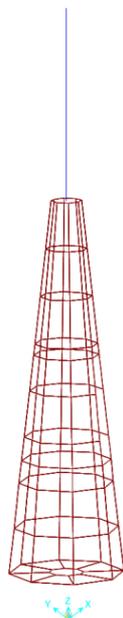


Figura 5.716 Momento flettente 2-2 nullo sugli elementi "frame" di Cuspide di Cupolino senza e/o con cedimenti



Figura 5.717 Momento flettente 3-3 nullo sugli elementi "frame" di Cuspide di Cupolino senza e/o con cedimenti

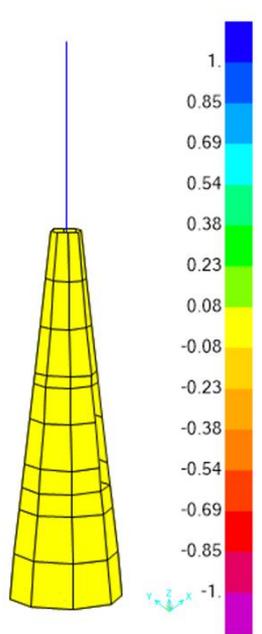


Figura 5.718 Tensione S1-1 Top Face di elementi shell di Cuspide di Cupolino in direzione circonferenziale senza cedimenti

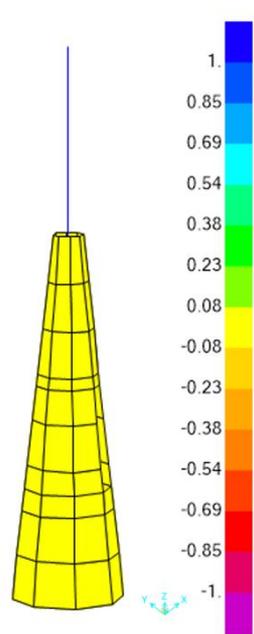


Figura 5.719 Tensione S1-1 Top Face di elementi shell di Cuspide di Cupolino in direzione circonferenziale con cedimenti

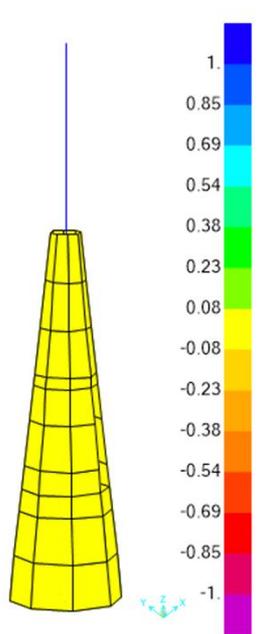


Figura 5.720 Tensioni S1-1 Bottom Face di elementi shell di Cuspide di Cupolino in direzione circonferenziale senza cedimenti

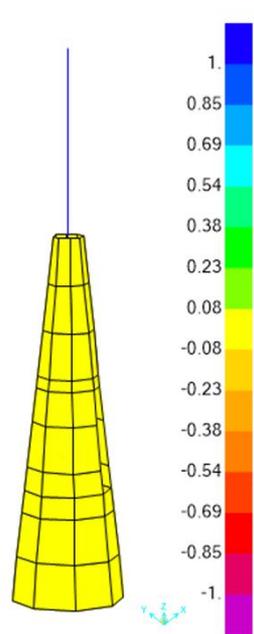


Figura 5.721 Tensioni S1-1 Bottom Face di elementi shell di Cuspide di Cupolino in direzione circonferenziale con cedimenti

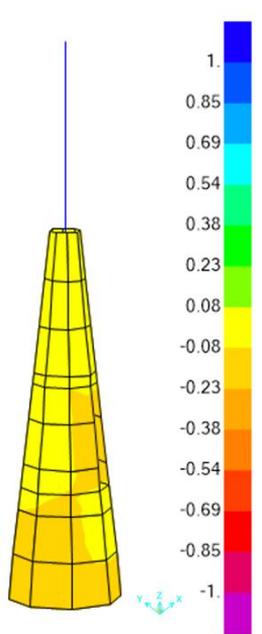


Figura 5.722 Tensioni S2-2 Top Face di pareti di Cuspide di Cupolino in direzione verticali e pavimenti in direzione radiale senza cedimenti

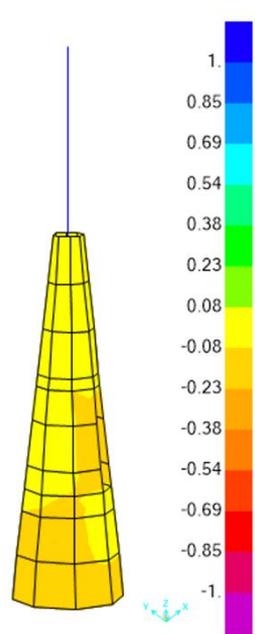


Figura 5.723 Tensioni S2-2 Top Face di pareti di Cuspide di Cupolino in direzione verticali e pavimenti in direzione radiale con cedimenti

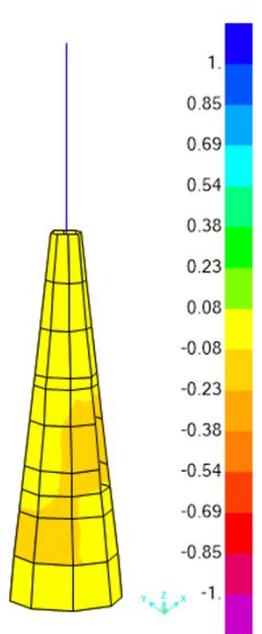


Figura 5.724 Tensioni S2-2 Bottom Face di pareti di Cuspide di Cupolino in direzione verticali e pavimenti in direzione radiale senza cedimenti

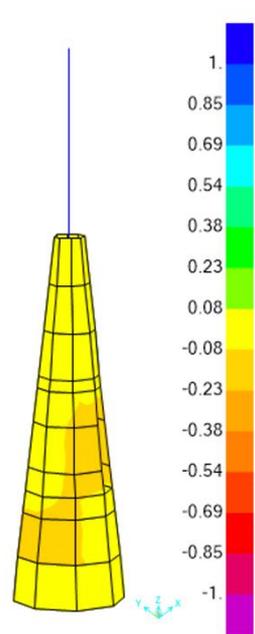


Figura 5.725 Tensioni S2-2 Bottom Face di pareti di Cuspide di Cupolino in direzione verticali e pavimenti in direzione radiale con cedimenti

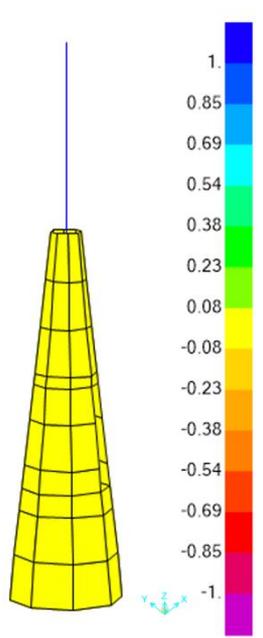


Figura 5.726 Tensione S-Max Top Face elementi shell di Cuspide di Cupolino senza cedimenti

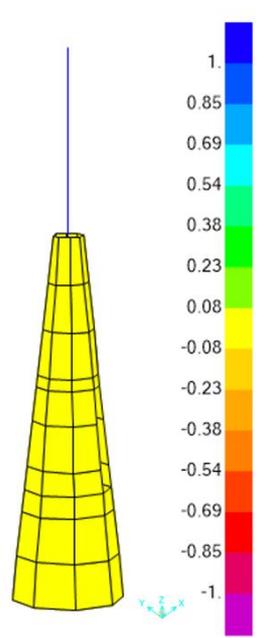


Figura 5.727 Tensione S-Max Top Face di elementi shell di Cuspide di Cupolino con cedimenti

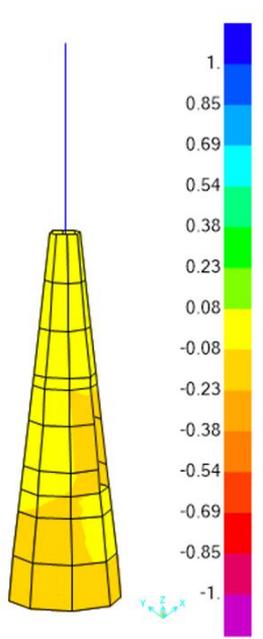


Figura 5.728 Tensioni S-Min Top Face di elementi shell di Cuspide di Cupolino senza cedimenti

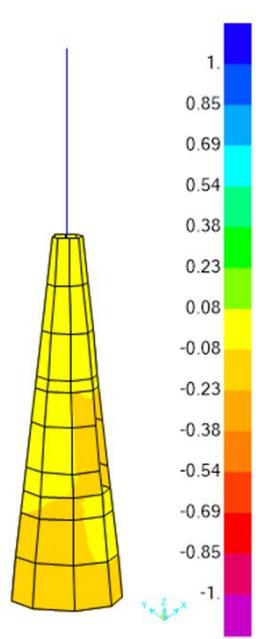


Figura 5.729 Tensioni S-Min Top Face di elementi shell di Cuspide di Cupolino con cedimenti

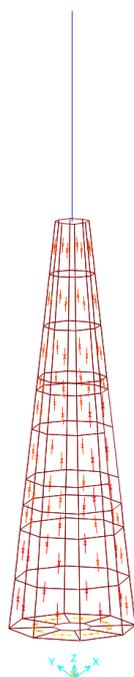


Figura 5.730 Direzioni delle tensioni principali (S-Max e S-Min) Top Face di elementi shell di Cuspide di Cupolino senza cedimenti

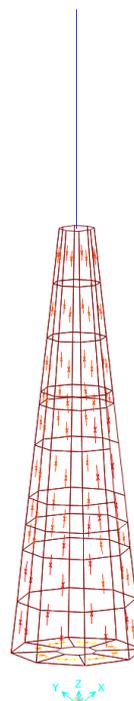


Figura 5.731 Direzioni delle tensioni principali (S-Max e S-Min) Top Face di elementi shell di Cuspide di Cupolino con cedimenti

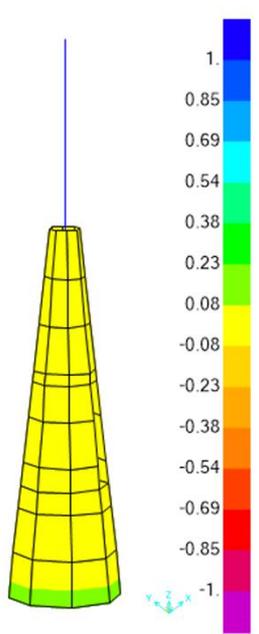


Figura 5.732 Tensioni S-Max Bottom Face di elementi shell di Cuspide di Cupolino senza cedimenti

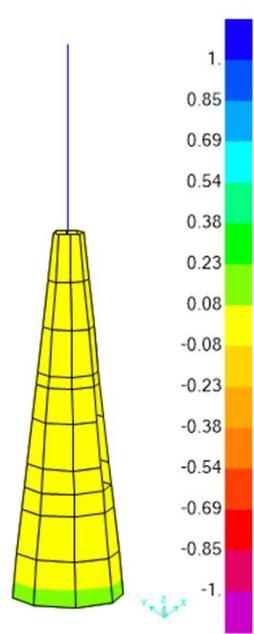


Figura 5.733 Tensioni S-Max Bottom Face di elementi shell di Cuspide di Cupolino con cedimenti

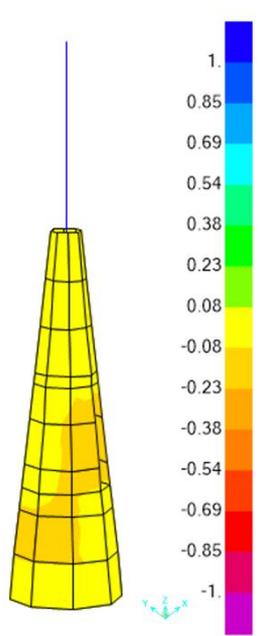


Figura 5.734 Tensioni S-Min Bottom Face di elementi shell di Cuspide di Cupolino senza cedimenti

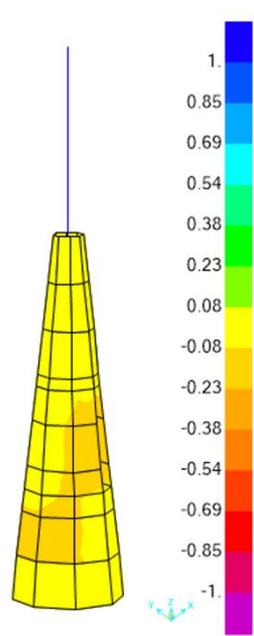


Figura 5.735 Tensioni S-Min Bottom Face di elementi shell di Cuspide di Cupolino con cedimenti

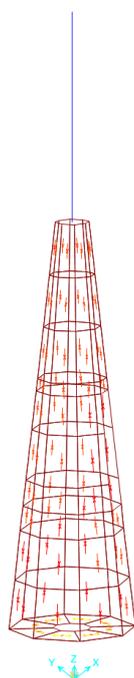


Figura 5.736 Direzioni delle tensioni principali (S-Max e S-Min) Bottom Face di elementi shell di Cuspide di Cupolino senza cedimenti

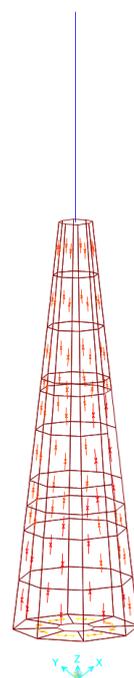


Figura 5.737 Direzioni delle tensioni principali (S-Max e S-Min) Bottom Face di elementi shell di Cuspide di Cupolino con cedimenti

Capitolo 6. Caratterizzazione dinamica

6.1 Introduzione

Avendo completato il modello della Cupola di Basilica del San Gaudenzio di Novara, l'ultimo step di lavoro verrà confrontare le frequenze naturali e le forme modali della Cupola preso dal software di elementi finiti SAP2000 e i tali valori preso dalle altre tesi in anni precedenti presso dai risultati registrati dagli accelerometri piezoelettrici installati sulla struttura. In particolare, le tesi sono:

- Tesi Moravi (A.A. 2000/2001) – Università di Trento
- Tesi Filippi (A.A. 2001/2002) – Università di Trento

6.2 Tesi Moravi (A.A 2000/2001) – Università di Trento

L'obiettivo principale della tesi è l'individuazione dei parametri dinamici quali: frequenze naturali, forme modali, fattori di smorzamento modale, con lo scopo di permettere la calibrazione dinamica del modello agli elementi finiti e la valutazione della sicurezza strutturale del complesso.

Sono stati utilizzati 16 accelerometri piezoelettrici. La scelta è ricaduta su tali strumenti grazie al loro peso, dimensioni e resistenza, e all'ampio range di sensibilità e di frequenze misurabili, vantaggi che li fecero preferire ad altri strumenti, quali trasduttori di spostamento e di velocità, o a sensori ottici, laser o magnetici, poco diffusi e molto costosi all'anno dell'installazione (1999).

In particolare, la strumentazione utilizzata consta in due (2) accelerometri 393B12 e quattordici (14) 393C, entrambi di produzione PCB Piezotronics.

Al fine di cogliere le forme flessionali, i sensori inseriti dove si prevedevano gli spostamenti maggiori tramite il modello agli elementi finiti.

I 16 accelerometri a disposizione sono stati disposti in serie di 4 su 4 livelli, come mostrato in Figura 6.1. Sono state scelte le direzioni NORD-SUD e EST-OVEST in modo tale da soddisfare l'esigenza di avere due coppie di strumenti in direzione ortogonale tra loro. La disposizione è stata tale da rilevare il segnale in modo tangenziale alla struttura, al fine di rilevare anche le forme torsionali.

Sono state effettuate 6 campagne di acquisizione della durata di 20 minuti nell'arco di una giornata, dalle ore 10:00 alle 18:00 circa. Nelle prime due acquisizioni della giornata si è potuto contare sulla presenza di una modesta sollecitazione esterna causata da un vento leggero, poi calato nel corso della mattinata. Si segnala che nella seconda acquisizione il

suono delle campane dell'attiguo campanile della basilica ha indotto un'ulteriore sollecitazione.

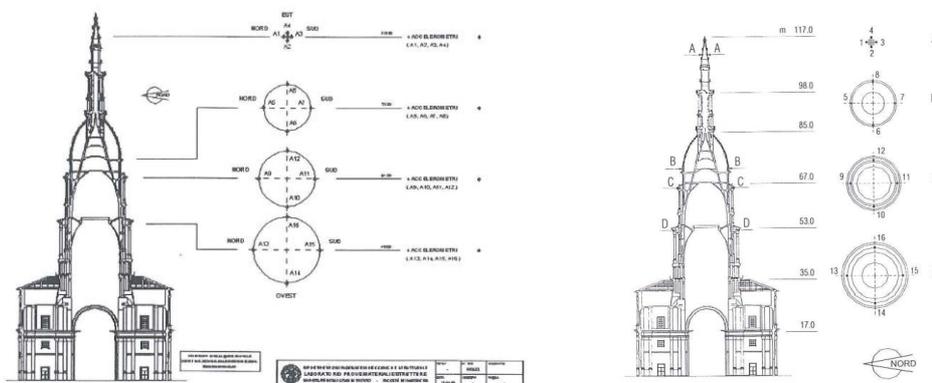


Figura 6.1 Posizione accelerometri

Considerando che le acquisizioni sono state effettuate in presenza di sollecitazioni ambientali, quali vento e traffico, si ipotizza una risposta prettamente lineare della struttura, e di conseguenza una risposta dinamica stazionaria nel tempo.

Per lo stesso motivo, inoltre, a causa del basso contenuto energetico delle vibrazioni registrate, è stata operata un'amplificazione del voltaggio registrato, allo scopo di rafforzare il segnale e renderlo più nitido.

Una non stazionarietà del segnale imputabile alla risposta della struttura significherebbe che durante il periodo di acquisizione dei dati la struttura ha modificato i suoi parametri meccanici a causa di un comportamento non lineare della struttura, molto improbabile sotto le azioni considerate.

La stazionarietà è stata verificata tramite un'analisi di tipo statistico del segnale denominata Reverse Arrangement Test.

Il segnale, una volta amplificato, è entrato in un registratore analogico multicanale TEAC XR-7000, che permette di registrare i canali in maniera continua e riversarli su un supporto magnetico: una videocassetta VHS. Questo tipo di registrazione permette di registrare più canali su un unico supporto senza perdere la sincronizzazione dei canali.

Il campionamento digitale è stato poi effettuato in secondo tempo tramite una scheda National Instrument AT-MIO-16XE-10 alla quale è stata collegata un'interfaccia in grado di acquisire i 16 segnali registrati tramite 16 cavi coassiali. La frequenza di campionamento è pari a 500 Hz, in modo da garantire frequenze valutabili correttamente fino ad una soglia di 250 Hz.

Si riporta la corrispondenza canali-accelerometri e la convenzione positiva degli assi degli accelerometri in Figura 6.2.

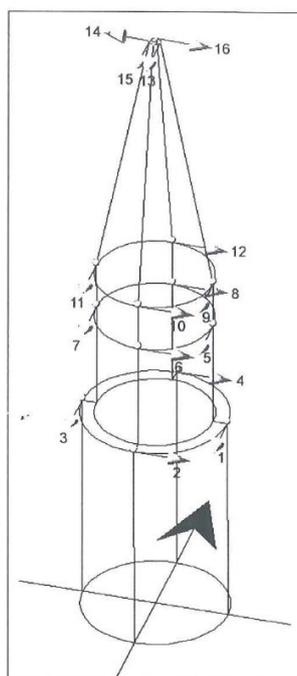


Figura 6.2 Numerazione accelerometri e convenzione degli assi positivi

Il segnale raccolto è caratterizzato da valori positivi e negativi con valori teorici medi di accelerazione pari a zero. Tuttavia, a causa di alcuni fattori si sono ottenuti dei valori medi diversi da zero. Per esempio, la durata di acquisizione è diversa da un multiplo del periodo di oscillazione della struttura e quindi si ottiene un errore di misurazione. Questo errore è stato però drasticamente ridotto dal fatto che le registrazioni sono estese su un intervallo temporale adeguatamente ampio.

Un secondo motivo che può portare ad avere un valore di media diverso da zero è la non perfetta orizzontalità degli strumenti, a causa della natura delle superfici e delle condizioni di installazione. Di conseguenza gli strumenti si pongono in un equilibrio statico diverso da zero. Tale valore deve essere perciò eliminato per evitare effetti indesiderati nel calcolo della trasformata di Fourier.

Dal segnale sono poi stati rimossi delle tendenze o componenti a basse frequenze, maggiori del periodo di acquisizione, imputabili ad esempio ad una deriva dello strumento. La tecnica più comune consiste nella sottrazione di una funzione al segnale. Di solito tale funzione è definita da un polinomio di un certo ordine, ricavato dal fitting del segnale stesso.

6.2.1 Tecniche di elaborazione

Le misure sono state eseguite con una forzante incognita di cui si conoscono le fonti (vento, traffico e suono delle campane), ma sono incogniti andamento temporale e l'energia ad esse associate.

Siamo quindi nel caso di un sistema Output-Only, basato su dati relativi solamente alla risposta della struttura. Ciò preclude l'utilizzo di tecniche, anche molto efficienti, basate su FRF (Frequency Response Function).

In questo caso, possono essere usati dei metodi nel dominio del tempo, della frequenza o nel dominio tempo-frequenza. Queste ultime hanno il vantaggio di rimuovere l'ipotesi di stazionarietà del segnale e della risposta del sistema, ma le prime due, seppur ipotizzando un andamento stazionario hanno il vantaggio di essere semplici da applicare e veloci nell'elaborazione. Fattore da non sottovalutare considerando la mole di dati da analizzare. Si è optato per delle tecniche che operano nel dominio della frequenza, denominate Basic Frequency Domain (BFD) e Frequency Domain Decomposition (FDD), entrambe basate sulla trasformata di Fourier ed in particolare sulla trasformata discreta di Fourier implementata tramite l'algoritmo Fast Fourier Transform (FFT).

Nell'individuazione dinamica è stata usata la tecnica FDD, per poi validarne i risultati con la BFD.

6.2.2 Basic Frequency Domain (BFD)

Utilizzata sia per input noti che incogniti. Si basa sulla combinazione delle FFT di vari canali. Si ottengono delle funzioni nel dominio della frequenza in cui si hanno dei picchi di energia in corrispondenza delle frequenze proprie del sistema. È comunque importante distinguere picchi strumentali da picchi strutturali. Questa tecnica ha i seguenti aspetti positivi: semplicità, velocità di utilizzo, facile intuizione della fisica del problema; ma se i modi sono ravvicinati, cioè se i picchi sono ravvicinati, risultano di difficile separazione e, nel caso vi si riesca, sono affetti da pesanti errori.

6.2.3 Frequency Domain Decomposition (FDD)

Utilizzato per sistemi output-only, risulta un'evoluzione dei metodi classici, con gli stessi pro e risolvendone i contro. Consente di individuare cioè anche picchi ravvicinati tra loro nel dominio delle frequenze.

Tramite la tecnica FDD è inoltre possibile ricavare una stima dello smorzamento modale riferito al singolo modo di vibrare. Considerando un singolo grado di libertà della struttura, attraverso l'isolamento del picco di energia relativo, nel dominio della frequenza, si può verificare che le forme modali associate ai punti che formano il picco, non siano troppo differenti rispetto alla forma modale che si sta considerando. Uno strumento per verificare tale grado di affinità è il Modal Assurance Criterion (MAC). Fissando un valore minimo

di MAC si è in grado di ricercare i punti che andranno a costituire il picco nell'autospettro del sistema considerato ad un grado di libertà. Quindi si effettua la trasformata inversa di Fourier per passare dal dominio delle frequenze al dominio del tempo. Si attua poi la tecnica del decremento logaritmico per ottenere una stima del fattore di smorzamento del sistema.

Alcune fonti ritengono che sia molto difficile ricavare un corretto valore del fattore di smorzamento da vibrazioni di origine ambientale, a causa del basso livello di spostamenti. Il calcolo consente comunque di ottenere un'idea dell'ordine di grandezza del parametro.

6.2.4 Identificazione dinamica

Delle sei campagne sono state prese in considerazione le prime due, quelle della mattina, nelle quali si è potuto contare dall'eccitazione della struttura fornita dal vento, poi calato di intensità nelle acquisizioni successive. Il vento, di entità modesta, ha comunque fornito un livello di energia accettabile ai fini delle acquisizioni. Per queste due campagne sono stati creati due segmenti di 500 secondi formati dai primi 5 segmenti di 100 secondi per le due acquisizioni. L'overlapping è imposto essere uguale a zero per ottenere sottosegmenti temporalmente non correlati.

I picchi nel dominio delle frequenze sono stati considerati validi solo se ad essi corrispondono delle forme modali flessionali e torsionali sufficientemente pulite, di senso fisico compiuto.

I picchi trascurati sono essenzialmente picchi strumentali, riconosciuti dal fatto che nel dominio delle frequenze essi sono molto stretti, indice di uno smorzamento modale bassissimo.

6.2.5 Individuazione delle frequenze e delle forme modali dal primo segmento

In è mostrata la FDD Peak analysis del primo segmento temporale. Si possono individuare in modo chiaro diversi picchi in corrispondenza delle seguenti frequenze:

- 0,81Hz: 1° frequenza flessionale.
- 0,95Hz: questo picco viene trascurato in quanto ritenuto di tipo strumentale. Appare infatti essere un picco molto stretto, sintomo di uno smorzamento modale bassissimo, che si stacca da valori nulli con troppa decisione, mentre tutti i picchi. Strutturali tendono a coinvolgere un più. Ampio range di frequenze alla sua base.
- 1,63Hz oppure 1,67Hz: 2° frequenza flessionale.

- 1,74Hz: 1° frequenza torsionale.
- 1,90Hz, multiplo del picco da 0,95Hz, viene considerato strumentale e trascurato.
- 2,03Hz, sembra avere forma modale simile al secondo modo flessionale. È stato scartato a causa degli spostamenti limitati del primo livello di strumenti (Figura 6.3) e di conseguenza a causa di una forma modale non ben definita. Si potrebbe ricondurre questo modo di vibrare alla parte interna della struttura, il cosiddetto cavatappi, che appare abbastanza svincolato ed è collocato nella parte superiore della struttura della cupola.
- 2,65Hz: 3° frequenza flessionale.
- 4,72Hz: 4° frequenza flessionale.

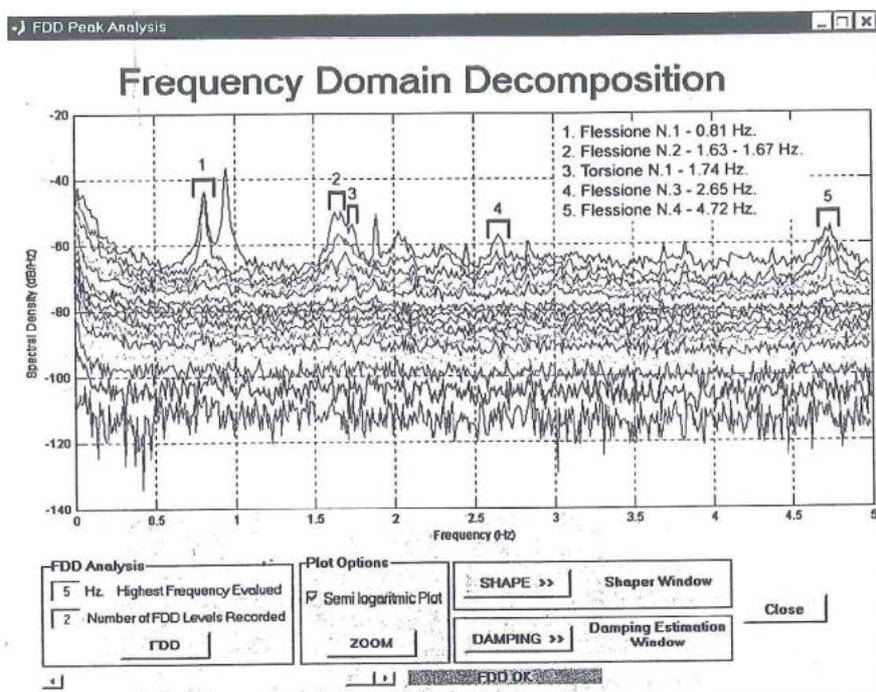


Figura 6.3 Grafico semilogaritmico della FDD del primo segmento

In Figura 6.4 e Figura 6.5 sono mostrate le prime 4 forme flessionali riconosciute come “strutturali”.

Nella forma torsionale visibile in Figura 6.6, lo spostamento della sommità del cupolino è probabilmente dovuto al fatto che in termini di frequenza è molto vicina alla seconda forma modale flessionale e con un contenuto di energia superiore. Non è quindi possibile dissociare completamente i due modi ma si sottolinea comunque l'efficacia di tale metodo nel permettere l'identificazione di forme modali corrispondenti a frequenze molto vicine.

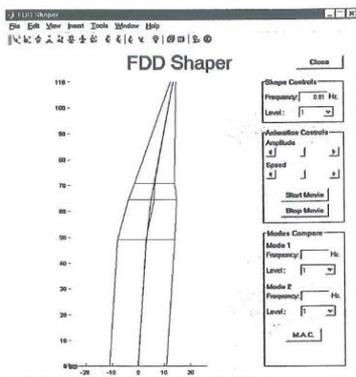


Figura 8-7. Flessione N.1; Vista 2D

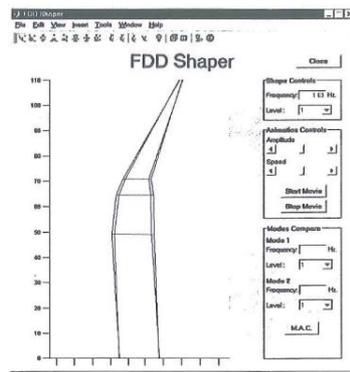


Figura 8-11. Flessione N.2; Vista 2D

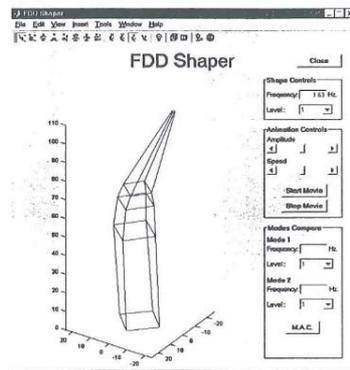
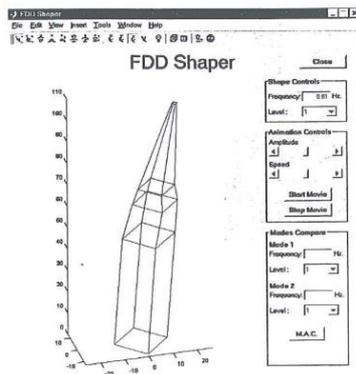


Figura 6.4 Forme modali flessionali ricavate dal primo segmento temporale

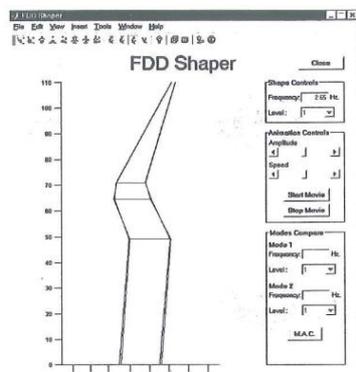


Figura 8-17. Flessione N.3; Vista 2D

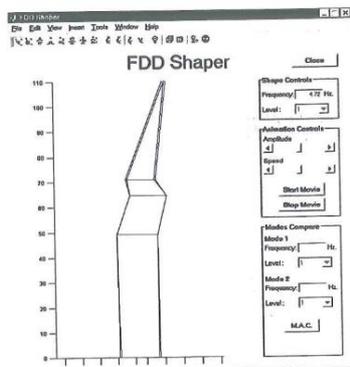


Figura 8-21. Flessione N.4; Vista 2D

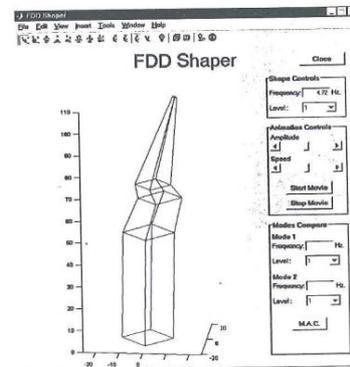
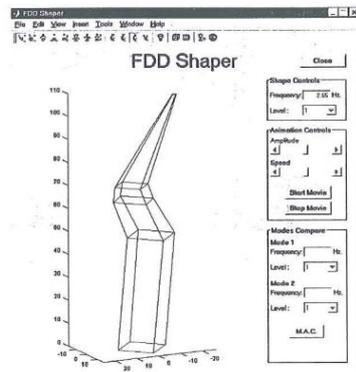


Figura 6.5 Forme modali flessionali ricavate dal primo segmento temporale

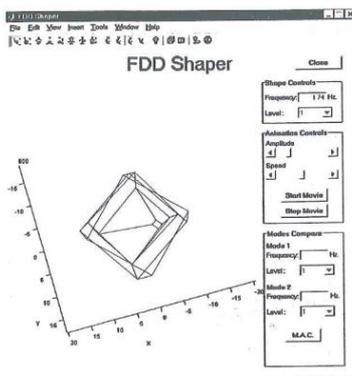


Figura 8-13. Torsione N.1; Vista 2D

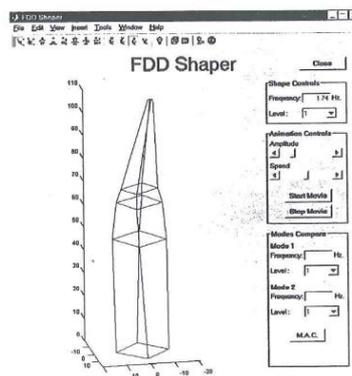


Figura 6.6 Forma torsionale ricavata dal primo segmento temporale

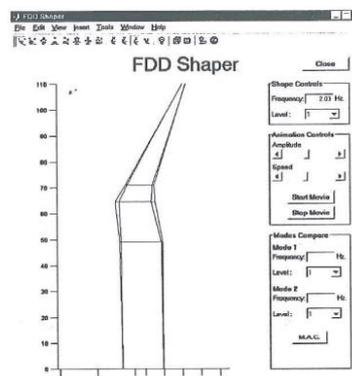


Figura 6.7 Forma modale corrispondente al picco di 2.03 Hz

6.2.6 Individuazioni delle frequenze e delle forme modali dal secondo segmento

Nel secondo segmento considerato, oltre al vento, si è potuto contare sul suono delle campane proveniente dall'attiguo campanile della Basilica. Il campanile è inoltre collegato alla Basilica, che costituisce la struttura di base della cupola. Il movimento delle campane ha quindi indotto delle vibrazioni nel campanile che si sono poi propagate fino alla Cupola attraverso la Basilica. Per questo motivo questa campagna è stata la migliore in termini quantità e qualità delle informazioni ricavate.

Si possono individuare chiaramente in Figura 6.8 alcuni picchi con frequenze in comune con il primo segmento temporale:

- 0.81 Hz: 1° frequenza flessionale.
- 1.63 oppure 1.69 Hz: 2° frequenza flessionale.
- 1.74 Hz: 1° frequenza torsionale (picco di entità molto modesta) parzialmente coperto dai due precedenti.
- 2.03 oppure 2.10 Hz, possibile frequenza del cavatappi.
- 2.31 Hz: modo non riconoscibile con moto rotatorio del cupolino, viene scartato.
- 2.65 Hz: 3° frequenza flessionale.
- 3.83 Hz: seconda frequenza torsionale.
- 4.72 Hz: 4° modo flessionale

In Figura 6.9 e Figura 6.10 sono mostrate le prime quattro forme flessionali riconosciute come “strutturali”, in Figura 6.11 le prime due torsionali.

La seconda forma modale torsionale non era stata individuata dall'analisi del primo segmento, probabilmente a causa della scarsa eccitazione ambientale dovuta al vento.

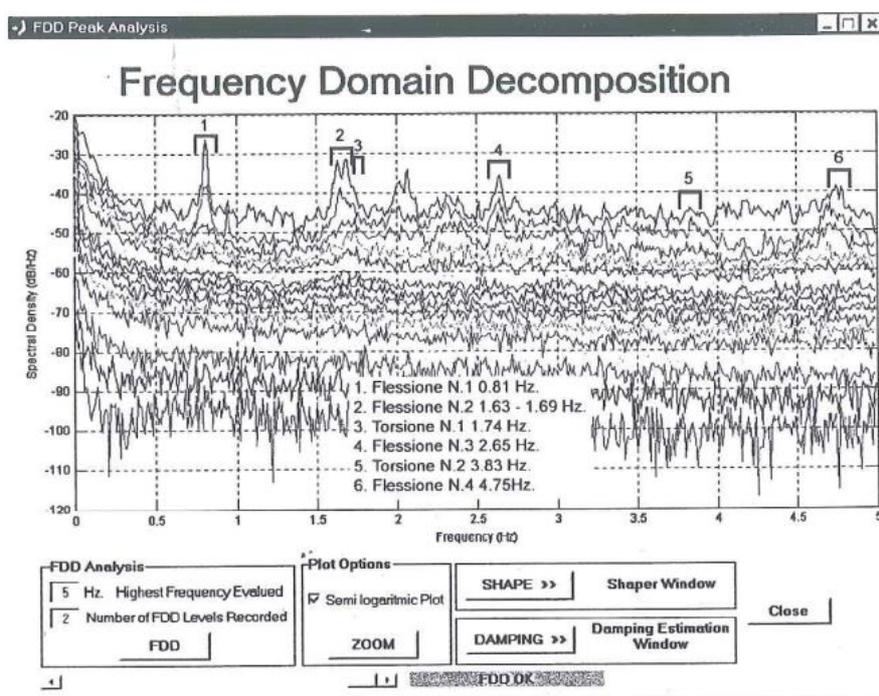


Figura 6.8 - Grafico semilogaritmico della FDD del secondo segmento

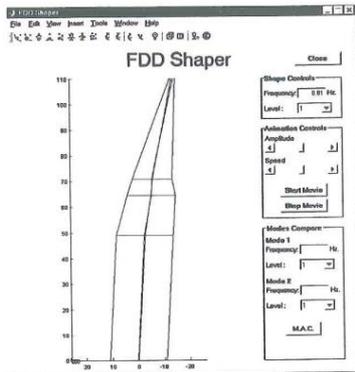


Figura 8-32. Flessione N.1; Vista 2D

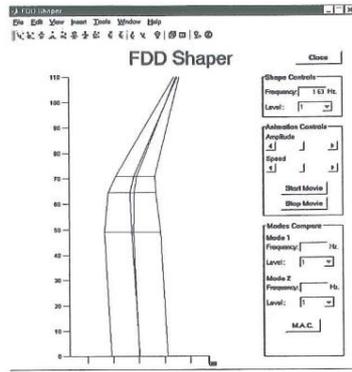


Figura 8-37. Flessione N.2; Vista 2D

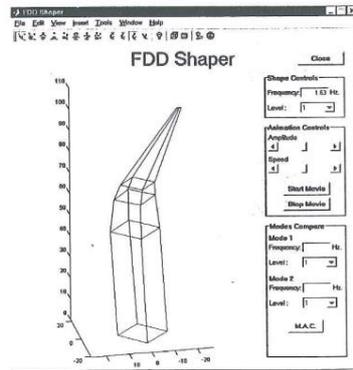
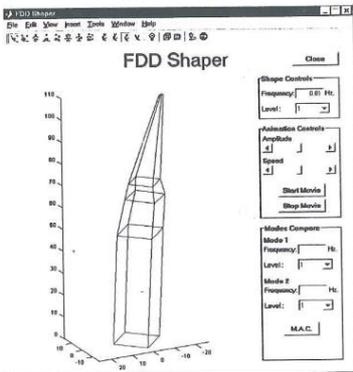


Figura 6.9 Forme modali flessionali ricavate dal secondo segmento temporale

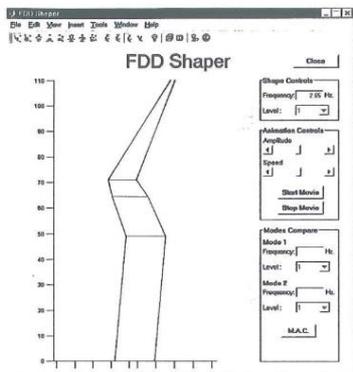


Figura 8-45. Flessione N.3; Vista 2D

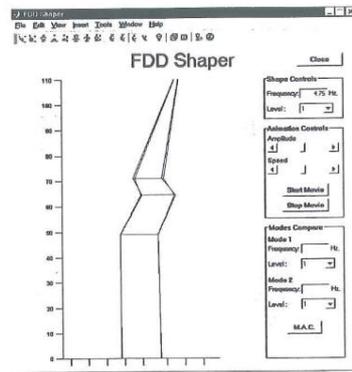


Figura 8-55. Flessione N.4; Vista 2D

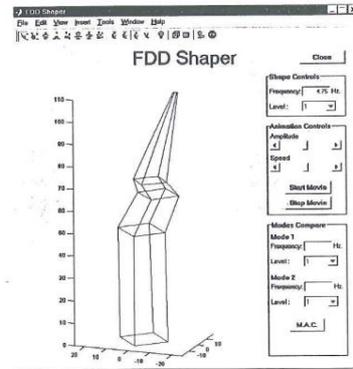
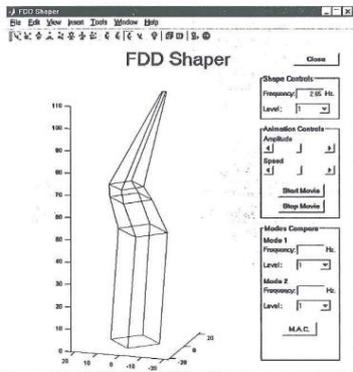


Figura 6.10 Forme modali flessionali ricavate dal secondo segmento temporale

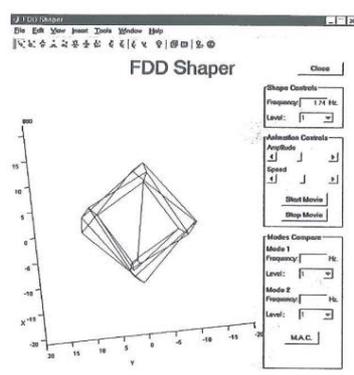


Figura 8-39. Torsione N.1; Vista 2D

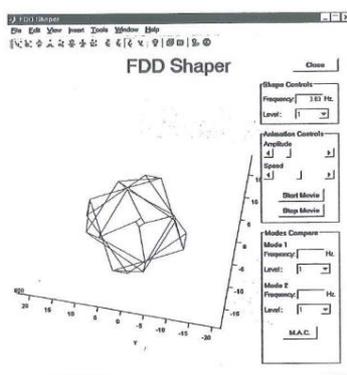


Figura 8-50. Torsione N.2; Vista 2D

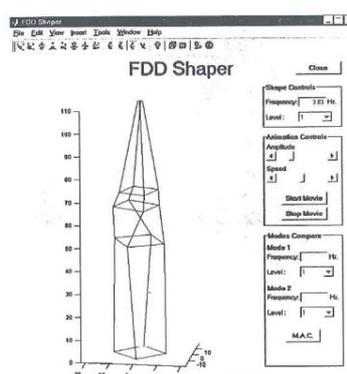
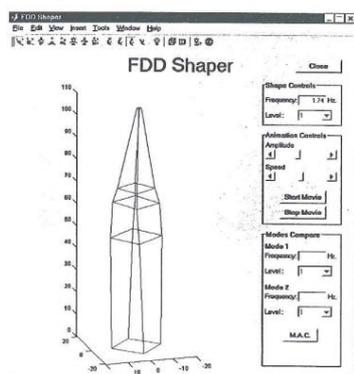


Figura 6.11 Forme torsionali ricavate dal secondo segmento temporale

6.3 Individuazione dinamica (Tesi Filippi A.A 2001/2002)

La campagna di acquisizione del 2000 ha permesso di ottenere una serie di campioni che hanno fornito un'ampia base di studio e di ricerche. Sono stati inseriti 16 accelerometri in direzione orizzontale e tangenti al perimetro. La registrazione del segnale è stata effettuata in assenza di output imposto, cioè acquisendo le vibrazioni ambientali della struttura, sottoposta cioè alle normali, ma incognite, condizioni di esercizio, quali ad esempio il vento e le sollecitazioni del traffico.

I dati ottenuti con la strumentazione sono stati analizzati usando diverse tecniche dall'università di Trento e di Torino allo scopo di ricavare il modello modale della struttura:

- La tecnica Frequency Domain Decomposition (FDD) da parte dell'Università di Trento
- Il metodo Eigensystem Realisation Algorithm (ERA) da parte dell'Università di Torino
- L'approccio Time-Frequency (TF) basato sull'analisi della deviazione standard degli stimatori della differenza di fase (Torino)

Le forme modali e le relative frequenze sono state individuate anche utilizzando un modello agli elementi finiti, attraverso il quale si sono ottenute le prime frequenze fondamentali,

ottenendo 2 modi per ogni frequenza, relativi ad oscillazioni perpendicolari tra di loro, riportate in Tabella 4.

Tabella 6.1 Risultati analisi dei dati

<i>Analisi forme modali</i>	<i>Frequenze [Hz]</i>			
	FEM	ERA	FDD	TFD
1° Flessionale	0.82	0.75	0.79	0.79
	0.82	-	0.81	0.82
2° Flessionale	1.45	1.7	1.63	1.62
	1.45	-	1.67	1.68
1° Torsionale	1.64	-	1.73	1.74
3° Flessionale	2.64	2.42	2.63	-
	2.64	-	-	-
2° Torsionale	2.99	-	-	-
4° Flessionale	-	-	4.72	-

Il metodo TFD fornisce informazioni sul reale disaccoppiamento nelle prime tre frequenze, cosa che invece non accade con il metodo ERA. Il modello FDD fornisce un unico valore nella prima frequenza, mentre per la seconda e la terza sono ottimamente disaccoppiate.

Il disaccoppiamento della prima forma modale flessionale è stato possibile grazie ad una rielaborazione dei dati che ha fornito due frequenze pari a 0.79 Hz e 0.81 Hz relative a movimenti in due direzioni ortogonali.

Il modello agli elementi finiti è stato calibrato con i risultati della campagna di prove soniche sui materiali ed ha permesso di ottenere le forme modali analitiche e le relative frequenze.

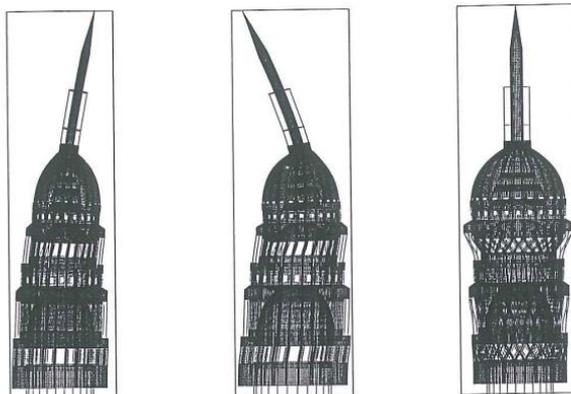


Fig. 7.3 I° Forma Flex

Fig. 7.4 II° Forma Flex

Fig. 7.5 I° Forma Torsionale

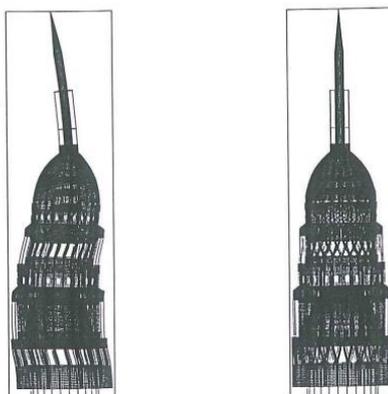


Fig. 7.6 III° Forma Flessionale

Fig. 7.7 II° Forma Torsionale

Figura 6.12 Forme modali ottenute tramite modello F.E.M.

6.4 Risultati di analisi del modello in studio

L'analisi modale del modello completo viene predefinito nel programma SAP2000. In specifico, è stato fissato di analizzare fino ad 20 modi di vibrare con il tipo di modo "Eigen Vectors" come mostrato in Figura 6.13.

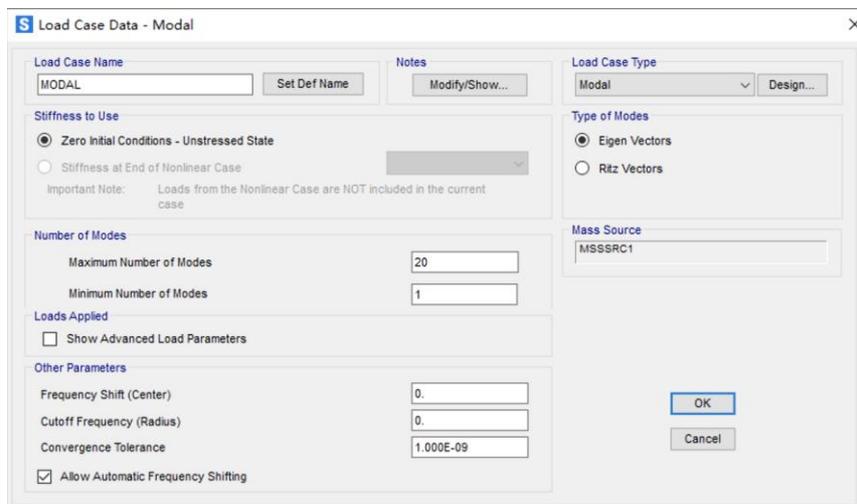


Figura 6.13 Impostazione analisi modale

Tabella 6.2 Risultati periodi, frequenze e massa partecipante

StepNum	Frequency	Period	UX	UY	UZ	RX	RY	RZ
[-]	[Hz]	[Sec]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
1	0.56	1.787	0.7%	41.0%	0.0%	82.0%	1.5%	0.0%
2	0.56	1.775	41.2%	0.7%	0.0%	1.4%	83.0%	0.0%
3	1.04	0.965	0.0%	0.0%	0.0%	0.1%	0.0%	33.5%
4	1.18	0.849	0.1%	8.6%	0.0%	0.5%	0.0%	0.2%
5	1.19	0.843	9.2%	0.1%	0.0%	0.0%	0.3%	0.0%
6	1.70	0.587	0.1%	3.4%	0.0%	0.6%	0.0%	0.0%
7	1.72	0.582	4.3%	0.1%	0.0%	0.0%	0.5%	0.0%
8	2.08	0.480	0.0%	0.1%	0.0%	0.0%	0.0%	2.2%
9	3.05	0.328	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
10	3.05	0.327	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
11	3.21	0.312	0.0%	0.0%	69.9%	0.0%	0.0%	0.0%
12	3.93	0.254	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
13	4.08	0.245	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
14	4.42	0.226	0.1%	1.8%	0.0%	2.1%	0.2%	0.1%
15	4.45	0.225	1.3%	0.1%	0.0%	0.2%	2.6%	0.0%
16	4.68	0.214	0.0%	0.0%	0.0%	0.2%	0.0%	0.1%
17	4.73	0.212	0.0%	0.0%	0.0%	0.1%	0.0%	0.8%
18	4.77	0.210	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.4%
19	5.30	0.189	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
20	5.41	0.185	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.1%	0.0%

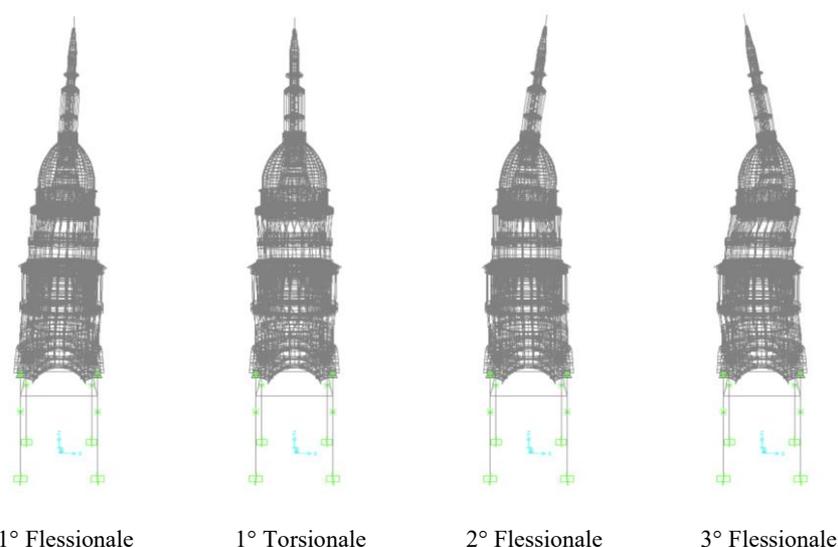
Come mostrato in Tabella 6.2, i risultati ottenuti sono: la frequenza, il periodo e la massa partecipante associati ai 20 modi di vibrare come predefinito iniziale. Inoltre, la massa partecipante è suddivisa in tre direzioni di spostamento e in tre direzioni di rotazione.

Trascurando i valori nulli in risultati di analisi, le frequenze vengono così riportate in Tabella 6.3.

Tabella 6.3 Risultati di Analisi modali

	Frequenza [Hz]	Massa Partecipante					
		Spost. X	Spost. Y	Spost. Z	Rot.X	Rot.Y	Rot.Z
1 Flessionale	0.56	0.7%	41.0%	0.0%	82.0%	1.5%	0.0%
	0.56	41.2%	0.7%	0.0%	1.4%	83.0%	0.0%
1 Torsionale	1.04	0.0%	0.0%	0.0%	0.1%	0.0%	33.5%
2 Flessionale	1.18	0.1%	8.6%	0.0%	0.5%	0.0%	0.2%
	1.19	9.2%	0.1%	0.0%	0.0%	0.3%	0.0%
3 Flessionale	1.70	0.1%	3.4%	0.0%	0.6%	0.0%	0.0%
	1.72	4.3%	0.1%	0.0%	0.0%	0.5%	0.0%
2 Torsionale	2.08	0.0%	0.1%	0.0%	0.0%	0.0%	2.2%
1 Verticale	3.21	0.0%	0.0%	69.9%	0.0%	0.0%	0.0%
4 Flessionale	4.42	0.1%	1.8%	0.0%	2.1%	0.2%	0.1%
	4.45	1.3%	0.1%	0.0%	0.2%	2.6%	0.0%

Inoltre, le forme modali sono riportati in seguenti:



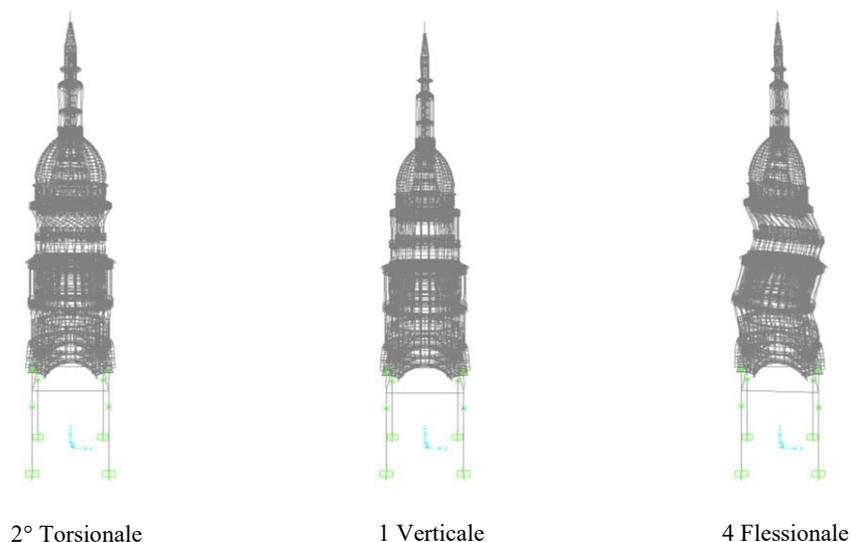


Figura 6.14 Forme modali

Avendo ottenuto i risultati delle frequenze di modello fatto in SAP2000, viene riportato un confronto delle frequenze con i risultati di Moravi e i risultati di Filippi. Pertanto, in seguente Tabella 6.4 è riportato tale confronto delle frequenze:

Tabella 6.4 Confronto delle Frequenze della Cupola S. Gaudenzio

	Questa Tesi	Tesi Filippi				Tesi Moravi	
	Frequenze	Frequenze [Hz]				Frequenze [Hz]	
	[Hz]	FEM	ERA	FDD	TFD	I segmento	II segmento
1 Flessionale	0.56	0.82 0.82	0.75	0.79 0.82	0.79 0.82	0.81	0.81
1 Torsionale	1.04	1.64	-	1.73	1.74	1.74	1.74
2 Flessionale	1.18	1.45 1.45	1.70	1.63 1.67	1.62 1.68	1.63	1.63
3 Flessionale	1.70	2.64 2.64	2.42	2.63	-	2.65	2.65
2 Torsionale	2.08	2.99	-	-	-	-	3.83
1 Verticale	3.21	-	-	-	-	-	-
4 Flessionale	4.42	-	-	4.72	-	4.72	4.72

Capitolo 7. Conclusione

Il modello strutturale è stato creato partendo da un modello bidimensionale (sezione verticale) per ottenere per rotazione il modello tridimensionale. Gli elementi strutturali del modello tridimensionale sono stati assegnati seguendo le diverse configurazioni di ogni componente strutturale. Nello specifico, i pilastri sono stati modellati con gli elementi “frame”, mentre gli elementi “shell” rappresentano gli elementi piani, come le cupole o le volte. In particolare, i pilastri interni del Primo Peristilio e del Secondo Peristilio avendo delle sezioni non uniformi in altezza, sono stati modellati tramite gli elementi “shell”.

Il confronto tra le frequenze ottenute dal modello confrontando e quelle registrate con gli accelerometri in sito (risultati di Moravi) è riportato in Tabella 7.1. I risultati ottenuti in questa tesi differiscono da quelli precedenti. La differenza delle frequenze rispetto a Moravi e di Filippi è probabilmente dovuta a una maggiore massa del modello FEM eseguito in SAP2000 a causa della sovrapposizione degli elementi finiti nodi strutturali. In futuro, per ridurre la massa assegnata bisognerebbe effettuare in seguente passi:

1. Indagare le caratteristiche dei campioni strutturali reali in laboratorio.
2. Indagare le caratteristiche dei campioni strutturali reali in sito tramite gli strumenti onde soniche.
3. Studiare la percentuale della sovrapposizione degli elementi in modello.

Tabella 7.1 Confronto delle Frequenze della Cupola S. Gaudenzio

	Questa Tesi	Tesi Filippi				Tesi Moravi	
	Frequenze [Hz]	Frequenze [Hz]				Frequenze [Hz]	
		FEM	ERA	FDD	TFD	I segmento	II segmento
1 Flessionale	0.56	0.82	0.75	0.79	0.79	0.81	0.81
		0.82		0.82	0.82		
1 Torsionale	1.04	1.64	-	1.73	1.74	1.74	1.74
2 Flessionale	1.18	1.45	1.70	1.63	1.62	1.63	1.63
		1.45		1.67	1.68		
3 Flessionale	1.70	2.64	2.42	2.63	-	2.65	2.65
		2.64		-	-		
2 Torsionale	2.08	2.99	-	-	-	-	3.83
1 Verticale	3.21	-	-	-	-	-	-
4 Flessionale	4.42	-	-	4.72	-	4.72	4.72

Nonostante la probabile differenza di massa, il modello risulta corretto macroscopicamente, in ragione del confronto tra le forme modali numeriche (SAP2000) e i risultati della registrazione in sito siano corrisposti in modo ragionevole.

La valutazione della reale rigidezza delle murature contribuirebbe inoltre a migliorare l'accuratezza dei risultati ottenuti.

In ogni caso, le sollecitazioni ottenute dai risultati di SAP2000 in ogni elemento sono ammissibili con la resistenza delle murature calcolabile secondo la NTC2018. Soltanto in alcuni spigoli si osservano concentrazioni di sforzo dovute alla geometria del mesh e imputabili alla sola approssimazione numerica e non ad un reale stato di sollecitazione.

Bibliografia

- [1.] *La Cupola della Basilica di S. Gaudenzio in Novara. Analisi storica e strutturale*, Tesi Matteo Mottironi, A.A. 1997/1998, Prof. Ing. Paolo Zanon, Dott. Ing. Oreste Bursi, Università degli studi di Trento.
- [2.] *Tecniche di identificazione dinamica di strutture Monumentali. Applicazione della Cupola della Basilica di San Gaudenzio in Novara*, Tesi Stefano Moravi, A.A. 2000/200, Prof. Ing. Paolo Zanon, Ing. Silvano Erlicher, Università degli studi di Trento.
- [3.] *Valutazione dell'efficienza di tecniche di identificazione modale tramite analisi numerico-sperimentale*, Tesi Loris Filippi, A.A. 2001/2002, Prof. Paolo Zanon, Dott. Ing. Oreste Bursi, Università degli studi di Trento.
- [4.] *Per S. Gaudenzio*, Arialdo Daverio, Edizione aggiornata dell'opera "La cupola di S. Gaudenzio" (1940).
- [5.] *CSI Analysis Reference Manual (manual di SAP2000) :*
<https://docs.csiamerica.com/manuals/sap2000/CSiRefer.pdf>
- [6.] *Basilica di S. Gaudenzio "Intervento e conservativo esterno di cupola"*, Rilievo di Ing. Perazzo, 1986, comune in Novara.
- [7.] *Basilica di San Gaudenzio "Diagnosi relativa alle condizioni statiche, Progetto del sistema di monitoraggio"*, Rilievo di Ing. Giampiero Germanino, 1997, Comune in Novara.
- [8.] *Cupola di San Gaudenzio, Servizio di rilievo topografico fotogrammetrico e con laser scanner*, Rilievo con drone e laser scanner, Impresa Rossi Luigi s.r.l Firenze.