

In copertina:

PONTE SIFONE SUL VEILINO (Archivio Temporelli)

Lo sviluppo urbanistico di Genova è dipeso dall'approvvigionamento idrico, garantito per secoli da un'esile infrastruttura oggi denominata Acquedotto Storico. Diversamente dagli acquedotti di epoca romana che collegavano direttamente le città con i luoghi di captazione (sorgenti o fiumi), il nostro si configurava in realtà come un collettore di raccolta di svariate sorgenti e rivi. Sempre alla ricerca di nuove fonti di adduzione, i genovesi lo modificarono diverse volte, costruendo nuovi rami e prolungandolo fino a quando, nel 1639, l'acquedotto raggiunse il massimo sviluppo possibile. Dopo quella data lo sforzo fu rivolto alla continuità del servizio: molte erano infatti le tratte costruite su terreni ripidi che, rovinando periodicamente a valle, cancellavano lunghi tratti di acquedotto, lasciando senz'acqua l'intera città. Per questo, appena la tecnologia rese disponibili i primi rudimentali tubi di ghisa, si costruirono due ponti-sifone che, evitando lunghe e franose vallate, aumentarono l'affidabilità dell'acquedotto e ne accorciarono la lunghezza. Ma le tubazioni erano di diametro relativamente modesto: la nascente industria siderurgica non ne forniva di più grandi. Gli autori, nel presente studio, hanno condotto delle verifiche idrauliche per stabilire se e quanto i ponti-sifone avessero migliorato il trasporto delle acque alla città, valutando a tal scopo non solo la continuità del servizio ma anche la potenzialità massima del sistema, costituito dal canale a pelo libero e dai due tratti in pressione.

VERIFICHE IDRAULICHE SULL'ACQUEDOTTO STORICO DI GENOVA

M. Pittaluga*, G. Temporelli*

PREMESSA

L'acquedotto Storico di Genova, oggetto del presente studio, è costituito, dal punto di vista idraulico, da tratti di un canale a pelo libero intervallati da due tratti di tubazione (ponti-sifone). È intenzione degli autori verificarne la portata massima, dal momento che le fonti storiche riferiscono dati discordanti. Il presente lavoro non va tuttavia inteso come esaustivo, ma piuttosto come indicazione di metodo. In quest'ottica è stata compiuta la verifica di esempio nel canale del fossato Cicala e nei due sifoni del Geirato e del Veilino.

L'acquedotto storico della val Bisagno è stato oggetto, nel corso della sua lunga storia, di innumerevoli modifiche, volte al miglioramento dell'approvvigionamento idrico della città di Genova. Tra le più rilevanti si evidenzia l'entrata in servizio della prima tubazione in ghisa sul ponte sifone del rio Geirato (1778)¹, cui fece seguito la posa di una seconda tubazione parallela alla prima² (1831). Seguì la costruzione di un secondo ponte sifone ubicato nella vallata del Veilino (1842) dotato, fin dalla sua inaugurazione, di due condotte parallele³. La Tabella 1 sintetizza quanto appena esposto.

I sifoni costituiscono perciò gli unici due tratti dell'antico acquedotto in cui l'acqua non scorreva in canale a pelo libero, ma entro tubazioni metalliche; la Figura 1 illustra parte del percorso dell'antico acquedotto lungo la Valbisagno, evidenziando sia i tratti sifonati sia i tratti in canale (comprese le parti abbandonate dopo l'attivazione dei sifoni).

Dalle fonti bibliografiche a disposizione, si evince che i dati relativi alla portata dell'acquedotto storico, nei vari periodi testè indicati, presentano notevoli difformità. Il matematico Leonardo Ximenes nel 1784 (periodo 1) misura in zona Montaldo, ovvero all'entrata in città, 53262 palmi cubi all'ora, che corrispondono a circa 225,6 L/s (812 m³/h)⁴. Secondo il generale Barabino⁵, nel 1825 (periodo 1) la

portata è di 374 L/s (1346 m³/h). Il Banchero⁶ afferma che la portata massima dell'acquedotto è 417 L/s (1500 m³/h), mentre il Cattaneo⁷ attribuisce al sifone del Veilino una portata massima pari a 324 L/s (1166 m³/h) e a quello del Geirato 300 L/s (1080 m³/h).

L'ingegner Nicolò Bruno, nella sua monografia del costruendo Acquedotto De Ferrari Galliera (1892), afferma che l'acqua fornita a Genova in quel periodo dall'acquedotto storico era di 180,5 L/s (659 m³/h), a cui si aggiungevano 125 L/s (450 m³/h) dell'Acquedotto Nicolay, entrato in servizio da pochi decenni. Dalla lettura del Banchero e dello Stringa⁸ si estrapola la Tabella 2 dalla quale si evince come sia la sezione del condotto sia la sua lunghezza (e, quindi, in ultima analisi la portata erogabile), cambiarono nel corso dei secoli. Queste informazioni, seppur provenienti da

fonti autorevoli, sono tra loro discordanti, sia per il valore numerico della portata, sia per la poco chiara indicazione circa il luogo esatto della misura (alla presa, nel canale prima del sifone, nel canale dopo il sifone, all'arrivo in città). Ai fini della determinazione della portata erogata alla città di Genova non vanno infine dimenticate le numerose prese, autorizzate o abusive, presenti lungo il percorso dell'acquedotto, nonché l'estrema influenzabilità dei corsi d'acqua fluenti dai livelli di piovosità stagionali. Appare perciò doveroso fare chiarezza. Non essendo proponibile riattivare il condotto a pelo libero per misurarne l'effettiva portata si è scelto di calcolare, con strumenti matematici, sia la portata dei sifoni idraulici (che seppur fuori servizio da decenni si presentano integri e perciò rilevabili nelle loro caratteristiche geometriche) sia quella del condotto a pelo libero. Scopo del presente studio è quindi ricavare le portate teoriche dei due tratti sifonati nei tre diversi periodi storici testé

 ^{*} Arch. Michele Pittaluga, dott. Giorgio Temporelli (Fondazione AMGA) – Via Piacenza, 54 – 16138 Genova.

¹ F. Podestà, L'acquedotto di Genova – 1071-1879, Genova, 1879 pag. 68.

² Podestà, op. cit., pag. 86.

Podestà, op. cit., pag. 95.

Dalla relazione dell'abate Leonardo Ximenes (Archivio Storico Comune di Genova al n. 738 Padri del Comune).

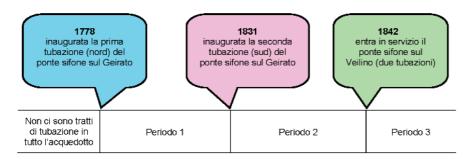
G. Cattaneo, Relazione sul riordinamento del civico acquedotto di Genova, 1867, pag. 22.

G. Banchero, Genova e le due riviere, 1846, pag. 563.

G. Cattaneo, op.cit., pag. 39.

⁸ P. Stringa, La strada dell'acqua. L'acquedotto storico di Genova, tecnica ed architettura. Sagep, 1980.

Tab. 1 – Periodi storici dell'acquedotto relativi all'attivazione dei sifoni idraulici



individuati, ovvero verificare se le portate massime di ciascun sifone fossero adeguate rispetto a quella del canale a pelo libero, oppure avessero costituito punti critici, ovvero *colli di bottiglia*, all'interno del sistema.

PARTE PRIMA: RILIEVI

PREMESSE

Scopo del rilievo idraulico è stabilire i valori numerici per risolvere le equazioni idrauliche e ricavare la portata dell'acquedotto, sia nel tratto a pelo libero sia nel tratto in pressione dei sifoni. Al fine di ottimizzare l'operato, anche a causa delle difficoltà di accesso in molti tratti dell'acquedotto, il rilievo è stato dapprima progettato a tavolino. La finalità di questa operazione è stata quella di razionalizzare le campagne operative di rilievo, valutandone tra l'altro le potenzialità ed i limiti della strumentazione a disposizione.

I dati che occorrono per impostare le equazioni idrauliche sono:

A) per il canale:

- 1) la sezione del condotto;
- 2) la sezione bagnata;
- 3) la pendenza;
- B) per i sifoni:
 - 4) il diametro interno delle tubazioni;
 - 5) la loro lunghezza effettiva;
 - 6) la differenza di quota tra l'imbocco e lo sbocco del tratto sifonato.

Si deve valutare inoltre il coefficiente di scabrosità della superficie del condotto in contatto con l'acqua.

La strumentazione impiegata per il rilievo idraulico è stata:

- flessometro da 10 m;
- rotella metrica da 20 m;
- · filo a piombo;
- · livella da 80 cm;
- livella Carl Zeiss Jena mod. Ni. V e relativo treppiede o stativo;
- odometro con sensibilità 0,1 metri.
- 1) Misura della sezione del condotto

Al fine di aumentare la portata dell'acquedotto e adattarla alle crescenti richieste della città,

nel corso dei secoli la sezione del canale venne più volte modificata; lungo il suo tragitto si possono ancora trovare dei tratti con sezione 30x60 cm (periodo tra XI e XVI secolo), 50x60 cm (periodo tra XVI e XVII secolo), 60x110 cm (periodo tra XVI e XIX secolo), 70x150 cm (dalla metà del XIX secolo). Al fine di poterne confrontare le potenzialità con i tratti in pressione, la misura della sezione deve essere valutata in uno dei tratti del canale ancora in uso quando i sifoni erano operativi.

2) Stima della lunghezza totale e misura della pendenza locale del condotto

La lunghezza da determinare ai fini del calcolo della pendenza media è riferita al canale dalle prese al suo ingresso in città. Vengono perciò escluse dal conteggio le derivazioni di adduzione delle prese e, in generale, tutti i tratti che, nel 1639, non c'erano ancora (come le gallerie, i ponti sifone, ecc.). Ci si è avvalsi della cartografia regionale (CTR al 5000) sulla quale sono chiaramente identificate le percorrenze e, poiché l'acquedotto è oggi quasi interamente utilizzato come percorso pedonale, risulta relativamente semplice identificarne la posizione. In ausilio a questo strumento è stato usato il Piano dell'Aquedotto di Genova distinto nelle rispettive custodie – Ricavato dalla Carta formata dal Colonello Jngegniere Matteo Vinzoni, l'Anno 1729.

Nei tratti lacunosi, dove dell'acquedotto non rimangono nemmeno tracce, se ne è ricavata la posizione mediante interpolazione, utilizzando le curve di livello riportate dal CTR (Cartografia Tecnica Regionale) al 5000. La lunghezza ricavata con questa tecnica è di circa 27.000 metri, di cui 5.327 m costituiscono il "giro del Geirato" e 3.075 costituiscono il "giro del Veilino" (vedi Tab. 2).

Il gradiente idraulico medio J è dato dal rapporto tra la differenza delle quote di partenza Δh (La Presa = 145,2 m.slm) e di arrivo (Porta di San Bartolomeo = 81,5 m.slm) e la lunghezza totale del percorso L, ovvero quella del canale principale nel 1639 (L = 27.000 m):

 $J = \Delta h / L = (145,2 - 81,5)/27.000 = 0,00236$ = 2.36 \(\infty\).

Considerando invece il valore di lunghezza riportato dal Banchero (L = 28.260 m) il gradiente idraulico risulta di 2,25 ‰.

Tuttavia solo attraverso un rilievo locale, nella stessa zona dove è stata misurata la sezione, è possibile determinare univocamen-

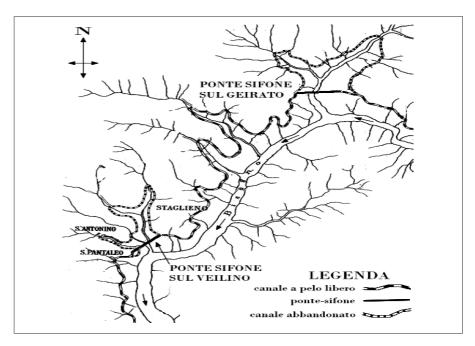


Fig. 1 – Percorso dell'acquedotto storico lungo la Valbisagno



Fig. 2 - Vista aerea del ponte sifone sul Geirato



Fig. 3 – Vista aerea del ponte sifone sul Veilino

Tab. 2 – Variazioni dimensionali del condotto nel corso dei secoli

Periodo	Lunghezza del condotto principale	Sezione
XI sec. – 1355	7.786 m	30 x 60 cm
1355 – 1520	12.461 m	50 x 60 cm
1520 – 1639	12.461 m	60 x 110 cm
1639 – 1770	28.260 m	60 x 110 cm
1770 – 1825	28.260 - 5.327 = 22.933 m (saltato il giro Geirato)	70 x 150 cm
1841 – oggi	22.933 – 3.075 = 19.858 m (saltato il giro Veilino)	70 x 150 cm

te la velocità dell'acqua e, quindi, la portata. Per misurare il dislivello presente tra due tratti del condotto si utilizza la livella ottica, mentre la misura longimetrica relativa alla distanza tra i due punti prestabiliti viene effettuata con un odometro.

3) Misura del diametro interno delle tubazioni

Il diametro interno delle tubazioni dovrebbe essere rilevato con misura longimetrica

diretta, approfittando di alcuni punti di discontinuità riscontrati lungo la tratta; laddove non possibile, si misurerà tramite fettuccia metrica la circonferenza esterna della tubazione, e da questa verrà ricavato il diametro (esterno). Tramite documentazione storica si potrà ipotizzare la tipologia di tubazione impiegata e perciò risalire al diametro interno. Saranno inoltre eseguite verifiche, misurando in più punti la circonferenza esterna delle tubazioni, per essere certi

che la dimensione si mantenga costante lungo le tratte dei sifoni.

4) Misura della lunghezza effettiva delle tubazioni

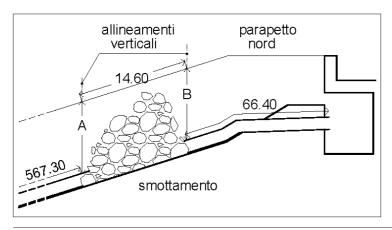
La lunghezza delle tubazioni può essere misurata direttamente mediante semplice rotella metrica, essendo le tubazioni stesse quasi totalmente visibili. Contestualmente si devono classificare eventuali pezzi speciali presenti nelle tubazione, per valutare le perdite di carico concentrate.

Ci si prefigge di effettuare queste operazioni indipendentemente per tutte le tubazioni oggetto di studio.

5) Misura della differenza di quota tra vasca di carico e vasca di scarico del tratto sifonato

Per misurare il dislivello presente tra la partenza (camera di carico o "dei filtri") e l'arrivo delle tubazioni (o camera di scarico), si adotta il seguente procedimento:

- a) si individua una base in prossimità della camera di arrivo, in posizione tale che possa essere traguardata otticamente la camera di carico che, ubicata sul versante opposto della vallata, è di qualche metro più in alto;
- b) si piazza il treppiede e la livella ottica e, dopo aver eseguito la taratura dello strumento, si individua una mira affidabile ove un collaboratore può sistemare un riferimento orizzontale;
- c) si esegue, tramite semplici misure longimetriche, la misura della distanza tra la livella stessa e il presunto pelo dell'acqua nella camera di arrivo; parimenti, in prossimità della camera di carico, si misura la differenza di quota tra la linea preventivamente tracciata e il presunto pelo dell'acqua. Con semplici somme algebriche è quindi possibile determinare la reale differenza di quota tra gli estremi del sifone.





Figg. 4a/b - Lo smottamento che ha coinvolto il sifone Geirato nel dicembre 2008

Tab. 3 - Misure rilevate e dedotte riguardanti la tubazione sud del Geirato

Misure rilevate (cm)				Misure dedotte (cm)
	profondità	h. interna colletto	circonferenza	Ø int.
Tubazione sud	51.0	14.0	122.5	37.0

CAMPAGNA DI RILIEVO SUL SIFONE DEL RIO GEIRATO

La prima campagna di rilievo, sul sifone del Geirato in località Molassana, è stata eseguita nel mese di febbraio 2009.

Diametro delle tubazioni

La misura del diametro interno delle tubazioni è stata dedotta da misure di circonferenza unitamente agli spessori ricavati grazie ad alcuni sfiati a colletto presenti nella tubazione sud, in prossimità della camera di carico. Per tale operazione si sono adoperati un flessometro ed un metro rigido, introdotto negli sfiati stessi fino al raggiungimento della parete diametralmente opposta del tubo (profondità). Le circonferenze sono risultate uguali per entrambe le tubazioni mentre l'i-spezione interna è stata effettuata solo per la tubazione sud, l'unica con sfiati accessibili. La Tabella 3 riporta i valori rilevati e le misure dedotte con semplici operazioni algebriche.

Ipotizzando lo stesso spessore per la tubazione nord si assume, anche per questa, un valore del diametro interno pari a 37 cm.

Lunghezza effettiva della tubazione

Il lavoro di rilievo longimetrico, basato sull'ipotesi della totale accessibilità della tubazione, si è rivelato più complesso a causa di uno smottamento (Figg. 4a e 4b) che pochi mesi prima (dicembre 2008) ha coinvolto il tratto di risalita del sifone (tratto in trincea); ciò ha comportato un artificio per poter effettuare la misura.

Gli allineamenti verticali sono stati effettuati con normale filo a piombo e, al fine di ridurre al minimo l'errore, le misure A e B sono state verificate, risultando identiche.

La lunghezza totale della tubazione nord è data dalla somma dei tre valori e risulta essere 648,30 m.

Differenza di quota del tratto sifonato

La misurazione è avvenuta come progettato, fatto salvo che lo strumento ottico non è stato installato sul treppiede ma direttamente sulla sommità del muro di confine, ubicato esattamente sulla camera di scarico del sifone (Fig. 5).

Un'ispezione all'interno della camera di carico ha permesso di misurare la distanza di 120 cm che separa la soglia dall'asse dei tubi; ne consegue che il dislivello tra l'asse



Fig. 5 – Osservazione alla livella ottica



Fig. 6 – Misure longimetriche della tubazione

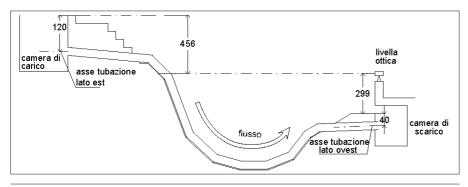
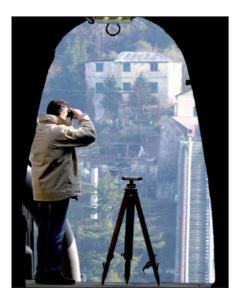


Fig. 7 - Schema delle quote rilevate sul Geirato





Figg. 8a/b - Alcune fasi del rilievo sul Veilino

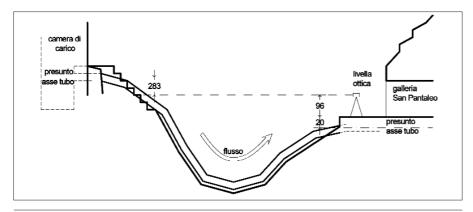


Fig. 9 - Schema delle quote rilevate sul Veilino

delle tubazioni nella camera di carico e l'asse delle stesse nella camera di scarico è facilmente ricavabile dalla seguente somma algebrica:

$$-120+456+299+40=675$$
 (cm)

La Figura 7 illustra la sequenza delle misure effettuate.

La misura risulta lievemente inferiore a quella indicata dal Banchero (743 cm).

Ciò può essere spiegato dal fatto che la nostra misura è riferita alla differenza di quota tra le tubazioni di partenza e di arrivo, mentre i dati storici sono stati rilevati in condizioni di funzionamento dell'acquedotto, quindi riferiti alla differenza di quota tra i peli liberi dell'acqua nelle due camere del sifone (carico piezometrico). Attraverso le equazioni idrauliche preposte è possibile dimostrare che tale differenza di valori è in grado di influenzare la determinazione della portata con un errore di circa 3%.

CAMPAGNA DI RILIEVO SUI SIFONE DEL RIO VEILINO

Nel mese di marzo 2009 è stata eseguita una seconda campagna di rilievo (Figg. 8a e 8b) sul sifone del Veilino, in località Staglieno. Si constata immediatamente che è presente soltanto una delle due tubazioni originali (lato nord-ovest).

Diametro delle tubazioni

Poiché la tubazione non presenta discontinuità, ed è perciò impossibile eseguire la misurazione del diametro interno, se ne misura la circonferenza esterna che risulta essere 141 cm, da cui si deduce il diametro esterno pari a 44,9 cm. Tale valore, confrontato con antiche tabelle riferite alla produzione di tubi in ghisa, indicano come molto probabile il diametro interno di 40 cm, valore peraltro ritrovato in lettura (dati del Banchero) e assunto quindi con un buon grado di affidabilità come vero.

Lunghezza effettiva della tubazione

Effettuata con rotella metrica, risulta essere 393,20 m. Tale misura è riferita alla tubazione in ghisa superstite, misurata nella sua parte visibile, non è perciò compresa la parte annegata nella muratura in prossimità della camera di carico (estremità nord est) e dell'arrivo. A titolo di completezza si è rilevata anche la lunghezza del terrazzo d'arrivo (7,10 m) e della galleria San Pantaleo (72,00 m).

Differenza di quota del tratto sifonato La campagna di rilievo delle quote è schematizzata in Figura 9. Il dislivello tra l'asse della tubazione nella camera di carico e quello nella camera di scarico è facilmente ricavabile dalla seguente somma algebrica:

$$283 + 96 + 20 = 399$$
 (cm)

valore lievemente superiore a quanto riportato dal Banchero (375 cm).

CAMPAGNA DI RILIEVO SUL CANALE A PELO LIBERO, LO-CALITÀ FOSSATO CICALA

Nei mesi di aprile-maggio 2009 è stata effettuata la campagna di rilievo sul canale a pelo libero che ci ha permesso di determinare sia la sezione del canale sia il gradiente idraulico nel tratto di acquedotto che abbiamo ritenuto essere più significativo allo scopo, ovvero quello di fossato Cicala (Fig. 10); in tale zona, infatti:

- a) il canale era in funzione contemporaneamente ai sifoni;
- b) la mancanza di alcune lastre⁹ ha permesso l'ispezione interna;
- c) la particolare conformazione della valle (stretta e lunga) ed il buono stato di conservazione del piano di calpestio ha consentito di effettuare agevolmente sia le misurazioni longimetriche sia quelle di pendenza.

Le dimensioni massime del canale sono risultate essere: larghezza 1 = 70cm; altezza h = 150 cm; tuttavia la presenza regolare di sfioratori (Fig. 11) fissa l'altezza massima raggiungibile dall'acqua nel canale a 140 cm.

Un evidente banda presente sulle pareti laterali interne del condotto (Figg. 12a e 12b) rimanda all'antico passaggio dell'acqua; va detto che questa correlazione, seppur intuitiva, merita qualche considerazione. Ricordiamo di seguito gli ultimi anni di funzionamento dell'acquedotto: il 12 luglio 1917 le acque dello storico acquedotto sono state dichiarate non potabili, e gli ultimi documenti reperibili riguardanti la manutenzione sono degli anni '20, tuttavia le acque hanno continuato a fluire ancora per molti anni all'interno del condotto tanto che, nel 1951, arrivavano ancora in piazza della Marina e in vico Lavatoi¹⁰. L'acqua del condotto smette di arrivare in città nel 1955 quando, a seguito dei lavori dell'acquedotto del Brugneto, viene edificato l'impianto filtrante di Prato proprio sul sedime dell'antico acquedotto.

Dopo circa mezzo secolo di inattività, le righe orizzontali presenti e ben visibili in alcuni tratti coperti del condotto sono la memoria dei fenomeni di deposito o erosione che le acque, per secoli, hanno svolto incessantemente, in maniera differente a seconda delle caratteristiche del rivestimento della parete del canale e dell'acqua stessa.

Ovviamente ogni vecchio canale nel quale per molto tempo siano fluite delle acque presenta tracce di questo tipo; questa è una tesi riconosciuta dagli addetti ai lavori che inter-

pretano tali linee come un'indicazione del livello medio raggiunto dalle acque¹¹. Nel

In fase di risistemazione durante la campagna di rilievo. P. Stringa, op. cit.



Fig. 10 -Tratto del canale ispezionato in fossato Cicala

caso specifico l'altezza "bagnata" più probabile misura circa 72 cm.

Per quanto riguarda invece la pendenza, il tratto di canale ispezionato ha presentato un dislivello pari a 1,48 m su una lunghezza di 762 m, il che fissa il valore del gradiente idraulico "locale" a 1,94 ‰, ovvero leggermente inferiore a quello medio calcolato sull'intero percorso (2,25 %).

CALCOLO PARTE SECONDA: PORTATE MASSIME

CANALE A PELO LIBERO IN FOSSATO CICALA

Sulla base dei rilievi effettuati in zona fossato Cicala è possibile determinare la portata d'acqua massima del canale a pelo libero. Per la stima delle perdite di carico e, quindi, della massima velocità raggiungibile dall'acqua all'interno del canale, si utilizza la formula di Kutter, per la cui soluzione si utilizzano i valori del gradiente idraulico e



Fig. 11 - Uno sfioratore presente lungo il canale

della sezione utile del canale determinati in fase di rilievo, nonché del coefficiente di scabrezza, come evidenziato nella forma seguente:

$$\mathbf{v} = \frac{100}{1 + \frac{k_{\rm m}}{\sqrt{R}}} \sqrt{JR}$$
 Formula di Kutter

v = velocità dell'acqua nel canale a pelo

$$R = \frac{A}{P} = \frac{lh}{l+2h}$$
 raggio idraulico, determi-

nato dal rapporto tra area e perimetro bagnato, dove l e h sono rispettivamente la larghezza e l'altezza del canale bagnato (k_m) ;

 $J = \Delta h/L = gradiente idraulico (adimensio-$

 $k_m = coefficiente scabrezza (m^{1/2}).$

Per il calcolo della velocità utilizziamo quindi la formula di Kutter inserendo i valori rilevati dalla campagna di misure, in particolare essendo fissati i valori del gradiente idraulico (J = 1,94%), della larghezza del condotto (l = 0,7 m) e del coefficiente di scabrezza (k_m = 0,35 – ipotesi di canale in muratura ordinaria con costruzione accurata), calcoliamo 2 possibili velocità riferite una alla quota dell'ipotetica linea bagnata ($h_1 = 0.72$ m) e l'altra all'altezza del bordo inferiore dello sfioro (h2 = 1,4 m). La portata viene determinata con l'equazione di continuità, ovvero dal prodotto della sezione utile per la velocità. I valori ottenuti vengono riassunti nella Tabella 4.

TRATTI SIFONATI

Per la stima delle perdite di carico e, quindi, della massima velocità raggiungibile dall'acqua all'interno della tubazione, occorre fare qualche considerazione e verifica preliminare al fine di poter utilizzare la formula di Darcy-Weisbach-Colebrook. La formula di Colebrook può infatti essere utilizzata in forma approssimata e consentire il calcolo diretto della velocità a patto che siano soddisfatte le ipotesi di moto turbolento, ovvero che il numero di Reynolds Re sia maggiore di 4000. La determinazione di Re, però, richiede a sua volta la conoscenza della velocità, la quale può essere stimata utilizzando la formula semplificata di Strickler:

$$v = k_s \left(\frac{D}{4}\right)^{\frac{2}{3}} \sqrt{\frac{\Delta h}{L}}$$
 Formula di Strickler dove:

v = velocità (m/s);

 $k_s = coefficiente\ scabrezza\ (m^{1/3}\ s^{-1});$

D = diametro interno della tubazione (m);

In un recente lavoro ("Water supply of Bologna by Roman Aqueduct: history, morphology and hydraulic, from ancient time to nowadays" di R.Drusiani, G.Leoni, D.Demaria, N.Lembo) presentato al 2nd International Symposium IWA "Water and Wastewater Technologies in Ancient Civilizations - Bari il 28-30 maggio 2009", gli autori hanno avvalorato questa tesi per risalire alla portata dell'antico acquedotto romano di Bologna.

Tab. 4 - Valori di portata relativi al canale nel tratto fossato Cicala

Altezza dell'acqua (m)	Velocità (m/s)	Sezione utile (m²)	Portata
Altezza bagnata $h_1 = 0,72 \text{ m}$	1,24	$S_1 = 0,50 \text{ m}^2$	$626 \text{ (L/s)} = 2253,6 \text{ (m}^3/\text{h)}$
Altezza sfioratori h ₂ = 1,4 m	1,4	$S_2 = 0.98 \text{ m}^2$	1375 (L/s) = 4950 (m^3/h)

Tab. 5 – Parametri idraulici e portate massime teoriche ricavate per i sifoni Geirato e Veilino

	Geirato 1° tubo ghisa	Geirato 2° tubo ghisa	Veilino 2 tubi ghisa
h (m)	6,75	6,75	4
L (m)	648	648	393
D (m)	0,37	0,37	0,4
_s (m)	0,003	0,003	0,002
v (m/s)	1,46	1,46	1,62
Q (L/s)	157	157 (TOT = 314)	204 x 2 = 408
Q (m ³ /h)	565	565 (TOT = 1130)	1469

 $\Delta h = differenze di quota tra la camere di carico e quella di arrivo (m);$

L = lunghezza tubazione (m)

con la quale si ottengono per i tratti sifonati velocità prossime a 1,6 m/s, un valore abbastanza elevato infatti inserito nella formula di Reynolds consente di determinare un valore di R_e prossimo a 4·10⁵ dimostrando che, all'interno delle tubazioni in oggetto, il moto era totalmente turbolento.

$$R_e = \frac{\rho v D}{\mu}$$
 Formula di Reynolds

dove

Re = numero di Reynolds (adimensionale); ρ = densità = 1000 (kg/m³);

v = velocità (m/s);

D = diametro interno della tubazione (m);

 μ = viscosità dinamica (ipotizzando l'acqua a 20°C) = 0,0014 (kg/ms).

Provato ciò possiamo effettuare i calcoli definitivi di velocità e portata utilizzando la più precisa formula di Darcy-Weisbach-Colebrook, ottenuta mettendo a sistema l'equazione di Darcy-Weisbach con quella di Colebrook approssimata:

$$J = \frac{\Delta h}{L} = \beta \frac{Q^2}{D^5} = \frac{8\lambda Q^2}{9\pi^2 D^5}$$

Formula di Darcy-Weisbach

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 2\log(3.715\frac{D}{\varepsilon})$$

Formula di Colebrook approx

dove:

J = gradiente idraulico (dimensionale); $\Delta h = differenze di quota tra la camere di carico e quella di arrivo (m);$ L = lunghezza tubazione (m);

 ε = coefficiente di scabrezza assoluto (m);

 $\lambda = coefficiente di attrito (adimensionale);$

 $Q = portata (m^3/s);$

g = accelerazione di gravità = 9,81 (m/s²);

D = diametro interno della tubazione (m).

$$v = log(3.715 \frac{D}{\varepsilon}) \sqrt{\frac{\Delta hg D8}{L}}$$

Formula di Darcy-Weisbach-Colebrook La portata è ricavabile dall'equazione di continuità.

Riportiamo in questa pagina la Tabella 5 riassuntiva dei parametri idraulici, riguardanti i ponti sifone Geirato e Veilino, utilizzati nella formula di Darcy-Weisbach-Colebrook, nonché i valori della velocità e della portata massima con essa determinati.

Dato per scontato che l'invecchiamento di due secoli che il manufatto ha subito non possono aver alterato la lunghezza, il diametro e la differenza di quota delle tubazioni, resta come unica variabile il coefficiente di scabrezza assoluto; i valori di $\varepsilon_s(m)=0{,}003$ per il Geirato e $\varepsilon_s(m)=0{,}002$ per il Veilino sono stati individuati da tabella, considerando la tipologia "condotte in ghisa con depositi, con giunti a flangia o a bicchiere". Un'accentuata rugosità della superficie interna di questi tubi è stata verificata anche tramite l'esame visivo di un campione di tubo del sifone del Geirato (Fig. 13), precedentemente utilizzato per studi metallografici¹².





Figg. 12a/b – Alcune fasi dell'ispezione interna al condotto

Con questi valori dei coefficienti di scabrezza le perdite di carico localizzate, attribuite sia al particolare tipo di giunzione a bicchiere (Fig. 14) sia alla modesta lunghezza dei singoli tubi (inferiore a 1 m per Geirato e circa 2 m per Veilino), vengono assimilate al calcolo per le perdite di carico distribuite lungo tutta la tubazione.

CONCLUSIONI

L'analisi comparativa tra canale e sifoni viene fatta nei vari periodi, ovvero dagli anni immediatamente precedenti il 1778, quando l'acquedotto era costituito unicamente dal canale, per arrivare all'epoca successiva l'attivazione del secondo sifone, quello del Veilino, avvenuta nel 1842.

Grazie agli studi storico-topografici e le valutazioni idrauliche effettuate, è stato possibile stimare il volume massimo d'acqua trasporta-

Marchetto S. "Studio degli aspetti realizzativi di un manufatto in ghisa – A.A. 2008/9" – Università degli Studi di Genova – Facoltà di Ingegneria – Dipartimento della Produzione Termoenergetica e Modelli Matematici.



Fig. 13 – Campione di tubo appartenente al sifone del Geirato

bile dell'acquedotto storico in vari periodi, confrontando al tempo stesso la potenzialità del canale a pelo libero rispetto ai sifoni. I dati ricavati inducono alle seguenti considerazioni:

- prima del 1778 la captazione alla Presa era attiva, così come le tre documentate dal Podestà¹³ nelle valli Figallo, Cicala e Trensasco; l'acquedotto era all'epoca costituito unicamente da un canale a pelo libero (60 x 110 cm) in grado di sopportare una portata massima teorica di 820 L/s (2952 m³/h);
- 2. nel 1778 viene attivato il ponte sifone sul Geirato il quale, munito di una sola tubazione, era in grado di sopportare un flusso massimo pari a 157 L/s (565 m³/h); l'eventuale acqua in eccesso proveniente dalla Presa sarebbe fuoriuscita dal troppo pieno della camera di carico, fatto peraltro segnalato dal Banchero "...si rende indispensabile questo spandente particolarmente nella stagione invernale in cui il sifone non è capace di ricevere tutta l'acqua versata dall'Aquidotto";
- 3. nel 1825 viene attivata una presa sul rivo Torbido, a monte del sifone Geirato e il canale viene ulteriormente ingrandito, le dimensioni diventano 70 x 150 cm e la portata massima teorica, valutata considerando l'altezza degli sfioratori presenti lungo il percorso, aumenta a 1375 L/s (4950 m³/h). Il sopralluogo da noi effettuato in zona fossato Cicala ha evidenziato una banda a circa 72 cm dal fondo del canale, correlabile all'altezza più probabile del passaggio dell'acqua relativamente all'ultimo periodo di funzionamento dell'acquedotto; inoltre dalla determinazione della pendenza locale pari a 1,94‰ si è dedotta una portata media pari a 626 L/s $(2254 \text{ m}^3/\text{h});$
- nel 1831 sul sifone del Geirato viene aggiunta una seconda tubazione, parallela e sostanzialmente uguale alla precedente, ciò

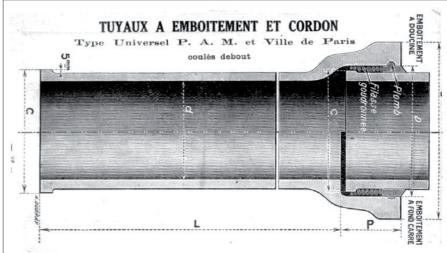


Fig. 14 – Schema di giunto a bicchiere (da Agenda Pont-à-Mousson, 1923)

consente di portare la capacità del ponte a 314 L/s (1130 m³/h); dopo pochi anni (1837) viene attivata una modesta presa sul Concasca, a monte del precedente con ciò la portata sale a 314 L/s (1469 m³/h);

5. nel 1841 viene attivato il ponte sifone sul Veilino, da subito dotato di due tubazioni parallele in grado di condottare, complessivamente, 408 L/s (1469 m³/h); tale valore risulta essere molto significativo perché confrontabile con quello che il Banchero segnala nel suo libro come misurato "Il maximum dell'acqua attuale misurata nell'Acquidotto prima di entrare in città risulta essere per ogni ora Metri Cubi 1,500.00".

La Figura 15 mostra l'andamento del flusso idraulico, a partire dalla presa (a destra) sino ad arrivare in città (a sinistra), nell'ultimo periodo di attività dell'acquedotto, ovvero quello caratterizzato dal funzionamento di entrambi i sifoni ed indicato nel presente lavoro come "Periodo 3".

Nella parte bassa dello schema, sono leggibili le variazioni di portata; in particolare, le adduzioni (o prese) generano incrementi (verso l'alto), mentre i due colli di bottiglia rappresentati dai sifoni, "tagliano" i valori di portata massima. Le zone tratteggiate rappresentano perciò proprio l'acqua che, non potendo essere trasportata dalle tubazioni, doveva essere lasciata. Lo schema non tiene conto delle numerose derivazioni, dei bronzini e delle captazioni abusive presenti lungo il percorso. Lo studio condotto ha posto in risalto come l'entrata in servizio dei ponti sifone, costruiti al fine di evitare le franose valli del Geirato e del Veilino, e quindi di assicurare una continuità del flusso idrico alla città di Genova, abbia però diminuito la potenzialità massima del sistema.

APPENDICI

Nel corso dello studio sono emerse alcune realtà non molto note, che ci sembra opportuno riportare in questa sede, anche se non strettamente inerenti alla verifica idraulica.

TUBI DI MARMO

La letteratura indica che la costruzione del sifone sul Geirato fu proposta nel 1660, molto prima cioè della sua reale entrata in funzione, quando ancora l'industria siderurgica doveva muovere i primi passi. Non si pensò quindi ad una tubazione di ghisa, come invece fu realizzata, ma di marmo di Carrara, materiale conosciuto ed utilizzato nella Repubblica di Genova di allora. Dovranno trascorrere però ben 110 anni affinchè il progetto diventasse esecutivo ad opera dello Storace che, nel 1770 presentò lo studio con due corsi di tubi di ghisa; motivazioni economiche, evidenziate dallo stesso Storace (risparmio di 1/4 del costo) indussero alla rinuncia della seconda tubazione parallela¹⁴.

Nel 1778 venne finalmente inaugurato il sifone che, fin dai primi giorni, presentava numerose perdite dalle giunzioni che si traducevano in un servizio discontinuo; si decise, nel 1793, di realizzare il raddoppio della tubazione, questa volta impiegando tubi di

Podestà, op. cit., nota 6 pag. 28.

¹⁴ Podestà, op cit. pag. 60.

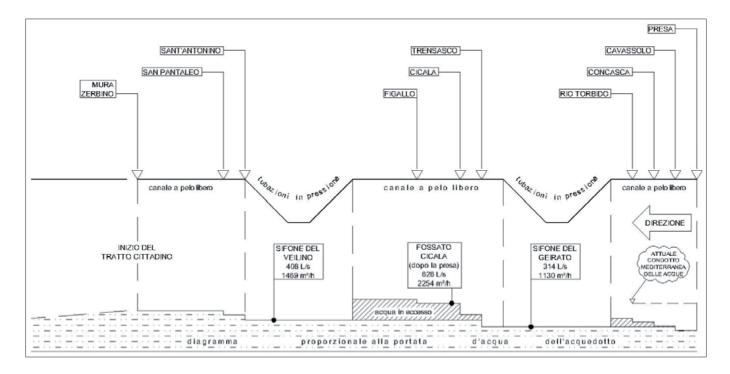


Fig. 15 - Flusso idrico in vari tratti dell'acquedotto relativamente al "Periodo 3"

Tab. 6 – Parametri idraulici e portata massima teorica per il sifone del Geirato con tubo di marmo

Dislivello	Δh (m)	6,75	
Lunghezza	L (m)	648	
Diametro interno	D (m)	0,37	
Rugosità	$\varepsilon_s(m)$	0,004	
Velocità	v (m/s)	1,4	
Portata	Q (L/s) Q (m ³ /h)	150 540	

marmo. Furono ordinati circa 800 tubi, la cui fornitura iniziò subito e si sarebbe dovuta completare in quattro anni: i tubi scolpiti venivano man mano trasportati e sistemati a piè d'opera. Tuttavia non vennero mai installati. I tubi di marmo già consegnati (il cui numero era ovviamente inferiore a 800) furono trasportati nella città ed impiegati in tratti sotterranei urbani della rete idrica. Alcuni di questi sono poi riemersi in successivi lavori di sistemazioni stradali ed esposti al pubblico. Allo stato attuale delle conoscenze, tre pezzi sono visibili nei giardini di villa Cambiaso (sede della Facoltà di Ingegneria), due sono nell'area industriale di Gavette (Fig.16), uno è presso i depositi di Mediterranea delle Acque di Genova Campi, e due sono attualmente esposti in uno spazio

di verde pubblico nelle vicinanze del ponte di Geirato.

Questi pezzi presentano lunghezze intorno a 1 metro (con delle differenze di alcuni decimetri) e diametro internodi circa 0,37 m. Si è pensato perciò di rilevarne il diametro interno e valutarne la rugosità superficiale al fine di calcolare l'ipotetica portata idrica del sifone del Geirato nel caso fossero stati messi in opera. Con procedimento analogo ai casi analizzati precedentemente (formula di Darcy-Weisbach-Colebrook) si è ricavata la portata teorica. I dati sono sintetizzati nella Tabella 6.

Si osservi che, a parità di diametro utile, la tubazione di marmo, a causa dell'elevata scabrezza, avrebbe trasportato un volume d'acqua inferiore a quello della tubazione di ghisa effettivamente realizzata.

2. VARIAZIONE DELLE SEZIO-NI IN ALCUNI PONTI-CA-NALE

Come precedentemente osservato, l'acquedotto, nel corso dei secoli, è stato oggetto di numerose modifiche di percorso, finalizzate a bypassare tratti franosi e instabili e garantire in tal modo maggior continuità di servizio di approvvigionamento idrico alla città.

Tali accorciamenti di percorso consistono, oltre ai due importanti sifoni già menzionati, in alcune gallerie e ponti-canale.



Fig. 16 – Tubo di marmo situato presso l'area industriale di Gavette (ex AMGA)

I ponti-canale costruiti a tal fine, come per esempio quello di Preli sul rio Figallo (Fig. 17), presentano pendenza anomala, e cioè maggiore del consueto 2‰ caratteristico dell'acquedotto storico.

Il motivo di tale peculiarità è semplice: nel costruire tali ponti, si dovette intervenire su una situazione già esistente, in cui il punto di partenza e quello d'arrivo erano assegnati dalla presenza del condotto.

La pendenza di codesti ponti-canale non è perciò imposta dalla volontà dei progettisti, ma dalla configurazione dell'acquedotto stesso.

Nessun espediente	Ponte canale	Ponte sifone	Sifone
Il condotto segue la vallata e l'attraversa		L'acqua del condotto entra in una tubazione che scende a valle. La parte più bassa della tubazione (ventre) viene comunque sostenuta da un ponte, per evitare che la pressione idraulica, dovuta al dislivello, faccia esplodere i tubi.	torrente e risale il versante opposto. La
Sviluppo tecnologico	AVI.		

Fig. 18 - Come un acquedotto può superare una vallata

Ma poiché ad un aumento della pendenza del canale fa seguito un aumento della velocità del flusso, ne consegue che la sezione bagnata si riduca. In tali circostanze è sufficiente un canale in muratura di sezione ridotta.

Ad un esame visivo effettuato ai nostri giorni, e cioè con l'acquedotto privo d'acqua, appare molto evidente tale riduzione della sezione del canale in prossimità di certi ponti, mentre assolutamente impercettibile è l'aumento della pendenza, trattandosi di valori non valutabili ad occhio.

In conclusione, i ponti canale dell'acquedotto storico non sono, dal punto di vista idraulico, tutti uguali.

Quelli nati contemporaneamente al canale, come ad esempio a Cavassolo, hanno sezione e pendenza congruente, mentre quelli costruiti successivamente al fine di accorciare il percorso, presentano pendenze maggiori.

3. REALE LUNGHEZZA DEI SIFO-NI E DEI PONTI SIFONI

Un'altra considerazione emersa ai margini del presente studio riguarda la reale lunghezza dei ponti sifone.

Ricapitoliamo, a beneficio del lettore, le tipologie di acquedotto che consentono di attraversare un avvallamento naturale del terreno (Fig. 18). La scelta da parte dei costruttori è condizionata dalle epoche storiche, e quindi



Fig. 17 – il ponte canale di Preli (1784)

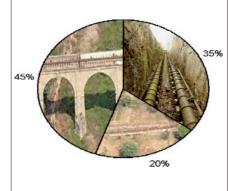


Fig. 19 – Giaciture del sifone del Geirato

della tecnologia disponibile al momento della costruzione.

Risulta perciò evidente, salvo clamorose e documentate eccezioni d'epoca romana¹⁵, che il periodo storico nel quale si fece ricorso ai ponti sifoni è limitato a poco più di un secolo, ovvero tra la fine del '700 e i primi decenni del '900, è cioè legato alla disponibilità di tubazioni metalliche (ghisa) che però resistevano a pressioni relativamente basse. Con l'avvento dell'acciaio si poterono finalmente produrre tubazioni adatte a sopportare pressioni maggiori: l'onere della costruzione del ponte per reggere i tubi non fu più necessario.

Rimane da chiarire un problema semantico, reso evidente dai sopralluoghi effettuati nel corso del presente studio. È corretto infatti asserire che la lunghezza di un ponte canale coincide con la lunghezza del canale da esso sostenuto, non altrettanto vero è per un ponte sifone. Il manufatto architettonico che si identifica col "ponte" non è necessariamente lungo come il tratto sifonato sostenuto, anzi, in genere è più breve.

In altre parole, tra le camere di carico/arrivo e il ponte vero e proprio, vi sono dei tratti in cui la tubazione corre a livello del piano di campagna. Tali tratti, ai fini delle corrette misurazioni, fanno parte del sifone idraulico, ma non devono essere considerati ponte. Il sifone del Veilino coincide sostanzialmente con il relativo ponte (393 m), mentre per quello sul Geirato (Fig. 19) attualmente sono stati misurati tratti sorretti dal ponte (45%, corrispondente a circa 290 m), altri appoggiati al piano di campagna (20%) e altri ancora in trincea, ovvero più bassi del livello del terreno circostante (35%).

ALLEGATO

SIFONI, SIFONI ROVESCI E CAR-TEGGIO BALIANO-GALILEI

Nel corso della presente trattazione si è parlato di sifone, intendendo un tratto di tubatura che collega due vasche posizionate sui versanti opposti di una vallata.

Sono giunti sino a noi importanti reperti sia di ponti sifone sia di ponti canale risalenti all'epoca romana; per il superamento di una valle era la profondità della stessa che dettava la scelta di una soluzione tecnica piuttosto che un'altra.

Il sostantivo sifone, ampiamente adoperato nel linguaggio acquedottistico, è però usato impropriamente.

La branca della fisica che tratta l'argomento, la meccanica dei fluidi, indica come sifone un tubo con forma a "\", mentre la configurazione a "U" viene chiamata sifone rovescio. Tale locuzione non è usata nel linguaggio acquedottistico italiano; al contrario in altri idiomi la distinzione è più sentita. In inglese, ad esempio, è usato con una certa frequenza inverted syphon anche in contesto acquedottistico. Per non generare equivoci, nel corso di questa appendice, indicheremo le due tipologie come suggerito dalla meccanica dei fluidi, ovvero con sifone un tubo configurato a "∩", e con sifone rovescio un tubo configurato a "U". Nelle applicazioni pratiche sia il sifone che il sifone rovescio non sono in realtà molto usati; un esempio di applicazione del principio del sifone è il travaso del vino dalla damigiana alla bottiglia mediante tubo di gomma, mentre il sifone rovescio è usato soprattutto nel sistema di scarico dei sanitari, dove assolve il compito di guardia idraulica, ovvero un "tappo liquido" che, chiudendo lo scarico stesso dopo l'uso, impedisce all'aria mefitica presente nelle fognature di penetrare negli

Dal punto di vista fisico i due principi sono completamente differenti e se oggi sono perfettamente note le leggi che ne governano i rispettivi funzionamenti, in passato non è stato così.

ambienti domestici.

Il funzionamento del sifone rovescio è assicurato dal principio dei vasi comunicanti, noto fin dall'antichità: come già accennato i romani lo usarono disinvoltamente, ad esempio per la realizzazione dei sifoni degli acquedotti di Lione.

Il sifone propriamente detto non si basa sullo stesso principio, bensì sulla spinta della pressione atmosferica che, com'è noto, venne scoperta soltanto nella prima metà del XVII sec. grazie agli studi di Galileo Galilei, il suo allievo Evangelista Torricelli e Giovanni Battista Baliano.

Il motivo di questo ritardo è da ricercarsi nel fatto che se realizzati in scala ridotta, un sifone ed un sifone inverso sembrano funzionare secondo lo stesso principio. Soltanto superando in altezza il limite della spinta atmosferica (10,33 m) il sifone non funziona più. Ma poiché tale limite è ampiamente superiore alle misure di un rudimentale gabinetto di fisica, per secoli gli scienziati non si resero conto dell'errore, non avendo occasione di incorrere in un esperimento non riuscito, che è quasi sempre alla base delle nuove scoperte scientifiche. Intorno al 1630 lo scienziato genovese G.B.Baliano fu

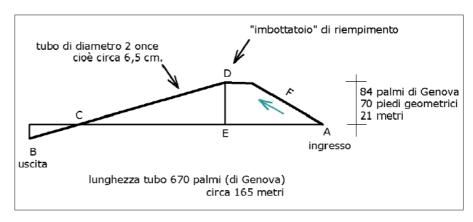


Fig. 20 - Schema dell'esperimento descritto da Baliano

chiamato alla sopraintendenza dei lavori dell'acquedotto. In tale veste ebbe modo di condurre un esperimento di cui si conserva memoria; non ci è dato sapere tuttavia se l'esperimento fosse propedeutico ad una modifica idraulica dell'acquedotto o se si trattasse di un'iniziativa del Baliano ai solo fini speculativi.

La descrizione dell'esperimento e le ipotesi formulate dal Baliano per spiegare il fallimento dello stesso, sono giunte a noi grazie a un carteggio avvenuto con Galileo Galilei tra il 27 luglio 1630 e il 24 ottobre dello stesso anno. La descrizione dell'esperimento, nella prima lettera di Baliano a Galilei, è la seguente (si tratta inequivocabilmente di un sifone):

"...Ci conviene far che un'acqua di due oncie di diametro in circa traversi un monte, e, per farlo, conviene che l'acqua salisca a piombo 84 palmi di Genova, che son circa 70 piedi geometrici; e per farlo habbiam fatto un sifone di rame, conforme il disegno inchiuso, ove CA è il livello, A ove si piglia l'acqua, B ove ha da uscire, D l'imbottatoio per dove si empie il sifone, DE l'altezza a piombo che l'acqua ha da salire" (Fig. 20).

Il Baliano non si riuscì a spiegare perché il sifone non abbia funzionato come previsto, e chiese lumi all'illustre Galilei che, come lui, non condivideva la teoria aristotelica.

Dalla risposta di Galilei, datata 6 agosto 1630, capiamo che lo scienziato pisano aveva già avuto occasione di studiare il problema che conosceva perfettamente, e fornisce al Baliano una risposta al quesito.

La spiegazione del fenomeno non è però corretta: Galilei assimila il sistema ad una "corda d'acqua" che, resiste a trazione fino a 40 piedi di dislivello. Oltre questa misura, similmente ad una corda di canapa, si spezza. Il Baliano replica con la lettera del 24 ottobre 1630 e, pur ringraziando delle spiegazioni fornite, si dice non convinto e fornisce una

serie di contro argomentazioni che sostanzialmente invalidano le spiegazioni di Galilei, di cui comunque conserva la massima stima.

In conclusione Galilei, pur essendosi in più casi impegnato nella risoluzione di vari problemi idraulici legati al trasporto delle acque, non si occupò mai direttamente di questioni specificatamente legate all'acquedotto di Genova, tanto meno della realizzazione del ponte sifone sul torrente Geirato a Molassana. Sebbene infatti l'imponente costruzione, a causa della varietà dei progetti presentati e della difficoltà dovuta all'estensione longimetrica per il superamento dell'ampia valle, richiamò all'epoca l'attenzione di importanti studiosi, non fu il caso di Galilei, per almeno un paio di motivi. Il primo è banalmente di natura cronologica, il ponte in questione venne infatti per la prima volta progettato nel 1660 (costruito nel quinquennio 1772-7 e definitivamente attivato soltanto nel 1793), ma in quella data lo scienziato pisano era già morto da tempo mentre lo studioso genovese era molto anziano. La seconda osservazione che va fatta è invece di natura tecnica e riguarda il fatto che il Baliano si trovò nell'impossibilità di adescare il sifone alto oltre venti metri proposto a Genova per il superamento di un colle, problema differente rispetto al superamento della valle del Geirato dove è impiegato un sifone rovescio.

RINGRAZIAMENTI

Si ringraziano: l'Ing. Paolo Ridella (Mediterranea delle Acque) per la supervisione alla parte idraulica, il sig. Luciano Rosselli per le preziose segnalazioni delle fonti bibliografiche, la sig.ra Jolanda Valenti Clari per l'assistenza fornitaci nell'inquadramento storico dell'intero lavoro.