

Analisi statica e pushover di un ponte in muratura sottoposto a transito ferroviario

Proponiamo un'interessante applicazione di Aedes.PCM con l'estensione ECS, dedicata agli elementi costruttivi storici e monumentali.

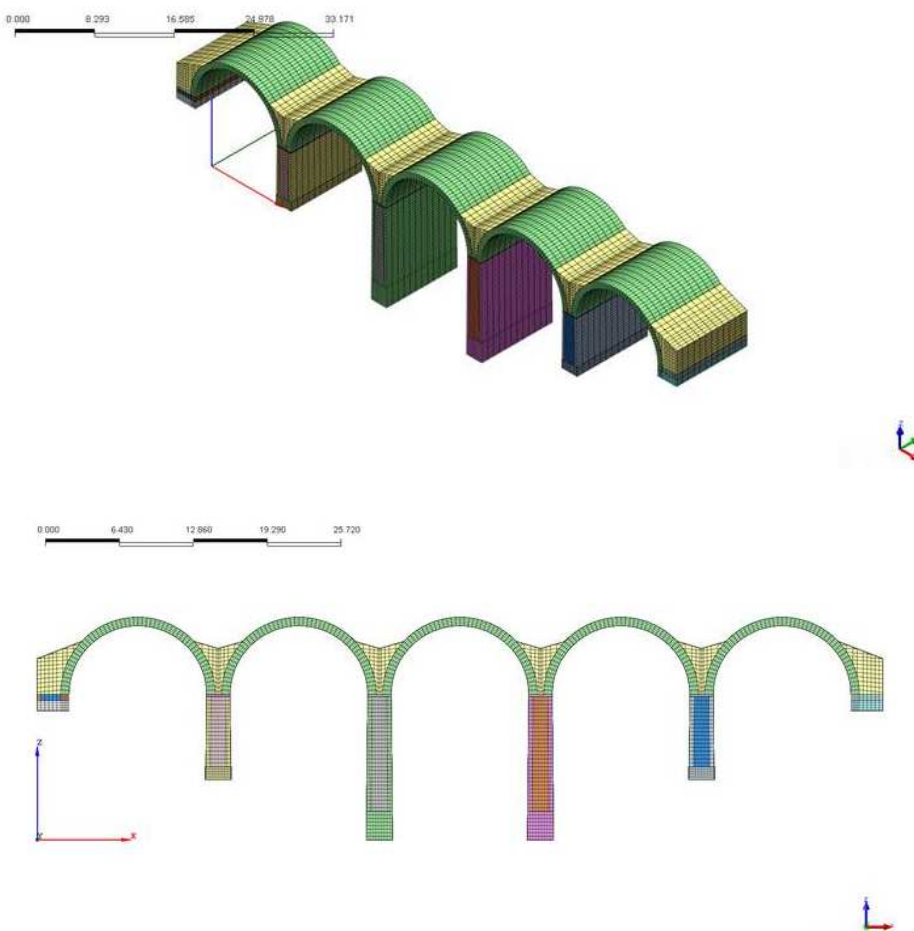
Recentemente è stata sottoposta ad Aedes la richiesta di esaminare con PCM, incluso il modulo ECS dedicato alle strutture ad arco, il ponte in muratura descritto nelle figure seguenti.

La struttura era stata già analizzata con altro software FEM che utilizza elementi solidi, rilevando un notevole onere relativo alla definizione dei dati e alle elaborazioni di calcolo.

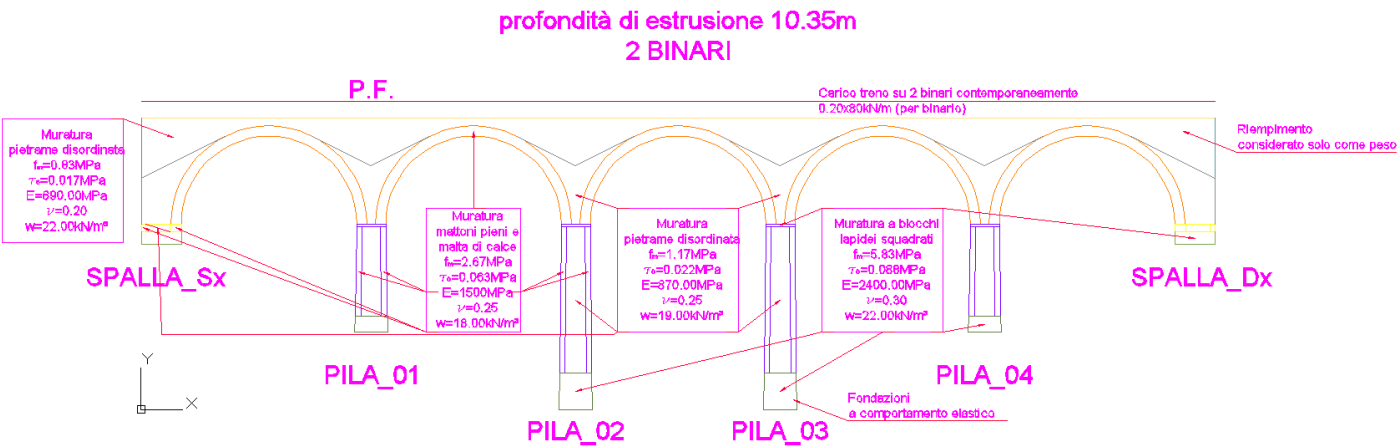
I risultati ricavati con PCM in termini di analisi modale e curve pushover hanno dimostrato le notevoli potenzialità del metodo adottato nel software Aedes, che per questo tipo di strutture coniuga la semplicità operativa con un'attendibile stima del comportamento statico e dinamico.

Senza niente togliere a modellazioni più raffinate, **l'utilizzo di PCM è sempre consigliato, in quanto consente di cogliere in modo molto agevole l'ordine di grandezza dei risultati.**

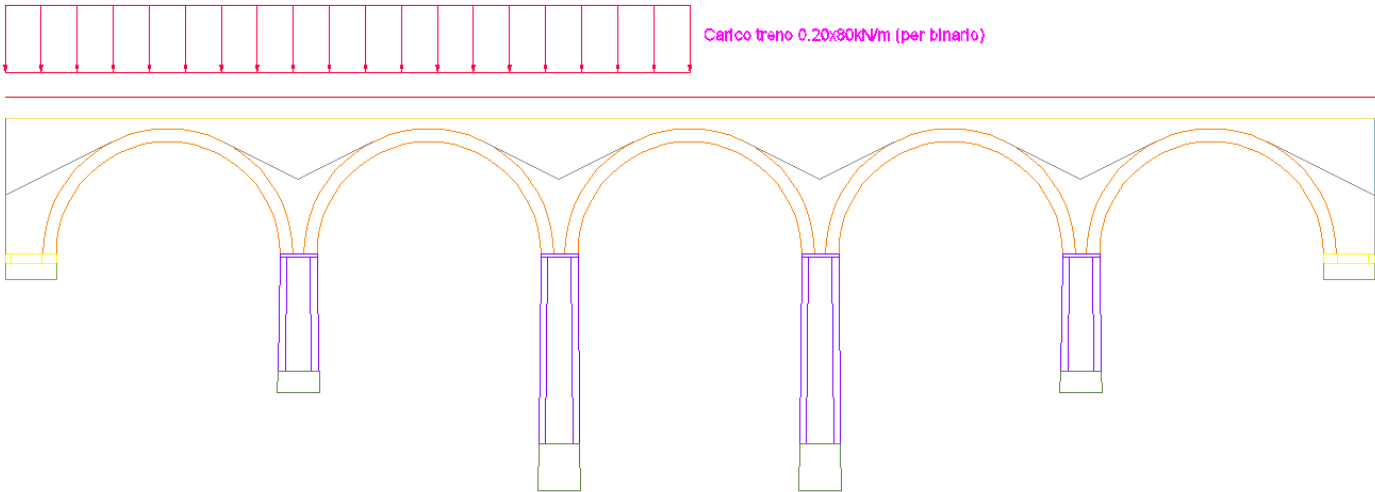
Rispetto a metodi molto onerosi, PCM costituisce quindi un'efficace alternativa nei casi dove non si rilevano particolari criticità, mentre per le situazioni più problematiche PCM crea un riferimento di base e aiuta ad inquadrare correttamente il primo approccio, che sarà poi eventualmente seguito da indagini FEM più approfondite.



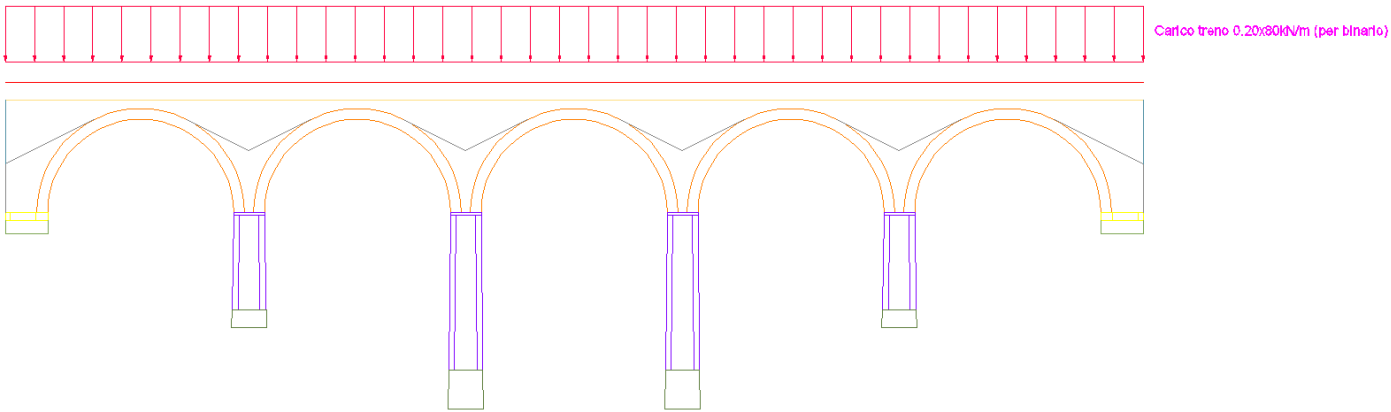
Dalla documentazione grafica fornita, si riportano le informazioni su geometria, materiali e carichi.

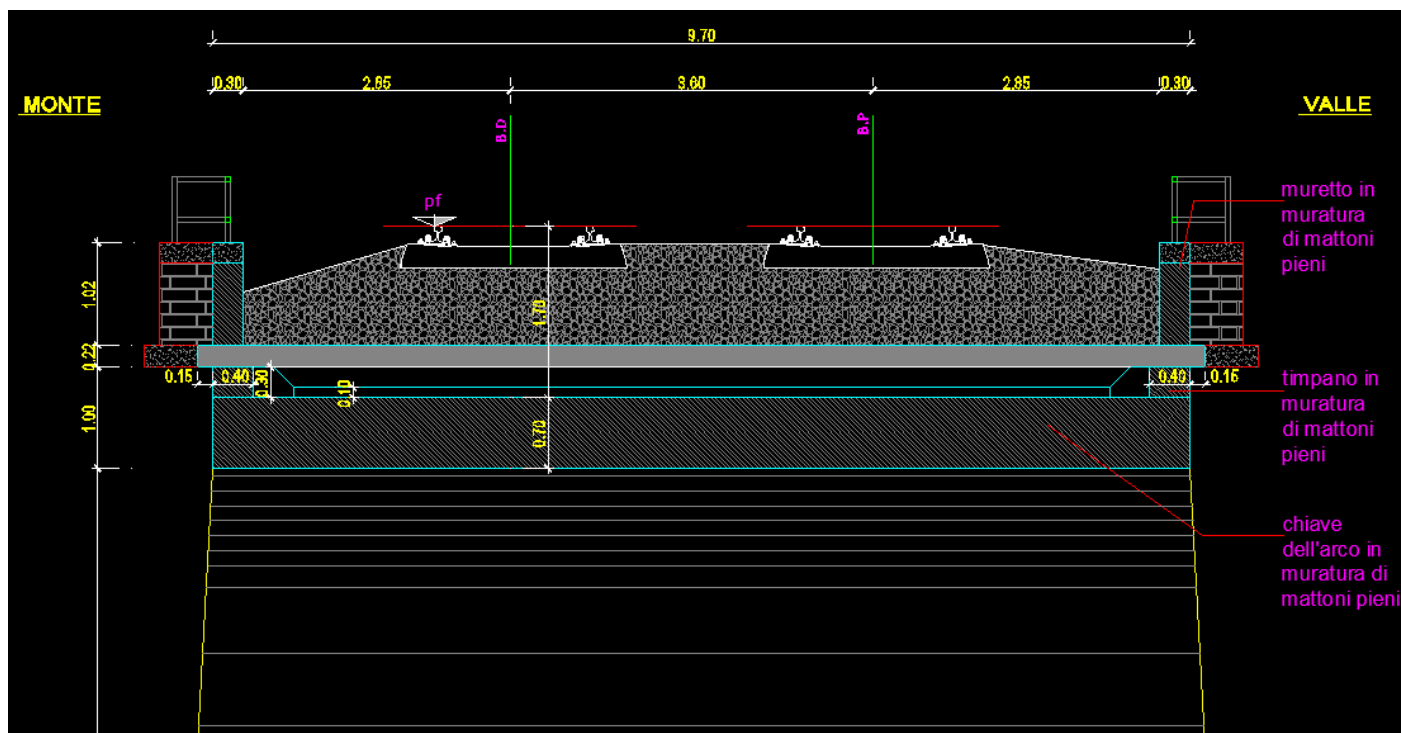


Condizione di carico per analisi LONGITUDINALE



Condizione di carico per analisi TRASVERSALE





Caratteristiche principali dell'opera muraria.

Le pile del ponte sono lievemente rastremate, ed hanno alla base sezione 220 x 1035 cm, formata da un nucleo esterno di muratura in mattoni pieni e malta di calce, e nucleo interno (di dimensioni 146 x 961 cm) di muratura in pietrame disordinato.

Le dimensioni in pianta sono di circa 73.5 m (longitudinale) x 10.35 m (trasversale); l'altezza massima in corrispondenza delle pile più alte è di circa 19.90 m.

Il piano ferroviario è definito da un riempimento che può essere considerato pari a 1.00 m di spessore, con peso specifico 16 kN/m³; viene generato così un carico permanente oltre peso proprio pari a 1.00 x 9.70 x 16.00 = 155.2 kN/m, applicato in estradosso. Questo carico viene distribuito su tutte le aste dell'orizzontamento. Il peso proprio delle strutture di riempimento, degli archi e delle pile viene automaticamente considerato dal software.

Il materiale delle pile viene omogeneizzato considerando la congruenza per deformazione assiale; risulta: $E = 1112 \text{ N/mm}^2$, cui corrisponde: $G = E/2.5 = 445 \text{ N/mm}^2$

Il peso specifico è ottenuto da media pesata: $w = 18.6 \text{ kN/m}^3$

Generalità sui criteri di analisi

La resistenza viene assunta coincidente con il materiale esterno (di migliore qualità); tuttavia, PCM consente analisi di stabilità che prescindono dalla resistenza: nello spirito del metodo di Heyman, la stabilità delle pile viene studiata attraverso la posizione della curva delle pressioni. Se questa fuoriesce in una sezione della pila, viene inserita una sconnessione interna che determina la perdita di iperstaticità del sistema; durante un'analisi incrementale (quale la pushover) le progressive instabilizzazioni conducono infine ad una labilità generale, con arresto della curva di capacità.

Gli elementi resistenti su cui si focalizza l'attenzione per le verifiche di sicurezza eseguite nel corso dell'analisi incrementale sono archi e pilastri murari (=pile). Gli archi vengono modellati a blocchi; si studia la posizione della curva delle pressioni e laddove questa fuoriesce superando la resistenza a trazione ipotizzata per i blocchi, viene inserita una cerniera (in intradosso o estradosso, a seconda della zona di arco interessata). Al raggiungimento della condizione limite concorrono quindi, oltre alle pile, anche gli archi.

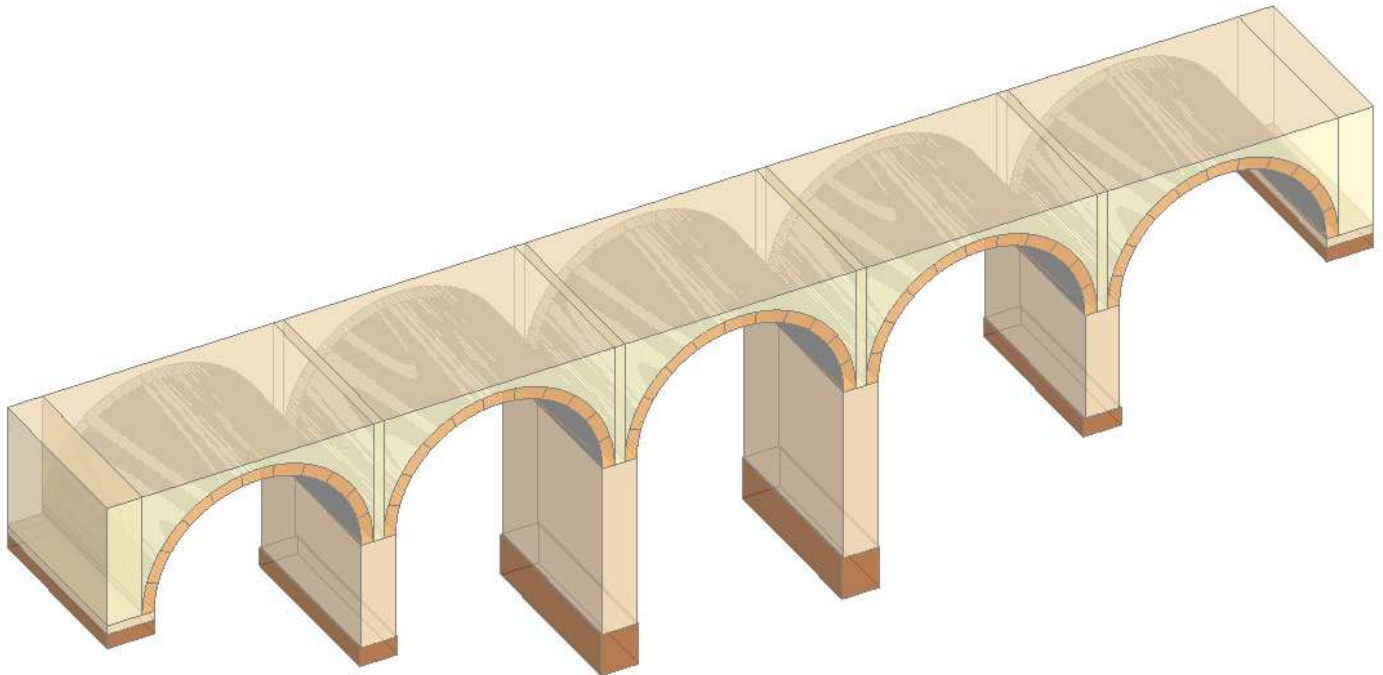
PCM consente anche analisi statiche indipendenti dalla pushover; con esse è possibile studiare l'assetto della struttura sotto i carichi verticali, ad esempio per studiare la posizione statica della curva delle pressioni. Le analisi modali provvedono inoltre a caratterizzare dinamicamente la struttura, e tra l'altro permettono di conoscere le masse partecipanti.

Dal punto di vista della pushover, le distribuzioni di forze modali assegnano l'incremento di taglio progressivo nel rispetto della legge di distribuzione delle azioni orizzontali secondo il modo principale, o in alternativa secondo una proporzionalità con le masse. Le masse, di tipo nodale, sono distribuite in tutta la struttura e quindi, in assenza di relazioni di rigidità reciproche, forniscono una efficace descrizione del comportamento dinamico.

Come post-elaborazione della pushover, è poi possibile operare direttamente sul moltiplicatore di collasso, seguendo un'impostazione tipica dello studio dei cinematismi, oppure si può seguire la via dell'oscillatore elastoplastico equivalente (quest'ultima sembra tuttavia più appropriata per tipologie edilizie quali i fabbricati multipiano). In definitiva, si individua il valore sostenibile di PGA (capacità), con confronto con i valori richiesti dalla Normativa e conseguente definizione dell'indicatore di rischio sismico.

Modellazione in PCM

La fase iniziale di input consiste nella modellazione architettonica.



Le pile sono definite come colonne, discretizzate in conci; gli archi sono definiti con l'elemento arco; il piano di estradosso si forma come rinfiando dell'arco (cioè il riempimento sovrastante); le fondazioni sono travi rigide su suolo elastico alla Winkler (per il coefficiente di sottofondo è stato adottato, in assenza di indicazioni specifiche, il valore $K = 0.1 \text{ N/mm}^3 = 10 \text{ kg/cm}^3$).

Nel modello strutturale (figura seguente): in rosso chiaro gli archi e il loro riempimento; in verde, le pile.

Le verifiche di sicurezza predisposte sono le seguenti: per i conci delle pile, la verifica a pressoflessione con controllo geometrico sulla posizione della curva delle pressioni; per i blocchi degli archi: la verifica di superamento della resistenza a trazione della muratura (assunta pari a 1/10 della resistenza a compressione dei blocchi (0.267 N/mm^2); la possibilità di considerare una resistenza a trazione non nulla permette di evitare sottostime di resistenza, tuttavia le analisi potrebbero essere condotte agevolmente anche con resistenza a trazione nulla.

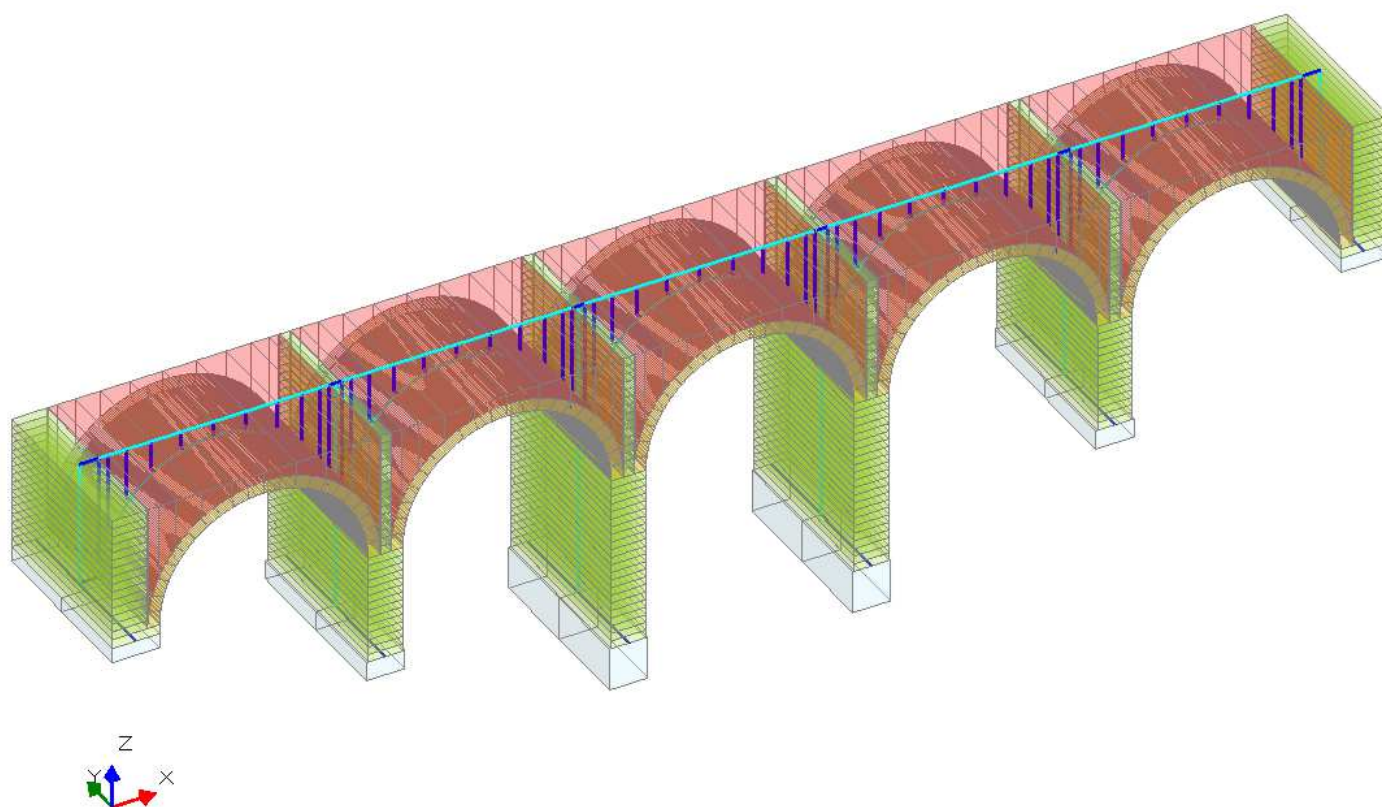
Sono stati predisposti **4 modelli**, caratterizzati dai seguenti aspetti:

modello 1: analisi modale, statica e pushover della struttura senza carichi ferroviari (soli pesi propri), con fondazioni su suolo elastico

modello 2: come modello 1, ma con carico ferroviario per analisi longitudinale (parzialmente esteso sulla superficie viaria)

modello 3: come modello 1, ma con carico ferroviario esteso per tutta la lunghezza del ponte, finalizzato all'analisi trasversale

modello 4: come modello 1, ma con fondazioni con cerniera (eccetto le spalle) per testare la capacità in corrispondenza di un cedimento vincolare a rotazione nelle pile intermedie.



In figura sopra: modellazione strutturale. In evidenza, la discretizzazione in blocchi degli archi, e in conci delle pile (pilastri murari).

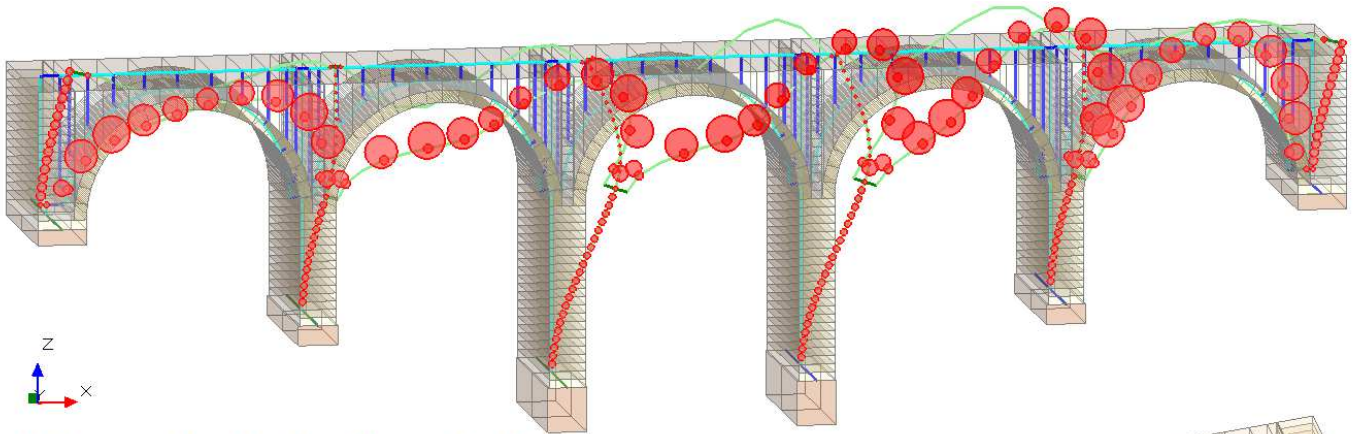
Modello 1: solo pesi propri

Analisi modale:

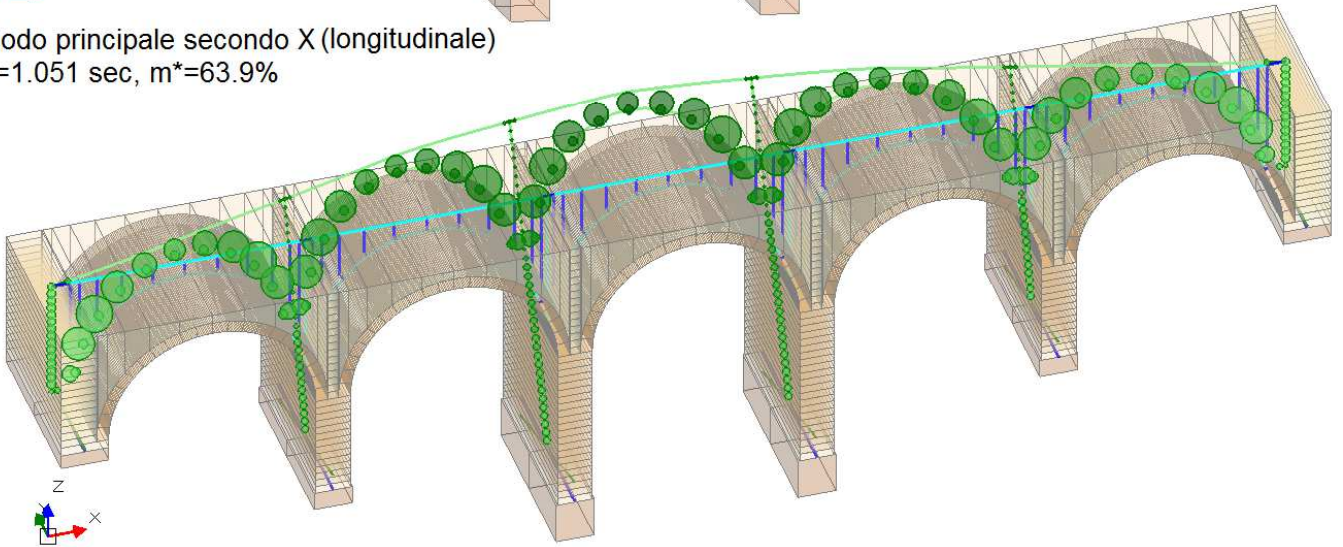
Modo principale X (longitudinale): $T = 1.051$ sec, massa partecipante 63.9%

Modo principale Y (trasversale): $T = 0.748$ sec, massa partecipante 64.9%

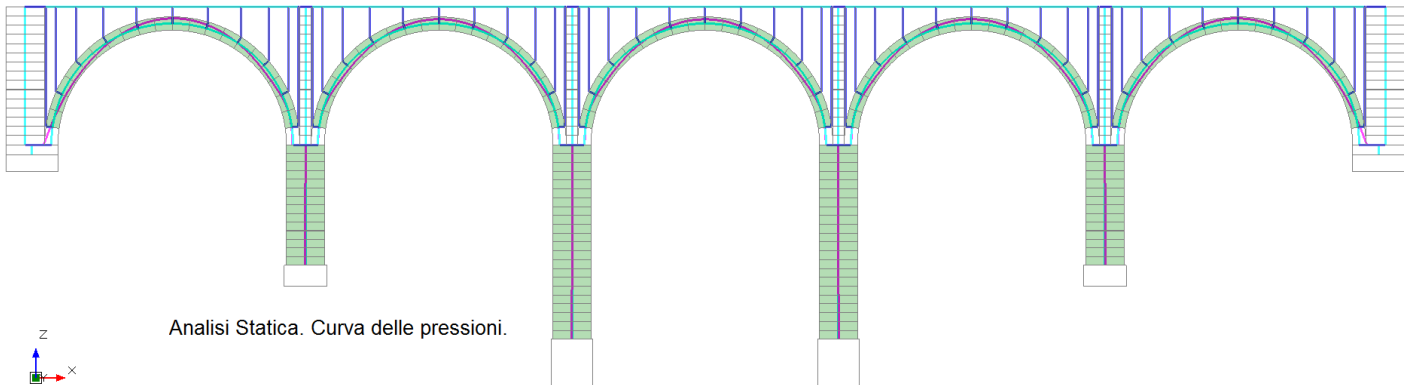
Nelle figure seguenti sono riportati i risultati dell'analisi modale e dell'analisi statica, per la quale si evidenziano in particolare la curva delle pressioni ed il diagramma degli sforzi normali (ovviamente è possibile ottenere molte altre restituzioni grafiche, p.es. sulla tensioni in fondazione, diagrammi dei momenti, spostamenti, ecc.)



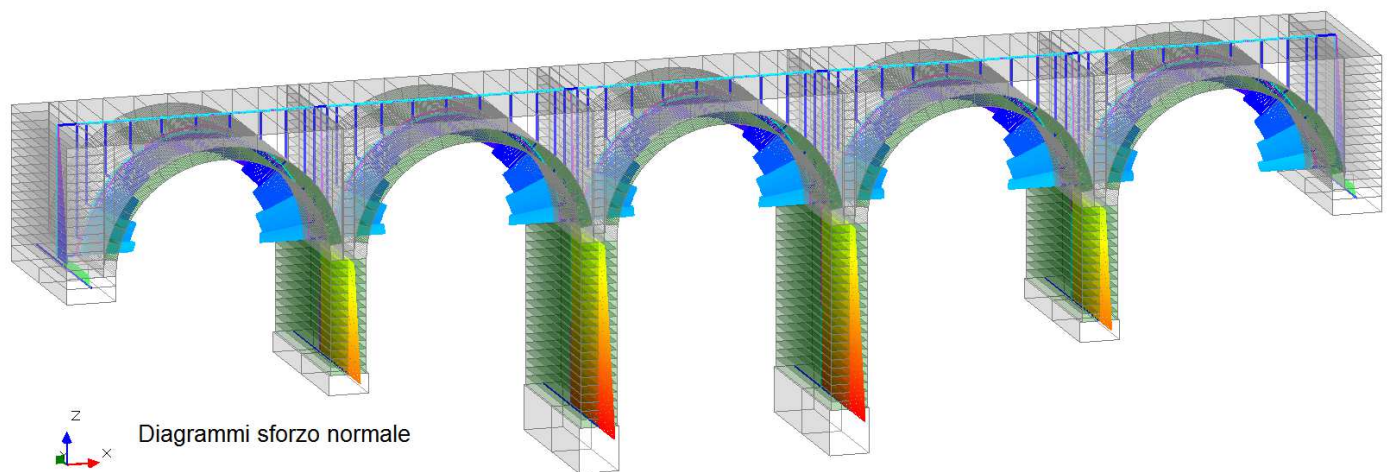
Modo principale secondo X (longitudinale)
 $T=1.051 \text{ sec}$, $m^*=63.9\%$



Modo principale secondo Y (trasversale)
 $T=0.748 \text{ sec}$, $m^*=64.9\%$



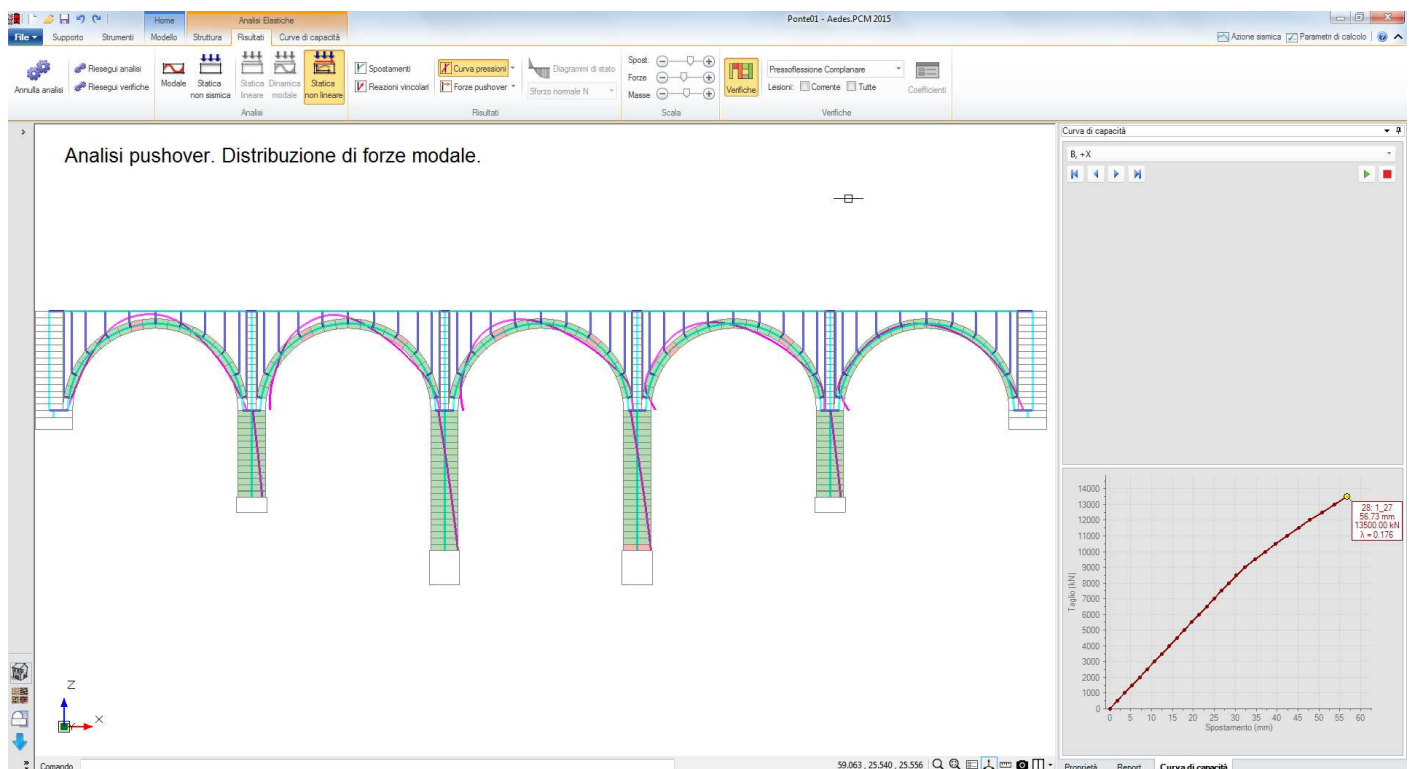
Analisi Statica. Curva delle pressioni.



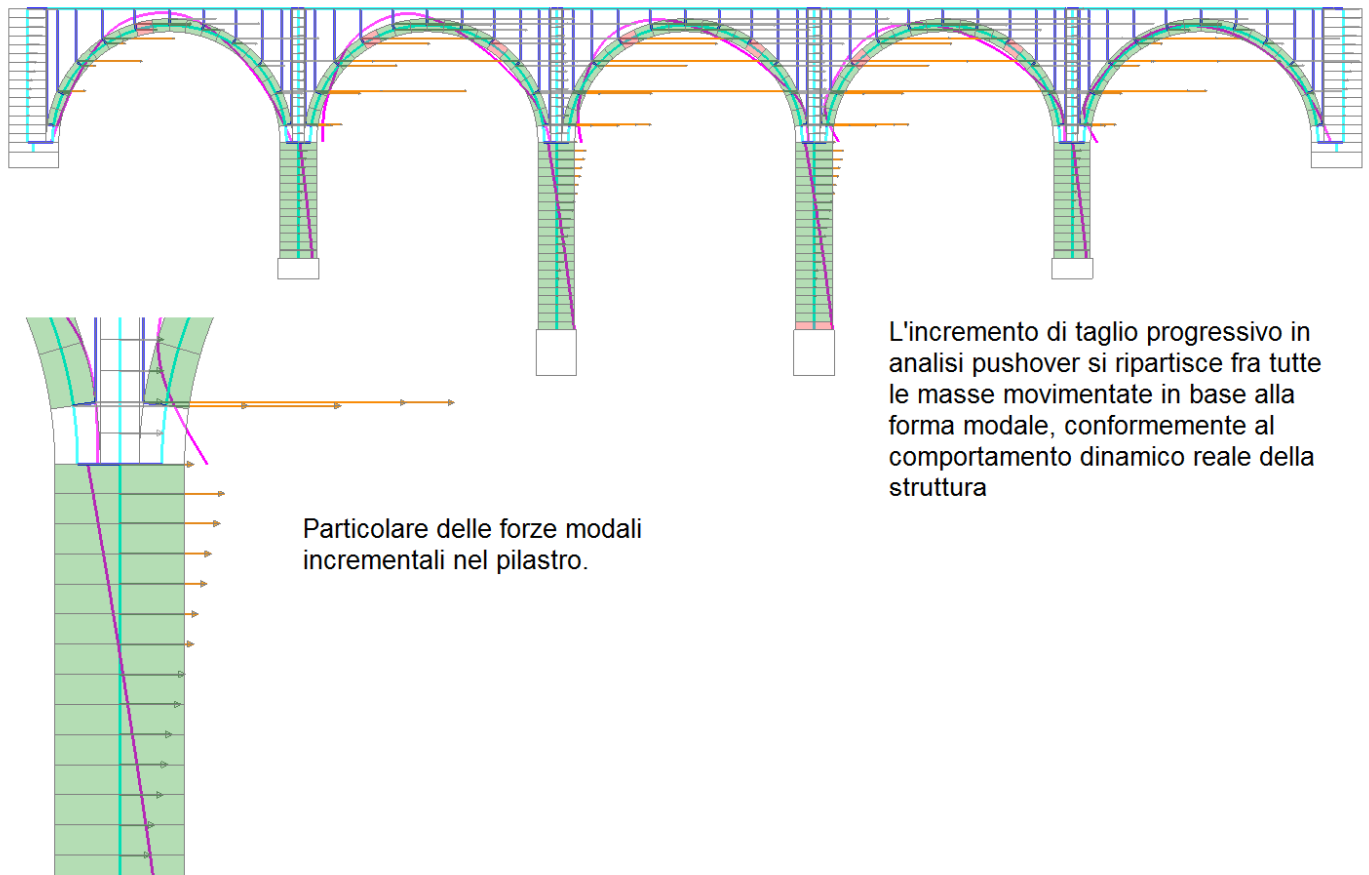
Nella figura seguente sono riportati i risultati dell'analisi pushover, con distribuzione di forze modale. La configurazione rappresentata si riferisce al punto evidenziato sulla curva pushover (a lato), cioè il punto finale di raggiungimento dello stato limite ultimo.

Dietro l'incremento progressivo di taglio globale, ripartito fra le varie masse secondo la forma modale, in alcuni blocchi di arco si sono formate cerniere; inoltre alla base della pila centrale la curva delle pressioni fuoriesce.

La struttura diventa labile e la curva di capacità termina in corrispondenza del moltiplicatore di collasso $\lambda=0.176$.



In figura seguente, si osservi la distribuzione delle forze incrementali, che segue la legge modale riferita a tutte le masse movimentate:



Oltre alla distribuzione modale è stata studiata anche la distribuzione di forze proporzionali alle masse, nelle due direzioni longitudinale e trasversale. I risultati sono i seguenti (per brevità, non si riportano le immagini relative a tutte le distribuzioni):

modale +X (longitudinale): $\lambda=0.176$ ($F_u = 13500$ kN, $\delta=56.73$ mm)

modale +Y (trasversale): $\lambda=0.286$ ($F_u = 22000$ kN, $\delta=16.93$ mm)

proporzionale alle masse +X (longitudinale): $\lambda=0.247$ ($F_u = 19000$ kN, $\delta=53.29$ mm)

proporzionale alle masse +Y (trasversale): $\lambda=0.501$ ($F_u = 38500$ kN, $\delta=18.65$ mm)

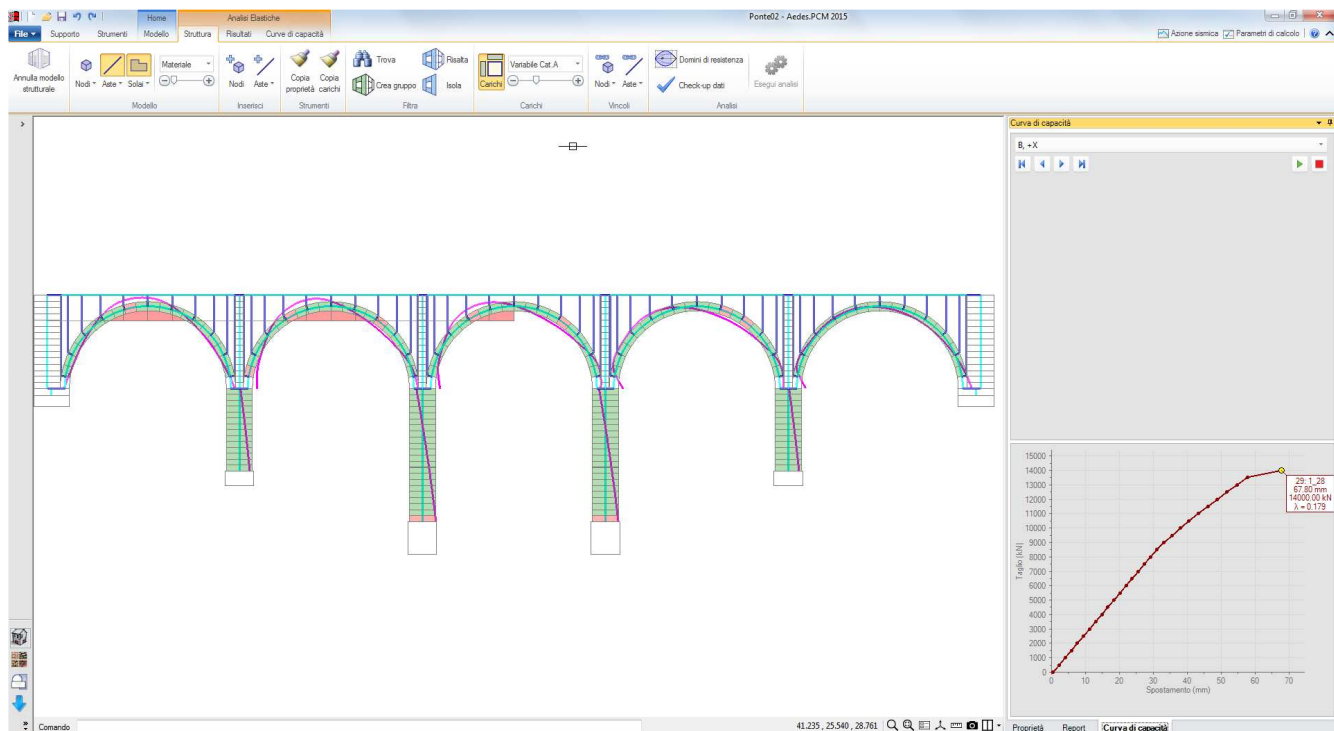
Al moltiplicatore λ può essere associato secondo i criteri di Analisi Cinematica (meccanismi di collasso) un'accelerazione sostenibile (capacità in termini di PGA). Non sono noti i dati di ubicazione dell'opera; tuttavia, a titolo indicativo, possiamo studiare la seguente relazione:

accelerazione spettrale di attivazione del meccanismo: $a_0^* = \lambda g / (e^* F_C) = a_g S / q$

da cui:

$a_g = q \lambda g / (S e^* F_C) = 2.0 * 0.176 * g / (1.2 * 1.000 * 1.35) = 0.217$ g (capacità in termini di accelerazione su roccia), avendo ipotizzato: $S=1.2$, $e^*=1.000$ (a favore di sicurezza), $F_C=1.35$.

Modello 2: carico ferroviario per analisi longitudinale



In figura si può rilevare la posizione del carico nella metà sinistra del ponte.

Data la scarsa incidenza sismica del carico ferroviario (avendo assunto $\psi_2=0.20$), i risultati dell'analisi pushover differiscono di molto poco rispetto al modello 1 senza carico ferroviario.

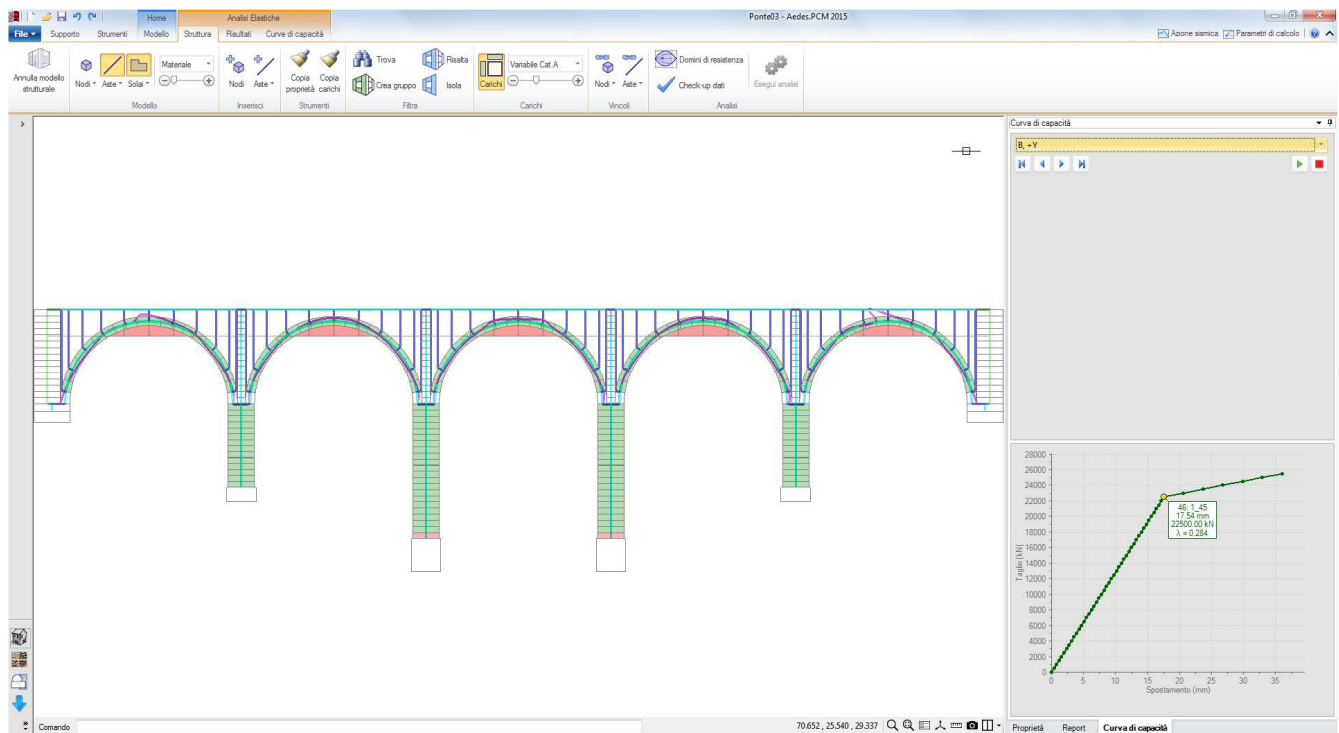
Risulta: $\lambda = 0.179$.

Le sezioni critiche al termine della curva restano sostanzialmente invariate rispetto al modello 1, anche se risulta maggiormente coinvolta la pila sottostante alla zona caricata dal treno.

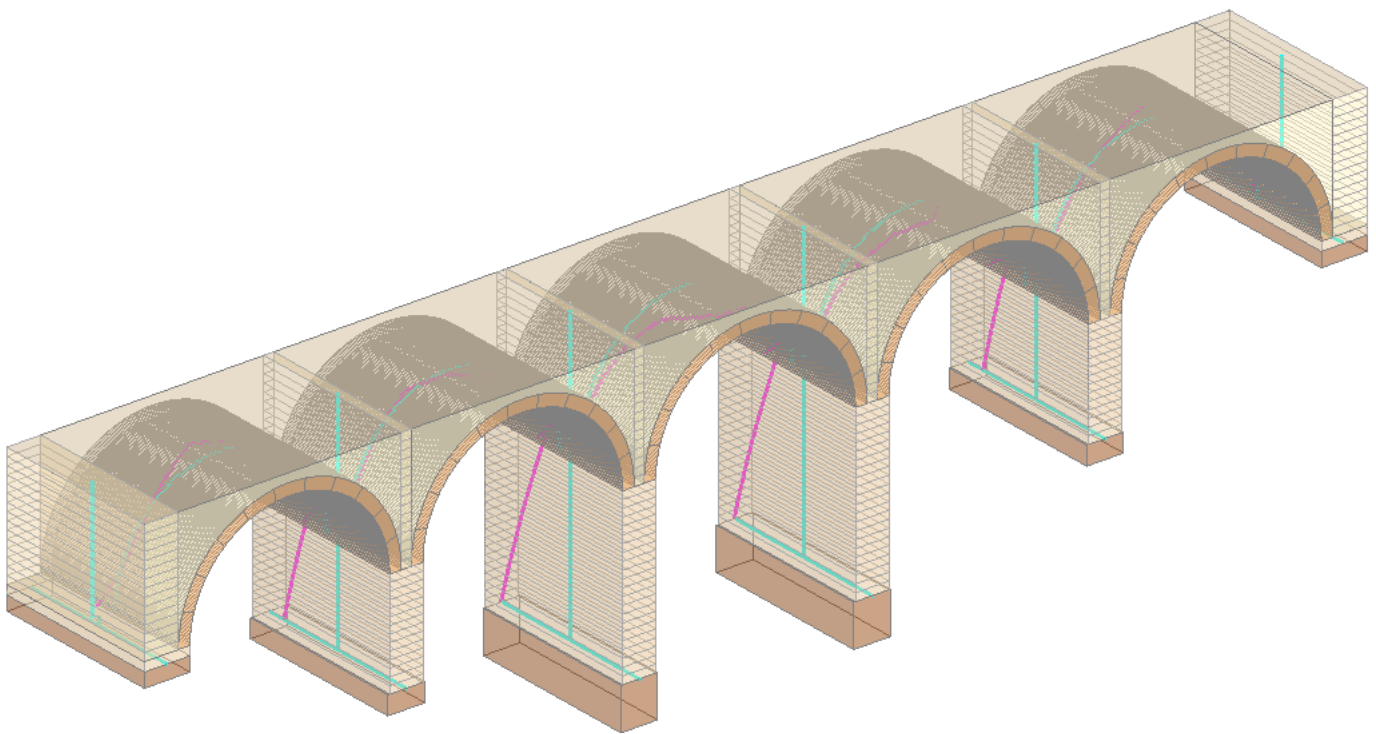
Anche in analisi modale, le differenze rispetto al modello 1 risultano minime:

in direzione X: $T = 1.062$ sec, $m^*=64.1\%$

Modello 3: carico ferroviario per analisi trasversale

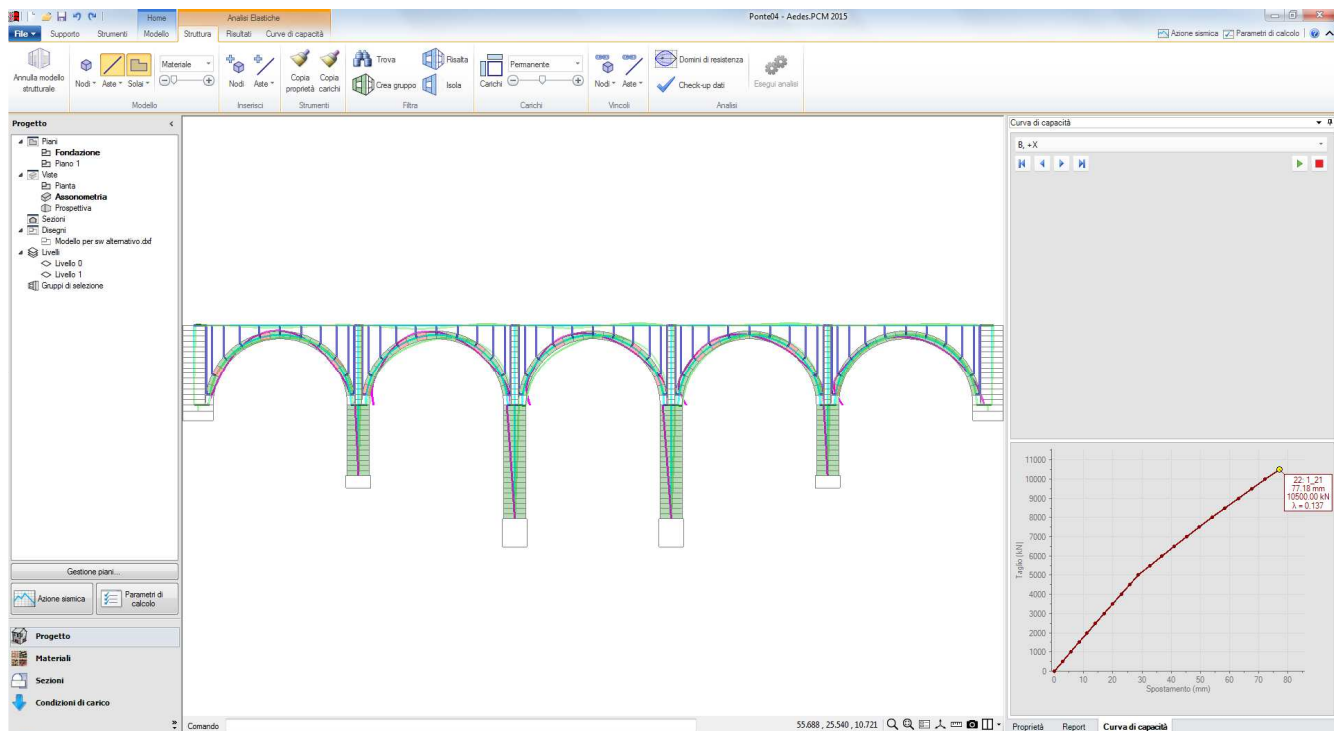


Considerando cautelativamente il limite della curva nel punto di passaggio dalla fase elastica alla plastica, si ha un risultato pari a $\lambda=0.284$, quasi coincidente anche in questo caso con il modello a soli pesi propri. E' interessante osservare in pianta la curva delle pressioni, per apprezzare lo scostamento in direzione trasversale sia negli archi che nelle pile:



In analisi modale: $T = 0.764$ sec, $m^*=65.2\%$ (risultato molto simile al modello 1).

Modello 4: effetto di rotazione libera nella sezione di base delle pile intermedie (con contemporanee fondazioni incastrate in corrispondenza delle spalle)



La configurazione ultima della curva, studiata in assenza di carico ferroviario (quindi direttamente confrontabile con il modello 1) mostra che la curva delle pressioni alla base delle pile resta centrata, in quanto la cerniera comporta sempre un momento nullo, e la crisi sopraggiunge per eccessivo numero di cerniere negli archi. Il moltiplicatore di collasso diminuisce in modo significativo: scende da 0.176 a 0.137 (-22%).

Considerazioni conclusive

Con PCM è possibile condurre vari tipi di analisi per strutture quali il ponte ferroviario oggetto del presente studio, ottenendo con una relativa semplicità una serie di informazioni interessanti e in grado di confermare le caratteristiche prestazionali note per questo tipo di strutture.

In genere questi ponti sono infatti strutture massicce che lavorano in modo appropriato sotto i pesi propri, ed il carico ferroviario sposta di poco il risultato: la capacità in termini di accelerazione al suolo è sostanzialmente invariata rispetto all'assenza di carico ferroviario. In altri termini, un ponte originariamente ben progettato può, dal punto di vista della stabilità strutturale interna, assicurare ottime prestazioni anche sotto il carico ferroviario.

Il punto debole di queste strutture sembra consistere invece nei cedimenti di fondazione. Un semplice modello con cerniere alla base delle pile ha mostrato infatti una significativa riduzione di capacità.

Qualunque sia il modello di calcolo adottato, è un compito fondamentale del Progettista la calibrazione delle condizioni vincolari, determinanti ai fini del raggiungimento di un risultato attendibile.

PCM si rivela uno strumento idoneo per cogliere la sensibilità del risultato in dipendenza dalle variazioni sulle condizioni al contorno (vincoli interni ed esterni, ma anche: carichi, materiali, geometrie, resistenze a trazione, comportamenti di stabilità secondo Heyman ed anche per resistenze ad attrito e a compressione).