

DISSERTAZIONE

PRESENTATA

ALLA COMMISSIONE ESAMINATRICE

DELLA

R. Scuola d'Applicazione per gl'Ingegneri in Torino

DA

AMERIO GIUSEPPE

DA ASTI

Allievo del Regio Collegio delle Provincie

PER OTTENERE IL DIPLOMA DI LAUREA

DI

INGEGNERE CIVILE

.....
TORINO 1870
.....

ALLA SACRA MEMORIA DI MIO PADRE

ALL'AMATA FAMIGLIA

CONSACRO QUESTO SCRITTO

TENUE PEGNO DEL PIU' VIVO AFFETTO

ESERCITAZIONI PRATICHE DI COSTRUZIONI

DELL'ANNO SCOLASTICO 1868-69

CANALE SUSSIDIARIO DEL CANALE CAVOUR PRESSO SALUGGIA



EDIFICIO DI SBocco NEL CANALE CAVOUR

Il chiariss.^{mo} prof. cav. Curioni, per compiere il programma del suo corso di costruzioni dell'anno 1868-69, condusse gli allievi ingegneri a visitare le opere d'arte del Canale sussidiario Cavour presso Saluggia, e propose ad alcuni di essi di descriverle, e di farne argomento della loro dissertazione di Laurea. Tra questi io ebbi l'incarico di trattare dell'edificio di sbocco nel canale Cavour, e questo compito, malgrado le mie deboli forze, pure accettai volentieri in quanto che si trattava di concorrere alla relazione di un'opera della Campagna Generale dei Canali Italiani di Irrigazione che « sarà classificata per la sua grandiosità fra le pregevoli opere idrauliche del paese nostro e dell'estero » ().*

Credo opportuno, per maggior chiarezza, dividere in cinque parti questo scritto: anzitutto colla descrizione dell'opera ne indicherò le dimensioni principali; poscia, onde prepararmi la via a bene studiarne la stabilità, considererò la spinta al vuoto propria dei volti obliqui ed il modo di rimediarvi; dovrò per conseguenza parlare dell'apparecchio impiegato nella costruzione dei volti, e dirò come si applichi alle volte oblique di sezione retta ellittica l'apparecchio elicoidale od inglese, imparato nel corso di costruzioni, e che serve pei volti obliqui a sezione retta circolare. Finalmente verificata la stabilità dell'opera, parlerò dei materiali da costruzione in essa impiegati, e del resto dell'intero edificio.

(*) BENAZZO — Il Canale sussidiario Cavour.

I.

Descrizione e dimensioni principali.

Il canale che presso Saluggia conduce le acque della Dora Baltea a sussidiare il canale Cavour quando sono basse le acque del Po, termina con un ponte obliquo che costituisce l'*edifizio di sbocco*, ed il quale si trova verso il termine dell'acquedotto che guida le acque del canale Cavour attraverso il basso piano della Dora Baltea.

Tale ponte di quattro arcate ha due uffizi: 1° di dare continuazione alla strada laterale della sinistra sponda del canale Cavour; 2° di regolare la immissione delle acque della Dora nel gran canale conforme il bisogno richiede. Perciò esso è diviso per tutta la sua lunghezza in due zone, di cui l'una serve realmente di ponte e l'altra di galleria di manovra delle venti paratoie che tolgono la comunicazione dei due canali.

Questo manufatto è di struttura murale, ed il suo asse, parallelo al canale Cavour, fa colla direzione della corrente un angolo di $72^{\circ} 49'$. La distanza delle due sponde è di m. 33,50: la corda dell'arco, sezione retta dell'intrados di ciascuna arcata, è m. 7,64; la sezione retta di ciascuna pila m. 0,99; quella delle spalle m. 3. — La porzione di asse del ponte compresa tra il ciglio interno delle due spalle è di m. 35,075: la corda dell'arco di testa m. 8, la monta m. 0,772; la grossezza delle pile parallela all'asse del ponte m. 4,025; quella delle spalle m. 3,10.

La linea d'imposta dei vòlti è a m. 3,70 sul fondo del canale Cavour che coincide col fondo del canale sussidiario a valle delle paratoie; i vòlti hanno lo spessore alla chiave di m. 0,52: l'estrados nelle fronti è a gradinata, non ad arco di circolo come l'intrados:

su di esso v'ha la cappa, il riempimento e quindi il selciato che costituisce il suolo stradale: il loro insieme forma sull'estrados uno spessore di m. 0,25 alla chiave.

La larghezza del ponte è di m. 8,10 di cui m. 0,40 sono occupati da un parapetto alto m. 0,85, e che si trova dalla parte che fiancheggia il canale Cavour per tutta la lunghezza del ponte; m. 3,50 sono occupati dal suolo stradale, m. 4,60 dal muro che divide il ponte obliquo in due zone, dagli stipiti che guidano le saracinesche, e dai lastroni di granito che li fermano a posto: finalmente m. 2,60 appartengono alla zona necessaria alla manovra delle paratoie: questa è priva di parapetto come quella su cui è impedito il transito da due muri trasversali agli estremi del ponte, e quindi non v'ha pericolo di sinistro accidente.

I muri che costituiscono le pareti dell'acquedotto in cui, come dicemmo, scorre il canale Cavour, là dove sono incontrati dal nuovo canale, si raccordano alle spalle del ponte: oltre le quali si prolungano nel canale sussidiario di m. 20 circa sulla destra, e di m. 30 sulla sinistra sponda del medesimo. Una scala appoggiantesi a quest'ultimo muro permette di discendere nel canale qualora il bisogno lo richieda: nella sponda opposta dirimpetto alla scala si trova uno scaricatore che serve a dare sfogo alle acque che discendono lungo il canale sussidiario, quando la sua comunicazione col canale Cavour è interrotta. Per lo stesso scopo il fondo del canale sussidiario a monte delle paratoie forma una specie di bacino la cui parte più bassa è all'imbocco del canale fugatore, dove per conseguenza si raccolgono le acque che pel medesimo devono scaricarsi.

Il suolo, che costituisce il fondo del cavo in cui scorre il canale, sabbioso quale si trova in prossimità dei fiumi, ma abbastanza sodo perchè fuori d'acqua fu convenientemente rassodato con una platea generale di calcestruzzo dello spessore di m. 0,50 sotto il ponte e sotto l'accennato bacino, e di 1 metro sotto le pile e le spalle. Questa platea fu coperta con un pavimento di muratura, cosicchè sono evitate le escavazioni, e si tolgono facilmente gli interrimenti, in guisa che la sezione dell'ultimo tratto di canale è conservata costante e tale perciò è anche la sezione di efflusso sotto le paratoie: intanto le pile hanno abbastanza sodo imbasamento. Queste al pari del vólto, del parapetto e degli altri muri insistenti sul ponte sono in muratura di buona qualità. Le pile sono magre, cioè non hanno che la grossezza necessaria per re-

sistere alla pressione verticale che ripartitamente su di esse esercita il peso del ponte; ed è razionale: infatti le pile intermedie non soffrono veruna spinta laterale dalle adiacenti arcate, perchè queste si appoggiano mutuamente e le loro spinte orizzontali si fanno equilibrio: quindi è necessario e basta che reggano alla pressione esercitata da due mezzi archi. Questo sistema delle pile magre, come le chiama il Cavalieri, ha due vantaggi essenziali: consiste il primo nello imbarazzare meno la sezione del canale e rendere quindi meno forte il rigurgito a monte del ponte, e l'aumento di velocità dell'acqua sotto le arcate: consiste il secondo nel risparmio di spesa per la minore ampiezza di fondazione e per la minor quantità di muratura: questo risparmio però è in parte compensato dalla maggiore spesa richiesta dalla necessità di disporre contemporaneamente le armature di tutte quante le arcate; d'altra parte poi ha lo svantaggio che la ruina di una sola arcata produce inevitabilmente la distruzione totale del ponte.

Le pile sono munite di rostri che hanno per iscopo di ridurre gradatamente l'alveo dalla sezione libera a monte alla ristretta sotto il ponte, e da questa di nuovo alla sezione libera a valle. Questi hanno direttrice curvilinea composta di due archi di cerchio raccordati, l'uno di raggio m. 0,40, l'altro m. 0,65. Sui rostri delle pile gira una cornice alta m. 0,25 che si prolunga anche sotto il ponte, il che fa meglio risaltare il distacco degli archi dalla imposta.

Le spalle sono nell'interno costrutte di muratura di pietrame alternata con strati di buoni mattoni, e quindi rivestite di laterizii. Le pile terminano alla parte superiore in un prisma di muratura a sezione trasversale trapezia, su cui viene impostato il vólto.

Volendo ora conoscere la stabilità dell'opera fa d'uopo studiare l'azione delle forze sollecitanti le singole parti di cui il ponte è costituito; considererò specialmente il vólto come la parte più importante di un ponte obliquo, e brevemente le altre parti: pile, spalle e muri d'ala.

II.

Spinta di un vólto obliquo.

Manca una teoria completa della spinta delle vólte: ecco come questa può concepirsi (fig. *b*). Rappresenti $MNM'N'$ il piano di

imposta di una vòlta che si suppone omogenea: osservo dapprima che di tutte le sezioni verticali passanti per A , per esempio, la più piccola è quella la cui traccia Ac è nel piano normale all'asse $a a'$ della vòlta e che dicesi *sezione retta*. Si vede inoltre che i movimenti, che tendono a prodursi nella vòlta, sono la conseguenza dello sforzo che ciascuna molecola esercita in virtù della gravità sulle molecole contigue situate nel piano immediatamente inferiore: questo sforzo propagandosi in tutti i sensi tende a provocare movimenti di diversa natura, ed a ridurre per effetto della contrazione le diverse sezioni verticali della vòlta. Ma in questi movimenti, sempre piccolissimi, le sezioni rette che sono qui le linee di minor curvatura provano la maggior compressione: devono quindi reagire con maggior forza che le altre sezioni verticali; ed è nel loro piano infatti che si dirige lo sforzo principale o la risultante delle spinte che tende a rovesciare i piedritti e la parte inferiore della vòlta.

Questo sforzo in pratica può essere vinto dalla coesione delle malte, dalla loro aderenza ai materiali di costruzione, ed infine dalla resistenza dei piedritti.

Tagliando il cilindro $MNM'N'$ con due piani verticali AB , $A'B'$ paralleli tra loro ed obliqui all'asse, ne risulta un cilindro obliquo avente la stessa sezione retta della vòlta retta prima considerata. Ora se pei punti A, D, A', D' , si fanno passare piani verticali diretti perpendicolarmente ai piedritti, e che si considerino gli effetti della spinta che si esercita secondo l'arco di gran contrazione in ciascuna delle zone così ottenute, si osserverà che la zona centrale è la sola in cui le forze che tendono a rovesciare la vòlta incontrano nei piedritti una resistenza capace di neutralizzare la loro azione.

Nelle parti $Ac d D$, $A' c' d' D'$ gli sforzi che si producono tendono a rovesciare gli angoli acuti D, D' che non offrono resistenza sufficiente. Infine nelle porzioni di vòlta ABe , $A' B' e'$ le spinte parallele ad Ac non sono contrastate che da una parte del piedritto, mentre dall'altra nissuna resistenza di questa natura si oppone al loro effetto e per conseguenza al rovesciamento dei conci fuori della vòlta; per questo motivo alla tendenza di questo sforzo si dà il nome di *spinta al vuoto*.

Nella vòlta omogenea, che abbiám considerato, la spinta al vuoto risulta unicamente dall'elasticità dei materiali, e dalla forma della superficie cilindrica: sarebbe quindi indipendente dall'appa-

recchio di costruzione del vólto impiegato; ma in pratica le costruzioni sono lungi dal presentare questo carattere d'omogeneità, e si sa che la coesione delle malte e la loro aderenza ai materiali possono cooperare in modo affatto artificiale sia alla resistenza al rovesciamento, sia ai diversi movimenti di reazione necessarii per deviare la direzione degli sforzi della spinta. Se si considera infine che l'arte del taglio delle pietre ha precisamente per oggetto la creazione di giunti di rottura artificiali, e la trasformazione di certi sforzi in altre forze, la cui azione è diretta nel senso della massima resistenza, sarà facile il comprendere che, colla scelta dell'uno o dell'altro apparecchio, si può lasciare una costruzione esposta a tutte le conseguenze che derivano dalla spinta al vuoto, od attenuare l'effetto di questa spinta al punto di renderlo quasi nullo. Quest'ultimo risultato si ottiene riducendo in una direzione parallela ai piani di testa lo sforzo che tende al rovesciamento; perchè questo sforzo sarà allora contrastato nei due lati della vólta dai piedritti, che gli opporranno secondo il loro spessore obliquo la più gran somma di resistenze.

Egli è tuttavia indispensabile di conciliare l'esigenza di questa condizione essenziale col principio generale di stabilità non meno rigoroso, che consiste nel dirigere le superficie di giunto dei diversi filari continui di conci normalmente alla risultante delle pressioni che devono sopportare. Il costruttore pertanto nello studio e nella scelta dell'apparecchio che deve impiegare, dovrà fare in modo che le diverse superficie di separazione dei cunei risultino normali ai piani di testa; e che i cunei costituenti la vólta presentino angoli diedri retti o prossimamente tali. A queste diverse condizioni si tentò di soddisfare con diversi sistemi d'apparecchio, fra cui il principale è *l'apparecchio elicoidale*, che fu appunto adottato pei vólti del nostro ponte obliquo.

III.

Apparecchio per la costruzione del vólto.

Si consideri un semicilindro, intrados della vólta obliqua: se ne immagini lo sviluppo sul piano d'imposta, e su di esso le rette perpendicolari alle corde delle sinusoidi secondo cui sono sviluppati gli archi di testa; vi corrisponderà sul cilindro una serie di eli-

che parallele, che saranno le linee di giunto longitudinale. Secondo queste eliche si facciano muovere rette che si conservino in tutte le loro posizioni normali alle sezioni d'intrados parallele ai piani di testa: le superficie sghembe così descritte divideranno la vólta in filari di conci, di cui costituiscono le superficie di giunto longitudinali continue. Si immaginino ora tagliati questi filari da superficie di giunto trasversali discontinue generate dalle normali alle sezioni parallele ai piani di testa. Si otterrà una vólta apparecchiata col sistema elicoidale teorico.

Se non che la vólta obliqua può avere per intrados un cilindro a sezione retta circolare, nel qual caso le teste sono ellissi, oppure un cilindro a sezione retta ellittica colle sezioni di testa circolari. Fino a questi ultimi anni era prevalsa negli ingegneri costruttori l'opinione dell'inglese Giorgio Watson Buck, doversi nella costruzione delle vólte oblique per ponti coll'apparecchio elicoidale adottare per intrados una superficie cilindrica a sezione retta circolare; ora però cominciano anche a costruirsi vólte oblique il cui intrados è un cilindro a sezione retta ellittica; il ponte che ora studiamo, ne è un esempio. Il prefato Buck riguarda tali vólte come mancanti di stabilità, più difficili ad eseguirsi e conseguentemente più dispendiose, soprattutto se in muratura; e dopo aver gratuitamente asserito che l'applicazione dell'analisi a tali vólte non conduce a formole semplici, conchiude col dire che egli le rigetta affatto perchè non avranno mai un concorso di circostanze favorevoli alla loro applicazione. Ma l'esperienza fece in seguito vedere fino a qual punto fossero attendibili le conclusioni dell'autore inglese; il Graeff specialmente nella sua memoria, sull'apparecchio e la costruzione dei ponti obliqui, osserva con molto discernimento che nelle ipotesi di un sotterraneo o di un ponte, la cui lunghezza sia grande a fronte dell'apertura, si deve evitare la sezione retta ellittica perchè apparterebbe alla maggior lunghezza della vólta; ma in un ponte in cui la porzione di vólta da apparecchiare in vólta retta è di poca lunghezza, vale molto meglio aver l'arco di cerchio per la sezione di testa che per la sezione retta: imperocchè è nell'arco di testa che l'apparecchio richiede la massima regolarità, come quello che è più in vista, e l'apparecchio su d'un arco di cerchio si fa sempre più semplicemente e regolarmente che su d'un arco d'ellisse.

Ma v' ha di più; anche dal lato della stabilità il sistema eli-

coidale ellittico ha un vantaggio sull'inglese. Consideriamo due semicilindri obliqui aventi la stessa proiezione orizzontale, l'uno ellittico, l'altro circolare, ciascuno dei quali formi l'intrados di una vólta obliqua, se dopo averli sviluppati sul piano orizzontale d'imposta si traccia la trasformata per isviluppo dell'elice intradosale di giunto che dev'essere perpendicolare alla corda della trasformata dell'arco di testa, queste eliche incontreranno le generatrici dei due cilindri secondo angoli disuguali: il minore appartiene al cilindro ellittico. La differenza dei due angoli aumenta coll'obliquità del cilindro; così per una obliquità di 40° il rap-

porto delle tangenti dei due angoli è $\frac{4}{5}$ circa, e diventa $\frac{1}{2}$ quando

l'angolo d'obliquità è 25° . Segue da ciò che l'inclinazione dei giunti presso le imposte nelle vólte oblique, inclinazione che molti costruttori ritengono nociva dal lato della esecuzione, è molto minore nelle vólte ellittiche che nelle circolari: l'apparecchio ellittico adunque si avvicina più che l'inglese all'apparecchio retto, soddisfacendo contemporaneamente le condizioni proprie di una conveniente ripartizione della spinta al vuoto.

Finalmente le operazioni che il costruttore deve eseguire per l'applicazione dell'apparecchio ellittico sono egualmente facili che quelle dell'inglese; per vederlo considero una vólta obliqua col l'intrados cilindrico a sezione retta ellittica, ed archi di testa circolari; prendo il piano verticale di proiezione parallelo ai piani di testa, ed il piano d'imposta per piano orizzontale; costruisco il rabbattimento della sezione retta del cilindro sul piano orizzontale, esso servirà allo sviluppo della superficie sul piano d'imposta. Segno le generatrici sullo sviluppo ed ottengo la sinusoide in cui si trasforma l'arco di testa, osservando che, nel moto di sviluppo, ciascun punto della superficie rimane costantemente in un piano perpendicolare alle generatrici, e si trova nel rabbattimento su quello della generatrice che lo contiene. Conduco la corda della sinusoide; per un suo estremo una perpendicolare ad essa nell'interno dello sviluppo; questa determina la direzione delle linee di giunto longitudinali; essa incontra la corda della sinusoide trasformata dell'altro arco di testa in un certo punto; la porzione di corda compresa fra questo punto e l'estremo suo più vicino deve essere un multiplo dello spessore da darsi ai singoli filari di conci; generalmente non è tale, ed allora si conduce la obliqua che meno si scosta dalla perpendicolare, che parta dallo stesso

punto e che soddisfi alla richiesta condizione. Si divide poi l'arco di testa in un numero impari di parti tali che la lunghezza di ognuna si allontani il meno possibile dalla ora accennata; pei punti di divisione della sinusoida si conducono rette parallele alla trasformata dell'elica: queste segneranno sullo sviluppo le trasformate delle eliche dei giunti longitudinali che devono limitare sulla superficie cilindrica l'intrados dei filari di concii continui; ciascuna di queste zone può suddividersi in altre eguali per permettere di impiegare materiali di piccole dimensioni. Tutte queste eliche formeranno le direttrici secondo cui le superficie dei giunti longitudinali devono essere generate dalla serie delle normali alle sezioni parallele alle teste. Le superficie di giunto trasversali discontinue avranno per direttrici non curve parallele a quelle di testa, ma eliche normali alle longitudinali e le cui trasformate sul piano di sviluppo sono rette perpendicolari alle trasformate delle eliche longitudinali.

Con queste leggere modificazioni ci allontaniamo alquanto dalle prescrizioni della teoria, e la spinta non si trova più diretta in un piano parallelo alle teste; ma non risulta inconveniente di sorta, e si ha il vantaggio di avere per linee di giunto due sistemi di curve tagliantisi ad angolo retto, e per superficie di giunto trasversali delle superficie sghembe taglianti l'intrados e le superficie di giunto longitudinali secondo diedri e triedri sensibilmente retti.

I filari che non si trovano compresi fra concii corrispondenti sulle due teste, incontrano le imposte secondo un angolo acuto; si evita questo inconveniente troncando ciascun filare con un piano perpendicolare alle eliche di giunto longitudinale, ed essi allora si appoggeranno su d'un filare soventi in pietra da taglio situato all'altezza delle imposte e tagliato a dentiera; i concii d'imposta che costituiscono questa dentiera diconsi *cuscinetti*; essi hanno per intrados i triangoli determinati dai due sistemi di eliche di giunto e dalla porzione di linea d'imposta fra loro intercettata.

Vediamo come si costruisca l'apparecchio delle teste; perciò osservo che le traccie delle superficie d'intrados e d'estrados sul piano di testa sono due archi di cerchio concentrici aventi per raggio quello della sezione obliqua. Il piano verticale che limita i concii di testa taglia le stesse superficie secondo due archi di cerchio concentrici e dello stesso raggio dei primitivi; di questi archi si conoscono le trasformate, su cui stanno segnati i punti di divisione, nell'incontro delle linee di giunto longitudinali; pei

punti di divisione conduco le normali, o giunti di testa, ed unisco con rette i punti corrispondenti sui due archi di cerchio; queste danno i giunti d'intrados e d'estrados dei conci di testa.

Arrivati a questo punto, date le proiezioni dell'estrados riesce facile segnare le linee di giunto sul suo sviluppo: e così siamo in grado di determinare sul disegno tutte le linee che presentano una maggiore o minore utilità per l'applicazione dell'apparecchio. I diversi elementi del sistema elicoidale applicato ai cilindri di sezione retta ellittica si determinano analiticamente e graficamente con processi teorici abbastanza semplici: tali elementi serviranno poi mediante opportuni pratici accorgimenti alla completa esecuzione del vólto. Tratterei volentieri ancora di questo argomento, ma temo di allontanarmi di troppo dai limiti che mi sono imposti dalla presente dissertazione, Solo osserverò che quando la vólta deve costruirsi in pietra da taglio è necessaria l'esatta determinazione ed il tracciamento degli sviluppi delle superficie d'intrados e d'estrados dei singoli conci. Trattandosi di muratura laterizia non occorre speciale conformazione dei conci nel corpo della vólta: solo pei conci di testa dovremo tagliar ciascun mattone secondo un piano di conveniente inclinazione, o fabbricarli con modelli speciali. Seguate sul manto le eliche longitudinali, comprendenti quattro o cinque filari di mattoni, si procede alla costruzione del vólto: nella quale operazione è necessaria attenzione somma.

IV.

Stabilità dell' opera.

Ora che abbiamo studiato il modo di agire delle forze che sollecitano i vólti obliqui in generale, e veduto come l'apparecchio elicoidale, secondo cui son costrutte le vólte del nostro ponte, abbia per iscopo di ridurre in un piano parallelo alle teste gli sforzi che tendono a comprometterne la stabilità, ci pare doversi il grado di stabilità del nostro ponte studiare applicando ad una sezione parallela alle teste la teoria che si studia pei vólti retti: al che ci consigliano considerazioni dedotte dal Rondelet. Egli infatti, nella sua *Teoria delle vólte*, dietro opportuni calcoli ed esperienze deduce: 1° Se si immagina che la larghezza di una semi-vólta di-

minuisca continuamente, restando costante la monta, la somma degli sforzi orizzontali diminuirà nello stesso rapporto, cosicchè se il punto d'imposta si confonde col mezzo della corda la spinta orizzontale sarà nulla, e non resta più che la pressione verticale che agisce sola sul piedritto e contribuisce a rassodarlo: infatti non si ha più una vòlta, ma un semplice piedritto continuo. — 2° Se al contrario è la monta che diminuisce mentre la larghezza resta la stessa, la curva d'intrados finirà col confondersi colla sua corda, e la vòlta diverrà un tavolato, o vòlta piana orizzontale. Sono annientati gli sforzi che rassoderebbero il piedritto e non restano più a questa vòlta per sostenersi che le spinte orizzontali, che agiranno sole con tutto il peso della vòlta: onde queste specie di vòlte son quelle che spingono di più. — 3° Le vòlte a montar rialzata spingono meno che quelle a tutta monta dello stesso diametro ed egual forma, e queste meno che quelle a monta depressa. Ora noi studiando l'azione delle forze sollecitanti il vòlto parallelamente ad un arco di testa, e verificando la stabilità di esso avremo implicitamente verificata la stabilità della sezione retta del vòlto la quale avendo minor corda ed egual monta esercita una spinta minore.

Ciò posto, conoscendo la curva d'intrados, la monta, la corda, ed il raggio: dato il peso Π del m. c. di muratura, calcolo l'altezza di un muro fittizio faciente lo stesso uffizio del sovraccarico. La spinta orizzontale Q alla chiave sarà espressa da

$$Q = \Pi \left\{ \frac{1}{2} z_0^2 + (a + r_0) z_0 + a r_0 \right\} \quad (1)$$

in cui $\Pi = 2000$ kg.

$z_0 = 0^m,52$ spessore del vòlto alla chiave.

$a = 0^m,79$, ossia $0^m,25$, distanza del suolo stradale dal vertice dell'estrados alla chiave, più $0^m,21$ altezza di un muro fittizio disteso sul suolo del ponte e faciente lo stesso uffizio del parapetto e del muro mediano; più $0^m,33$ altezza di un muro fittizio faciente uffizio del sovraccarico che si suppone di 650 kg. per m.q. di suolo stradale.

$r_0 = 10^m,77$ raggio di curvatura dell'arco d'intrados.

Ricavo $Q = 29300$ kg. per m.q. Ora perchè vi sia stabilità è necessario che si abbia:

$$Q = n' R' z_0 \quad (2)$$

essendo n' il coefficiente di stabilità, R' il coefficiente di resistenza alla rottura per compressione, che pella muratura di buona qualità può ritenersi $1^{kg},20$ per millimetro quadrato.

Da essa ricavo $n' = \frac{1}{21}$: ossia il vólto alla chiave sarebbe capace di sopportare una spinta 21 volte maggiore di quella che realmente sostiene.

Per accertarci ora della stabilità dell'intiero vólto, cerchiamo per alcuni giunti la direzione ed il punto d'applicazione della risultante delle forze che si esercitano su di essi: la scomporremo in due, una normale e l'altra parallela al giunto, e vedremo se la pressione, riferita all'unità di superficie sugli spigoli di ciascuno dei giunti considerati, sia o no maggiore di quella che il materiale onde sono costrutti può sopportare (fig. a).

Considero un giunto qualunque BC faciente l'angolo φ colla verticale: ED sia la linea del sovraccarico: H il punto di mezzo del vólto alla chiave; il masso $ABCDE$ è sollecitato dal proprio peso che chiamo P , e dalla spinta Q diretta secondo l'orizzontale passante per H .

Possiamo determinare l'area e quindi il peso $ABCDE$ per uno spessore = 1; prendendo per unità di forza il peso del m.c. dei materiali con cui è costruito il vólto, la stessa superficie della sezione verticale rappresenterà in m.q. il suo peso. Cerco il centro G di gravità dell'area suddetta, e per esso conduco la verticale, nel cui punto I d'incontro colla orizzontale passante per H trasporto la P e la Q data dalla (1). Componendole si ottiene la R risultante delle forze operanti sul giunto BC , ed il suo punto M di applicazione sul giunto medesimo. Scompongo la R in due, l'una parallela, l'altra normale a BC : chiamo T quest'ultima componente: rappresenterà la pressione sopportata dal giunto.

Chiamo c il braccio HI del peso P .

θ l'angolo RIQ .

y l'incognita BM .

Prolungo RI fino ad incontrare l'asse del vólto in N ; abbiamo:

$$R = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (3)$$

$$\text{tang } \theta = \frac{P}{Q} \quad (4)$$

$$NH = c \text{ tang } \theta \quad NO = c \text{ tang } \theta + \frac{1}{2} z_0 + \rho_0$$

Dal triangolo NMO essendo i lati proporzionali ai seni degli angoli opposti:

$$OM = \left\{ c \operatorname{tang} \theta + \frac{1}{2} z_0 + \rho_0 \right\} \frac{\cos \theta}{\cos (\varphi - \theta)}$$

e quindi:

$$y = \left(c \operatorname{tang} \theta + \frac{1}{2} z_0 + \rho_0 \right) \frac{\cos \theta}{\cos (\varphi - \theta)} - \rho_0 \quad (5)$$

$$T = R \cos (\theta - \varphi) \quad (6)$$

Chiamo K' , K'' le pressioni sugli spigoli B , C riferite alla unità di superficie: per vedere se non vi sia pericolo di schiacciamento servono le formole seguenti date dalla teoria della resistenza delle murature: valgono le due prime se $y > \frac{1}{3} Z$ e le altre due se $y < \frac{1}{3} Z$:

$$\left. \begin{aligned} K' &= 2 \left(2 - 3 \frac{y}{Z} \right) \frac{T}{Z} & K'' &= 2 \left(-1 + 3 \frac{y}{Z} \right) \frac{T}{Z} \\ K' &= \frac{2}{3} \frac{T}{y} & K'' &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

Calcolo ora l'angolo del giunto all'imposta colla verticale e trovo 21° , $45'$, $15''$: lo divido in 5 parti eguali di 4° , $21'$, $3''$ ciascuna; e per ognuno dei giunti corrispondenti calcolo i valori della tavola qui unita. In essa i valori di P rappresentano la superficie delle parti comprese tra il giunto che si considera e la verticale passante pel mezzo dell'arco. I valori di Q sono rappresentati in volume supponendola applicata, come dicemmo, nel mezzo del giunto alla chiave. Dai valori di y si vede che i punti di applicazione delle risultanti sui giunti sono compresi fra $\frac{1}{3}$ e $\frac{2}{3}$ dei giunti medesimi. I valori di K' , K'' mostrano che il primo giunto a partire dalla chiave ha maggiormente premuto lo spigolo di estrados; la pressione è uniformemente ripartita sul secondo giunto; lo spigolo maggiormente premuto del terzo giunto è quello d'intrados; gli spigoli maggiormente premuti degli altri giunti, sono di nuovo quelli di estrados. Finalmente nell'ultima colonna si hanno i coefficienti di stabilità relativi ai vari giunti calcolati colla formola $n' = \frac{K_{II}}{R^I}$. Da essi si vede come la maggiore stabilità si verifichi verso la chiave.

**Tavola delle dimensioni, delle pressioni e dei coefficienti di stabilità
di alcuni giunti di un arco.**

GIUNTI	P	Q	R	tang θ	θ	φ	$\theta - \varphi$	c	y	T	Z	K	K'	n'
1	1,11	14,65	14,70	0,076	4° 20' 46"	4° 21' 3"	-0° 0' 17"	0,43	0,29	14,70	0,32	18,50	38,05	$\frac{1}{15}$
2	2,26	14,65	14,82	0,154	8° 45' 18"	8° 42' 6"	0° 3' 12"	0,87	0,26	14,81	0,32	28,48	28,48	$\frac{1}{21}$
3	3,53	14,65	15,10	0,240	13° 59' 44"	13° 3' 9"	-0° 26' 35"	1,30	0,25	15,09	0,32	32,37	25,67	$\frac{1}{18}$
4	4,97	14,65	15,47	0,340	18° 46' 40"	18° 14' 12"	0° 32' 28"	1,85	0,30	15,46	0,32	16,00	43,45	$\frac{1}{13}$
5	6,70	14,65	16,10	0,457	24° 33' 37"	21° 45' 15"	2° 48' 22"	2,40	0,29	16,08	0,32	20,22	41,62	$\frac{1}{14}$

Consideriamo le *pila* — esse devono sopportare il peso di un'arcata col suo sovracarico; le spinte orizzontali si elidono. Il peso del masso murale che gravita sulla base della pila è

$$\pi \{ (2c + x)(d + a) - 2S \}$$

essendo c la semicorda;

x la grossezza della pila, a l'altezza;

d l'altezza della linea di sovracarico sulla linea d'imposta;

S area del segmento $ZABL + ac$.

L'equazione di stabilità relativa allo schiacciamento sarà per conseguenza :

$$n' R' x = \pi \{ (2c + x)(d + a) - 2S \} \quad (8)$$

in cui R' è il coefficiente di resistenza alla rottura per compressione dei materiali usati;

n' il coefficiente di stabilità.

Fatte le sostituzioni si trova $n' = \frac{1}{30}$: ossia sulla base della pila gravita un peso 30 volte minore di quello che sarebbe capace di schiacciare i materiali.

Venendo ora alle *spalle*, sappiamo che sopportano il peso di una mezza arcata e la sua spinta orizzontale: dobbiamo quindi verificare se si trovano in buone condizioni di stabilità sotto il rapporto della resistenza alla rottura per scorrimento, per rovesciamento e per schiacciamento. Sotto il primo aspetto si ha l'equazione di stabilità:

$$T'' = n'' f N \quad (9)$$

in cui è: T'' somma algebrica delle componenti orizzontali delle forze applicate ad una spalla superiormente al giunto d'imposta, sul quale è probabile avvenga lo scorrimento. L'azione del volto è qui in parte neutralizzata dalla spinta e dalla reazione del terapieno a cui la spalla è appoggiata.

N somma algebrica delle componenti verticali delle stesse forze.

f coefficiente di attrito di muratura sopra muratura. Fatte le debite sostituzioni si ricava il coefficiente di stabilità relativo allo scorrimento:

$$n'' = 0,66.$$

Le forze applicate alla spalla, invece di produrre scorrimento sul giunto d'imposta, potrebbero rovesciare la spalla facendola rotare attorno al suo spigolo esterno inferiore. Perchè ciò non succeda dev'essere soddisfatta l'equazione di stabilità:

$$T''' = n''' M \quad (10)$$

essendo: T''' il momento rovesciante;

M il momento resistente;

n''' coefficiente di stabilità relativo al *rovesciamento*.

Si ricava nel nostro caso:

$$n''' = 0,70$$

Se costruiamo graficamente la risultante delle forze che sollecitano il nostro masso murale, essa non escirà dalla base della spalla, perchè se ciò accadesse la spalla dovrebbe rovesciarsi: possiamo per conseguenza determinare la distanza del punto in cui tale risultante incontra la base della spalla, dallo spigolo esterno inferiore di questa, attorno a cui si teme che avvenga il rovesciamento. Detta x questa distanza, si potrà determinare colla equazione:

$$Qq - Vv - Pp + (P + V)x = 0 \quad (11)$$

nella quale sono:

Q, V componenti orizzontali e verticali della spinta che l'intero vólto esercita contro la spalla;

P peso della spalla col suo sovracarico;

v, p bracci di leva delle forze verticali P, V rispetto allo spigolo esterno inferiore della spalla;

q braccio di Q forza che tende a produrre rovesciamento rispetto al piano di base della spalla;

$P + V$ reazione opposta alla spalla dall'appoggio sottostante alla base di distacco.

Si ricava $x = 0,25$.

Sullo spigolo attorno a cui tende a prodursi il rovesciamento si verifica una pressione maggiore che su tutti gli altri punti: dobbiamo perciò vedere se questa pressione non è tanto grande da produrre lo schiacciamento dei materiali. Applico a tale scopo le formole (7) pel caso di $y < \frac{1}{3} Z$ ed ho la pressione massima K' riferita all'unità di superficie che ha luogo sullo spigolo esterno inferiore della spalla: da cui deduco il coefficiente di stabilità re-

lativo alla resistenza alla rottura per *ischiacciamento*: $n' = \frac{1}{18}$

I valori dei coefficienti finora trovati, dimostrano a sufficienza le buone condizioni di stabilità dell'opera.

— Verifichiamo finalmente la stabilità dei *muri d'ala*, che, come più sopra dicemmo, sono sul prolungamento delle spalle del ponte: sono alti m. 3,70, con m. 1 di spessore, e possono ritenersi muri di sostegno spinti da un terrapieno costituito dalle pareti della trincea in cui scorre il canale: essendo tale terrapieno senza sovracarico, e terminato superiormente da un piano orizzontale. In questo caso le formole generali relative alla spinta delle terre si riducono a:

$$\text{tang. } \Psi = \text{tang. } \varphi + \frac{1}{\cos. \varphi} \sqrt{\frac{1}{2}} \quad (12)$$

$$R_m = \frac{1}{2} \Pi y^2 \frac{\cos \varphi}{\cos 2 \varphi} \frac{\text{tang } \Psi - \text{tang } \varphi}{\text{tang } 2 \varphi \text{ tang}^2 \Psi + \text{tang } \Psi} \quad (13)$$

$$\left. \begin{aligned} Q_m &= R_m \cos \varphi \\ V_m &= R_m \sin \varphi \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

$$Z_m = \frac{y}{3} \quad (15)$$

in cui si ha:

Ψ angolo che il piano di distacco del prisma di massima spinta fa col piano orizzontale;

φ angolo di natural declivio, eguale a 34° per terre sabbiose;

$\Pi = 1700$ kg., peso di 1 m. c. di terra;

R_m spinta massima che il terrapieno esercita contro il muro di sostegno;

Q_m, V_m sue componenti orizzontale e verticale;

y altezza del muro di sostegno eguale a quella del terrapieno;

Z_m distanza del punto d'applicazione di R_m dal piano orizzontale che passa per la base del muro.

Si trova:

$$\text{tang } \Psi = 1,50 \quad R_m = 3128 \text{ kg.} \quad Q_m = 2596 \text{ kg.} \quad V_m = 1751 \text{ kg.} \quad Z_m = 1^m,27.$$

Il nostro muro di sostegno deve resistere allo scorrimento, al rovesciamento ed allo schiacciamento. Per la stabilità anzitutto

dev'essere soddisfatta la equazione (9) che nel nostro caso diventa :

$$Q_m = n'' f (V_m + P) ;$$

considerando una lunghezza = 1 di muro, e supponendo che lo scorrimento avvenga sulla sua base; f è il coefficiente d'attrito della muratura sopra muratura; P è il peso dell'unità di lunghezza del muro di sostegno: il coefficiente di stabilità relativo allo scorrimento diventa;

$$n'' = 0,49.$$

Vediamo se è possibile il rovesciamento attorno allo spigolo della base inferiore del muro esterno al terrapieno: serve a questo riguardo, per verificare la stabilità, l'equazione (10) che diventa:

$$Q_m q = (V_m v + P p) n''' ;$$

essendo q braccio di Q_m rispetto al piano di base del muro.

v, p bracci delle V_m e P rispetto allo spigolo attorno a cui può succedere il rovesciamento: il coefficiente di stabilità relativo al rovesciamento diventa :

$$n''' = 0,64.$$

Se chiamo x la distanza del punto, in cui la risultante delle forze applicate al muro di sostegno incontra la base del medesimo dallo spigolo attorno a cui può succedere il rovesciamento, si potrà essa determinare colla (11) che diventa nel nostro caso:

$$Q_m q - V_m v - P p + (P + V_m) x = 0$$

da cui ricavasi:

$$x = 0,51;$$

ed applicando le formole (7) pel caso di $y > \frac{1}{3} Z$ si ha la pressione massima K' riferita all'unità di superficie sullo spigolo attorno a cui può succedere il rovesciamento. Quindi si deduce che il coefficiente di stabilità relativo allo schiacciamento è:

$$n' = \frac{1}{30}.$$

Questi valori dimostrano come la stabilità sia dovunque assicurata.

Materiali da costruzione impiegati, e costo dell'opera.

La *pietra da taglio* impiegata proviene dalle cave di Mont'Orfano sul lago Maggiore: essa servi per gli stipiti fra cui si muovono le paratoie, e pei lastroni componenti la soglia che serve a sorreggerli. Il numero totale degli stipiti per le 4 arcate, di cui è costituito il ponte, è di 24, cioè 6 per arcata: di essi 16 hanno sezione di 0^m,40 per 0^m,34 ed 8 hanno sezione di 0^m,40 per 0^m,30.

Tutti questi stipiti sono indistintamente in due pezzi, di cui l'uno, posto immediatamente sulla soglia, è lungo m. 4,42, e m. 4,52 compreso il maschio; l'altro al primo sovrapposto è lungo m. 3,16.

Le sezioni degli stipiti variano col variare delle altezze, come abbastanza si vede dalla tavola.

La soglia in cui penetrano i maschi degli stipiti, è costruita di massi aventi la sezione rettangola con lati di m. 0,50 per m. 0,40.

Contro la soglia ed inferiormente alla stessa è posto un filare di pietre aventi pure sezione rettangola con lati di m. 0,20 per m. 0,50.

I *laterizi* provennero in massima parte da Rondissone; ne diedero anche le fornaci di Torrazza, Vinovo e Novara.

Le *calci idrauliche* adoperate sono di Casale e di Palazzolo.

Ogni m. c. di *calcestruzzo* si formò con 8 parti di ghiaia, 5 di sabbia e 2/5 di calce di Casale in pasta.

La quantità dei materiali impiegati, e l'importo dell'opera compresi i muri a monte sono i seguenti:

		Quantità.	Importo.
Scavi di fondazione	m. c.	2125,00	2125,00
Assate di pioppo	m. q.	52,00	156,00
Muratura di calcestruzzo	m. c.	793,00	11102,00
Id. mattoni scelti	»	902,00	25256,00
Id. ciottoli spaccati	»	274,00	4384,00
Id. id. naturali	»	56,00	784,00
Id. a secco di pietrame	»	17,00	204,00
Id. pietra da taglio a grana fina »	»	47,00	6580,00
Id. id. ordinaria	»	15,00	1727,80

A riportarsi

L. 52318,80

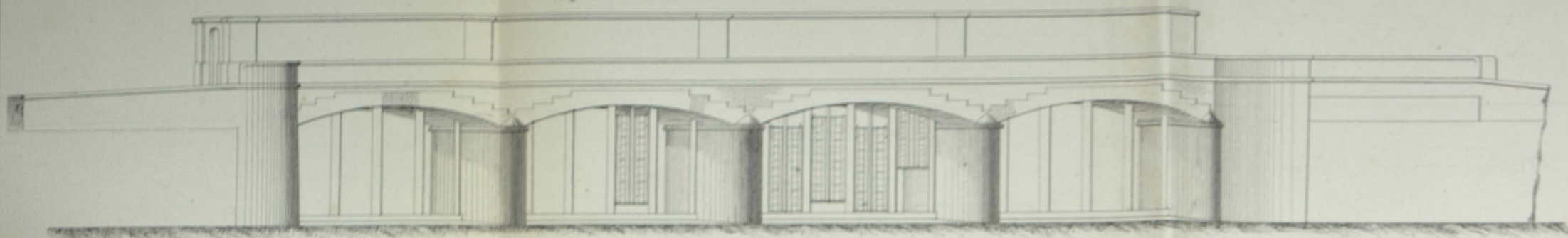
			<i>Riporto</i> L. 52318,80
Muratura di pietra per gradini esterni	m. c.	4,55	201,50
Cappa per vòlti	»	12,39	247,80
Paratoie	N°	22,00	12596,80
Opere minori			1088,10
Importo totale dell'edificio			<u>L. 66453,00</u>

Giunto così al fine della mia dissertazione, mancherei ad uno stretto dovere se non ringraziassi l'egregio ingegnere E. Benazzo, direttore locale dei lavori del Canale Sussidiario, per le precise indicazioni, che, con isquisita cortesia, mi procurò sull'argomento che venni finora svolgendo (*).

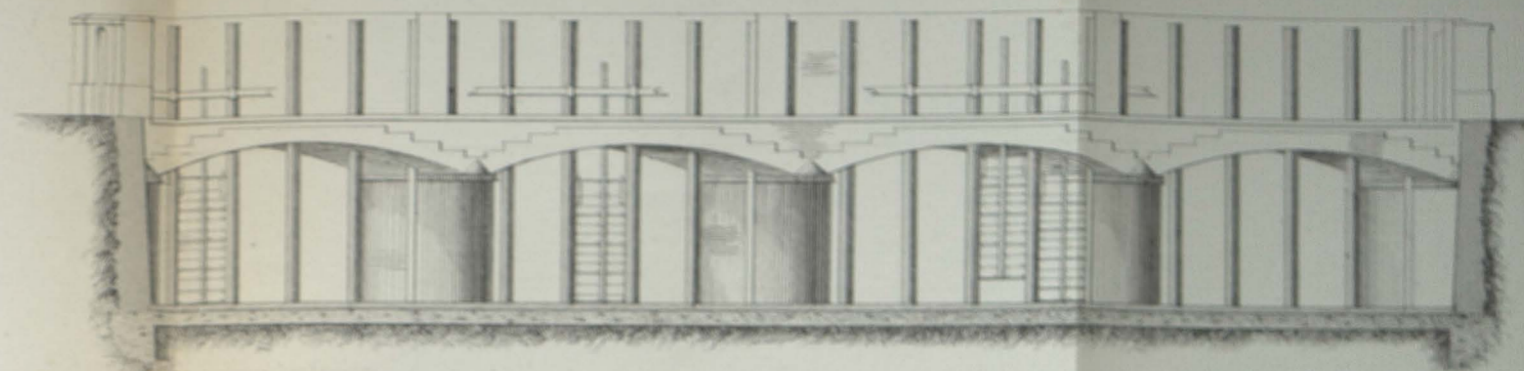
AMERIO GIUSEPPE.

(*) Tali indicazioni venivano contemporaneamente pubblicate per cura dello stesso nella monografia tecnica che ha per titolo: *Il Canale sussidiario Cavour*.

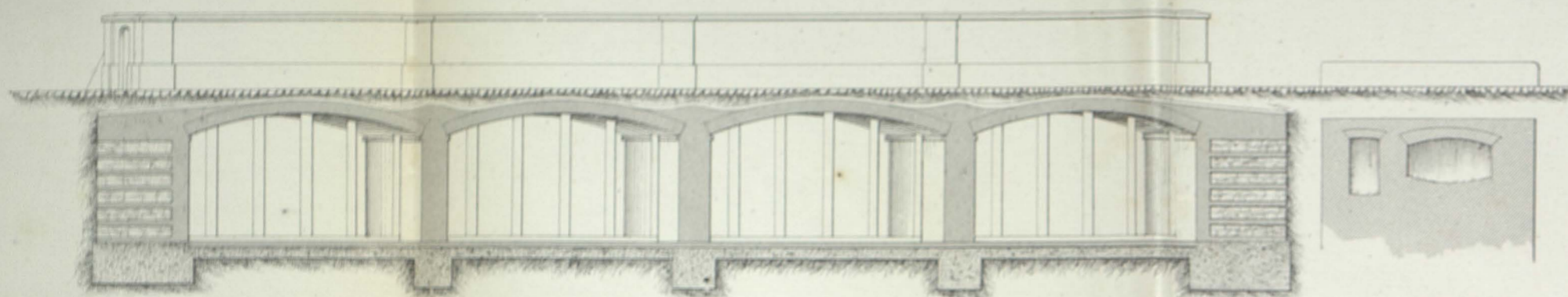
Prospetto a valle



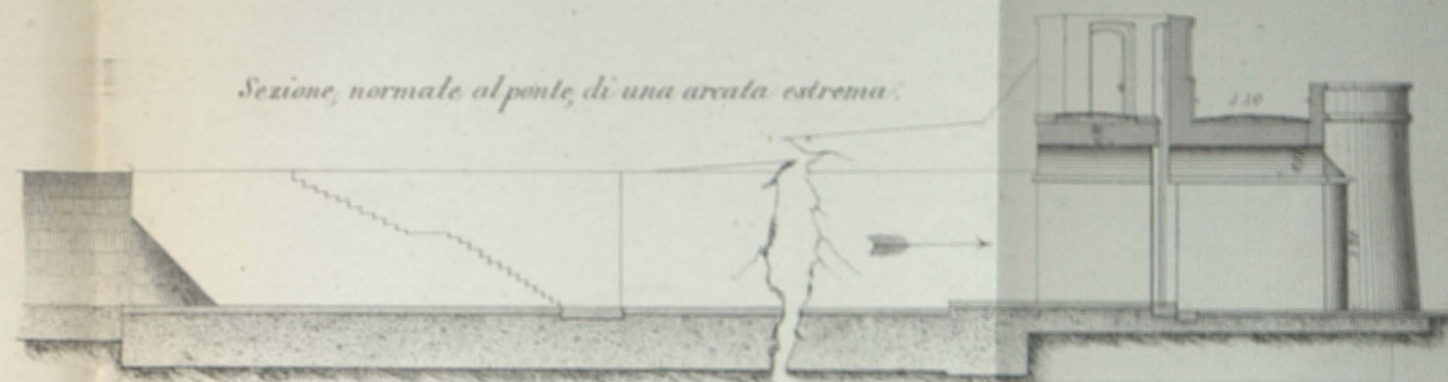
Prospetto a monte



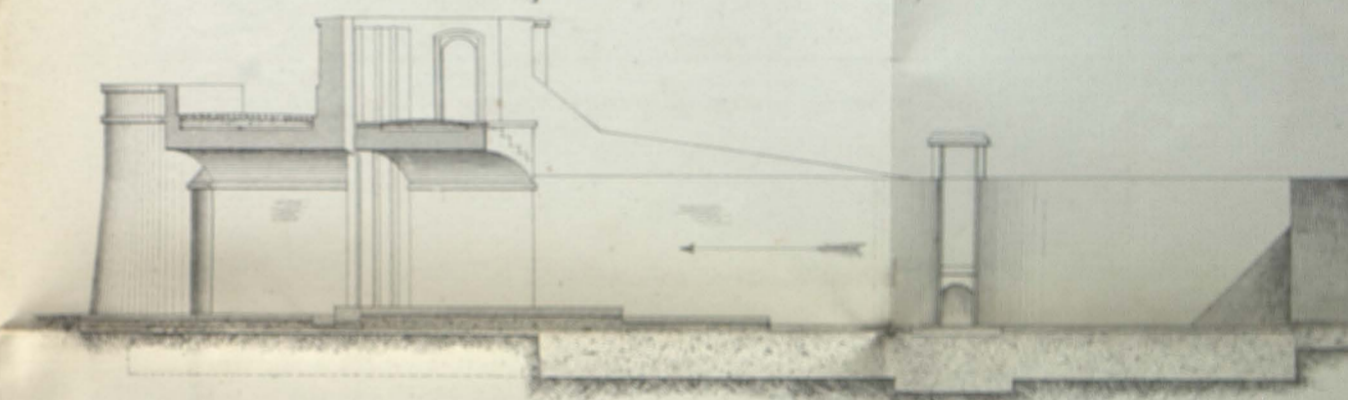
Sezione longitudinale



Sezione, normale al ponte, di una arcata estrema



Sezione, parallela all'asse del Canale, di una arcata estrema



Sezioni al di sopra del pavimento — Scala $\frac{1}{40}$

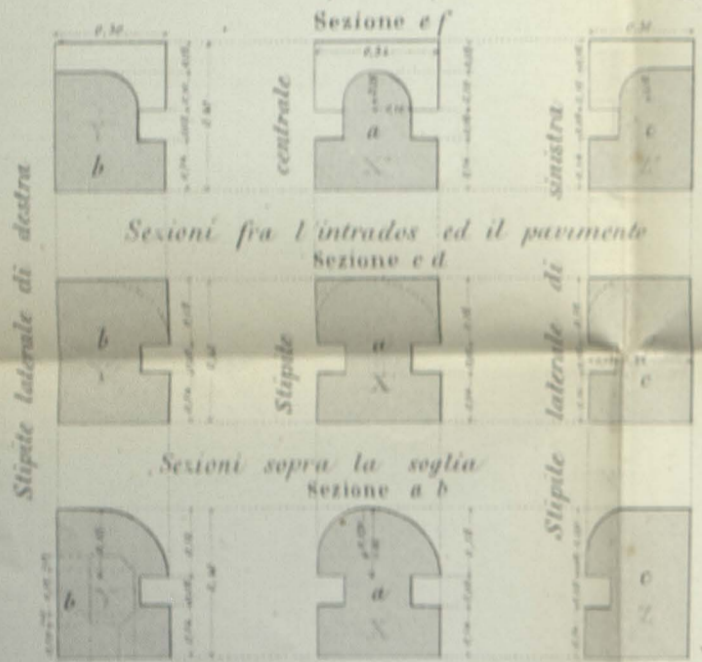


Fig. (a)

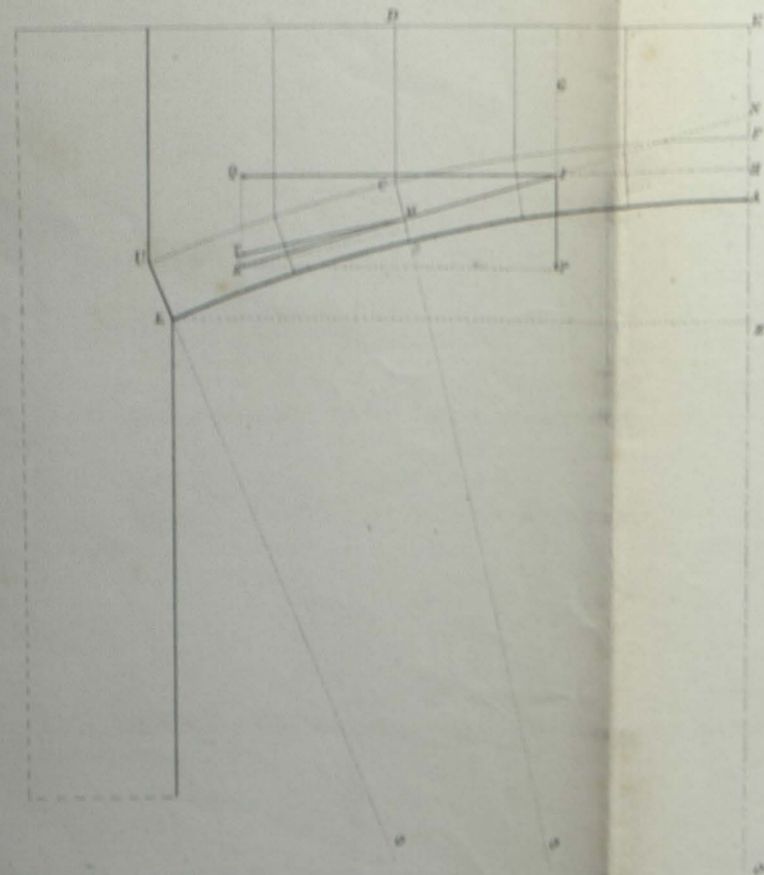
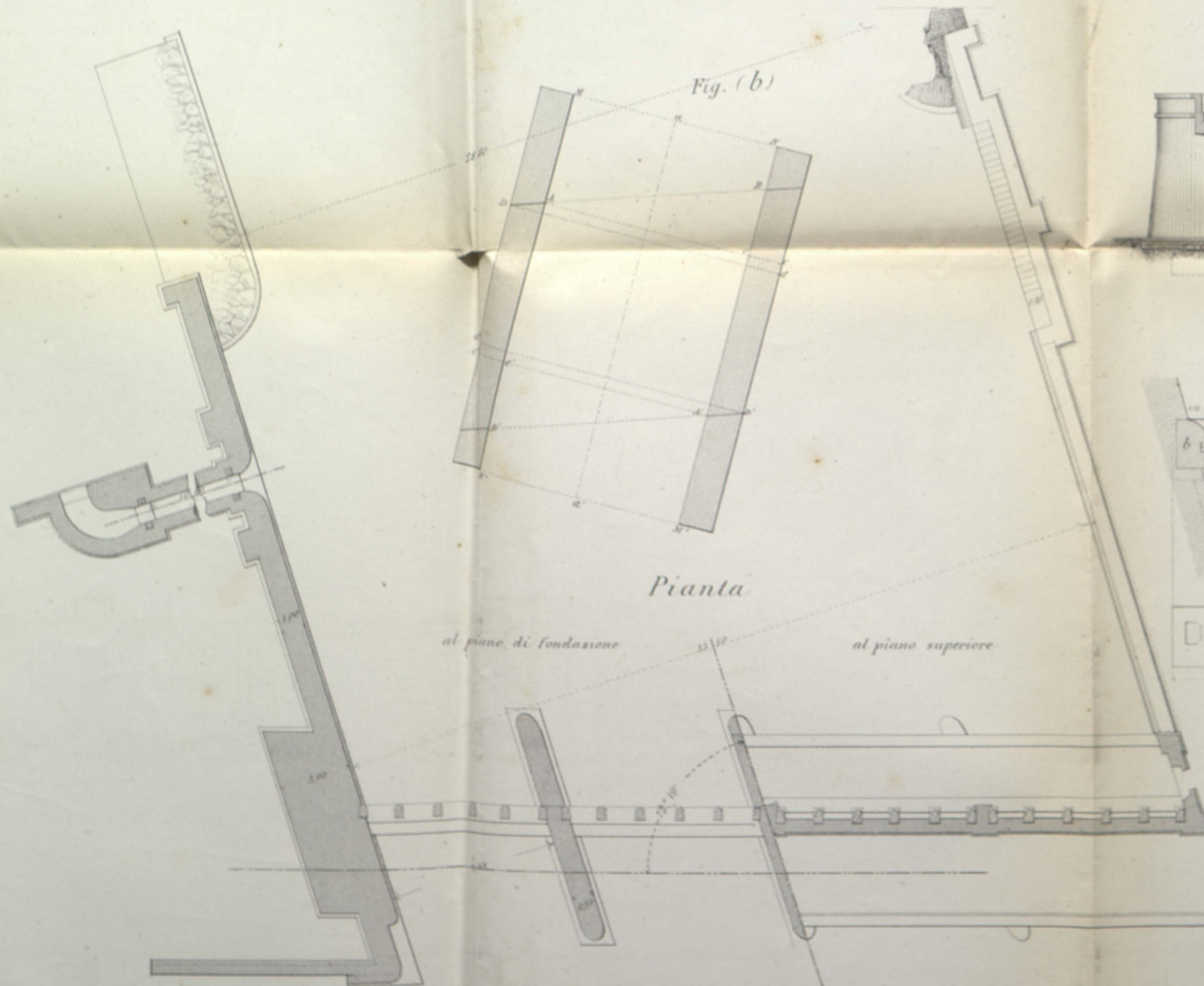


Fig. (b)



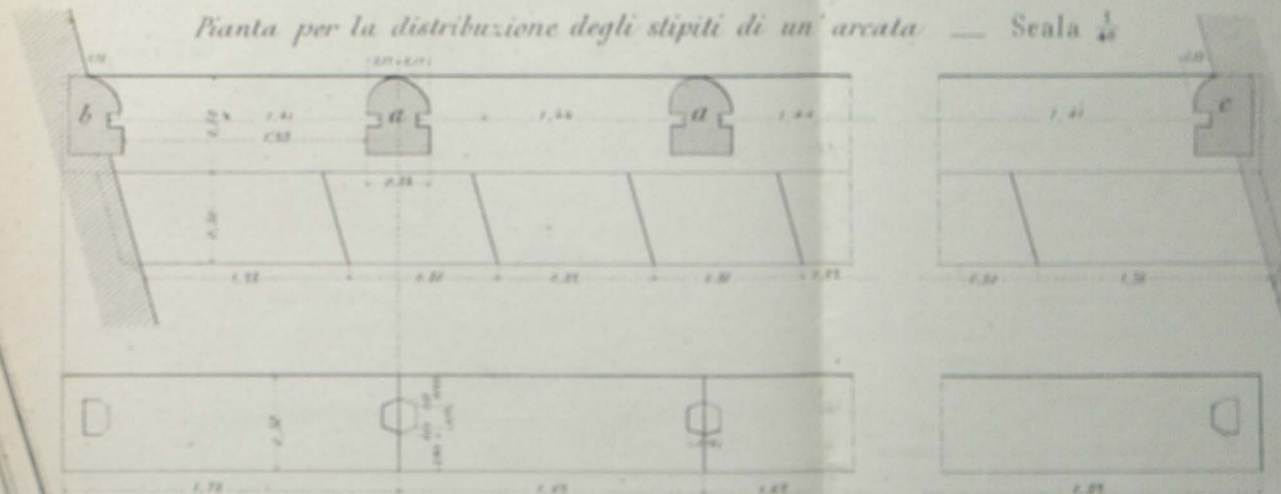
Pianta

al piano di fondazione

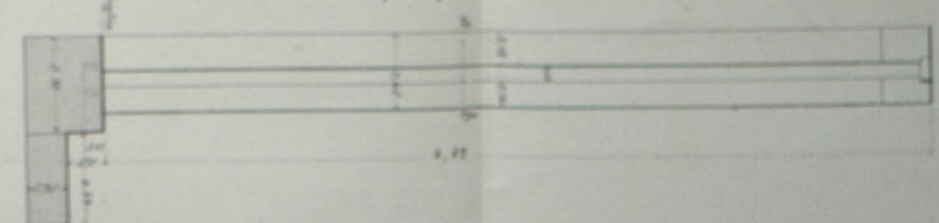
al piano superiore

CAVALE CAVOUR

Pianta per la distribuzione degli stipiti di un'arcata — Scala $\frac{1}{40}$



Fianco di uno stipite fra il volto e la soglia



Fianco superiore al volto

Scala $\frac{1}{40}$

