

ELEMENTI COSTITUTIVI DEL PONTE

Introduzione

I ponti in muratura *moderni*, e specialmente quelli ferroviari, sono stati costruiti nell'arco di poco più di 100 anni, approssimativamente dal 1840 al 1930. Nonostante la costruzione sia collocata in un periodo di tempo piuttosto limitato, questo tipo di ponte si presenta con alcune soluzioni strutturali comuni, con alcune scelte strutturali di dettaglio e con particolari esecutivi variabili in funzione dell'epoca di costruzione, dell'area geografica e, probabilmente, anche del progettista.

Per tali motivi in questo paragrafo vengono descritti i caratteri comuni ai ponti ad arco in muratura, rimandando al successivo paragrafo 4 la discussione dei diversi dettagli esecutivi.

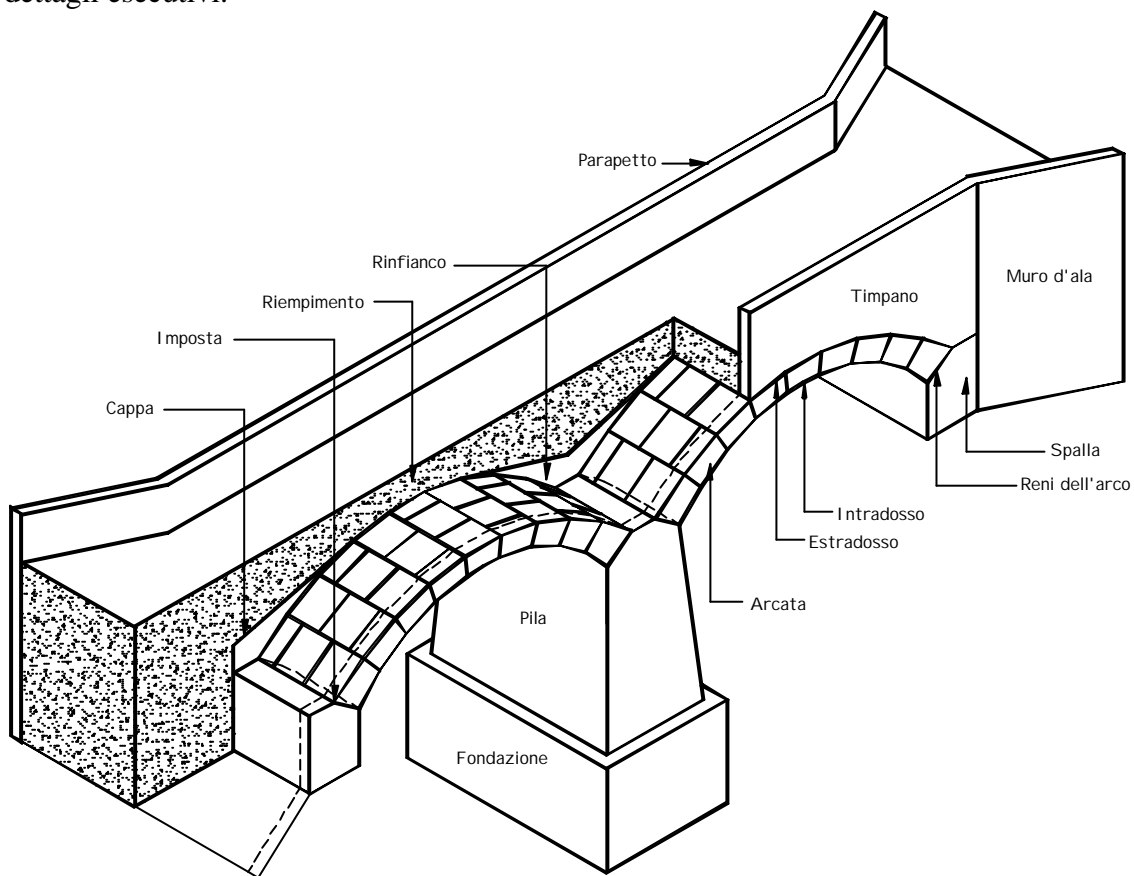


Figura 1 Spaccato assonometrico di un ponte in muratura a due campate uguali.

Con riferimento alla figura 1, le parti che costituiscono un ponte in muratura sono sinteticamente: l'*arcata*, che costituisce la struttura che porta il piano percorribile, le strutture di sostegno delle arcate (*spalla*, *pila*), le opere di fondazione, e gli elementi apparentemente privi di efficacia strutturale, posti al di sopra dell'arcata per fornire un piano percorribile piano (*rinfianco*, *cappa riempimento*). Il riempimento è contenuto lateralmente da due muri (*timpani* o *muri frontali*) impostati sulla parte esterna dell'arcata, figura 1.



Figura 2 Pila di viadotto, viadotto Pesio – linea Fossano-Ceva, progr. 14+200 (Archivio FS-TO)



Figura 3 Pila con rostro, ponte Meletta – linea Trofarello-Cuneo, progr. 19+256 (Archivio FS-TO)

La geometria del ponte è, in genere, fortemente condizionata dall'orografia della valle da attraversare; valli ampie, ed in genere profonde, vengono attraversate da ponti a più campate su pile alte (*viadotti*, figura 2), mentre valli ampie poco profonde richiedono ponti a più campate ma su pile basse (*ponti* propriamente detti, figura 3). Valli minori e piccoli corsi d'acqua vengono di norma attraversate con ponti a singola campata (ponti a campata singola, figura 4).

Le opere di fondazione rappresentano la parte del ponte non visibile, per cui ogni informazione sulla consistenza delle opere di fondazione deve essere dedotta dalla bibliografia storica sulle tecniche costruttive di cui si dirà diffusamente nel quarto paragrafo.



Figura 4 Arco a sesto ribassato - linea Cuneo-Limone, ponte Vermenagna, progr. 19+403 (Archivio FS-TO).

2 Le arcate

La parte principale della struttura, è costituita dalle *arcate* (o *volte*). Nei ponti vengono generalmente impiegate arcate a botte, ovvero con intradosso cilindrico ed a pianta retta; nel mentre i casi di volte con geometria non cilindrica rappresentano esempi molto rari, i ponti con volta a pianta non retta si presentano in numero piuttosto elevato in quanto l'asse della linea ferroviaria si trova spesso ad attraversare il corso d'acqua secondo un tracciato non ortogonale all'asse della valle.

Il profilo dell'intradosso è rappresentato da una superficie cilindrica con generatrice costituita da un arco di circonferenza nelle arcate con un unico centro ed a raggio costante. Le arcate policentriche sono superfici cilindriche in cui la generatrice è formata da tre o più archi di cerchio definiti da raggi e centri differenti raccordati; questo tipo di volte, tuttavia, è piuttosto raro nella tipologia dei ponti ad arco in muratura, mentre pare essere stato di più largo uso per la realizzazione dei ponti ad arco in calcestruzzo. L'impiego così vasto delle circonferenza, in sostituzione di altre forme per gli archi geometriche possibili e strutturalmente più efficienti, come l'ellisse, è probabilmente dovuto alla semplicità costruttiva nel tracciamento e nell'esecuzione delle centine. Dall'analisi statistica di cui si riferisce in questo rapporto si è potuto rilevare come gli archi policentrici siano stati impiegati tipicamente nei ponti ad arco in calcestruzzo con armatura localizzata.

L'ampiezza della curva individua diverse tipologie distinte dal *ribassamento*, ovvero dal rapporto freccia/luce (f/l) :

- *arco a tutto sesto* (semicircolare): $0.4 < f/l < 0.5$
- *arco ribassato* (circolare, policentrico, molto raramente semiellittico), in cui si definisce $0.11 < f/l < 0.4$;

- arco acuto o ogivale, in cui gli archi di circonferenza non sono raccordati (tipologia non ritrovata nei ponti ferroviari oggetto di studio, si tratta piuttosto di una tipologia medievale e tardo medievale tipica del gotico e del neogotico): $f/l > 0.5$.

L'intradosso di una volta può essere raccordato con i paramenti delle pile (archi a tutto sesto, figura 2) ovvero può formare uno spigolo più o meno evidenziato da dettagli architettonici (figura 3) che rende evidente la separazione tra arcata e pila. Nel primo caso, per il calcolo di verifica si assume tipicamente che l'arco strutturale (la struttura resistente) abbia le reni sollevate di 30° rispetto all'orizzontale (angolo al centro di 120°); è evidente, quindi, come la classificazione di *arco a tutto sesto* è relativa alla geometria esterna dell'arcata, mentre l'arco strutturale è comunque un arco ribassato con rapporto $f/l = 0.29$. Questa prassi nel calcolo di verifica è motivata dalle esperienze sui ponti in muratura giunti a collasso, dei quali si rileva la conservazione di una parte dell'arcata in adiacenza alla pila, figura 5.



Figura 5 Posizione delle reni dell'arco strutturale (ponte di S. Agata – Genova)

L'impiego dell'arco a tutto sesto per l'intradosso delle arcate dei viadotti (figura 2) trova probabilmente ragioni strutturali in fase esecutiva. L'esecuzione del viadotto per avanzamenti successivi definisce alcune fasi operative in cui l'ultima arcata realizzata poggia sull'ultima pila completata senza il contrasto delle arcate successive. In questa condizione, figura 6, l'*arco a tutto sesto*, nell'accezione precisata, è la struttura meno spingente e che, quindi, induce le minime sollecitazioni flessionali nell'ultima pila.

L'arco ogivale è stato impiegato solo se esistono forti carichi concentrati in chiave, mentre per altre condizioni di carico la sua risposta è peggiore di quella di altri archi ribassati o a tutto sesto. Si tenga conto, poi, che l'arco ogivale richiede monte molto elevate per coprire la luce della campata, costringendo ad aumentare il numero di campate per rispettare le quote del piano del ferro.

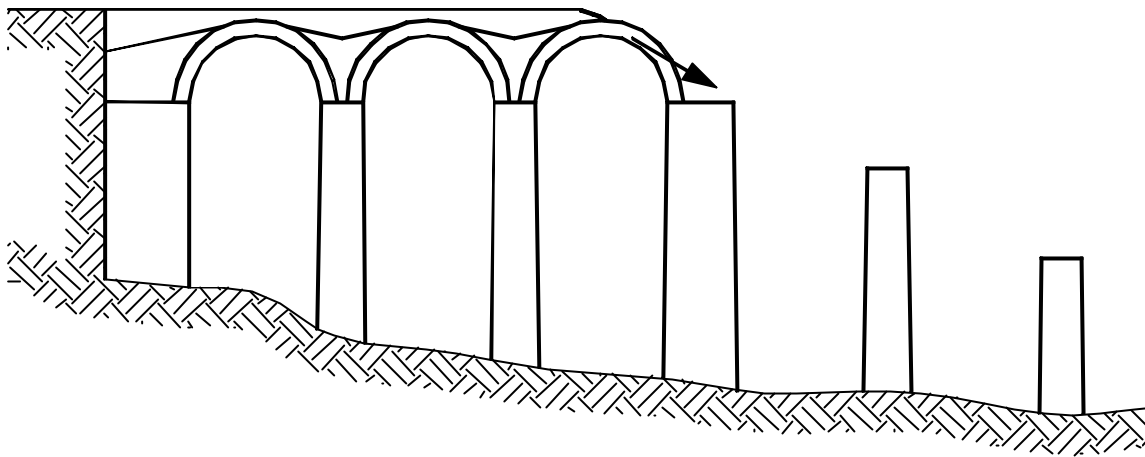


Figura 6 Avanzamento della costruzione del ponte e spinte sulle pile.

Nei viadotti a più ordini le arcate degli ordini inferiori non sono vere e proprie volte in quanto hanno larghezza in genere ridotta rispetto alla larghezza della pila su cui vanno ad intestarsi. Si tratta di strutture alle volte assimilabili ad archi piuttosto larghi, altre volte ad arcate. La funzione strutturale di queste volte è quella di ridurre gli effetti flessionali sulle pile di rilevante altezza, figura 7.



Figura 7 Viadotto Stura - linea Fossano-Ceva, progr. 2+606 (Archivio FS-TO).

3 Le strutture di sostegno delle arcate: spalle, pile e pile-spalle

Le *spalle* dei ponti sono, in genere, massicci muri di sostegno in muratura che, oltre ad assolvere alla funzione di sostegno del terreno, forniscono appoggio alle arcate terminali. Mentre le volte centrali di un ponte trasmettono alle pile azioni prevalentemente

mente verticali, almeno con riferimento ai pesi propri, l'ultima arcata trasmette alla spalla anche una rilevante spinta orizzontale che deve essere sopportata adeguatamente dalla struttura della spalla. Per questo motivo le spalle sono in genere più ampie della loro parte visibile, con sezione trapezia o rettangolare, con sezione rettangolare massiccia o rettangolare con muri d'irrigidimento nella direzione dell'asse longitudinale del ponte, figura 8.

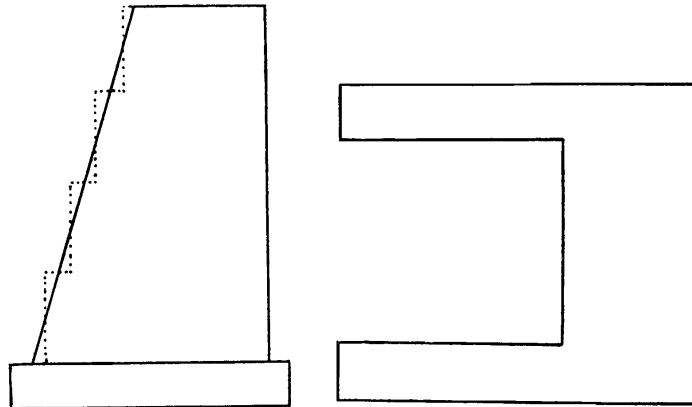


Figura 8 Sezione longitudinale e pianta di una spalla (Campanella,1928).

Nei ponti in cui le spalle presentano uno spessore rilevante, le spalle possono essere alleggerite mediante la realizzazione di volte interne alla spalla, talvolta visibili dall'esterno se costituiscono sottopassaggi pedonali. La realizzazione di spalle traforate, così come di pile cave, è legata all'esigenza di ridurre l'impiego di materiale.

Talvolta, per una ripartizione uniforme dei carichi può essere realizzato un arco rovescio al di sotto delle volte interne in modo da non ridurre la sezione della fondazione.

La tessitura delle spalle e delle pile è a corsi orizzontali, modificati solo nella zona d'imposta per resistere alle elevate spinte trasmesse dall'arcata; per questo l'arcata viene impostata o su porzioni di muratura con tessitura diversa o, talvolta, su blocchi di pietra sagomati in modo da distribuire il più possibile le spinte della volta (volte a spessore contenuto) o su veri e propri gradoni in pietra. Per maggiori dettagli su questi particolari si rimanda al quarto paragrafo.

Le *pile*, dovendo riunire esigenze statiche ed estetiche, vengono realizzate nelle forme più svariate. Esse hanno sezione orizzontale rettangolare (trapezia solo per i ponti con sviluppo planimetrico non rettilineo); le pile fondate nei corsi d'acqua possono essere provviste di *rostri* per ridurre la turbolenza sottovento e per deviare il materiale galleggiante trasportato dalla corrente. I paramenti delle pile possono essere verticali (ponti) o a scarpa (viadotti), sia rastremando il solo paramento esterno ovvero, nei casi di maggior impegno, rastremando entrambe le dimensioni. L'inclinazione dei lati corti è minore di quella dei lati maggiori; la legge di variazione del profilo può essere lineare o curvilinea (in particolare logaritmica).

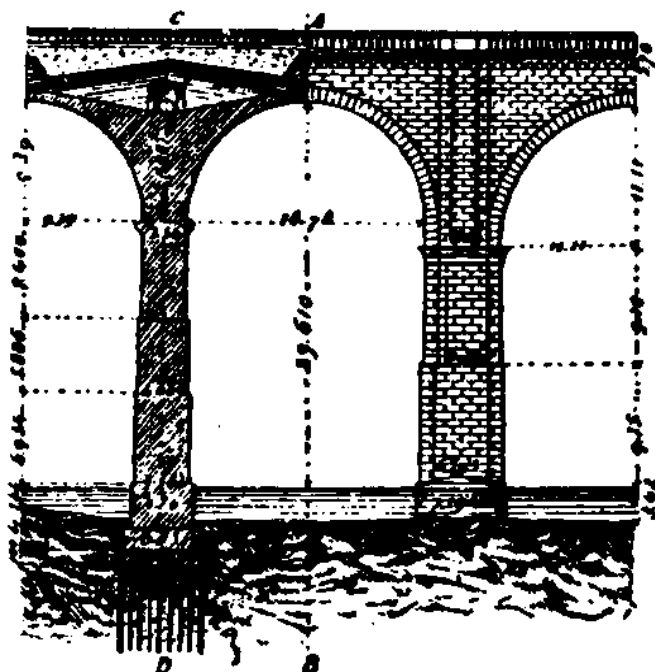


Figura 9 Esempio di *pila-spalla* (Campanella, 1928).

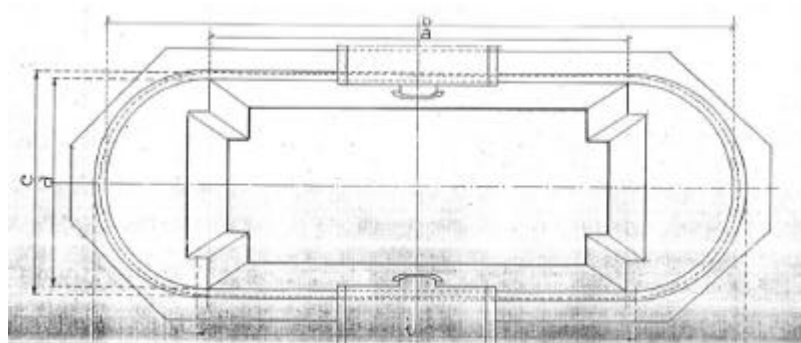


Figura 10 sezione di una *pila-spalla* del viadotto Ellero - linea Fossano-Mondovì, progr. 19+722 (Archivio FS - TO).

Le *pila-spalle* sono presenti nei ponti a più luci ogni n campate e nascono dall'esigenza di garantire la sopravvivenza almeno parziale del ponte quando dovesse crollare un'arcata. Specie nei viadotti, il crollo di un'arcata determina l'insorgere di spinte orizzontali in sommità alle pile, spinte cui la pila non può resistere. Di conseguenza è possibile un collasso in sequenza di molte pile, che si arresta quando una delle pile è in grado di equilibrare la spinta orizzontale dell'arcata residua. Questa pila deve presentare maggiore resistenza mediante un ampliamento delle sue dimensioni e costituisce quello che viene definito una *pila-spalla*, figura 9 e 10. I testi storici di Tecnica delle Costruzioni in muratura riferiscono della *pila-spalla* anche come di un

modo per poter eseguire il ponte per gruppi di arcate: in questo caso l'ultima arcata realizzata poggiava su una pila in grado di sostenerne la spinta.

4 Rinfianco, cappa e riempimento

Al di sopra delle arcate, lo spazio necessario a realizzare un piano del ferro orizzontale viene colmato con due distinti materiali: in prossimità della volta, e con spessore maggiore al di sopra delle imposte e sulle pile, viene disposto il *rinfianco*, al di sopra del rinfianco viene collocato il *riempimento*, costituito da materiale sciolto o conglomerato poverissimo che porta il livello complessivo della struttura al piano viario, figura 1. Tra *rinfianco* e *riempimento* si ritrova la *cappa* che assolve la funzione d'impermeabilizzare il ponte. In figura 11 sono rappresentati il profilo di un rinfianco, in figura 12 quello dell'intero ponte.

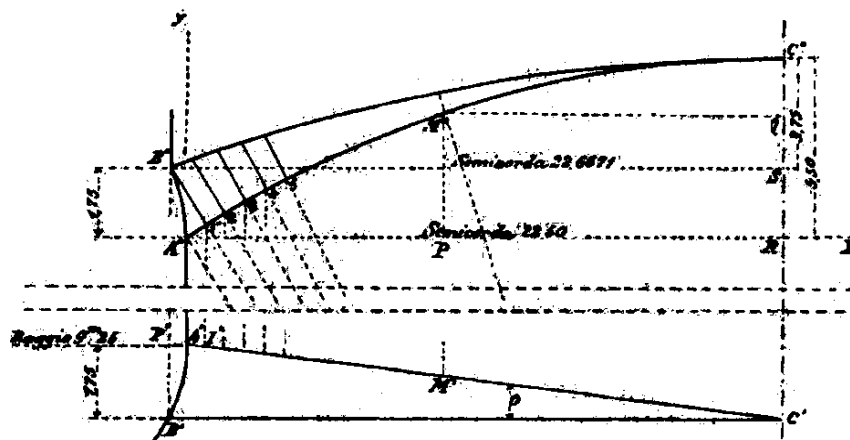


Figura 11 Profilo di un rinfianco (Campanella, 1928).

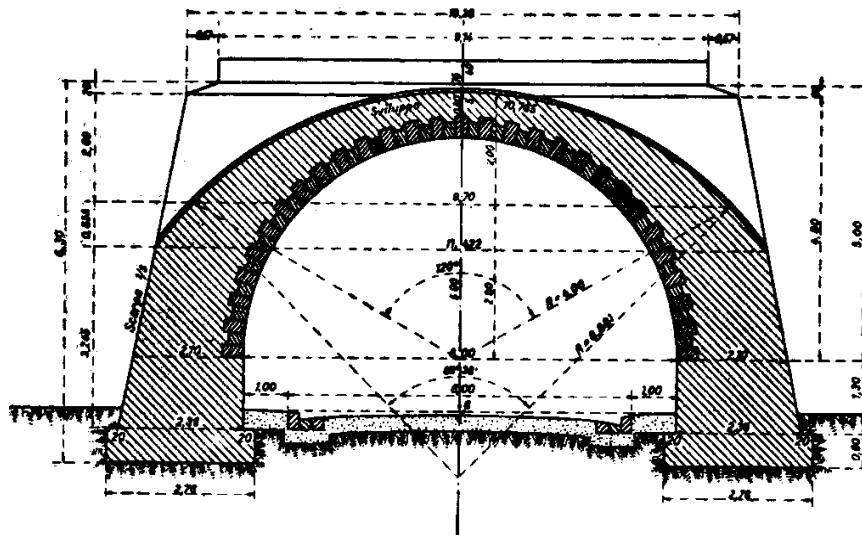


Figura 12 Ponte ad una arcata; geometria dei rinfianchi (Albenga, 1953).

Il *rinfianco* è costituito, in genere, da un conglomerato con discrete caratteristiche meccaniche, inferiori rispetto a quelle della muratura delle arcate, e di peso maggiore rispetto a quello della volta. Esso assolve due funzioni: 1) zavorrare e, quindi,

stabilizzare l'arco, in particolare deviando la spinta alle imposte verso la direzione verticale; (si riducono gli effetti flessionali sulle pile); 2) costituisce un ostacolo alla formazione del meccanismo di collasso dell'arco, ed in genere è responsabile dell'innalzamento, rispetto alla posizione geometrica, della posizione delle reni. Il profilo superiore del rinfiango può essere rettilineo o, più spesso, è formato da piani inclinati in genere con pendenza di $3/11 \approx 27\%$ con la funzione di convogliare l'acqua che s'infiltra nel riempimento verso i pluviali di scarico.

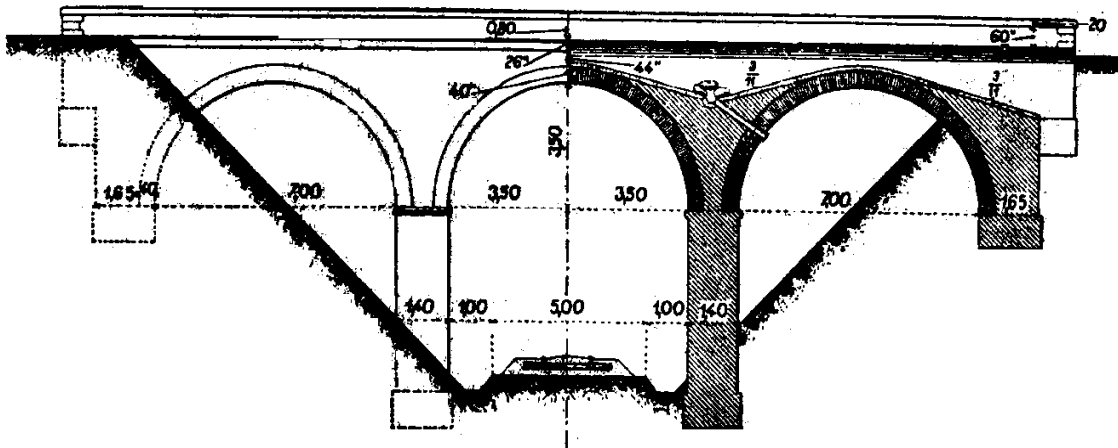


Figura 13 Sezione longitudinale con sistemazione della cappa (Albenga, 1953).

La *cappa* è formata da uno strato di materiale impermeabile posto a protezione della muratura e dei rinfianchi; in corrispondenza dei piedritti la cappa crea una canaletta di raccolta, raccordando con superfici cilindriche le diverse pendenze dei rinfianchi; la canaletta è riempita con materiale drenante (pietrisco) e da essa si dipartono, normalmente all'intradosso dell'arco, i pluviali di smaltimento, figura 13. Essa è costituita da 3-4 cm di malta idraulica o cementizia (con molto legante, 350 kg/m^3) preparata con sabbia grossa e ricoperta da 1,5 cm di asfalto bituminoso. Per evitare le infiltrazioni lungo i muri andatori la cappa risale, con spessore ridotto, fino sotto al cordolo di coronamento. Nei ponti ferroviari il problema dell'impermeabilizzazione è particolarmente sentito, data lo scarso impedimento all'acqua che danno la massicciata ed il riempimento.

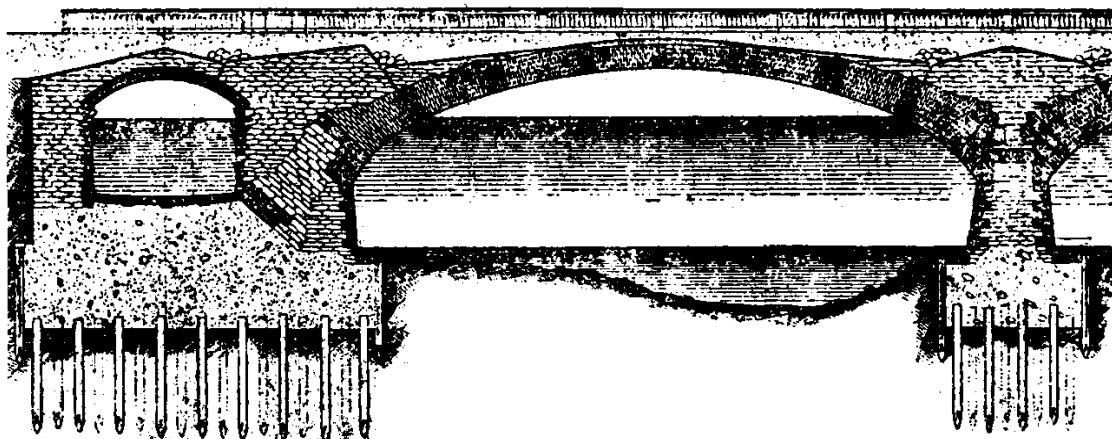


Figura 14 Sistemazione del riempimento (Albenga, 1953).

Il *riempimento* è posto al di sopra della cappa ed è contenuto lateralmente dai timpani. Poiché esso deve essere abbastanza leggero, permeabile all'acqua senza originare rigonfiamenti o disgregazioni, è in genere costituito da materiale sciolto, nei ponti ferroviari spesso da ghiaia (smarino delle gallerie) o ballast. Nei ponti stradali, invece, si riscontrano casi di riempimento eseguito con materiale di recupero di ogni genere. Secondo prescrizioni codificate dalla tecnica costruttiva (Albenga, 1953) la altezza del riempimento tra la suola della rotaia ed il punto più alto della cappa dovrebbe essere non inferiore a 40 cm; se l'altezza della costruzione è limitata possono essere sufficienti 30 cm (linee a scartamento normale e traffico notevole), ma mai minori di 15 cm (linee secondarie a ridotto traffico) per lo strato sotto la traversina. In genere lo spessore del riempimento in chiave è pari allo spessore, in chiave, dell'arcata.

Nei ponti a più arcate il riempimento viene disposto a formare dei piani di raccolta delle acque disposti secondo diverse falde, come rappresentato in figura 14. Nei viadotti, specie con pile di rilevante altezza, non è raro trovare il riempimento sostituito da una serie di voltine di mattoni; non è chiaro se questa tecnica sia dovuta a specifiche esigenze di cantiere (difficoltà a reperire idoneo materiale di riempimento) ovvero se si tratti di una tecnica finalizzata a ridurre il carico sull'arcata. Dall'analisi dei viadotti delle linee del compartimento di Genova, e riportando la situazione alle modalità esecutive, si deve concludere che questa tecnica sia finalizzata a ridurre le masse poste in sommità alle pile.



Figura 15 Muro andatorio o timpano. Si osservi il coronamento in pietra a taglio (ponte Dora - linea Torino-Milano, progressiva 5+915 – Archivio FS-TO).

5 Timpani

I *muri andatori*, o *timpani*, hanno il compito di contenere il riempimento che insiste sulla volta e sui rin fianchi, ovvero di assorbire le spinte orizzontali delle voltine di alleggerimento longitudinali. Per evitare un sovraccarico puntale alle estremità della volta, costituito dal peso dei timpani, questi sono, in genere, costituiti con murature più leggere di quelle dell'arcata e del rin fianco. Spesso, negli alti viadotti, i muri andatori

presentano paramenti inclinati in prosecuzione della pendenza dei piedritti: a questo modo la via sovrastante è più stretta degli archi e delle pile; in questi casi il paramento interno è verticale, a scarpa ovvero con riseghe.

I muri andatori sono quasi sempre sovrastati da un coronamento in pietra da taglio o in mattoni a coltello, figura 15.

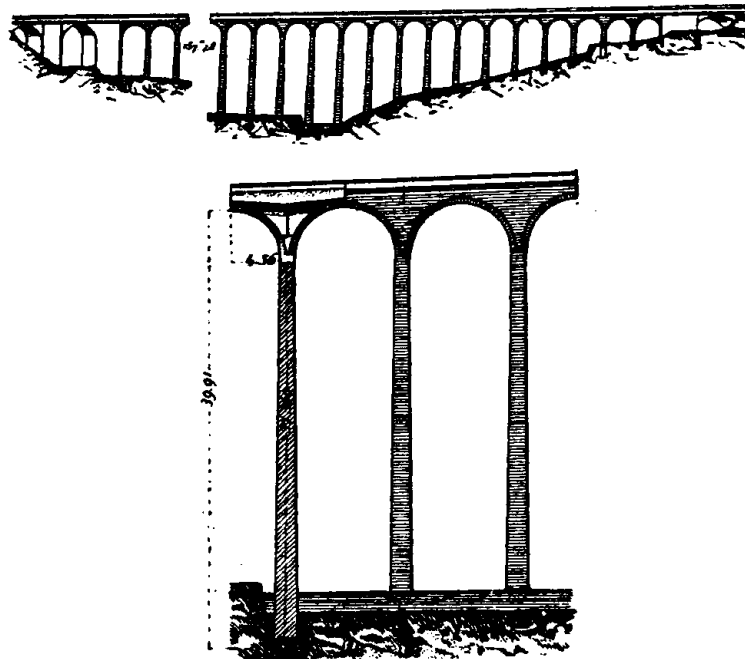


Figura 16 Viadotto di Lockwood (Campanella, 1928).

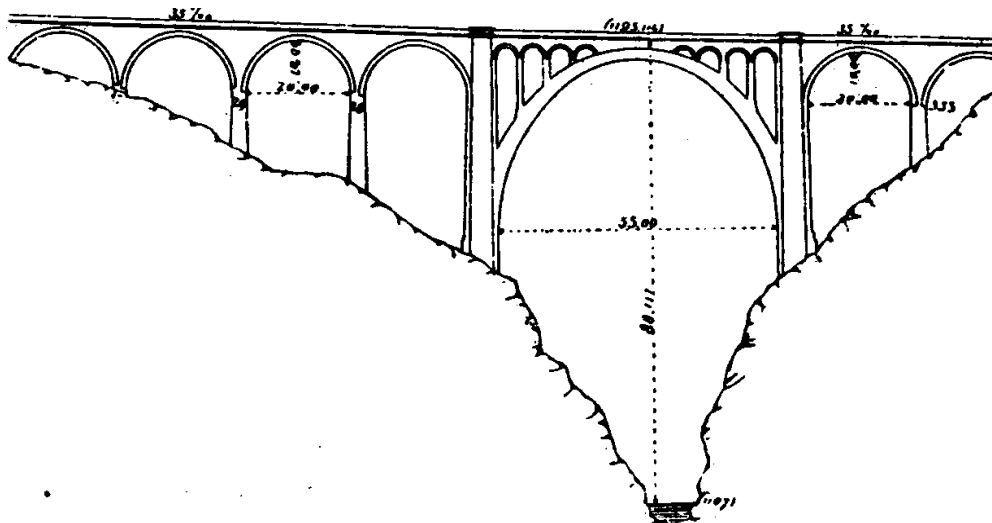


Figura 17 Viadotto di Wiesen (Campanella, 1928).

6 Viadotti

I viadotti sono opere piuttosto impegnative impiegate per superare ampie vallate: la specificità dell'opera si traduce spesso in soluzioni piuttosto originali dovute alla situazione orografica e alle scelte del progettista; ciononostante anche nei viadotti si

riconoscono delle tipologie ricorrenti, probabilmente dovute ad una serie di regole dell'arte verificate dall'esperienza. Si possono quindi trovare opere con pile altissime e arcate di luce modesta come il viadotto di Lockwood, figura 16, pile molto alte con luci significative delle arcate tutte uguali, come il viadotto Pesio di figura 17. Un tipologia piuttosto rara di ponte a più ordini di arcate è esemplificato dal viadotto di Wiesen di figura 17, in cui l'ordine superiore di arcate è impostato su un arco di luce maggiore, la struttura principale del ponte. Per l'elevata snellezza delle pile, i viadotti presentano spesso un secondo ordine di arcate, raramente anche un terzo ordine, con luci differenti o anche con luci piuttosto simili, come nel caso del viadotto Stura sulla linea Fossano-Ceva, figura 7.

Nei viadotti ad un solo ordine di arcate, esse sono **sempre** semicircolari; la luce é piccola (tra 10 e 20 m, spesso 15 m), a parte i casi in cui esiste una volta centrale più ampia. I viadotti a più ordini si riscontrano per altezza delle pile oltre i 20-30 m; le arcate inferiori sono di importanza minore e quasi sempre ribassate.

Nei viadotti è molto frequente ritrovare le pile-spalle, che assumono la forma di una *lesena* pronunciata affiancata da due mezze pile; la lesena può avere una pendenza maggiore rispetto a quella del paramento esterno della pila ed essere prolungata fino all'estremità superiore del ponte.



Figura 18 Viadotto in curva ad un solo ordine (viadotto Luogelkinnenviadukt, Svizzera).

7 Ponti e viadotti in curva

Un ponte ferroviario di modesta lunghezza su una linea ferroviaria in curva viene realizzato con impalcato di larghezza maggiore rispetto a quanto strettamente necessario in modo da consentire ai binari di realizzare la curvatura su un ponte rettilineo, di più semplice costruzione rispetto ad un ponte in curva, figura 18. Tuttavia questo accorgimento non è ammissibile se la lunghezza del ponte è rilevante, ed in questo caso è necessario realizzare il ponte o il viadotto seguendo il tracciato della linea, quindi con un profilo interno ed esterno di lunghezza diversa. In genere le arcate mantengono la pianta rettangolare, mentre la differente lunghezza dei due lati della struttura viene ottenuta mediante pile trapezoidali: i lati maggiori delle pile sono paralleli all'asse trasversale dell'arcata che vi si imposta

Al passaggio del treno la parte convessa delle pile risulta più sollecitata a compressione (per la presenza di una componente centrifuga nell'azione del convoglio); la pendenza del paramento sul lato esterno delle pile viene perciò aumentata fino ad $1/8$ - $1/5$ e, a volte, conservata anche nei timpani. In questo specifico tipo di struttura, la scarpata esterna della pila trapezia può non essere costante, maggiore alla base e via via più ridotta verso la sommità.