G 105

REGIA SCUOLA D'APPLICAZIONE PER GLI INGEGNERI
IN TORINO

IL PONTE MOSCA

SULLA DORA RIPARIA

presso Torino

DISSERTAZIONE

PRESENTATA ALLA COMMISSIONE ESAMINATRICE

DA

MOSCA CARLO
da Torino

PER OTTENERE IL DIPLOMA
DI
INGEGNERE CIVILE

TORINO
STAMPERIA DELL'UNIONE TIPOGRAFICO-EDITRICE
Via Carlo Alberto, N° 33, casa Pomba
1873

Dolente della perdita di quella persona, che mi sarebbe stata ambita e sicura guida nel cammino che sto per intraprendere e memore del suo affetto per me e per i miei cari, io credetti dover mio il prendere ad esame le ragioni di stabilità di quella sua opera, che, dopo i più gravi contrasti, gli fu ben meritata fonte di pubblica rinomanza.

Così sul finire dei miei studi scolastici, ho cercato di adempiere un suo vagheggiato disegno, già suggeritogli dal voto del Congresso permanente di Ponti e Strade, e contrastatogli solo dalle dure e molteplici vicende, che travagliarono la sua esistenza.

Questa mia intenzione valga ad ottenermi un benevolo compatimento e un indulgente giudizio.

CARLO MOSCA.

SOMMARIO

I. Descrizione dell'opera.

II. Teoria generale dell'equilibrio degli archi depressi, e sua applicazione al calcolo delle principali dimensioni del Ponte sulla Dora.

III. Descrizione delle operazioni fatte per regolare la costruzione del volto del ponte sulla Dora; osservazioni raccolte durante l'esecuzione; disarmamento e risultato finale.

IV. Verificazione della stabilità dell'arco del ponte sulla Dora.

I.

DESCRIZIONE DELL' OPERA

. . . . . *Si quid novisti rectius istis,*
Candidus imperti; si non, his utere mecum.
HOR: *Epist.*, lib. I, *Epistola Sexta.*

Il varco della Doria Riparia presso Torino, il quale da tempo antico si faceva per mezzo di un modesto ponte di legno posto a Nord-Ovest del sobborgo di Dora, fin dall'epoca dell'ultima dominazione Francese e posciachè i Reali di Savoia ripresero le redini del Governo, fu argomento di studi varii, e tema di molteplici discussioni, sì per il nuovo suo collocamento, che per la sua costruzione. Varii furono i progetti presentati e discussi; tutti però si riducevano a proporre ponti a più archi stante la non piccola larghezza dell'alveo del torrente.

Ebbe per ultimo Carlo Mosca, ingegnere della Provincia, la missione di fare appositi studi su tale questione.

Esaminate accuratamente le circostanze locali, chiarite le varie difficoltà che si opponevano al buon esito dell'opera, dipendenti dall'ampiezza dell'alveo, dalla sua obliquità sull'asse della via, e dal rapido corso del torrente in piena, successivamente quattro ponti furono da lui ideati.

I due ponti a tre archi, obliquo l'uno, e l'altro retto, di cui nei suoi due primi progetti, come quelli che restringevano colle pile la sezione libera del torrente, e facean temere al piede delle pile medesime la formazione di vortici in tempi di piena, i quali minacciato avrebbero la solidità dell'opera, non parvero atti a superare le varie difficoltà del problema.

Unico mezzo, che soccorreva naturalmente al pensiero per risolvere la questione, era quello di un ponte ad un solo arco. Ed a questo si appigliò l'ingegnere Mosca.

Sorretto da diligenti studi fatti a tal uopo su Perronet, Gauthey, Boitard, appoggiato al felice esito da lui già ottenuto nella costruzione di un ponte ad arco depresso sul Tesio presso Lanzo, propose un ponte ad un sol arco di 50 m. di corda e 5, 50 di saetta. Ma l'arditezza di quest'opera, prima di tal fatta ad essere eseguita, fu causa che, dietro parere del Congresso permanente di ponti e strade, se ne riducesse la luce a 45 m. di corda, rimanendo invariata la saetta di 5, 50.

Ultimati gli studi ed approvato quest'ultimo progetto, fu posto in esecuzione dal 1823 al 1830 con una interruzione dei lavori per anni quattro dal 1824 a tutto il 1827 per lotte e contestazioni in quell'epoca insorte. Pel buon andamento dei lavori s'ebbe lode precipua l'ingegnere Giuseppe Mosca fratello minore dell'autore, che, fedele interprete del suo concetto, ne fu esecutore e collaboratore indefesso.

Aperto al pubblico il passaggio sul nuovo ponte nell'agosto 1830, lo si intitolò dal voto pubblico e spontaneo Ponte *Mosca*, e l'amministrazione municipale sanzionava lo stesso nel 1868 colla nuova denominazione imposta alla via, che dalla piazza Emanuele Filiberto conduce al ponte.

Corre la correggiata, orizzontalmente disposta per tutta la lunghezza del ponte, sopra un grande arco di Gneiss appoggiato a solide spalle dello stesso materiale. Posano le spalle sopra una platea portata da fondazioni a pali mediante due primi corsi di pietre con riseghe; altri cinque corsi vi sono in seguito sovrapposti, e dal superiore di essi nasce il volto, che ha per intrados un arco di circolo di 45 m. di corda e di 5, 50 di saetta, corrispondente ad un'apertura di 54° 56′ 45″.

Il leggiero aspetto che esso riceve dalla sua depressione è d'assai aumentato dall'aggiunta di due strombature, le quali, partendo dal terzo corso sull'imposta, formano sulla fronte un secondo arco d'apertura un po' maggiore, avente col primo comune la tangente all'intrados della chiave, e la cui saetta misura m. 3,75.

La parte cilindrica del volto è terminata verso caduna fronte da due piani verticali simmetricamente disposti rispetto all'asse del volto, incontrantisi secondo una verticale, che passa per la sommità dell'arco della fronte, e distanti dalla medesima fronte di m. 1,75 presso ciascuna spalla: tali piani intersecano la parte cilindrica del volto secondo due archi d'elisse. Si hanno così due spazii triangolari per caduna fronte, i quali sono coperti dalle suddette strombature. Ciascuna di esse è generata da una retta, che, incontrando in ogni sua posizione l'asse della superficie cilindrica d'intrados, si muove appoggiandosi costantemente e simultaneamente all'arco di fronte di 3, 75 di saetta, e ad uno degli archi di elisse, secondo cui i detti piani intersecano la superficie d'intradosso dell'arcata.

A porre in opera questa strombatura fu indotto l'Autore da un più favorevole sfogo delle acque nelle massime piene, e da una maggior armonia delle parti componenti l'edifizio.

La forma circolare delle spalle, che verso la base fanno da rostri, concorre essa pure a dare più libero ed aperto passaggio alla corrente, mentre la loro parte superiore aggiunge eleganza alle fronti, ed accresce l'ampiezza degli accessi del ponte. Questi ultimi sono limitati da cadun lato da un muro ornato da pilastri e terminante al ciglio della sponda.

L'arco è composto di 93 corsi di conci; 91 dei quali, compreso quello di chiave, sono di egual grossezza, mentre i due rimanenti all'imposta sono più larghi, riuscendo questa maggior larghezza determinata dalla condizione, che il piano superioro del corso primo corrisponda all'origine dell'arco della strombatura. Alla chiave il volto ha la grossezza di m. 1,50.

Dall'origine della strombatura, con 10 altri corsi di pietre orizzontali si raggiunge il livello d'estradosso della chiave. Su questo piano posa immediatamente un cornicione con modiglioni in pietra da taglio, disegnato a somiglianza di quello, che già ornava la parete della piazza davanti al tempio di Marte Vendicatore in Roma; semplice ed elegante decorazione. Una fascia senza modiglioni segue detto cornicione al di là dei pilastri delle spalle. La linea superiore del cornicione segna esternamente il livello del marciapiede, e della carreggiata sull'asse della strada. Sul medesimo posa un solido pa-

rapetto liscio terminato da una pietra di coronamento superiormente convessa; l'altezza totale del parapetto è di m. 1.

Sbocca la strada, che è sul ponte, su due piccole piazzette misti-linee formate sulle teste di essa, che dall'un lato e dall'altro si allargano un quarto di circolo, mettendo da una parte alla via, che dà l'accesso alla città e le si apre di fronte, e dall'altra alla strada che conduce a Milano (V. tav. I e II).

E ciò valga per quanto spetta all'opera compiuta. Di maggior momento saranno per lo scopo prefissoci alcuni particolari circa i procedimenti impiegati nella costruzione di tal ponte, in cui l'eccellenza dell'esecuzione fu pari all'arditezza del disegno.

Ma a ben comprendere questi particolari, ed anche per ordine di necessaria precedenza nel progetto, premetterò alcuni cenni sulla teoria degli archi depressi, quale servì all'autore per istituire i calcoli delle principali dimensioni del ponte.

II.

TEORIA GENERALE DELL' EQUILIBRIO DEGLI ARCHI DEPRESSI

Il problema dell'equilibrio di un ponte è uno dei vari problemi, i quali si presentano all'ingegnere costruttore, che non si possono con tutta la esattezza del calcolo e in tutta la loro generalità risolvere; poichè, per non dire di quegli elementi che si dovrebbero introdurre, e intorno ai quali mancano sufficienti esperienze, vi sono certe condizioni che non si possono assoggettare al calcolo, perchè affatto dipendenti da circostanze particolari. Quindi non è che facendo accurate esperienze, osservando attentamente ciò, che nei vari casi pratici avviene, ed interrogando, dirò così, la natura, si arriva a stabilire delle ipotesi, le quali ci conducono poi a soluzioni per questo genere di problemi abbastanza soddisfacenti.

Le osservazioni di Perronet sul movimento che prendono i conci delle volte dei ponti nell'atto del loro disarmamento, le esperienze fatte da Gauthey nell'atterrare ponti antichi, e per ultimo quelle di Boitard su archi di varie forme costrutti ad arte ci fanno credere con ragione, che, quando in una volta di ponte venga a rompersi per poco l'equilibrio, la volta agisce contro i piedritti nello stesso modo, che farebbero due spranghe pesanti appoggiate l'una contro l'altra, e che posassero sovra i piedritti. Che anzi, dacchè si comincia a disarmare l'arco il peso di questo fa sì che questo effetto tende continuamente

a riprodursi. Si può adunque in generale considerare la volta di un ponte come formata di quattro parti, due delle quali verso le imposte rimangono aderenti ai piedritti, le altre due sono fra loro disgiunte alla chiave. Ma se l'arco della volta è a monta depressa, se la sua saetta non è più di 1/4 della corda, le due parti inferiori aderenti ai piedritti più non esistono, facendosi la separazione alle imposte ed alla chiave. Intanto in tale condizione di cose la volta non può cadere se non per due ragioni: o perchè i piedritti vengono rovesciati all'infuori o perchè vengono spostati scorrendo sulle loro basi.

Pertanto nel fissare le varie dimensioni delle parti di un ponte si dovrà pel suo equilibrio fare in modo, che questo sussista fra le parti spingenti e le parti resistenti del ponte secondo la precedente ipotesi; giacchè è evidente, che, se si potesse fare un ponte d'un sol pezzo, purchè abbastanza incompressibile fosse il fondo su cui posa, qualunque poi fossero le sue dimensioni, esso durerebbe sempre in equilibrio, sinchè, vinta la tenacità della materia, non venisse a separarsi in più pezzi.

Ora, determinata la curva dell'arco di un ponte secondo le varie circostanze locali, fissata la spessezza alla chiave dietro la natura dell'arco e del materiale che si vuole impiegare, e quindi stabilito l'estradosso della volta, quello che resta a determinarsi per l'equilibrio del ponte è lo spessore delle spalle. E questo spessore si dovrà determinare per modo che, sotto l'azione spingente delle due parti superiori di volta, essi piedritti o spalle non vengano nè rovesciati all'infuori, nè spostati per moto di scorrimento sulle basi loro.

E qui si vede che per risolvere questo problema, prima di tutto convien supporre, che il fondo, su cui sono innalzate le spalle, sia incompressibile, o siasi ridotto ad esser tale; poi bisogna sapere, se, succedendo il rovesciamento o spostamento delle spalle, ciò avverrà conservandosi queste d'un sol pezzo o se invece non si farà per avventura una qualche disgiunzione attraverso tutta la massa della spalla e la parte superiore non venga essa solo rovesciata o spostata.

Ma sebbene nelle esperienze di Boitard su archi depressi siasi osservato, che le spalle tendono a rovesciarsi girando attorno allo spigolo esterno della loro base, pare non potersi

tuttavia nulla conchiudere in generale su questo proposito, dipendendo ciò essenzialmente dal metodo adottato nella costruzione delle spalle. E se si evita di costrurre queste a strati orizzontali, che si estendano a tutta la sezione della spalla, si potrà supporre che il rovesciamento succeda come se la spalla fosse di un sol pezzo; e così pure lo scorrimento, quando non vi sia unione alcuna fra la spalla ed il fondo, su cui essa è innalzata. Poichè, quando la stessa aderenza vi fosse fra il fondo e la spalla, che in qualunque sua sezione, converrebbe supporre il caso più sfavorevole, dello scorrimento cioè della parte superiore della spalla sopra una sezione orizzontale che passi per le imposte dell'arco. La stessa ipotesi si dovrà adottare, quando la massa della spalla si voglia costrurre a strati orizzontali uniti con semplice cemento.

Premesse queste osservazioni veniamo ora alla ricerca delle condizioni analitiche per l'equilibrio di un ponte, coll'applicare il calcolo alle precedenti ipotesi nel caso di un arco depresso sostenuto da spalle, che si possano considerare come di un sol pezzo ed innalzate sopra di un fondo piano.

Da quanto sopra si scorge, che nel cedere di una volta di ponte ad arco depresso esso si può considerare come formato di quattro parti AE, Ed, dE′, E′A′ (Tav. III, fig. 1ª) distinte, che si appoggiano fra di loro nei punti C, C′ e D. Perciò le due parti AE ed A′E′ non saranno rovesciate all'infuori quando sarà assicurato l'equilibrio del poligono ACDC′A′, i cui lati sono invariabilmente uniti coi centri di gravità G, g, g', G′ delle quattro masse suddette mercè le linee AG, GC, Cg, gD, ecc.; e nel qual poligono i due capi A ed A′ si suppongono fissi. Nè le spalle AE ed A′E′ scorreranno sulle loro basi quando l'attrito, che vi si oppone non sia vinto dalla spinta orizzontale, da cui sono sollecitate.

Applicando il principio delle velocità virtuali all'equilibrio del poligono A C D C′ A′, detti P e Q i pesi delle masse AE ed Ed sull'unità di larghezza del ponte, fatto GP $= p$, gQ $= q$, e quindi dp e dq essendo gli spazii percorsi nel tempuscolo dt dai punti di applicazione dei pesi P e Q secondo le loro direzioni nel leggero movimento del poligono, sarà l'equazione di equilibrio:

$$P\,dp + Q\,dq = o.$$

Dove si tratta di sostituire dp e dq calcolati pei valori di p e q, che si ricaveranno dalla ispezione della figura.

Perciò chiamando:

$$AC = l \quad G\hat{A}C = e \quad AB = x$$

$$CD = l' \quad g\hat{C}D = e' \quad BC = y$$

$$AG = \rho \quad C\hat{A}B = \mu \quad CF = x'$$

$$Cg = \rho' \quad D\hat{C}F = \mu' \quad FD = y'$$

$$AP = \varepsilon \quad BQ = \varepsilon'$$

Sarà

(1) $\quad p = \rho \operatorname{sen}(e + \mu) \qquad q = y + \rho' \operatorname{sen}(e' + \mu')$

(2) $\quad \varepsilon = \rho \cos(e + \mu) \qquad \varepsilon' = \rho' \cos(e' + \mu')$

(3) $\quad x = l \cos \mu \qquad x' = l' \cos \mu'$

(4) $\quad y = l \operatorname{sen} \mu \qquad y' = l' \operatorname{sen} \mu'$

Per la natura stessa del presente sistema essendo i triangoli A G C e C g D invariabili (fig. 2ª), le quantità ρ, ρ', l, l', e, e', sono costanti ed invece le quantità μ, μ', x, x', y, y', sono variabili; cosicchè differenziando le equazioni (1) si avrà:

$$dp = \rho \cos(e + \mu)\, d\mu$$

$$dq = dy + \rho' \cos(e' + \mu')\, d\mu'$$

le quali, a cagione delle equazioni (2), diventano

$$dp = \varepsilon d\mu$$

$$dq = dy + \varepsilon' d\mu'.$$

Ora per le due prime equazioni (3) e (4) si ha:

$$dy = x d\mu \qquad \text{da cui:}$$
$$dp = \varepsilon d\mu \qquad \text{e}$$
$$dq = x d\mu + \varepsilon' d\mu'.$$

L'equazione $P\,dp + Q\,dq = o$ diventa adunque sostituendo:

$$P\varepsilon d\mu + Q\,(x d\mu + \varepsilon' d\mu') = o$$

d'onde
$$\frac{d\mu'}{d\mu} = -\frac{Qx + P\varepsilon}{Q\varepsilon'}$$

Ma il punto A essendo fisso, si ha:

$$x + x' = \text{cost.}$$

ossia:
$$l \cos \mu + l' \cos \mu' = \text{cost.}$$

quindi:
$$l \operatorname{sen} \mu d\mu + l' \operatorname{sen} \mu' d\mu' = o$$

ossia:
$$y d\mu + y' d\mu' = o$$

d'onde:
$$\frac{d\mu'}{d\mu} = -\frac{y}{y'}$$

Perciò sostituendo nella:

$$\frac{d\mu'}{d\mu} = -\frac{Qx + P\varepsilon}{Q\varepsilon'}$$ si avrà:

$$\frac{Qx + P\varepsilon}{Q\varepsilon'} = \frac{y}{y'}$$

equazione, che impedisce il rovesciamento delle spalle: la quale si ricava anche direttamente con semplici scomposizioni di forze come si trova in Venturoli ed in Gauthey.

L'altra equazione, che impedisce lo scorrimento delle spalle sulla loro base, si ricava osservando, che l'attrito, il quale si oppone da solo a questo scorrimento, secondo la nostra ipotesi è espresso da: $f(P+Q)$, essendo f il coefficiente d'attrito: mentre la forza, che tende a produrre lo scorrimento della spalla, è la spinta orizzontale della mezza vôlta, la quale si calcola così: scomposto il peso Q in due nei punti C e D e lo stesso fatto per la parte simmetrica vi sarà in D il peso $2Q\frac{BQ}{BO}$. Fatta la scomposizione di questo peso secondo le due rette DC e DC′ ed una di queste componenti risolta in due, una orizzontale e l'altra verticale, la componente orizzontale sarà $Q\frac{BQ}{DF}$. Questa essendo la spinta cercata si eguaglierà all'attrito suddetto e si avrà:

$$f(P+Q)=Q\frac{BQ}{DF}$$

ossia colle notazioni superiormente stabilite

$$f(P+Q)=Q\frac{\varepsilon'}{y'}$$

che è l'equazione seconda cercata. La quale pure si trova nel Venturoli e nel Gauthey.

Da entrambe pertanto queste due equazioni, che valgono l'una ad impedire il moto di rovesciamento, l'altra quello di scorrimento delle spalle, si ricaverà lo spessore di queste: e per la stabilità del ponte si dovrà poi adottare uno spessore maggiore d'entrambi i valori che soddisfano alle due prestabilite equazioni.

Applicazione delle precedenti equazioni per determinare lo spessore delle spalle del Ponte sulla Dora

La costruzione delle spalle di questo ponte è tale da potersi escludere il caso di una rottura attraverso la spalla, stante il ben studiato sistema di costruzione della medesima ottenuto mediante l'interposizione di grossi macigni, la cui altezza uguaglia due o tre corsi di muratura; inoltre faremo astrazione dall'aderenza, che ha la massa della spalla col fondo su cui è innalzata, come pure della spinta, che la terra vi esercita contro. Ma invece, per tener conto del peso dei parapetti in pietra da taglio, considereremo l'equilibrio dell'arco per una sezione fatta lungo i parapetti. La fig. 3ª, tav. III indica tale sezione, dove $abceh$ è la sezione della spalla di cui si cerca lo spessore, e $cemndd'$ è la mezza volta. E per favorire sempre più la stabilità non terremo conto del riempimento di terra, che vi è ancora al disopra della spalla, ovvero della linea he; il che serve anche a semplificare alquanto il calcolo.

Ciò posto nel ponte di Dora si hanno i seguenti dati:

Corda $= 2\,cf = 45^{m}$.

Saetta $= f\,d' = 5^{m},50$.

Spessore alla chiave $= d\,d' = 1^{m},50$.

Raggio calcolato $= o\,d' = 48^{m},772$.

Ampiezza dell'arco $2\,c\,d' = 54^{o}, 56', 45''$.

Sviluppo dell'arco $= 2$ arc. $c\,d' = 46^{m},772$.

Altezza delle spalle dal fondo all'imposta $= bc = 5^{m},00$.

Altezza totale delle spalle stabilita in progetto $= ah = 9^{m},75$.

Altezza del parapetto dal vertice dell'estradosso $= dn = 1,70$.

Essendo G e g i centri di gravità della spalla e della mezza vôlta (fig. 3ª), P e Q rispettivamente i loro pesi, ed avvertendo, che in quest'ultima figura i punti a, b, c, d, f, p, q, G, g corrispondono rispettivamente ai punti A, B, C, D, F, P, Q, G, g della figura 1ª, che ha servito a ricavar le formole, si vedrà,

che dietro i precedenti dati si ha in questo caso da porre nelle precedenti equazioni:

$$DF = y' = 5,50 + 1,50 = 7$$
$$CB = y = 5$$
$$AB = x$$

e che $AP = \varepsilon$ è la distanza orizzontale ap del punto a dal centro G di gravità dell'area $abcdh$ e così pure $BQ = \varepsilon'$ e la distanza orizzontale bq del punto b dal centro g di gravità dell'area $cemnd'$.

Perciò restano a cercarsi le quantità P, Q, ε, ε' da sostituirsi colle precedenti nelle due equazioni, che ci daranno i due valori di x, che è lo spessore cercato.

Calcolo di P.

Il peso specifico della spalla formata di muratura greggia rivestita in pietra da taglio si assume dietro apposite esperienze di 2300 circa Kg. per metro cubo.

Per semplicità poi di calcolo supporremo he orizzontale, per cui si avrà:

$$\text{area } abceh = \text{rettang. } bh - \text{triang. } cek = 9,75x -$$
$$-\frac{1}{2}\,4,75 \times 4,75 \text{ tang } (27^\circ, 28', 23'') = 9,75x - 5,86587$$

Dunque $P = 2300\,(9,75x - 5,86587)$

Calcolo di Q.

La mezza volta come noi la consideriamo, essendo formata di pietra da taglio soltanto, se ne assume il peso specifico di 2750 circa kg. per metro cubo.

Pertanto si ha:

$$\text{area } cemnd' = \text{trapez. } emno - \text{sett. } cd'o =$$

$$= \frac{51{,}972 + 3{,}95}{2}(22{,}50 + 4{,}75 \text{ tang } 27^\circ, 28', 23'') -$$

$$-\frac{1}{2}\,48{,}772\,\frac{1}{2}\,46{,}772 = 27{,}961\,(22{,}50 + 2{,}46984) -$$

$$-570{,}291 = 698{,}182 - 570{,}291 = 127{,}891.$$

Dunque $\qquad Q = 2750 \times 127{,}891.$

CALCOLO DI $\varepsilon = AP = ap$.

Servendoci della teorie dei momenti, e prendendoli rispetto alla linea $a\,h$ ed osservando, come sopra si è già fatto, che l'area $a\,b\,c\,e\,h$ è la differenza tra il rettangolo $a\,b\,k\,h$ ed il triangolo $c\,e\,k$, si avrà:

$$abceh \times \varepsilon = abkh \times \frac{1}{2}ab - cek\,(kh - \frac{1}{3}ek)$$

e servendoci dei risultati già ottenuti:

$$(9{,}75\,x - 5{,}86587)\,\varepsilon = 9{,}75\,x\frac{x}{2} - 5{,}86587\,(x - \frac{1}{3}\,2{,}46984) =$$

$$= 4{,}875\,x^2 - 5{,}86587\,(x - 0{,}82328)$$

D'onde $\qquad \varepsilon = \dfrac{4{,}875\,x^2 - 5{,}86587\,(x - 0{,}82328)}{9{,}75\,x - 5{,}86587}\,.$

CALCOLO DI $\varepsilon' = BQ = b\,q$.

Con calcolo analogo al precedente, ed avvertendo che i momenti si prendono rispetto alla linea $b\,c$, e che l'area $cemnd'$

è la differenza tra il trapezio $emno$ ed il settore cod' il cui centro di gravità è in γ, si ha

$$cemnd' \times \varepsilon' = \frac{em+no}{2} mn \left(\frac{mn}{3} \frac{me+2no}{me+no} - 2,46984 \right) -$$

$$- \text{arc.}\, cd' \frac{1}{2} d'o\, (cf - \gamma i)$$

Ora $$\gamma i = \frac{2}{3} \frac{od'.cd'}{\text{arc.}\, cd'} \text{sen}\, (13^{\circ}\, 44'\, 12'') = 7.6468$$

Perciò riducendo:

$$cemnd' \times \varepsilon' = \frac{\overline{mn}^2}{6} (me + 2no) - \frac{em+no}{2} mn.2,46984 -$$

$$- \text{settore} \times (cf - \gamma i).$$

Sostituendo e servendoci anche qui dei risultati precedenti:

$$127,891.\varepsilon' = \frac{\overline{24,96984}^2}{6} 107,894 - \frac{55,922}{2} 24,9698.2,46984 -$$

$$- 570,291\, (22,50 - 7,6468) = 11211,50 - 1734,37 -$$

$$- 8470,65 = 1006,48$$

D'onde $$\varepsilon' = \frac{1006,48}{127,891}$$

Facendo finalmente tutte le sostituzioni nelle due equazioni di equilibrio precedenti:

$$\frac{Qx + P\varepsilon}{Q\varepsilon'} = \frac{y}{y'}$$

$$f(P+Q) = Q \frac{\varepsilon'}{y'}$$

la prima diventa:

$$\frac{2750 \,.\, 127{,}891\, x + 2300\,[4{,}875\, x^2 - 5{,}86587\,(x - 0{,}82328)]}{2750 \,.\, 1006{,}48} =$$

$$= \frac{5}{7}$$

e la seconda diventa, prendendo $f = 0{,}65$:

$$0{,}65\,[2300\,(9{,}75 \,.\, x - 5{,}86587) + 2750 \,.\, 127{,}891] =$$

$$= 2750 \,.\, 1006{,}48\,\frac{1}{7}$$

Fatte le debite riduzioni, queste due equazioni si riducono a queste altre:

$$x^2 + 30{,}163 \,.\, x = 184{,}792$$

$$0{,}65 \,.\, 2300 \,.\, 9{,}75\, x = 416617 + 8769{,}4 - 228603$$

Dalla prima si ha: $x = 5^{m},22$

Dalla seconda: $x = 13^{m},50$

Lo spessore, che si deve adottare per la spalla dovendo per la stabilità del ponte superare entrambi questi valori, dovrà esser maggiore di m. 13,50, e per poco, che superi questo valore si potrà aver certezza dell'equilibrio del ponte per questo riguardo, giacchè il calcolo, che si è stabilito e da cui si è ricavato il limite per la dimensione della spalla è già favorevole alla stabilità.

Ma prima di conchiudere ricordiamoci, che abbiamo considerato l'equilibrio per la sezione, che evidentemente è la più sfavorevole; per modochè, se tutte le altre sezioni longitudinali del ponte fossero eguali a quella fatta lungo il parapetto, la spalla dovrebbe avere uno spessore uniforme maggiore di m. 13,50.

Ora, come è ben chiaro, se si fa una sezione fuori dei parapetti, lungo i marciapiedi per esempio, quivi non occorrerà per l'equilibrio, che lo spessore della spalla superi m. 13, 50; ma basterà che superi quella dimensione, che sarà data dal calcolo istituito per siffatta sezione. Dal che si vede, che, per non sprecare materia, e per assicurare tuttavia la stabilità del ponte, converrà formare dietro alla spalla due speroni nelle direzioni dei parapetti. Sebbene però, osservando che nella costruzione non riescono disgiunte fra loro le parti della spalla, che sopportano spinte diverse, si potrebbe dare alla spalla uno spessore uniforme compreso fra m. 13, 50, e quel numero, che corrisponde all'equilibrio della sezione fatta lungo i marciapiedi.

Il qual numero cercheremo, deducendolo dal calcolo fatto per la sezione lungo i parapetti, correggendo, dove occorre, le dimensioni della mezza vôlta. Poichè supporremo la linea $m\,n$ un metro più bassa, per arrivare al piano dei marciapiedi; e lasciando pel peso specifico della mezza vôlta quello della pietra da taglio, cioè 2750 kg. per m. c., terremo così conto del riempimento di terra, che sovrasta all'estradosso dell'arco e anche di un maggior peso distribuito sul ponte stesso.

Pertanto i valori di P ed ε rimangono gli stessi, mentre Q ed ε' diventano:

$$Q = 2750 \times 102{,}921$$

$$\varepsilon' = \frac{756{,}40}{102{,}921}$$

Quindi la prima equazione, in cui si considera il moto di rotazione della spalla, diventa:

$$x^2 + 24{,}039 . x = 131{,}52$$

da cui si ricava $x = 4^m{,}59$.

La seconda equazione, che impedisce lo scorrimento della spalla, diventa:

$$0{,}65 . 2300 . 9{,}75\, x = 297157 - 8769 - 183971$$

da cui si trae $x = 8^m{,}37$.

Si potrebbe adunque dare alla spalla uno spessore uniforme compreso almeno fra m. 13, 50 e m. 8, 37. E per non correre il rischio di prendere una grossezza troppo al disotto di m. 13, 50, è meglio sicuramente dare alla spalla uno spessore maggiore di m. 8, 37, munendola di due speroni sulle direzioni dei parapetti, per modochè ivi lo spessore di essa superi m. 13, 50. E siccome gli speroni avranno una larghezza maggiore di quella del parapetto, così sarà sempre più assicurata la stabilità.

In progetto si proponeva lo spessore della spalla di 12 metri con due speroni di 6 metri di lunghezza; sicchè nelle direzioni dei parapetti riusciva di 18 metri lo spessore della spalla. Inoltre gli speroni avevano 3 metri di larghezza, mentre i parapetti non ne hanno che m. 0, 40.

Nell'atto poi della costruzione si aumentò l'altezza della spalla al disopra dell'imposta; e si assegnò alle spalle uno spessore maggiore di quello stabilito in progetto facendo la spalla destra della grossezza di m. 12, 45 con due speroni lunghi 6, 02 e la sinistra dello spessore di m. 12, 54 con due speroni lunghi 5, 58. Così gli spessori dati alle due spalle furono in complesso di m. 18, 47 per la spalla destra, di m. 18, 12 per la sinistra. È superfluo l'aggiungere che ad assicurare la stabilità contribuiscono i muri circolari d'ala, che si dipartono dalle spalle presso all'imposta dell'arco.

Calcolo della pressione alla chiave ed alle imposte del Ponte sulla Dora.

Faremo questo calcolo per due sezioni longitudinali del ponte, cioè per quella fatta lungo i parapetti, e per quella fatta lungo i marciapiedi. Ma anzitutto ricaveremo le formole, che si dovranno applicare in ambi i casi, per avere queste diverse pressioni.

Sia Q il peso della mezza vôlta sull'unità di larghezza del ponte, intendendo per mezza vôlta non solo il mezzo arco, ma ancora tutto ciò, che dal mezzo arco è sostenuto. Sia φ l'incli-

nazione alla verticale del piano d'imposta; siano A ed R le pressioni cercate rispettivamente alla chiave ed all'imposta.

Si sa, che la pressione alla chiave di un arco formato di conci è la stessa spinta orizzontale dell'arco, la quale è espressa da $A = \frac{\pi}{\text{tang. } e}$ dove π è il peso d'una porzione qualunque d'arco a partire dalla chiave ed e l'inclinazione alla verticale del giunto corrispondente. Perciò, ponendo per π ad esempio il peso Q della mezza vôlta, si dovrà porre per e l'angolo φ che fa colla verticale il piano d'imposta; il che darà per pressione alla chiave:

$$A = \frac{Q}{\text{tang } \varphi}$$

Inoltre si sa che la pressione in un giunto qualunque fra i conci di un arco è la risultante della spinta A orizzontale dell'arco, e del peso π verticale della porzione d'arco compresa fra quel giunto e la chiave: perciò questa pressione è espressa da:

$$\sqrt{\pi^2 + A^2} = \sqrt{\pi^2 + \frac{\pi^2}{\text{tang}^2 e}} = \frac{\pi}{\text{sen } e},$$

e ponendo $\pi = Q$, per cui $e = \varphi$, sarà la pressione all'imposta:

$$R = \frac{Q}{\text{sen } \varphi}$$

Con una semplice scomposizione di forze si arriva egualmente a queste due formole della pressione alla chiave ed all'imposta. Considerando la mezza volta come un sol pezzo d'arco sostenuto fra i due piani dell'imposta e del giunto alla chiave, basta scomporre il peso Q della mezza volta in due componenti perpendicolari rispettivamente a questi due piani, le quali saranno le espressioni delle cercate pressioni A ed R.

Così dalla proporzione:

$$A : R : Q = \text{sen } (90^\circ - \varphi) : \text{sen } 90^\circ : \text{sen } (180^\circ - \varphi)$$

si deduce:

$$A = \frac{Q}{\text{tang}\,\varphi}$$

ed

$$R = \frac{Q}{\text{sen}\,\varphi}$$

valori identici a quelli superiormente espressi.

Applichiamo ora queste due formole alla sezione fatta lungo i parapetti. Per questa sezione si ha:

$$Q = 2750.\,127{,}891 \text{ Kg.}$$

e si ha:

$$\varphi = 27°.\,28'.\,22''.$$

Perciò risulta quivi la pressione alla chiave

$$A = \frac{2750.\,127{,}891}{\text{tang}\,(27°.\,28'.\,22'')} = 676394 \text{ Kg.}$$

e quella all'imposta:

$$R = \frac{2750.127{,}891}{\text{sen}\,(27°.\,28'.\,22'')} = 762366 \text{ Kg.}$$

Le quali due pressioni si devono immaginare esercitate sopra una superficie rettangolare di lunghezza un metro, ed avente per altezza rispettivamente le lunghezze del giunto prossimo alla chiave e del giunto all'imposta. Ora lo spessore alla chiave essendo di metri 1, 50, la pressione per centimetro quadrato alla chiave sarà:

$$\frac{676394}{100.150} = 45{,}09 \text{ Kg.}$$

Ed essendo in questa sezione di metri 1, 90 la larghezza del giunto all'imposta, la pressione ivi sarà per centim. quadrati.

$$\frac{762366}{100.190} = 40{,}12 \text{ Kg.}$$

Per la sezione fatta lungo i marciapiedi, supponendo per facilità, che la mezza volta sia ivi tutta in pietra da taglio e sia superiormente terminata col piano dei marciapiedi, si ha:

$$Q = 2750.102{,}921 \text{ Kg.}$$

essendo sempre $\varphi = 27°.28'.22''$

Perciò si trova dietro le due formole stabilite:

$$A = \frac{2750.102{,}921}{\text{tang}(27°.28'.22'')} = 544342 \text{ Kg.}$$

$$R = \frac{2750.102{,}921}{\text{sen}(27°.28'.22'')} = 613519 \text{ Kg.}$$

Quindi essendo per questa sezione longitudinale del ponte lo spessore alla chiave ancora di m. 1, 50 e la larghezza del giunto all'imposta invece di m. 3, 40, si trova, che la pressione per cent. quad. alla chiave è:

$$\frac{544332}{100.150} = 36{,}29 \text{ Kg.}$$

ed all'imposta è:

$$\frac{613519}{100.340} = 18{,}04 \text{ Kg.}$$

Ora troviamo in Rondelet, Navier, Poncelet, che non si devono i materiali sottoporre ad uno sforzo permanente maggiore del $\frac{1}{10}$ di quello sotto cui resterebbero schiacciati. Dietro accurate esperienze istituite dall'autore del progetto nell'arsenale di Torino sottoponendo parallelepipedi del Gneiss del Malanaggio a progressive pressioni esercitate da torchi idraulici, possiamo supporre, che la pietra, di cui è formato l'arco in quistione, non possa resistere alla pressione esercitata da un peso maggiore di 600 kg. per cent. quad. di superficie premuta.

Risulta quindi, che, adottando $\frac{1}{10}$ per coefficiente di stabilità, non dovrebbe essere assoggettata ad una pressione permanente maggiore di 60 kg. per cent. quad. Il che appunto si verifica tanto alla chiave, che all'imposta nelle sezioni superiormente considerate.

Dai risultati precedenti si potrebbe ricavare qual debba essere lo spessore alla chiave e la larghezza del giunto all'imposta affinchè il materiale non sopporti una pressione maggiore di $\frac{1}{10}$ di quella, sotto cui si schiaccerebbe. Così per la sezione lungo i parapetti, sapendo che la pressione alla chiave è di 676394 kg. per l'unità di lunghezza della volta, si avrà lo spessore x alla chiave dalla condizione seguente:

$$676394 < 60 . 100 . 100 x, \text{ d'onde : } x > 1^{m},13$$

Ma di leggeri si vede che, variando lo spessore alla chiave, varia il peso della mezza vôlta; e quindi starebbe la condizione espressa solo quando il peso della mezza volta continuasse ad essere quello calcolato collo spessore di m. 1,50 alla chiave.

Perciò lasciando indeterminato questo spessore nell'espressione del peso della mezza vôlta, si avrà la vera condizione da stabilirsi come segue:

$$246503 + 68613 . x < 60 . 100 . 100 . x$$

Da cui $$x > \frac{246503}{531387} \text{ ossia } x > 0^{m},46.$$

Dove però si suppose nota la lunghezza del giunto all'imposta. Fissando adunque la chiave con uno spessore al disopra

di m. 0, 46, sarà la pressione ivi sopportata minore del decimo di quella, sotto cui può resistere il materiale prima di schiacciarsi.

Con ragionamento analogo si potrebbe determinare il limite inferiore dello spessore alla chiave per la sezione fatta lungo i marciapiedi.

Ritornando ai calcoli precedenti, si osservi che le pressioni trovate per cent. quad. alla chiave ed all'imposta per le due sezioni longitudinali del ponte, che abbiamo considerate, sono vere nell'ipotesi, che la vôlta agisca in una delle due sezioni indipendentemente dall'altra; voglio dire nell'ipotesi, che la lunghezza della vôlta si voglia considerare separata in tre parti distinte, di cui due laterali corrispondono ai parapetti e la parte intermedia corrisponde alla via cui sostiene.

Ma in realtà la vôlta non agisce in questo modo, poichè è evidente che non può la vôlta premere più in un punto che in un altro del piano d'imposta come del giunto alla chiave senza che venga alterata la sua struttura, e che invece essa fa l'effetto di un corpo pesante sostenuto tra due piani egualmente inclinati, quali sono quelli delle imposte. In tal caso le formole precedenti servono ugualmente per avere la cercata pressione alla chiave e all'imposta, purchè in esse si ponga per Q il peso di tutta la mezza vôlta che diremo Q′, ed i valori che ne risulteranno per A ed R saranno quelli della totale pressione sopportata dai due corsi alla chiave ed all'imposta, e che chiameremo A′ ed R′. Il peso di tutta la mezza vôlta si avrà facilmente calcolando quello della parte, che corrisponde ai parapetti, ed aggiungendovi la porzione intermedia. Il volume di vôlta, che sostiene immediatamente i parapetti, si ha moltiplicando per 0, 80 (doppio dello spessore dei parapetti) la superficie della sezione fatta lungo i parapetti medesimi, la quale è 127, 89 metri quadrati. Sarà quindi il peso corrispondente eguale a:

$$0,80 . 127,89 . 2750 = 102,312 . 2750 \text{ kg.}$$

Il volume della porzione di vôlta compresa fra i parapetti si ha moltiplicando per 11, 90 (larghezza totale della via sul ponte compresi i marciapiedi) la superficie della sezione fatta lungo i marciapiedi, la quale è 102, 92 metri quadrati. Quindi pren-

dendo lo stesso peso specifico di sopra, il quale però per questa parte sarà maggiore del vero, si ha il peso corrispondente eguale a

$$11,90 \,.\, 102,92 \,.\, 2750 = 1224,748 \,.\, 2750 \text{ Kg.}$$

Il peso totale della mezza vôlta sarà dunque:

$$Q' = 2750 \left\{ 102,312 + 1224,748 \right\} = 3649415 \text{ Kg.}$$

Quindi si ha:

$$A' = \frac{Q'}{\text{tang}\,\varphi} = \frac{3649415}{\text{tang}\,(27°.28'.22'')} = 7018600 \text{ Kg.}$$

$$R' = \frac{Q'}{\text{sen}\,\varphi} = \frac{3649415}{\text{sen}\,(27°.28'.22'')} = 7910690 \text{ Kg.}$$

La superficie totale del giunto prossimo alla chiave essendo $1^m,50 \times 12^m,70 = 19^{mq}.,05$, la pressione alla chiave per cent. quad. è

$$\frac{7018600}{190500} = 36,84 \text{ Kg.}$$

E la superficie del piano d'imposta essendo $12^m,70 \,.\, 3^m,40 - 1^m,63 \,.\, 1^m,63 = 40^{mq}.,5231$, la pressione all'imposta per cent. quad. sarà:

$$\frac{7910690}{405231} = 19,52 \text{ Kg.}$$

(Il termine 1, 63 . 1, 63 rappresenta la parte di piano d'imposta che è esportata dalle strombature).

Finalmente ancora un calcolo si potrebbe instituire, ed è quello della pressione sostenuta dal primo concio presso l'imposta, nel quale è tagliata la strombatura nella supposizione però, che questo concio sostenga da solo il peso della vôlta che gli corrisponde. La quale ipotesi non è esattamente vera, ma si può immaginare, che, per l'elasticità del materiale, essa

possa verificarsi. La larghezza di questo concio è m. 2,31; perciò sarà di m. 2,31 la lunghezza della volta sostenuta. E siccome si deve pure tener conto del parapetto, così si avrà il peso di questa porzione di volta, secondo quanto si è detto sopra, composto di due parti nel modo seguente:

$$2750\left\{127{,}89.\ 0{,}40 + 102{,}92.\ 1{,}91\right\} = 2750.\ 247{,}7332$$

Quindi la pressione sul detto concio sarà:

$$\frac{2750.\ 247{,}7332}{\text{sen}\,(27°.28'.22'')} = 1476753 \text{ Kg.}$$

La faccia del concio, sulla quale si esercita questa pressione ha per superficie:

$$2{,}31.\ 2{,}95 - \frac{1{,}63 \times 1{,}63}{2} + 1{,}32.\ 0{,}90 = 6{,}674^{\text{mq.}}$$

Perciò questo concio sopporta secondo la suddetta ipotesi una pressione di 22,12 kg. per centimetro quadrato.

III.

DESCRIZIONE DELLE OPERAZIONI FATTE PER REGOLARE LA COSTRUZIONE DEL VOLTO DEL PONTE SULLA DORA; OSSERVAZIONI RACCOLTE DURANTE L'ESECUZIONE; DISARMAMENTO E RISULTAMENTO FINALE.

Stabilite, come abbiam veduto nel precedente capitolo, secondo le leggi della resistenza dei materiali, le principali dimensioni da darsi all'arco ed alle spalle, furono con tutta diligenza studiate le norme, che doveano dirigere l'esecuzione dell'opera, affinchè si conseguisse un felice esito colla più stretta economia di tempo e di danaro.

Per gettare sulle sponde le fondazioni delle spalle furono costrutte ture provvisorie di fronte al sito, su cui doveano sorgere le spalle; si prosciugò poi questo sito per mezzo di un canale scaricatore, e così si potè arrivare collo scavo a metri 2, 30 al disotto delle magre. A tale profondità, spianata la superficie del terreno, furono disposti, alla distanza di 1 metro da asse ad asse, pali di quercia del diametro di m. 0, 30 e della lunghezza da 9 a 12 metri, muniti di puntazza di ferro del peso di 8 kg., ed infissi verticalmente nel terreno; le loro teste vennero in seguito tagliate ad un medesimo livello.

Questi pali venivano piantati con battipali, la cui massa del peso variabile da 400 a 500 kg. veniva sollevata da squadre di 25 a 30 uomini; circa 200 uomini erano simultaneamente impiegati su ciascuna sponda. Terminato il piantamento dei pali per le spalle si passò a quelli, che doveano sostenere i muri

circolari d'ala ed i muri di prolungamento; e per questi si tralasciò la fondazione per uno spazio di metri 5 da coprirsi con un arco per economia di materiale.

Lungarine di quercia di m. 0,25 per m. 0, 30 in sezione furono fissate sulle teste dei pali, in direzione longitudinale e trasversale, riunite tra loro con caviglie di ferro, a metà legno nell'interno, e a coda di rondine, ma sempre a metà legno, sul perimetro delle fondazioni, per modo da formare un solido intelaramento.

Gli spazii lasciati fra esse lungarine furono riempiti con malta di calce e polvere di tegole ben cotte passata al setaccio in proporzioni eguali in peso, sì che questa massa sorse al livello delle teste dei pali, formando platea. Su questa si pose un primo corso formato di massi dell'altezza di m. 0, 50, a cui si sovrapposero altri 3 corsi simili con due riseghe. Vennero di poi collocati altri cinque corsi orizzontali ciascuno dell'altezza di m. 0, 60, formanti lateralmente le spalle, e la cui parte superiore costituiva il letto di posa o piano d'imposta dell'arco.

Infine altri sette corsi orizzontali furono aggiunti alle parti circolari delle spalle e rettangolari dei muri di prolungamento.

A questo punto i lavori furono sospesi e lasciati rassodare per una intera stagione, affinchè la muratura prendesse la necessaria consistenza per sostenere la spinta dell'arco a costruirsi.

E qui, è d'uopo, che a facile intelligenza dei metodi usati nella costruzione del volto, si espongano alcuni dati dell'esperienza, che a questi metodi furono base e servirono di norma per la formazione dell'armatura e per l'eseguimento del volto.

Dalle sperienze fatte da Boitard sul modo di comportarsi degli archi (V. BOITARD, *Expériences, et Mémoires de M.* LESAGE) si apprende che i volti nell'atto del disarmamento, ed anche dopo, subiscono un cedimento, di cui non si può prevedere l'entità: esso dipende dalla curva, che si è data al volto, dal numero e dall'apparecchio dei conci che lo compongono, dallo spessore fissato alle commessure, dal grado di precisione adoperato nell'eseguimento, dal modo, con cui si riempirono le commessure, e dal grado di disseccamento del cemento

impiegato. Ne consegue pertanto la necessità di assegnare all'armatura una saetta alquanto maggiore di quella fissata in progetto, cioè di rialzare il volto di quella quantità, di cui si suppone potersi desso abbassare nel disarmamento.

Non avendo dati precisi e norme certe per determinare tale rialzo, è forza attenersi ai dati dell'esperienza raccolti nella costruzione di edifizii della stessa specie.

I volti durante la loro costruzione fanno un movimento sui fianchi, cui si provvede sovente caricando l'armatura alla chiave. Si è osservato, che, nell'atto del disarmamento, le commessure presso l'imposta si restringono all'intrados e si dilatano all'estrados, e l'inverso ha luogo presso la chiave. Questo movimento fu sensibile al ponte di Némours (V. BOITARD *Expériences*), dove fu osservato, che dopo il disarmamento il primo concio presso l'imposta, era interamente staccato dal cuscinetto, e poggiava soltanto sopra una parte del piano di imposta. Questo vuoto fu in seguito riempito con cemento. La stessa osservazione si fece su altri ponti (V. PERRONET; *Ponti Neuilli, Mantes, ecc.*).

Questo movimento si accorda benissimo col principio enunciato nel precedente capitolo sul modo di agire delle masse dei ponti ad archi scemi. (V. fig. 1ª, tav. III).

Dietro queste osservazioni e questi dati d'esperienza si deduce la conseguenza, che, se nell'atto di eseguimento del volto si segue un ordine inverso per la formazione delle commessure, se cioè, invece di farle tutte di spessore uniforme a partire dall'imposta alla chiave, si fanno presso all'imposta maggiori all'intrados, ne consegue, che, dopo il disarmamento, le commessure si ridurranno ad essere di spessore uniforme o quasi. In generale la differenza nello spessore delle commessure fra l'intrados e l'extrados, deve seguire una progressione decrescente e regolare a partire dall'imposta alla chiave per l'intrados, e dalla chiave all'imposta per l'estrados. Perchè le commessure fra i conci del volto riescano di spessore uniforme è chiaro, che, nel disarmamento, tutti i conci devono subire un leggero movimento di articolazione tanto all'intrados che all'estrados; e perchè questo movimento sia regolare, e la curva del volto non si deformi, è necessario che il disarmamento

si faccia colle maggiori precauzioni possibili, e che l'armatura si stacchi dal volto in massa. Il modo da seguirsi nel disarmamento non è dunque indifferente; e pare preferibile quello per mezzo di cunei.

Il maggior sviluppo dell'arco rialzato, secondo il quale si prepara l'armatura e si eseguisce il volto, in confronto con quello dell'arco in progetto, cioè con quello, che deve risultare dopo il disarmamento, somministra il mezzo di determinare le due progressioni suddette nello spessore delle commessure; e ciò riesce più facile, se a questo maggiore sviluppo dell'arco rialzato si aggiunge ancora una certa lunghezza dell'arco vero in proporzione del numero dei conci, supponendo, che si lascino tra loro delle commessure di spessore uniforme, come si è fatto al ponte di Némours: in tal caso, e tuttavolta che il numero dei conci non è molto grande, è facile ottenere una regolare progressione a partire dall'imposta alla chiave e viceversa. Ma al ponte di Dora si tagliarono i conci secondo l'arco vero, senza aver riguardo allo spessore delle commessure, e supponendo, che, se fosse stato possibile di preparare un'armatura di forma invariabile, e secondo l'arco vero, si sarebbero collocati i conci a contatto; di modo che, per stabilire la serie delle commessure, restò disponibile soltanto la differenza fra lo sviluppo dell'arco vero e quello dell'arco rialzato; per tal motivo non si potè formare la progressione su tutta l'estensione del semi-arco, ma la si dovette limitare a pochi giunti tanto all'imposta, che alla chiave, come si vedrà in seguito.

Perciò ancora, e per l'esattezza, con cui i conci venivano tagliati, riusciva facile il prevedere, che l'abbassamento del volto dopo il disarmamento non dovea eccedere il limite fissato dalla saetta dell'arco vero, come effettivamente ebbe luogo; mentre, seguendo il sistema del ponte di Némours e d'altri, se cioè i conci si fossero tagliati alquanto più sottili per supporre una commessura tra di loro, il cedimento avrebbe potuto oltrepassare detto limite per la compressione stessa del cemento fra i conci.

Malgrado tutta l'esattezza, che si può adoperare nel taglio delle pietre, è certo che, sovrapposte le une alle altre, lasciano

piccoli vani, che scomparirebbero se le pietre fossero perfettamente levigate; al ponte di Dora si suppose, che il cemento liquido impiegato, dopo che il volto fu terminato, non servisse ad altro che a riempiere i detti vani inevitabili. Si sarebbe ottenuto lo stesso effetto nell'atto del disarmamento, collocando fra i conci una sottile lamina di piombo; ma questo ripiego avrebbe prodotto una spesa maggiore.

Stabilita la serie per le commessure all'intrados presso l'imposta, e all'estrados presso la chiave, restano a determinarsi i dati necessari per verificare la posizione d'ogni concio sulla armatura, in modo da ottenere le commessure suddette.

Vedremo in seguito come si sono determinate le coordinate dell'intrados del volto e le operazioni fatte per verificare la posizione d'ogni concio.

Pertanto allo scopo di determinare con grande accuratezza il taglio dei conci e la disposizione dei legnami costituenti la armatura del volto, e per facilitare il lavoro in tutti i suoi particolari, fu costrutta una platea di 450 metri quadrati, perfettamente piana ed orizzontale, sulla quale si disegnò al vero l'arco rialzato per determinare la serie degli spessori assegnati alle commessure; sulla stessa area si disegnò altresì l'armatura e si tagliarono tutti i legnami.

L'area era formata mediante un cemento di calce, sabbia e ghiaia disteso sopra un pavimento di ciottoli e lisciata colla maggior diligenza possibile, quindi coperta con tetto di paglia.

La figura 4ª, tav. III rappresenta il disegno fatto sull'area in grandezza naturale.

Sulle orme di Perronet e Boitard, fissato a centimetri 25 il rialzo da assegnarsi al volto nell'atto del suo eseguimento, ossia a metri 5,75 la saetta dell'arco rialzato, il suo raggio trovossi di m. 46,8967, ossia 46,897.

Lo sviluppo dell'arco rialzato risultò di .	metri	46,934
mentre lo sviluppo dell'arco vero, quello cioè del progetto, colla saetta di m. 5,50 era di . . .	»	46,772
Differenza fra lo sviluppo dei due archi . .	»	0,162
E per la metà del volto	»	0,081

I conci, essendo tagliati esattamente, secondo la curvatura dell'arco vero, restava disponibile soltanto la larghezza di metri 0,081 per le commessure da lasciarsi tra i conci nell'atto di eseguimento del volto sulla metà soltanto della sua ampiezza.

Quantunque piccola tale differenza, si sarebbe potuto tuttavia stabilire la progressione, ossia la serie dello spessore delle commessure dall'imposta fino al corso N° 15, o fino al N° 16; ma si pensò essere conveniente di limitarla al N° 10, onde facilitare il tracciamento.

La prima operazione era quella di tracciare sull'area l'arco rialzato, e non potevasi fare in altro modo che mediante le coordinate preventivamente calcolate; poichè altrimenti non sarebbe stata esatta la curva tracciata con moto continuo e con un raggio di m. 46,897.

Per calcolare le coordinate dell'arco rialzato si suppose prima di tutto tirato un raggio dal centro dell'arco rialzato alla sommità del cuscinetto fissata al quinto corso sopra l'imposta, ossia all'altezza di m. 2,923. (Questo raggio è segnato nella figura 4ª con linea punteggiata), e si suppose, che la la distribuzione dei conci cominciasse da questo raggio ; supponendo cosi una sola grande commessura all'imposta, il cui spessore dal calcolo fatto risultò di $0^{m},064$, eguale cioè all'elemento dell'arco rialzato compreso fra l'imposta ed il raggio suddetto.

Ora la differenza fra la metà dell'arco rialzato e la metà dell'arco vero, essendo di . . . . . m. 0,081

e la lunghezza dell'archetto suddetto di . . . . » 0,064

Si ha una differenza di . . . . . m. 0,017

Si trascurò questa differenza, e si calcolarono le ascisse e le ordinate dell'arco rialzato a partire dal raggio suddetto, e, supponendo diviso lo sviluppo dell'arco nello stesso numero di conci fissato in progetto, che doveano comporre il volto; si ottenne così una certa latitudine per tener conto delle imperfezioni inevitabili nelle operazioni grafiche: ora supponendo ripartita la differenza di m. 0,017 fra il numero dei conci, sic-

come lo sviluppo dell'arco rialzato non differiva sensibilmente dalla somma degli spessori dei conci ossia dall'arco vero (considerato però l'arco rialzato fra i limiti dati, ossia a partire dal raggio suddetto), egli è evidente, che i punti della curva dell'arco rialzato, così determinati, servirono già di un primo riparto dei conci, e così si rese più facile il tracciamento. Delineato sull'arca l'arco rialzato, e ritenuto, che la serie degli spessori delle commessure dei primi conci all'intradosso presso l'imposta, si limitava al corso N° 10, e trascurando la differenza di 0,017, di cui sopra si ripartì come segue lo spazio disponibile di 0,064 che nel calcolo delle coordinate dell'arco rialzato erasi supposto intieramente all'imposta.

Spessore della commessura:

All'imposta			0,009
Fra il corso	N° 1	ed il N° 2	0,008
Id.	2	3	0,008
Id.	3	4	0,007
Id.	4	5	0,007
Id.	5	6	0,006
Id.	6	7	0,005
Id.	7	8	0,005
Id.	8	9	0,004
Id.	9	10	0,003
Id.	10	11	0,002
		Totale	0,064

Il volto è composto di 93 corsi di conci, dei quali i due presso all'imposta hanno uno spessore all'intrados di m. 0, 6377 determinato dalla condizione, che il piano del giunto intercedente fra il primo ed il secondo corso dei conci presso l'imposta, piano che passa per l'asse dell'intrados, contenga il punto più basso dell'arco di fronte delle strombature. Gli altri 91 conci hanno tutti uno spessore uniforme di m. 0, 4999. Tutti i conci furono tagliati secondo sagome in legno preparate con tutta l'esattezza possibile e tagliate secondo l'arco vero. I tre primi conci

delle faccie sono tagliati secondo un apparecchio speciale collo scopo di ottenere vivo l'angolo rientrante fra la faccia del volto e la superficie cilindrica della spalla; ad un tale oggetto il piano d'imposta dei due primi conci è più basso di 0,20 di quello pei conci intermedii, come vedesi indicato sul disegno (fig. 4ª, tav, III).

Le stesse sagome, colle quali si regolò il taglio dei conci, servirono al tracciamento sull'area delle commessure secondo la serie sovra indicata, applicando sull'area le sagome in modo, che, essendo a contatto fra di loro nella parte superiore, rimanesse all'intrados lo spessore della commessura, come fu determinato a partire dall'imposta fino al corso N° 10. Successivamente, a partire dal corso N° 11, tenendo conto dei 17 millimetri, di cui sopra; doveasi lasciare fra i conci uno spazio di 0, 00047, quantità minima, che dovea perdersi nell'atto della posa. Se ne tenne conto però nel tracciamento sull'area e si fecero commessure parallele frapponendo alle sagome una piccola lamina di tale spessore.

Si continuò il tracciamento fino al corso N° 38 e si osservò che a questo modo procedendo ne risultava una curva particolare, che si scostava assai regolarmente dall'arco rialzato, e che si chiamò *curva di posa*.

Al corso N° 38 questa curva tagliava l'arco rialzato: si verificò lo spazio che rimaneva disponibile tanto all'intrados che all'estrados, e si riconobbe potersi cominciare la serie delle commessure all'estrados dal detto corso 38 alla chiave; e dopo varie prove si continuò a costrurre così graficamente il volto cercando la posizione da assegnarsi ad ogni concio e si formò la serie delle commessure all'estrados:

Al corso N°	38	Spessore	0,001
»	39	id.	0,002
»	40	id.	0,0025
»	41	id.	0,0025
»	42	id.	0,003
»	43	id.	0,0035
»	44	id.	0,0045
»	45	id.	0,005

Al corso N° 46 risultò una commessura di spessore uniforme tanto all'intrados che all'estrados di 0,005; e ciò perchè non si potè ripartire esattamente la lunghezza di m. 0, 017, di cui sopra, a partire dal corso N° 10.

Si credette conveniente di lasciare questa commessura, come risultò dal tracciamento, affine di avere il mezzo di correggere le anomalie, che potevano aver luogo nell'atto dello eseguimento. Si vedrà in seguito come nella esecuzione si dovette modificare la serie suddetta.

La *curva di posa* trovossi più bassa dell'arco rialzato a partire dall'imposta fino al corso 38, ed a partire da questo corso si rialzò insensibilmente sopra l'arco rialzato, di modo che alla chiave il rialzo risultò di un centimetro, e la saetta totale nella curva di posa di 5,76 invece di 5,75, come era stata fissata per l'arco rialzato.

Sulla tavola III, fig. 4ª è indicata in millimetri la distanza fra l'arco rialzato e la curva di posa per ogni giunto, giusta quanto si è rilevato sull'area.

La distribuzione delle commessure si fece pei conci delle fronti del volto, apparecchiati come si vede in disegno, ma internamente avendo i conci lunghezza minore di quella dei conci delle fronti, ne risultava, che non potevano i conci intermedii alle fronti essere collocati a contatto all'estrados; ma bensì anche all'estrados dovea fra di loro intercedere una commessura più o meno grande secondo la minore o maggiore lunghezza dei conci.

Per ottenere in esecuzione tale commessura in modo che il piano superiore d'ogni corso dei conci intermedii fosse esattamente d'accordo con quello delle faccie, si regolarono le commessure all'intrados collocando fra i conci dei cunei di ferro, per modo che ogni giunto presentasse un piano continuo dall'una all'altra fronte del volto: lo spessore delle commessure all'intrados era determinato da lamine di piombo aventi lo spessore indicato dalla serie. I cunei suddetti di ferro doveano essere solo provvisorii, e prima del disarmamento, e dopo che le commessure fra i conci sarebbero state riempite con cemento di calce e sabbia, e questo avrebbe fatto presa sufficiente, si sarebbero estratti per lasciare libero il movimento del volto;

mentre d'altra parte le lamine di piombo per la pressione, che avrebbe avuto luogo al momento del disarmamento, schiacciandosi, non avrebbero potuto in verun modo impedirlo.

Determinata in tal guisa la posizione di ogni concio sull'area si rilevarono le ascisse e le ordinate della curva di posa ad ogni commessura, ossia dei punti d'intersezione delle linee di giunto di ogni corso colla curva di posa, e quindi con un istromento apposito si rilevò l'angolo di ogni giunto colla verticale e si riportò sopra una tavoletta; notati così tutti questi angoli nella esecuzione del volto si verificava l'inclinazione di ogni corso, dopo aver prima verificate le coordinate.

Si sarebbe potuto, secondo le norme date nell'opera citata di Boitard, determinare analiticamente l'inclinazione d'ogni corso; ma è facile il convincersi, che, dopo avere graficamente determinata la posizione d'ogni corso, era meglio rilevare sull'area stessa non solo le ordinate e le ascisse della *curva di posa*, ma altresì l'inclinazione di ogni corso, perchè non conoscendo l'equazione della *curva di posa* non si potevano dedurre questi dati dal calcolo, mentre Boitard pel suo calcolo partì non dalla curva di posa ma dall'arco rialzato.

Nel quadro seguente sono indicate le coordinate dell'arco rialzato dedotte dal calcolo, le coordinate della *curva di posa* misurate sull'area, e le distanze espresse in millimetri fra l'arco rialzato e la *curva di posa*, come già sono indicate nel disegno:

N° d'ordine dei Corsi	Coordinate dell'arco rialzato		Coordinate dell'arco di posa		Distanza fra le due curve
	ascisse	ordinate	ascisse	ordinate	
	metri	metri	metri	metri	millimetri
1	0, 6189	0, 3335	0, 574	0, 295	2
2	1, 0627	0, 5645	1, 027	0, 527	6
3	1, 5089	0, 7907	1, 481	0, 755	10
4	1, 9575	1, 0121	1, 938	0, 974	16
5	2, 4084	1, 2287	2, 396	1, 189	21
6	2, 8616	1, 4405	2, 857	1, 401	26
7	3, 3170	1, 6475	3, 316	1, 610	28
8	3, 7747	1, 8496	3, 775	1, 815	28
9	4, 2345	2, 0468	4, 239	2, 015	25
10	4, 6963	2, 2391	4, 703	2, 210	25
11	5, 1602	2, 4282	5, 166	2, 397	25
12	5, 6260	2, 6105	5, 632	2, 579	25
13	6, 0938	2, 7879	6, 101	2, 758	25
14	6, 5634	2, 9603	6, 570	2, 931	24
15	7, 0348	3, 1277	7, 041	3, 099	24
16	7, 5081	3, 2901	7, 513	3, 261	24
17	7, 9830	3, 4474	7, 988	3, 419	23
18	8, 4595	3, 5996	8, 463	3, 572	23
19	8, 9377	3, 7468	8, 941	3, 718	23
20	9, 4174	3, 8888	9, 420	3, 862	22
21	9, 8986	4, 0257	9, 901	4, 000	20
22	10, 3812	4, 1575	10, 382	4, 132	20
23	10, 8652	4, 2841	10, 867	4, 262	20
24	11, 3506	4, 4056	11, 351	4, 384	19
25	11, 8372	4, 5219	11, 838	4, 502	19
26	12, 3246	4, 6330	12, 325	4, 612	18
27	12, 8140	4, 7389	12, 813	4, 720	17
28	13, 3040	4, 8395	13, 303	4, 823	17
29	13, 7952	4, 9358	13, 792	4, 919	15
30	14, 2873	5, 0260	14, 284	5, 011	14

N° d'ordine dei Corsi	Coordinate dell'arco rialzato		Coordinate dell'arco di posa		Distanze fra le due curve
	ascisse	ordinate	ascisse	ordinate	
	metri	metri	metri	metri	millimetri
31	14, 7803	5, 1109	14, 778	5, 095	14
32	15, 2743	5, 1905	15, 270	5, 177	13
33	15, 7690	5, 2649	15, 764	5, 252	12
34	16, 2645	5, 3340	16, 259	5, 324	9
35	16, 7607	5, 3978	16, 745	5, 388	9
36	17, 2576	5, 4563	17, 252	5, 450	7
37	17, 7551	5, 5095	17, 750	5, 504	5
38	18, 2531	5, 5575	18, 248	5, 557	0
39	18, 7516	5, 6001	18, 747	5, 602	2
40	19, 2505	5, 6374	19, 246	5, 642	4
41	19, 7498	5, 6693	19, 746	5, 675	5
42	20, 2495	5, 6960	20, 246	5, 703	6
43	20, 7493	5, 7173	20, 746	5, 725	7
44	21, 2494	5, 7333	21, 246	5, 741	8
45	21, 7496	5, 7440	21, 746	5, 754	9
46	22, 2499	5, 7493	22, 246	5, 759	10

Osservando il quadro precedente si scorge, che in generale le ascisse dell'arco rialzato poco differiscono in lunghezza da quelle della *curva di posa*, e che più notevole è la differenza nell'altezza delle ordinate, differenza questa, che si raccorda sensibilmente colle distanze misurate sull'area fra l'arco rialzato e la *curva di posa;* tenendo conto delle inesattezze degli strumenti si vede che si ottenne una sufficiente precisione. Le ascisse si riportarono in seguito sopra due solidi travicelli, che si collocarono sotto le faccie del volto in posizione orizzontale per servire a regolare la posa dei conci; e le ordinate si riportarono su quattro aste, che si collocarono verticalmente ai quattro angoli del volto, e servirono a regolare l'altezza di ogni corso a misura che si collocava.

Ecco come si determinarono graficamente tutti i dati necessarii a dirigere il collocamento dei conci del volto, partendo dal principio stabilito sul modo con cui hanno luogo i movimenti negli archi depressi, principio che già servito avea di base a fissare le condizioni dell'equilibrio stabile dell'arco.

La figura 4ª della tavola III fa vedere l'insieme di tutte queste operazioni eseguite in aprile 1828. Si cominciò il dì 8, e quando fu terminato il tracciamento pel volto, si disegnò con eguale precisione tutta l'armatura sull'area medesima; ed il 3 maggio questo disegno era pure compiuto.

Prima di descrivere le osservazioni raccolte durante l'eseguimento del volto, sarà conveniente dare un'idea dell'armatura e del modo usato nella posa dei conci.

Per la gran mole del volto e della stessa armatura, stabilita questa sul tipo di quelle di Perronet, la si rese fissa con appoggi sul mezzo (V. tav. II, fig. 4ª).

Essa era costituita da dieci cavalletti a tre corsi di puntoni p, p', p'' della sezione di m. 0,30 per m. 0, 35 legati fra di loro da staffe s formate da due travi gemelle.

Le travi orizzontali t servivano al collegamento dei dieci cavalletti.

I sei cavalletti più prossimi alle fronti del volto erano distanti fra loro di m. 1,175 da asse ad asse, avuto riguardo al maggior peso dei conci delle fronti; e gli spazi intercedenti fra i rimanenti quattro cavalletti intermedii erano di m. 1,44.

Sul mezzo dell'armatura erano i cavalletti sostenuti da tre ordini di pali legati fra di loro da travi orizzontali così da formare un solidissimo appoggio.

I puntoni laterali appoggiavano su cunei di frassino contro ritti verticali adossati alle due spalle, e le tre travi verticali doppie, che servivano d'appoggio ai cavalletti sul mezzo posavano altresì su cunei acciocchè si potesse eseguire il disarmamento in massa. Nell'unione fra i puntoni ed i ritti, come pure sul piano d'appoggio dei cunei, si collocò una lamina di ferro.

Si usò la maggior diligenza possibile nella preparazione dei legnami sull'area, dove tutti i cavalletti furono prima costrutti, per modo, che nel collocarli in opera non si dovette ritoccare alcuna parte componente l'armatura.

Le operazioni necessarie per porre a sito i differenti pezzi di un cavalletto erano agevolate per mezzo di curri di egual diametro, i quali, muovendosi sulla platea, sostenevano il legname ad una certa altezza dalla medesima. E appena ciascun pezzo veniva per tal modo esattamente preparato secondo le linee disegnate sulla platea era mandato al luogo destinato e fissato nella sua posizione; così, mentre venti legnaiuoli erano impiegati a preparare un cavalletto, venti altri lavoravano ad elevarne un altro con legnami già preparati, e che non richiedevano ulteriore lavorazione.

Per tal modo, in 45 giorni di lavoro si pose in opera l'intera armatura.

La riuscita dell'opera dipendeva essenzialmente dall'esattezza, che sarebbesi adoperata; e la mole e il peso dei conci e la loro forma nelle faccie esigevano molte precauzioni. Si studiò a tale oggetto un sistema di ponti di servizio, che potesse soddisfare a tutte le condizioni volute, cioè, esattezza, facilità e speditezza di esecuzione.

Un primo ponte generale, all'altezza dell'imposta dell'arco, servì di base pel collocamento dell'armatura. Due ponti laterali presso le due fronti del volto ed inclinati verso le spalle, collegati fra loro da due altri ponti tangenti sopra l'armatura servirono al collocamento dei conci dell'arco.

Tutta la struttura dei ponti di servizio era tale che riuscì affatto indipendente dall'armatura del volto, quantunque i legnami dei ponti di servizio l'attraversassero in ogni senso, dimodochè i movimenti, che l'armatura dovea subire nell'atto di eseguimento del volto erano affatto indipendenti da quelli dei ponti di servizio. Con questa precauzione essenziale si potevano fare i trasporti delle pietre sui ponti di servizio, senza pericolo che l'armatura potesse per essi subire alcuna deformazione.

L'armatura trovavasi caricata dei conci al momento soltanto in cui doveano esser collocati a sito; e ciò senza la menoma scossa, poichè si facevano discendere dai ponti di servizio sull'armatura mediante piani inclinati, finchè la pietra posava sul travetto destinato a riceverla, ed allora, mediante un apparecchio sovrastante munito di puleggie ed un moto rotatorio,

si sollevava la pietra dal piano inclinato, e così le si faceva prendere la sua posizione senza imprimere un menomo urto all'armatura, nè ai conci già in opera.

Questa disposizione dei ponti di servizio permetteva che si lavorasse dai due lati. Le pietre arrivavano presso le due spalle su carri tirati da buoi, e quindi venivano tratte sui ponti di servizio mediante argani collocati alle sommità di questi; con tal mezzo si collocarono tutti i corsi dal N° 4 alla chiave; chè, i tre primi corsi si calarono direttamente sull'armatura dalle spalle del ponte mediante un apparecchio particolare.

Non si adoperò alcun meccanismo speciale e complicato, ma soltanto argani, taglie, martinelli, corde e cunei. Con questi mezzi semplici ad un tempo e di poco valore, due soli posatori con qualche operaio sull'armatura e pochi uomini lavoranti agli argani erano capaci di collocare a sito in una sola giornata di lavoro circa 9 conci pesanti in media più di cinque tonnellate ciascuno; e per tal modo tutti i 651 conci componenti l'arco, e pesanti insieme circa 3250 tonnellate, vennero collocati in opera in 75 giorni di lavoro utile; nè vuolsi tacere che un terzo circa del numero totale dei conci pesava oltre ad 8 tonnellate ciascuno, ed i primi verso le imposte da 15 a 18.

Si noti ancora, che questi enormi massi si posero in opera senzachè la minima disgrazia accadesse agli operai o il minimo guasto ai massi stessi.

A misura che si eseguiva il volto, si demolivano i due ponti di servizio tangenti sopra l'armatura, e si trasportavano gli apparecchi superiori, ai quali erano fisse le taglie, colle quali si operava la posa definitiva dei conci. Nel giorno 12 agosto 1828 si fecero i preparativi pel collocamento del primo concio di testa a monte, sponda destra, e nel giorno successivo la posa ebbe luogo definitivamente con pieno successo; si collocò in seguito il concio a valle, e successivamente le altre pietre del 1° corso e quelle del 2° e 3° sullo stesso lato destro furono poste a sito. Ultimato il 3° corso a destra, si cominciò a sinistra, e dopo che da questo lato fu collocato il 3° corso (6 settembre), si prepararono gli apparecchi per con-

tinuare la posa da due lati ad un tempo: si cominciò la posa del 4° corso il dì 11 settembre.

A tutta prima il lavoro progrediva un po' lentamente, perchè i conci dei primi corsi, per la loro mole, presentavano qualche difficoltà e richiedevano molte precauzioni; gli operai non erano ancora avvezzi a tale lavoro, ed erano necessarie le massime cure a prevenire ogni infausto accidente. La maggior difficoltà stava nel collocamento dei conci delle faccie, i quali, avendo una piccola base, stante lo smusso della strombatura, tendevano sempre ad inclinarsi all'infuori; si sostenevano mediante puntelli, che posavano sul travetto inferiore e sotto il dente, che si era lasciato alle pietre per tale oggetto.

Fra i corsi si collocavano all'intrados le lamine di piombo aventi lo spessore della commessura fissato sul tracciamento; ed i conci intermedii (che si collocavano sempre dopo quelli delle faccie) si rialzavano all'intrados con sottili cunei di ferro finchè il loro piano superiore coincidesse perfettamente con quello dei conci di fronte. Nell'intervallo di tempo in cui la posa delle pietre era sospesa per la preparazione degli apparecchi sui ponti di servizio, si caricò l'armatura sul suo mezzo con un volume di pietre, da impiegarsi poi nei corsi presso la chiave, di m. c. 47,38 di un peso maggiore di 130000 kg.

Prima di riprendere la posa del 4° corso si verificò l'ordinata del 3°, e la si trovò più bassa di 5 millimetri a sinistra, e di un centimetro a destra; si pensò che ciò potesse provenire da un leggero movimento dell'armatura, e diffatti si trovò un lieve abbassamento alla staffa N° 4, ed un piccolo rialzo alla staffa Num. 6. Si decise di continuare il caricamento sopra l'armatura oltre le staffe verticali del castello di mezzo, e ciò obbligò a scoprire una parte dei ponti di servizio sopra l'armatura. Si aggiunse un volume di m. c. 36,78, il quale, col precedente forma il volume totale di m. c. 84,16. E siccome il rialzo dell'armatura alla staffa N° 6 non poteva aver luogo senza un abbassamento all'estremità del primo puntone *p*, si pensò di rendere più rigido il sistema mediante l'aggiunta di un appoggio all'estremità del primo puntone (fig. 4ª, tav. II). Il sostegno suddetto vi è segnato con tratteggio).

Nel giorno 11 settembre si rialzarono le pietre del 3° corso;

e ciò fu facilissimo mediante le taglie fisse agli apparecchi. Per regolare facilmente l'altezza d'ogni corso i travetti τ posavano sopra cunei, per mezzo dei quali si poteva facilmente determinare l'altezza conveniente pel corso a mettersi a sito, collocando una sagoma di legno sopra il piano del corso già in opera.

Nello stesso giorno si cominciò la posa del 4° corso da ambe le parti, cioè con due squadre, e così si continuò fino alla fine.

Malgrado tutta l'attenzione di tenere le ordinate alquanto più elevate, tuttavia si osservò in esse una tendenza ad abbassarsi, e ciò fino alle ordinate 16 e 17. Dopo il corso 27 al contrario vi era tendenza all'innalzamento.

Collocato il corso N° 8, si osservò un movimento nella commessura fra il corso N° 3 e il corso N° 4. Tutti i corsi dopo il N° 4 si abbassavano in massa: per giudicare di questo movimento, che ebbe luogo fino ai corsi 15 e 16, si tirarono alcune linee rette sulle quattro faccie del volto. L'armatura non dava segni sensibili di movimento; scorgevasi bensì una tendenza ad abbassarsi nella staffa N° 4 e ad elevarsi al N° 6; ma tale movimento non fu sensibile che al corso N° 21. Le saette del castello di mezzo non portavano interamente, ed i cunei del medesimo cedevano facilmente.

Il rialzo che ebbe luogo dell'armatura può valutarsi a due centimetri dopo ultimato il corso N° 21. Ma prima non avendo luogo tale rialzo, e, d'altronde, osservandosi l'abbassamento totale del volto a partire dal corso N° 3, si pensò che tale movimento fosse dovuto alla flessione dei primi puntoni: e difatti si osservò che i puntoni inferiori toccavano la steccaia costrutta nel letto del torrente, ciò che non avea luogo prima.

Forse tale movimento non avrebbe avuto luogo, se si fosse fatta fin da principio l'aggiunta dell'appoggio sotto l'articolazione all'estremità del primo puntone: mentre tale aggiunta non si potè terminare, che allorquando già collocavasi il corso N° 15. Le teste dei puntoni contro i ritti non combaciavano esattamente.

Dopo il corso N° 27 le ordinate si trovavano alquanto più elevate, le ascisse un po' deboli, e l'inclinazione dei conci al-

quanto maggiore della presunta. Ciò era dovuto allo spessore della piccola commessura che si era fatta nel tracciamento sull'area, a partire dal corso 1° al 38°, la quale si supponeva sarebbe poi scomparsa nell'atto della posa per le piccole imperfezioni inevitabili nelle operazioni. Questo risultato stesso prova con quale esattezza si procedeva. Si corresse tale differenza nelle ascisse, collocando fra i conci sottili lamine di piombo, in modo da ottenere delle commessure parallele; ma ciò non bastò a correggere l'inclinazione dei conci colla verticale.

L'armatura intanto andava rimettendosi nella sua posizione normale, a misura che la posa dei conci avanzava; e per meglio verificare tali minimi movimenti si collocarono varii scandagli sotto l'armatura all'estremità delle staffe.

Fatta la correzione sulle ascisse e sulle ordinate, restava ancora a correggersi la differenza osservata nell'inclinazione dei conci; ad un tal fine, rilevata esattamente la posizione del corso 36 e riportata sull'area, si modificò come segue la scala dello spessore delle commessure all'estrados, che dal tracciamento fatto sull'area dovea cominciare al corso N° 38, e che invece si fece partire al corso 36:

Al corso	36	—	Spessore delle commessure	0,001
»	37	—	» »	0,001
»	38	—	» »	0,002
»	39	—	» »	0,002
»	40	—	» »	0,003
»	41	—	» »	0,003
»	42	—	» »	0,004
»	43	—	» »	0,006
»	44	—	» »	0,007
»	45	—	» »	0,008
»	46	—	» »	0,010

ferma restando la condizione, che i conci si toccassero all'intrados. Per precauzione si era riservata la formazione di un letto ai conci della chiave; ma, verificata la distanza che rimase disponibile dopo aver collocate le due controchiavi, si

riconobbe con soddisfazione, che potevasi conservare lo stesso spessore all'intrados fissato dal calcolo come per gli altri corsi; ed ecco come tutte le anomalie incontrate nella posa, e di cui sopra dicemmo, si compensarono in fine. Per diminuire tuttavia lo spessore delle due commessure laterali alla chiave, si stimò opportuno di aumentare lo spessore delle pietre all'estrados di cinque millimetri.

Tutti i conci del volto si collocarono a secco, ed a misura che un corso era ultimato, si otturava la commessura all'estrados con stoppa. Collocato il corso N° 33 si ripulì con diligenza l'estrados del volto, e, tolta la stoppa, si lavarono le commessure mediante una pompa munita di appositi tubi di cuoio, che si fece agire prima di riempiere le commessure con cemento di calce e sabbia; e ciò affinchè le pietre, essendo ben pulite ed umide, il cemento potesse più facilmente scorrere in tutte le commessure, e riempiere esattamente tutti i vani: a misura che si lavavano le commessure si otturavano nuovamente, tanto all'estrados quanto all'intrados.

Collocato il corso N° 39, si cominciò a colare il cemento liquido nelle commessure, togliendovi prima la stoppa all'estrados; vedevasi come il cemento scorreva uniformemente per tutte le commessure e mettevasi di livello: a misura che il cemento prendeva consistenza, si ricaricava con nuovo cemento, finchè le commessure furono perfettamente riempite.

Nel giorno 8 novembre si collocò l'ultima pietra di mezzo nel corso della chiave, e si chiuse il volto con pieno successo, dopo sette mesi di lavoro, a partire dal giorno 8 aprile, in cui si cominciarono le operazioni sull'area pel tracciamento dell'arco. Nel giorno successivo si batterono le pietre della chiave e si terminò il riempimento delle commessure con cemento. Pochi giorni dopo (21 novembre) si allentarono i cunei sotto i travetti della chiave e delle due controchiavi, il che produsse un abbassamento di circa due centimetri nei tre corsi. Si allentarono per una seconda volta gli stessi cunei, e battendo con mazze di legno le pietre dei tre corsi, si ottenne un abbassamento totale di tre centimetri e mezzo circa.

Negli ultimi giorni di novembre si fecero i preparativi per il disarmamento. Si demolirono le steccaie in giro alle spalle;

si prepararono delle pedane per comunicare facilmente da una parte all'altra: si fissarono varii capi saldi e si segnarono sulle due fronti del volto cinque grandi linee (che vedonsi punteggiate nella fig. 4ª della tav. III) affine di riconoscere il menomo movimento dei conci, riferendoli a punti fissi di livello, vicino all'imposta dell'arco.

Oltre a queste precauzioni, si raschiò dai giunti dell'intrados e dell'estrados il cemento fino alla profondità di tre centimetri, per evitare nel cedimento dell'arco qualsiasi scheggiamento degli spigoli; questi vani furono di nuovo riempiti alla fine del lavoro.

Prima di cominciare il disarmamento si rilassarono tutte le chiavarde a vite dell'armatura, affinchè non fosse per nulla impedito ogni suo movimento, e si rimossero dall'armatura i sostegni ausiliari di cui sopra dicemmo.

Terminate queste operazioni, venti giorni circa dopo la chiusura dell'arco, si cominciò il rallentamento dell'armatura. Sotto i colpi delle mazze i 240 cunei che sopportavano i cavalletti, presero a scorrere uniformemente ed insensibilmente con moto quasi simultaneo per effetto del peso dell'arco e dell'armatura; questo movimento fu sospeso e ripetuto ad intervalli, finchè si riconobbe che avea toccato il suo termine il cedimento dell'arco, e che i cunei più non sopportavano che il peso della sola armatura. È da notarsi che, a misura che il disarmamento procedeva, non si sentì verun scroscio che indicasse qualche movimento parziale od anormale; e ciò è novella prova della diligenza usata nell'esecuzione.

Terminato il disarmamento, nel quale s'impiegarono cinque giorni, si abbassò del tutto l'armatura e si cominciò a scomporla.

Mediante i capi saldi collocati lungo le due faccie del volto si riconobbe come il cedimento avesse avuto luogo regolarmente dalla chiave all'imposta. Si misurarono le distanze, e si ebbero i seguenti risultati:

Al corso	45	— Cedimento	0,125
»	43	»	0,123
»	41	»	0,117
»	39	»	0,113
»	37	»	0,107
»	35	»	0,101
»	33	»	0,094
»	31	»	0,087
»	29	»	0,082
»	27	»	0,072
»	25	»	0,068
»	23	»	0,060
»	21	»	0,054
»	19	»	0,049
»	17	»	0,042
»	15	»	0,036
»	13	»	0,031
»	11	»	0,024
»	9	»	0,019
»	7	»	0,014

Nessuna rottura ebbe luogo nelle cinque grandi linee tracciate sulle faccie, cosicchè il cedimento fu il risultato di un movimento d'articolazione dei conci tra di loro senza il minimo spostamento sui giunti. A misura che il volto si abbassava, le commessure all'intrados presso l'imposta, e quelle all'estrados presso la chiave diminuivano di spessore, finchè si ottenne il parallelismo: si osservò però una tendenza ad aprirsi all'estrados presso l'imposta.

Questi risultati non potevano essere più soddisfacenti, come quelli che confermarono pienamente le prime previsioni.

Prima di fare i timpani e di collocare le cornici ed i parapetti, era d'uopo che il volto facesse tutto il cedimento possibile: perciò in gennaio e febbraio 1829 si caricò il volto di una massa di ciottoli di m. c. 1854,00 il cui peso, calcolato a 1500 kg. il m. c., dà un totale di kg. 2,781,000, peso assai superiore a quello dei timpani, cornici, parapetti, marciapiedi e selciato, e del sovraccarico massimo accidentale, che il volto

avrebbe in seguito dovuto sostenere. I ciottoli formavano un prisma regolare contenuto da un solido tavolato verticale che si era preparato sulle due faccie; il peso era maggiore presso la chiave che sui fianchi, come si vede dal profilo di esso prisma, segnato nella fig. 2ª, tav. II.

Si lasciò caricato il volto durante quattro mesi e più; poscia si impiegarono man mano i ciottoli nella muratura interna dei muri circolari, adoperando prima tutti quelli, che erano disposti sui fianchi del volto, senza toccare a quelli della chiave, dimodochè il volto venne a trovarsi così con tutto il suo carico sul mezzo e libero sui fianchi, ciò che dovea produrre il massimo cedimento e servire di tutta prova. Si trovò che l'aggiunta di questo carico di ciottoli avea prodotto un nuovo cedimento di 0,065, il quale, aggiunto a quello già ottenuto nel disarmamento di 0,125, forma il cedimento totale di 0,19. Il totale rialzo della *curva di posa*, essendo di 0,26, ne risultò un cedimento minore di 0,07 di quello che sarebbe stato necessario per passare dalla *curva di posa* all'arco vero progettato. La curva definitiva dell'arco vedesi rialzata di 0,07 sopra quella dell'arco vero calcolato in progetto nella fig. 5ª, tav. III, che rappresenta l'arco già preparato per ricevere i timpani.

Questo risultato dimostra con quanta esattezza si tagliarono i conci, e che effettivamente il cemento impiegato nelle commessure non dovea servire che a riempiere i piccoli vani che naturalmente lasciano le pietre tra di loro, quantunque lavorate con tutta la diligenza possibile. Egli è certo che se si fosse anche d'una minima quantità diminuita la grossezza dei conci o aumentato lo spessore delle commessure, il cedimento sarebbe stato maggiore.

Si osservò, che delle cinque linee tracciate sulle fronti del volto, dopo il totale cedimento, quella orizzontale fra i conci 36 a destra e 36 a sinistra aveva acquistata una saetta di 0,03, senza però la menoma rottura o discontinuità nei giunti. L'arco conservò la sua perfetta curvatura, nè fu osservata in alcuna sua parte la minima deformazione.

Potendosi allora considerare l'arco come solidamente stabilito ed in condizioni favorevoli alla continuazione dei lavori, si procedette alla collocazione dei corsi orizzontali di collega-

mento dell'estrados dei conci con quelli che terminano le spalle.

Terminate queste operazioni, si verificò che il lato superiore dell'ultimo corso delle fronti del ponte era perfettamente a livello coll'estrados della chiave per tutta la lunghezza dei ponti ed accessi.

Collocate poi le pietre della cornice, si coprì l'intera superficie dell'arco e delle spalle con uno strato di cemento bituminoso dello spessore di 15 centimetri, ben battuto finchè divenne affatto duro; sovra di esso ne fu disteso un secondo di 7 centimetri misto con ghiaia fina e leggermente battuto; con ogni cura si evitò nei due strati la menoma discontinuità. Per mezzo di questa cappa la filtrazione delle acque fu completamente impedita. Terminata questa operazione si riempì lo spazio fino a livello della carreggiata con strati regolari di terra, e, quando il tutto fu bene assettato e ridotto alla forma prescritta, si collocarono i lastroni dei marciapiedi con lieve pendenza verso il mezzo della strada e difesi dai veicoli da piccoli paracarri di pietra. Si eseguì poi il selciato sopra uno strato di sabbia e ghiaia dello spessore medio di 15 centimetri, e lo si coprì con uno strato di sabbia di 5 centimetri.

Giova osservare, che per la cornice ed il parapetto impiegaronsi pietre della lunghezza non minore di m. 2,50, e alcune di quelle adoperate pel parapetto delle spalle misurano da 11 a 12 metri di lunghezza.

Quando ogni cosa fu così ultimata, si corressero i minimi difetti, e tutte le parti dell'opera furono diligentemente ripulite; si raschiò il cemento da ciascuna fronte e dalle parti viste fino alla profondità di 3 centimetri, e si lavarono le fessure con acqua di calce. Quindi nuovamente si riempirono con cemento appositamente preparato composto per un terzo di polvere fina di marmo, un terzo di polvere della stessa pietra usata nella costruzione, ed un terzo di calce con piccolissima quantità di scorie di ferro. Cementati appena i giunti fregando con punte di ferro sul cemento, gli si fece assumere una considerevole durezza.

Nel chiudere la descrizione di quest'opera, accennerò come tutti i conci costituenti l'arco, tutte le pietre delle parti viste,

delle cornici, delle fascie, dei marciapiedi e dei parapetti sono di gneiss del Malanaggio presso Pinerolo; le faccie viste furono lavorate a grana fina, e i conci intermedii dell'arco furono lavorati con egual finitezza per tre faccie. Furono pure adoperate, ma in piccol numero, pietre provenienti dalla cava di Cumiana, ma solo internamente nelle fondazioni e nelle spalle; e ciò perchè il granito di Cumiana, più duro forse di quello del Malanaggio, è più facile a sgretolarsi, e contenendo molte particelle di ferro è soggetto a macchie che deturpano il bell'aspetto dell'opera (come si può osservare nel ponte sul Po, a Torino).

Quest'opera, incominciata nel 1823, non potè essere ultimata che nel 1830, perchè più volte e con varii avvicendamenti interrotta, poi nuovamente ripresa.

Così, fin dal principio, non essendosi potuto per mancanza di fondi fare le necessarie preventive esplorazioni per conoscere a dovere la natura del suolo su cui dovea sorgere il nuovo ponte, cominciati i piantamenti, non si trovò il terreno resistente che a considerevole profondità; laonde fu necessario procedere in gran parte dell'area a tre palafitte sovrapposte; il che, se accresceva il costo dell'opera, non menomava punto la certezza di sua riuscita; fu questa la sola cosa che non fosse stata preveduta prima della costruzione.

Il lavoro fu abbandonato dall'appaltatore tre anni dopo il suo cominciamento; e dopo qualche intervallo fu ripreso ad economia dal Governo, colla direzione dell'autore e del suo fratello ingegnere Giuseppe, e fu condotto a termine con esito soddisfacente, essendo costato il ponte, compresi gli accessi, L. 1,348,552, 39.

Or dopo 43 anni, dacchè si è aperto il libero passaggio sul ponte, fino a questo giorno non accadde il menomo cedimento in alcuna sua parte, sia delle spalle che dell'arco; sicchè, meglio che qualunque altra prova, sta il fatto a dimostrare che, riguardo alla statica, erano ben lungi dall'essere lese le sue leggi, e riguardo alla costruzione di un arco di sì gran mole, tutte se ne prevedevano le difficoltà, e tutte si seppero con felice esito superare.

IV.

VERIFICAZIONE DELLA STABILITÀ DELL'ARCO DEL PONTE SULLA DORA

Vedemmo nel capitolo II qual fosse la teoria da cui prese le mosse l'autore del ponte di Dora per assegnare al ponte dimensioni tali, che riuscisse assicurata la stabilità dell'opera sua.

E che egli abbia veramente conseguito questo scopo, il vedremo pure in quest'ultimo capitolo, in cui, prendendo ad esame per altra via la stessa quistione, faremo la verificazione della stabilità dell'arcata; dell'arcata solamente, poichè, quanto alle spalle, io credo, che il metodo esposto nel capitolo II per determinarne la grossezza sia valido a persuaderci della loro stabilità.

Premetto che la stabilità di un arco deve sussistere, sia per rispetto allo schiacciamento per pressione, che per rispetto allo scorrimento. Considererò la stabilità sotto i due aspetti nel farne la verificazione.

Operazioni preliminari

Considero una sezione longitudinale dell'arcata come quella rappresentata nella figura 2ª, tavola II. Per semplificare il calcolo, alla superficie d'estradosso reale sostituisco una

superficie regolare cilindrica, passante per gli spigol rientranti della superficie esistente (V. tav. IV, figura 1ª). Divido l'arco d'intrados H B in tal numero di parti che ciascuno degli archi minori b_1b_2, b_2b_3 .... non si scosti molto dalla sua corda. Considerando i giunti esistenti nell'arcata, le parti, in cui fu diviso l'arco H B, comprendono ciascuna 4 conci, se si eccettua quella della chiave che ne comprende due e mezzo. Queste parti sono eguali tra di loro, tranne quella presso l'imposta e quella alla chiave, poichè i conci sono tutti di eguale spessore, tranne il primo all'imposta, e perchè non si potè dividere l'arco in un numero tale di parti, che tutte comprendessero un eguale numero di conci.

Pei varii punti b_1, b_2, b_3, ... di divisione dell'arco H B conduco le rette $b_1 c_1$, $b_2 c_2$, $b_3 c_3$ .... normali alla curva d'intradosso, rette che rappresentano i giunti e sono limitate dalla curva C I, che segna la superficie d'estradosso. Conduco poi le verticali passanti pei punti c_1, c_2, c_3 ....

Cerco i pesi, che gravitano sopra una parte d'arcata compresa fra due sezioni longitudinali, distanti fra loro dell'unità di lunghezza. Essi sono: il peso proprio dell'arcata, il peso della muratura di riempimento, che sta sopra i fianchi dell'arco, il peso del suolo stradale, il peso dei parapetti ed il sovraccarico. Per questi pesi assumo i seguenti valori:

Peso di 1 m. c. di muratura in pietra da taglio dell'arcata	Kg.	2750
Peso di 1 m. c. della muratura di riempimento in pietra greggia	»	2300
Peso di 1 m. c. di suolo stradale, comprendendo in esso il peso dei marciapiedi, supposto uniformemente distribuito per tutta la superficie del ponte.	»	1600
Peso dei parapetti al m. c.	»	2750
Sovracarico per m. q.	»	600

Riduco questi varii pesi alla stessa muratura dell'arco, cioè cerco quale sarebbe quel masso murale in pietra da taglio, che produrrebbe sull'arcata il medesimo effetto che vien pro-

dotto realmente dai diversi pesi sovra accennati. Ciò eseguendo pei varii giunti considerati, ottengo la linea $\mu\nu$, che limita l'altezza del riempimento, la $\rho\sigma$ che limita l'altezza del suolo stradale, e finalmente la E L, la quale, rappresentando le altezze sul suolo stradale del sovraccarico e dei parapetti (supposto il peso di questi uniformemente diffuso sul ponte), limita il masso murale totale che gravita sull'arco.

Colle linee di giunto $b_1 c_1$, $b_2 c_2$, $b_3 c_3$, ... e colle verticali $c_1 n_1$, $c_2 n_2$, $c_3 n_3$, ... ho scomposta la parte di volta I H B C e la parte di masso I L E C in tanti quadrilateri, che posso supporre con sufficiente approssimazione chiusi da lati rettilinei.

Trovo le superficie s_1, s_2, s_3, ... dei quadrilateri, in cui fu scomposta la parte di volta I H B C; e quelle dei trapezii costituenti in complesso l'area di carico I C E L, le quali dico σ_1, σ_2, σ_3. . . . .

Determino i centri di gravità g_1, g_2, g_3, ... γ_1, γ_2, γ_3, ... delle figure s_1, s_2, s_3, ... e delle σ_1 σ_2 σ_3, ... e misuro le loro distanze dalla verticale E V passante per la chiave. Sieno esse rispettivamente d_1, d_2, d_3, ... e δ_1, δ_2, δ_3, ...

Trovo poi le distanze D_1, D_2, D_3, ... dalla stessa E V delle verticali sulle quali si trovano i centri di gravità delle figure:

$$BEn_1 c_1 b_1 = s_1 + \sigma_1 = S_1$$

$$BEn_2 c_2 b_2 = s_1 + \sigma_1 + s_2 + \sigma_2 = S_2$$

$$BEn_3 c_3 b_3 = s_1 + \sigma_1 + s_2 + \sigma_2 + s_3 + \sigma_3 = S_3 \text{ ecc.}$$

Queste distanze saranno espresse da:

$$D_1 = \frac{s_1 d_1 + \sigma_1 \delta_1}{S_1}$$

$$D_2 = \frac{S_1 D_1 + s_2 d_2 + \sigma_2 \delta_2}{S_2}$$

$$D_3 = \frac{S_2 D_2 + s_3 d_3 + \sigma_3 \delta_3}{S_3}, \text{ ecc.}$$

Avute queste distanze, segno in figura le verticali suddette; siano la 1.1, la 2.2, la 3.3, ... corrispondenti rispettivamente ai giunti b_1c_1, b_2c_2, b_3c_3. ....

Tutte le aree considerate sono le basi di tanti prismi in pietra da taglio aventi per altezza l'unità: perciò i pesi, che gravitano sull'arcata, saranno: $S_1 \times 2750$ corrispondente al giunto b_1c_1, $S_2 \times 2750$ corrispondente al giunto b_2c_2, $S_3 \times 2750$ corrispondente al giunto b_3c_3, ecc.

I risultati di queste operazioni preliminari sono raccolti nel quadro seguente:

N° d'ordine dei giunti a partire dalla chiave	Angoli dei giunti colla verticale	Elementi lineari pel calcolo delle				Aree		Distanze		Momenti		Aree S	Distanze D	Pesi corrispondenti alle aree S
		Aree s		Aree σ		s	σ	d	δ	sd	$\sigma\delta$			
		Basi	Metà altezze	Basi	Metà altezze									
		metri	metri	metri	metri	m. q.	m. q.	metri	metri			m. q.	metri	chilog.
1	1°. 28′. 5″	1,95	0,97	1,37	0,45	1,89	0,61	0,62	0,65	1,17	0,39	2,50	0,63	6880
2	3°. 49′. 3″	2,50	1,20	2,10	0,50	3,00	1,05	2,30	2,32	6.90	2,43	6,55	1,66	18000
3	6°. 10′. 0″	2,50	1,20	2,12	0,61	3,00	1,29	4,37	4,42	13,11	5,70	10,84	2,73	29900
4	8°. 30′. 58″	2,52	1,20	2,15	0,77	3,02	1,65	6,35	6,45	19,20	10,64	15,51	3,84	42600
5	10°. 51′. 56″	2,52	1,22	2,20	0,95	3,07	2,09	8,35	8,50	25,60	17,76	20,67	5,00	56700
6	13°. 12′. 53″	2,55	1,27	2,30	1,13	3,24	2,59	10,37	10,55	33,50	27,32	26,50	6,20	72900
7	15°. 33′. 51″	2,62	1,30	2,40	1,33	3,40	3,19	12,37	12.57	42,20	40,09	33,09	7,42	91000
8	17°. 54′. 48″	2,65	1,31	2,57	1,52	3,47	3,90	14,32	14,60	49,60	56,94	40,46	8,70	111000
9	20°. 15′. 46″	2,67	1,32	2,90	1,67	3,53	4,84	16,25	16,57	57,20	80,19	48,83	10,00	134000
10	22°. 36′. 43″	2,70	1,35	3,27	1,82	3,65	5,95	18,20	18,52	66,50	110,19	58,43	11,40	160000
11	24°. 57′. 41″	2,72	1,40	3,75	1,90	3,80	7,12	20,10	20,50	76,10	145,96	69,35	12,80	191000
12	27°. 28′. 22″	2,92	1,47	4,27	2,00	4,30	8,54	22,00	22,45	94,50	191,72	82,19	14,25	226000

Determinazione della spinta orizzontale e costruzione della curva delle pressioni

Sia H I il giunto d'imposta: per la piccola apertura dell'angolo, che esso fa colla verticale, riterremo che esso sia pure il giunto di rottura. Sia la V′ V′ la verticale corrispondente ad esso giunto, cioè la verticale, su cui trovasi il centro di gravità della intera figura B E L I H. Supporremo, che il punto di applicazione della spinta orizzontale sia in M alla metà di B C spessore dell'arco alla chiave, e che il punto di applicazione della pressione all'imposta sia in N, alla distanza dall'intrados di un terzo del giunto d'imposta H I. Di queste ipotesi la prima è molto prossima al vero, come si può analiticamente dimostrare, e la seconda è favorevole alla stabilità come quella che suppone, che la pressione al giunto di imposta sia zero all'estrados.

Per M conduco una orizzontale M O; ed a partire dal punto U d'intersezione della M O colla V′ V′ porto U P_{12} verticale all'ingiù, che nella scala assunta per le forze ci rappresenti 226000 kg. peso corrispondente al giunto H I, cioè peso dell'intero masso H B E L I. Avendo già fissato il punto N di applicazione della pressione all'imposta, tiro U N, e per P_{12} una orizzontale P_{12} R_{12}, la quale in R_{12} interseca la U N. Questa U N ci dà in intensità e direzione la pressione sul giunto H I. Infatti la pressione su di un giunto qualunque è la risultante del peso, che si trova tra il giunto stesso e la chiave, e della spinta orizzontale; ora la direzione della pressione sul giunto H I è data dalla U N; la direzione della spinta orizzontale è pur nota; quindi costruendo il triangolo rettangolo U R_{12} P_{12}, nel quale conosco la direzione dei tre lati ed il valore di uno di essi, ottengo il valore degli altri due U R_{12} e P_{12} R_{12}, che rappresentano rispettivamente la pressione sul giunto H I, e la spinta orizzontale. Questa, misurata sulla scala delle forze, risulta eguale a 339500 kg. (1).

---

(1) Nel capitolo II si è trovato un valore della spinta orizzontale diverso da quello ora trovato. Questa apparente discordanza ha la sua ragione in

A partire dai punti $u_1, u_2, u_3, \ldots$ in cui la orizzontale condotta per M incontra le verticali corrispondenti ai varii giunti, porto sulle stesse verticali i pesi $\overline{u_1 P_1} = P_1, \overline{u_2 P_2} = P_2, \overline{u_3 P_3} = P_3, \ldots$ e pei punti $P_1, P_2, P_3 \ldots$ conduco delle orizzontali; su queste porto una lunghezza rappresentante la spinta orizzontale $P_1 R_1 = P_2 R_2 = \ldots = P_{12} R_{12}$. Conduco le rette $n_1 R_1, n_2 R_2, n_3 R_3 \ldots$ I punti, in cui esse intersecano i giunti corrispondenti, determinano una curva detta *curva delle pressioni*, che è luogo geometrico dei punti d'applicazione della pressione pei singoli giunti.

Già fin d'ora si scorgono le buone condizioni dell'arcata dalla sola ispezione della figura; poichè la curva delle pressioni, non arrivando mai in alcun giunto (tranne che nel giunto d'imposta) dalla curva d'intradosso o da quella d'estradosso ad una distanza, che sia eguale ad un terzo della lunghezza del giunto stesso, anzi distando ad ogni suo punto dall'una delle due curve di una quantità non troppo diversa da quella, che segna la sua distanza dall'altra, ogni giunto è premuto in ogni elemento di sua superficie.

Verificazione della stabilità della volta per rispetto alla resistenza allo scorrimento

Considerando un giunto qualunque troviamo, che esso è sollecitato dalla spinta orizzontale Q, e dal peso P del masso murale, che sta superiormente adossato al giunto medesimo; ora, come già si disse, componendo queste due forze si ha la pressione sul giunto. Scompongo tale pressione in due, di cui l'una, che dirò N, normale al giunto, l'altra T contenuta nel piano

---

ciò, che nella teoria esposta nel capitolo II si suppose, per favorire la stabilità, che tutto ciò, che gravita sopra l'arco, avesse lo stesso peso specifico della muratura componente l'arco stesso, laddove nella operazione, che or facciamo di verificazione si assegnò a quanto sta sopra l'arco il proprio peso specifico, assai minore di quello della pietra da taglio. Ciò sia pure valevole a spiegare la differenza che si trova nei valori ottenuti nei due calcoli pel peso della mezza volta.

del giunto medesimo. Questa scomposizione si può fare analiticamente colle due formole

$$T = P \cos \alpha - Q \operatorname{sen} \alpha$$
$$N = P \operatorname{sen} \alpha + Q \cos \alpha$$

in cui α è l'inclinazione del giunto alla verticale; oppure graficamente nel modo seguente.

Preso un punto qualunque G, conduco per esso una orizzontale GO ed una verticale GU (tav. IV, fig. 2ª); sulla orizzontale porto GQ valore della spinta orizzontale, e sulla verticale porto i pesi $P_1, P_2, P_3 \ldots$ a partire per ciascuno dal punto G. Pel punto Q conduco una verticale, e pei varii punti $P_1, P_2, P_3 \ldots$ altrettante orizzontali, le quali intersecheranno nei punti $R_1, R_2, R_3 \ldots$ la verticale condotta per Q.

Da quanto sopra riesce evidente, che le rette GR_1, GR_2, $GR_3 \ldots$ rappresentano rispettivamente le pressioni sui giunti b_1c_1, b_2c_2, $b_3c_3, \ldots$ Ora per G tiro le rette GN_1, GN_2, $GN_3, \ldots$ che facciano colla orizzontale GQ gli stessi angoli α_1, α_2, $\alpha_3, \ldots$ dei varii giunti colla verticale, e su queste rette dai punti R_1, R_2, R_3 abbasso le perpendicolari R_1T_1, R_2T_2, $R_3T_3 \ldots$

Egli è chiaro che la retta R_1T_1 rappresenterà la componente tangenziale, e la GT, la componente normale al primo giunto della pressione GR_1, che esso sopporta.

Così operando per gli altri giunti si avranno tutte le componenti normali N e tangenziali T della pressione; componenti, che ci sono necessarie per istituire i calcoli che seguono.

Ciò premesso si osservi, che in un giunto qualunque la componente tangenziale T della pressione è quella forza, che tende a produrre lo scorrimento; ma ad essa si oppone l'attrito, che si sviluppa in virtù della componente normale N.

Perchè adunque vi sia stabilità per rispetto allo scorrimento, è necessario che per tutti i giunti sia verificata l'eguaglianza:

$$T = n^{IV} f N$$

in cui il coefficiente di stabilità n^{IV} deve risultare minore di $^4/_5$. Nel nostro caso, assumendo $f = 0{,}65$ e risolvendo l'equazione testè stabilita pei singoli giunti si ebbero i seguenti risultati:

Numero d'ordine dei giunti	Angoli dei giunti colla verticale α	Componenti delle pressioni		Valori dell'attrito fN	Coefficienti di stabilità n^{IV}
		Normali N	Tangenziali T		
		chilog.	chilog.	chilog.	
1	1°. 28′. 5″	340000	1500	221000	1/147,3
2	3°. 49′. 3″	340500	4400	221325	1/50,3
3	6°. 10′. 0″	341400	6100	221910	1/36,3
4	8°. 30′. 58″	342800	8000	222820	1/27,8
5	10°. 51′. 56″	344800	8200	224120	1/27,3
6	13°. 12.′ 53″	347500	6700	225870	1/33,7
7	15°. 33′. 51″	352000	2900	228800	1/78,8
8	17°. 54′. 48″	358000	2300	232700	1/101,1
9	20°. 15′. 46″	366000	9200	237900	1/25,8
10	22°. 36′. 43″	376000	19200	244400	1/12,7
11	24°. 57′. 41″	389000	31800	252850	1/7,9
12	27°. 28′. 22″	406000	46000	263900	1/5,7

Dai valori del coefficiente di stabilità n^{IV} notati in questo quadro si può argomentare, che l'arco è più che stabile per quanto riguarda la resistenza allo scorrimento.

Verificazione della stabilità per rispetto allo schiacciamento per pressione.

Per ciascun giunto è nota la distanza c del punto d'applicazione della pressione dall'intrados, ed è pur noto il valore della pressione N normale al giunto.

La pressione riferita all'unità di superficie varia generalmente dall'intrados all'estrados. Diciamo K_i e K_e le pressioni riferite all'unità di superficie rispettivamente all'intrados e all'estrados. Allora colle formole:

$$K_i = 2\left(2-3\frac{c}{a}\right)\frac{N}{a} \qquad K_e = 2\left(-1+3\frac{c}{a}\right)\frac{N}{a}$$

in cui a rappresenta la lunghezza dei giunti, si potrà calcolare K_i e K_e per ogni giunto.

Or affinchè l'arco sia stabile per rispetto alla resistenza allo schiacciamento, è necessario, che sieno soddisfatte per ogni giunto le relazioni:

$$K_i = n''_i R'' \qquad K_e = n''_e R''$$

nelle quali espressioni devono essere n''_i e n''_e, coefficienti di stabilità per la pressione all'intrados ed all'estrados, minore di $^1/_{10}$ ed R'' esprime il coefficiente di rottura per pressione del materiale adoperato, e che noi assumeremo eguale a 4 kg. per mm. q. Con queste formole possiamo compilare facilmente il quadro seguente:

Numero d'ordine dei giunti	Lunghezza dei giunti a	Distanza dall'intrados del punto di applicazione della pressione c	Componente normale della pressione N	Pressione normale		Coefficienti di stabilità	
				all'intrados K_i	all'estrados K_e	all'intrados n''_i	all'estrados n''_e
	metri	metri	chilog.	chilog.	chilog.		
1	1,50	0,730	340000	245705	207625	$^1/_{16,2}$	$^1/_{19,2}$
2	1,50	0,750	340500	227000	227000	$^1/_{17,5}$	$^1/_{17,5}$
3	1,50	0,790	341400	192094	253105	$^1/_{20,8}$	$^1/_{15,8}$
4	1,50	0,835	342800	154488	304220	$^1/_{25,8}$	$^1/_{13,1}$
5	1,55	0,900	344800	115674	329227	$^1/_{34,5}$	$^1/_{12,7}$
6	1,65	0,950	347500	113727	305378	$^1/_{35,1}$	$^1/_{13,0}$
7	1,70	0,975	352000	120507	297735	$^1/_{33,1}$	$^1/_{13,7}$
8	1,70	0,985	358000	110769	310406	$^1/_{36,1}$	$^1/_{12,8}$
9	1,75	0,985	366000	131341	286942	$^1/_{30,4}$	$^1/_{13,9}$
10	1,80	0,940	376000	181314	236461	$^1/_{22,0}$	$^1/_{16,9}$
11	1,95	0,810	389000	301225	97748	$^1/_{13,2}$	$^1/_{40,9}$
12	2,05	0,680	406000	396096	0	$^1/_{10,9}$	$^1/_{\infty}$

E da questo quadro possiamo conchiudere, che anche per rispetto alla resistenza allo schiacciamento l'arcata trovasi in buone condizioni di stabilità (1).

C. Mosca.

---

(1) Come si è veduto nel capitolo secondo, l'Autore del ponte prese per coefficiente di rottura per pressione 6 kg. per metro quadrato: e ciò egli fece pensando allo scopo solo accessorio da raggiungersi col cemento impiegato fra i conci; mentre in quest'ultimo capitolo fu ridotto tale coefficiente a 4 kg. per metro quadrato. Così facendo dietro le norme dei più moderni costruttori, si trovò ancora più che assicurata la stabilità dell'opera.

PONTE SULLA DORA RIPARIA

PIANTA

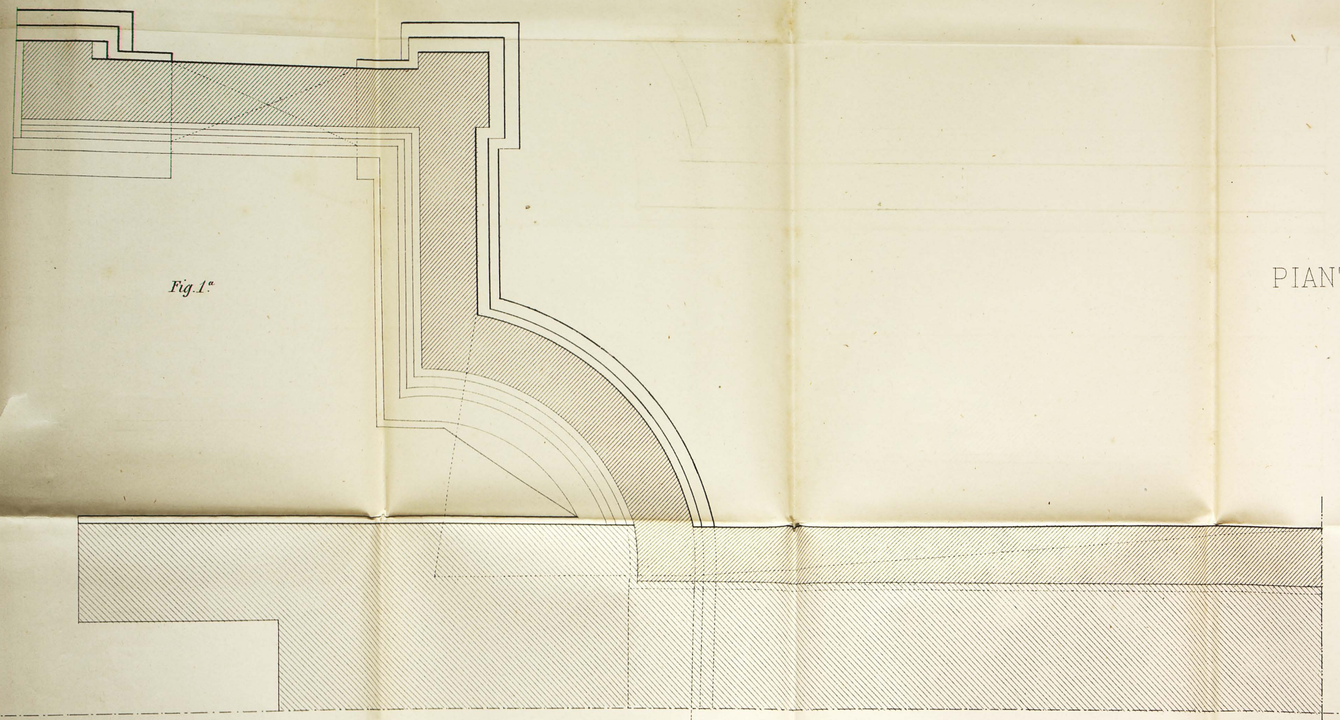


Fig. 1ª

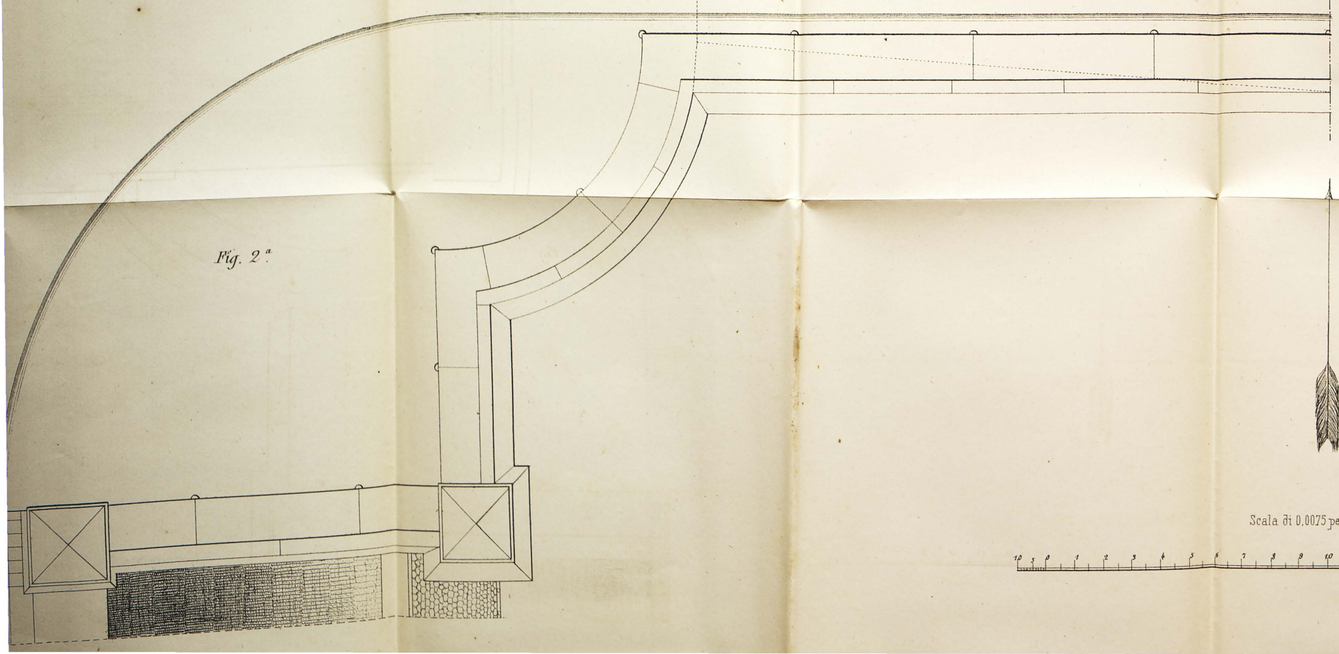


Fig. 2ª

Fig. 1ª Sezione orizzontale in cui sono indicate le grossezze dei muri ad altezze diverse a partire dall'intelaramento fino al piano del marciapiede.
Fig. 2ª Pianta ad opera finita.
„ 3ª Pianta della palificata.
„ 4ª Pianta dell'intelaramento sopra la palificata.

Scala di 0,0075 per metro

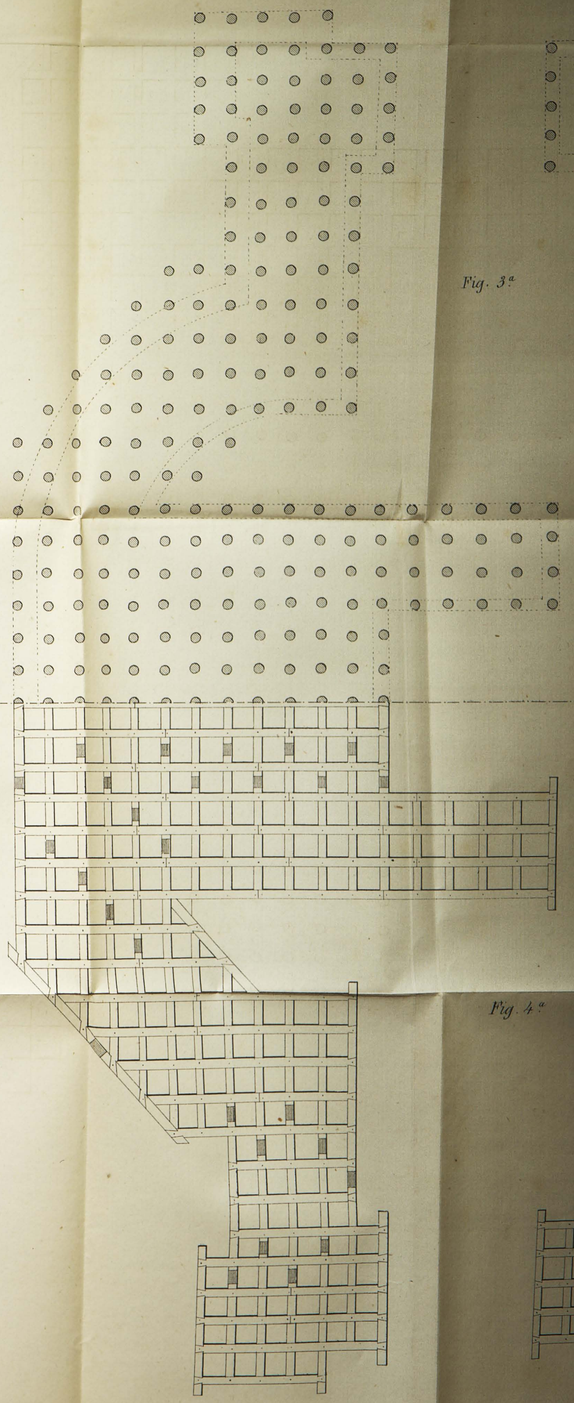


Fig. 3ª

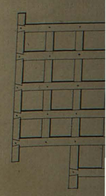


Fig. 4ª

PONTE SULLA DORA RIPARIA

Fig. 1

Elevazione

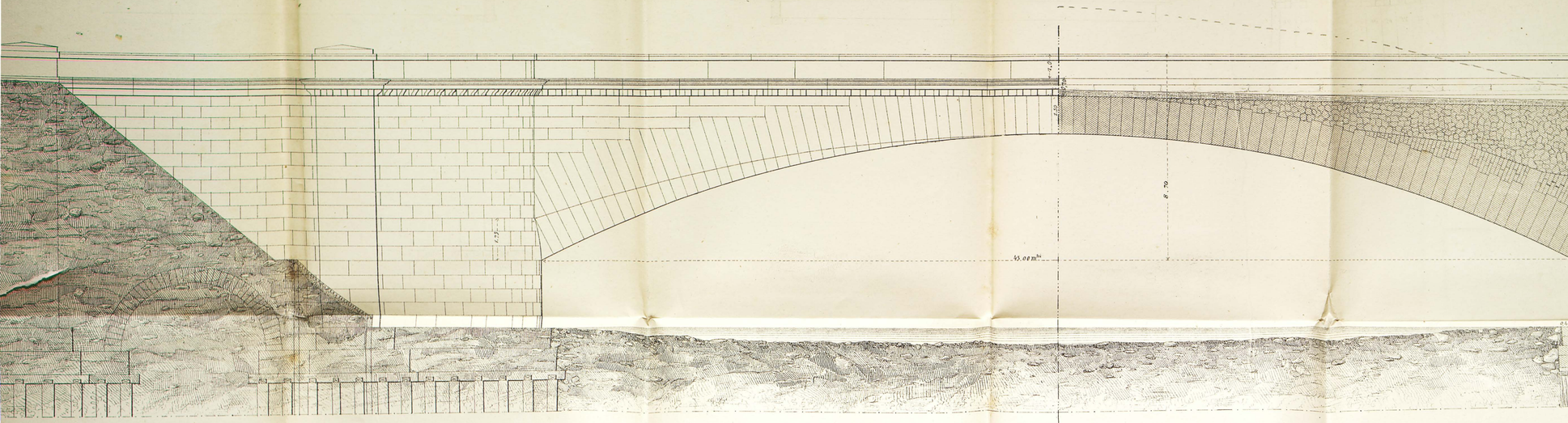


Fig. 2

Sezione Longitudinale .

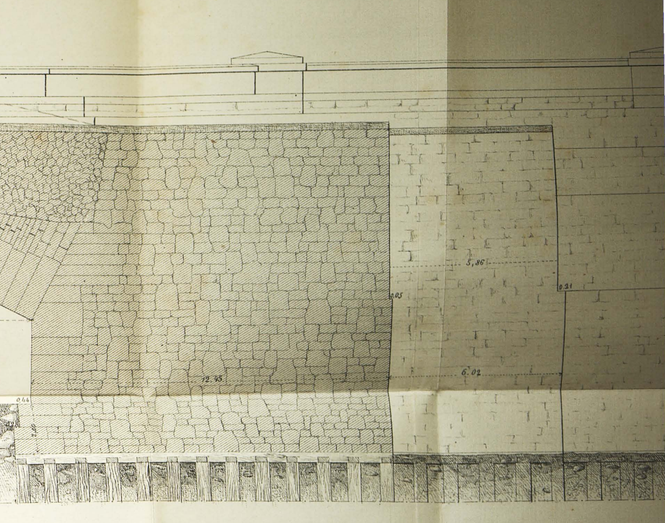


Fig. 3

Sezione trasversale

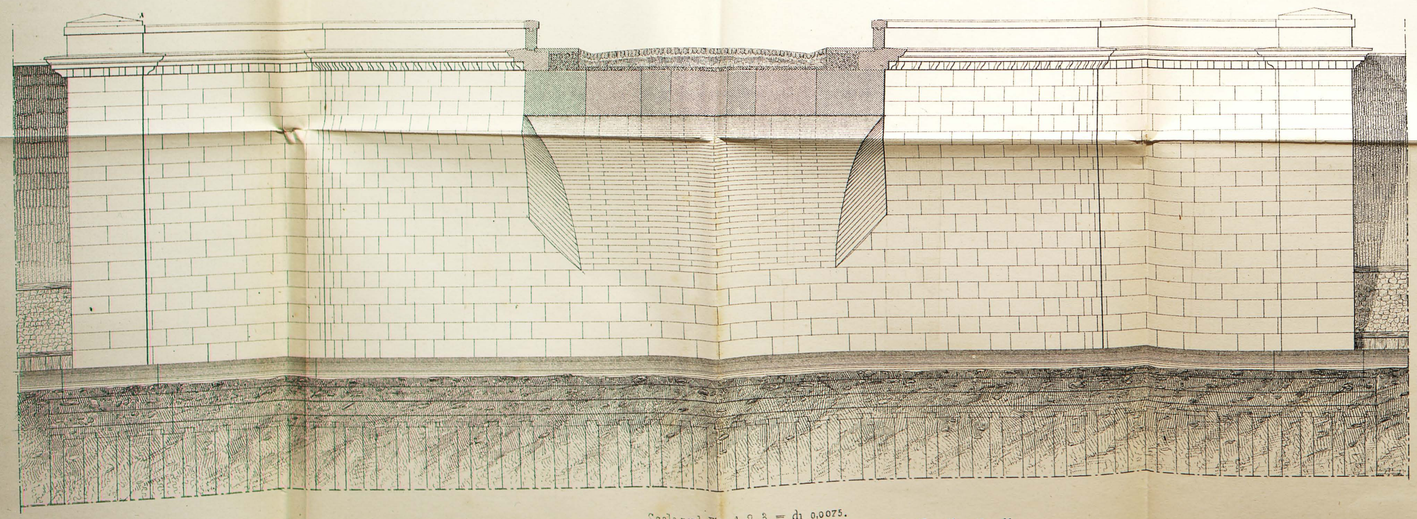
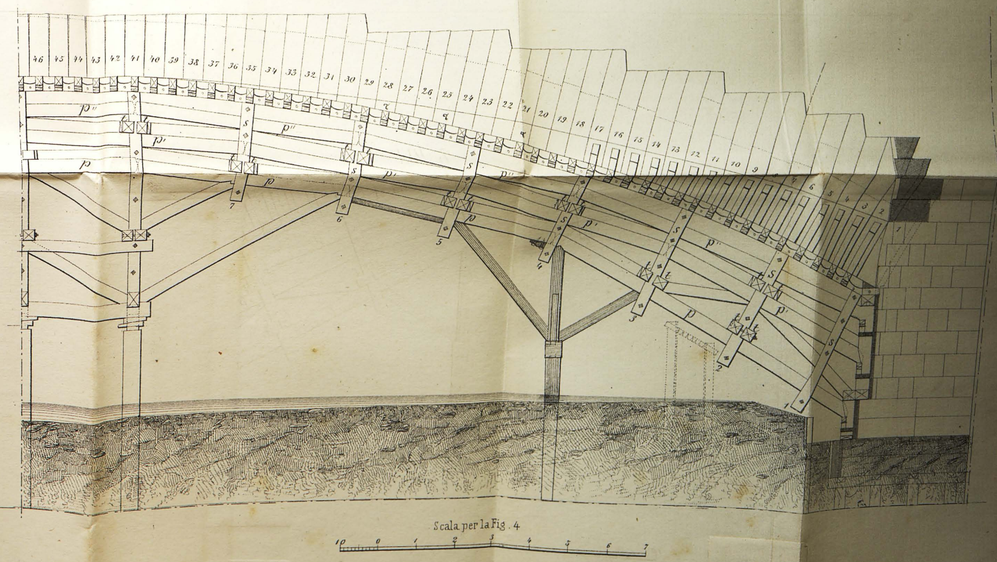


Fig. 4

Armatura

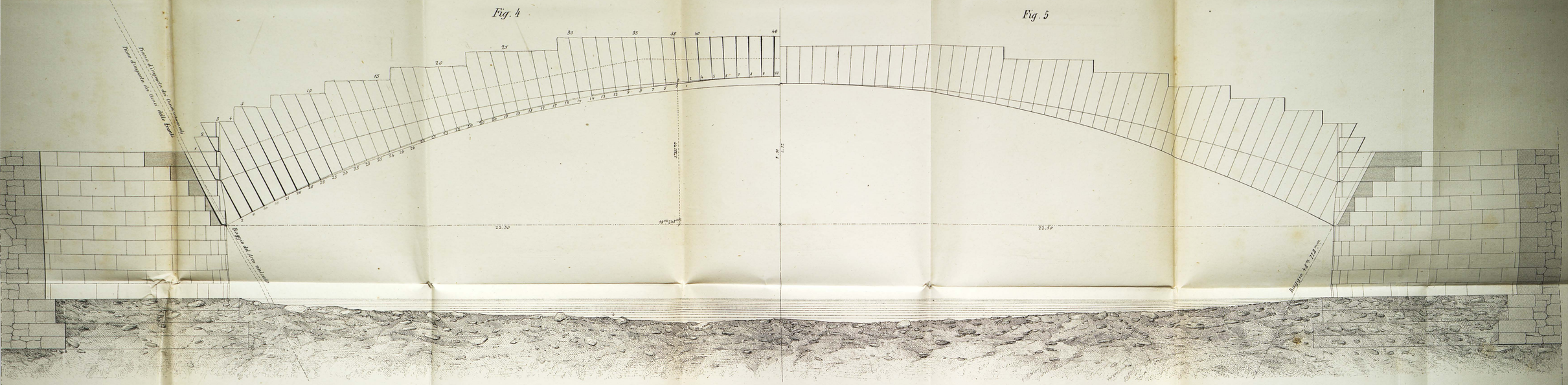


PONTE SULLA DORA RIPARIA

Tav. III

Operazioni pel tracciamento dell'arco rialzato

Fig. 4



Curva definitiva del volto

Fig. 5

Fig. 1

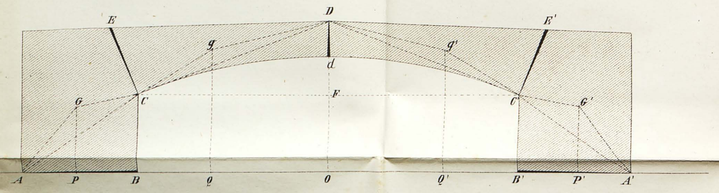


Fig. 2

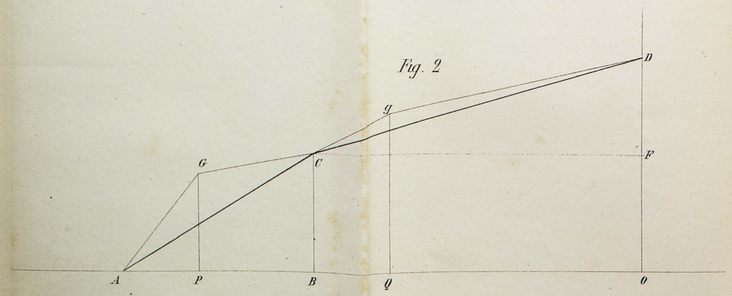
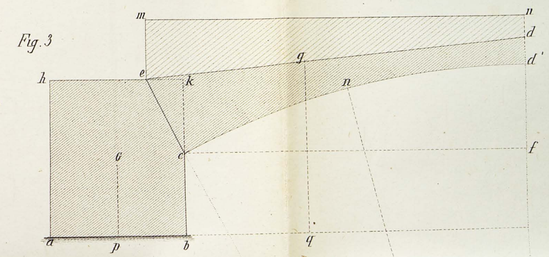
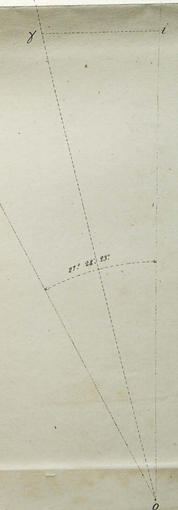


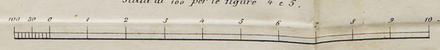
Fig. 3



$bc = 5^m 00$
$cf = 22^m 50$
$fd' = 5^m 50$
$dd' = 1^m 50$
$nd = 1^m 70$
$oc = 48^m 772$
$dnc = 46^m 772$ (sviluppo dell'arco)
$ah = 9^m 75$
$ab = x$



Scala di $\frac{1}{200}$ per le figure 4 e 5.



PONTE SULLA DORA RIPARIA

Fig 1 Verificazione della stabilità dell'arco

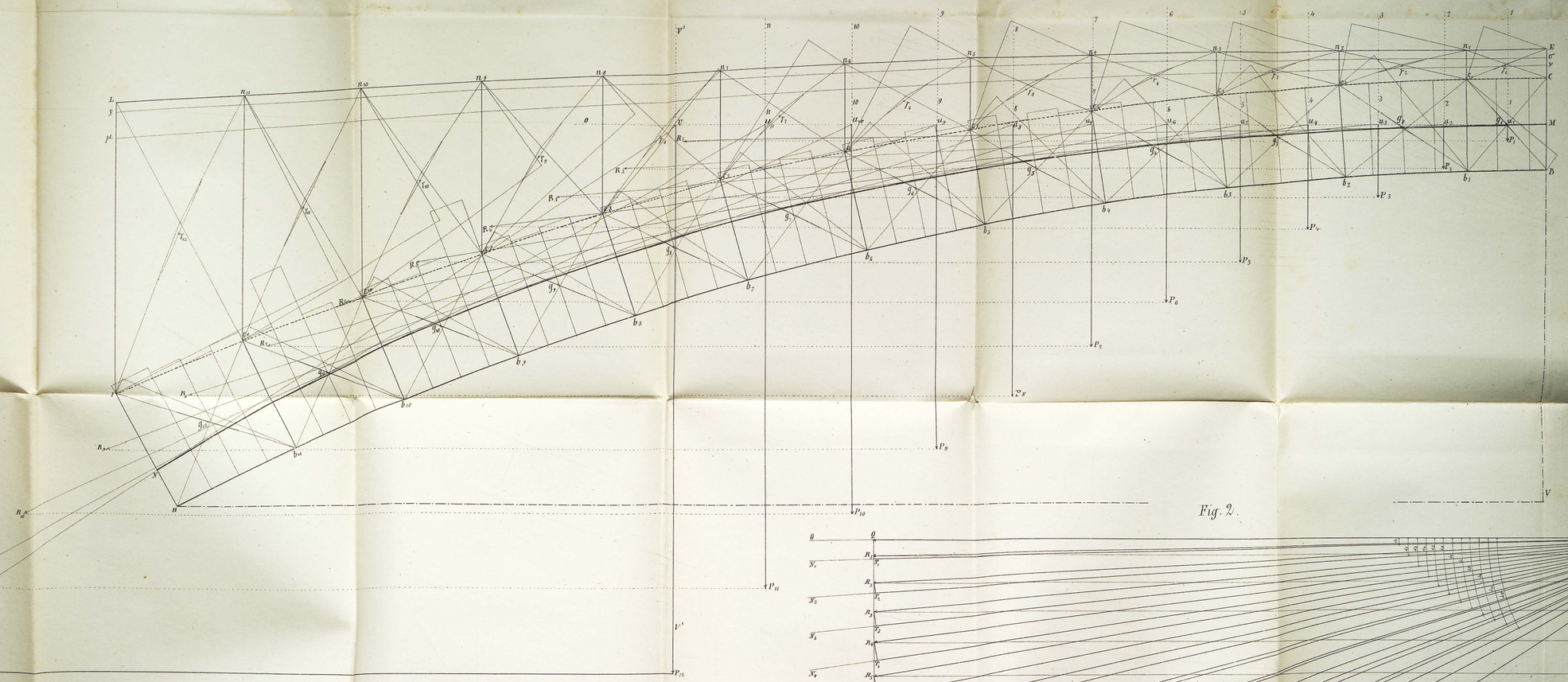
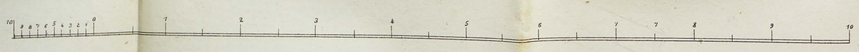
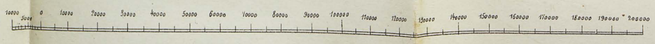


Fig. 2.

Scala per le lunghezze di 0m.02 per metro



Scala per le forze di 0,008 per 10.000 Kg.



TORINO LIT. F.lli DOYEN