

PONTI IN MURATURA: DIFETTI E PATOLOGIE

Massimo Mazzoleni
Lorenzo Jurina
Politecnico di Milano

Premesse

All'interno della più ampia discussione inerente le tecniche di diagnosi e di risanamento dei ponti, il presente contributo ha come obiettivo la lettura dei diversi fenomeni di degrado meccanico che interessano i manufatti in muratura alla luce di alcune basilari considerazioni teoriche sul comportamento strutturale degli stessi in condizioni ultime.

Nell'ottica di una coerente programmazione degli interventi di manutenzione sul patrimonio costruito risulta infatti di primaria importanza il dotarsi di efficaci strumenti di lettura dello stato di conservazione dello stesso.

Nell'ampio e diffuso contesto delle opere d'arte stradali e ferroviarie si rende indispensabile la costituzione di un sistema di valutazione di tipo parametrico che possa condurre ad un quadro di conoscenza sufficientemente esaustivo delle caratteristiche, delle problematiche e quindi anche delle priorità di intervento sui diversi manufatti.

In quest'ottica, per il caso specifico dei ponti in muratura, vengono proposte alcune valutazioni sui principali fenomeni di dissesto che li interessano sia in termini di cause scatenanti, che in termini di rilevanza nei riguardi di un potenziale collasso della struttura.

Non solo dunque “come intervenire”, ma anche “quando intervenire” sul manufatto per garantirne sia la salvaguardia sia l'efficienza funzionale.

Caratteristiche costruttive dei ponti murari e classificazione tipologica

Non è certamente questa la sede per proporre una trattazione di tipo storico sui ponti in muratura, anche se risulta basilare per molte successive considerazioni rimarcare il fatto che molti manufatti a tutt'oggi impegnati dal transito veicolare hanno origini antichissime ed ovviamente una condizione attuale di esercizio ben diversa da quella di partenza.

Risulta invece indispensabile, per gli intenti di questo scritto, una seppur schematica caratterizzazione dei ponti murari da un punto di vista costruttivo e tipologico.

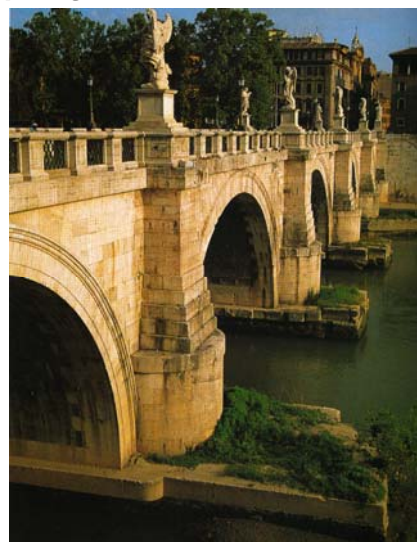
Per ciò che concerne la struttura e le sue componenti costitutive principali si possono distinguere¹:

Apparecchio: modo di tagliare e di disporre massi, blocchi, conci, cunei, laterizi o qualsivoglia materiale edilizio in una data struttura muraria.

Archivolto: fronte vista di un *arco di testata* per lo *più estradossato* (cioè con linea di estradosso parallela alla linea di intradosso) che viene messo in evidenza, o mostrando le linee costruttive della sua stessa struttura (*archivolto semplice*), o muovendo tale superficie con apposite modanature (*archivolto modanato*), o sottolineando la linea dell'estradosso con una apposita *cornice* che l'accompagna (*archivolto corniciato*).

Arco di testata: è l'arco (visto nell'insieme della sua struttura) che conclude a monte o a valle una arcata. Nei testi di ingegneria riguardanti i ponti moderni è pure detto *armilla*, un termine che viene peraltro impiegato anche per designare la semplice *fronte vista* di un singolo *arco di testata*.

Chiave o serraglia: prende il nome di *concio di chiave* o *cuneo di chiave*, ovvero, più semplicemente, di *chiave* (o *serraglia*) il concio o cuneo a penetrazione posto alla sommità o colmo dell'arco, giusto in linea con l'asse dell'intradosso. I due cunei contigui e laterali vengono invece detti *controchiavi*, mentre il settore di arco comprendente la *chiave* e le *controchiavi* prende il nome di *testa*.



Ponte Elio - Roma

Contrafforte: struttura muraria a pilastro, a scarpa, o variamente conformata, il cui scopo è di opporre resistenza all'azione di una spinta. Nei ponti esso appare soprattutto alle spalle (dove mostra per lo più forme a pilastro o a semipilastro, sia a pianta quadrata, sia a pianta rettangolare), oppure è presente sopra i rostri delle pile, a rinforzo e a difesa dei *muri di testa* dei *timpani*.

Cornice d'imposta: cornice in vario modo articolata o modanata che in genere aggetta a livello del *piano d'imposta* di un arco allo scopo di offrire un appoggio alla centina, rinforzando ed evidenziando al tempo stesso la *mossa* o *nascita* dell'arco medesimo.

Estradosso: superficie curva superiore di un arco o di una arcata (e in tal caso per lo più coperta dal *timpano*).

Fondazione: parte con la quale un manufatto poggia sul terreno. Essa può essere *diretta*, se la base del manufatto raggiunge direttamente lo strato solido atto a sopportarne il peso, *indiretta*, se non lo raggiunge.

Freccia o saetta: distanza massima in altezza fra la *luce* (o *corda*) e il punto più alto o sommità della linea d'intradosso.

Intradosso: superficie curva inferiore, per lo più in vista, di un arco o una arcata. E' pure detto *sottarco*.

Luce (o corda): distanza fra i paramenti interni dei piedritti misurata all'altezza dei *punti d'imposta* dell'intradosso.

Muri di accompagnamento: si tratta di muri che completano le fronti del ponte raccordando quest'ultime con le rispettive scarpate dei terrapieni stradali. Più in particolare prendono il nome di *muri d'ala* se sono normali o obliqui ai muri di testa del ponte, o *muri di risvolta* (o *muri di ritorno*, o *muri di mantello*) se sono paralleli a quest'ultimi.

Muro di spina: muro robusto di diversa struttura messo in opera allo scopo di contrastare una spinta. Nei ponti è impiegato a rinforzo di una spalla oppure di una o più arcate.

Muro di testa o frontale: muro frontale ed in vista di un *timpano*, il quale serve a contenere sia la struttura di *rinflanco* o colmatura, sia l'eventuale *riempimento* sopra un'arcata, sia la *massicciata stradale* che può scendere fino ai rinfianchi. Esso in genere è sormontato da un *plinto in forte aggetto* o *coronamento aggettante* per lo più modanato, detto *cornice di coronamento*.

Muro di testa o frontale: muro frontale ed in vista di un *timpano*, il quale serve a contenere sia la struttura di *rinflanco* o colmatura, sia l'eventuale *riempimento* sopra un'arcata, sia la *massicciata stradale* che può scendere fino ai rinfianchi. Esso in genere è sormontato da un *plinto in forte aggetto* o *coronamento aggettante* per lo più modanato, detto *cornice di coronamento*.

Palificata di costipamento: operazione di consolidamento del terreno che si attua infiggendo in esso vari pali di legno o *passoni* ognuno dei quali è per lo più difeso nella punta da una robusta guaina protettiva di ferro detta *puntazza di ferro*. Essa rende più compatto il terreno.

Parapetti: muri di protezione e di contenimento del traffico lungo le contrapposte fronti di un ponte, al di sopra del *piano stradale*. Essi, piuttosto genericamente, prendono pure il nome di *spallette*.

Peduccio d'imposta o concio d'imposta: concio il quale con il suo *letto* o *piano di posa inferiore* costituisce la *mossa* o la *nascita* dell'arco (in pratica è il primo concio o cuneo che dà avvio ad un arco).

Piano di calpestio (o manto stradale di usura): è la parte utile del piano stradale che comprende la *carreggiata*.

Pila: è un *piedritto* o sostegno intermedio di muratura atto a raccordare le *fondazioni* con le *arcate*, permettendo il deflusso dell'eventuale acqua sottostante. Il corpo di una pila presenta nella porzione inferiore un *piede* o *base* che può slargarsi in una struttura con pianta maggiore rispetto allo spiccato, dando così luogo ad uno *zoccolo di base*.

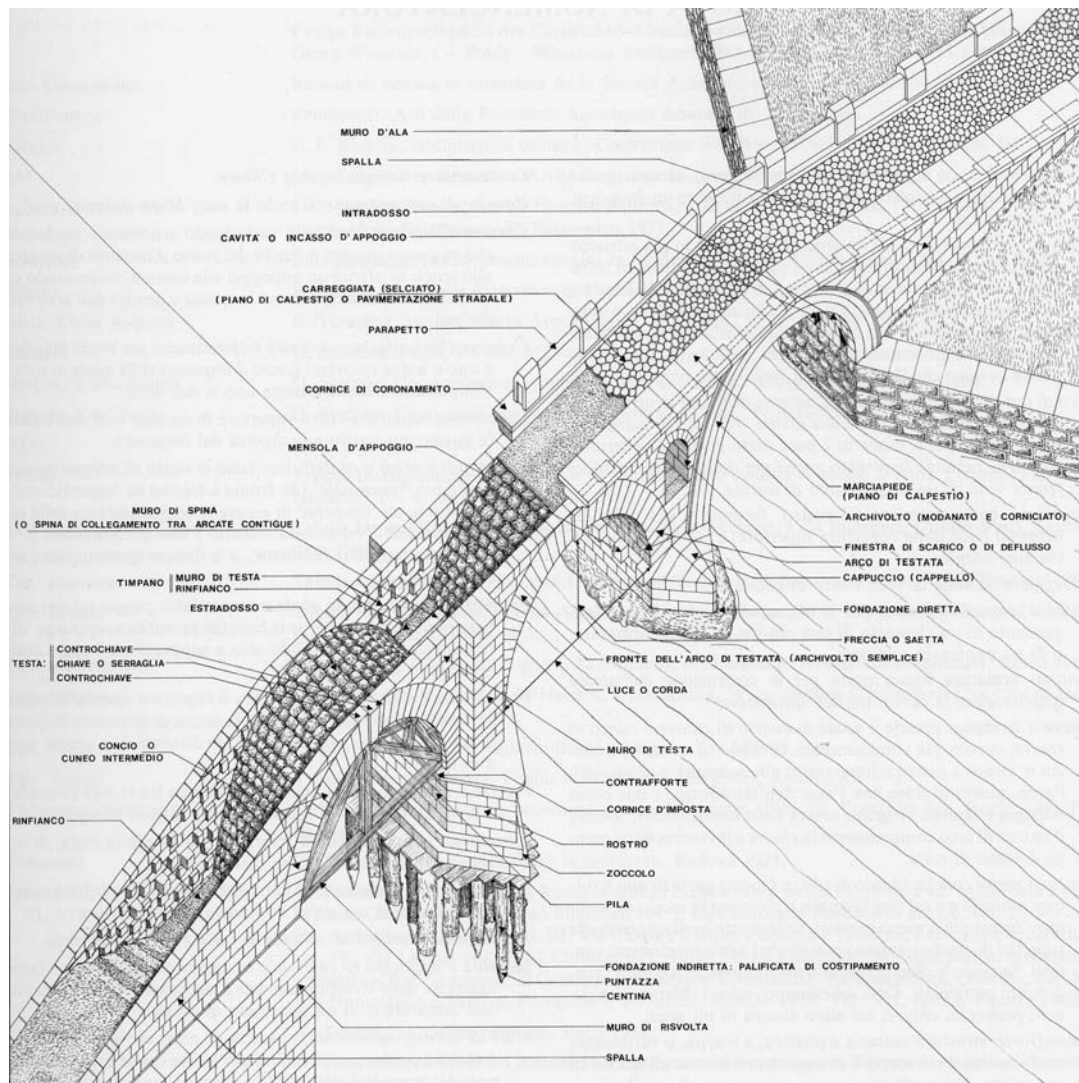
Rene o fianco: è il settore di un arco (o di una arcata dall'imposta fino ad un piano di giunto inclinato detto *piano* o *giunto al rene* (o, più semplicemente, *rene*). In pratica è il settore d'arco che va dall'imposta fino al concio o cuneo in cui il coefficiente d'attrito è tale da impedirne lo scorrimento (in genere i due *piani* o *giunti alle reni* di una arcata sono dati dalle sezioni che formano un angolo di circa 60° con il piano verticale passante per il centro dell'arco o della volta).

Rinflanco: è la struttura muraria che viene addossata sull'estradosso dell'arcata ai lati di questa e sulla quale viene impostato l'eventuale *riempimento* e/o la *massicciata stradale*.

Soprastruttura: parte superiore del ponte comprendente l'*arcata*, il *timpano*, il *piano di calpestio* e i *parapetti*.

Spalla: *piedritto* con cui un ponte è sostenuto ad una estremità. Essa in genere si presenta come un corpo di sostegno resistente, verticale e di muratura.

Timpano: struttura muraria di copertura di un'arcata che sta fra l'estradosso e il piano stradale o di calpestio. Esso comprende i *rinfianchi*, l'eventuale soprastante *riempimento* e i *muri di testa* o *frontali*.



Visione assonometrica dall'alto di un ponte ideale con terminologia essenziale.

Pur essendo nella totalità dei casi basati su un sistema resistente ad arco, per ovvie ragioni legate alle caratteristiche meccaniche degli apparati murari, i ponti in muratura possono essere suddivisi secondo ben precise categorie “formali”, “d’uso”, “materiche”.

Si possono distinguere:

per materiale:

- muratura di pietra da taglio e conglomerato cementizio non armato
- muratura di concio squadrato e posato a secco
- muratura di mattone

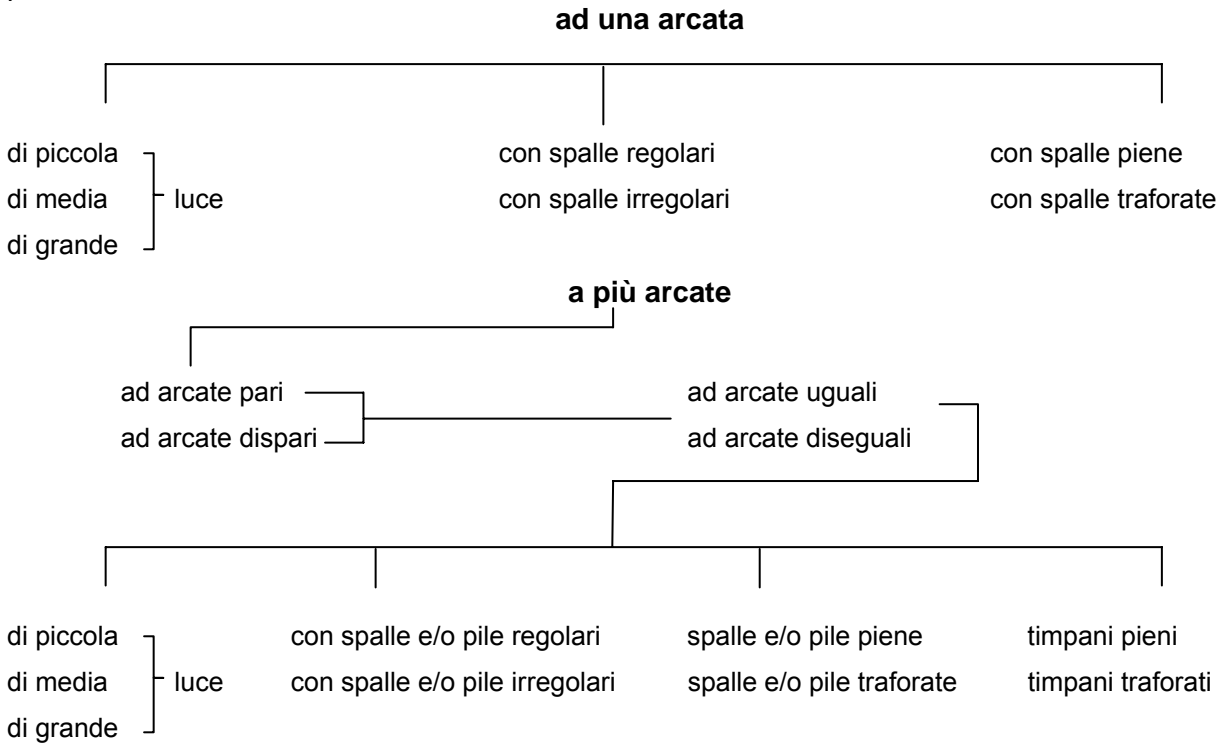
per destinazione d’uso:

- pedonali
- per strada ordinaria
- ponti canale
- ponti ferroviari

per forma:

- ad arco a tutto sesto
- ad arco ogivale o a sesto acuto
- ad arco ribassato
- ad arco policentrico
- a catenaria

per numero di arcate:



per tipo di sezione trasversale:

- a larghezza costante
- a larghezza variabile
- ad andamento rettilineo rispetto al fiume
- ad andamento rettilineo obliquo rispetto al fiume
- ad andamento curvilineo

Cenni sulla stabilità dei ponti in muratura

Lo studio delle strutture ad arco si fonda sull'analisi limite e sulla determinazione del fattore di sicurezza della struttura rispetto al più probabile meccanismo di collasso indotto da carichi esterni dati.

Coincide quindi con l'analisi in condizioni ultime dei possibili cinematismi della struttura, ovvero delle possibili configurazioni assunte dalla curva delle pressioni.

Il poter affermare che il grado di sicurezza di questi tipi di strutture è strettamente subordinato alla presenza di sufficienti margini rispetto all'innescarsi di un meccanismo di collasso (il più debole fra quelli ammissibili) deriva dalla lunga evoluzione teorica sul comportamento statico delle strutture ad arco e soprattutto dagli ultimi sviluppi di J. Heyman² basati sulla teoria della plasticità.

Nel "safe theorem" Heyman afferma che "se è possibile trovare una linea delle pressioni per l'arco completo, che sia in equilibrio con i carichi applicati (incluso ovviamente il peso proprio della struttura) e che rimane ovunque interna allo spessore dell'arco, allora questo è sicuro".

Questa affermazione consente di ovviare, ai fini della sicurezza, alla indeterminatezza legata alla individuazione della "vera" curva delle pressioni fra le infinite possibili.

Risulta infatti sufficiente determinare almeno una curva delle pressioni ammissibile (tutta contenuta nello spessore dell'arco) per essere certi del fatto che "l'arco sarà almeno altrettanto bravo a trovarsi una da sé" e quindi a stare in equilibrio.

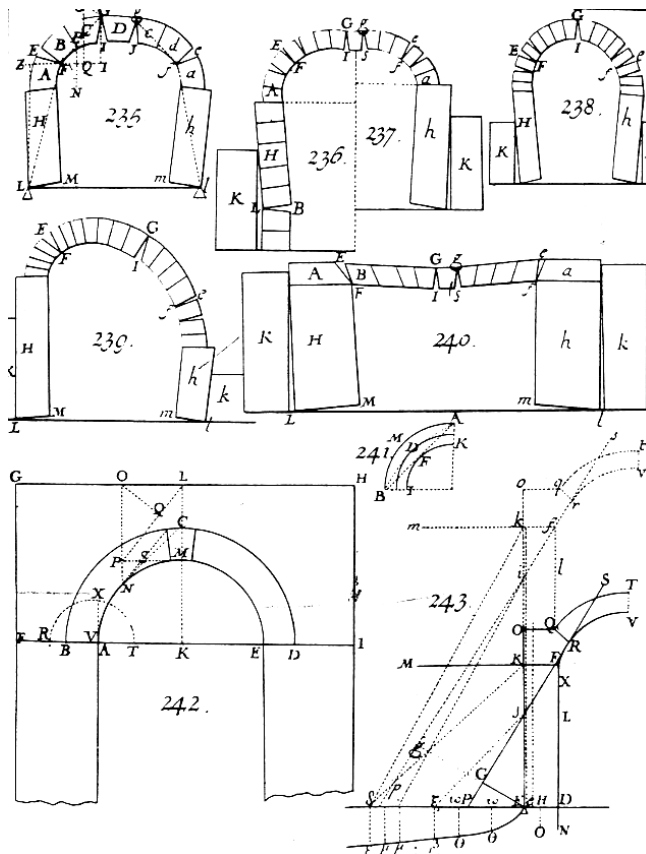
Risulta trascurabile dunque, al di là di casi particolari legati ad un eccessivo deterioramento fisico-chimico del materiale, la valutazione dello stato tensionale nei riguardi dei valori di rottura per schiacciamento del materiale.

Tale ultima affermazione, mutuata da numerose evidenze sperimentali e propria degli assunti teorici sopra accennati, trova la propria giustificazione nel fatto che in un arco costituito da un materiale non resistente a trazione come la muratura il livello di carico che provoca lo

schacciamento del materiale supera di molto il livello che innesca invece il meccanismo della struttura.

Nella gran parte dei casi risulta inoltre scongiurato il fenomeno di scorrimento fra i conci della struttura data la scarsa probabilità che la curva delle pressioni fuoriesca dal cono d'attrito senza prima fuoriuscire dallo spessore dell'arco.

La crisi è perciò legata all'insorgere di una serie di perni unilateri posti in maniera alternata all'intradosso e all'estradosso dell'arco secondo uno schema che è funzione della forma dello stesso e dei carichi agenti.



Frezier 1737-39: "lettura" di alcuni meccanismi di collasso

Risulta a questo punto necessario fornire alcune indicazioni di carattere quantitativo sul grado di sicurezza nei confronti della condizione ultima di collasso del "sistema arco" comprensivo anche dei piedritti di imposta.

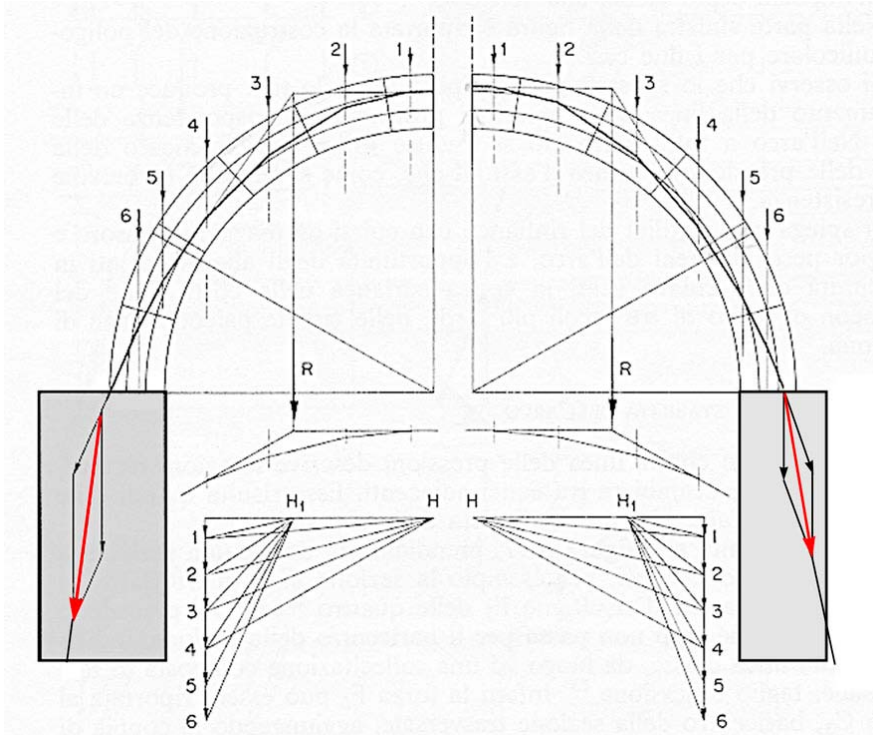
Preliminarmente devono essere distinti i due principali meccanismi di collasso possibili:

- ribaltamento (o slittamento) dei piedritti di imposta
- collasso dell'arco ad imposte fisse

Nel primo dei due casi (ribaltamento o slittamento) la condizione ultima di stabilità è governata dalla spinta sulle imposte murarie e risulta svincolata dalla formazione di cerniere plastiche a livello dell'arco.

Un principale parametro che descrive la sicurezza del sistema nei confronti di questo tipo di meccanismo è dunque quello che pone in relazione la spinta esercitata dall'arco sull'imposta con la spinta minima in grado di provocare il collasso del piedritto.

$$\Psi = H / H^*$$



Tracciamento del poligono funicolare dei carichi (A. Giuffrè, 1992³)

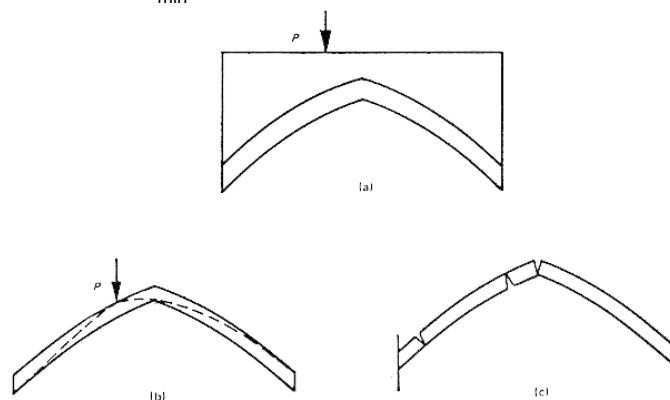
Lo schema riportato sopra pone in evidenza due diverse situazioni di imposta dell'arco con il piedritto di destra in una situazione di non ammissibilità.

Nel secondo caso citato (collasso dell'arco ad imposte fisse) la curva delle pressioni risulta compatibile in termini di spinta orizzontale con i piedritti di imposta, ma lambisce le superfici di intradosso ed estradosso dell'arco in almeno quattro punti così da determinare una configurazione ipostatica della struttura ed innescare un potenziale meccanismo di collasso.

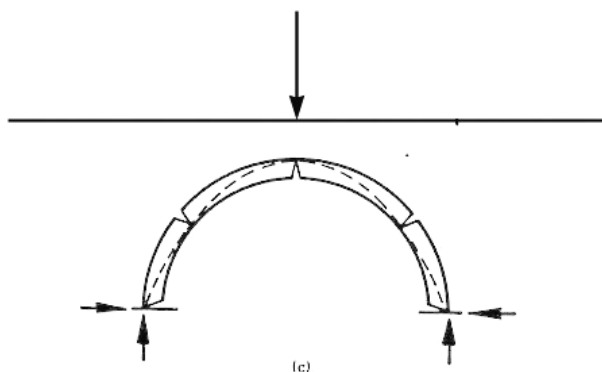
Nello specifico, se il carico risulta asimmetrico la forma del meccanismo di collasso presenta 4 cerniere, mentre solitamente se il carico risulta simmetrico la forma iniziale presenta 5 cerniere, per poi passare rapidamente ad un meccanismo a 4 cerniere, a causa delle inevitabili dissimmetrie geometriche presenti. Anche in questo caso è possibile desumere un fattore di sicurezza per la struttura nei riguardi del meccanismo.

Il fattore è di natura geometrica ed è ricavato dal rapporto tra il vero spessore dell'arco e quello di un ipotetico arco interno al primo, di spessore necessario a contenere interamente la curva delle pressioni relativa ai carichi esterni dati ².

$$\Omega = S / S_{\min}$$



Heyman 1966, cinematismo con 4 cerniere



Heyman 1966, cinematicismo con 5 cerniere

Ruolo degli elementi costruttivi nella risposta della struttura

Nel paragrafo precedente si è posto in evidenza il comportamento dell'impalcato di un ponte murario in condizioni ultime di stabilità.

Non si sono tuttavia fino ad ora presi in considerazione i rimanenti elementi costitutivi del ponte precedentemente descritti, quelli che non vengono considerati strutturali, che in generale costituiscono la "sovrastuttura". E' invece necessario comprendere "se", ed eventualmente "come", questi ulteriori elementi concorrono nel mantenimento della stabilità del manufatto.

Data la natura del problema risulta superflua e poco significativa una valutazione del livello tensionale sull'intera struttura in condizioni di esercizio, che di solito non costituisce la causa primaria del crollo. Si è visto infatti che per poter giungere a considerazioni inerenti la sicurezza del sistema arco è necessario analizzare la "condizione ultima" di questo.

In tale condizione è lecito affermare che il comportamento dell'intero manufatto è governato dall'arco (volta) portante, mentre le altre componenti si configurano "quasi"^a esclusivamente come pesi⁴.

Questa affermazione trova numerosi riscontri nell'osservazione di quadri fessurativi presenti su alcuni ponti a livello dell'arco portante e fra questo e la parete muraria di testa.

Quello che si evidenzia chiaramente in tali fenomeni, riportati nel successivo paragrafo, è l'insorgere di separazioni nette fra la superficie di estradosso dell'arco portante ed il paramento superiore, e la concomitante formazione di fessure ad andamento radiale in ben definite zone dell'arco.

La struttura in condizioni ultime tende a trasformarsi in uno dei meccanismi anzidetti rompendo i diversi legami iperstatici che fino a quel momento l'avevano caratterizzata.

Le masse murarie sovrastanti l'arco svolgono dunque in questa fase la "quasi"^b esclusiva funzione di carichi, comunque indispensabile per la sussistenza della struttura.

Di seguito vengono proposte alcune analisi di stabilità condotte su tre tipi differenti di arco mediante il codice di calcolo "Arco" elaborato dal Prof. Gelfi dell'Università di Brescia.

Le analisi vengono condotte attraverso la parametrizzazione dei seguenti fattori:

- Peso specifico del rinfiacco
- Angolo di attrito interno del rinfiacco e contributo della spinta passiva
- Carico accidentale e sua distribuzione
- Geometria dell'arco

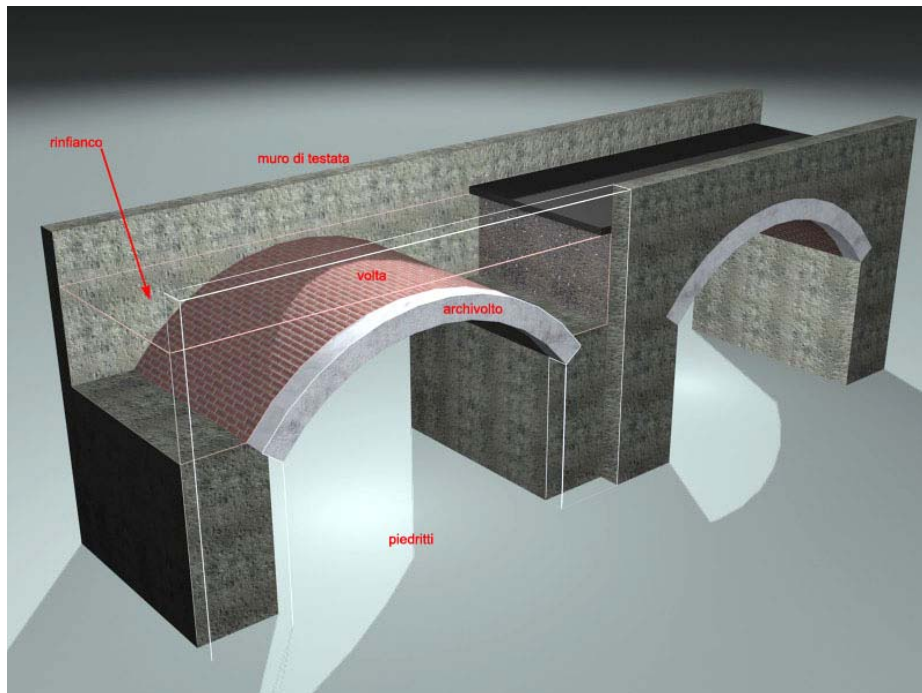
Si considerano tre differenti tipologie di arco caratterizzate da parametri comuni: medesima corda, medesimo spessore costante e medesimo spessore del rinfiacco in chiave.

Obiettivo di questa sintetica indagine è quello di ottenere un quadro sufficientemente rappresentativo delle differenti condizioni di sicurezza delle strutture oggetto di esame, in funzione dei diversi parametri in gioco.

In particolare si focalizza l'attenzione sul ruolo della sovrastuttura muraria del timpano e del rinfiacco nella valutazione del grado di sicurezza del manufatto.

^a Legato alla ulteriore risorsa stabilizzante offerta dal contrasto orizzontale dei rinfiacci.

^b Idem.

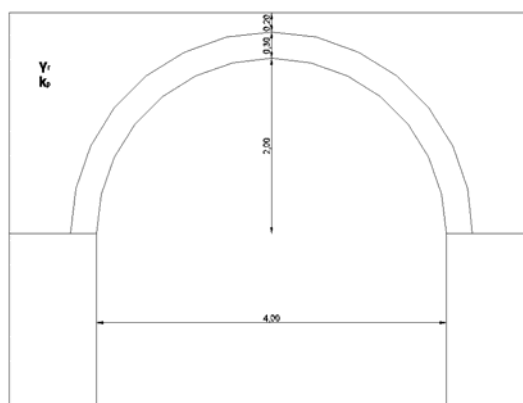


Schema dell'impalcato generico con arco a sesto ribassato

Caratteristiche degli archi:

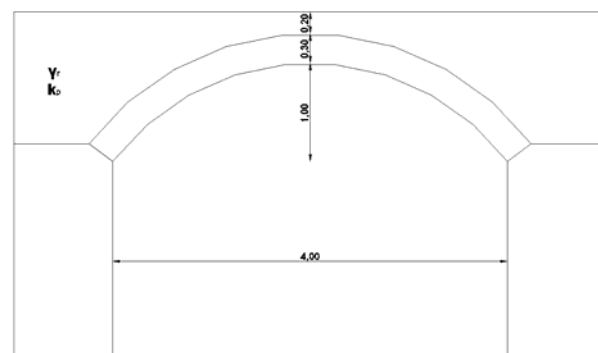
Arco a tutto sesto:

- corda: 4 m
- monta: 2 m
- spessore: 0.3 m
- spessore rinfianco in chiave: 0.2 m



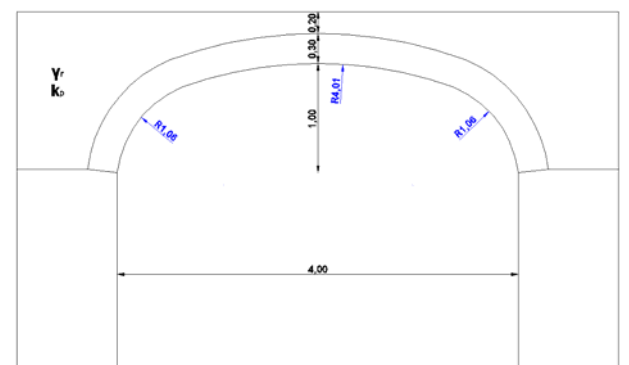
Arco a sesto ribassato:

- corda: 4 m
- monta: 1 m
- spessore: 0.3 m
- spessore rinfianco in chiave: 0.2 m



Arco policentrico:

- corda: 4 m
- monta: 1 m
- spessore: 0.3 m
- spessore rinfianco in chiave: 0.2 m
- raggio 1: 1.06 m
- raggio 2: 4.0 m



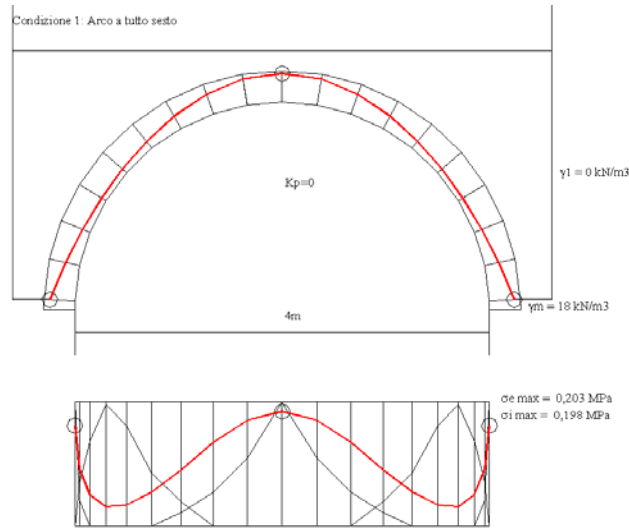
Condizione 1:

Carichi accidentali: non presenti

Rinfiacco: $\gamma_r = 0 \text{ t/m}^3$; $\Phi = 0^\circ$

Viene simulata la condizione di totale assenza del rinfiacco.

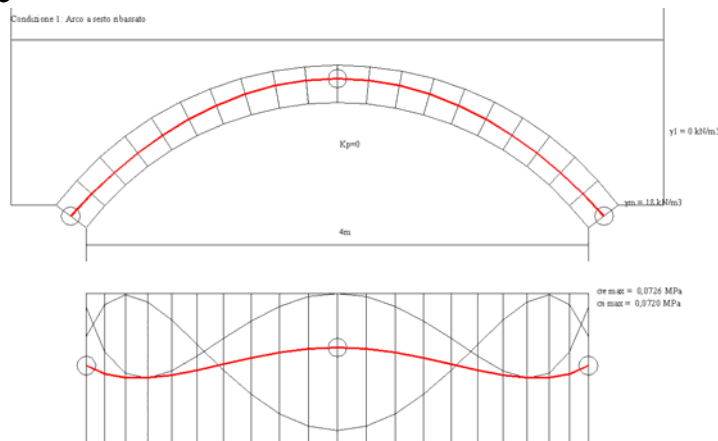
Arco a tutto sesto



La curva delle pressioni risulta interna allo spessore dell'arco. Non si registrano punti di tangenza né in intradosso, né in estradosso. Non si registra l'innescio di un meccanismo di collasso.

Fattore di sicurezza: $\Omega = S / S_{\min} = 30 / 22.97 = 1.306$

Arco a sesto ribassato

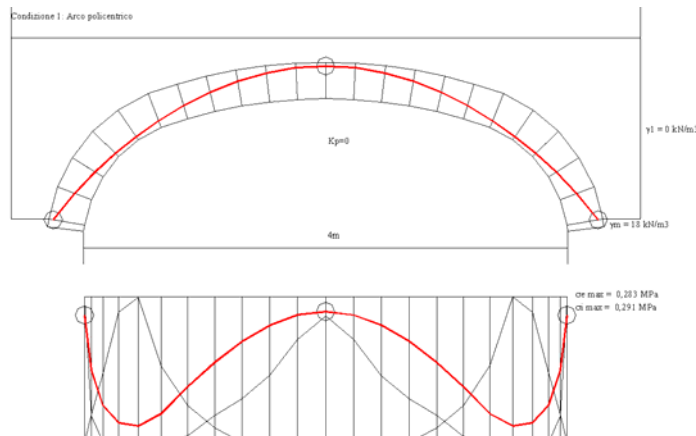


La curva delle pressioni risulta molto prossima alla linea d'asse dell'arco.

Fattore di sicurezza: $\Omega = S / S_{\min} = 30 / 6.07 = 4.97$

Fattore di sicurezza: $\Omega = S / S_{\min} = 30 / 23.62 = 1.27$

Arco policentrico



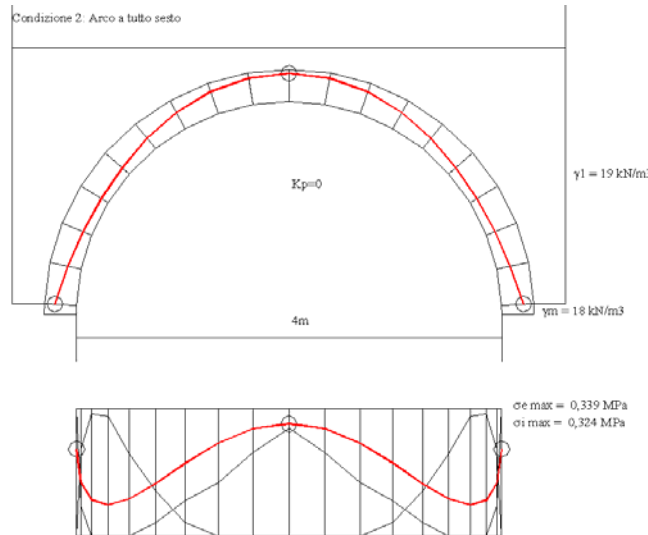
Come prevedibile la forte curvatura nelle zone delle reni determina, in assenza di rinfiacco, una condizione molto prossima alla forma simmetrica di meccanismo con 5 cerniere.

Condizione 2:

Carichi accidentali: non presenti
Rinfiango: $\gamma_r = 1.9 \text{ t/m}^3$; $\Phi = 0^\circ$

Viene simulata la condizione di assenza dei carichi accidentali e di un rinfiango granulare mediamente addensato. Viene trascurato il contributo della spinta passiva.

Arco a tutto sesto

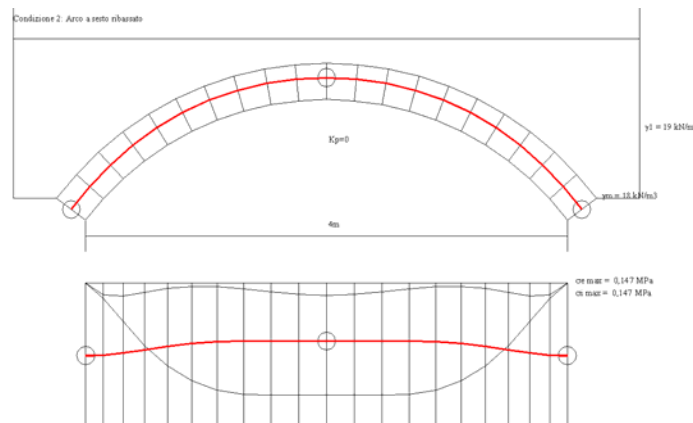


La curva delle pressioni risulta interna allo spessore dell'arco. Non si registrano punti di tangenza né in intradosso, né in estradosso. Non si registra l'innescio di un meccanismo di collasso.

La presenza del rinfiango determina un sensibile miglioramento in prossimità delle reni con un innalzamento della curva delle pressioni.

Fattore di sicurezza: $\Omega = S / S_{\min} = 30 / 19.09 = 1.57$

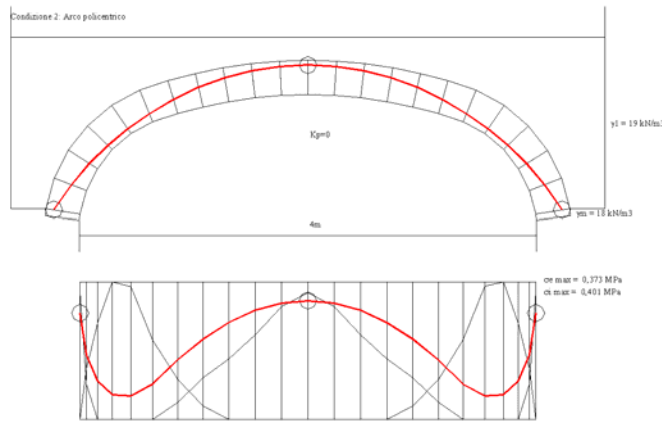
Arco a sesto ribassato



Ancor più di quanto registrato nella condizione 1 l'arco risulta ben posto rispetto ai carichi in gioco.

Fattore di sicurezza: $\Omega = S / S_{\min} = 30 / 2.89 = 10.38$

Arco policentrico



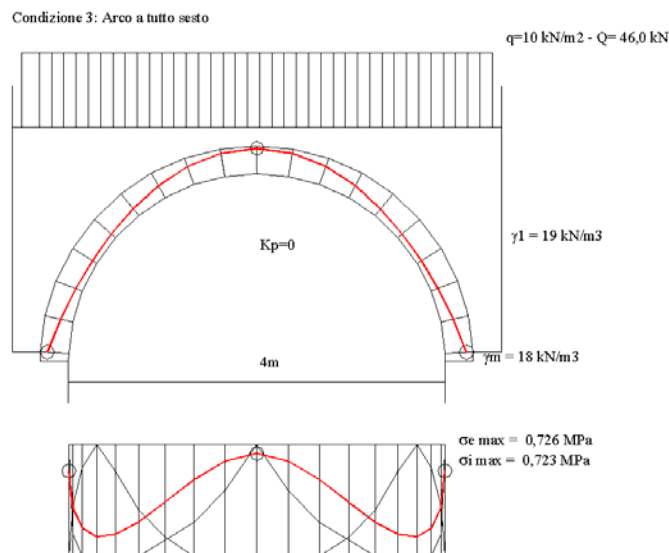
L'introduzione del rinfianco ha contribuito a migliorare sensibilmente il grado di sicurezza dell'arco
 Fattore di sicurezza: $\Omega = S / S_{\min} = 30 / 20.85 = 1.44$

Condizione 3:

Carichi accidentali: $q = 1 \text{ t/m}$ stesa uniforme
 Rinfianco: $\gamma_r = 1.9 \text{ t/m}^3$; $\Phi = 0^\circ$

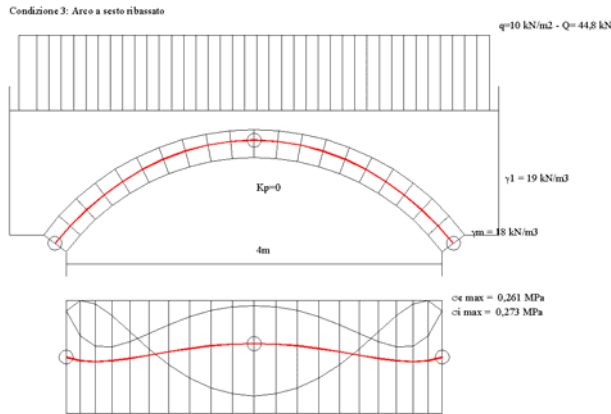
Viene simulata la condizione di carico accidentale uniformemente distribuito sull'intera carreggiata e di un rinfianco granulare mediamente addensato. Viene trascurato il contributo della spinta passiva.

Arco a tutto sesto



La curva delle pressioni risulta interna allo spessore dell'arco. Non si registrano punti di tangenza né in intradosso, né in estradosso. Non si registra l'innescio di un meccanismo di collasso. Nonostante l'aggiunta del carico accidentale la struttura presenta un maggior grado di sicurezza rispetto alla condizione 1, a riconferma dell'importante ruolo del rinfianco. Si rilevano ovviamente maggiori valori di sollecitazione locale sulla muratura, lontani tuttavia da stati di crisi.
 Fattore di sicurezza: $\Omega = S / S_{\min} = 30 / 22.37 = 1.353$

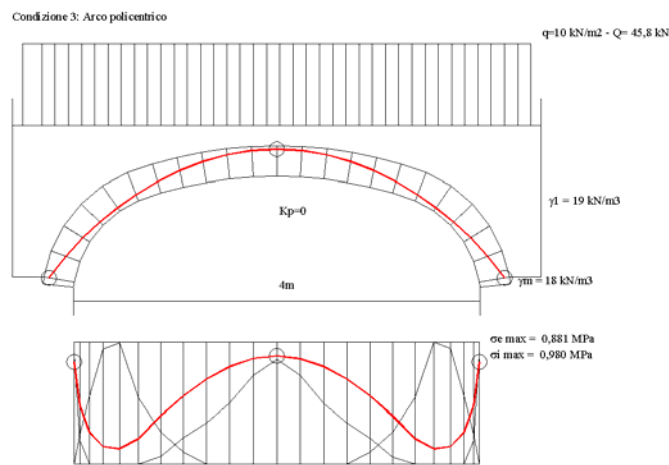
Arco a sesto ribassato



Non si registrano particolari variazioni rispetto alle due precedenti condizioni. La distribuzione uniforme di carico accidentale non altera la Cdp.

Fattore di sicurezza: $\Omega = S / S_{\min} = 30 / 4,80 = 6,25$

Arco policentrico



Si registra un ulteriore allontanamento della Cdp rispetto all'asse mediano dell'arco. La situazione risulta comunque migliore di quanto riscontrato nella condizione 1.

Fattore di sicurezza: $\Omega = S / S_{\min} = 30 / 22,80 = 1,317$

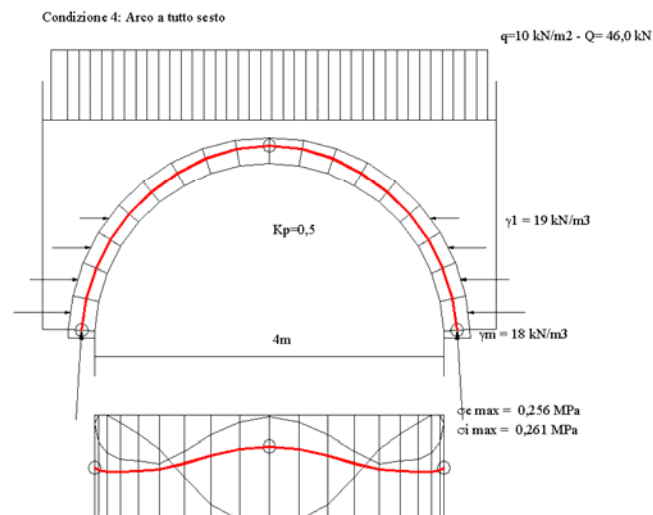
Condizione 4:

Carichi accidentali: $q = 1 \text{ t/m}$ stesa uniforme

Rinfiango: $\gamma_r = 1,9 \text{ t/m}^3$; $K_p = 0,5$

Viene simulata la condizione di carico accidentale distribuito uniformemente e di un rinfiango granulare mediamente addensato. Viene considerato il contributo della spinta passiva.

Arco a tutto sesto



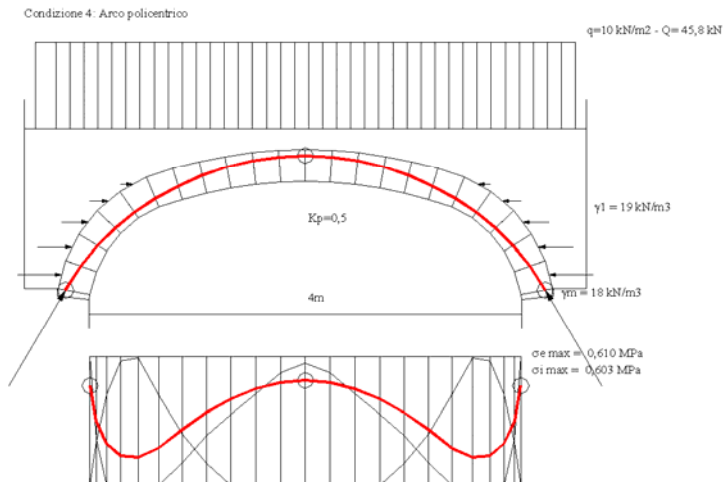
Rispetto alla condizione 3 si registra una consistente ricentratura della curva delle pressioni con un conseguente netto incremento del fattore di sicurezza.

Fattore di sicurezza: $\Omega = S / S_{\min} = 30 / 7.13 = 4.20$

Arco a sesto ribassato

Nel caso dell'arco a sesto ribassato, dati gli esiti della condizione 3 e il conseguente non innesco di un meccanismo cinematico si può escludere l'attivazione della spinta passiva dei rin fianchi.

Arco policentrico



Rispetto alla condizione 3 si registra una sensibile ricentratura della curva delle pressioni ed un conseguente incremento del fattore di sicurezza.

Fattore di sicurezza: $\Omega = S / S_{\min} = 30 / 17.87 = 1.67$

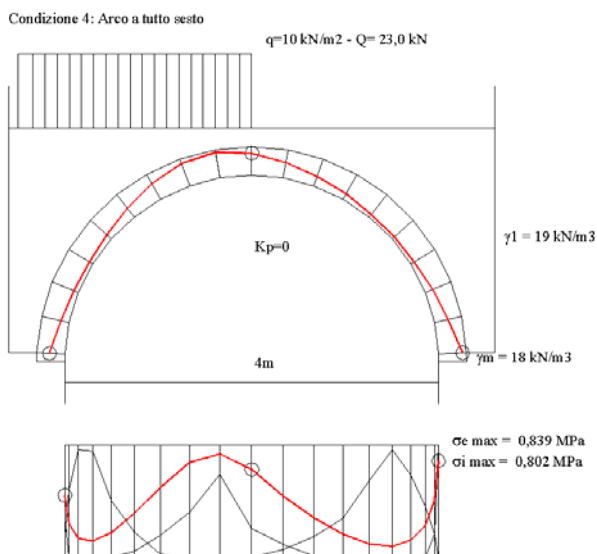
Condizione 5:

Carichi accidentali: $q = 1 \text{ t/m}$ stesa eccentrica

Rin fianco: $\gamma_r = 1.9 \text{ t/m}^3$; $\phi = 0^\circ$

Viene simulata la condizione di carico accidentale distribuito su una sola porzione eccentrica della carreggiata e di un rin fianco granulare mediamente addensato. Viene trascurato il contributo della spinta passiva.

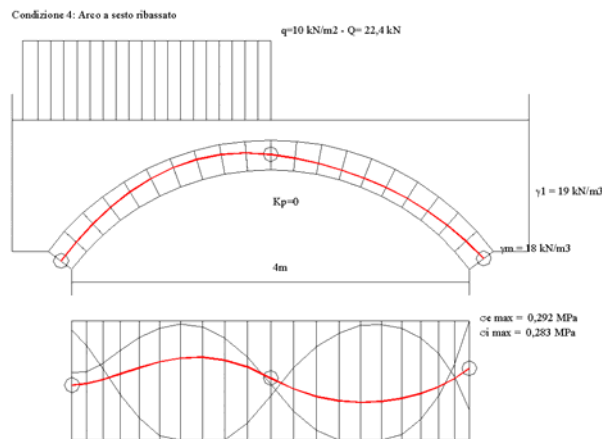
Arco a tutto sesto



Non si registrano punti di tangenza della curva della pressioni. Si verifica comunque un maggiore allontanamento dalla linea d'asse dell'arco rispetto alle condizioni precedenti e conseguentemente una ulteriore riduzione del fattore di sicurezza rispetto al meccanismo di collasso a 4 cerniere.

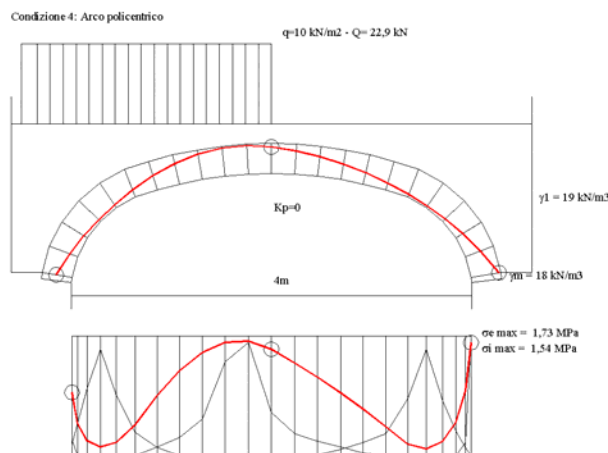
Fattore di sicurezza: $\Omega = S / S_{\min} = 30 / 24.70 = 1.214$

Arco a sesto ribassato



Si registra un netto scostamento della Cdp rispetto alle precedenti posizioni centrali. Nonostante ciò tuttavia l'arco risulta ben lontano dalla soglia di instabilità. Mantenendo la stessa stesa di carico si raggiunge il collasso attorno alle 6 t/m con fenomeni di rottura locale per schiacciamento. Fattore di sicurezza: $\Omega = S / S_{\text{min}} = 30 / 11,38 = 2,63$

Arco policentrico



L'arco risulta in una situazione di incipiente collasso. Si può notare la quasi tangenza della Cdp alle superfici esterne in 4 punti. Fattore di sicurezza: $\Omega = S / S_{\text{min}} = 30 / 26,5 = 1,13$

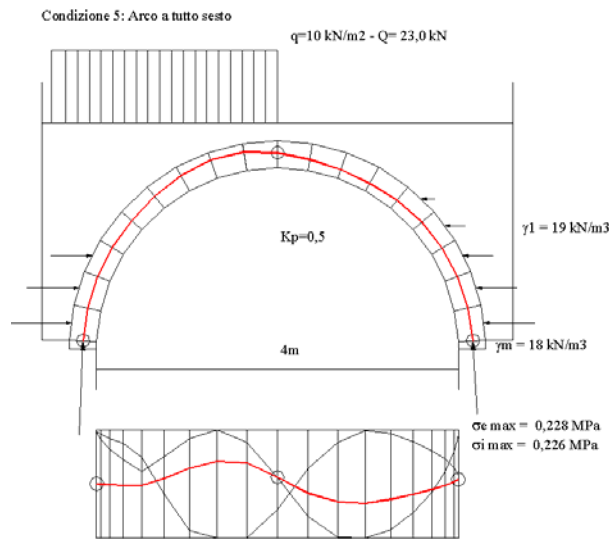
Condizione 6:

Carichi accidentali: $q = 1 \text{ t/m}$ stesa eccentrica

Rinfianco: $\gamma_r = 1.9 \text{ t/m}^3$; $K_p = 0.5$

Viene simulata la medesima precedente condizione considerando però il contributo derivato dalla spinta passiva del rinfianco.

Arco a tutto sesto



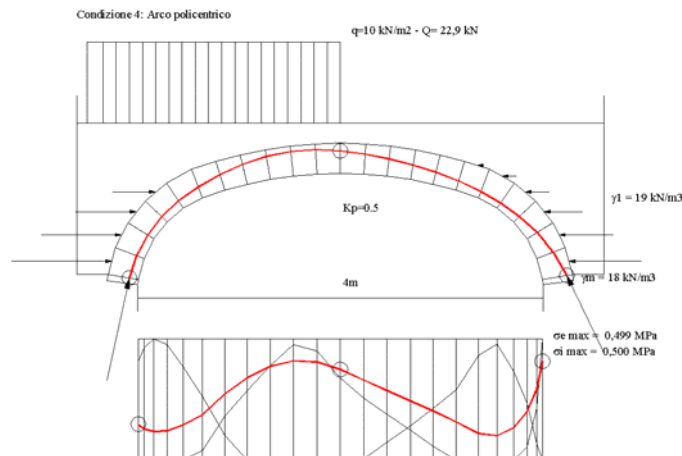
L'attivazione del contrasto laterale derivato dalla spinta passiva del rinfianco determina una netta ricentratura della Cdp e conseguentemente un incremento del fattore di sicurezza.

Fattore di sicurezza: $\Omega = S / S_{\min} = 30 / 11.62 = 2.58$

Arco a sesto ribassato

Nel caso dell'arco a sesto ribassato, dati gli esiti della condizione 4 e il conseguente non innesco di un meccanismo cinematico si può escludere l'attivazione della spinta passiva dei rinfianchi.

Arco policentrico



L'attivazione della spinta passiva sui rinfianchi determina una sensibile ricentratura della Cdp e quindi un incremento del fattore di sicurezza.

Fattore di sicurezza: $\Omega = S / S_{\min} = 30 / 18.45 = 1.626$

QUADRO RIASSUNTIVO DEGLI ESITI:

	Tutto sesto	Sesto ribassato	Policentrico
Condizione 1	$\Omega = 1.306$	$\Omega = 4.97$	$\Omega = 1.27$
Condizione 2	$\Omega = 1.57$	$\Omega = 10.38$	$\Omega = 1.44$

Condizione 3	$\Omega = 1.353$	$\Omega = 6.25$	$\Omega = 1.317$
Condizione 4	$\Omega = 4.20$	spinta passiva non attivata	$\Omega = 1.67$

Condizione 5	$\Omega = 1.214$	$\Omega = 2.63$	$\Omega = 1.13$
Condizione 6	$\Omega = 2.58$	spinta passiva non attivata	$\Omega = 1.626$

L'indagine parametrica sopra riportata, seppur molto riduttiva delle molteplici casistiche possibili e limitata alla sola valutazione del meccanismo ad imposte fisse, permette di porre in rilievo il fondamentale ruolo svolto dai rinfianchi, e più in generale dalla sovrastante massa muraria, nei confronti del comportamento ultimo dell'arco portante.

L'apporto fornito da tali elementi non è limitato alla sola spinta verticale da peso proprio, ma si esplica anche in termini di spinta orizzontale, con una importante funzione di "contenimento" nei confronti di un eventuale cinematismo dell'arco.

Deve essere tuttavia chiarito che tale apporto, a differenza del peso, non risulta a priori scontato, ed è subordinato all'esistenza di alcune fondamentali condizioni al contorno fra cui:

- la presenza di rinfianchi compatti e dotati di buone caratteristiche meccaniche
- la presenza di imposte in grado di sopportare l'incremento di spinta orizzontale derivato dalla spinta passiva del rinfianco

Lettura dei meccanismi di collasso estesa al sistema "arco-imposte"

Al fine di estendere la trattazione al sistema "arco-imposte" vengono illustrati di seguito, per le tre tipologie di arco analizzate al punto precedente, alcuni dei possibili meccanismi di collasso riguardanti anche il ribaltamento e lo slittamento dei piedritti di imposta.

Vengono introdotti per i tre archi piedritti di altezza 200cm e larghezza 100cm e viene eseguita l'analisi allo stato limite di questi sotto le azioni illustrate nelle "condizioni 4 e 6" del paragrafo precedente.

Viene inoltre introdotto e posto in evidenza un ulteriore parametro che influenza in maniera considerevole il comportamento statico del sistema strutturale "arco-piedritti": il coefficiente di attrito interelemento.

Nei casi proposti di seguito vengono eseguite per la medesima condizione di carico due analisi distinte con due differenti valori di attrito interno della muratura ($\phi=22^\circ$, $\phi=35^\circ$).

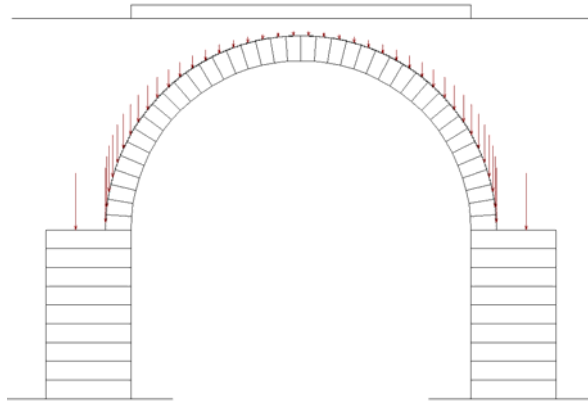
Le analisi vengono condotte mediante l'impiego del codice di calcolo ad elementi finiti "Ring 1.5".

Condizione 4:

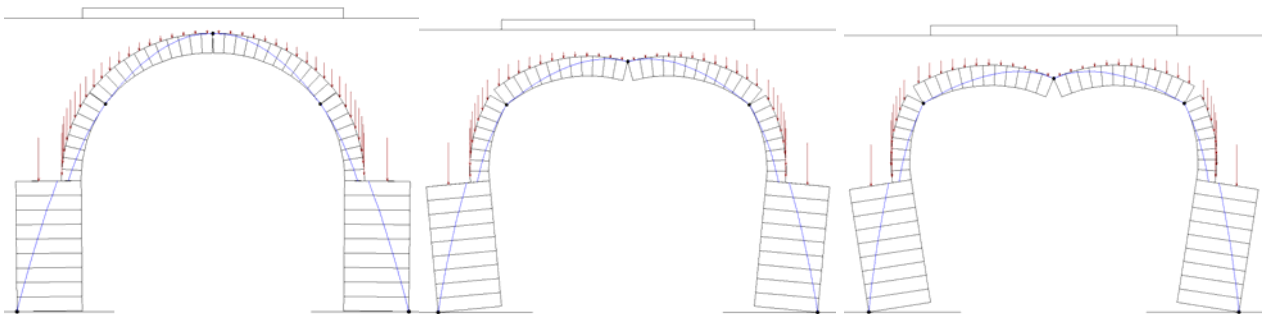
Carichi accidentali: $q = 1 \text{ t/m}$ stesa uniforme

Rinfianco: $\gamma_r = 1.9 \text{ t/m}^3$; $K_p = 0.5$

Arco a tutto sesto

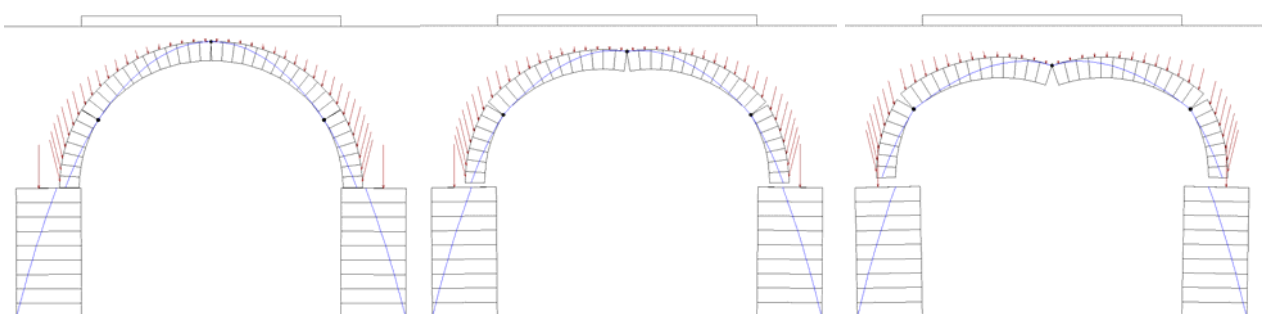


Attrito: $\phi = 35^\circ$



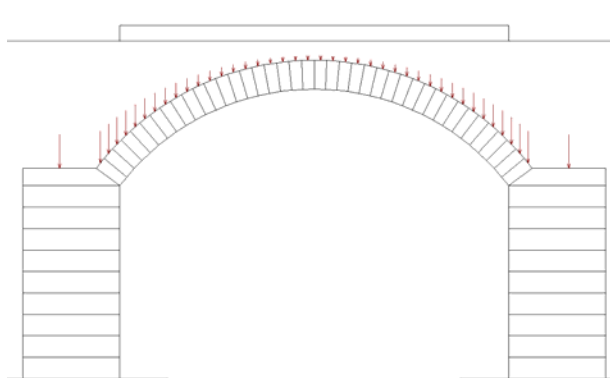
Il meccanismo di collasso risulta esteso ai piedritti di imposta che tendono a ribaltare sotto la spinta orizzontale dell'arco. Si registra la formazione di 5 cerniere alternate disposte simmetricamente. Non si manifestano né fenomeni locali di scivolamento fra gli elementi dell'arco né scivolamenti dei piedritti.

Attrito: $\phi = 22^\circ$

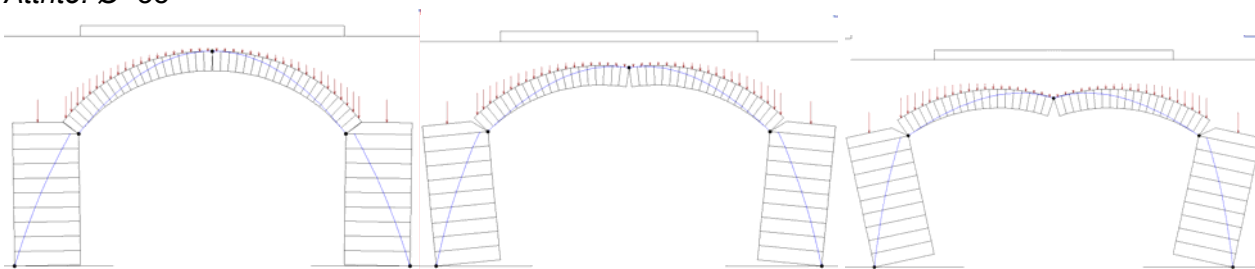


A differenza del caso precedente il meccanismo di collasso risulta di tipo "misto". Il sistema non raggiunge la crisi con il ribaltamento dei piedritti, ma con lo scivolamento delle imposte dell'arco sugli stessi.

Arco a sesto ribassato

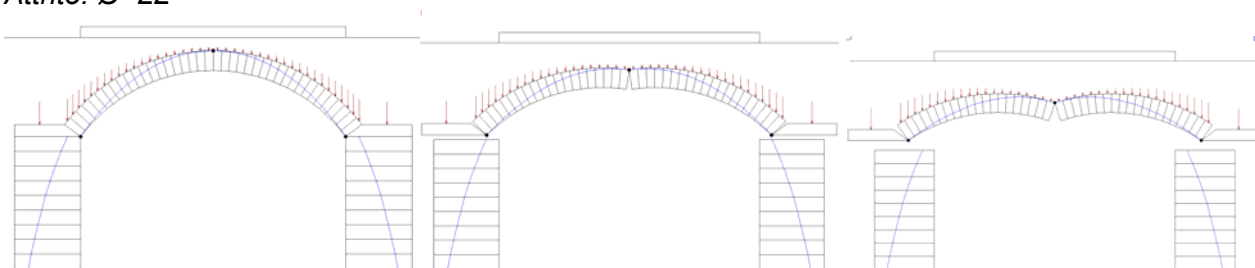


Attrito: $\phi=35^\circ$



Il meccanismo di collasso risulta esteso ai piedritti di imposta che tendono a ribaltare sotto la spinta orizzontale dell'arco. Si registra la formazione di 5 cerniere alternate disposte simmetricamente. Non si manifestano né fenomeni locali di scivolamento fra gli elementi dell'arco né scivolamenti dei piedritti.

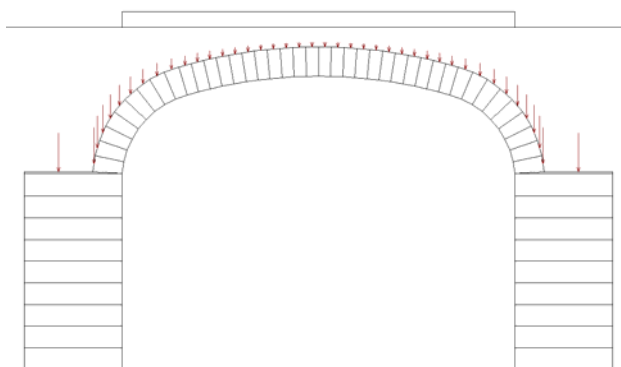
Attrito: $\phi=22^\circ$



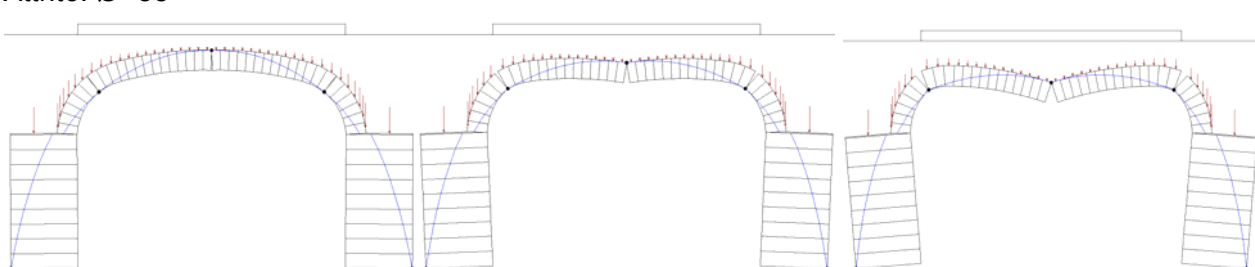
Il collasso riguarda il solo arco con la formazione di tre cerniere e con lo scivolamento delle imposte verso l'esterno.

Alla base dei conci sommitali dei due piedritti la curva delle pressioni supera l'angolo di attrito definito.

Arco policentrico

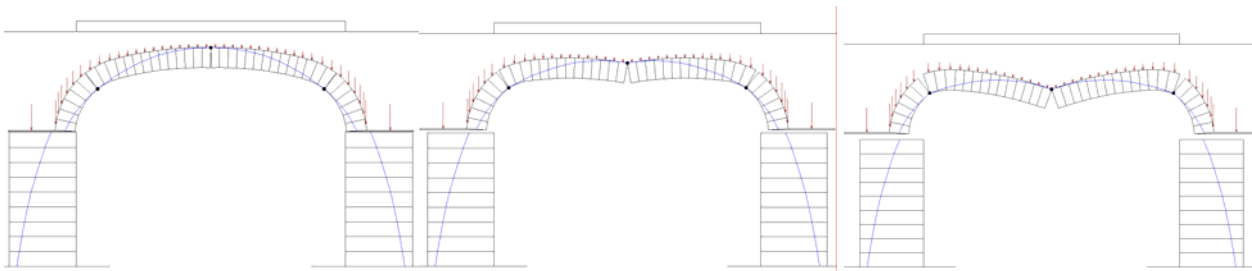


Attrito: $\phi=35^\circ$



Il meccanismo di collasso risulta esteso ai piedritti di imposta che tendono a ribaltare sotto la spinta orizzontale dell'arco. Si registra la formazione di 5 cerniere alternate disposte simmetricamente. Non si manifestano né fenomeni locali di scivolamento fra gli elementi dell'arco né scivolamenti dei piedritti.

Attrito: $\phi=22^\circ$



Il collasso riguarda il solo arco con la formazione di tre cerniere e con lo scivolamento delle imposte verso l'esterno.

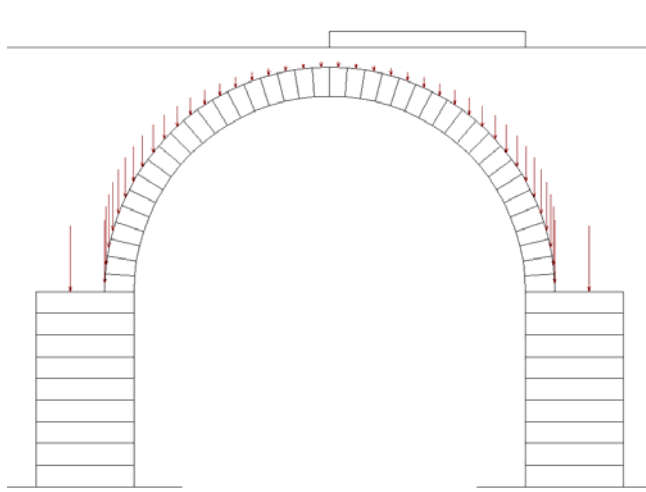
Alla base dei conci sommitali dei due piedritti la curva delle pressioni supera l'angolo di attrito definito.

Condizione 6:

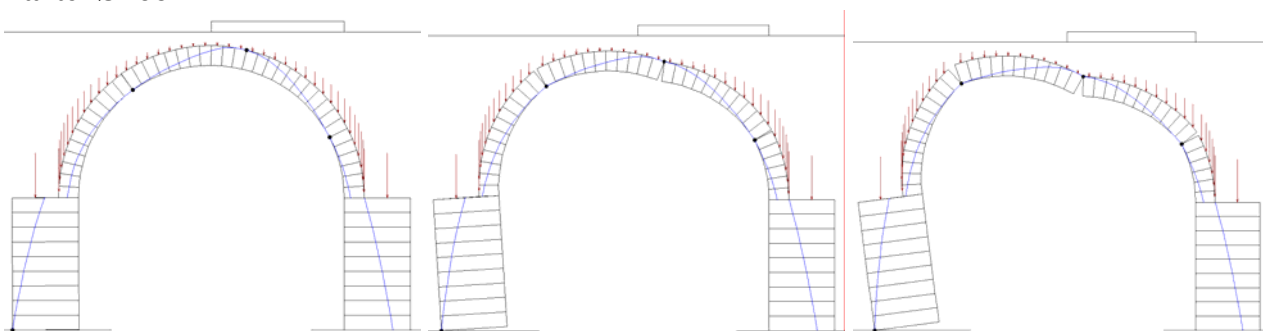
Carichi accidentali: $q = 1 \text{ t/m}$ stesa eccentrica

Rinfianco: $\gamma_r = 1.9 \text{ t/m}^3$; $K_p = 0.5$

Arco a tutto sesto

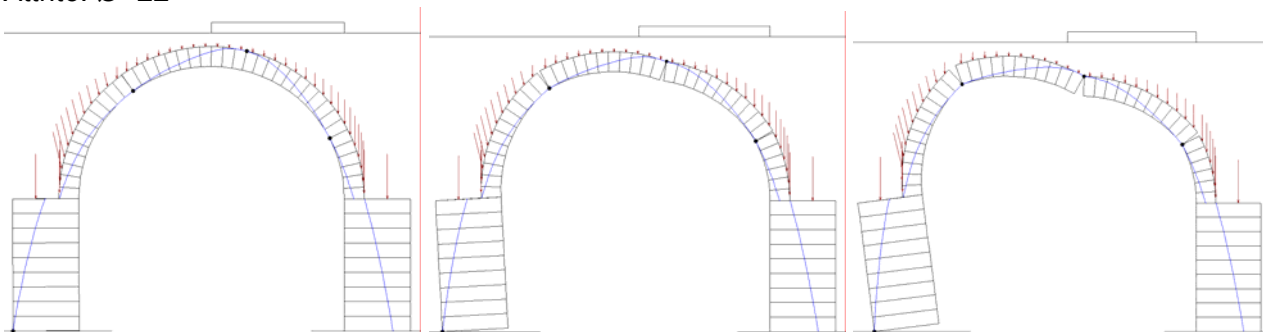


Attrito: $\phi=35^\circ$



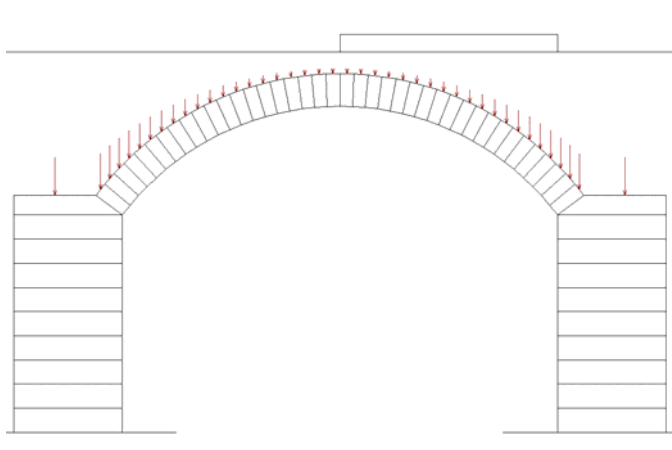
Il meccanismo di collasso risulta esteso al piedritto di sinistra che tende a ribaltare sotto la spinta orizzontale dell'arco. Si registra la formazione di 4 cerniere alternate. Non si manifestano né fenomeni locali di scivolamento fra gli elementi dell'arco né scivolamenti dei piedritti.

Attrito: $\phi=22^\circ$

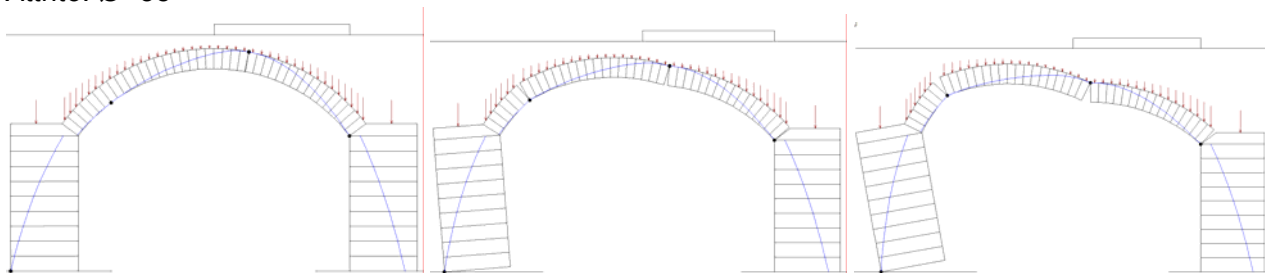


Nonostante la marcata riduzione dell'angolo di attrito interno nella muratura il meccanismo di collasso risulta pressoché identico al precedente. Non si registrano fenomeni di scivolamento.

Arco a sesto ribassato

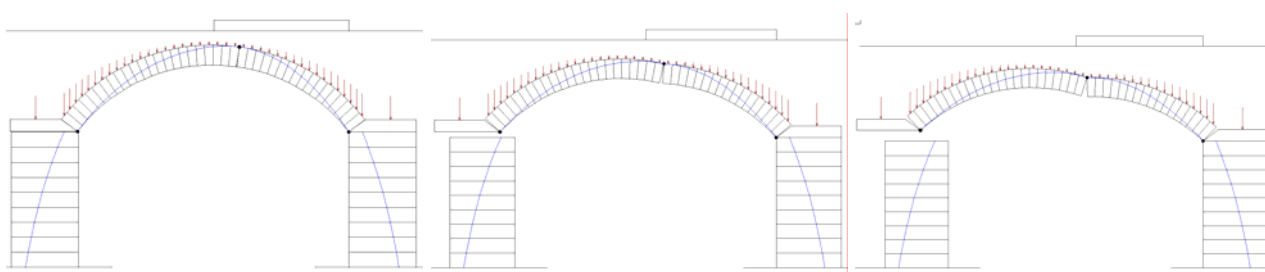


Attrito: $\phi=35^\circ$



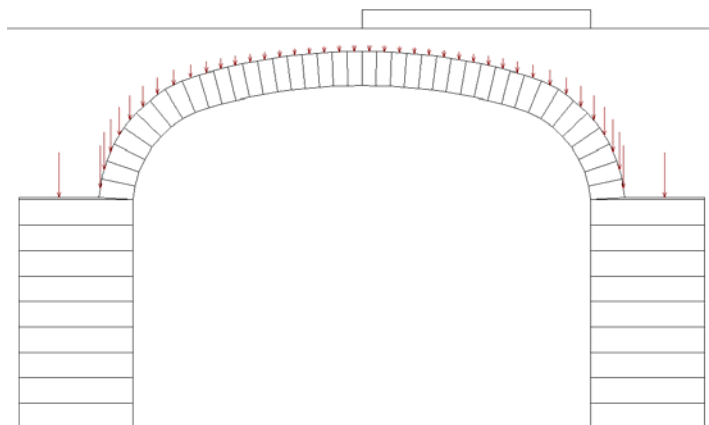
Il meccanismo di collasso risulta esteso al piedritto di sinistra che tende a ribaltare sotto la spinta orizzontale dell'arco. Si registra la formazione di 4 cerniere alternate. Non si manifestano né fenomeni locali di scivolamento fra gli elementi dell'arco né scivolamenti dei piedritti.

Attrito: $\phi=22^\circ$

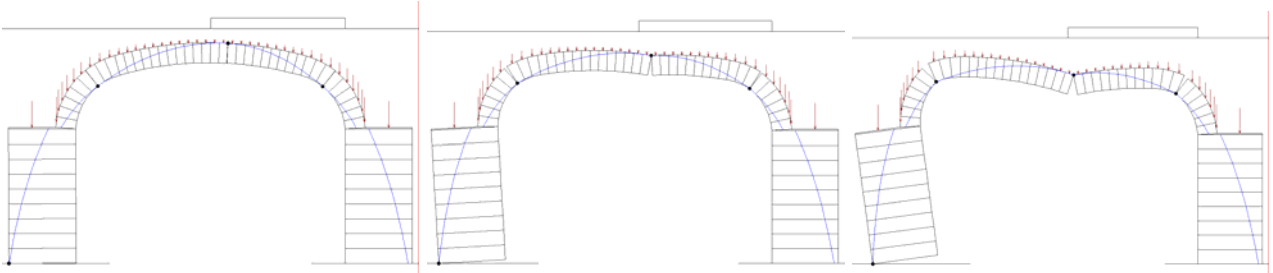


Il collasso riguarda il solo arco con la formazione di tre cerniere e con lo scivolamento della imposta di sinistra verso l'esterno.

Arco policentrico

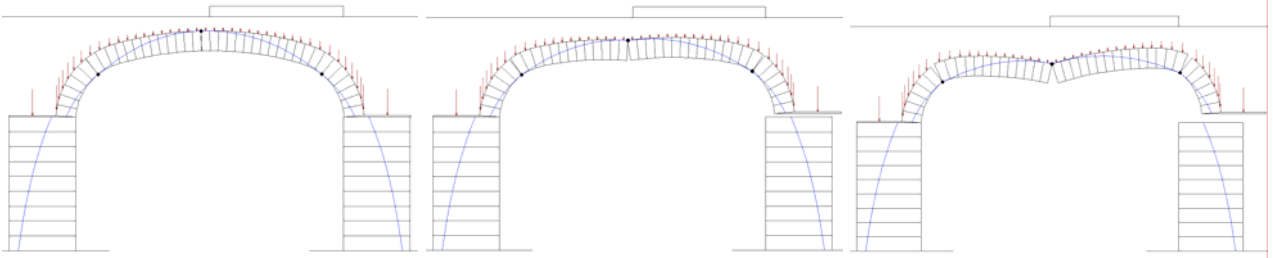


Attrito: $\phi=35^\circ$



Il meccanismo di collasso risulta esteso al piedritto di sinistra che tende a ribaltare sotto la spinta orizzontale dell'arco. Si registra la formazione di 4 cerniere alternate. Non si manifestano né fenomeni locali di scivolamento fra gli elementi dell'arco né scivolamenti dei piedritti.

Attrito: $\phi=22^\circ$



Il collasso riguarda il solo arco con la formazione di tre cerniere e con lo scivolamento della imposta di destra verso l'esterno.

I risultati ottenuti nel presente paragrafo permettono dunque di confermare quanto già affermato in precedenza riguardo al collasso per scorrimento relativo fra i conci dell'arco: il verificarsi di tale fenomeno risulta molto improbabile per normali spessori dell'arco.

Risulta invece molto più significativo il problema dello scorrimento parziale o complessivo dei piedritti di imposta.

Come visto tale fenomeno è fortemente influenzato da numerosi fattori fra cui:

- caratteristiche meccaniche della muratura;
- entità del carico verticale stabilizzante sui piedritti;
- geometria dell'arco;
- larghezza dei piedritti;
- simmetria geometrica e di carico del sistema;

Letture delle patologie dei ponti in muratura ed individuazione delle cause scatenanti

In una prima grande classificazione dei tipi di degrado che interessano i ponti in muratura e delle cause che li hanno determinati possono essere introdotte le seguenti macrocategorie:

Degradi originati da cause intrinseche al manufatto:

Catalogabili nella maggior parte dei casi come veri e propri difetti di costruzione possono essere legati a vari fattori.

- Difetti di progetto
- Scarsa qualità dei materiali
- Difetti realizzativi

Degradi originati da cause estrinseche al manufatto:

In questa categoria risultano compresi tutti quei fenomeni di degrado dei ponti le cui cause, di diversa natura, sono ascrivibili a fattori esterni agli stessi.

In questo senso si possono distinguere degrading determinati da:

- Azioni ambientali di natura fisica
 - *Vegetazione infestante*
 - *Variazioni termiche e igrometriche*
 - *Azione meccanica da dilavamento*
 - *Incendio*
- Azioni ambientali di natura chimica
 - *Efflorescenze e subefflorescenze saline*

- *Aggressione chimica da agenti inquinanti*
- Azioni sollecitanti di natura statica o dinamica:
 - Nel piano verticale del ponte
 - Pesi propri e di eventuali sovrastrutture
 - Transito mezzi
 - Nel piano trasversale al ponte
 - Flusso idrodinamico ordinario
 - Flusso idrodinamico eccezionale (alluvione)
 - Vento
 - Multidirezionali
 - Sisma
- Azioni derivate da variazioni al contorno
 - *Affondamento e scalzamento delle imposte*
 - *Cedimenti fondali*

Vengono di seguito riportate, secondo una suddivisione per elemento strutturale interessato dal fenomeno, le principali patologie che interessano i ponti in muratura e delle stesse vengono fornite alcune valutazioni in termini di diagnosi delle più probabili cause scatenanti.

Murature di testa - distacco dall'arco portante:

Questo tipo di manifestazione di degrado, piuttosto frequente nei ponti in muratura, è strettamente correlata alle osservazioni fatte nel paragrafo precedente circa i meccanismi di collasso della struttura.

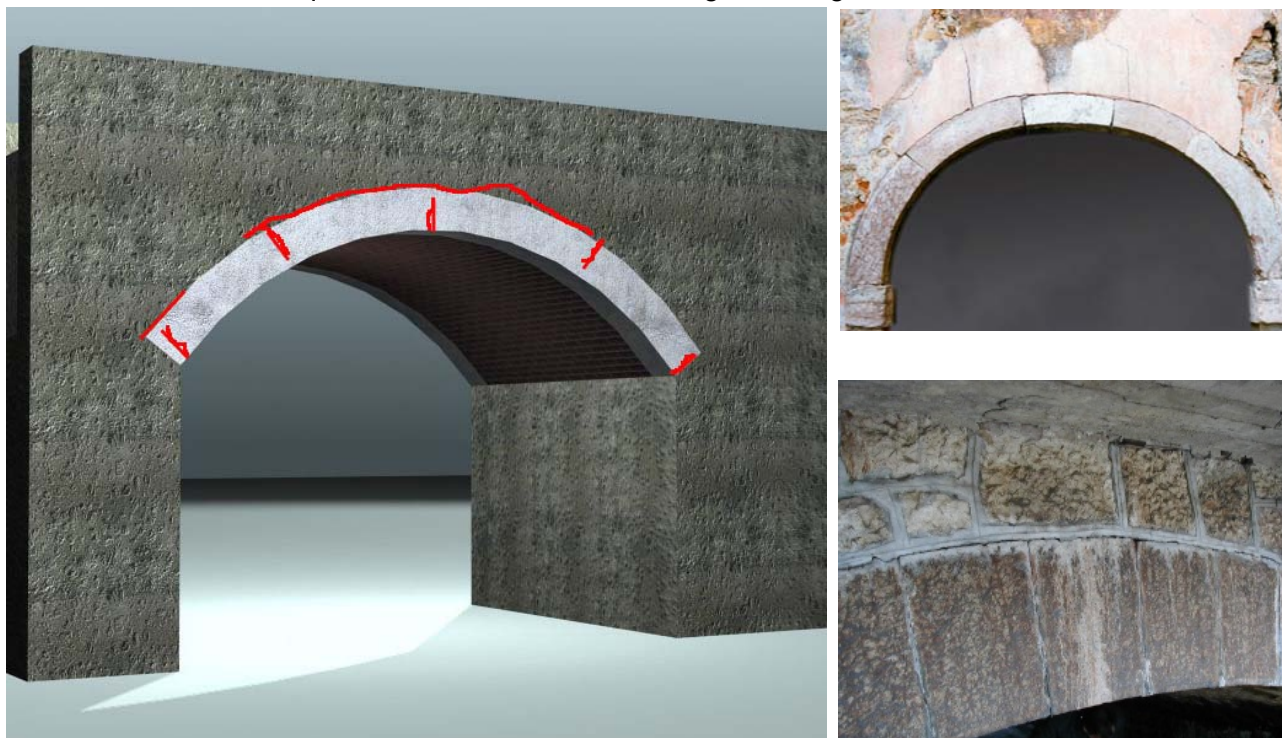
Questo tipo di quadro fessurativo evidenzia infatti la tendenza dell'arco portante ad innescare un cinematismo liberandosi da ogni tipo di costrizione iperstatica al contorno.

E' accompagnato dalla formazione di fessure alternate a livello dei conci dell'arco.

E' sintomatico quindi un assestamento, più o meno importante, avvenuto a livello dell'arco e può costituire un valido indicatore di un eventuale stato di sofferenza della struttura portante del ponte.

Ulteriori cause di questa manifestazione di fessurazione muraria possono essere:

- spinte orizzontali indotte dall'azione del riempimento contro il muro di testa;
- infiltrazioni d'acqua e successivo fenomeno di gelo e disgelo.



Fessurazioni radiali e distacco fra pareti di testa e arco

Murature di testa - deformazioni trasversali:

Questi tipi di fenomeni sono principalmente riconducibili all'azione destabilizzante esercitata in direzione trasversale dalla spinta attiva dei rinfianchi.

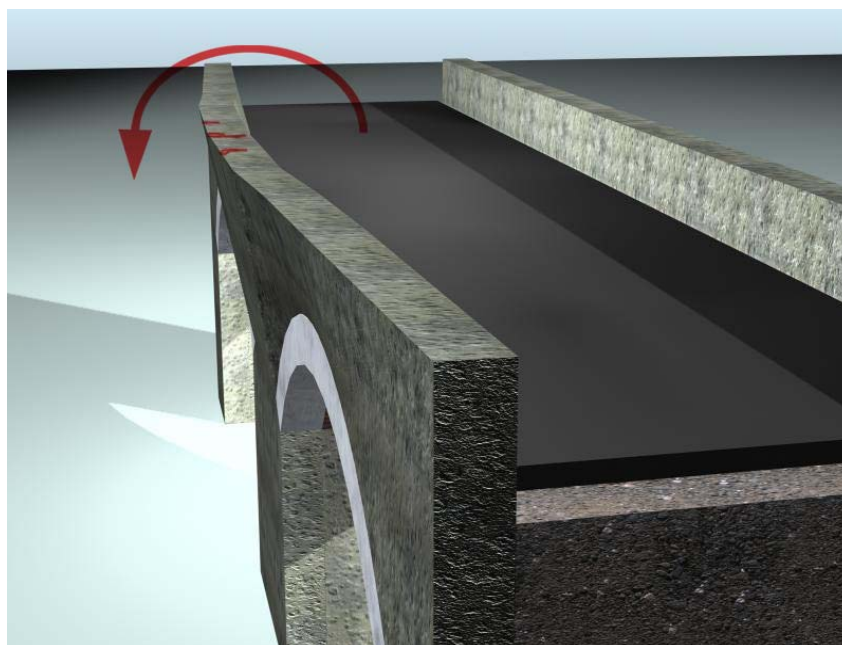
I parametri che maggiormente influenzano tali patologie sono:

- caratteristiche meccaniche del materiale di riempimento
- presenza di un impalcato stradale sufficientemente rigido in grado di distribuire in maniera idonea i carichi dei veicoli
- entità delle vibrazioni indotte dal transito veicolare
- snellezza dei muri di testa
- spessori rinfianchi
- presenza di elementi trasversali di ritegno (catene metalliche o lignee)
- possibilità di infiltrazione dell'acqua meteorica sotto il piano stradale con conseguente saturazione dei rinfianchi.

In taluni casi la causa di tali degni è derivata anche dall'urto di veicoli contro il parapetto (generalmente solidale al timpano).

Questi tipi di patologie si manifestano solitamente con:

- rotazione verso l'esterno: inflessione del muro di testa con deformata tipo mensola incastrata nell'arco sottostante;
- spanciamento: inflessione del muro di testa con deformata tipo trave appoggiata in corrispondenza dell'arco e dell'estremità superiore del muro;



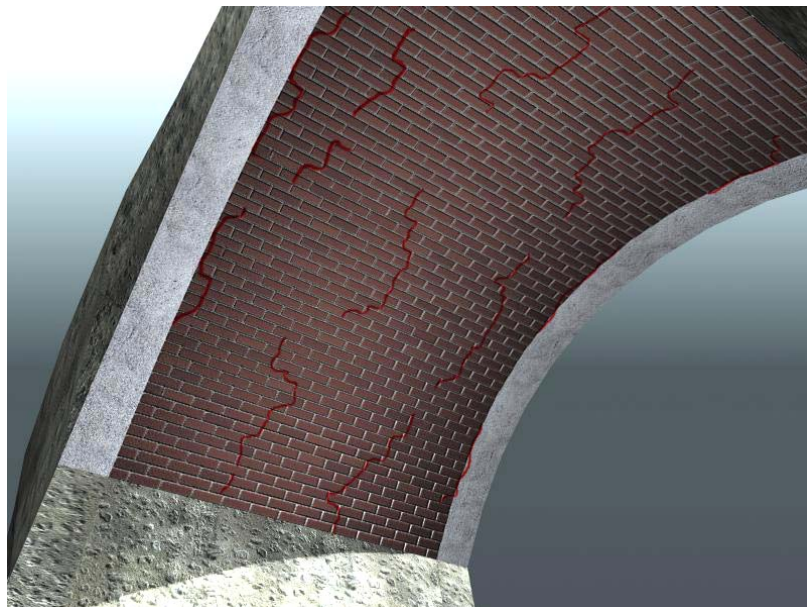
Arco portante - fessure ad andamento radiale:

Come già illustrato nelle precedenti sezioni e nel punto relativo al distacco del muro di testa questo tipo di fessure deriva dall'innescarsi di un meccanismo a livello dell'arco consistente nella rotazione relativa di alcuni suoi settori attorno a perni unilaterali posti in maniera alternata sulle sue superfici di intradosso ed estradosso.

Tale meccanismo può essere originato da un cedimento di una o entrambe le imposte o può essere legato ad un meccanismo ad imposte fisse dell'arco.

Volta portante - fessure ad andamento longitudinale:

Parzialmente correlata al fenomeno sopra illustrato di cedimento trasversale dei muri di timpano questa patologia molto ricorrente nei ponti murari si manifesta con la formazione di lesioni ad andamento longitudinale, generalmente a livello dei soli corsi di malta, chiaramente visibili sulla superficie di intradosso della volta portante (cfr. schema allegato).



Rappresentazione delle lesioni longitudinali nella volta

Questa forma di degrado è solitamente influenzata dai seguenti fattori:

- deterioramento chimico-fisico dei giunti di malta della volta;
- entità delle vibrazioni indotte dal transito veicolare
- presenza di elementi trasversali di ritegno (catene metalliche o lignee)
- spessori rinfianchi
- possibilità di infiltrazione dell'acqua meteorica sotto il piano stradale con conseguente saturazione dei rinfianchi.
- caratteristiche meccaniche del materiale di riempimento
- presenza di nervature longitudinali di estradosso della volta (frenelli)
- eterogeneità fra gli archivolti e la volta interna (archivolti realizzati con tecniche di grande apparecchio e volta interna con tecniche di piccolo apparecchio)



Ponte di Campazzino - Milano

La degenerazione del fenomeno può determinare l'insorgenza di problemi del secondo ordine nel piano trasversale dell'arco, data la formazione di porzioni isolate e molto irregolari di volta. Ne consegue un netto abbassamento dei margini di sicurezza dell'arco.

Pile e spalle – traslazioni e rotazioni:

Come accennato nelle precedenti sezioni il comportamento ultimo dell'arco è fortemente condizionato dalle caratteristiche delle imposte.

Si può dunque verificare un collasso della struttura per cedimento dei piedritti determinato dal superamento della spinta orizzontale sollecitante rispetto a quella resistente.

Il collasso può avvenire per ribaltamento o per scorrimento degli stessi.

I fattori che maggiormente influenzano questi tipi di fenomeno sono:

- entità ed inclinazione della spinta dell'arco;
- snellezza delle pile;
- simmetria delle spinte nel caso di ponti a più arcate;
- caratteristiche fondazioni;
- caratteristiche terreno di fondazione;

La grande maggioranza dei crolli documentati di ponti in muratura è da attribuire a movimenti anomali delle pile e delle spalle.

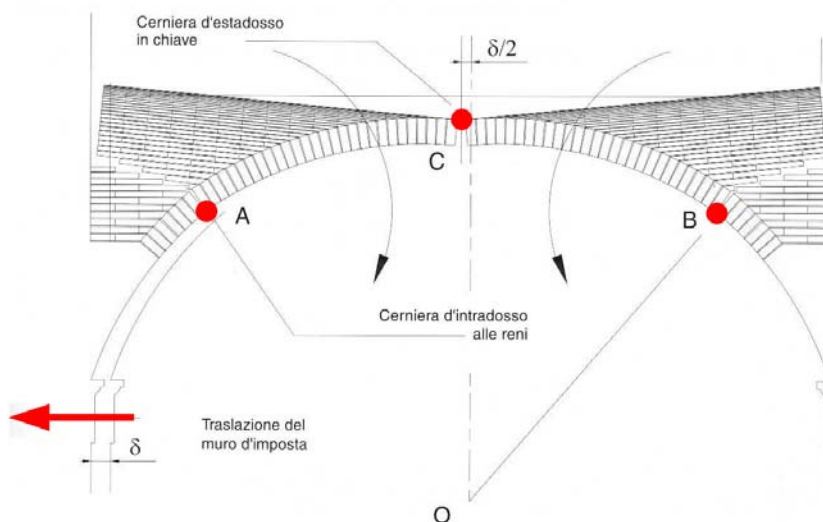
Le spalle, sottoposte alla spinta della volta da un lato e a quella del terrapieno dall'altro, possono presentare (ove le due azioni non siano in equilibrio) rotazioni non trascurabili che possono indurre dissesti nella sovrastruttura.

Se la spinta dell'arco è superiore a quella del terrapieno si verifica il classico cedimento con apertura della spalla e conseguente abbassamento della chiave che, nel caso di spostamenti eccessivi, dà luogo al collasso della struttura.

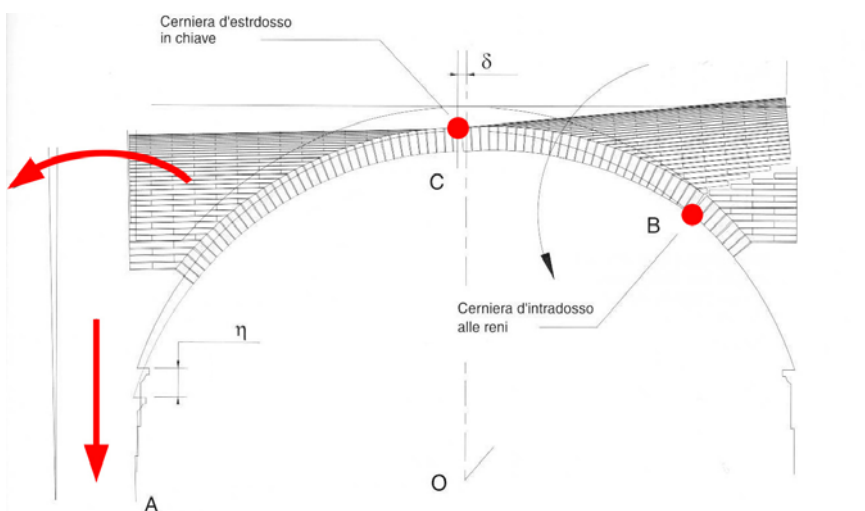
Se la spinta del terrapieno supera quella dell'arco la rotazione della spalla determina un avvicinamento delle imposte e una variazione dello stato tensionale nella volta, con modifica della curva delle pressioni.

Le lesioni, in questo secondo caso, si presentano in maniera evidente all'intradosso delle reni, mentre quelle all'estradosso delle zone in chiave rimangono occultate dal materiale di riempimento.

Le pile, in presenza di spinte non equilibrate prodotte da due archi adiacenti, possono presentare rotazioni sensibili e, quindi, essere soggette a sollecitazioni flessionali: delle due arcate una presenta allontanamento e l'altra avvicinamento delle imposte.



Meccanismo di collasso per traslazione verso l'esterno dell'imposta⁵

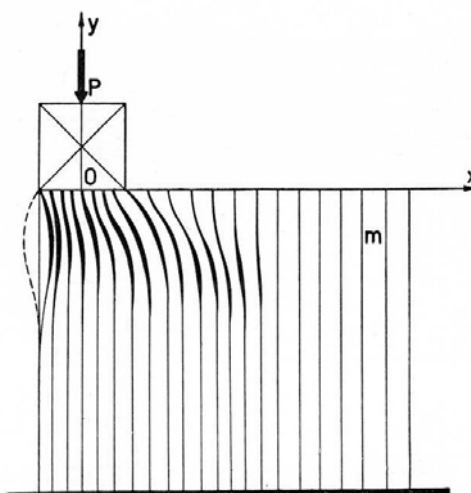


Meccanismo di collasso per rotazione verso l'esterno e cedimento verticale dell'imposta⁶

Pile e spalle – schiacciamento:

Il fenomeno dello schiacciamento, accompagnato quasi sempre da problemi di instabilità locale della compagine muraria, si manifesta soprattutto in situazioni caratterizzate da una tessitura irregolare dei paramenti.

Può risultare circoscritto ad aree limitate dell'imposta dell'arco in cui si concentrano elevate compressioni, o può estendersi a zone più ampie dei piedritti o delle spalle per via del deterioramento degli allettamenti causato da vibrazioni e da azioni di degrado fisico-chimico. Seppur non molto frequente, risulta essere un fenomeno di faticenza serio in quanto il più delle volte manifesta una progressione molto marcata legata al fenomeno di instabilità correlato.



Schiacciamento dei piedritti murari⁵

Fenomeni di degrado derivati da azioni ambientali di natura chimica o fisica:

Umidità di risalita:

Si tratta di macchie di colore più o meno uniforme, le quali si manifestano in genere con un tono più scuro del tessuto murario. La loro forma è variabile e può dipendere dalla provenienza dell'umidità che le genera e dal grado di omogeneità del tessuto murario. Queste macchie si trovano, per la maggior parte dei casi, nella parte bassa della muratura e sono conseguenza della risalita capillare di umidità dal suolo. La manifestazione di tale fenomeno dipende dalla posizione della muratura e dalla porosità del materiale: la diffusione dell'umidità per capillarità è infatti maggiore nei laterizi e in alcune pietre, tra le quali ad esempio le pietre tufacee, talvolta presenti nei paramenti misti.

Macchie da dilavamento:

Si tratta di macchie di colorazione diversa a seconda del materiale sul quale si formano; generalmente sono di colore scuro, ma si possono trovare alternate ad altre di colore biancastro, causate da depositi di calcare. La forma della macchia dipende dal percorso intrapreso dall'acqua sulla superficie del ponte; in genere tende ad allargarsi man mano che l'acqua scivola verso il basso lungo le superfici verticali.

Alcuni fattori che possono provocare tale fenomeno sono: presenza di scarichi corti o rotti, o comunque che espellano l'acqua direttamente su parti strutturali, la difettosa tenuta dei giunti e la rottura della scossalina.

Porzione di muratura mancante:

Il difetto è determinato dalla mancanza o la rottura di mattoni o pietre che appartengono ad elementi strutturali, quali pile, spalle e archi.

Se le lacune si presentano in corrispondenza di lesioni, le cause sono riconducibili a tensioni o spostamenti che le hanno generate. Mancanze o rotture localizzate possono derivare da:

urti; disfacimento della malta, causato da abrasioni e da cattiva qualità o a piene del fiume; lento deterioramento dei materiali da



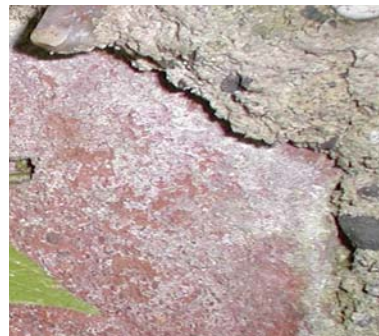
costruzione, in primo luogo dovuto all'azione degli agenti atmosferici; presenza di vegetazione infestante che, associata all'umidità e al gelo, porta ad una disgregazione del tessuto murario.

Efflorescenze:

Le efflorescenze sono macchie biancastre, cristalline o amorfe, che si possono formare sulla superficie esterna della muratura, o all'interno dei materiali stessi (subefflorescenze).

Normalmente questo fenomeno si verifica nelle zone maggiormente esposte a sole e vento, dove la facilità di evaporazione dell'acqua è maggiore.

Le cause possono essere ricercate nell'acqua di risalita che, passando per capillarità nella muratura, porta in soluzione solfati, carbonati e nitrati. Quando l'acqua raggiunge la superficie esterna della muratura evapora, depositando sulla superficie i cristalli salini.



Patina biologica:

La patina biologica si presenta come uno strato sottile, morbido e omogeneo, aderente alla superficie e di evidente natura biologica, di colore variabile, per lo più verde. La patina biologica è costituita prevalentemente da microrganismi cui possono aderire polvere, terriccio, ecc.

In particolare è facile riscontrare la presenza di organismi e microrganismi biologici quali alghe, oltre a patine discontinue di colore variabile (verde, nero, grigio) e di spessore pari a pochi millimetri.

Le cause più frequenti sono da ricercare nella presenza di acqua o di umidità sulla muratura o di depositi humiferi.



Polverizzazione:

Si tratta della distruzione e polverizzazione dei giunti di malta o dei materiali lapidei costituenti la muratura stessa.

Questo degrado è conseguente alla formazione di solfati sulla superficie della muratura, i quali sono solubili in acqua e quindi dilavabili.

Interventi consigliati sono: pulitura meccanica della superficie mediante spazzola morbida per asportare il materiale incoerente; lavaggio della muratura con la canna dell'acqua; ristilatura di giunti con malta dalle caratteristiche chimico – fisiche analoghe a quella esistente. Eventuali interventi di scuci – cuci nelle zone di muratura maggiormente colpite da tale fenomeno di degrado.

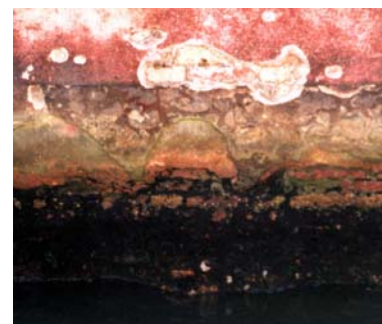


Esfoliazione:

Questo degrado si manifesta attraverso il distacco di croste e di placche di spessore variabile da qualche millimetro a qualche centimetro; lo strato immediatamente sottostante la placca staccatasi spesso è ridotto in polvere.

Il distacco è preceduto da un leggero rigonfiamento del paramento. Si verifica normalmente nelle parti più umide della muratura.

Le cause sono da ricercarsi nell'anidride solforica, contenuta nell'aria che reagisce con l'acqua meteorica trasformandosi in acido solforico. Questo, a sua volta, reagisce con il carbonato di calcio che costituisce i materiali litici producendo gesso (solfato idrato di calcio).



Conclusioni

In questa breve trattazione sono stati illustrati alcuni tra i fattori che maggiormente caratterizzano i ponti in muratura e che più ne condizionano l'integrità.

Si è posto l'accento in particolare sui principali meccanismi di dissesto di tali manufatti, sulla loro schematizzazione statica, e sulla valutazione del ruolo dei vari elementi che li compongono in termini di sicurezza della struttura rispetto alla condizione di collasso.

E' stata definita, per le principali manifestazioni di degrado la più probabile relazione di "causa-effetto". Nella quasi totalità dei casi tuttavia l'evidenza di un fenomeno di degrado non è mai esclusivamente determinata da una sola causa scatenante, ma molto più facilmente dalla commistione di più cause.

*"...Perciò se ogni lesione elementare corrisponde ad un unico dissesto elementare, non è vero che ad ogni dissesto elementare corrisponde una causa perturbatrice unica, ma le cause più diverse che possono intervenire isolatamente o variamente combinate fra loro"*⁶.

Per tale motivo risulta molto spesso difficoltosa una diagnosi del fenomeno che possa ritenersi completamente esaustiva delle sue origini.

Obiettivo del tecnico deve essere quello di:

- osservare attentamente l'ambiente, la struttura e le manifestazioni dei fenomeni in atto, da quelle più visibili a quelle meno evidenti, eventualmente nella loro evoluzione temporale;
- sintetizzare in un unico quadro di insieme tali osservazioni organizzandole secondo un ragionamento deduttivo;
- interpretare dette manifestazioni alla luce delle relazioni che le legano ai dissesti per poter definire questi ultimi e quindi la natura delle cause;
- individuare gli interventi più adatti da eseguire al fine di ripristinare una accettabile condizione di sicurezza per il manufatto, in una prospettiva di minimizzazione dei costi e del livello di invasività.

Il primo passo in questo senso è dunque quello di un esame obiettivo della struttura finalizzato all'acquisizione delle seguenti informazioni:

- dati geometrici e cinematici (dimensioni e spostamenti delle varie parti);
- dati costitutivi (natura e proprietà dei materiali);
- dati statici (natura ed entità delle azioni sollecitanti).

In ragione del livello di approfondimento necessario per ognuno di tali aspetti lo studio del manufatto potrà limitarsi ad una semplice lettura visiva, abbinata ad un rilievo geometrico di massima, o richiedere una serie di ulteriori approfondimenti diagnostici, di tipo strumentale.

Il ricorso a questi ultimi fornirà i dati per una più idonea calibratura del modello interpretativo della struttura, utile alle decisioni di tipo diagnostico e successivamente alla definizione del progetto di consolidamento

Bibliografia:

¹ Senini A., Zanon P., "I ponti storici in muratura. Adeguamento a nuove condizioni di esercizio: una modifica sostenibile", Tesi di Laurea, Fac. Architettura, Politecnico di Milano, relatore Prof. L. Jurina, 1999.

² Jaques Heyman, "The stone skeleton" in "International Journal of Solids Structures", 1966.

³ A. Giuffrè, "La meccanica nell'Architettura", Nuova Italia Scientifica, Roma 1992.

⁴ P. Foraboschi e E. Siviero, "Adeguamento funzionale di ponti e viadotti", in Seminario CIAS sul tema: Evoluzione sulla sperimentazione per le costruzioni, crociera sul Mediterraneo 26.09.2004 - 02.10.2004.

⁵ AA.VV., "Manuale per la riabilitazione e la ricostruzione postsismica degli edifici, Regione dell'Umbria", Tipografia DEI, Roma 1999.

⁶ S. Mastrodicasa, "Dissesti statici delle strutture edilizie", Hoepli, Milano 1992