

Ingegneria al servizio del monitoraggio conservativo nei Campi Flegrei

Castello di Baia, 21 febbraio 2025

Vulnerabilità sismica di beni archeologici

Luciano Rosati

*Dipartimento di Strutture per l'Ingegneria e l'Architettura (DiSt)
Centro Interdipartimentale di Ingegneria per i Beni Culturali (CIBeC)
Università degli Studi di Napoli Federico II*

Rischio sismico

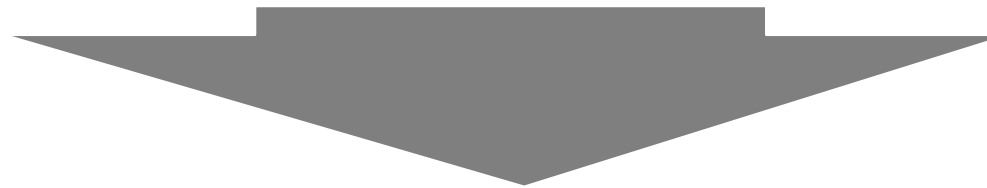
Stima delle perdite attese a seguito del verificarsi di un terremoto in una data area in un prefissato periodo di tempo

Rischio sismico

Stima delle perdite attese a seguito del verificarsi di un terremoto in una data area in un prefissato periodo di tempo

- danno economico al patrimonio edilizio
- numero persone coinvolte (vittime, feriti, senzatetto)
- perdite indirette in termini economici e sociali (interruzione di attività, **perdite al patrimonio culturale**, effetti indotti psicologici e sociali).

pericolosità x vulnerabilità x esposizione



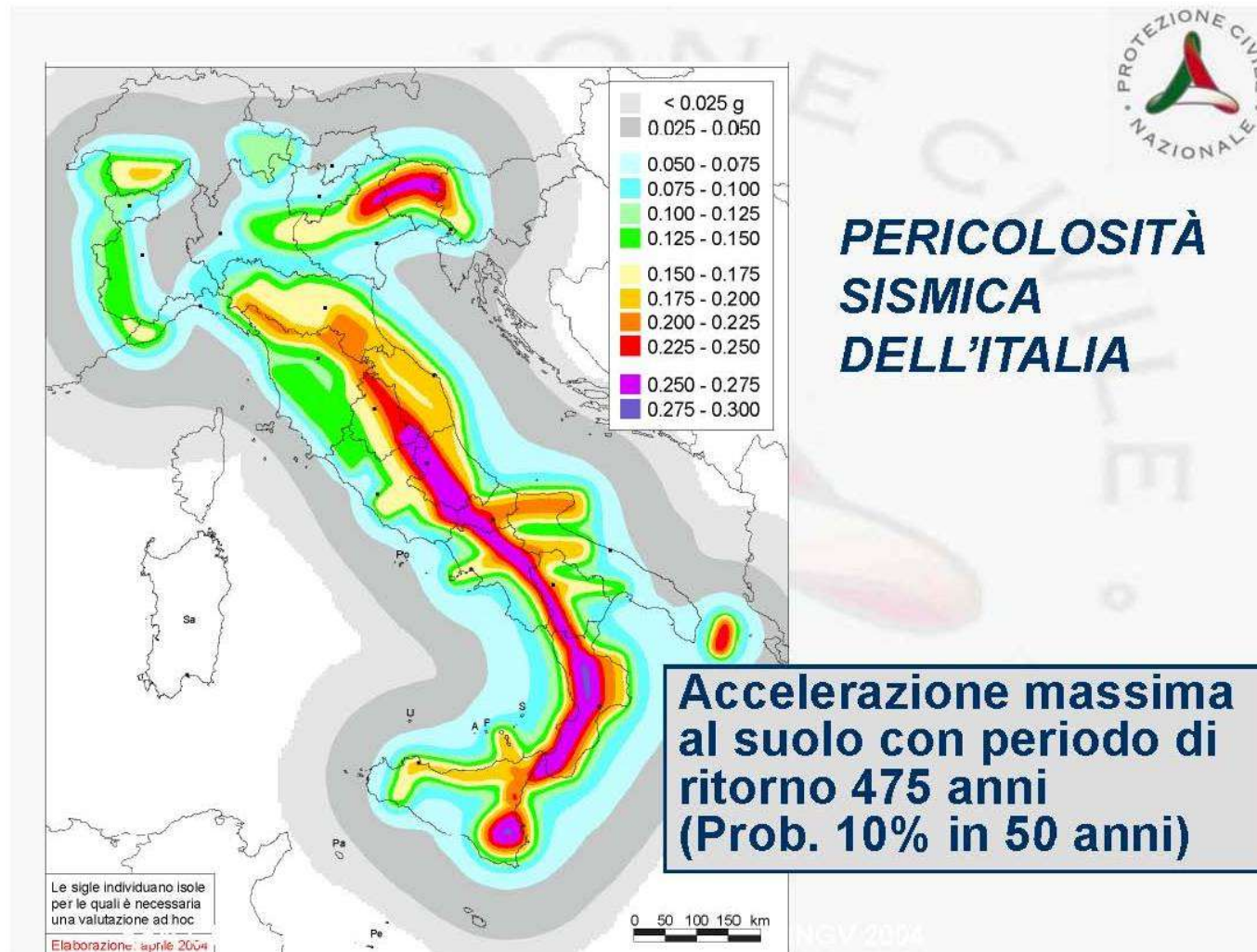
rischio sismico

Pericolosità sismica

Probabilità di superamento di una soglia stabilita di intensità in una determinata area ed in un determinato intervallo di tempo.

Caratteristica fisica del territorio

Quanto maggiore è la frequenza ed intensità degli eventi che caratterizzano un'area geografica, tanto maggiore è la sua pericolosità.



Vulnerabilità sismica

propensione a subire danni
in occasione di una scossa
sismica

edificio singolo

sistema urbano

sistema infrastrutturale

patrimonio culturale

BENI ARCHEOLOGICI

Metodi di valutazione della vulnerabilità

METODI STATISTICI

analisi statistiche di grandi campioni di costruzioni soggetti a sisma.

METODI MECCANICI

modelli meccanici di valutazione dei parametri che governano il comportamento sismico delle costruzioni (spostamenti, duttilità, etc.).

METODI BASATI SUL GIUDIZIO DI ESPERTI

valutazioni qualitative e quantitative di fattori che governano la risposta sismica e relative elaborazioni basate sulla conoscenza di esperti.

... nel seguito faremo un rapido cenno ad **ALCUNI METODI MECCANICI** senza pretesa di essere esaustivi

Esposizione

quantità e qualità degli elementi esposti a rischio:

- numero degli edifici presenti
- numero di persone coinvolte e loro capacità di reazione
- quantità e funzioni del sistema produttivo
- quantità e funzioni del patrimonio edilizio pubblico - edifici strategici
- quantità e funzioni delle infrastrutture
- **quantità e qualità dei beni culturali presenti**

Il concetto di archeologia e la sua evoluzione

In Italia, l'archeologia è tradizionalmente associata allo studio dei resti materiali dall'antichità fino al Medioevo, mentre in Francia riguarda tutta la storia dell'arte e si estende anche all'età moderna.

In generale, la definizione classica di archeologia permane in maniera più imperativa nell'Italia meridionale ed insulare, estendendosi alla Grecia ed al bacino mediorientale.

Viceversa, nel centro nord d'Italia e in Europa prevale la visione più ampia del termine (D'Agostino, 2014)

Il concetto di archeologia e la sua evoluzione



Questa differenza di approccio ha un impatto diretto sulla gestione del patrimonio archeologico: nell'accezione classica di archeologia ricadono i ruderi archeologici, sotto tutela dello Stato ed a fruibilità limitata.

Nel secondo caso, invece, ricade una rilevante parte degli edifici religiosi, torri, castelli e perfino abitazioni.

Torri a San Gimignano



Tempio di Segesta

In questa presentazione si analizza la problematica del rischio sismico nei siti archeologici italiani, mettendo in evidenza come l'applicazione delle normative edilizie moderne a contesti archeologici possa risultare inappropriata.

Il tema sarà affrontato attraverso alcuni casi studio significativi, con un'attenzione particolare alla necessità di un equilibrio tra sicurezza e conservazione

Il rischio sismico nei siti archeologici



Edilizia pompeiana

La vulnerabilità delle strutture archeologiche varia a seconda della loro altezza e configurazione. Tuttavia, la maggior parte delle rovine non supera generalmente i quattro metri di altezza, riducendo il rischio di danni diretti ai visitatori.

Il rischio sismico nei siti archeologici



Paestum, Tempio di Athena

Diverso è il caso di complessi monumentali come i templi di Paestum e Agrigento, dove sono necessarie strategie di protezione più specifiche, ad esempio la creazione di barriere di sicurezza per limitare l'accesso alle aree più vulnerabili.

Il rischio sismico nei siti archeologici



Restano alcuni casi particolari che devono essere riguardati a parte; i più emblematici sono Pompei, Ercolano, Stabia

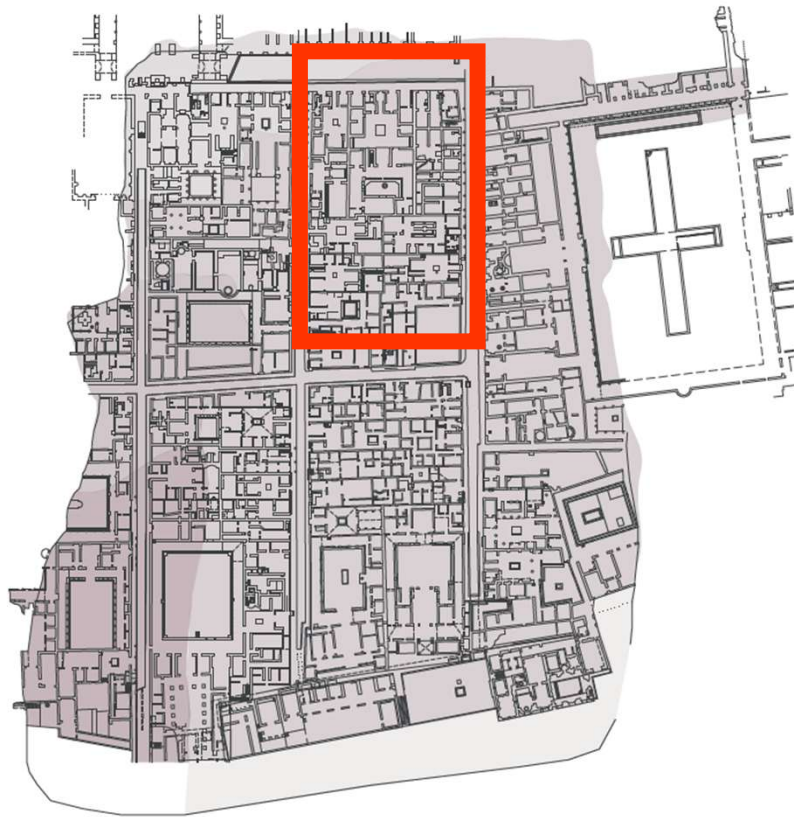
Il caso studio di Ercolano



Progetto MuRa – Multi-risk assessment and structural protection of archaeological vestiges in volcanic scenarios

Accordo CiBeC - PAERCO

Il caso studio di Ercolano



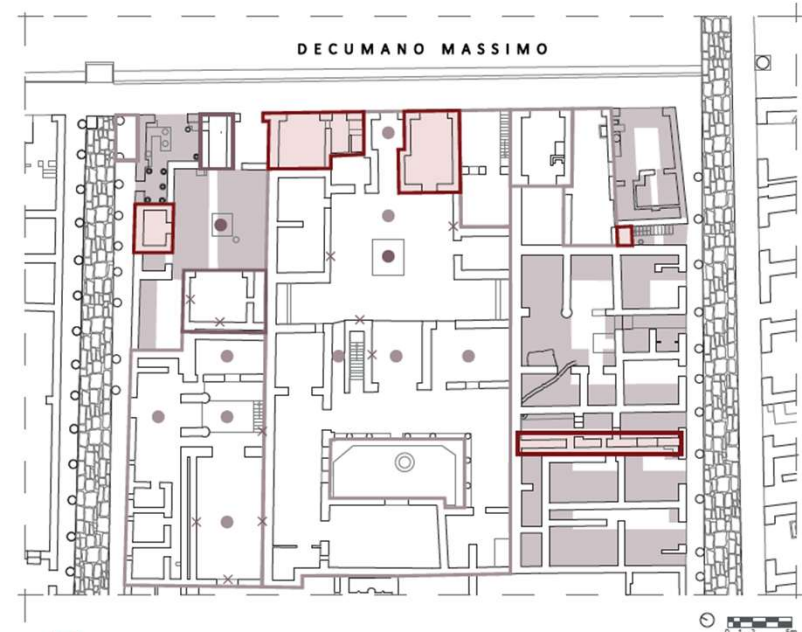
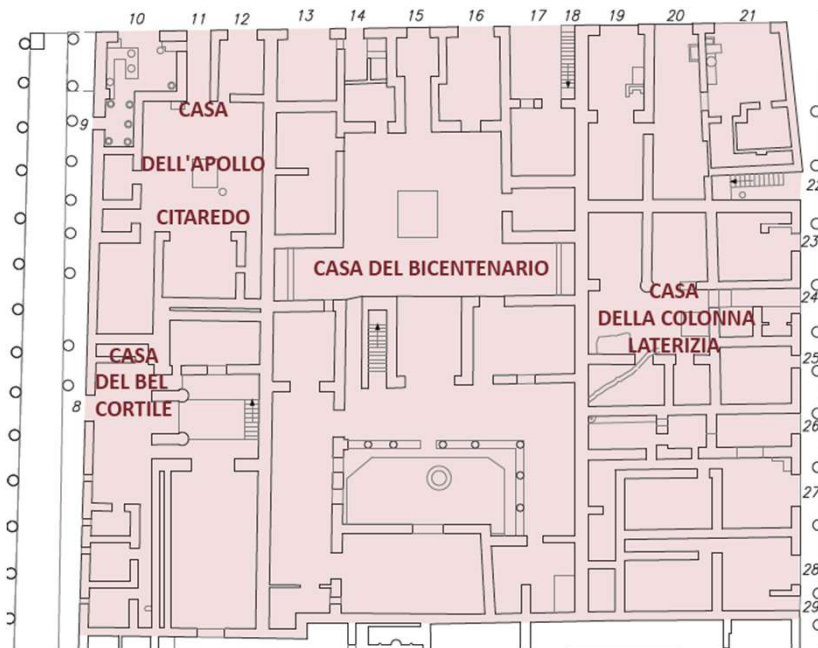
Tesi Arch. F. Marrazzo

Le attività di ricerca si concentrano sull'Insula V del parco archeologico di Ercolano,

Hanno incluso analisi storiche e documentali preliminari,

Le attività si orientano al risk-assessment di vestigia archeologiche in area vulcanica al fine di migliorare la protezione del bene e la fruizione da parte del pubblico.

Il caso studio di Ercolano



- dissesto in atto
- potenziale crollo di solaio
- costruzioni su più livelli- potenziale crollo di solaio
- possibile ribaltamento muri e caduta calcinacci
- impluvium marmoreo
- pavimentazione a mosaico
- × affreschi

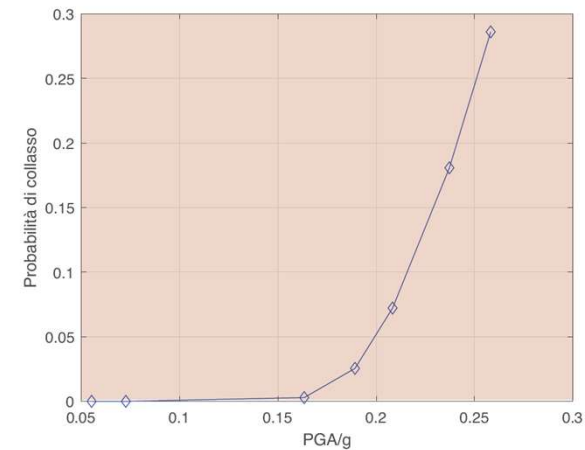
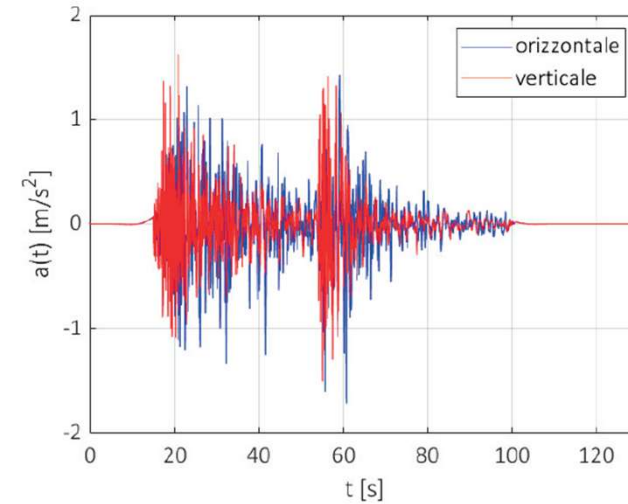
Tesi Arch. F. Marrazzo

Il caso studio di Ercolano



Verifica a ribaltamento di un muro puntellato: calcolo della curva di vulnerabilità.

Tesi Arch. F. Marrazzo



Le normative sismiche e il dibattito sulla loro applicazione

Dopo il terremoto dell'Irpinia del 1980, il tema del rischio sismico nei siti archeologici è stato oggetto di numerosi dibattiti.

In occasione del Convegno Nazionale di Ingegneria Sismica del 1998, i proff. Corsanego e D'Agostino proposero di escludere formalmente le rovine archeologiche dalle normative edilizie vigenti, riconoscendone la loro peculiarità strutturale.

Tuttavia, la proposta non fu accolta e ancora oggi non esistono regolamenti specifici per il patrimonio archeologico. Cosicché, negli ultimi anni, alcune circolari ministeriali hanno esteso l'applicazione delle normative antisismiche ai siti archeologici.

L'assenza di linee guida specifiche ha portato a una serie di interventi spesso inadeguati e potenzialmente dannosi per la conservazione dei reperti e dei siti archeologici.

Le normative sismiche e il dibattito sulla loro applicazione



Roma, veduta di Palazzo Senatorio e del Tabularium

Come è noto, le norme sismiche sono state concepite per edifici moderni e monumentali, mentre i ruderi archeologici presentano caratteristiche differenti, sia in termini di fruizione pubblica che di esigenze di conservazione. È dunque necessario adottare un approccio culturale e tecnico più mirato, che garantisca la sicurezza dei visitatori senza compromettere il valore storico e materiale delle strutture antiche

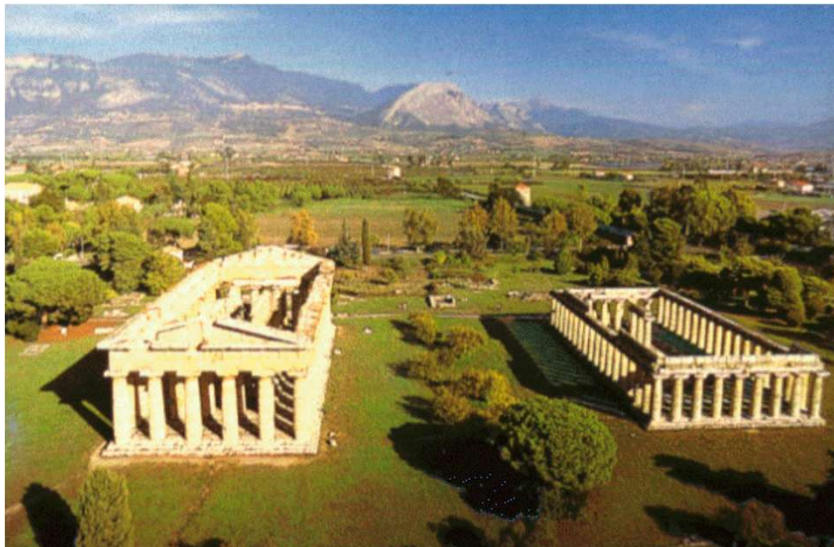
Conservazione e nuove tecnologie nei siti archeologici

Nel corso del XX secolo, la concezione costruttiva antica, basata essenzialmente sulle regole dell'arte, è stata soppiantata dall'applicazione dei principi fisico-matematici propri della Scienza delle Costruzioni. Questa nuova visione è andata di pari passo con la progressiva sostituzione dei materiali tradizionali con cemento armato e acciaio.

Questo approccio, basato su principi ingegneristici moderni, ha spesso ignorato le peculiarità costruttive dei monumenti antichi, compromettendone la conservazione a lungo termine.

Fortunatamente, da parte della più attenta cultura della conservazione, è stata sottolineata la necessità di seguire il criterio del miglioramento nella conservazione dei siti archeologici, privilegiando interventi che rispettassero la storia materiale dei manufatti, evitando interventi invasivi, e privilegiassero tecniche di miglioramento statico non distruttive.

Il restauro dei templi di Paestum



Paestum, cd. Basilica (a sin.) e il Tempio di Nettuno (a dx.)

Esemplare in tal senso è stato il restauro, tra il 1989 e il 2003, dei tre templi di Paestum, uno dei più importanti restauri archeologici in Italia.

Questo intervento, basato su studi approfonditi, ha dimostrato che le strutture antiche, se ben conservate, possono essere altamente resilienti ai terremoti.

La scelta di evitare il consolidamento con materiali moderni e di adottare tecniche di miglioramento statico ha permesso di mantenere intatta l'integrità dei monumenti, dimostrando la loro bassa vulnerabilità sismica

Il caso della Villa dei Quintili a Roma



Via Appia Antica, la Villa dei Quintili

Anche nel restauro della Villa dei Quintili, sull'Appia antica, a Roma, si sono presentati problemi con riferimento alla valutazione del rischio sismico.

Nell'area archeologica sono presenti complessi architettonici dalle grandiose volumetrie, con murature che svettano oltre i dieci metri di altezza.

In un caso particolare, la parete muraria del cosiddetto tepidarium si presentava ben collegata da un lato alla muratura a questa ortogonale, dall'altro risultava libera per il crollo di una parete ortogonale di chiusura.

Il caso della Villa dei Quintili a Roma



Via Appia Antica, la Villa dei Quintili

In questo caso, l'effetto di un sisma potrebbe chiaramente avere nefasti effetti. A ciò si è provveduto sia mediante il ripristino dell'antica efficienza statica della parete, sia realizzando un percorso pedonale intorno al monumento che salvaguardasse i visitatori in caso di crollo

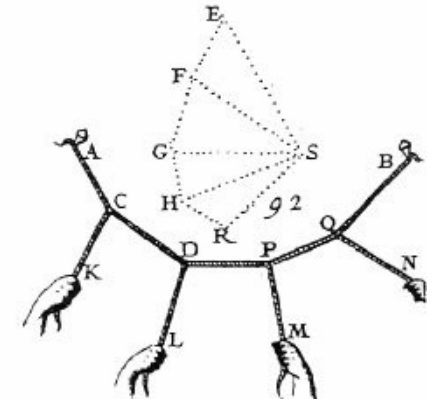
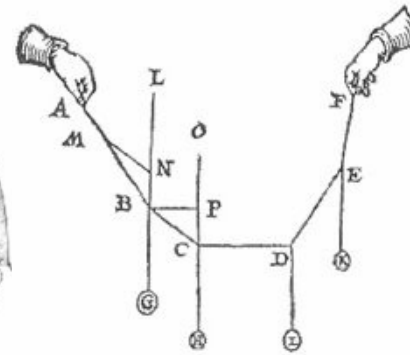
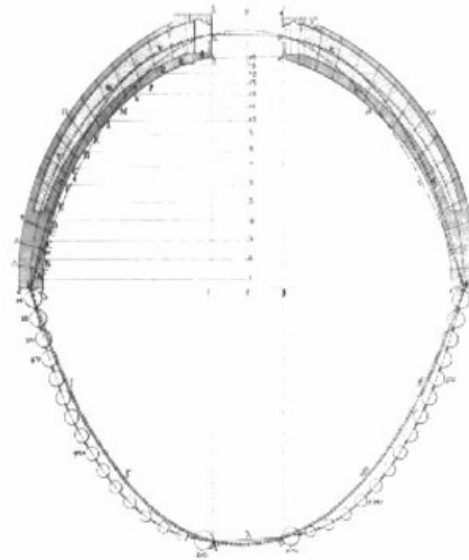
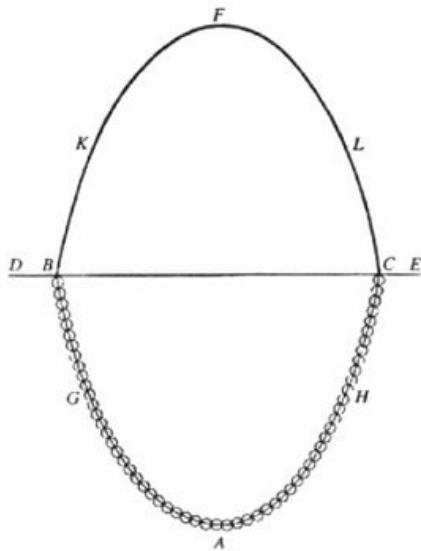
Capo Colonna, il tempio di Hera Lacinia



Era già stata proposta l'imperniatura della colonna ma, con una forte azione vuoi di analisi vuoi di convincimento delle Autorità preposte, si è riusciti a non procedere ad alcun intervento invasivo, a restaurare la sola superficie del fusto, a stabilizzare i giunti tra i rocchi ed infine a suggerire di recintare la colonna e la sua parte basamentale in modo da prevenire ed eliminare i molti atti di vandalismo cui era soggetta e nel contempo salvaguardare i visitatori da un eventuale quanto improbabile crollo.

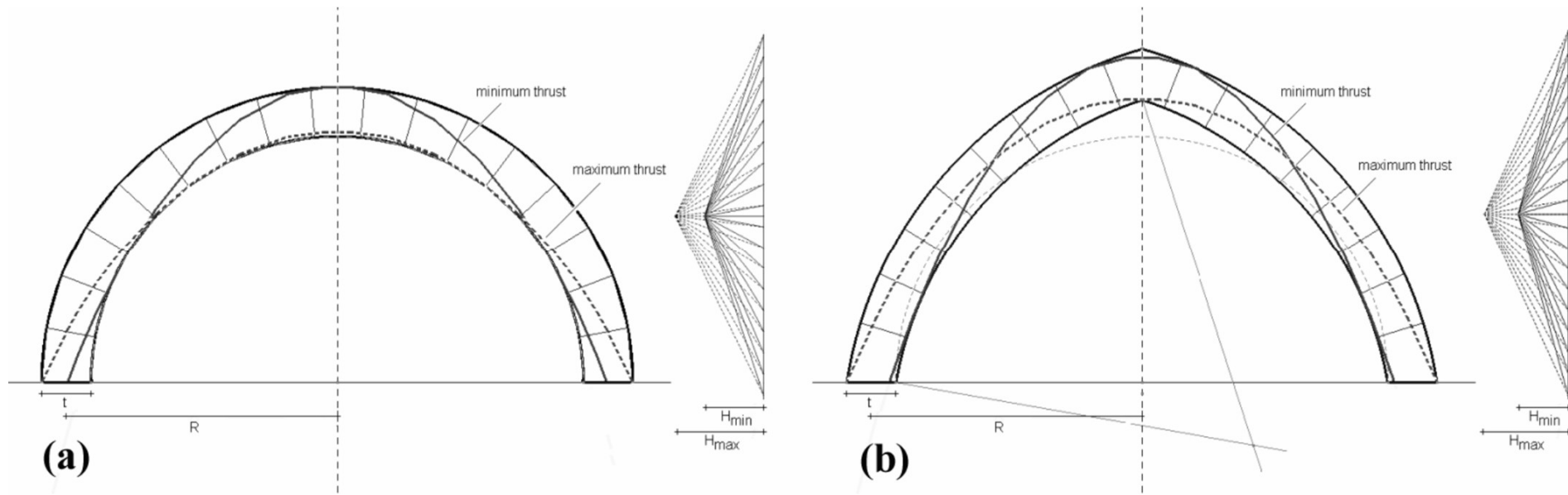
Crotone, Capo Colonna, tempio di Hera Lacinia

Analisi delle reti di spinta



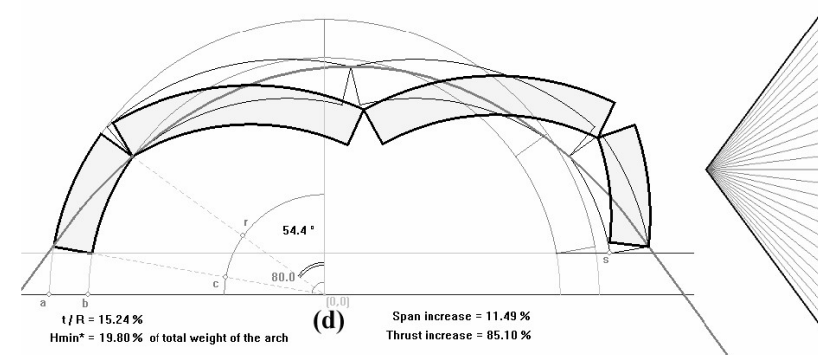
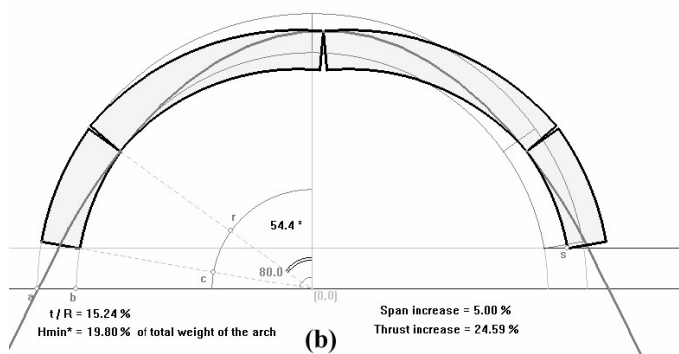
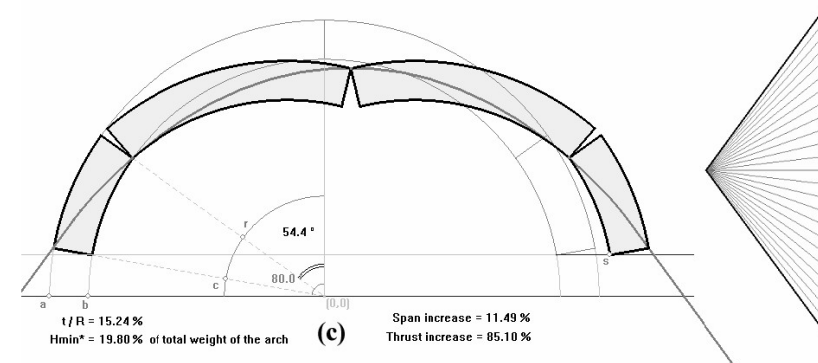
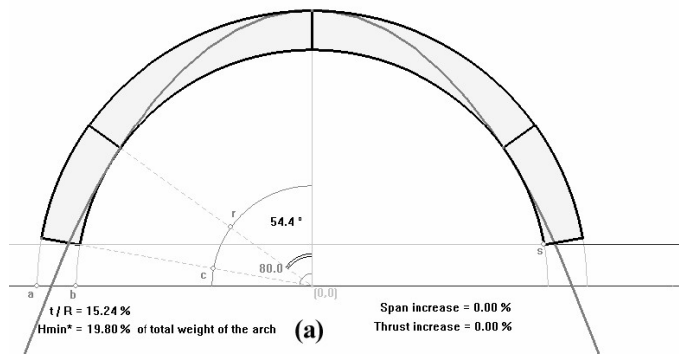
Block et al. (2006)

Analisi delle reti di spinta



Block et al. (2006)

Analisi delle reti di spinta



Block et al. (2006)

Analisi della linea di spinta di archi rinforzati e non rinforzati

Rinforzo con materiali compositi

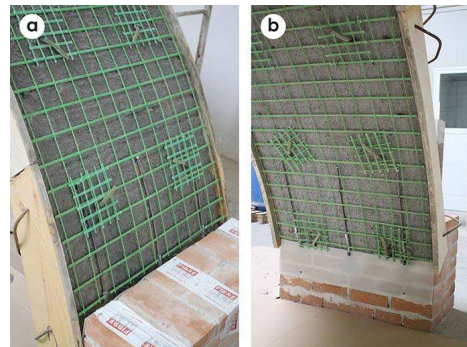
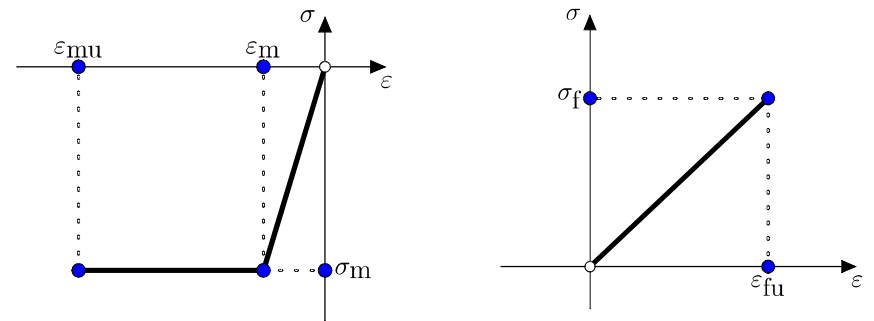
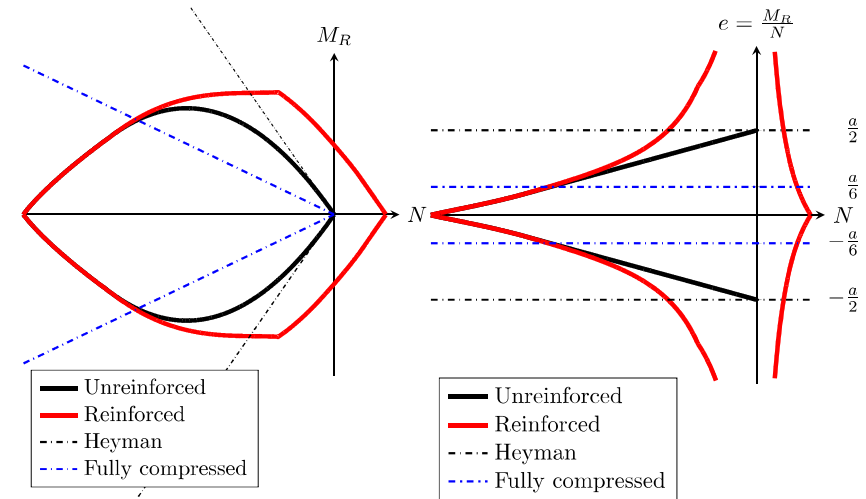
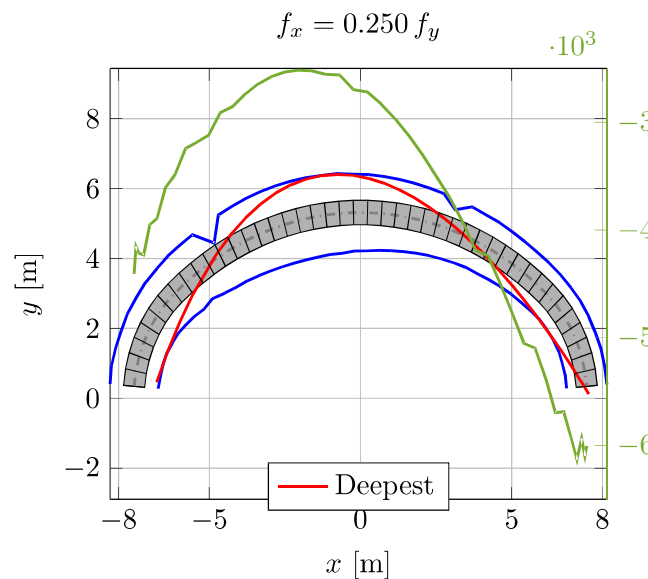
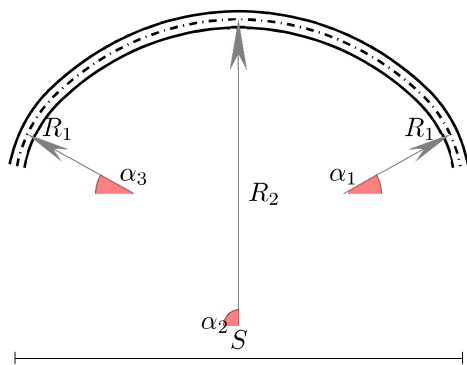


Figura 1. Illustrazioni di dettaglio delle configurazioni d'impasto nelle volte rinforzate con CRM (a) all'estrovasso e (b) all'infrodasso.

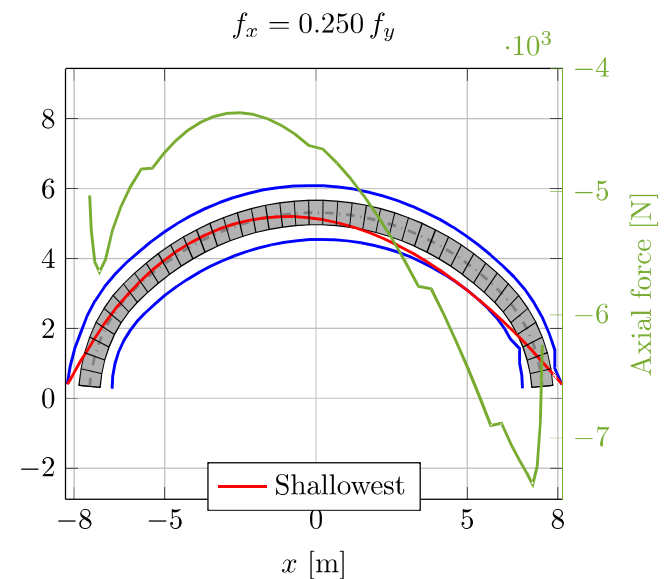


Analisi della linea di spinta di archi rinforzati e non rinforzati

Esempi numerici: arco rinforzato



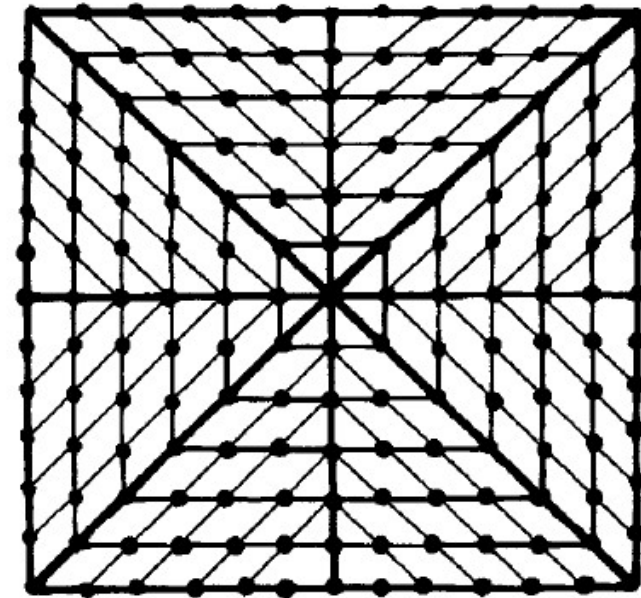
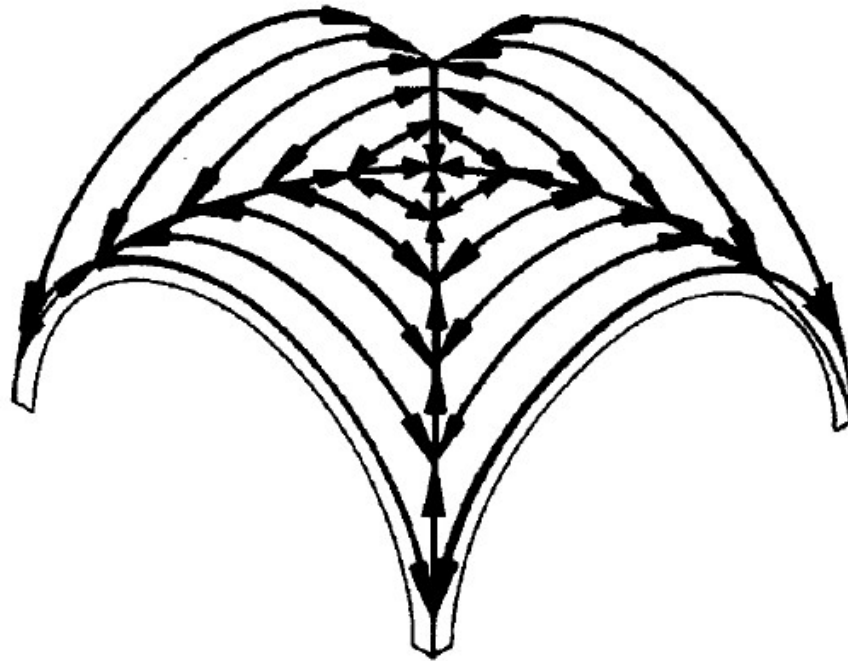
(a) Deepest solution.



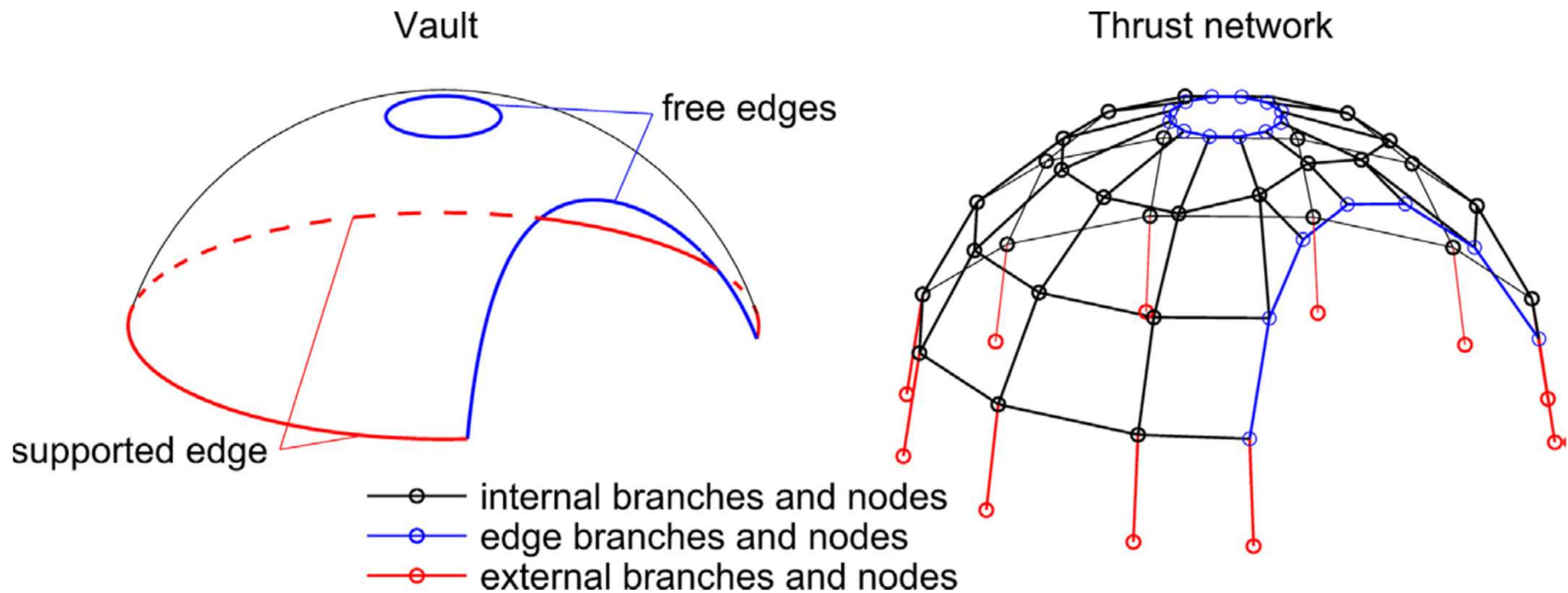
(b) Shallowest solution.

S [m]	R_1 [m]	R_2 [m]	angles [rad]	b [m]	h [m]
15.0	4.00	~ 9.32	$0.027 \pi \leq \alpha_1 \leq 0.27 \pi$	0.50	0.70
			$0.27 \pi \leq \alpha_2 \leq 0.77 \pi$		
			$0.77 \pi \leq \alpha_3 \leq 0.97 \pi$		

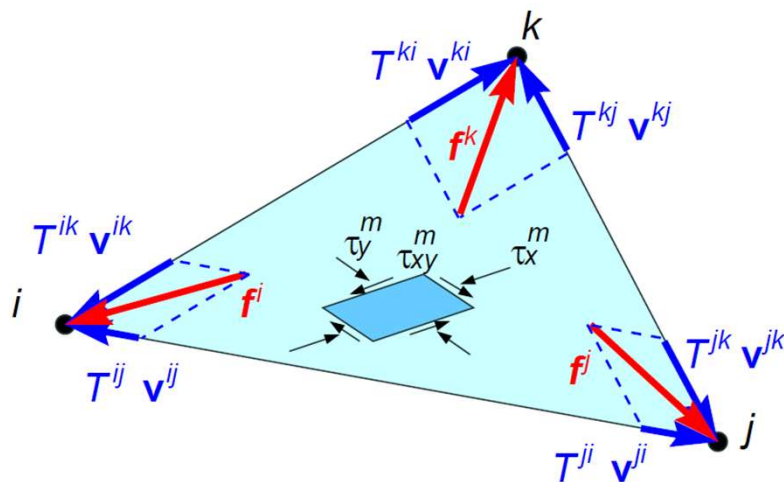
Analisi delle reti di spinta



Analisi delle reti di spinta



Analisi delle reti di spinta



Equivalence between thrusts transmitted to nodes $f^{(\cdot)}$ and three side thrusts $T^{(\cdot)}$
 f^i, f^j and f^k constitute a planar system of forces.

Equilibrium of moments with respect to node i :

$$(a) \quad e^{ki} \times f^k + e^{ji} \times f^j = 0$$

Nodal thrusts are decomposed as $f^i = T^{ij}v^{ij} + T^{ik}v^{ik}$ where $T^{ij} = f^i \cdot v^{ij}$.

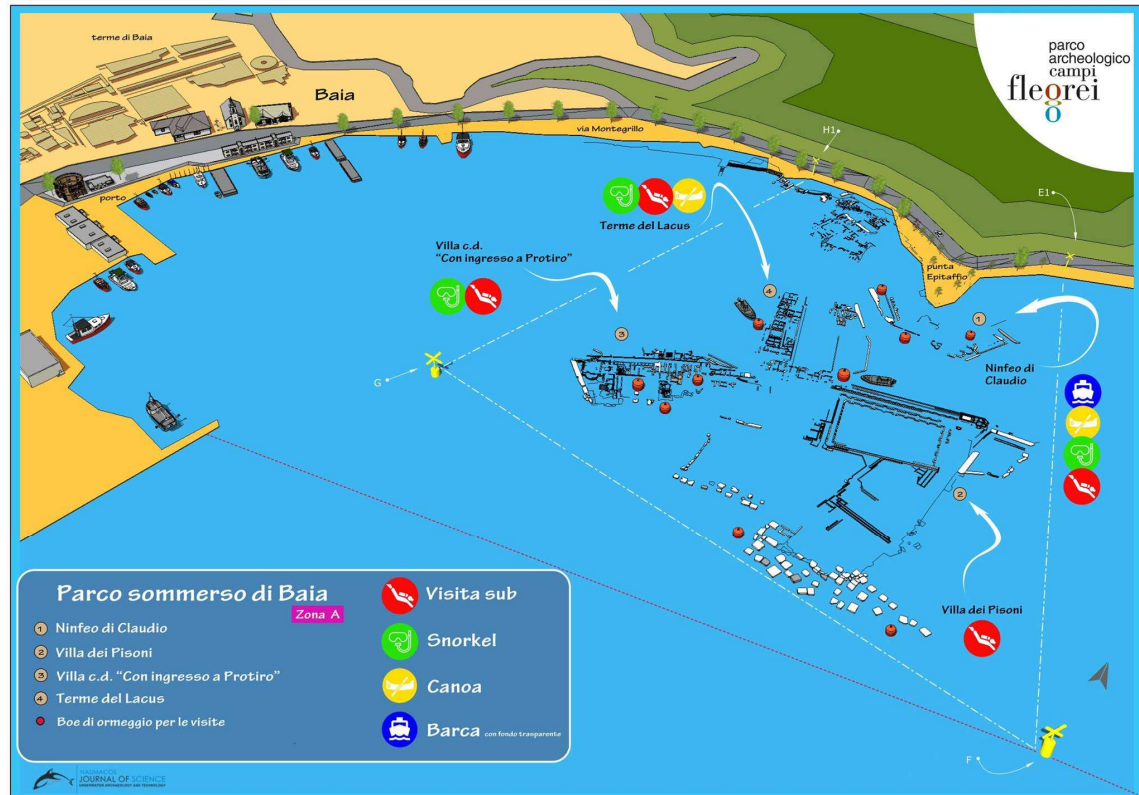
Eq. (a) becomes:

$$[T^{kj}(e^{ki} \times e^{kj}) + T^{jk}(e^{ji} \times e^{jk})] / e^{jk} = 0$$

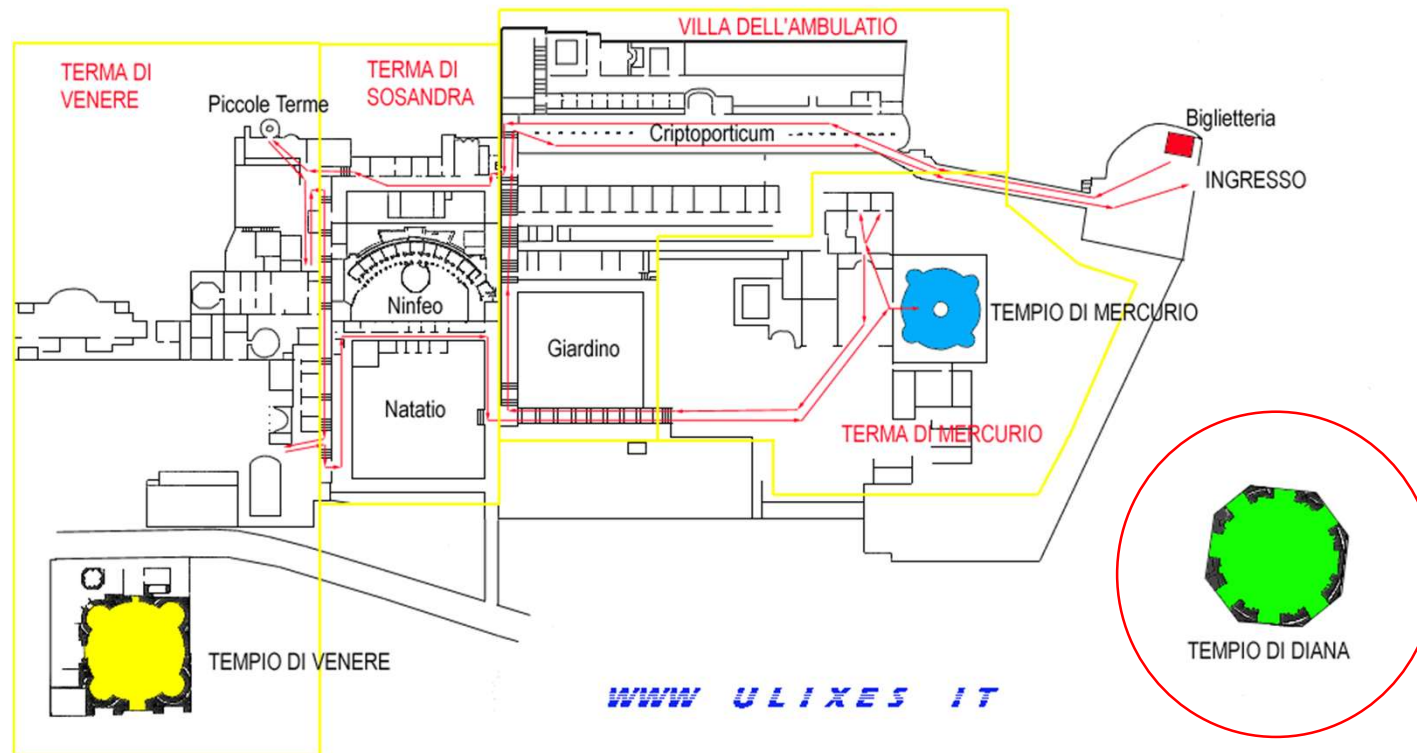
Being $e^{ki} \times e^{kj} = -e^{ji} \times e^{jk}$ it is $T^{kj} = T^{jk}$

F. Marmo - Structural analysis of masonry arches and vaults

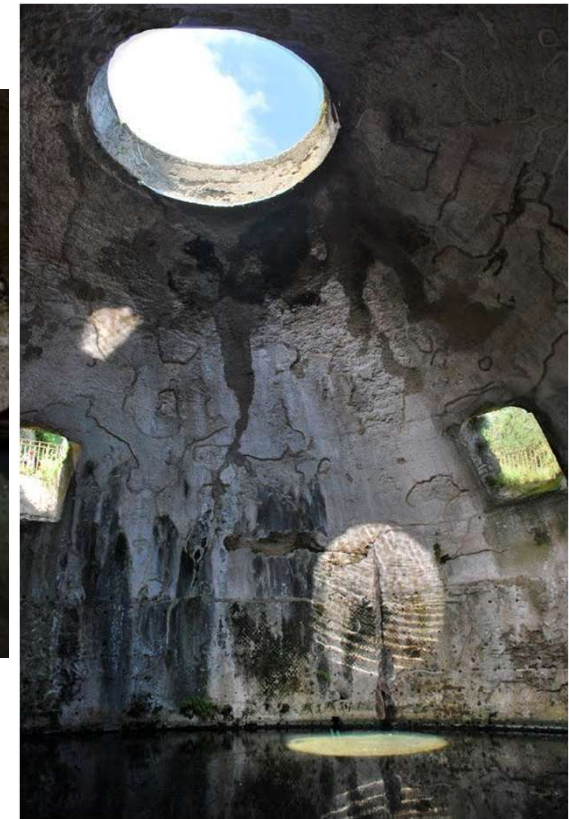
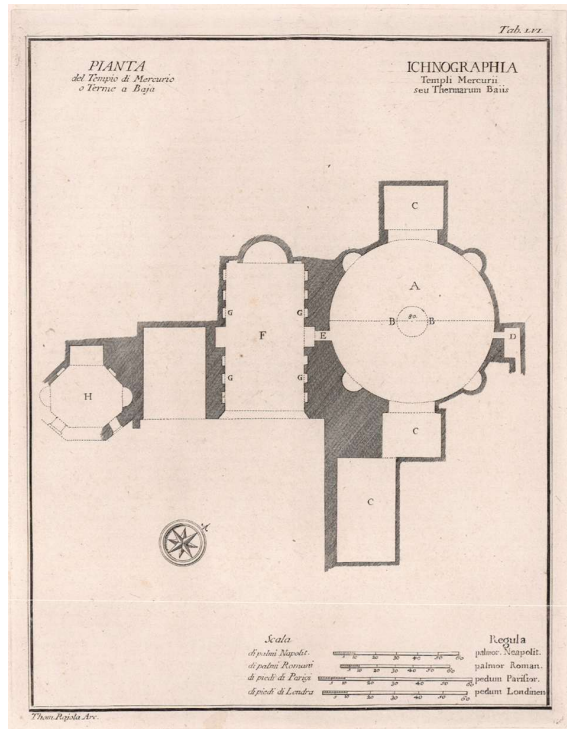
Sito archeologico di Baia: due casi studio



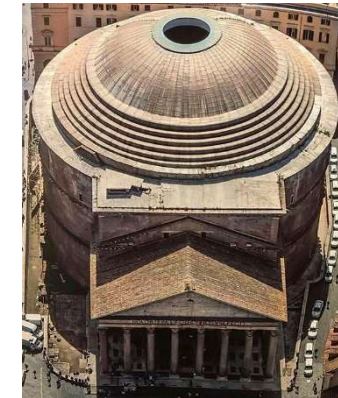
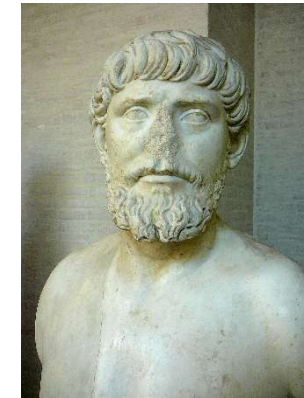
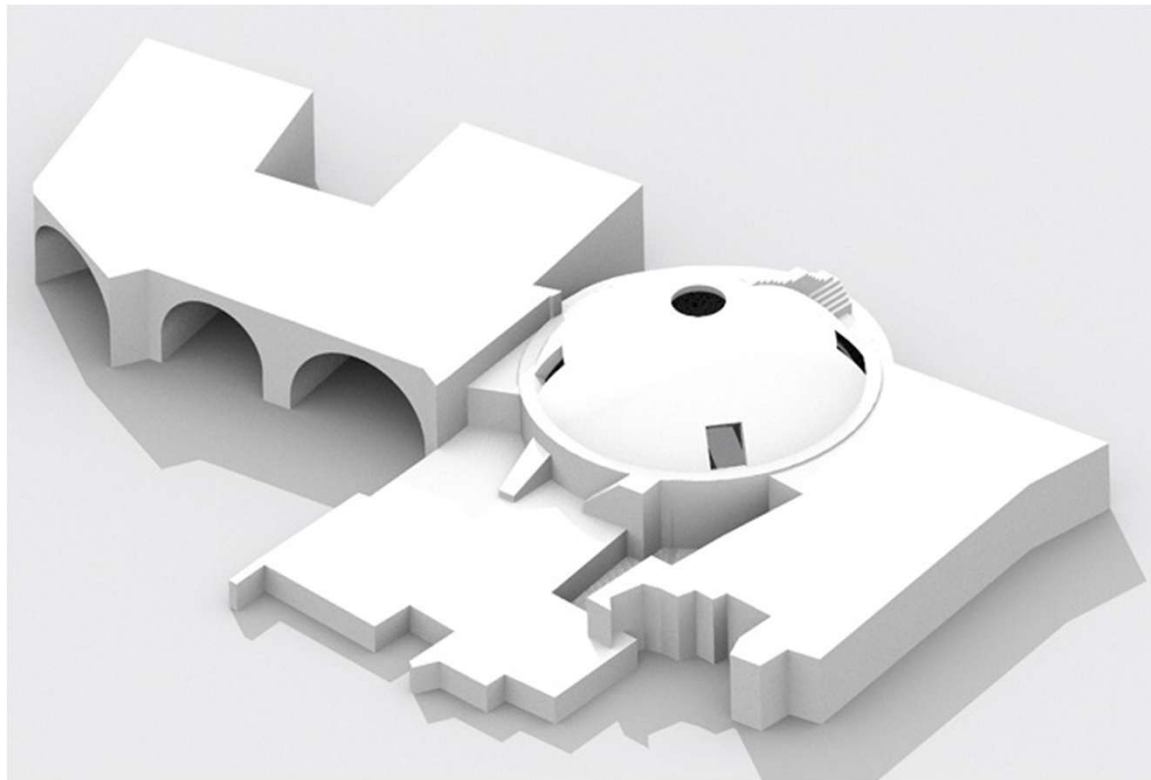
Sito archeologico di Baia: due casi studio



Sito archeologico di Baia: il tempio di Mercurio



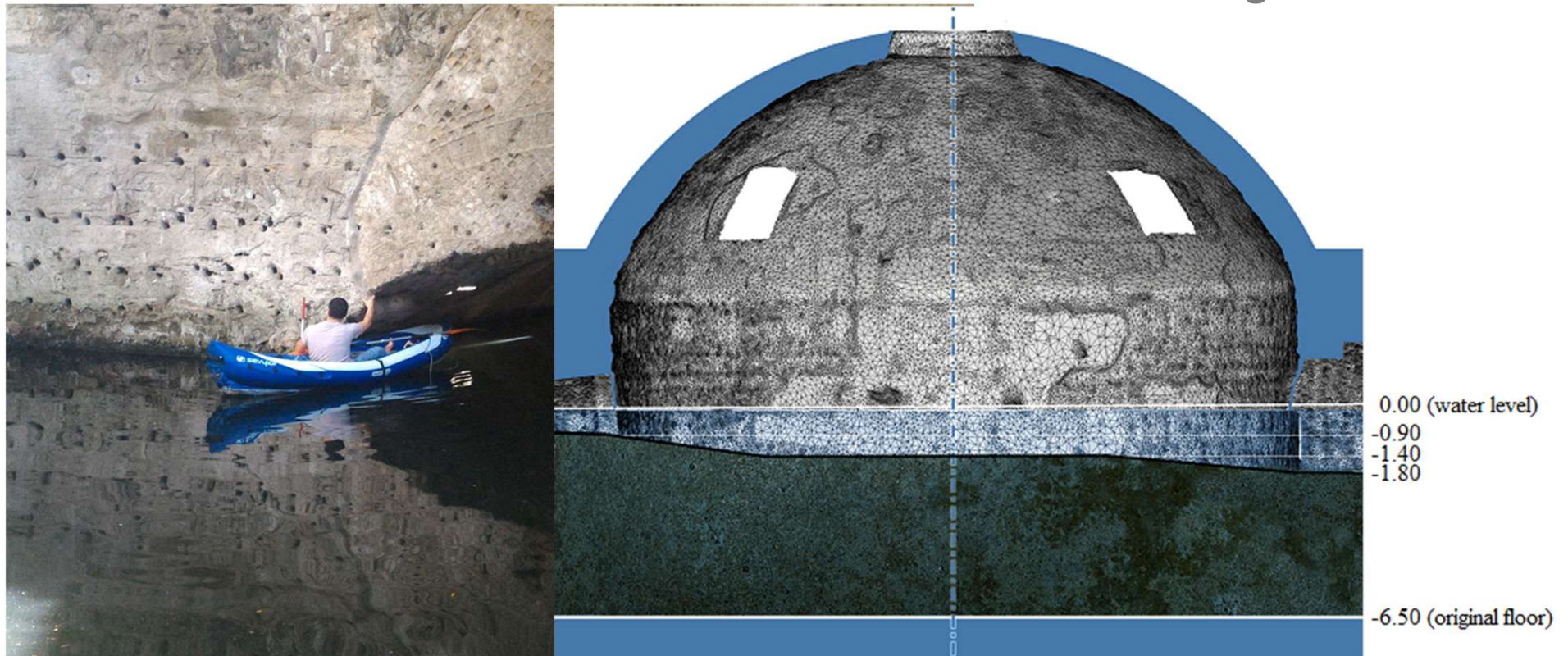
Sito archeologico di Baia: il tempio di Mercurio



Ἀπολλόδωρος ὁ Δαμασκηνός
Apollodorus Mechanicus
Nabatean – Architetto greco
della Siria romana, 2° C.A.D.
Introdusse innovazioni orientali
nello stile imperiale romano.

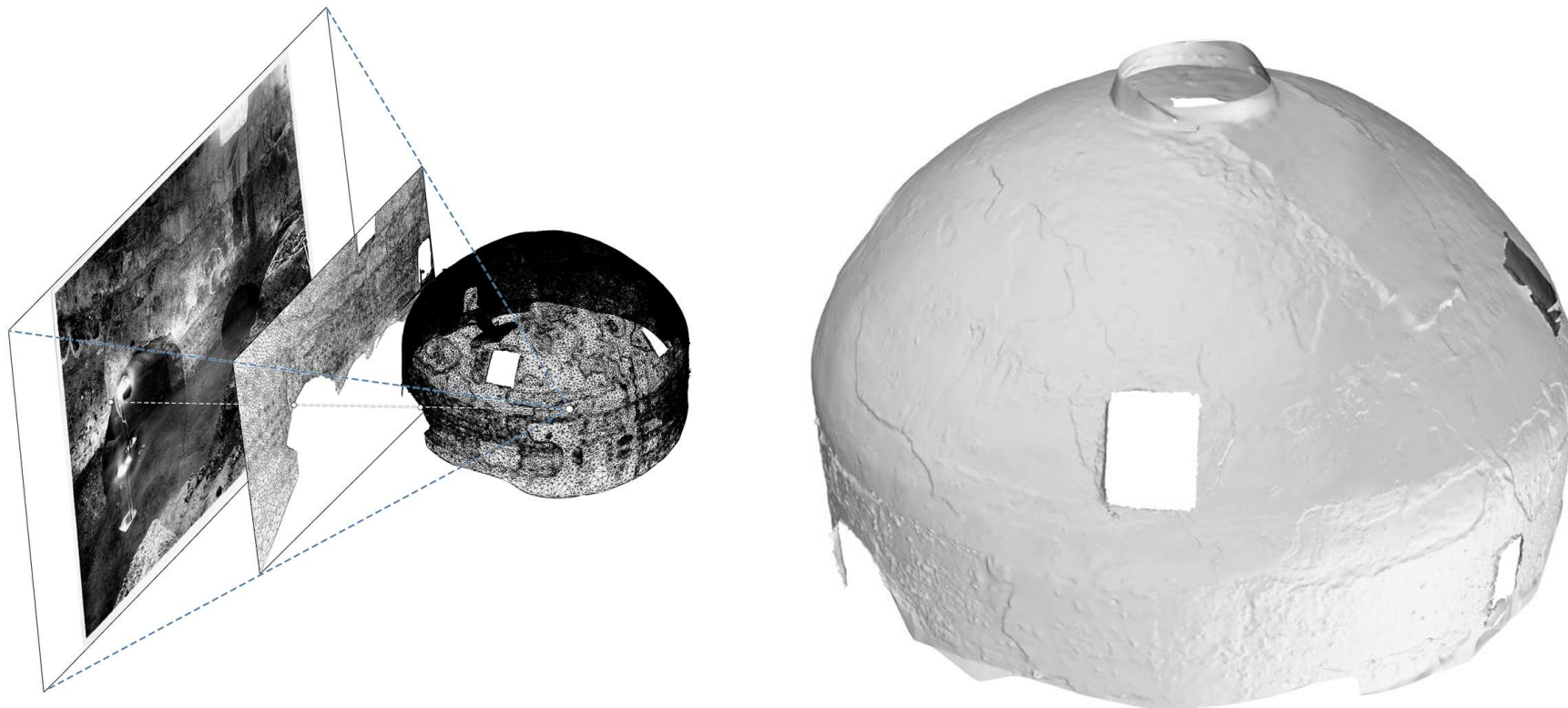
Sito archeologico di Baia: il tempio di Mercurio

Rilievo geometrico



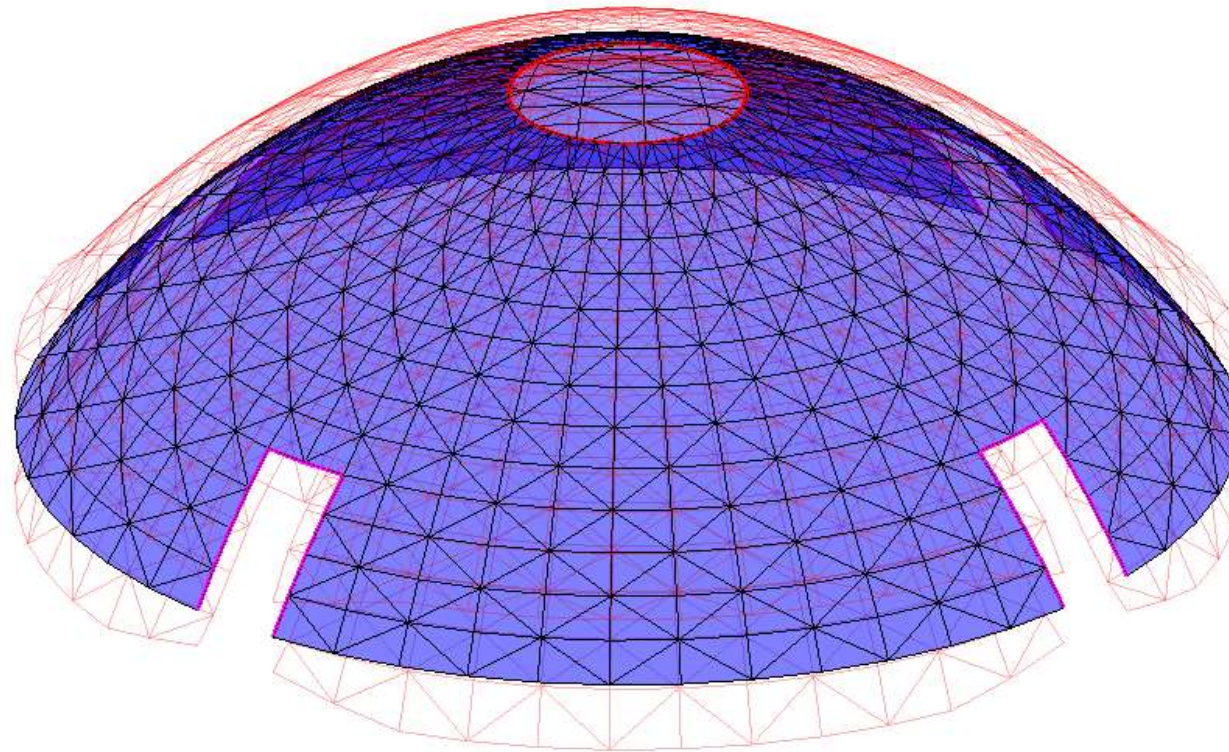
Sito archeologico di Baia: il tempio di Mercurio

Rilievo geometrico



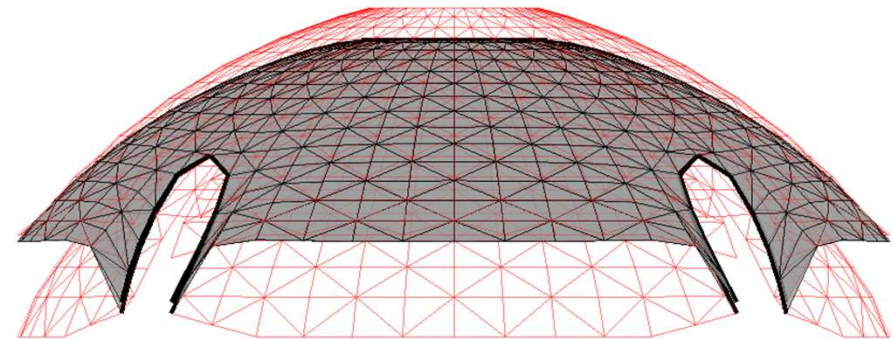
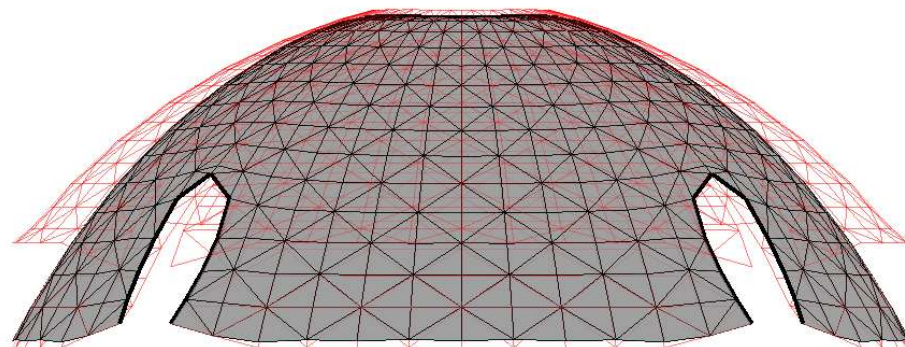
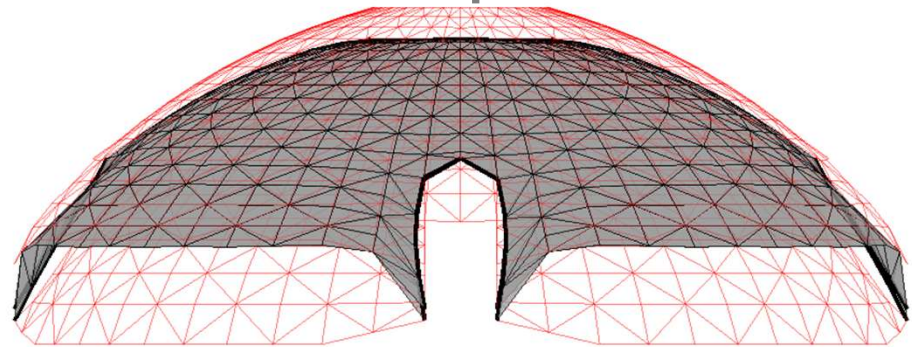
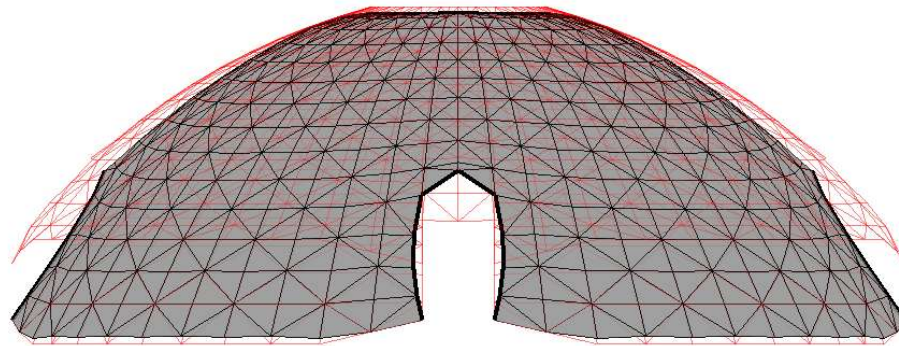
Sito archeologico di Baia: il tempio di Mercurio

Soluzione dell'analisi delle membrane di spinta



Sito archeologico di Baia: il tempio di Mercurio

Soluzione dell'analisi delle membrane di spinta



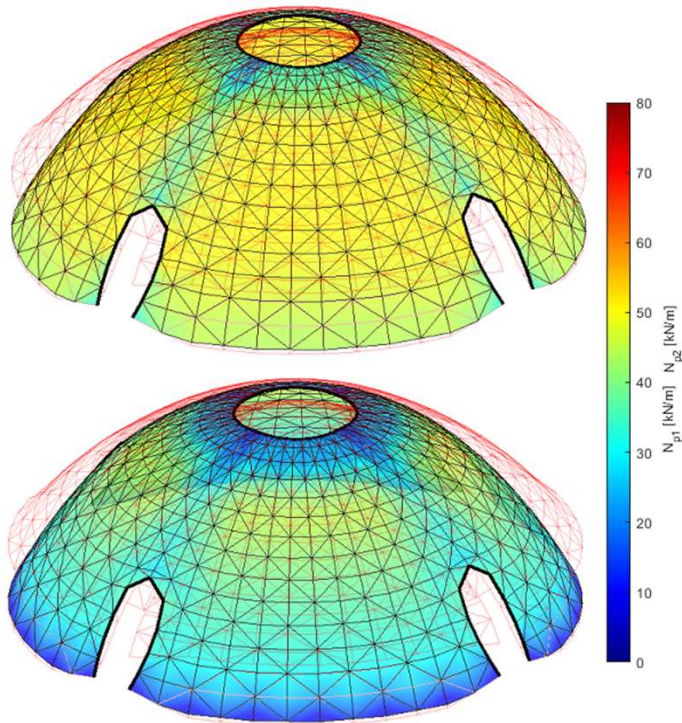
Min. thrust

Max. thrust

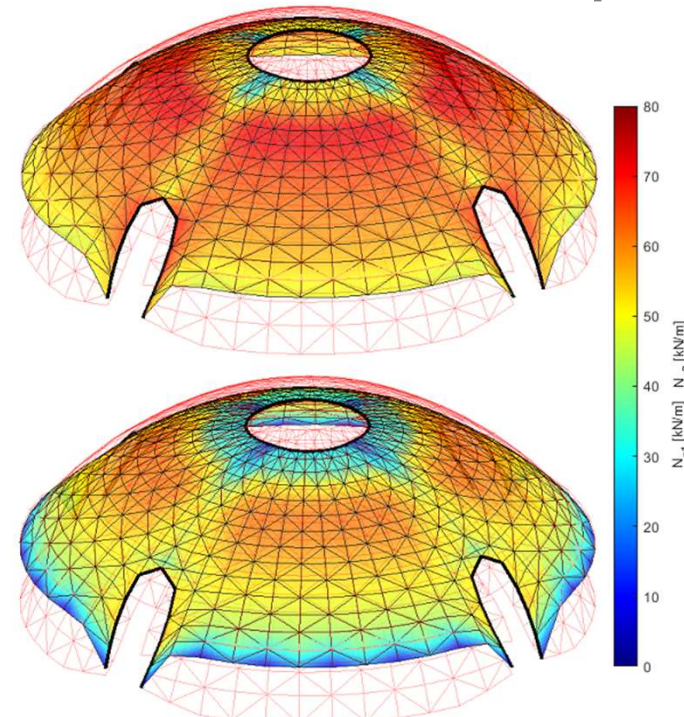
$R_s/R_d = 0.68$

Sito archeologico di Baia: il tempio di Mercurio

Soluzione dell'analisi delle membrane di spinta



Min. thrust

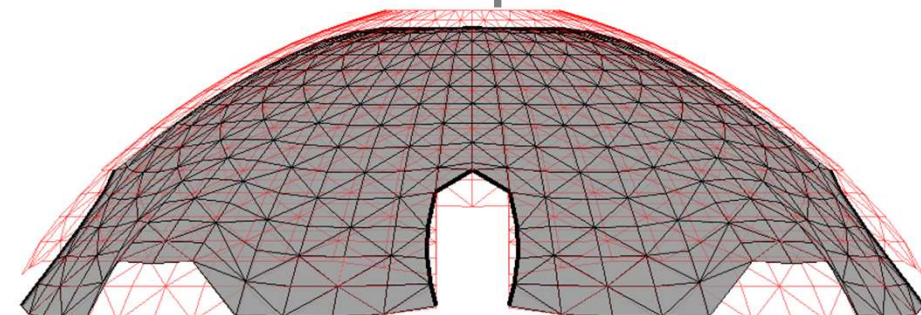
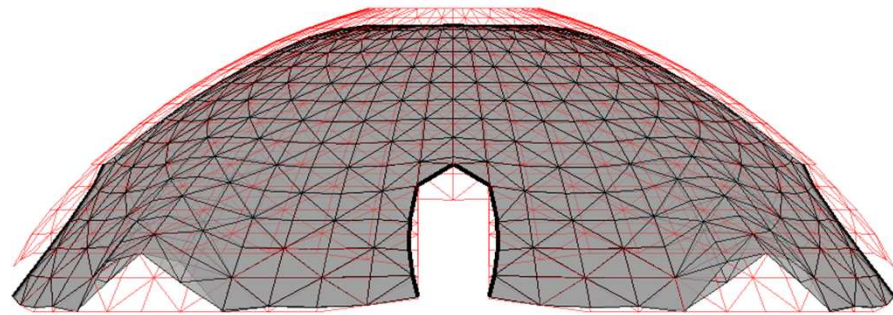


Max. thrust

$R_s/R_d = 0.68$

Sito archeologico di Baia: il tempio di Mercurio

Soluzione dell'analisi delle membrane di spinta



Min. thrust

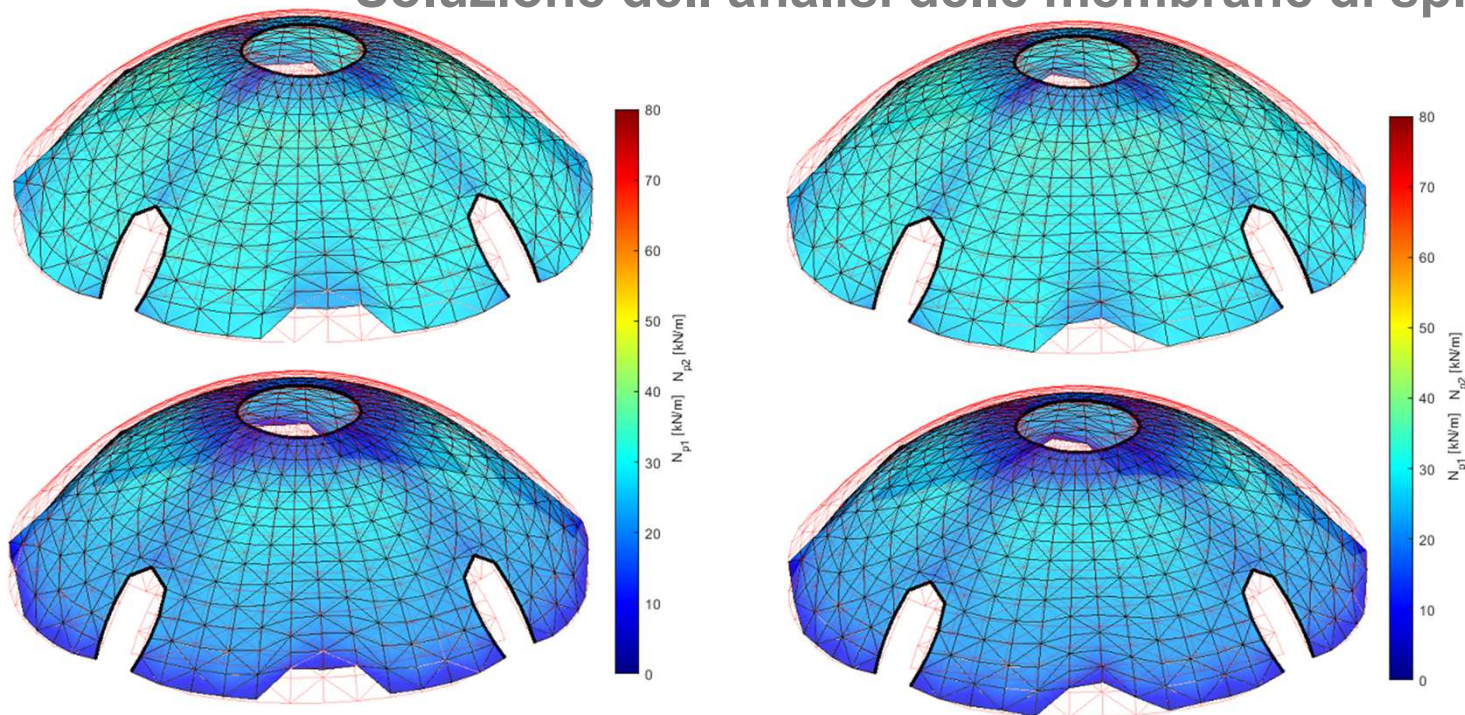
Max. thrust

Thick.= 0.43

Rs/Rd = 0.99

Sito archeologico di Baia: il tempio di Mercurio

Soluzione dell'analisi delle membrane di spinta



Min. thrust

Max. thrust

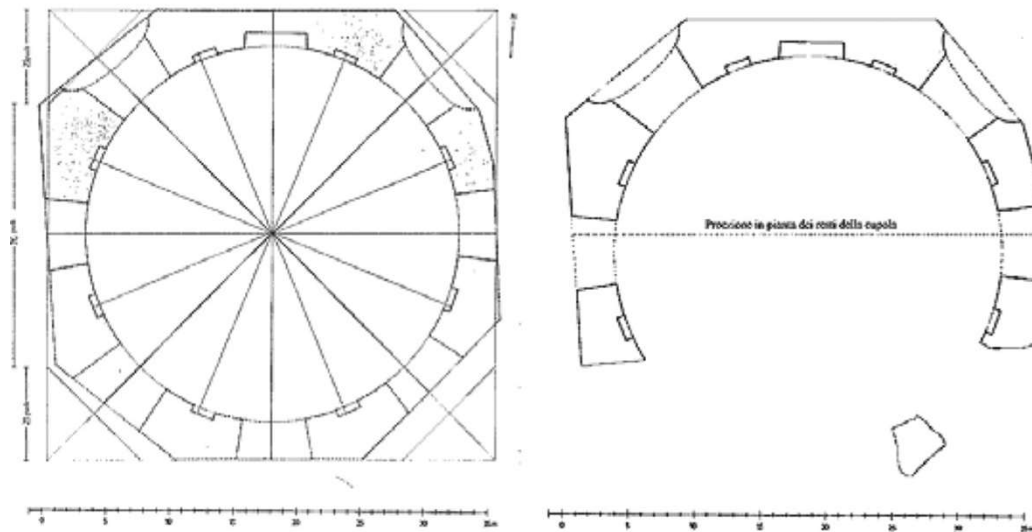
Thick. = 0.43

Rs/Rd = 0.99

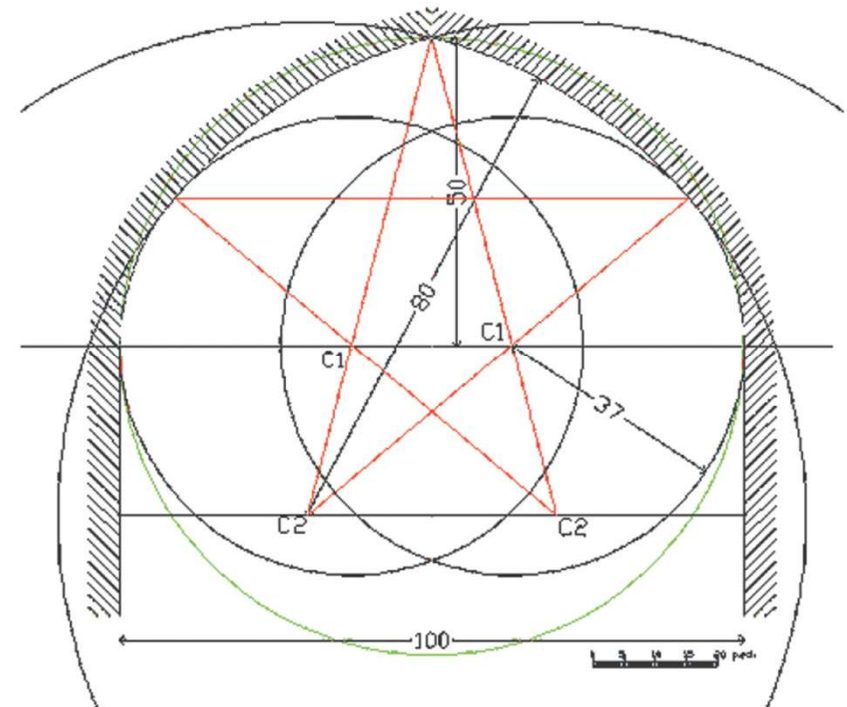
Sito archeologico di Baia: il tempio di Diana



Sito archeologico di Baia: il tempio di Diana

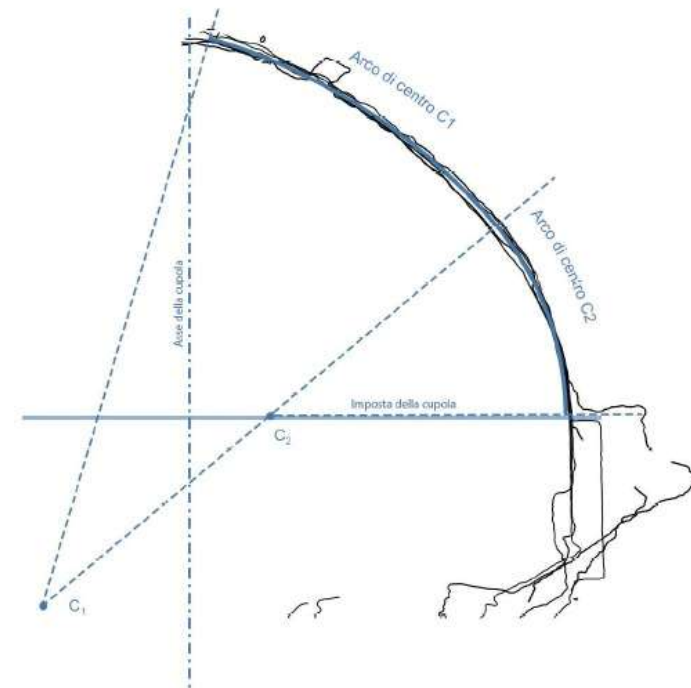
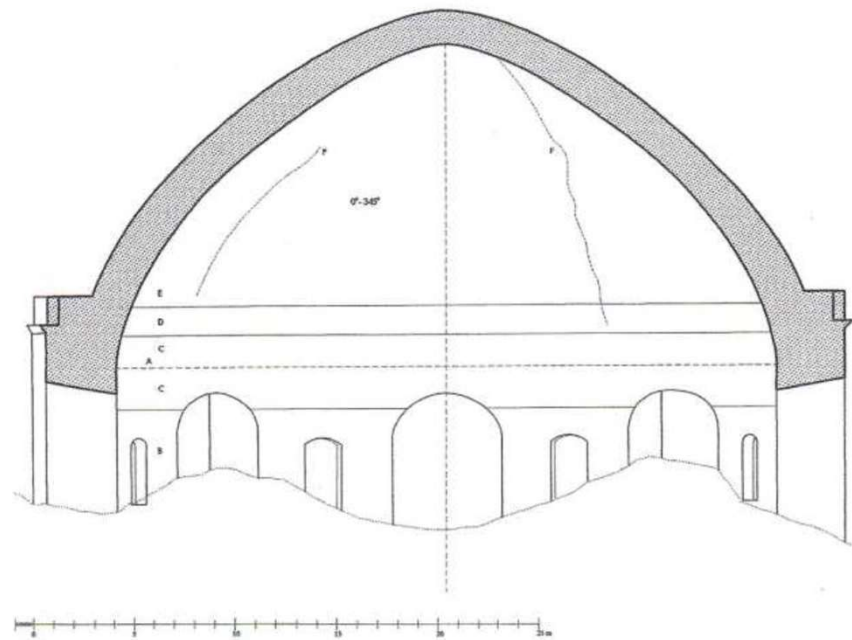


Rakob (1988)



Sito archeologico di Baia: il tempio di Diana

Rilievo geometrico

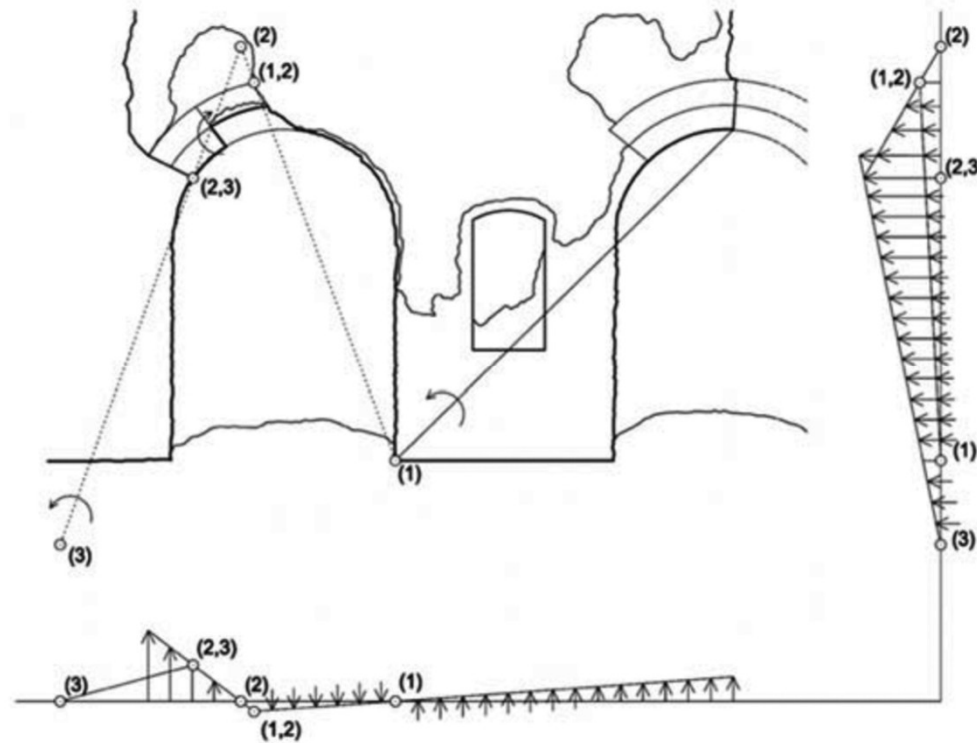


Rakob (1988) and Valenti and Romor (Sinopoli et al 2018)

Sito archeologico di Baia: il tempio di Diana



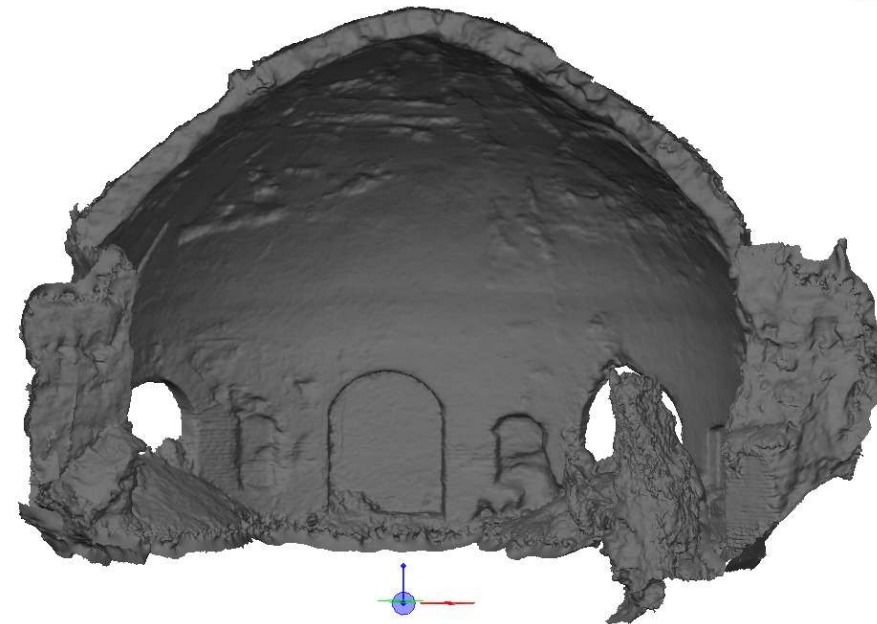
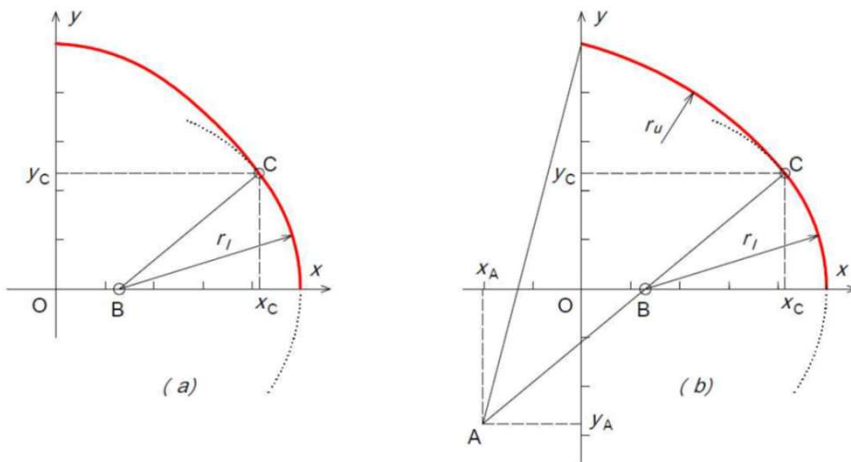
Rilievo geometrico



Sinopoli and Aita (2022)

Sito archeologico di Baia: il tempio di Diana

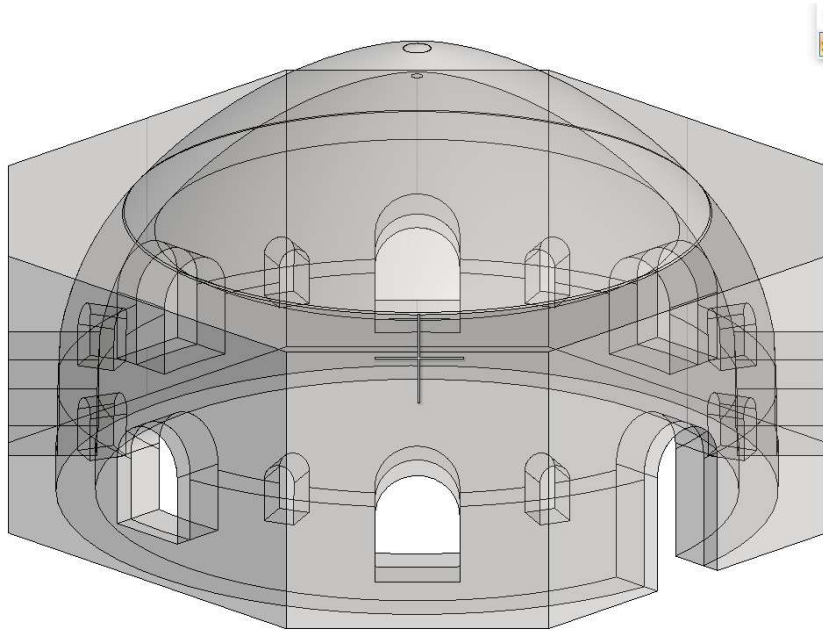
Rilievo geometrico



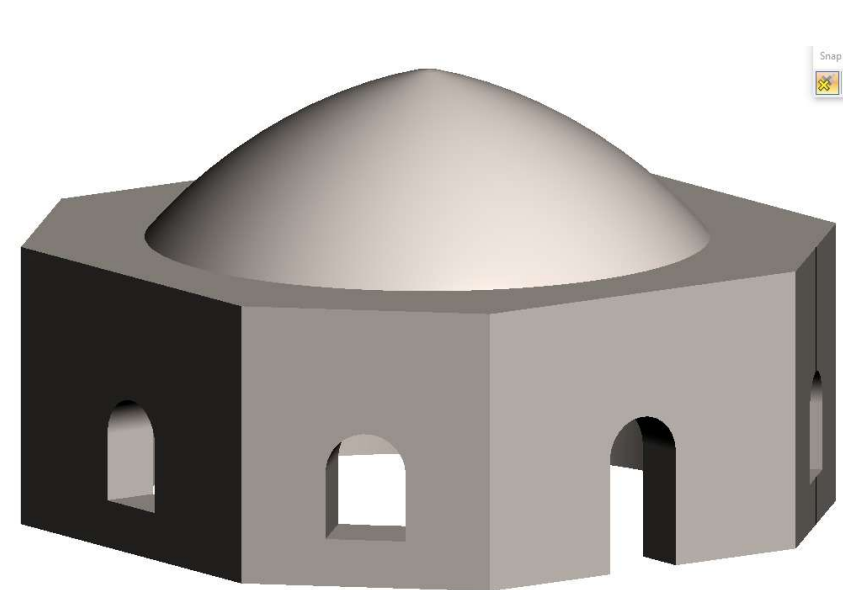
Sinopoli and Aita (2022) and Marmo (2018)

Sito archeologico di Baia: il tempio di Diana

Rilievo geometrico

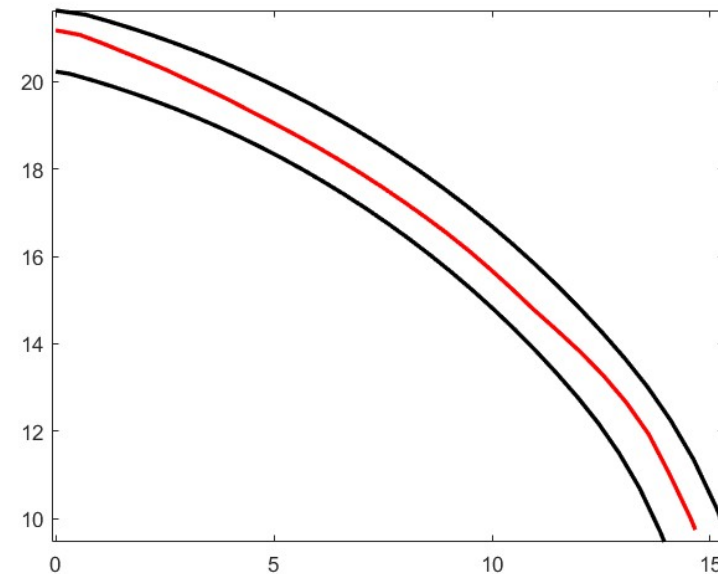
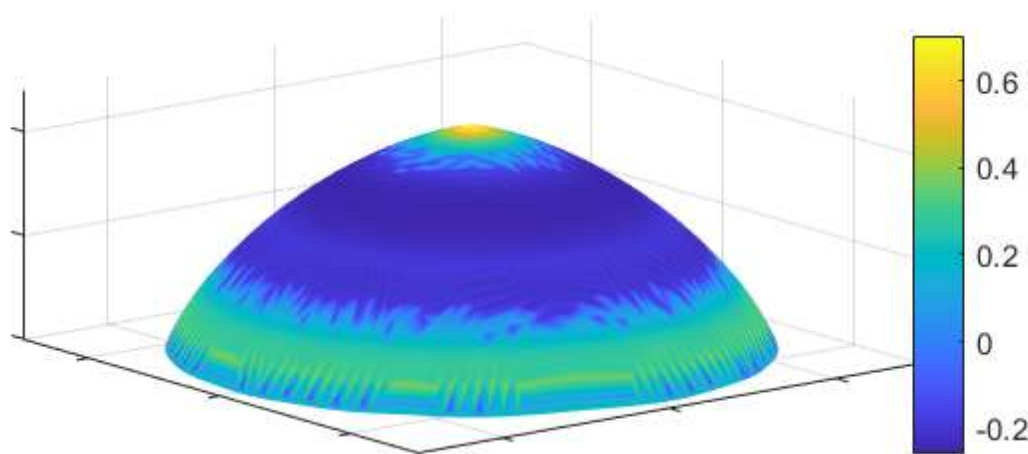


Marmo (2018)



Sito archeologico di Baia: il tempio di Diana

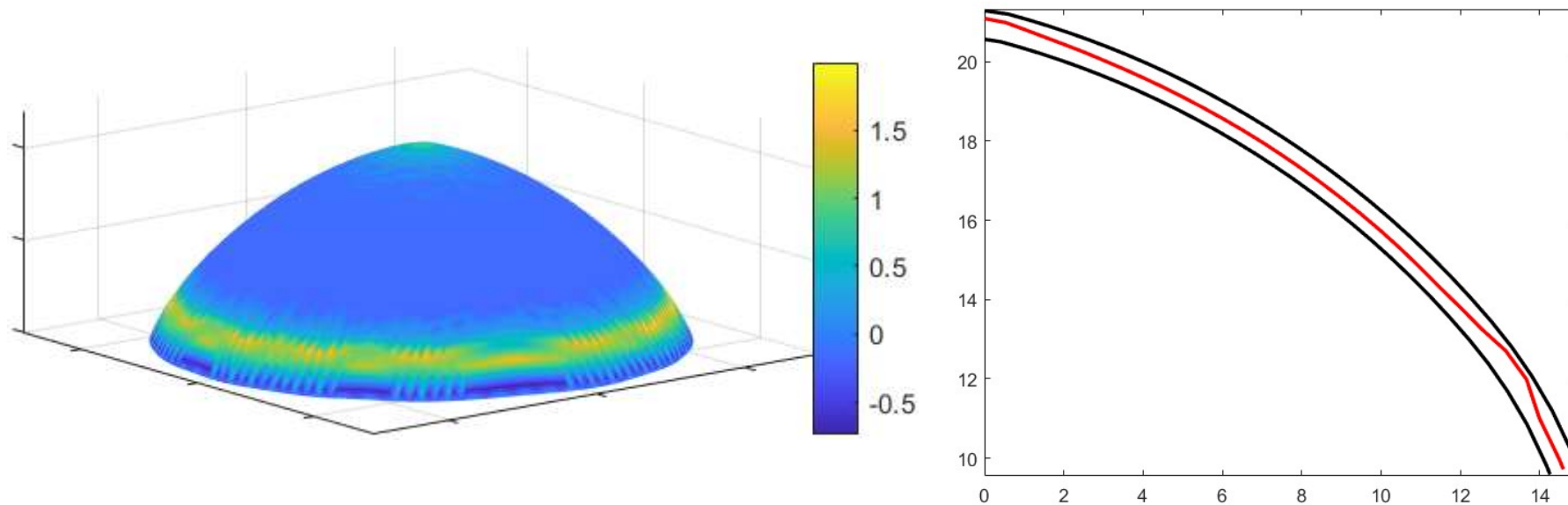
Modello agli Elementi Finiti



Spessore originale $d = 1.4\text{m}$

Sito archeologico di Baia: il tempio di Diana

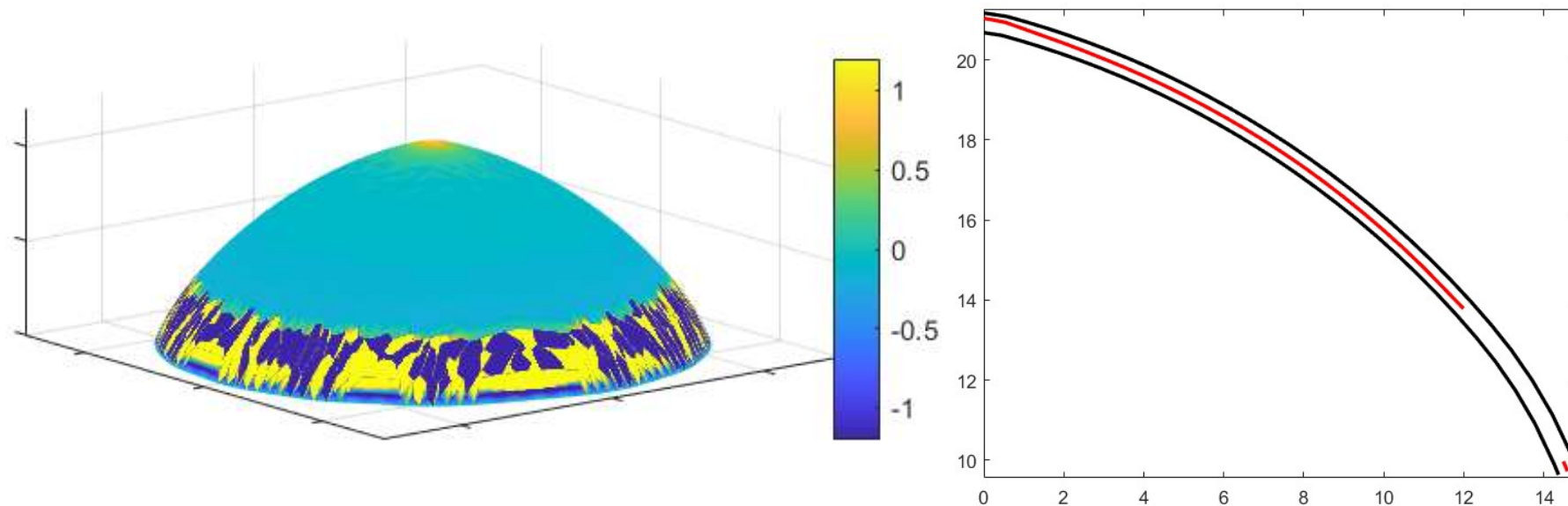
Modello agli Elementi Finiti



Spessore limite FEM $d = 1.4\text{m}$

Sito archeologico di Baia: il tempio di Diana

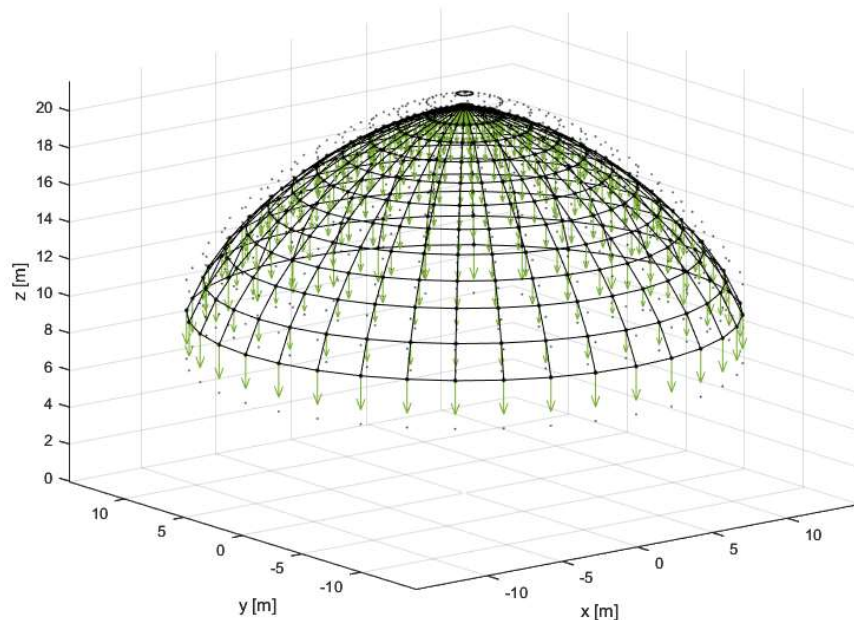
Modello agli Elementi Finiti



Spessore limite TNA d = 0.46m

Sito archeologico di Baia: il tempio di Diana

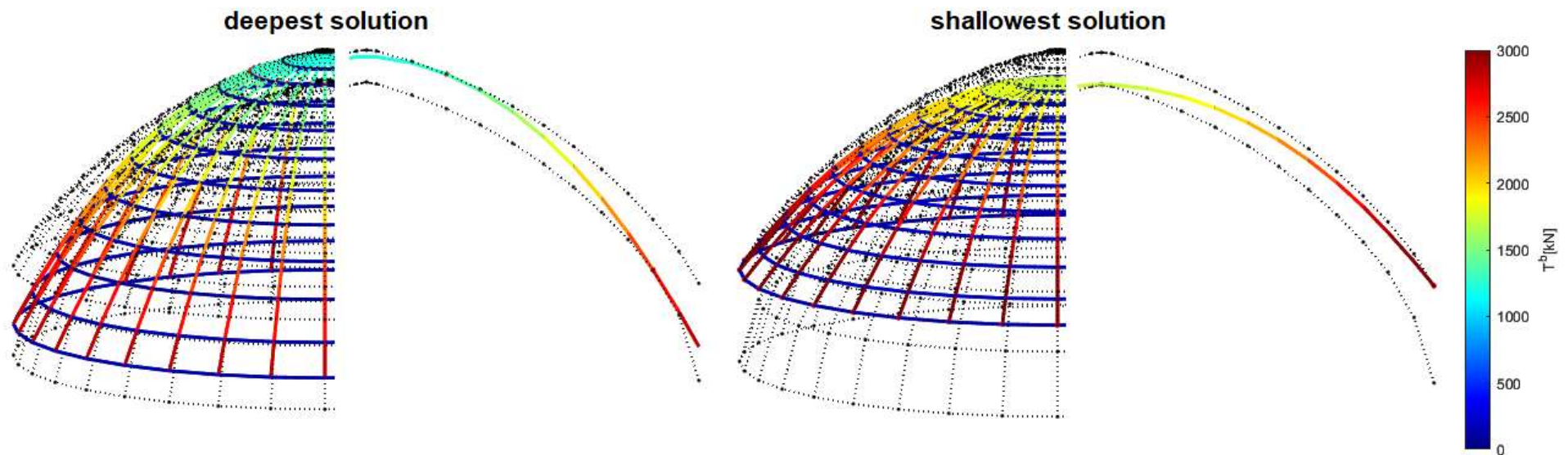
Analisi con le reti di spinta (TNA)



- TNA generalizza il metodo delle curve delle pressioni (Heyman 1966).
- La rete modella le forze assiali trasmesse dagli elementi in muratura.
- I nodi sono liberi di muoversi per raggiungere l'equilibrio.
- TNA fornisce infinite soluzioni equilibrate.
- L'analisi limite assicura che, se la TNA fornisce un moltiplicatore di carico per soluzioni equilibrate, questo sarà inferiore al moltiplicatore di collasso reale.

Sito archeologico di Baia: il tempio di Diana

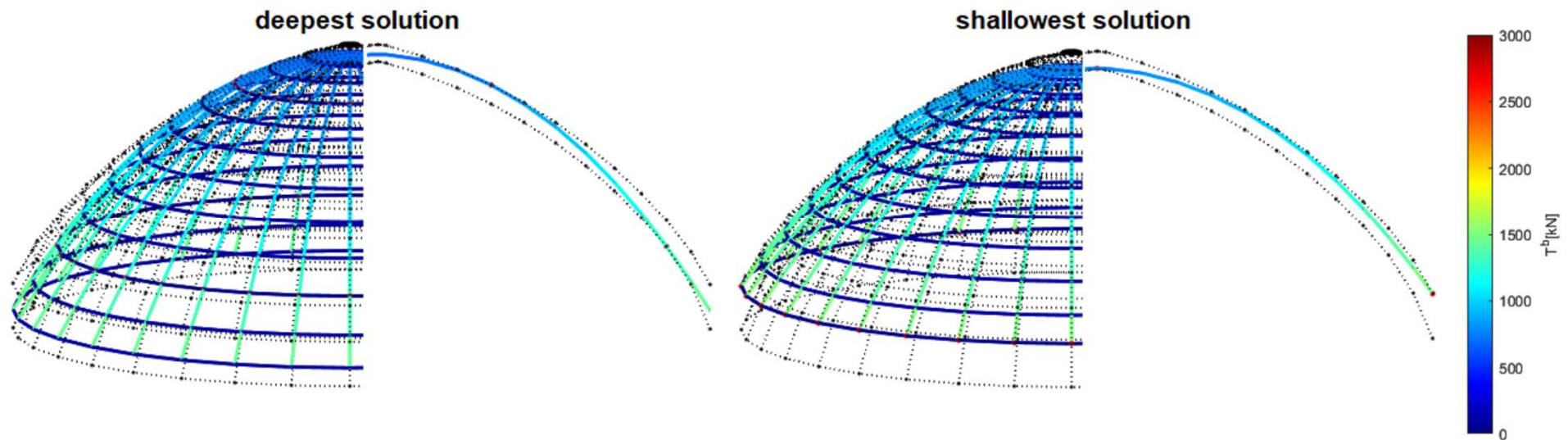
Analisi con le reti di spinta (TNA)



Spessore originale $d = 1.4\text{m}$

Sito archeologico di Baia: il tempio di Diana

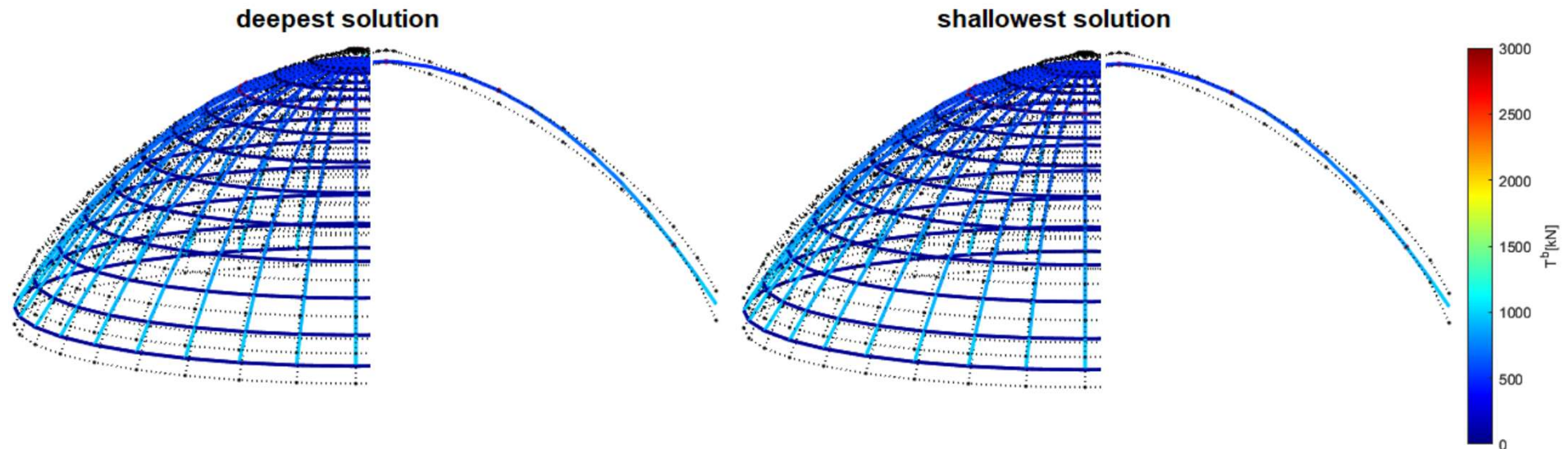
Analisi con le reti di spinta (TNA)



Spessore originale $d = 0.72\text{m}$

Sito archeologico di Baia: il tempio di Diana

Analisi con le reti di spinta (TNA)



Spessore originale $d = 0.46\text{m}$

Sito archeologico di Baia: il tempio di Diana

Confronto

- I risultati di FEM e TNA sono reciprocamente coerenti:
 - L'eccentricità FEM è vicina alla soluzione più superficiale di quella ottenuta con la TNA in prossimità del piano di imposta e a quella più profonda in cima.
 - L'entità dello spessore limite è coerente.
- FEM fornisce uno spessore limite del 50% più grande di TNA.
 - Questo può essere correlato al fatto che la TNA trascura il cedimento per taglio e compressione...
 - (infatti, mentre la regione di imposta è plasticizzata, la cupola diventa staticamente non determinata)
 - ...o a valori errati dei parametri costitutivi.

Vulnerabilità di beni archeologici semplicemente appoggiati



L'Aquila's earthquake (2009)



Irpinia's earthquake (1980)

Sulla salvaguardia di beni archeologici semplicemente appoggiati



Kos' earthquake (2017)



Zagreb's earthquake (2020)

Cinematismi di beni archeologici semplicemente appoggiati

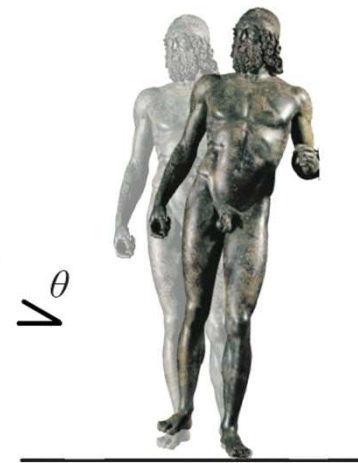
1) *Full-Contact*



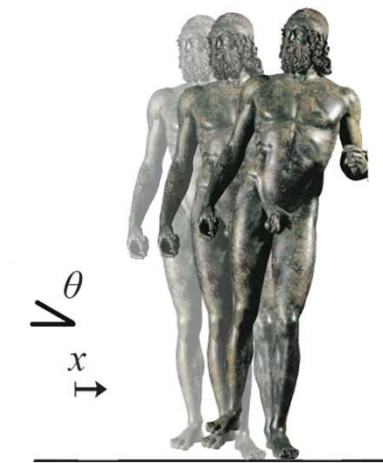
2) *Sliding*



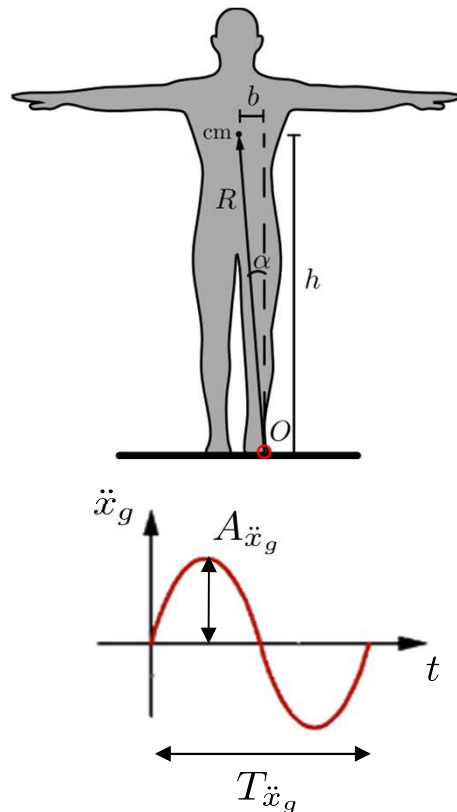
3) *Rocking*



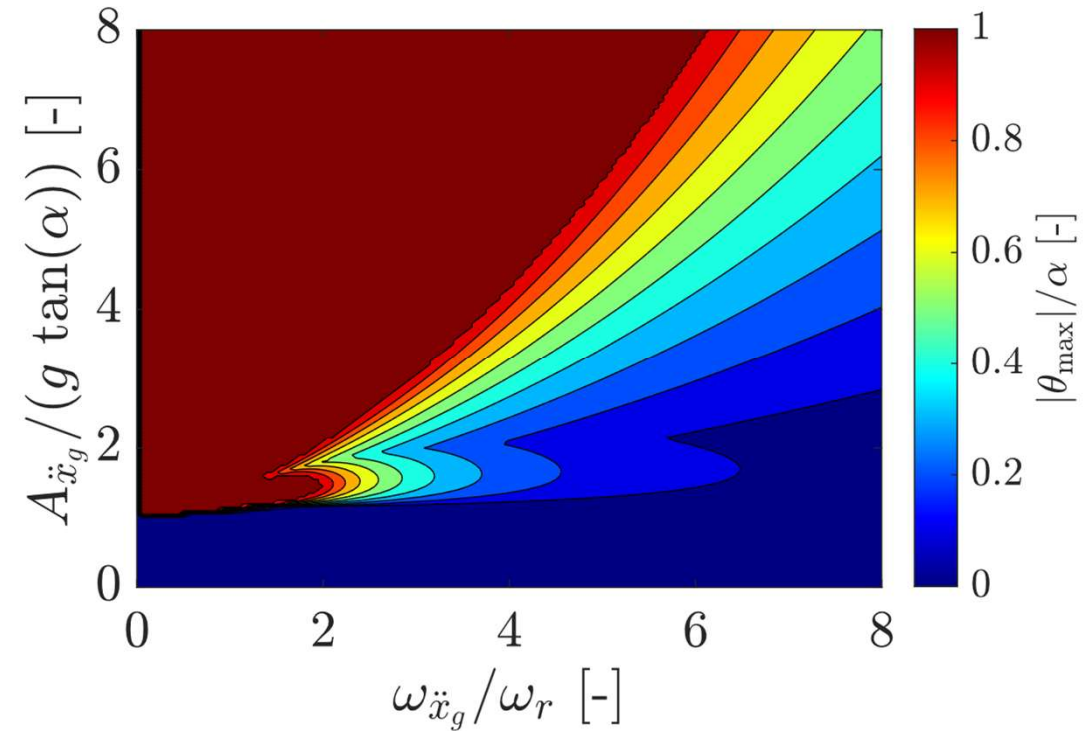
4) *Sliding-Rocking*



Spettri di ribaltamento

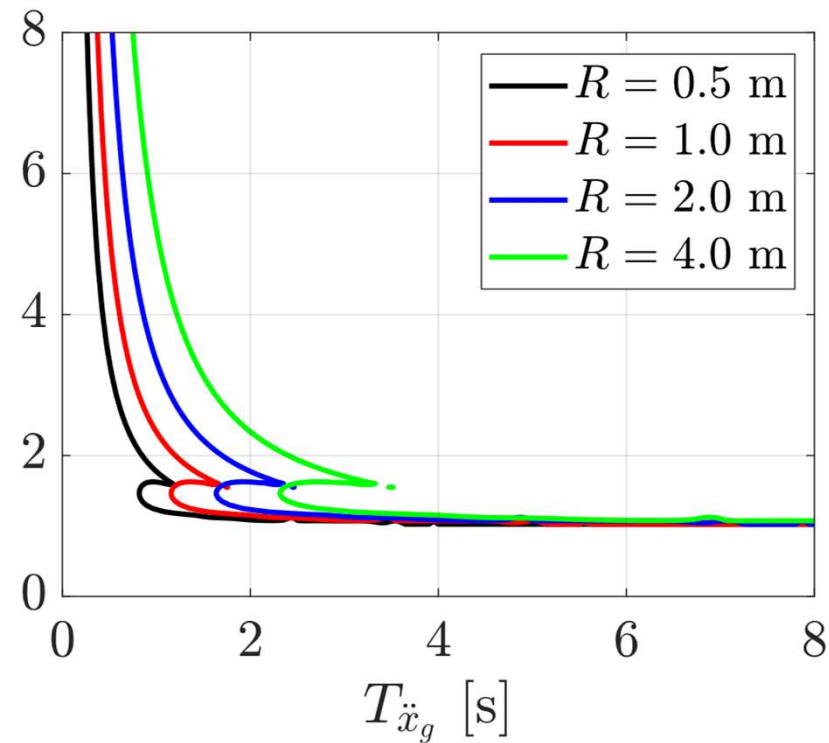
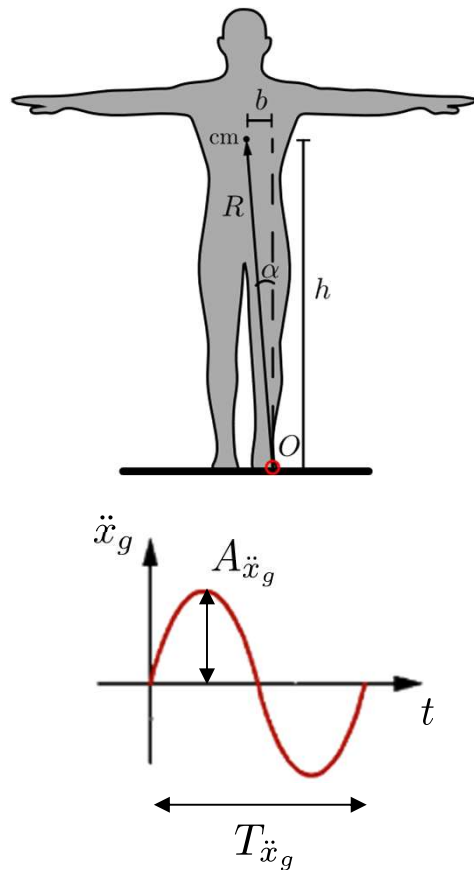


$$T_{\ddot{x}_g} = 0.5 \text{ s}$$

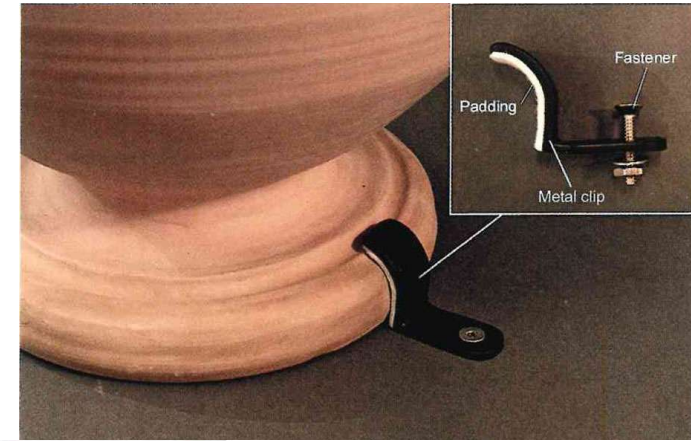


Spettri di ribaltamento

$$T_{\ddot{x}_g} = 0.5 \text{ s}$$



Sistemi di protezione: vincoli



Sistemi di protezione: interventi invasivi



Sistemi di protezione: isolamento alla base



Archaeological Museum in Olympia, Greece

Sistemi di protezione: isolamento alla base

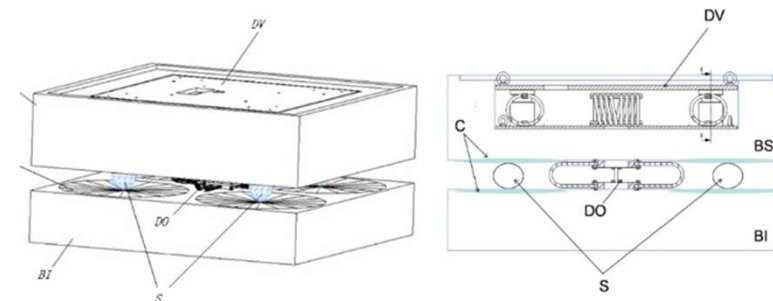


Gates of Hell in Tokyo, Japan

Sistemi di protezione: isolamento alla base

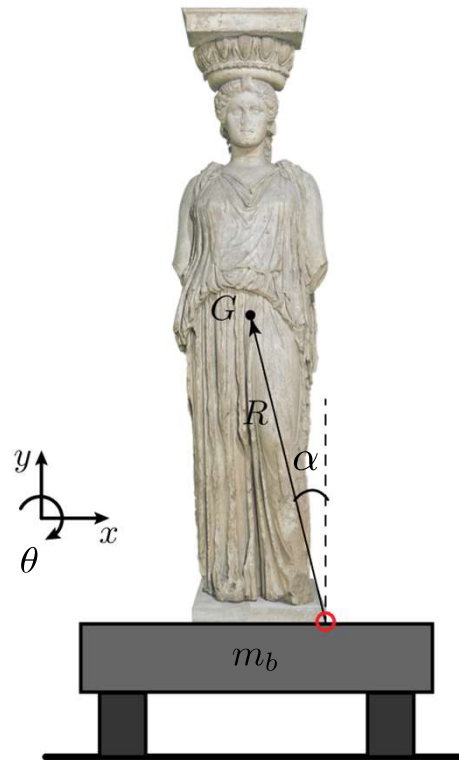


Museo archeologico nazionale di
 Reggio Calabria



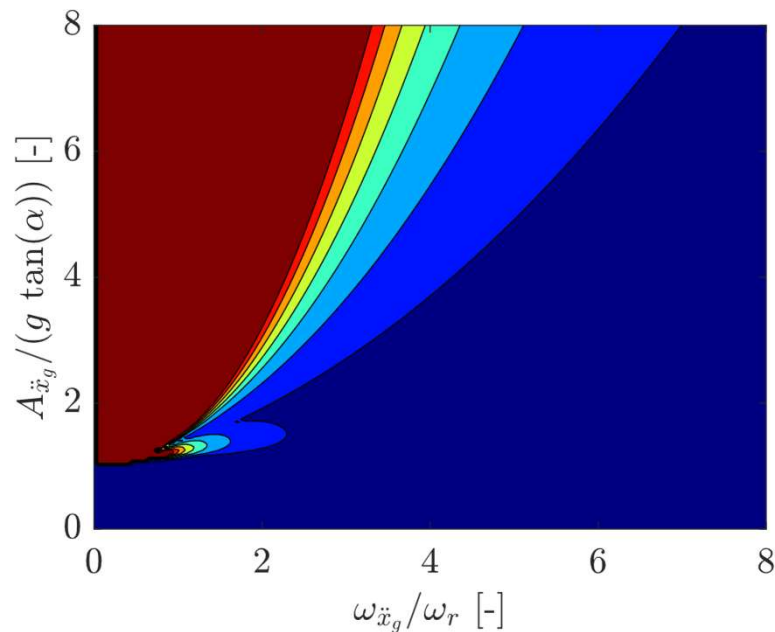
De Canio (2012) - Marble anti seismic basement provided by spheres + horizontal limitation device + vertical isolation device inserted in the upper block

Cinematica della statua isolata

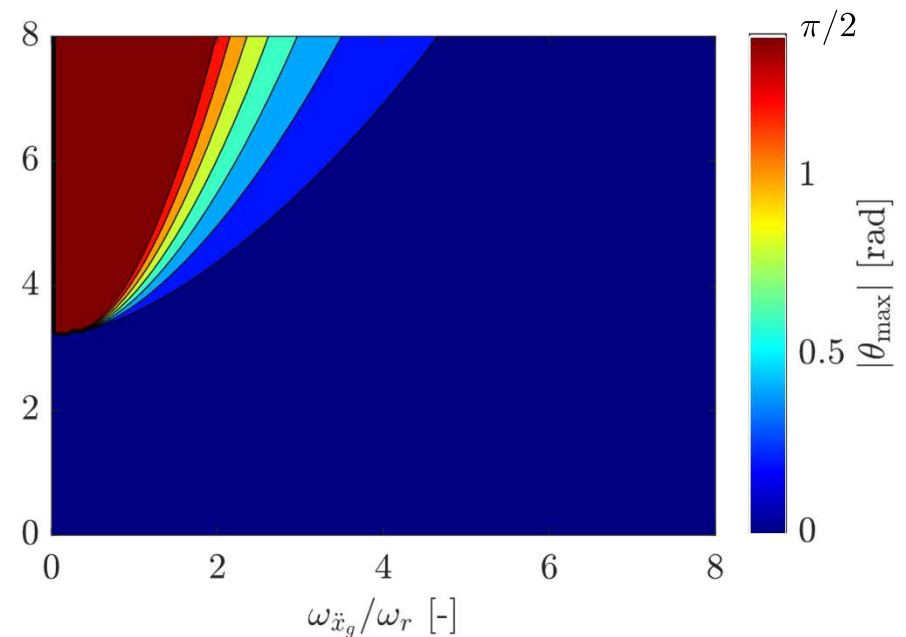


Cinematica della statua isolata

Spettri di ribaltamento



Statua non isolata



Statua isolata con isolatori elastomerici

La Fondazione CHANGES

È un ente no profit, nato nel settembre 2022 con l'obiettivo di coordinare, in qualità di Hub, il progetto di Partenariato Esteso PNRR "CHANGES: Cultural Heritage Innovation for Next-Gen Sustainable Society", in risposta al Bando MUR D.D. n. 341 del 15 marzo 2022.

La Fondazione CHANGES promuove l'innovazione scientifico-tecnologica e lo sviluppo sostenibile del patrimonio culturale, connettendo ricerca di eccellenza, imprese, istituzioni e cittadini per creare una grande rete di riferimento in Italia su questi temi. Svolge attività di supporto alla ricerca, alla formazione e al trasferimento tecnologico nell'ambito dei beni culturali, della cultura e della tutela del patrimonio storico-culturale.

CHANGES

CULTURAL HERITAGE ACTIVE INNOVATION FOR NEX-GEN SUSTAINABLE SOCIETY
EXTENDED PARTNERSHIP

La Fondazione CHANGES

La struttura organizzativa del progetto CHANGES si ispira al concetto della “ruota della bicicletta”, noto come “hub and spoke” in inglese, in cui “hub” significa mozzo e “spoke” significa Raggio.

In questo contesto, la Fondazione CHANGES funge da Hub, il centro vitale del progetto, mentre gli Spoke tematici rappresentano i raggi della ruota. Ogni Spoke ha un ruolo fondamentale nel contribuire alla forza e alla stabilità dell'intero sistema. Il progetto CHANGES è organizzato in 9 Spoke tematici, concepiti come aree complementari fondamentali per la formazione di un vasto ecosistema di competenze interdisciplinari nel campo umanistico, tecnologico e culturale.

Spoke 7: PROTECTION AND CONSERVATION OF CULTURAL HERITAGE AGAINST CLIMATE CHANGES, NATURAL AND ANTHROPIC RISKS

Lo Spoke 7 si concentra sulla mitigazione degli effetti dei cambiamenti climatici e di altri rischi sul patrimonio culturale, sviluppando soluzioni e strumenti innovativi per la sua protezione e conservazione. Gli obiettivi chiave includono la valutazione dell'impatto dei cambiamenti ambientali, lo sviluppo di prodotti di conservazione sostenibili e il miglioramento degli strumenti digitali per la conservazione preventiva. Spoke 7 integra la protezione del patrimonio con obiettivi di sostenibilità più ampi, assicurando la tutela del patrimonio culturale per le future generazioni.

Il patrimonio culturale è esposto a rischi naturali e antropici accentuati dal cambiamento climatico, che richiedono un approccio multidisciplinare e multi-scala per comprendere e affrontare diversi scenari. Studi di caso rilevanti includono ambienti e paesaggi storici, città storiche, centri storici minori, patrimonio costruito e monumenti, opere d'arte. L'obiettivo generale dello Spoke 7 è fornire soluzioni innovative per mitigare gli effetti del cambiamento climatico e dei rischi sul patrimonio culturale.

Considerazioni conclusive

Il problema della conservazione archeologica non va risolto attraverso imperative prescrizioni di carattere analitico, facilmente strumentalizzabili dai detentori della sicurezza (tecnici ed imprese), ma va perseguito attraverso una capillare diffusione della cultura archeologica tra gli “addetti ai lavori” consentendo nel contempo a tale cultura, attraverso i suoi rappresentanti istituzionali, di esercitare compiutamente l’indispensabile controllo scientifico degli interventi proposti.



Pompei, Teatro grande restaurato: veduta generale (a sin.); particolare della cavea (a dx.)