

SAFE MONUMENTS

Tra Conservazione e Sicurezza
di Edifici Monumentali e del Costruito Storico
Firenze 28 Marzo 2014

ANALISI STRUTTURALE DEL "VOLTONE" A LIVORNO

S. Briccoli Bati^a, M. Girardi^b, M. Lucchesi^a, C. Padovani^b, D. Pellegrini^c

^a Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale, Università di Firenze, Firenze, Italia

^b Istituto di Scienza e Tecnologie dell'Informazione "A. Faedo", CNR, Pisa, Italia

^c Dipartimento di Ingegneria dell'Energia, dei Sistemi, del Territorio e delle Costruzioni, Università di Pisa, Pisa, Italia



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
FIRENZE

DICEA

Dipartimento di Ingegneria
Civile e Ambientale



Regione Toscana

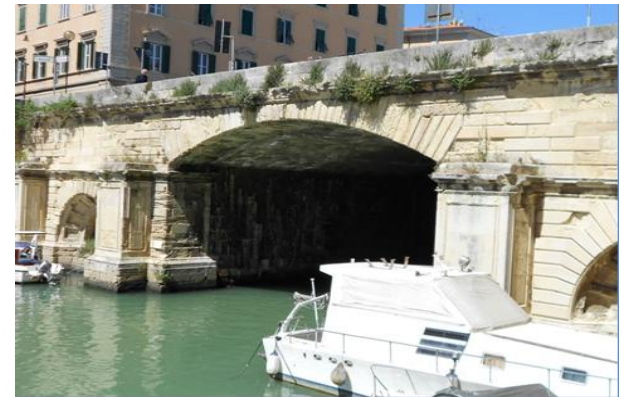


FAS
Fondo Aree
Sottoutilizzate
2007-2013



Caso studio : il 'Voltone' in Livorno, Italia

Il “**Voltone**”, la volta sottostante Piazza della Repubblica di Livorno sotto la quale scorre il canale del Fosso Reale, è una struttura, completamente in muratura, che si estende per una lunghezza complessiva di oltre 220 metri ed è costituita da due muri perimetrali ad altezza variabile su cui è impostata una volta fortemente ribassata



L’analisi della sicurezza statica della costruzione sotto l’azione dei carichi permanenti e accidentali è stata condotta attraverso l’uso del programma FEM **NOSA-ITACA** sviluppato nell’ambito del Progetto della Regione Toscana **“Strumenti informatici per la modellazione e la verifica del comportamento strutturale di costruzioni antiche”**.

Il codice **NOSA-ITACA** [1]

- **NOSA-ITACA** codice per lo studio del comportamento statico e dinamico della costruzioni in muratura nato dalla fusione dell'interfaccia grafica open-source SALOME e dal codice NOSA (implementato da ISTI-CNR di Pisa) ;
- **La muratura** è descritta come un materiale non lineare elastico con resistenza a trazione nulla e limitata resistenza a compressione (*masonry-like materials*).

-
- Analisi statica
 - Analisi dinamica

- Campo di tensioni
- Carico di collasso
- Deformazioni elastiche, di frattura e di schiacciamento
- Campo di spostamenti
- Time- histories

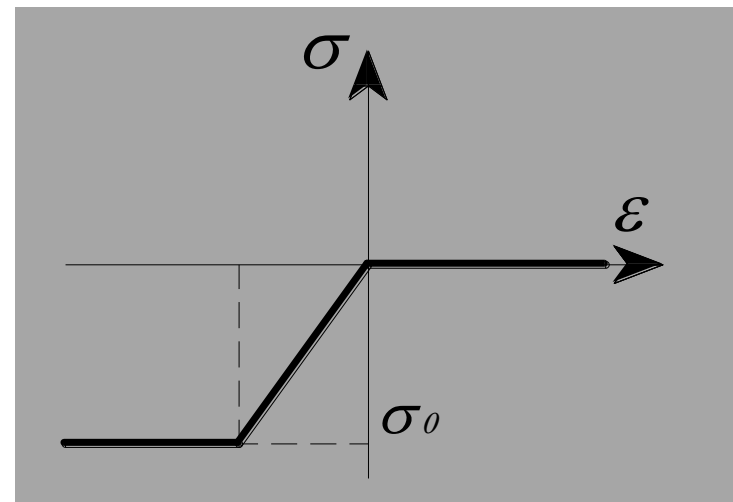
- Libreria NOSA-ITACA: beam, shell, elementi 2D e 3D (35 elementi)

[1] www.nosaitaca.it

Il codice **NOSA-ITACA** [1]

Equazione costitutiva dei materiali *masonry-like*

- E tensore di deformazione infinitesima,
- T tensore di tensione di Cauchy,
- E^e deformazione elastica ,
- E^f deformazione di frattura,
- E^c deformazione di schiacciamento,
- E, ν modulo elastico e modulo di Poisson,
- $\sigma_0 < 0$ massima resistenza a compressione della



Dato E , è possibile ricavare E^f, E^c, T tali che

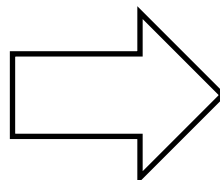
$$E = E^e + E^f + E^c$$

$$E^f \cdot E^c = 0$$

$$T = \frac{E}{1 + \nu} \left[E^e + \frac{\nu}{1 + \nu} \text{tr}(E^e) I \right]$$

$$T \cdot E^f = (T + \sigma_0 I) \cdot E^c = 0$$

$$T, E^c \in \text{Sym}^-, E^f \in \text{Sym}^+, (T - \sigma_0 I) \in \text{Sym}^+$$



$$T = \hat{T}(E), \quad D_E \hat{T}(E)$$

[1] www.nosaitaca.it

Fase 1: Analisi dello stato di fatto

Scopo: determinazione degli spessori degli elementi murari e caratterizzazione fisico meccanica dei materiali costituenti.

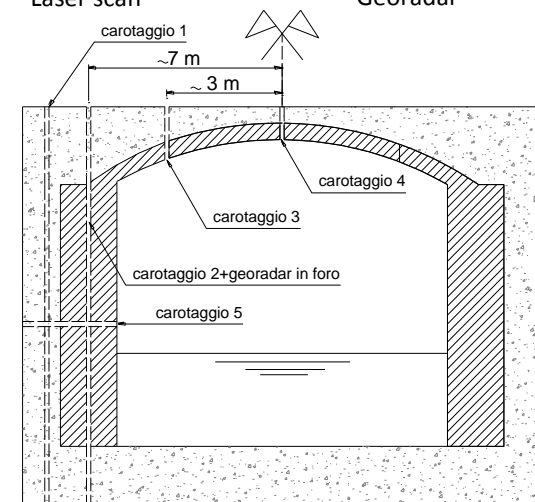
- Campagna di indagini non distruttive (rilievo laser scan, georadar e ricostruzione grafica);
- Estrazione di quattro “carote” verticali (due dal paramento laterale e dal terreno circostante, due dalla volta rispettivamente in chiave e alle reni);
- Estrazione di due carote orizzontali dai muri laterali;
- Relazione storica e archeologica
- Prove sperimentali di caratterizzazione meccanica sui campioni estratti



Laser scan



Georadar



Posizionamento dei carotaggi

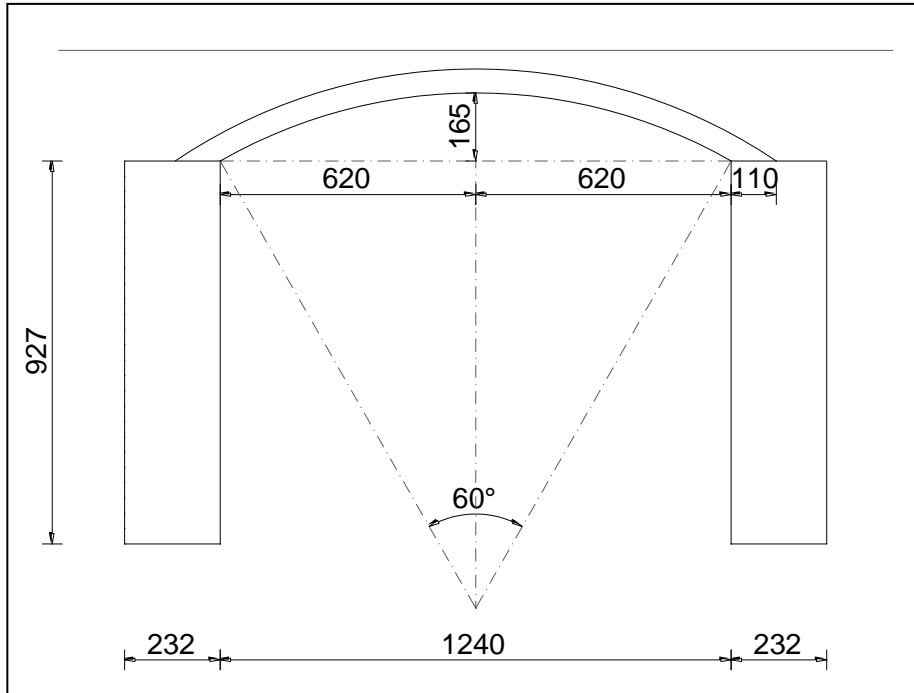


Carotaggio verticale



Campioni

Fase 1: Analisi dello stato di fatto



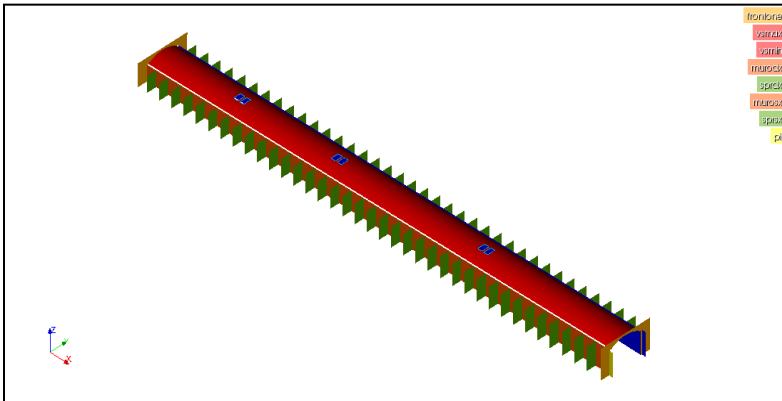
Sezione trasversale (misure espresse in cm)

Caratteristiche geometriche

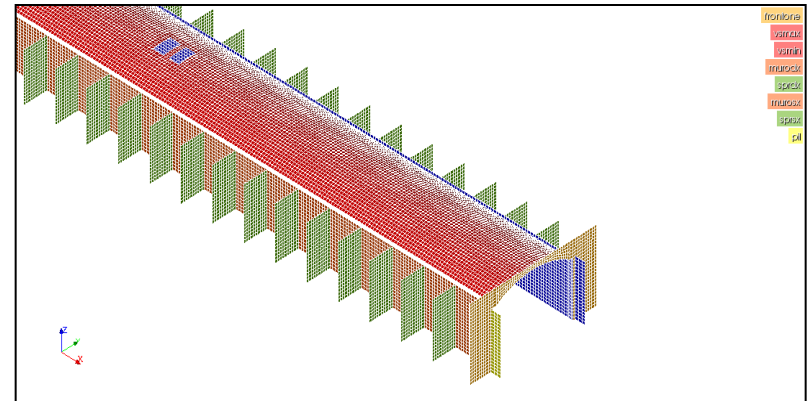
- Volta con spessore di circa $0.41 \div 0.43$ m costante lungo la sezione trasversale e lungo lo sviluppo longitudinale ad eccezione delle parti terminali (in corrispondenza delle quali è posizionata la sede stradale) dove lo spessore è di circa 0.7 m ;
- Muri laterali ad altezza variabile con spessore pari a 2.32 m;
- Volta fortemente ribassata (freccia pari a circa 1.65 m su 12.40 m di luce);
- Pareti di rinforzo ortogonali alle pareti longitudinali (speroni) posti ad interasse di circa 5.8 m [2].

[2] C. Errico, M. Montanelli, "Il progetto del Voltone". Private communication, 2012

Fase 2: Analisi numerica



Modello F.E.M.

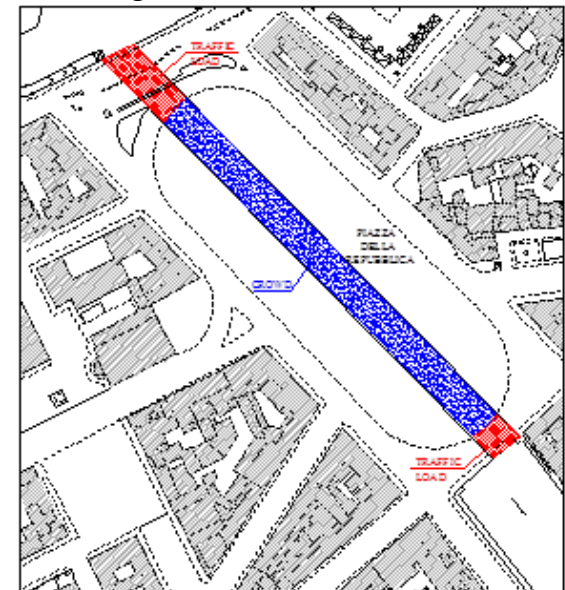


Dettaglio della mesh

Caratteristiche del modello agli elementi finiti : 45379 nodes ; 43084 thick-shell elements.

Carichi agenti sulla struttura:

- Carichi permanenti (come il peso proprio degli elementi strutturali " G_1 " e il materiale di riempimento " G_2 ");
- Pressione del terreno " S_t " e pressione idrostatica " S_w " sui muri laterali;
- Carichi accidentali (folla compatta " Q_f " nella parte centrale della piazza, e carichi da traffico " $Q_{k,i}$ " previsti per i ponti di II° categoria nelle parti terminali della piazza dove è posizionata la sede stradale).



Fase 2: Analisi numerica

- Carichi permanenti e accidentali applicati incrementalmente.
- Azione del terreno modellata come un'azione statica equivalente variabile lungo l'altezza dei muri.



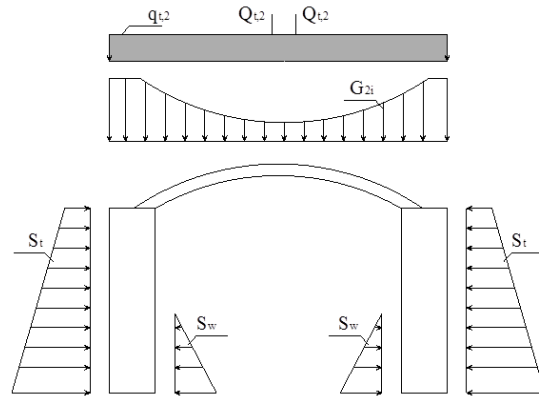
CASO 1

- Carichi permanenti e spinta del terreno in condizione a riposo
- Carichi accidentali e spinta del terreno mantenuta costante e pari a quella valutata per i carichi permanenti

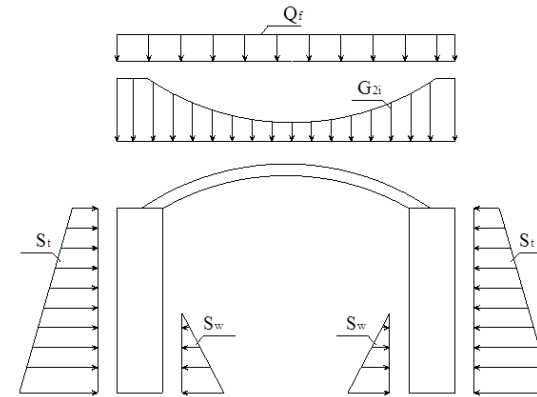
CASO 2

- Carichi permanenti e spinta del terreno in condizione a riposo
- Carichi accidentali e incremento di spinta del terreno pari al 30% della spinta passiva.

Fase 2: Analisi numerica



Schema di carico nelle parti terminali della piazza



Schema di carico nella parte centrale della piazza

I **carichi**, mostrati in figura, sono applicati alla struttura secondo la combinazione fondamentale prevista, per gli stati limite ultimi, dall'attuale D.M.2008 ed espressa dalla relazione seguente :

$$\gamma_{G1} \cdot G_1 + \gamma_{G2} \cdot G_2 + \gamma_{Q1} \cdot Q_{k1} + \gamma_{Q2} \cdot \psi_{02} \cdot Q_{k2} + \gamma_{Q3} \cdot \psi_{03} \cdot Q_{k3} + \dots$$

Le **analisi**, di tipo incrementale, sono condotte assumendo la muratura come un materiale elastico non lineare con resistenza a trazione uguale a zero e limitata resistenza a compressione le cui caratteristiche sono riportate nella tabella seguente :

Elemento	Modulo di Young E [daN/m ²]	Resistenza media a taglio τ_c [daN/m ²]	Resistenza media a compressione σ_c [daN/m ²]	Fattore parziale di sicurezza per il materiale	Resistenza a compressione di progetto σ_0 [daN/m ²]
Volta	1.5x10 ⁸	17100	720000	3.0	240000
Muri laterali	1.23x10 ⁸	9700	562500	3.0	187500
Speroni	1.23x10 ⁸	9700	562500	3.0	187500

Fase 3: Valutazione dei risultati e verifiche di sicurezza statica

Le analisi condotte hanno permesso di stimare il campo di tensione, le deformazioni di frattura e di crushing all'interno della struttura e di valutarne la sicurezza statica secondo le indicazioni riportate nelle attuali Normative Tecniche.

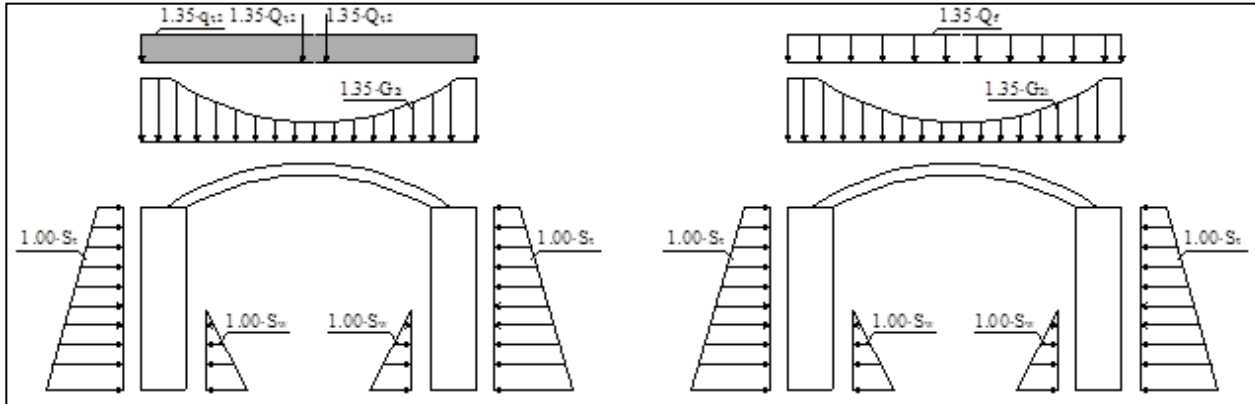
Le verifiche di sicurezza, basate sul metodo dei fattori parziali e implementate all'interno del codice NOSA-ITACA sono espresse dalle seguenti disequazioni :

$$\frac{M_i}{M_{iRd}} \leq 1$$
$$M_i = \int_{-h/2}^{h/2} T_{ii}(t) \cdot t \, dt \quad \text{momento sollecitante per unità di lunghezza}$$
$$M_{iRd} = (h^2 \frac{\sigma_{im}}{2})(1 - \frac{\sigma_{im}}{\sigma_0}) \quad \text{momento resistente per unità di lunghezza}$$

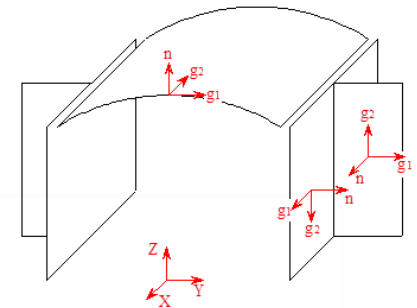
$$\frac{T_{ij}}{f_{ivd}} \leq 1$$
$$f_{ivd} = (\tau_c + 0.4 \cdot \sigma_{im}) / \gamma_m \quad \text{tensione tangenziale di progetto}$$

$$\frac{V_{ij}}{V_{ijRd}} \leq 1$$
$$V_{ij} = \int_{-h/2}^{h/2} T_{ij}(t) \, dt \quad \text{taglio sollecitante per unità di lunghezza}$$
$$V_{ijRd} = t' \cdot (\tau_c + 0.4 \cdot \sigma'_n) \quad \text{taglio resistente per unità di lunghezza}$$

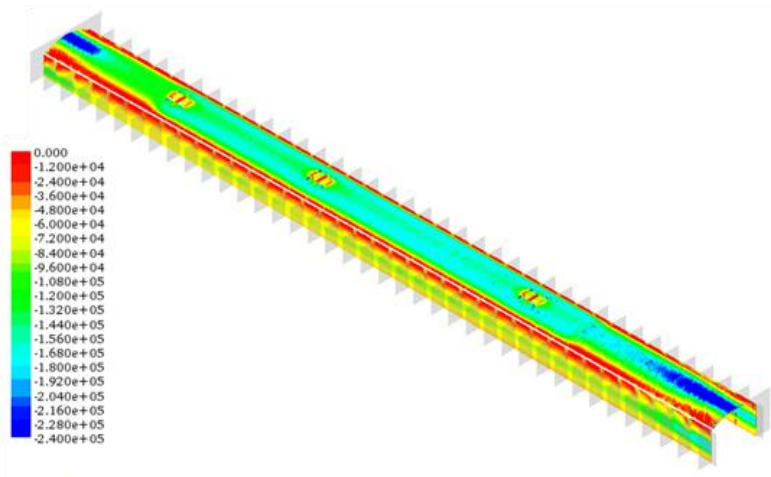
Fase 3: Valutazione dei risultati e verifiche di sicurezza statica



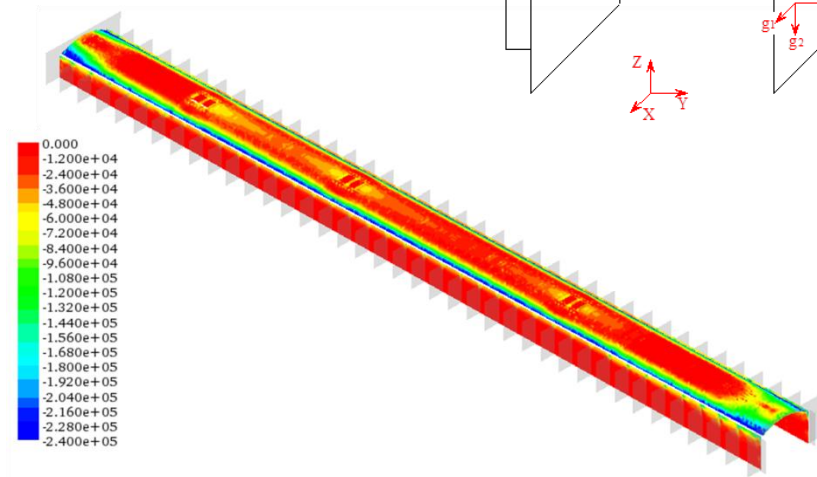
Esempio di combinazione di carichi analizzata.



Risultati ottenuti con **Nosa-Itaca** :

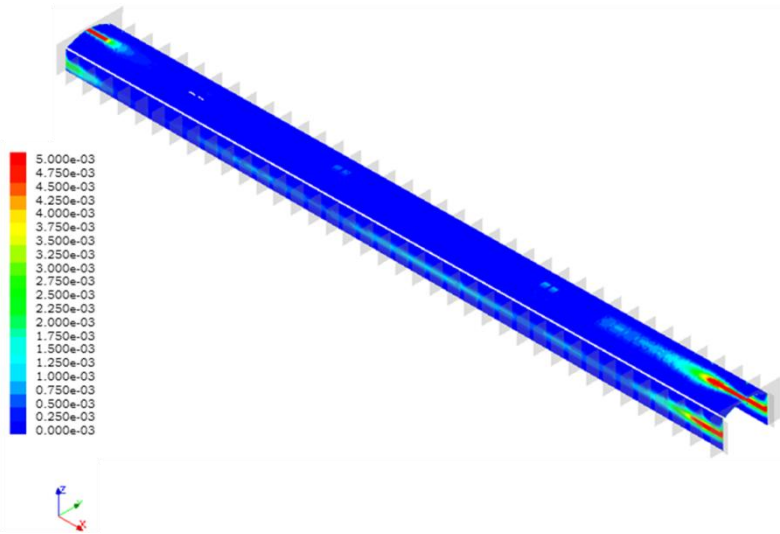


Caso 1. Tensioni T_{11} all'estradosso della volta e tensioni T_{22} all'estradosso dei muri laterali (daN/m²)



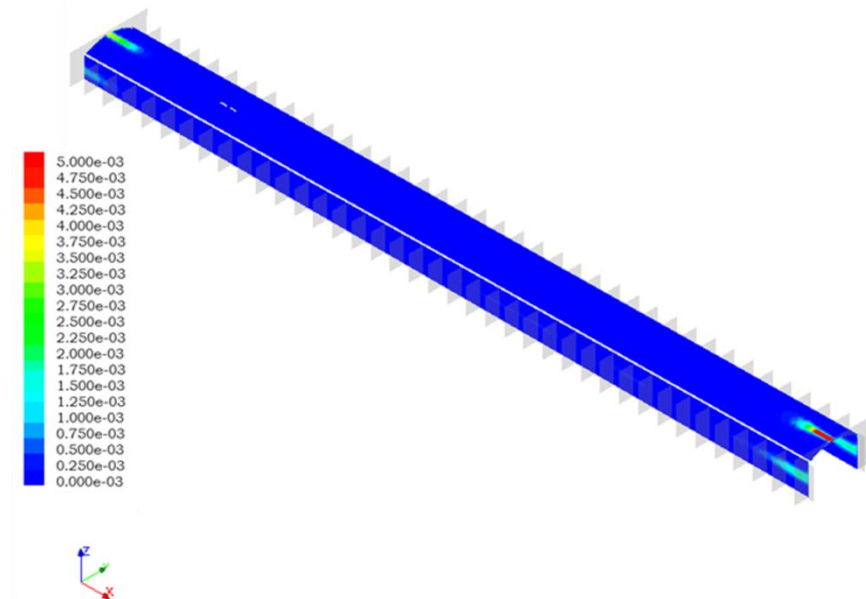
Caso 1. Tensioni T_{11} all'intradosso della volta e tensioni T_{22} all'intradosso dei muri laterali (daN/m²)

Fase 3: Valutazione dei risultati e verifiche di sicurezza statica

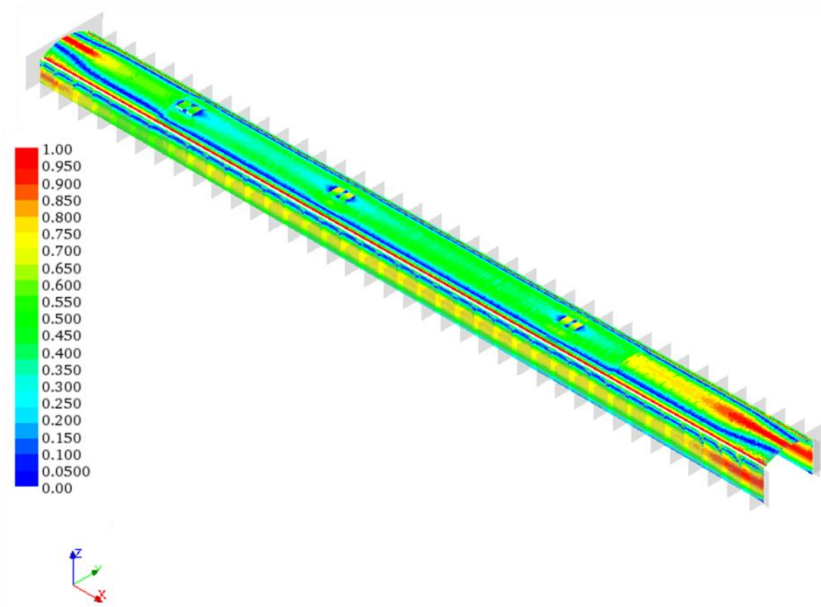


Case 1. Deformazione di frattura E_{11}^f all'intradosso della volta e tensioni E_{22}^f all'intradosso dei muri laterali

Case 2. Deformazione di frattura E_{11}^f all'intradosso della volta e tensioni E_{22}^f all'intradosso dei muri laterali

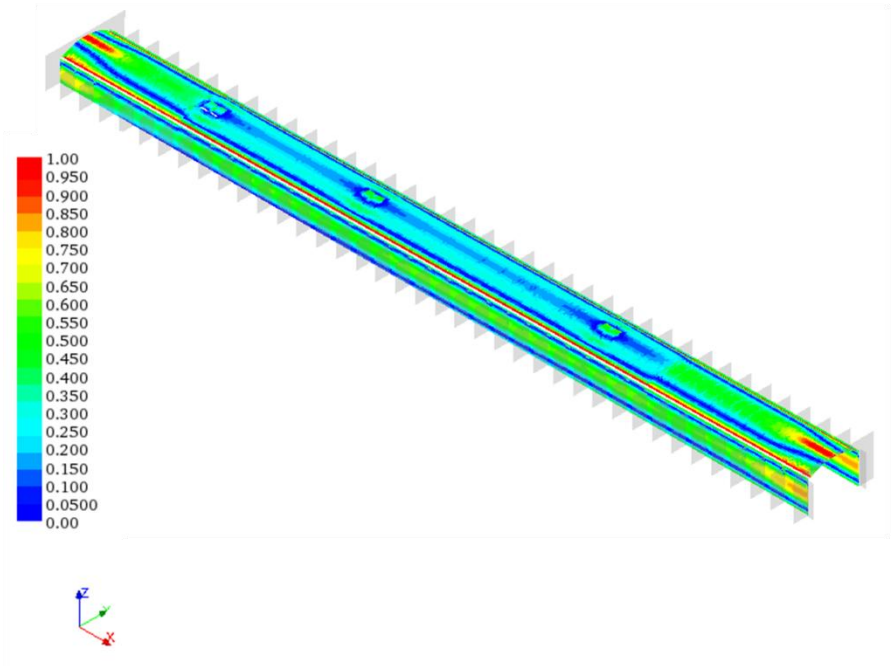


Fase 3: Valutazione dei risultati e verifiche di sicurezza statica

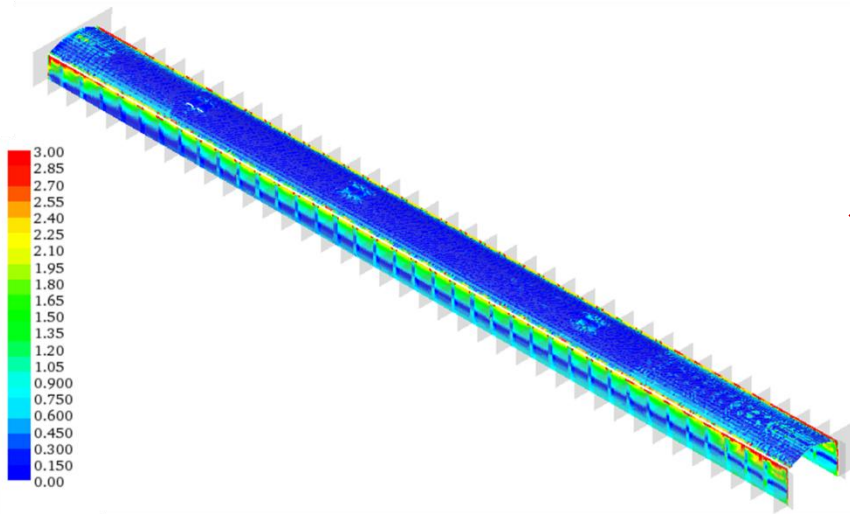


← Case 1. Rapporto M_1/M_{1Rd} nella volta e rapporto M_2/M_{2Rd} nei muri laterali

Case 2. Rapporto M_1/M_{1Rd} nella volta e rapporto M_2/M_{2Rd} nei muri laterali



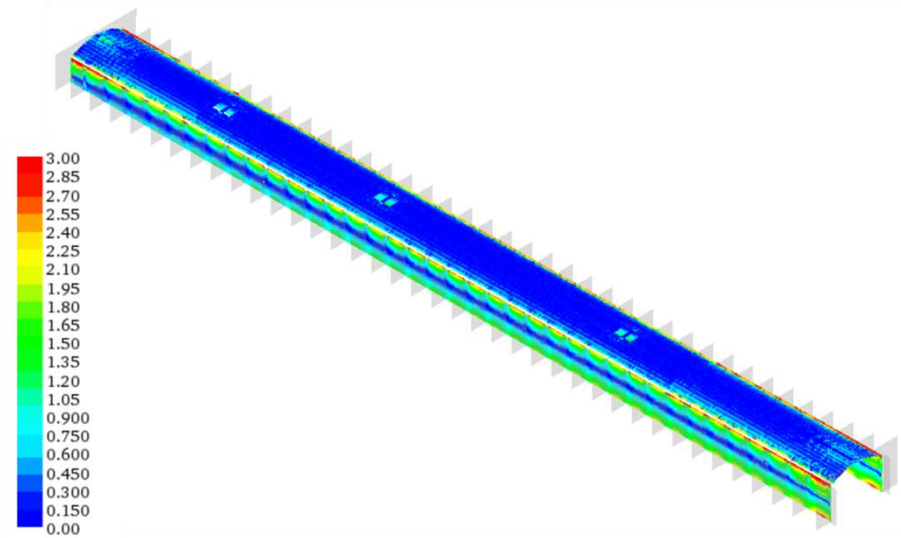
Fase 3: Valutazione dei risultati e verifiche di sicurezza statica



Case 1. Rapporto T_{13}/f_{1vd} nella volta e rapporto T_{23}/f_{2vd} nei muri laterali



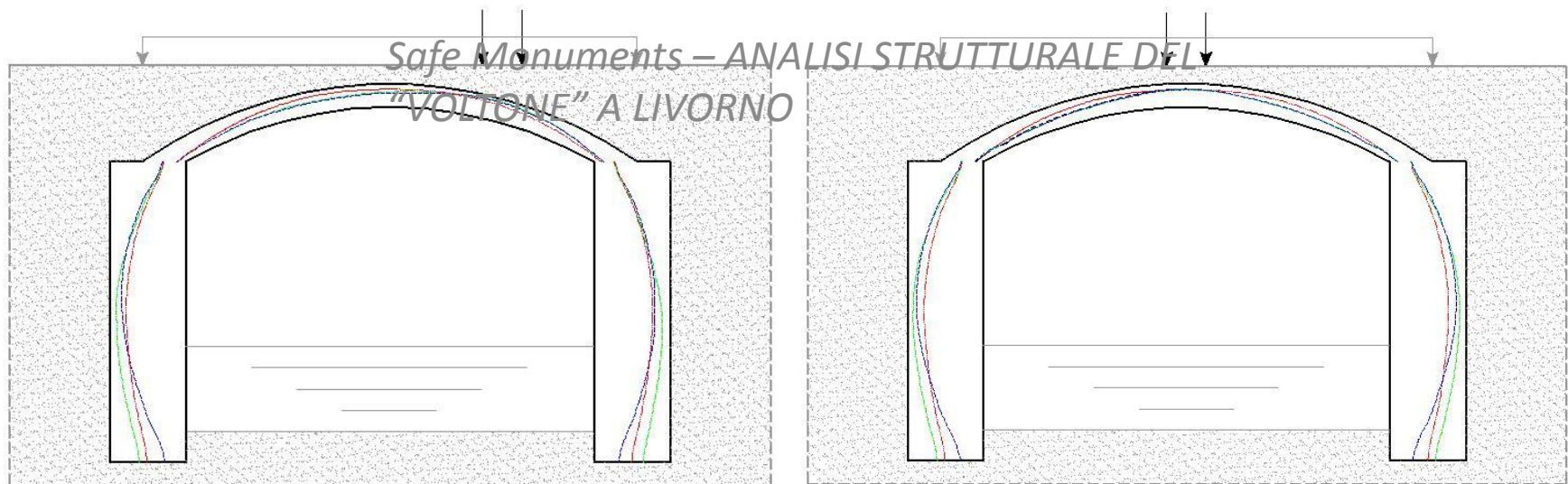
Case 2. Rapporto V_{13}/V_{13Rd} nella volta e rapporto V_{23}/V_{23Rd} nei muri laterali



Fase 3 : Valutazione dei risultati e verifiche di sicurezza statica

I **risultati** vengono riportati inoltre in termini di curva delle pressioni, che permette di valutare graficamente la sicurezza statica di una volta in muratura. Infatti una curva delle pressioni ben contenuta all'interno dello spessore ridotto della volta, è indice di sicurezza statica. Lo spessore ridotto è espresso mediante la seguente relazione :

$$t' = \frac{h}{2} \left(1 - \frac{N_i}{N_0} \right)$$



Parte terminale del voltone: curva delle pressioni per carichi permanenti (linea rossa) e per carichi da traffico (linea verde caso 1 e linea blu caso 2)

Conclusioni

- NOSA-ITACA è un codice FEM per lo studio del comportamento statico e dinamico di costruzioni in muratura
- La muratura è modellata con l'equazione costitutiva dei materiali *masonry-like* con debole resistenza a trazione e limitata (o infinita) resistenza a compressione.
- Il codice NOSA-ITACA è stato impiegato per l'analisi strutturale del Voltone di Livorno.
- I risultati salienti dell'analisi mostrano:
 - un buon contenimento della curva delle pressioni all'interno dello spessore della volta, anche in presenza di carichi da traffico.
 - contributo fondamentale fornito dai muri di contrafforte alla stabilità globale della struttura.
 - assenza di fenomeni fessurativi passanti visibili, confermata dai calcoli, e dai risultati delle prove di laboratorio che attestano la buona qualità dei materiali costituenti.
 - alcune criticità, messe in luce dalle verifiche di sicurezza, nei muri longitudinali e nei contrafforti, legate ai notevoli valori del taglio e al raggiungimento di elevati valori delle eccentricità nella mezzeria dei muri longitudinali

Ringraziamenti

Questo lavoro è stato condotto nell'ambito del Progetto NOSA-ITACA : Strumenti informatici per la modellazione e la verifica del comportamento strutturale di costruzioni antiche (PAR FAS Regione-Toscana).

Grazie per l'attenzione

Dott. Ing. Daniele Pellegrini