



FABRE – Consorzio di ricerca per la valutazione di ponti viadotti e altre strutture

*Ponti, viadotti e gallerie esistenti: ricerca, innovazione e applicazioni*

2- 4 Febbraio 2022, Lucca



# Strategie di modellazione a macro-elementi di ponti ad arco in muratura

Francesco Cannizzaro<sup>1</sup>, Salvatore Caddemi<sup>1</sup>, Ivo Calì<sup>1</sup>, Nunzio Catania<sup>2</sup>,

Sandro Liseni<sup>1</sup>, Giuseppe Occhipinti<sup>2</sup>, Davide Rapicavoli<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Università degli Studi di Catania*

<sup>2</sup>*FABRE*



Università  
di Catania

# La Sicurezza Strutturale di Ponti ad Arco in Muratura



*Ponte Ferroviario al km 326 linea Caltagirone – Gela Sicilia (Italia) Costruito tra il 1957 e il 1979 (08.05.2011)*

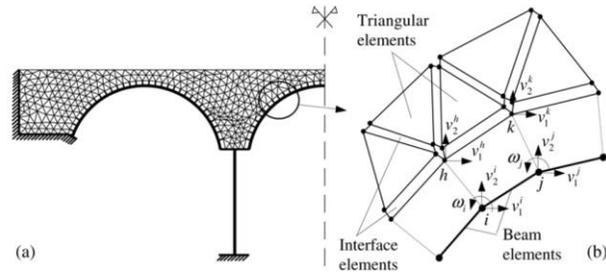


*Ponte Ferroviario Marcellinara, Catanzaro-Lamezia, Amato (Italia), (22.11.2011)*

*Ponte in muratura crollato nel **Febbraio 2010** a seguito di terremoto in Cile*

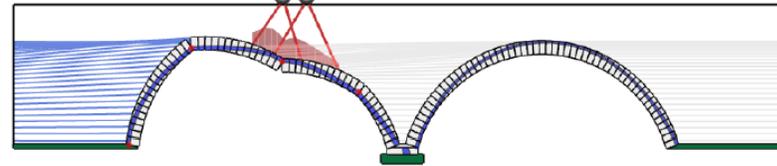
# Strategie Computazionali

## ANALISI LIMITE FEM



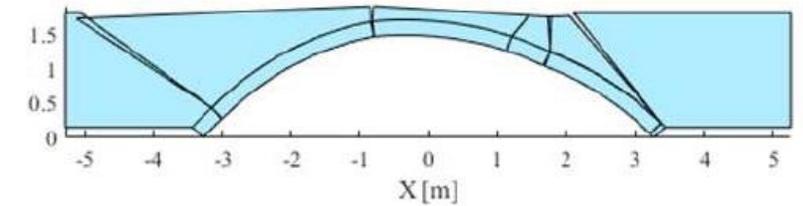
A. Cavicchi, L. Gambarotta, Collapse analysis of masonry bridges taking into account arch–fill interaction, Eng. Struct. 27 (2005) 605–615.

## ANALISI LIMITE 2D SOFTWARE RING



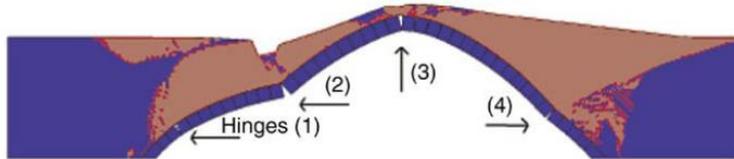
M. Gilbert, RING Theory and modelling guide. Computational limit analysis and design unit, University of Sheffield, UK, 2005.

## ANALISI LIMITE BASATA SU FUNZIONI NURBS-BASED



A. Chiozzi, N. Grillanda, G. Milani, and A. Tralli. Safety assessment of masonry bridges through a fast kinematic limit analysis procedure. 10th International Masonry Conference. Milan, Italy, July 9-11, 2018

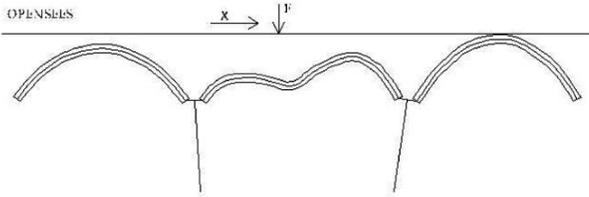
## ANALISI LIMITE CON MODELLI DI INTERFACCE AD ATTRITO



G.A. Drosopoulos, G.E. Stavroulakis, C.V. Massalas. Limit analysis of a single span masonry bridge with unilateral frictional contact interfaces. Engineering Structures 28 (2006) 1864–1873

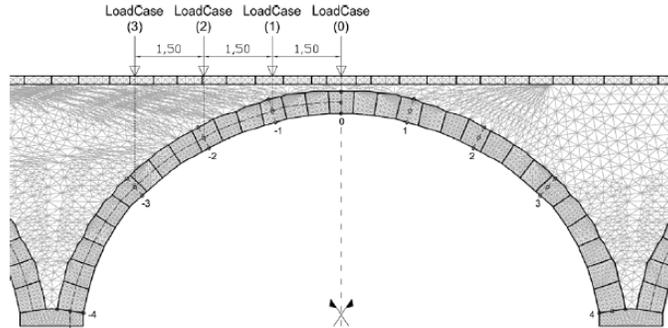
# Strategie Computazionali

## ANALISI STATICA NONLINEARE CON ELEMENTI CON MODELLI A FIBRE



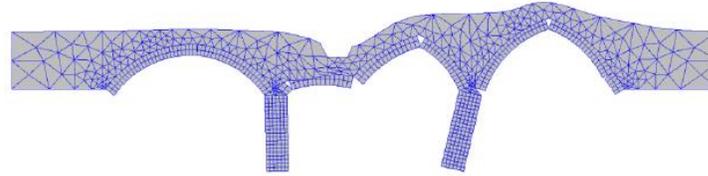
**G. De Felice.** Load-carrying capacity of multi-span masonry arch bridges having limited ductility. Structural Analysis of Historic Construction, T.&F., London, 2008, ISBN 978-0-415-46872-5

## ANALISI STATICA NONLINEARE DEM



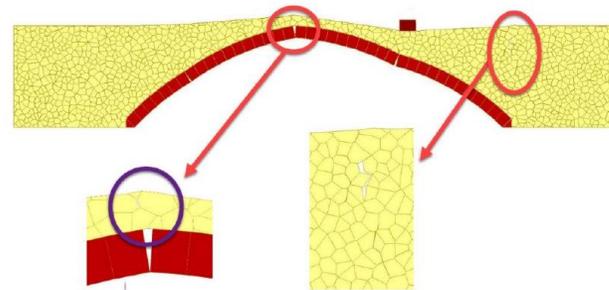
**A.R. Tóth, Z. Orbán, K. Bagi,** Discrete element analysis of a stone masonry arch, Mechanics Research Communications 36 (2009) 469–480.

## ANALISI STATICA NONLINEARE FEM CON MODELLI A PARTIZIONI ALLA MESOSCALA



**E. Tubaldi, E. Minga, L. Macorini, B A. Izzuddin** Nonlinear mesoscale analysis of multi-span masonry bridges. 10th International Masonry Conference. Milan, Italy, July 9-11, 2018

## ANALISI STATICA NONLINEARE DEM



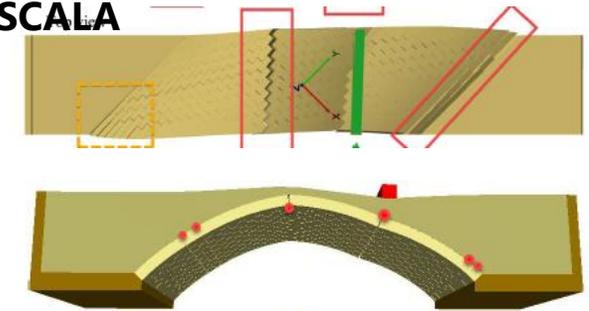
**V. Sarhosis, T. Forgács and J. V Lemos.** Modelling backfill in masonry arch bridges: A DEM approach. ARCH 2019 - 9th International Conference on Arch Bridges, Porto, October 2-4, 2019

## ANALISI STATICA NONLINEARE CON ELEMENTI RIGIDI E INTERFACCE



**G.Milani, P.B. Lourenco;** 3D nonlinear behavior of masonry arch bridges, Comp. & Struct. 110–111 (2012) 133–150.

## ANALISI STATICA NONLINEARE DEM ALLA MESOSCALA

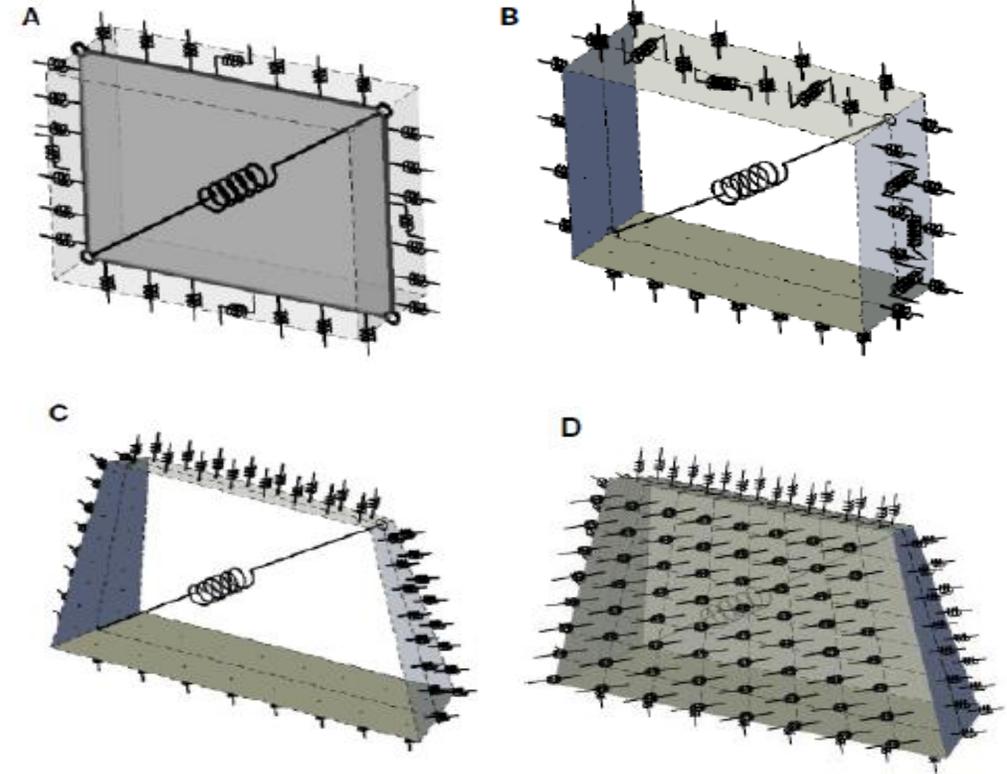


**T. Forgács, V. Sarhosis, S. Ádány.** Discrete element modeling of skew masonry arch bridges taking into account arch ring-backfill interaction. 10th International Masonry Conference Milan, Italy, July 9-11, 2018

## Il Metodo a Macro-Elementi Discreti (DMEM)

La struttura viene suddivisa in **macro-porzioni** (identificati come **macro-elementi**) il cui comportamento è simulato mediante un *Modello Meccanico Equivalente*

- A) **Macro-Elemento 'piano'** ([1], 2012): simula il comportamento piano di pareti murarie
- B) **Macro-Elemento 3D** ([2], 2017): introduce il comportamento fuori-piano di pareti murarie piane
- C) **Macro-Elemento 3D irregolare** ([3], 2018): introduce la possibilità di simulare il comportamento nonlineare di strutture a geometria curva (i.e. archi, volte, cupole)
- D) **Macro-Elemento 3D con interfacce su tutte le facce** ([4], 2018): introduce l'interazione 3D su tutte le facce del macro-elemento



[1] I. Calì, M. Marletta, B. Pantò 2012. A new discrete element model for the evaluation of the seismic behaviour of unreinforced masonry buildings. *Engineering Structures* 40 327–338.

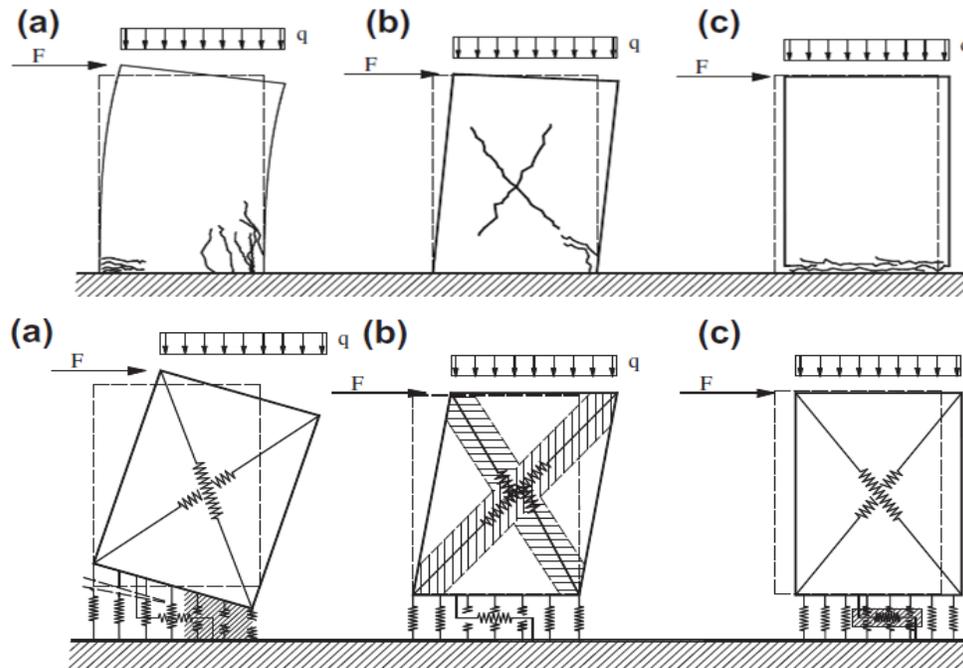
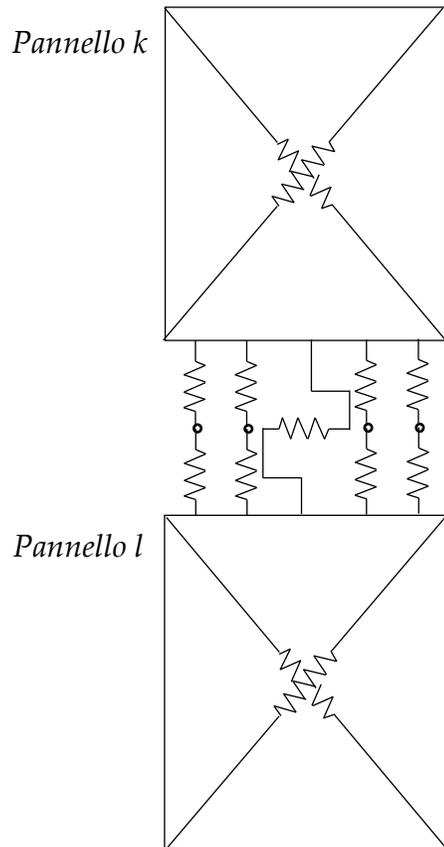
[2] Pantò, B., Cannizzaro, F., Calì, I., Lourenço, P.B. Numerical and Experimental Validation of a 3D Macro-Model for the In-Plane and Out-Of-Plane Behavior of Unreinforced Masonry Walls (2017) *International Journal of Architectural Heritage*.

[3] Cannizzaro, F., Pantò, B., Caddemi, S., Calì, I. A Discrete Macro-Element Method (DMEM) for the nonlinear structural assessment of masonry arches (2018) *Engineering Structures*.

[4] S. Caddemi, I. Calì, F. Cannizzaro, D. D'Urso, G. Occhipinti, B. Pantò, G. Pisanelli, D. Rapisavoli, G. Spirolazzi, R. Zurlo. A 'parsimonious' 3d discrete macro-element method for masonry arch bridges – (2018) Conference: 10th IMC - International Masonry Conference, Milan (Italy), 9-11 July 2018

# Il Metodo a Macro-Elementi Discreti (DMEM): comportamento piano

Modello originariamente proposto da **Pantò and Caliò (2003)**, simula il comportamento nonlineare di pareti piane caricate nel proprio piano



**Meccanismi di collasso tipici di strutture murarie**

- a) Rocking;
- b) Meccanismo di taglio per fessurazione diagonale;
- c) Meccanismo di taglio per scorrimento.

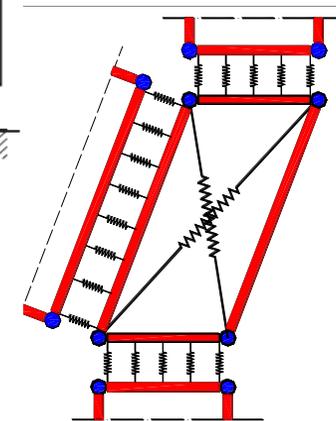


**Macro-Elemento**

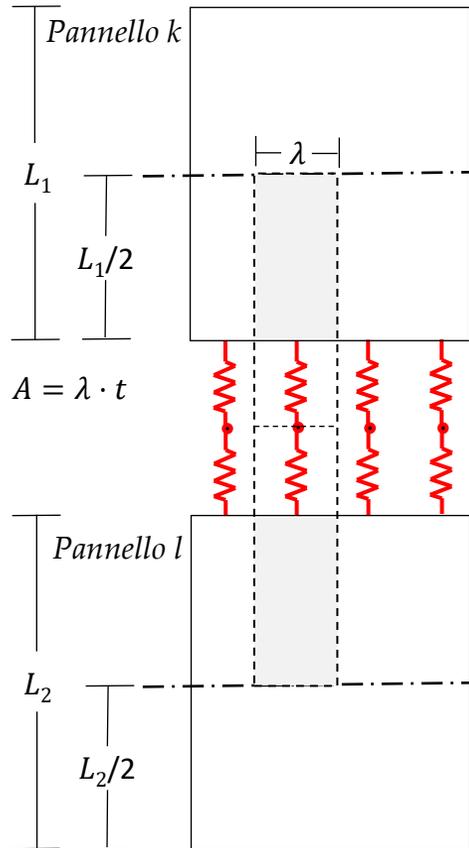
- b) Links nonlineari diagonali

**Interfacce**

- a) Links nonlineari per il comportamento a pressoflessione;
- c) Links nonlineari per il comportamento a scorrimento.

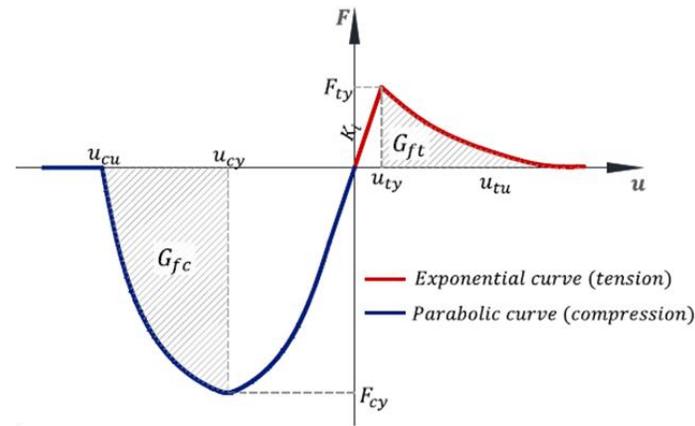
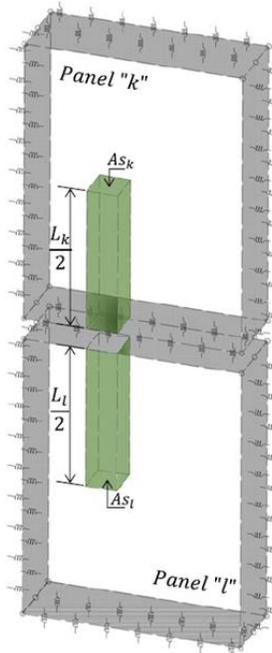


# Procedure di calibrazione link ortogonali: approccio a fibre

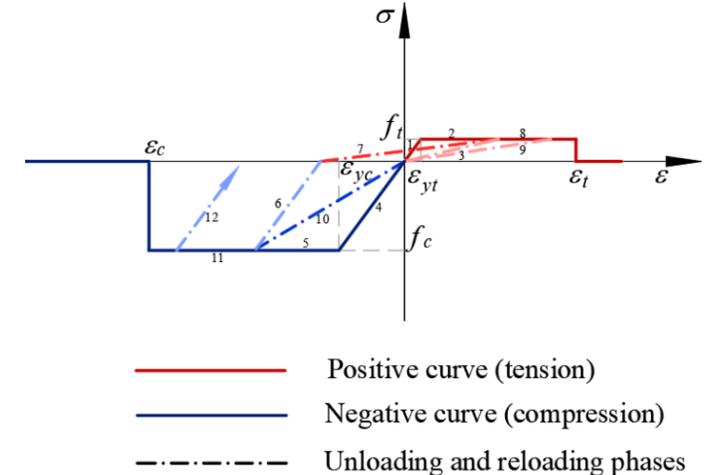


a) *Links nonlineari a pressoflessione: viene adottato un approccio a fibre per la calibrazione dei link*

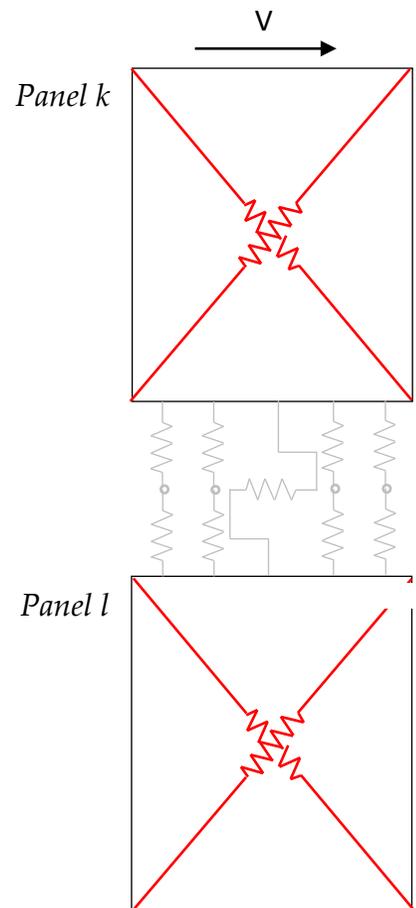
L'interazione tra macro-elementi adiacenti è concentrata in interface discrete a spessore nullo.



	Link 1 Pannello k	Link 2 Pannello l	Link equivalente
Rigidezza	$K_1 = \frac{EA}{L_1/2}$	$K_2 = \frac{EA}{L_2/2}$	$K = \frac{K_1 \cdot K_2}{K_1 + K_2}$
Resistenza a compressione	$F_{cy1} = \sigma_{c,1} A$	$F_{cy2} = \sigma_{c,2} A$	$F_{cy} = \min \{F_{cy1}, F_{cy2}\}$
Resistenza a trazione	$F_{ty1} = \sigma_{t,1} A$	$F_{ty2} = \sigma_{t,2} A$	$F_{ty} = \min \{F_{ty1}, F_{ty2}\}$
Spostamento ultimo a compressione	$u_{cu1} = \varepsilon_{cu} \frac{L_1}{2}$	$u_{cu2} = \varepsilon_{cu} \frac{L_2}{2}$	$u_{cu} = \min \left\{ \begin{array}{l} u_{cu1} + u_{c,el,2} \\ u_{cu2} + u_{c,el,1} \end{array} \right.$
Spostamento ultimo a trazione	$u_{tu1} = \varepsilon_{tu} \frac{L_1}{2}$	$u_{tu2} = \varepsilon_{tu} \frac{L_2}{2}$	$u_{tu} = \min \left\{ \begin{array}{l} u_{tu1} + u_{t,el,2} \\ u_{tu2} + u_{t,el,1} \end{array} \right.$

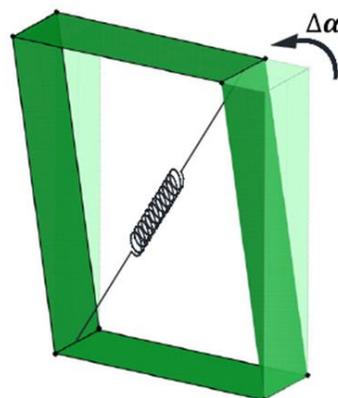


# Procedure di calibrazione link diagonali: equivalenza col continuo equivalente



## b) Links nonlineari diagonali:

Il comportamento a taglio per fessurazione diagonale del macro-elemento è ottenuto adottando un legame costitutivo elasto-plastico ottenuto imponendo un'equivalenza con il corrispondente continuo (lastra omogenea equivalente). La resistenza è funzione della tensione normale agente  $\sigma_0$ , in accordo a domini di resistenza alla Mohr-Coulomb o Turnsek-Cacovic



Rigidezza:

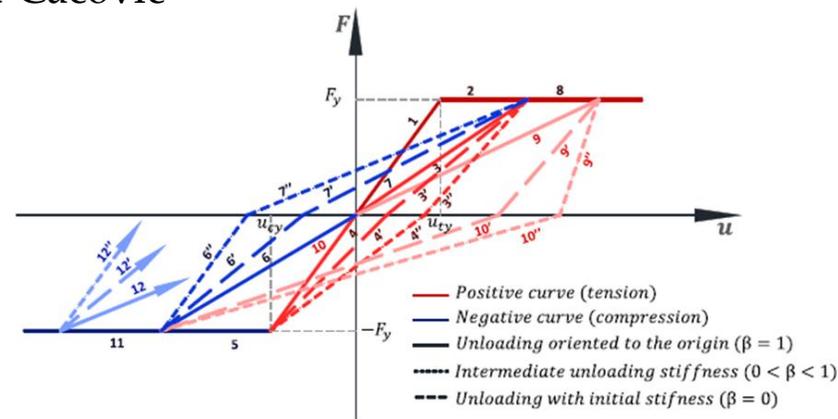
$$K_{diag} = \frac{G \cdot A_t}{2h \cdot \cos^2 \alpha}$$

Resistenza:

$$F_{y,diag} = \frac{f_v(\sigma_0) \cdot A_t}{2 \cos \alpha}$$

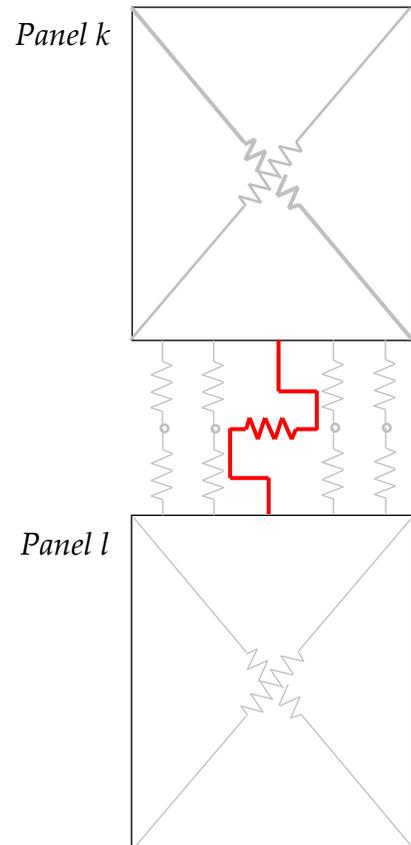
Dominio alla Mohr-Coulomb:  $f_v(\sigma_0) = f_{v0} + \mu_c \sigma_0$

Dominio alla Turnsek-Cacovic:  $f_v(\sigma_0) = \frac{f_t}{b} \sqrt{\frac{\sigma_0}{f_t} + 1}$



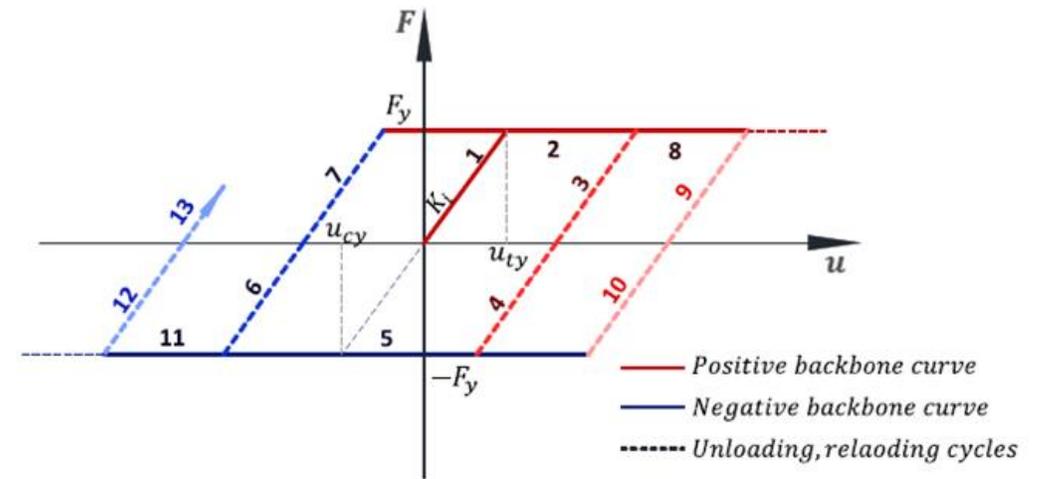
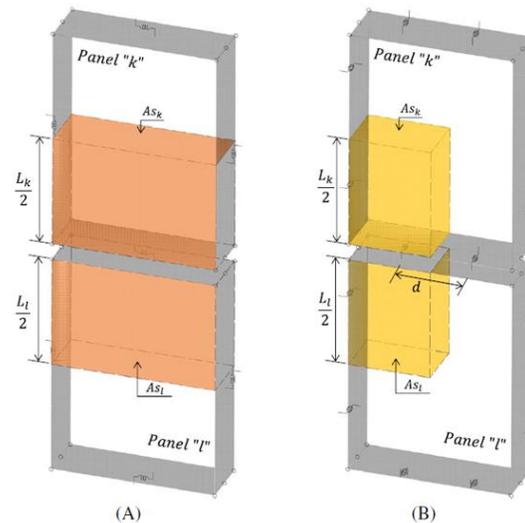
# Procedure di calibrazione link a scorrimento: approccio a fibre

$$F_{lim} = (c + \mu\sigma_0) A_0$$



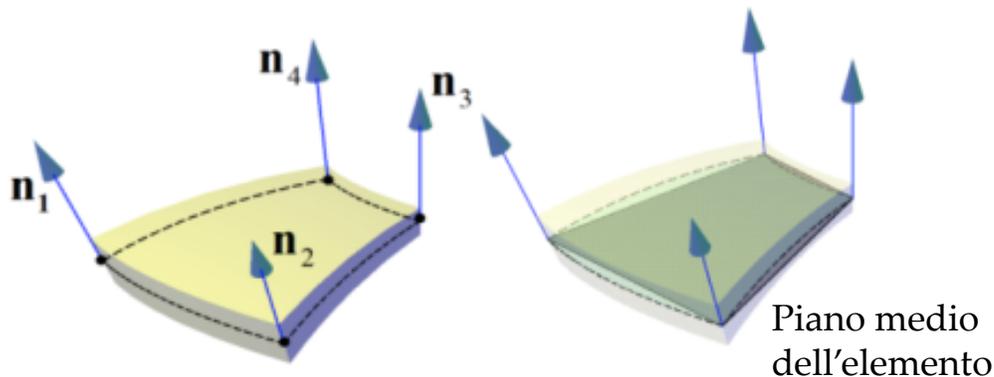
**Links nonlineari a scorrimento:** l'interazione a scorrimento tra due macro-elementi adiacenti è valutata adottando una legge costitutiva elasto-plastica dipendente dall'azione normale agente sull'interfaccia, e basata su un dominio di resistenza alla Mohr-Coulomb.

- $c$  cohesion
- $\mu$  friction coefficient
- $\sigma_0$  normal stress
- $A_0$  contact area between adjacents macro-elements

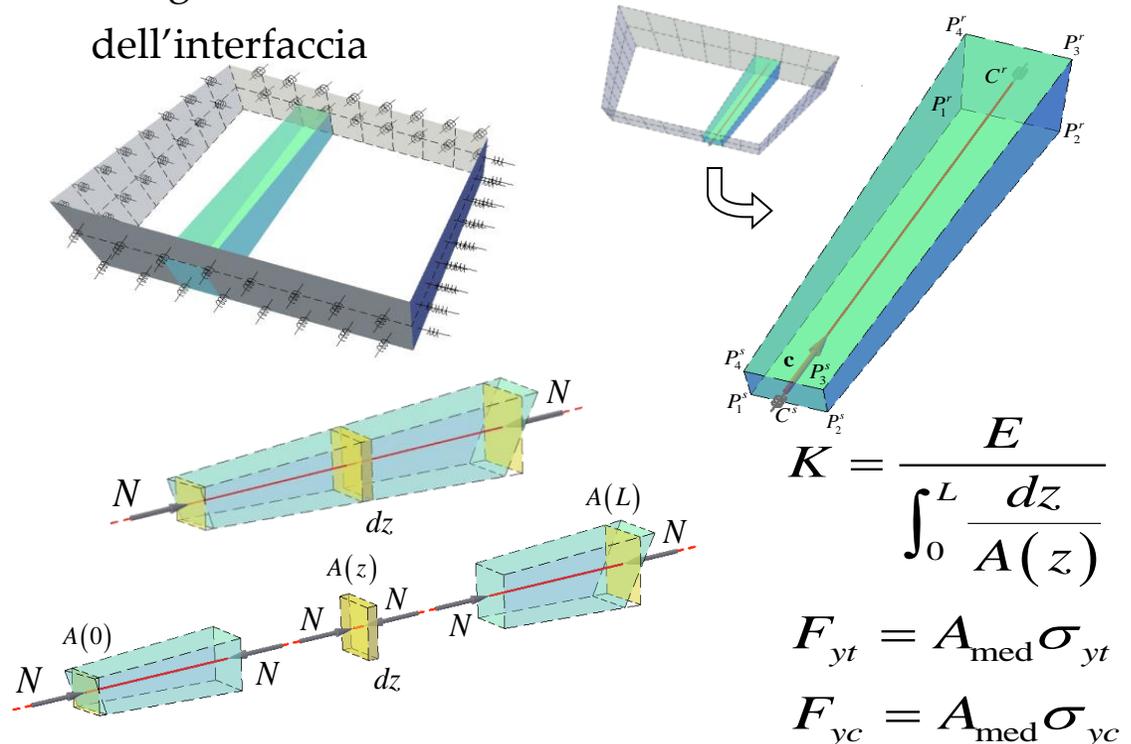


# Il Metodo a Macro-Elementi Discreti (DMEM): elemento 3D irregolare

- La cinematica di ciascun Macro-Elemento è governata da soli 7 gradi di libertà:
  - 6 gradi di libertà associati al moto rigido spaziale;
  - 1 grado di libertà associato alla deformabilità a taglio dell'elemento nel proprio piano.
- La geometria dell'elemento è irregolare
- Le interfacce non sono ortogonali al piano medio dell'elemento
- L'ipotesi di spessore costante è rimossa al fine di poter modellare strutture a spessore variabile



La calibrazione dei link flessionali è ancora basata su un approccio a fibre. Il comportamento membranale e a flessione è governato da link ortogonali all'orientamento della faccia dell'interfaccia



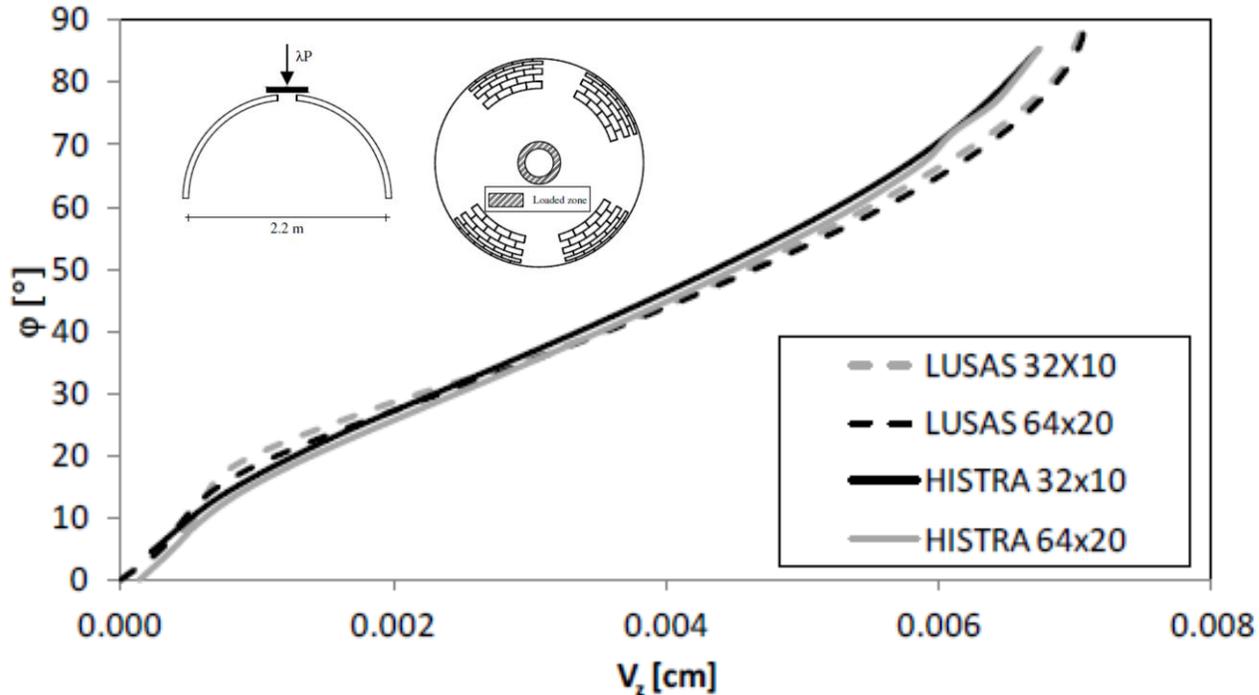
$$K = \frac{E}{\int_0^L \frac{dz}{A(z)}}$$

$$F_{yt} = A_{\text{med}} \sigma_{yt}$$

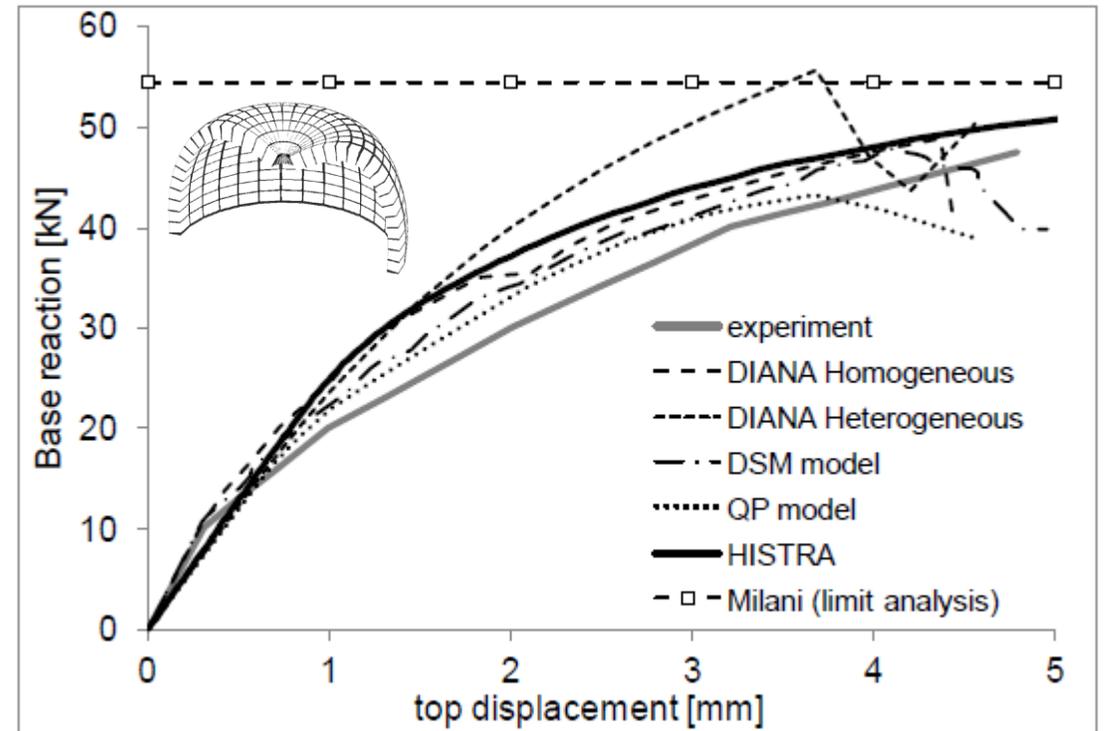
$$F_{yc} = A_{\text{med}} \sigma_{yc}$$

# Validazione numerica dell'elemento 3D irregolare

Comportamento lineare: Spostamenti verticali lungo i meridiani in funzione dell'angolo azimutale  $\phi$



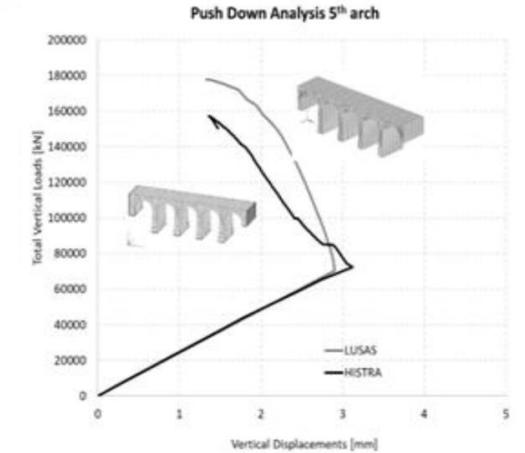
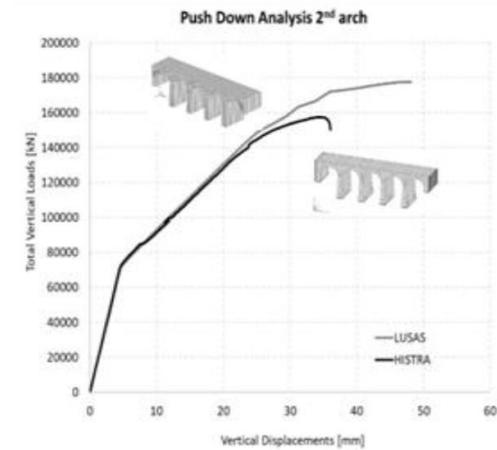
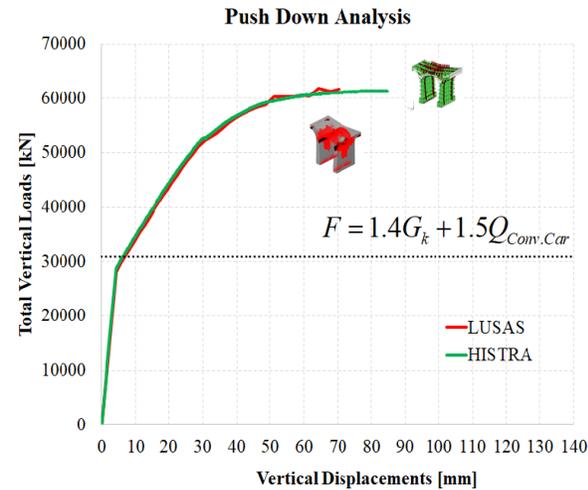
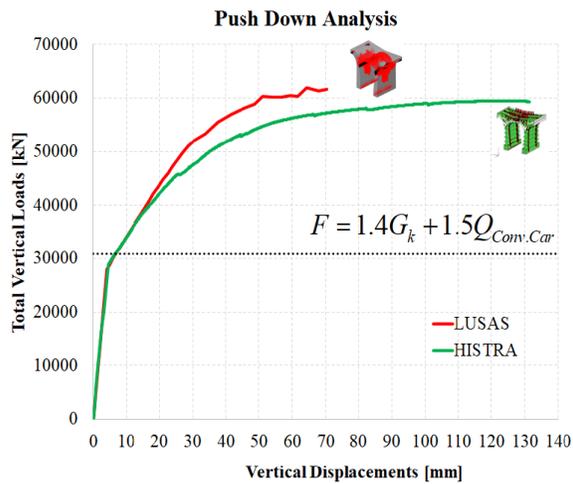
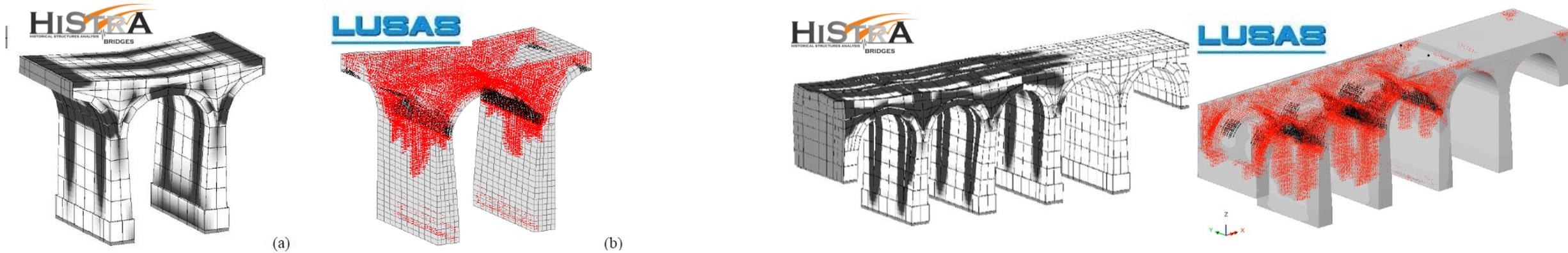
Validazione in campo non lineare: risultati numerici e sperimentali



[5] Salvatore Caddemi, Ivo Calio, Francesco Cannizzaro, Giuseppe Occhipinti, Bartolomeo Pantò. A PARSIMONIOUS DISCRETE MODEL FOR THE SEISMIC ASSESSMENT OF MONUMENTAL STRUCTURES Conference: CIVIL-COMP 2015 The Fifteenth International Conference on Civil, Structural and Environmental Engineering Computing At: Prague, Czech Republic, September 2015

# Strategie di modellazione a macro-elementi di ponti ad arco in muratura

Metodi di analisi non lineare per la valutazione della sicurezza strutturale dei ponti esistenti



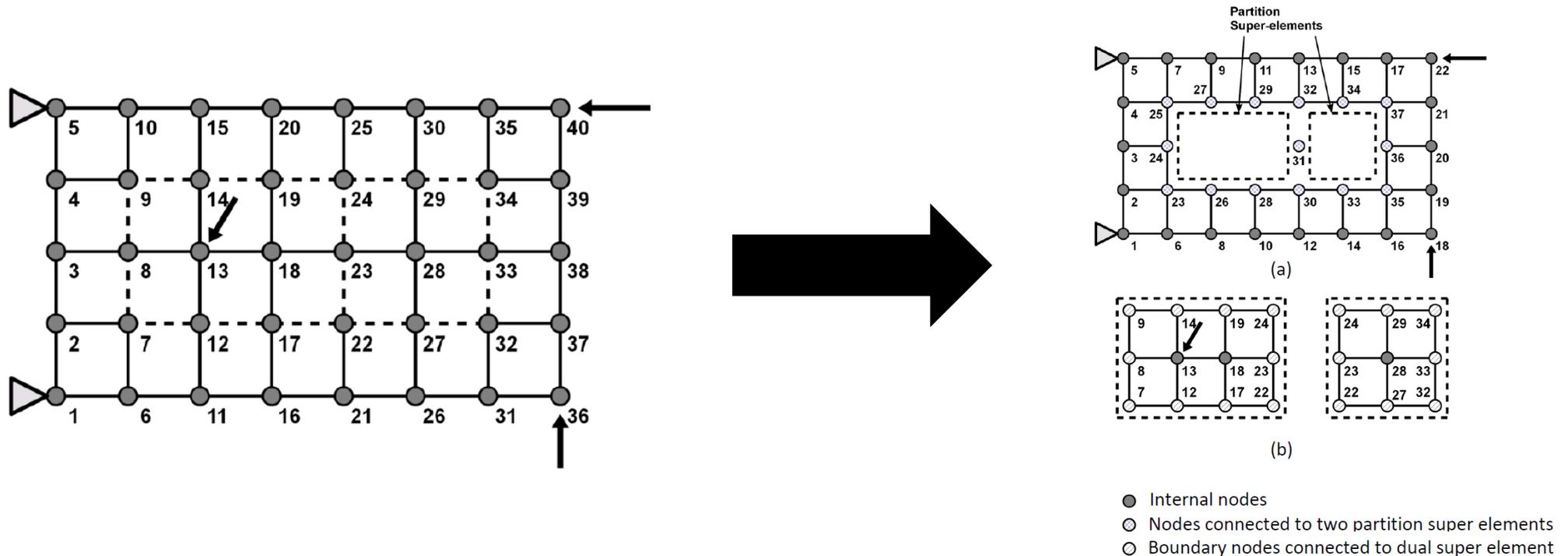
[4] S. Caddemi, I. Calì, F. Cannizzaro, D. D'Urso, G. Occhipinti, B. Pantò, G. Pisanelli, D. Rapicavoli, G. Spirolazzi, R. Zurlo. A 'parsimonious' 3d discrete macro-element method for masonry arch bridges – (2018) Conference: 10th IMC - International Masonry Conference, Milan (Italy), 9-11 July 2018

[6] Salvatore Caddemi, Ivo Calì, Francesco Cannizzaro, Domenico D'Urso, Bartolomeo Pantò, Davide Rapicavoli, Giuseppe Occhipinti. 3d Discrete Macro-modelling Approach For Masonry Arch Bridges - IABSE Symposium 2019 Guimarães Towards a Resilient Built Environment - Risk and Asset Management March 27-29, 2019, Guimarães, Portugal

# Strategia di partizione del modello con struttura gerarchica

Al fine di ottimizzare ulteriormente la strategia di calcolo (che già beneficia dell'impiego di un macro-elemento discreto dotato di un numero essenziale di gradi libertà), viene proposta una strategia numerica che prevede la **partizione geometrica del modello**, finalizzata alla distribuzione dell'onere computazionale su HPC (High Performance Computing).

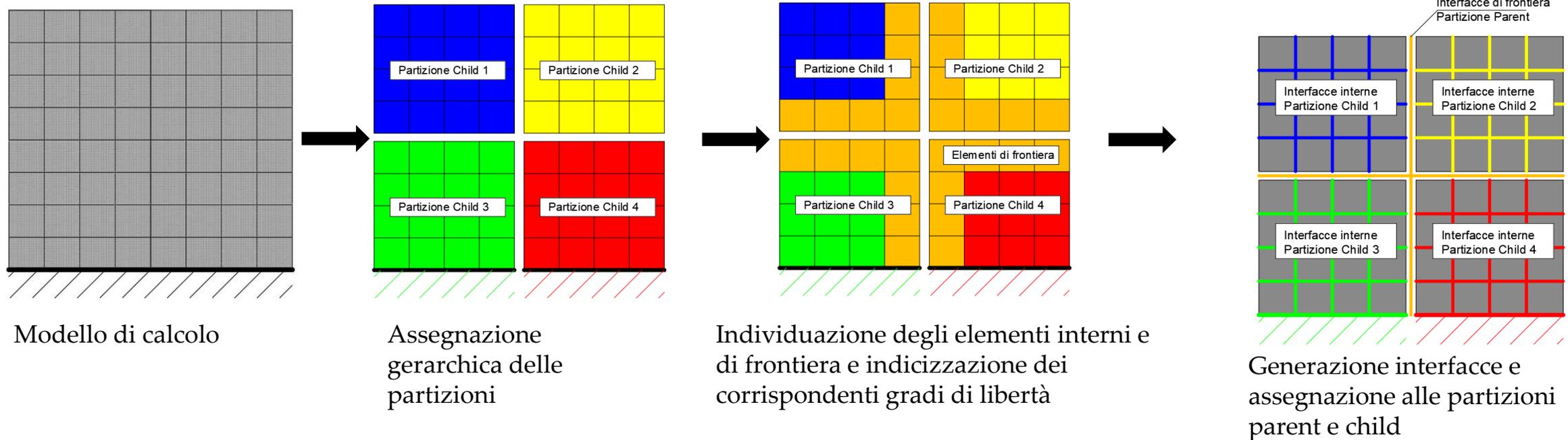
La strategia è stata proposta nell'ambito dell'approccio FEM [7-8], e viene qui estesa alla modellazione ai Macro-Elementi Discreti



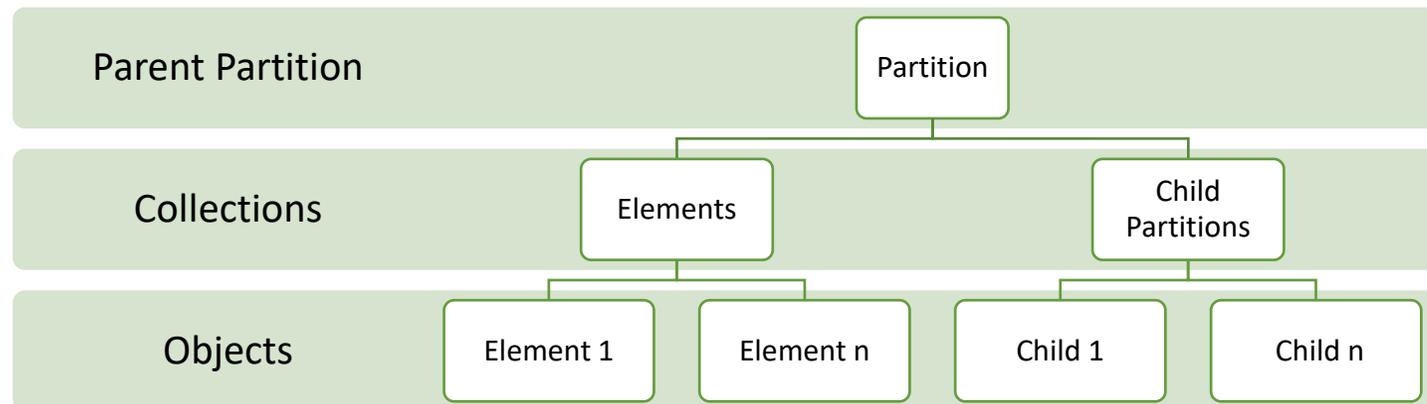
[7] Jokhio, Gul Ahmed. Mixed dimensional hierarchic partitioned analysis of nonlinear structural systems. Diss. Imperial College London, 2012.

[8] Jokhio, Gul Ahmed, Bassam A. Izzuddin Parallelisation of nonlinear structural analysis using dual partition super elements. June 2013 *Advances in Engineering Software* s 60–61:81–88

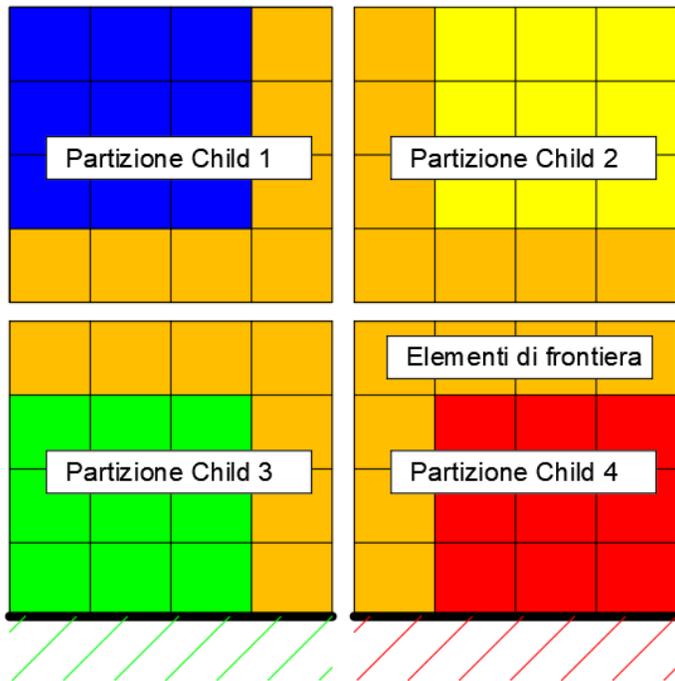
# Strategia di partizione del modello con struttura gerarchica



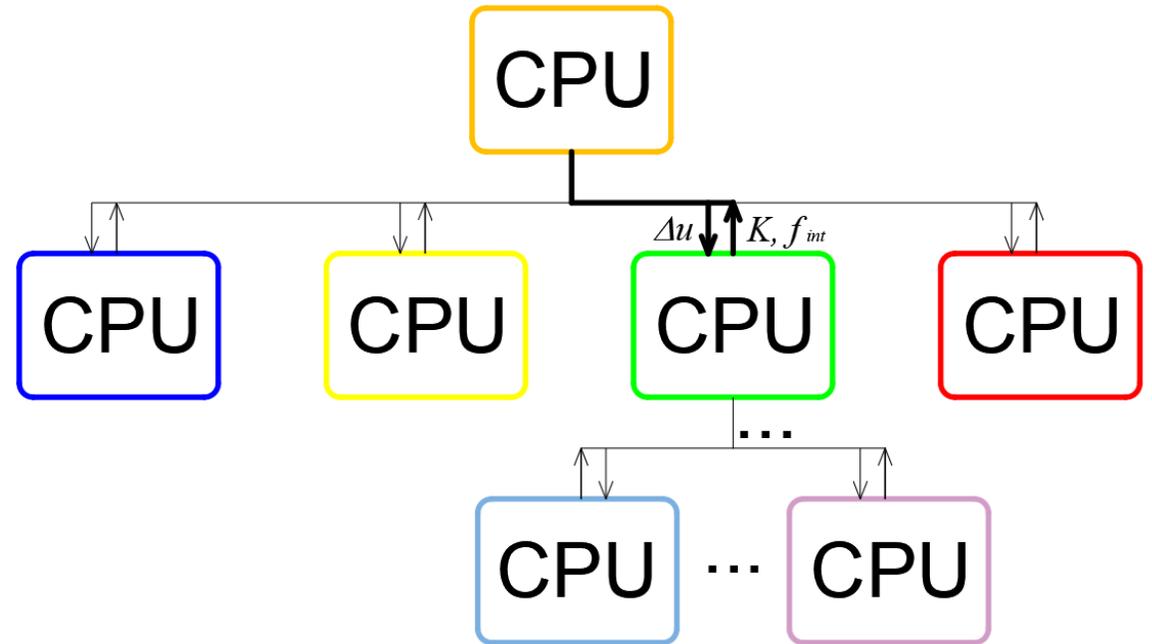
Struttura gerarchica delle partizioni



# Strategia di partizione del modello con struttura gerarchica



Individuazione delle partizioni

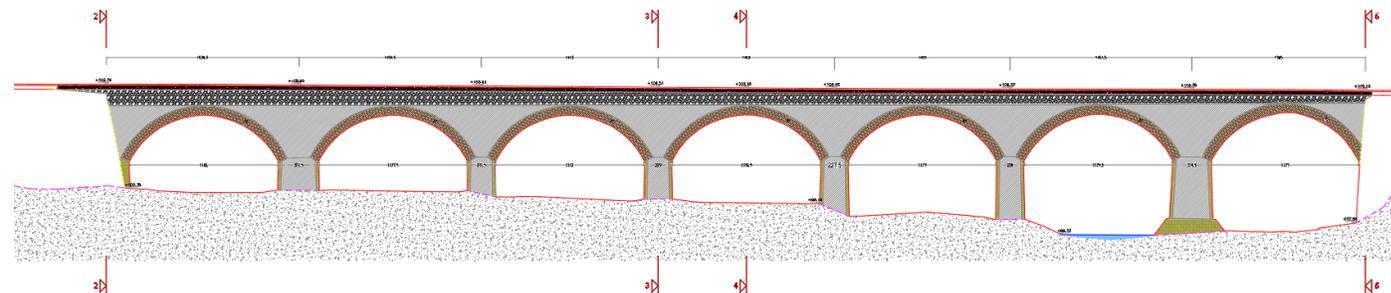


Distribuzione dell'onere computazionale

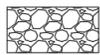
## Applicazioni: ponte Dolo – Toano (RE)



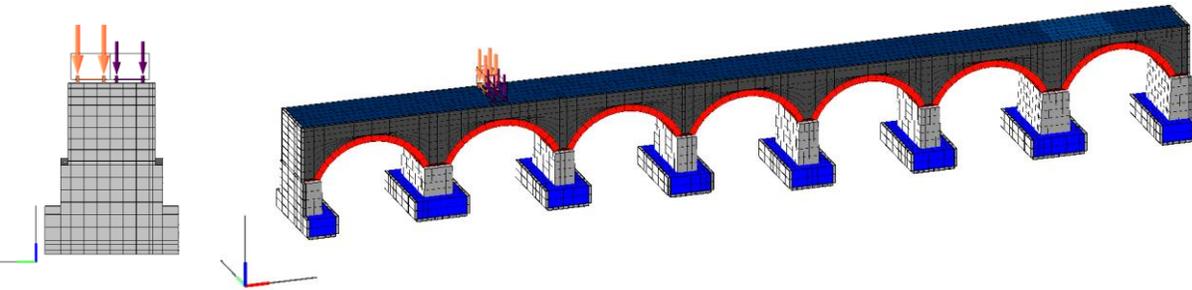
- Ponte ad arco (7 campate) in muratura
- Luce media: 11.80 m
- Freccia media: 3.80 m
- Spessore arcata: 0.75 m
- Altezza pile: da 2.25 m a 4.50 m fuori terra
- Spessore pile: da 2.30 m circa a 3.30 m circa
- Spessore soletta estradosso in c.a.: 0.3 m
- Caratteristiche riempimento: materiale incoerente
- Caratteristiche arcate: mattoni con malta cementizia e materiale lapideo
- Caratteristiche fondazioni e strato corticale delle pile: muratura in blocchi lapidei squadrati con spessore medio di circa 25cm.
- Pila 7 in alveo



### LEGENDA

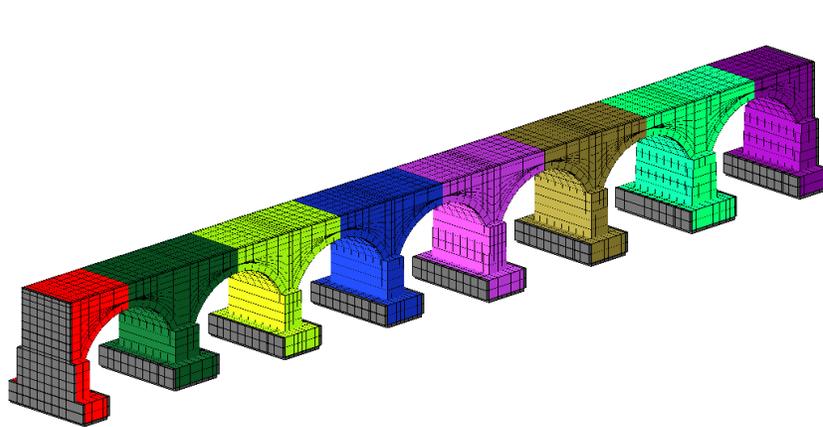
-  SOLETTA IN C.A. SPESSORE MEDIO 30cm ARMATURE Ø14/30" INCROCIATI (SUP. E INF.)
-  RIEMPIMENTO IN MATERIALE INCOERENTE
-  MALTA CEMENTIZIA CON CONCI DI MATTONE E MATERIALE LAPIDEO
-  MURATURA DI MATTONI PIENI E MALTA CEMENTIZIA (SPESSORE MEDIO 75cm)
-  MURATURA DI BLOCCHI LAPIDEI SQUADRATI (SPESSORE MEDIO 25cm)

# Applicazioni: ponte Dolo – Toano (RE)

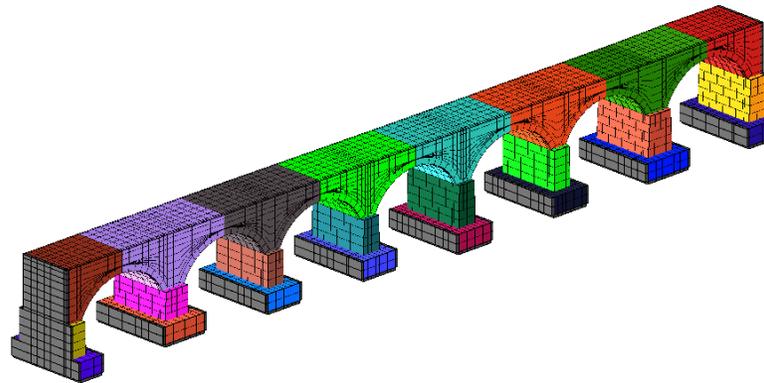


Configurazione 1: modello senza partizioni

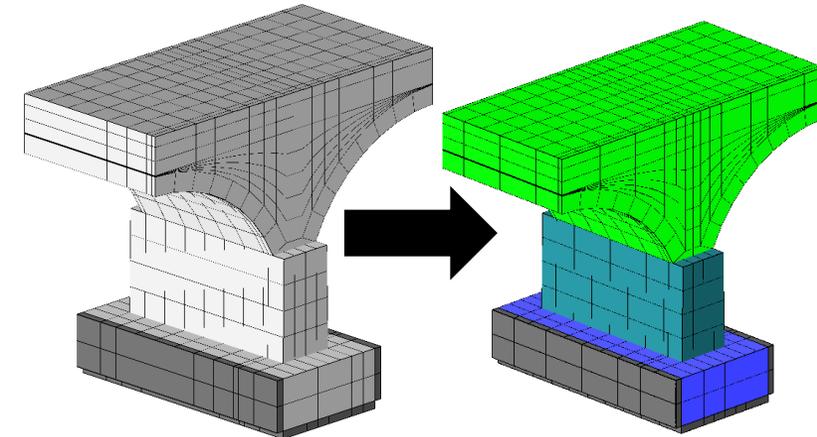
	$E$ (*)	$G$ (*)	$\nu$	Parametri meccanici non lineari								$\gamma$	FC
				Legame a presso-flessione				Taglio diagonale		Scorrimento			
				$f_c$ (*)	$f_t$ (*)	$G_c$	$G_c$	$\tau_0$ (*)	$\mu_d$	$c$ (*)	$\mu_s$		
MPa	MPa	N/mm	N/mm	MPa	MPa	MPa	MPa	kN/m <sup>3</sup>					
Fondazioni	1777.78	592.59	0.50	3.78	0.126	0.01	3	0.067	0.4	0.35	0.54	22	1.35
Pile e spalle	666.67	222.22	0.50	1.04	0.035	0.01	3	0.021	0.4	0.35	0.54	19	1.35
Arco	1777.78	592.59	0.50	4.30	0.143	0.01	3	0.067	0.4	0.35	0.54	18	1.35
Rinfianchi	666.67	222.22	0.50	1.04	0.035	0.01	3	0.021	0.4	0.35	0.54	19	1.35
Riempimento	222.22	85.47	0.30	0.15	0.001	-	-	-	-	-	-	19	1.35
Fondazione stradale in c.a.	12345.68	5144.03	0.20	14.81	0.494	-	10	-	-	-	-	25	1.35



Configurazione 2: modello con 8 partizioni



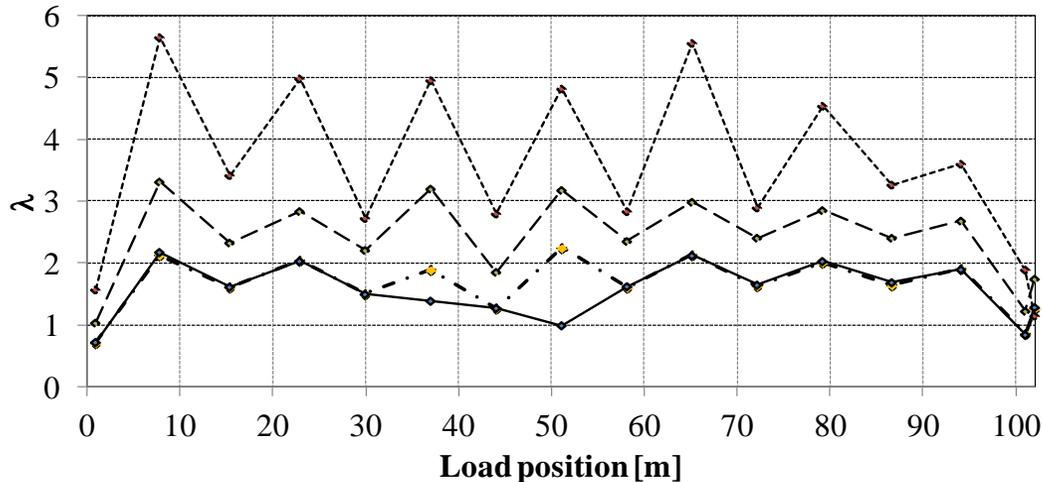
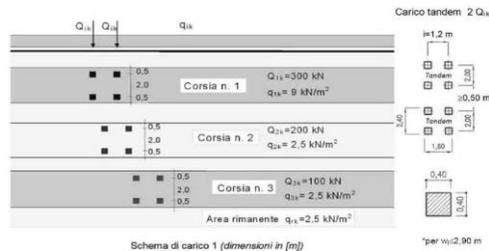
Configurazione 3: modello partizioni gerarchiche (8 partizioni di primo livello e 24 di secondo livello)



# Applicazioni: ponte Dolo – Toano (RE)

Carico ultimo corrispondente a quattro diverse combinazioni dei carichi al variare della posizione del carico mobile.

La condizione più gravosa risulta essere quella corrispondente al gruppo di azioni 1, schema 1, in accordo alle NTC 18

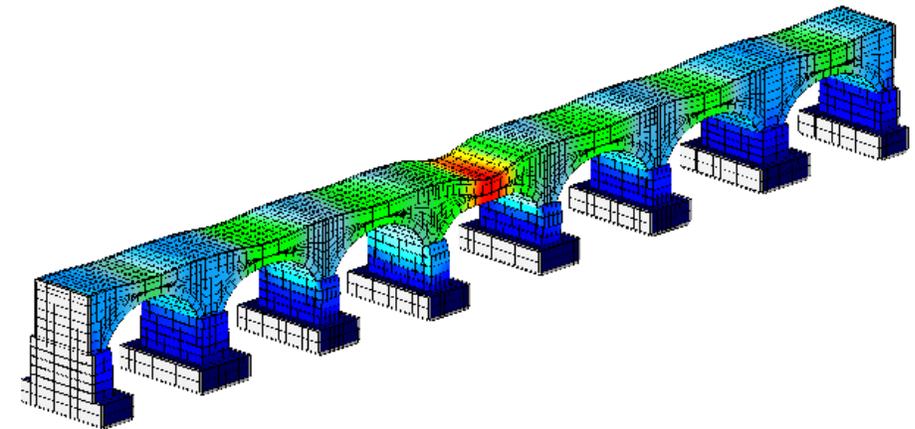


Combinazione di carico SLU base

N.	Combinazione
1	$\gamma_{G1}G_{1a} + \gamma_{G1}G_{1b} + \gamma_{G2}G_2$

Combinazioni di carico SLU per azione da traffico

N.	Gruppo di azioni	Schema	Combinazione
1	1	1	$\gamma_{G1}G_{1a} + \gamma_{G1}G_{1b} + \gamma_{G2}G_2 + \lambda\gamma_{Q1}Q_1$
2	1	2	$\gamma_{G1}G_{1a} + \gamma_{G1}G_{1b} + \gamma_{G2}G_2 + \lambda\gamma_{Q1}Q_1$
3	2a	1	$\gamma_{G1}G_{1a} + \gamma_{G1}G_{1b} + \gamma_{G2}G_2 + \lambda\gamma_{Q1}\Psi_{11}Q_1 + \lambda\gamma_{Q3}Q_3$
4	2a	1	$\gamma_{G1}G_{1a} + \gamma_{G1}G_{1b} + \gamma_{G2}G_2 + \lambda\gamma_{Q1}Q_1 + \lambda\gamma_{Q3}\Psi_{13}Q_3$



## Conclusioni

- È stato presentato un **Modello** di calcolo a **Macro-Elementi Discreti (DMEM)** per lo studio del comportamento nonlineare di ponti ad arco in muratura
- La strategia di modellazione mira a un forte **contenimento dell'onere computazionale** grazie al ridotto numero di gradi di libertà richiesti
- È stata proposta un ulteriore efficientamento della strategia numerica basata sulla partizione geometrica gerarchica del modello di calcolo (**partition modelling**)
- Nell'ambito dell'approccio DMEM è stata riformulata la strategia di partition modelling, inizialmente proposta in ambito FEM, **ridefinendo l'insieme degli elementi di frontiera e dei corrispondenti gradi di libertà**
- Sono state svolte **analisi statiche nonlineari preliminari** ad un caso di studio, dimostrando che, a parità di risultati ottenuti, viene ottenuto un notevole risparmio dei tempi di calcolo
- Tra gli **sviluppi futuri**, si prevede di estendere la strategia numerica, attualmente impiegata su un unico PC dotato di più processori, alla distribuzione del calcolo su super computer (HPC) ovvero a una rete di calcolatori