

IDRAULICA.

Sulle tracce dell'acquedotto romano di Cagliari vittima dei Vandali e poi del cemento

I POCHI RITROVAMENTI ARCHEOLOGICI FORNISCONO SOLO I DATI ESSENZIALI SULL'OPERA

1. Premessa.

Il territorio roccioso e ondulato sul quale sorge la città di Cagliari è totalmente privo di sorgenti significative ed i Fenici che nel VII secolo a.C. si insediarono nella zona di San Paolo provvidero a dotare le loro umili dimore di piccole cisterne, dove raccoglievano l'acqua piovana, per le loro necessità quotidiane.

Dopo il 509 a.C., quando subentrarono ai Fenici nel dominio della Sardegna, i Cartaginesi trovarono una Cagliari che da modesto scalo commerciale era ormai diventata una piccola città, e provvidero ad arricchire il vecchio sistema idrico ideato dai Fenici con nuovi impianti sempre basati sul sistema di accumulo dell'acqua piovana in cisterne. Sulla sommità dei colli rocciosi di Tuvixeddu e di Tuvumannu scavarono innumerevoli canaletti di raccolta dell'acqua piovana, tuttora ben visibili, che alimentavano le capaci cisterne sottostanti, scavate nella viva roccia.

Nel 238 a.C. i Cartaginesi, sconfitti dai Romani nella prima guerra punica, cedettero loro la Sardegna, che divenne una provincia di Roma. Cagliari fu scelta dai conquistatori come sede del governo della nuova provincia e vide rapidamente aumentare la sua dimensione urbanistica e la popolazione. Tuttavia per le necessità idriche della città i Cagliaritari continuarono ad utilizzare il vecchio impianto, solido e funzionale, ereditato dai Cartaginesi, adeguandolo alle aumentate esigenze.

I grandi serbatoi idrici furono collegati tra loro. Le acque in essi raccolte furono convogliate nelle due camere di decontaminazione e distribuzione di *Sa Grutta* e *Santu Lemu* (San Guglielmo), da dove partivano i canali di distribuzione per i vari quartieri della città. Ma tutti questi accorgimenti ad un certo punto non bastarono più, e divenne urgente la

costruzione di un acquedotto che convogliasse verso la città le acque fresche di una sorgente, sul modello di quelli realizzati per la città di Roma.

Il *librator* (ingegnere idraulico) che nel 140 d.C. fu incaricato di progettare e costruire un acquedotto per aumentare la dotazione idrica della Carales romana poteva contare sulla plurisecolare esperienza dei suoi predecessori nella costruzione di opere idrauliche in tutte le contrade dell'impero, ed aveva a disposizione diversi manuali dove erano raccolte le principali regole da seguire per non incorrere in errori di progettazione o di costruzione.

Due di queste opere si sono fortunatamente salvate e, seppure con qualche lacuna, sono giunte fino a noi attraverso il prezioso lavoro dei copisti medioevali. La più importante è il "De aquis et aqueductibus urbis Romae" di Sesto Giulio Frontino, pubblicato nel 98 d.C., ma altrettanto importanti sono le notizie contenute nell'ottavo libro del "De Architectura" di Vitruvio. Sugli acquedotti di Roma si soffermano nelle loro opere anche Plinio nella sua "Naturalis Historia" ed altri autori come Evertino e Marziale.

L'acquedotto realizzato dai Romani per la città di Cagliari svolse egregiamente la sua funzione per oltre trecento anni, finché con la decadenza dell'Impero iniziarono le scorrerie dei Vandali d'Africa contro le coste meridionali della Sardegna e, nel 456 d.C., al ritorno da una incursione nel Lazio, essi occuparono Carales con altre città costiere della Sardegna. La città fu parzialmente abbandonata dai suoi abitanti e l'acquedotto fu danneggiato. Le continue razzie dei Berberi islamizzati completarono l'opera di distruzione dei Vandali: il flusso dell'acqua attraverso l'acquedotto fu definitivamente interrotto, causando la rovina, e dell'imponente opera si perse perfino la memoria.

L'AUTORE.

L'ingegnere **Romano Sandri**, iscritto all'Albo d'oro dell'Ordine di Cagliari, ha operato a lungo anche nel settore delle grandi opere idrauliche.

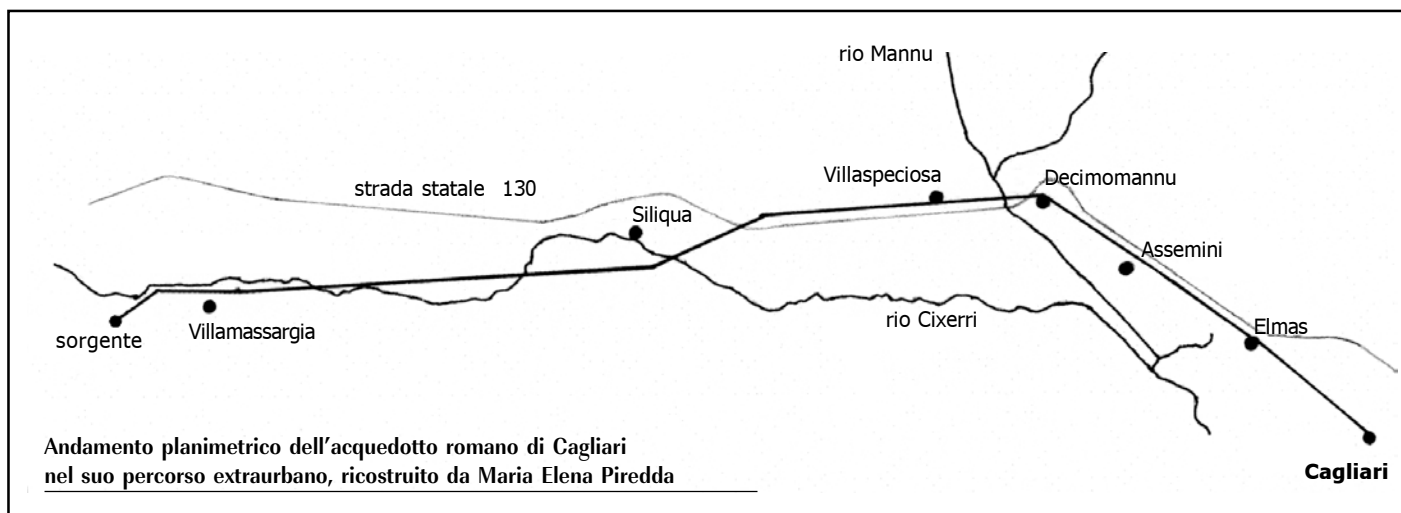
telefono: 070.493482

e-mail: rsandri@tiscali.it

Nella prima metà del 1700 si fecero sempre più frequenti i ritrovamenti archeologici che documentavano come anticamente la città di Cagliari fosse servita da un grande acquedotto. L'acqua allora in città scarseggiava, era di cattiva qualità e quella proveniente dai pozzi e dalle cisterne si pagava a caro prezzo. Il marchese di Saint Remy, in una lettera del 1728, asserisce che si faceva portare da Pisa la sua acqua personale.

In questo quadro si colloca il tentativo del cagliaritano dottor Gemiliano Deidda di recuperare l'antico acquedotto romano, in disuso da oltre mille anni. Le notizie in suo possesso sull'antica opera erano scarse, era convinto che le sorgenti dell'acquedotto si trovassero poco lontano da Cagliari. Il 14 settembre del 1761 iniziò gli scavi e riportò alla luce un tratto del condotto cittadino, ma la mancanza di un progetto e di un preciso piano di spesa per proseguire nell'opera di scavo decretò il fallimento del suo tentativo: nel 1763 i lavori furono interrotti, per non essere più ripresi.

Ottantaquattro anni più tardi, il geometra Francesco Pascalet ripeté il tentativo di recuperare l'acquedotto, pro-



ducendo una pregevole relazione ed una livellazione su un lungo tratto del condotto extraurbano. Ma le critiche alla sua opera da parte di una commissione presieduta dall'architetto Cima, il quale sosteneva che le sorgenti dell'antico acquedotto andavano ricercate sui monti di Dolianova, fecero naufragare anche questo tentativo.

Si deve alla valente archeologa Maria Elena Piredda, che nel 1975 pubblicò in "Studi Sardi" un aggiornato ed approfondito studio sull'acquedotto romano di Cagliari, la descrizione di quanto rimaneva di quest'opera, che per la sua grandiosità poteva rivaleggiare con il ben più celebre anfiteatro romano della città.

2. Lo schema costruttivo.

Per oltre cinquecento anni i Romani costruirono centinaia di acquedotti seguendo sempre lo stesso schema costruttivo, ereditato molto probabilmente dagli Etruschi e dai Greci che a loro volta avevano tratto dai Babilonesi e dagli Egizi le basi delle loro più antiche conoscenze scientifiche e meccaniche.

In particolare gli acquedotti romani erano composti da:

- una sorgente o *incile*, intendendo con questo termine, oggi poco usato, il complesso delle opere di captazione e di imbocco delle acque nel canale che doveva convogliarle verso la città;
- una *piscina limaria*, un bacino creato per la decantazione dell'acqua, che poteva essere originato da una semplice espansione del canale di adduzione o da un serbato attiguo,

suddiviso in più ambienti, per una depurazione più efficace;

- un *rivus* o canale adduttore che correva sotterraneo o poggiava su muri o arcuaciones e talvolta attraversava le montagne in una galleria chiamate *specus*, ventilata e illuminata da *lumina* o *putei*; il rivus doveva mantenere una leggera pendenza per assicurare all'acqua un deflusso naturale e regolare, a velocità contenuta;
- castelli idraulici che ripartivano l'acqua in città;
- tubazioni in piombo e più raramente in terracotta, che collegavano tra loro i vari castelli, la dimora dell'imperatore ed in casi eccezionali anche le abitazioni private più prestigiose.

Questo schema fu fedelmente seguito anche nella costruzione dell'acquedotto di Cagliari ed è interessante esaminare singolarmente le poche opere rimaste che lo componevano, per comprenderne il funzionamento.

3. La sorgente.

I Romani non possedevano i nostri sofisticati strumenti per l'analisi batteriologica dell'acqua e per determinare le qualità organolettiche che ne sanciscono la potabilità. La scelta della sorgente di un acquedotto era basata pertanto su procedimenti empirici ben illustrati da Vitruvio nel libro VIII del suo *De Architectura*. Per essere giudicate idonee, le acque che scorrevano all'aperto dovevano essere pure e limpide, senza tracce di muschi o di giunchi nelle loro vicinanze; inoltre le persone del luogo

dovevano avere un fisico robusto, un colorito florido, le gambe senza difetti e gli occhi privi di infiammazioni.

Differente era la prova che dovevano superare le acque di una nuova fonte, ottenuta da uno scavo profondo, per essere giudicate idonee. Versate in un recipiente di bronzo di Corinto, non dovevano lasciare macchie, e se fatte bollire nello stesso recipiente non dovevano lasciare residui di sabbia o fango. Inoltre i legumi fatti bollire in una pentola dello stesso materiale dovevano giungere rapidamente a cottura completa.

La prova del vaso di Corinto per determinare la purezza dell'acqua è ricordata anche da Plinio e da altri autori, sembra quindi che fosse quella preferita dai tecnici romani per decretarne la potabilità. Quello di Corinto era il tipo più pregiato di bronzo e secondo gli antichi era ottenuto con una lega di rame, stagno, oro e argento, temperata nelle acque della fonte Pirene. La tradizione voleva che gli oggetti di bronzo, di oro e di argento fusi insieme nell'incendio della città di Corinto, conquistata dal console Mummio nel 146 a.C., avesse casualmente prodotto la lega, che ebbe una grande fortuna alla fine dell'età repubblicana e nel periodo imperiale.

Anna Maria Piredda nel suo studio ricorda che nel 1835 l'abate Vittorio Angius eseguì un'indagine sui resti dell'acquedotto romano di Cagliari, descrivendo accuratamente tutto quanto rimaneva di questa magnifica testimonianza delle capacità dei costruttori. Egli trascurò però di indagare con uguale diligenza sull'ubicazione della sorgente che lo alimentava, limitandosi a confermare

l'opinione, allora comune, che l'origine dell'acquedotto si trovasse sui monti di Domusnovas. Tutti gli autori successivi sposarono acriticamente questa tesi; solo in un documento della raccolta arborense, ritenuto falso, si affermava con certezza che la sua origine era «a loco vocato Caput Acquarum».

Dopo un accurato e ripetuto esame del terreno, la Piredda scartò definitivamente l'ipotesi che l'origine dell'acquedotto potesse trovarsi sui monti di Domusnovas e concentrò la sua attenzione sulle due località che nel Cixerri sono entrambe chiamate *Capudacquas*. Accertò inequivocabilmente che la piccola sorgente con questo nome, che si trova nel territorio di Barbusi, non poteva in nessun caso alimentare la grande opera ideata dai Romani; non rimaneva quindi che ritrovare l'altra sorgente con lo stesso nome.

Dopo ulteriori ricerche, l'attenzione della Piredda si fermò, in territorio di Villamassargia, su un colle alto appena 116 metri, detto monte Ollastu, dai cui fianchi sgorga una copiosa sorgente di acqua limpidissima. La studiosa ritenne che quella fosse la sorgente dell'acquedotto e trovò conferma in una nota contenuta nel volume sulla "Sorgenti Italiane" pubblicato dal Servizio Idrografico del Ministero dei Lavori Pubblici dove, a proposito della sorgente di Capudacquas, si legge: «esistono tracce di un acquedotto romano; sembra che le sue acque fossero in tempi remoti convogliate per alimentare la città di Cagliari».

Non solo: in un volume sulla Sardegna pubblicato dal Corona nel 1895, sotto la voce Villamassargia si legge: «In vicinanza del Capudacquas veggonsi vestigia di un acquedotto ancora ben conservato». Ma l'indizio più interessante si nasconde forse nel toponimo della località. I Romani infatti chiamavano *Caput Aquas* tutte le località dove avevano origine gli acquedotti che costruivano, ed il nome si è conservato quasi inalterato, come toponimo, anche per le sorgenti dell'acquedotto di Cagliari.

Il monte Ollastu è costituito da stratificazioni di calcari e dolomie intercalati da strati argillo-scistososi che rendono l'acqua della sorgente rispondente ai requisiti di potabilità, purezza, inalterabilità e leggerezza postulati da Vitruvio. Inoltre l'acqua sgorga dai fian-

chi della montagna ad una temperatura costante di 16 gradi, ritenuta ottimale da Vitruvio e dagli altri autori.

Durante gli anni 1928-1932 il Genio civile di Cagliari misurò la portata della sorgente, ottenendo i seguenti risultati, riportati dalla Piredda nella sua relazione:

29 ottobre 1928: 0.108 metri cubi al secondo
3 gennaio 1929: 0.147 metri cubi al secondo
2 ottobre 1931: 0.070 metri cubi al secondo
20 aprile 1932: 0.217 metri cubi al secondo
16 ottobre 1932: 0.182 metri cubi al secondo

Si nota subito che la portata della sorgente, piuttosto discontinua, è legata alla piovosità sull'isola, ma la sua portata media di 150 litri al secondo da sola non era compatibile, come si vedrà, con le dimensioni dello specus dell'acquedotto progettato dai romani.

4. La captazione o incile.

In generale, sul tipo di allacciamento delle venature e sul modo di convogliarle nel canale si sa poco, ma dallo studio dei resti archeologici di molti acquedotti si può dedurre che la captazione doveva essere di molteplici tipi. Nel caso di sorgenti e vene sotterranee o di eventuali correnti di superficie, le acque erano raccolte in un bacino in muratura, impermeabilizzato in *opus signinum*, dal quale di solito defluivano in un bacino di decantazione chiamato piscina limaria, associato al canale di presa, e quindi l'acqua entrava nel canale adduttore denominato specus.

Nel caso dell'acquedotto di Cagliari è probabile che gli architetti abbiano seguito questo sistema, captando le acque della sorgente di *Capudacquas* e di altre sorgenti, ma del bacino di raccolta e delle opere che dovevano precedere l'immissione dell'acqua nello specus non è stata finora scoperta alcuna traccia, per cui nulla si può dire in proposito.

5. La piscina limaria.

L'acqua derivata con questo sistema era convogliata nella piscina limaria, una vasca sufficientemente ampia, progettata per rallentare la velocità dell'acqua e quindi permettere la precipitazione delle particelle in sospensione e di altre impurità presenti nell'acqua della sorgente. In generale, da un punto di vista funzionale, si può rappresentare

schematicamente la piscina come una semplice vasca ottenuta dall'espansione del canale dell'acquedotto in asse con il suo tracciato, oppure come un serbatoio costruito lateralmente al tracciato dell'acquedotto. Con questa seconda disposizione si aveva il vantaggio di permettere l'espurgo delle particelle depositate senza dover interrompere il flusso dell'acqua.

Ma gli architetti romani adottarono anche soluzioni più complesse, come quella di costruire quattro celle comunicanti tra loro con aperture di sezioni modeste, in modo da rendere più lungo e tortuoso il percorso dell'acqua a bassa velocità. In questo tipo di impianto la depurazione avveniva per quattro stadi successivi, interessando particelle via via più piccole, con una depurazione di gran lunga più efficace.

Nel caso dell'acquedotto di Cagliari una labile traccia di questa importante opera forse esisteva ancora nel 1895 e ad essa si riferiva il Corona parlando di vestigia ancora ben conservate. Alcuni resti archeologici, che gli studiosi interpretano come piscine limarie, sono presenti nella rete cittadina, costruite molto probabilmente per depurare le acque piovane, che si mescolavano con quelle dell'acquedotto.

6. Il canale adduttore.

Il trasporto dell'acqua si può effettuare in due modi: mediante condotte in pressione oppure con canali non in pressione, ossia, come si suol dire, a superficie libera. Anticamente gli studiosi erano convinti che i Romani avessero costruito i grandiosi archi che sostenevano i loro acquedotti perché non conoscevano il principio dei vasi comunicanti. In base a questo principio, per attraversare una valle con un acquedotto è sufficiente costruire una vasca su un versante della valle ed un'altra, a quota leggermente più bassa, sul versante opposto. Collegandole con un tubo, l'acqua si trasferirà da una vasca all'altra, per il fatto che a determinare l'equilibrio è l'uguaglianza delle pressioni agenti sul pelo libero dell'acqua contenuta nelle due vasche.

I Romani conoscevano bene il principio, ma per l'opera di adduzione lo sfruttarono solo in alcuni acquedotti di provincia di modesta portata. Per rifornire d'acqua le città i Romani usarono

quasi esclusivamente il sistema *a pelo libero*, consistente nel far scorrere l'acqua in un canale, dando a questo una giusta pendenza chiamata *libramentum* o *declivitas*. Il sistema permetteva all'acqua di scorrere per effetto della sola forza di gravità, senza peraltro raggiungere una velocità talmente elevata da compromettere la stabilità o la durata della struttura portante.

Questa scelta richiedeva che la sorgente fosse posta ad una quota superiore a quella del castello terminale, come appunto nell'acquedotto di Cagliari, e che la quota del canale adduttore dovesse diminuire continuamente lungo il suo percorso. È intuitivo che il problema si complicava dinnanzi ad ostacoli naturali, come monti o valli, e si riduceva al modo di superarli senza perdere più quota del necessario. Il risparmio della quota era il parametro importante da tenere presente nella scelta del tracciato, perché essendo Cagliari sviluppata su colli, permetteva di servire anche gli utenti dei luoghi più elevati della città. Quindi un modesto aumento di quota, anche di qualche metro, poteva ampliare molto il cerchio di utilizzo di quell'acqua.

Se il monte interposto non era molto elevato, veniva perforato. Se ciò non era possibile, si ricorreva alla costruzione di un canale a mezza costa, allungando in tal modo il tracciato e, eventualmente, rendendolo più tortuoso. Problema simile ma inverso sorgeva nel caso di valli. Se non erano molto profonde ed ampie, si procedeva senz'altro alla costruzione di arcate per mantenere la quota del canale. In caso contrario si costeggiava la valle con percorsi che possono somigliare alle linee di livello delle moderne carte geografiche.

Per l'acquedotto di Cagliari non fu necessario ricorrere a queste costose deviazioni e il suo tracciato si sviluppava in lunghi rettilinei con qualche breve galleria, e delle modeste *arcuationes* in corrispondenza dei punti più depressi.

La pendenza. La scelta di usare il sistema *a pelo libero* per il trasporto dell'acqua dalla sorgente al castello terminale poneva agli architetti romani il delicato problema della pendenza da dare al canale, affinché l'acqua potesse vincere la perdita di carico e fluire con una velocità non pericolosa per la stabilità dell'opera. Gli autori latini chiamano

la pendenza *declivitas*. Questo importante fattore, insieme agli altri relativi alla configurazione del terreno tra la sorgente e la città, determinava la lunghezza dell'acquedotto.

Vitruvio consiglia una pendenza molto bassa: «*solumque rivi libramenta habeat fastigata ne minus in centenos pedes sicilico*» (e il letto del canale abbia una pendenza livellata di non meno di un sicilico per cento piedi). In Plinio si trova la stessa affermazione: «*libramentum aquae in centenos pedes sicilici minimum erit*». Tenuto conto che il sicilico corrisponde ad $\frac{1}{4}$ di pollice, la pendenza consigliata è quindi dello 0,0208%, ovvero circa 0,20 metri per chilometro.

L'affermazione di Vitruvio e di Plinio, apparsa palesemente troppo bassa, fu poi così corretta: «*ne minus per centenos pedes semipede*», ossia una pendenza non inferiore allo 0,5%. Faventino invece consiglia una pendenza dell'1,5%, per impedire che un flusso troppo lento della acqua incrostasse di calcare le pareti del canale, e Palladio una pendenza compresa tra 0,94 e 2%. In realtà la mensura *declivitas* non ha mai seguito i valori suggeriti da questi autori e, dalle misurazioni effettuate con moderni strumenti, risulta che la pendenza media degli acquedotti costruiti per la città di Roma è circa dello 0,20%.

La pendenza dell'acquedotto di Cagliari non si discosta molto da questo valore medio. Tenuto conto infatti delle opere di captazione e della piscina limaria, si può ritenere che l'imbocco del canale adduttore fosse posto ad una quota di 112 metri sul livello del mare. I resti dello speco rinvenuti alle porte di Cagliari si trovano ad una quota di circa 11 metri, per cui la pendenza media del canale risulta dello 0,22%, molto prossima a quella media degli acquedotti che rifornivano l'antica Roma.

Lo specus. Lasciata la sorgente, attraversata l'opera di captazione e la piscina limaria, l'acqua entrava in un canale che i Romani chiamavano *specus*. Con questo nome in origine gli autori antichi indicavano solo il tratto di acquedotto in galleria; successivamente, per estensione, *specus* fu chiamato l'intero canale adduttore dalla sorgente al castello terminale. Era quasi sempre costruito in muratura, sia che l'acquedotto

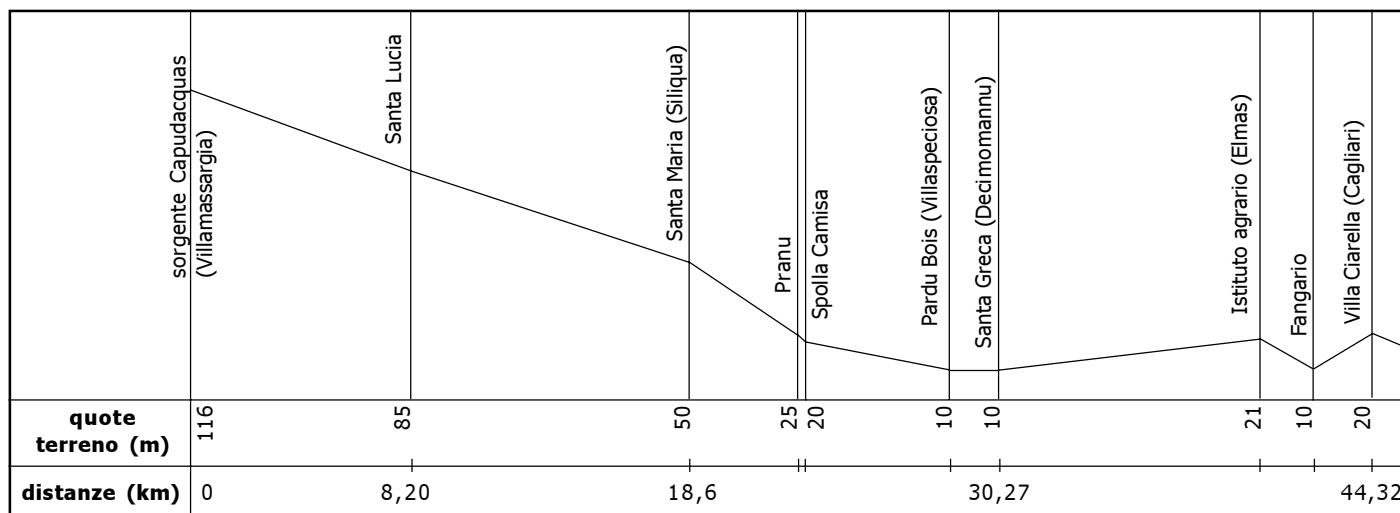
corresse sotterraneo, sia che attraversasse e superasse le depressioni del terreno per mezzo di costruzioni costituite da alti muri massicci o da arcate.

A questo proposito Vitruvio raccomandava: «La muratura sia il più solida possibile (...) e queste costruzioni in muratura siano fatte a volta, in modo che il sole non colpisca l'acqua». La funzione della volta che copriva il canale era quella di riparare l'acqua dal calore del sole e dall'inquinamento, per cui sono rare le attestazioni di canalizzazioni scoperte e sempre limitate a brevi tratti. La forma geometrica della copertura non era costante lungo tutto il percorso, ma per un tratto poteva essere piana, quindi a volta e, ancora, triangolare e a semiesagono; sono presenti anche coperture ad ogiva. È curioso osservare come questa importante raccomandazione di Vitruvio sia stata completamente ignorata nella costruzione dei moderni canali che portano l'acqua al Campidano.

Dice poi Vitruvio: «Ma se fra le mura della città e la sorgente d'acqua si frappongono montagne, bisognerà procedere a scavare gallerie sotterranee, livellandole secondo la pendenza precedentemente indicata». I tratti di acquedotto in galleria erano areati ed illuminati da pozzi verticali chiamati *lumina* che, secondo Plinio, dovevano essere disposti, in asse con la galleria, ad una distanza di due *actus*, ossia circa 72 metri. In un tratto dell'acquedotto di Cagliari che corre in sotterraneo alla profondità di circa 11 metri dal piano di campagna, si è recentemente accertato che i *lumina* si aprono, lungo il suo asse, a circa 70 metri l'uno dall'altro, ed hanno una sezione rettangolare compresa tra i 70x70 e gli 80x80 centimetri.

Sebbene nell'economia generale dei lavori questi pozzi possano sembrare costosi, in realtà nella perforazione di una lunga galleria rendevano possibile un lavoro simultaneo in più tratte, permettendo il contemporaneo utilizzo di maggiore manodopera, riducevano i tempi di scavo, ed evitavano grossolani errori di tracciato. I pozzi infatti, scavati all'esatta profondità del fondo della galleria, consentivano di correggere facilmente eventuali errori di scavo nelle brevi tratte che separavano due pozzi contigui.

Nei grandi acquedotti che riforni-



Il profilo altimetrico del terreno attraversato dall'acquedotto romano di Cagliari nel suo percorso extraurbano.

vano Roma le pareti dello speco erano in pietra (tufo o peperino), con i conci connessi tra loro talvolta con grappe di ferro e saldate nella pietra con una colata di piombo. Nei più modesti acquedotti di provincia lo speco era in *opus caementicium* con la cortina interna ed esterna in laterizio con o senza *opus testaceum*. È con questa tecnica costruttiva che è stato realizzato anche lo specus dell'acquedotto di Cagliari.

Planimetricamente l'opera, dalla sorgente al castello terminale, incontrava solo modesti rilievi e brevi depressioni per cui, secondo la descrizione della Piredda, dal *castellum* di Cagliari a Siliqua correva parallelamente alla strada statale Iglesiente, accompagnandola sulla destra, per poi dirigersi verso Villamassargia fino alla sorgente di Capudacquas.

Collegando con un profilo virtuale i punti dove fino alla seconda metà del secolo scorso erano ancora visibili dei resti archeologici dell'acquedotto si nota che nei primi 30 km, fino a Villaspeciosa, la maggior pendenza del terreno aveva consentito di realizzare un'opera prevalentemente interrata. Negli ultimi 19 km invece, fino al *castellum* terminale di Cagliari, l'acquedotto era costruito su muri o arcuaciones, con alcuni tratti in galleria.

Lo specus dell'acquedotto di Cagliari è stato quasi interamente cancellato dai mezzi meccanici, sempre più potenti, che gli agricoltori impiegano per arare i loro poderi. Da questa distruzione si sono salvati in parte solo alcuni

tratti in galleria. Per avere quindi un'idea di come fosse realizzato lo specus bisogna ricorrere alle relazioni degli antichi studiosi che in passato ebbero la fortuna di studiarne alcuni tratti, ancora ben conservati, e di comprenderne il funzionamento.

Il geometra Francesco Pascalet ha lasciato scritto che nel tratto compreso tra il rio Cixerri e Santa Maria di Siliqua «l'acquedotto scolpito in durissima roccia è stato da noi sgomberato per una lunghezza di metri venti. Il canale ha le medesime dimensioni ch'esso porta verso Cagliari e Villaspeciosa, cioè un metro sui lati perpendicolari, oltre la volta che ivi è stata rotta, e metri 0.60 di larghezza». Dopo aver pulito un tratto di canale, il Pascalet ha potuto osservare che il suo fondo era rivestito di piastrelle poste di traverso, larghe metri 0,40 e lunghe quanto è largo il canale, assicurate al fondo e ai lati con una cornice di smalto contro gli angoli.

Maria Elena Piredda, esaminando attentamente altri resti archeologici del tratto extra urbano dell'acquedotto, conferma che la tecnica usata nella sua costruzione era quella dell'*opus caementicium*. Tale tecnica edilizia, inventata dai Romani nel II secolo d.C., consisteva in una mescolanza di malta e di pietre grezze, o frammenti spezzati di pietre, chiamati *caementa*. La malta a sua volta era costituita da calce mescolata con sabbia di fiume a grana grossa. Nei tratti emergenti il paramento esterno dei muri che contenevano lo specus era rivestito in *opus testaceum*, realizzato con mattoni

cotti in fornace, di produzione locale.

Internamente, sul fondo e sulle pareti, un intonaco in *opus signinum* dava al canale la necessaria impermeabilità. Questo tipo di intonaco era ottenuto aggiungendo alla tradizionale malta di calce della polvere di mattoni, ricavata dalla macinazione di laterizi vari cotti al forno, per rendere l'intonaco più compatto ed impermeabile. Era un materiale di invenzione punica, che prendeva il nome dalla città di Signa dove, secondo la tradizione, i romani lo avevano usato per la prima volta.

Negli acquedotti romani le sezioni del canale dipendono in modo approssimato dalla portata dell'acqua e frequentemente, nello stesso acquedotto, la sezione varia da luogo a luogo, diminuendo e crescendo senza che apparentemente ne risulti evidente il criterio operativo. Ciò accade indipendentemente dal fatto che la portata sia costante o vi siano spillamenti.

L'acquedotto di Cagliari non sfugge a questa regola. Così, mentre il Pascalet afferma che la parte utile dello speco da lui misurata, esclusa la volta di copertura, aveva una sezione rettangolare di 0,60x1,00 metri, la Piredda sostiene che lo speco nel tratto extra urbano misurava metri 0,70 circa. Il rilievo recente effettuato su un tratto di condotto in galleria in territorio di Elmas ha dato una larghezza dello stesso variabile tra i 60 e gli 80 centimetri ed un'altezza di metri 1,20 all'apice della volta.

Gli archeologi hanno osservato delle aperture sulle pareti del canale,

poco sotto l'imposta della copertura, e ritengono che queste aperture fossero un sistema di sicurezza per evitare che, in caso di piena, il canale andasse in pressione, provocando la disastrosa rimozione della copertura o, peggio ancora, il crollo delle pareti.

Le arcuationes. Ma la parte più spettacolare degli acquedotti romani era la tecnica a cui ricorrevano per attraversare le depressioni del terreno, costruendo una successione di archi per sostenere il canale ad una prestabilita altezza dal suolo, conservando la necessaria pendenza. Gli archi erano delle strutture tipiche dell'architettura romana che permettevano di superare, nel modo più economico, sia fossi che ampie valli, quando l'altezza dal suolo superava i due metri. Erano anche costruzioni molto solide e durevoli nel tempo, e l'impiego delle arcuationes si affaccia negli acquedotti sin dai primordi della loro costruzione.

Il materiale utilizzato nella costruzione delle arcate variava secondo l'epoca, ma quelli preferiti erano il tufo peperino e il travertino, presenti in formazioni molto estese nella pianura laziale. Alla comparsa del laterizio, avvenuta sotto Silla, tali materiali furono talvolta sostituiti da muratura in *opus caementicium* rivestita esternamente di *opus reticulatum* oppure di una semplice cortina di laterizi triangolari.

In generale, nell'arco il rapporto pieno/vuoto è circa 1:2,50, mentre il rapporto altezza/larghezza non è definibile, in quanto varia con la conformazione del terreno. La sezione in pianta dei pilastri dipende ovviamente dal carico sostenuto. Ad esempio, è di m 2,30 x 2,10 con una luce di m 7,75 nel caso degli archi neroniani; in taluni punti questi piloni si innalzano sino a 17 metri.

Ci si può fare un'idea di come fossero realizzate le arcuationes dell'acquedotto di Cagliari osservando alcuni ruderi, che si sono conservati, dell'acquedotto romano di Olbia, costruito anch'esso con la tecnica dell'*opus caementicium*.

Il castellum. Nella parte terminale dell'acquedotto, gli architetti romani costruivano un *castellum* che nella sua struttura più semplice era una torre rettangolare con un serbatoio sulla sommità. Questa struttura dapprima fu chia-

mata *dividicula* ed in seguito *castellum*, con termine derivato dal linguaggio militare, forse perché con la sua struttura imponente e massiccia ricordava una fortezza.

Il compito del castello idraulico era quello di distribuire una parte dell'acqua agli utenti e immettere la restante in un acquedotto secondario che alimentava altri punti della città. Spesso l'acqua attraversava più castelli prima di giungere all'utente. In effetti i privati non potevano attingere acqua direttamente dai canali ma solo dal castello, per non indebolire con il gran numero delle perforazioni le pareti del canale. Così dal *castellum publicum* una sola tubazione conduceva acqua in un *castellum privatum*, da dove poi ciascun utente prelevava la sua spettanza.

Roma disponeva di un gran numero di castelli idraulici. Agrippa, durante l'impero di Augusto, ne aveva costruiti circa 130, la maggior parte adornati con grande munificenza, come racconta Plinio. Al tempo di Frontino, un secolo più tardi, se ne contavano circa 247.

A Pompei esiste tuttora intatto un castello terminale. L'acqua entrava nel castello attraverso un canale ed era ripartito nella proporzione voluta tramite tre tubazioni che rifornivano le terme, i servizi pubblici ed i privati. Le tubazioni erano poste sul lato opposte del canale d'entrata, in modo da mantenere l'acqua in lento ma costante movimento all'interno del castello. A Roma, nel Museo nazionale romano si trova il plastico, costruito nel 1939, del castello terminale di distribuzione dell'acquedotto di Nimes. Addetti alla sorveglianza dei castelli idraulici erano i *castellarii*, probabilmente con la propria dimora annessa a tali edifici.

Le tubazioni di prelievo dell'acqua erano applicate al castello mediante il calice. Era questo un tubo di bronzo della forma all'incirca tronco conica, della lunghezza minima di 22 cm e con un tratto ad uniforme diametro interno. Tale diametro doveva continuare costante ed eguale per circa 15 metri in un tubo di piombo saldato al calice.

Anche l'acquedotto di Cagliari terminava in un *castellum* del quale finora non è trovata traccia. Esso era ubicato molto probabilmente in piazza Sant'Avendrace, alla confluenza delle

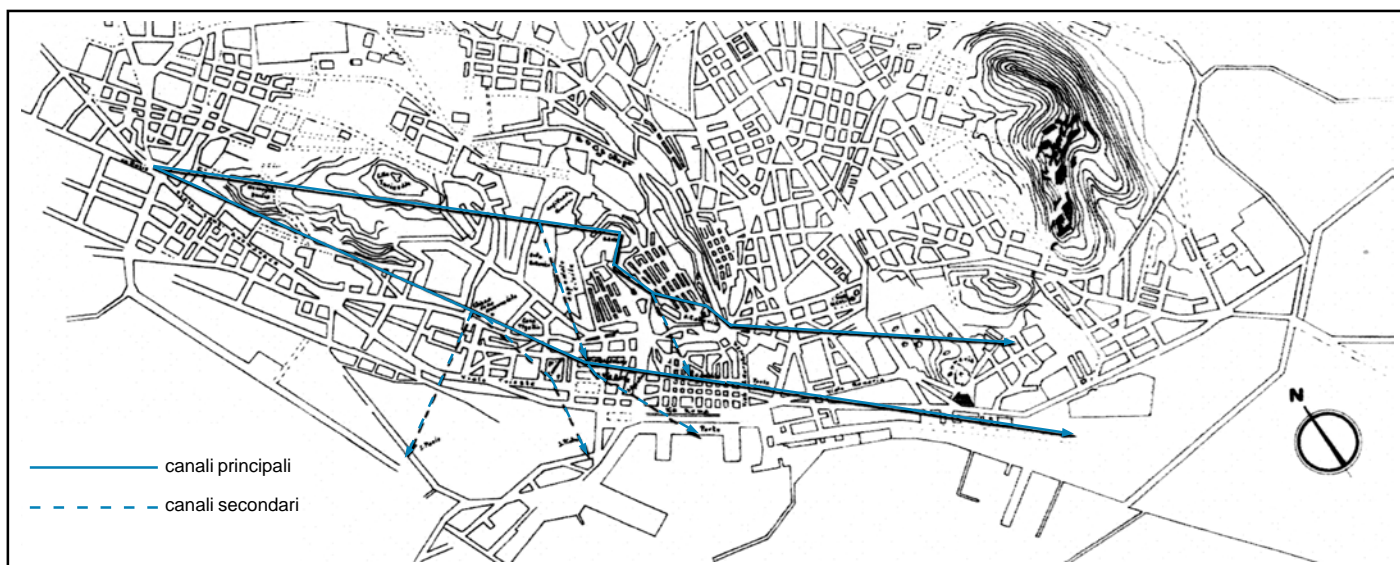
due strade statali, da dove si dipartivano due canali sotterranei che alimentavano i serbatoi ed i castelli della città.

La portata. All'inizio del suo incarico di *curator aquae*, Frontino volle verificare le quantità che giornalmente gli acquedotti allora in esercizio erano in grado di fornire alla città di Roma. Purtroppo espresse i risultati delle sue misure in quinarie e ancora oggi non c'è accordo tra gli studiosi sull'esatto significato da dare a questo termine. Il tentativo di stabilire se si trattasse di una portata, oppure di un volume, o della sezione dello specus rimase a lungo infruttuoso, finché nella prima metà del secolo scorso, attraverso una serie di prove sperimentali e calcoli teorici, si stabilì per la quinarie il valore di 0,48 litri al secondo, ossia di 41,5 metri cubi nelle 24 ore.

Sulla base di questo valore della quinarie, e delle quinarie calcolate da Frontino alla sorgente di ciascun acquedotto, si dedusse che la portata teorica degli acquedotti di Roma all'epoca dei suoi rilievi era di 11.692,8 litri al secondo, e che in ventiquattro ore avrebbero potuto affluire a Roma oltre un milione di metri cubi d'acqua.

Secondo Maria Elena Piredda la portata minima effettiva dell'acquedotto di Cagliari era di 5.000 metri cubi al giorno. La studiosa pose alla base dei suoi calcoli la portata minima di 70 litri al secondo misurata alla fonte di *Capudacquas* nell'ottobre del 1931. In realtà, volendo calcolare la portata di un canale adduttore come quello progettato dai Romani, largo 60 centimetri e alto un metro, si incontrano notevoli difficoltà, per la sua forma particolare e per la scelta del coefficiente di scabrezza delle pareti e del fondo. Con la formula semplificata di Kutter, ponendo $m = 0,23$ e $J = 0,0022$ si trova una velocità media di 0,97 m/sec e quindi una portata di 0,50 m³/sec. Ripetendo il calcolo con la più recente formula definita dal laboratorio di idrologia dell'Università di Stoccarda, si trova un risultato analogo, ossia una portata giornaliera teorica di 44.000 metri cubi.

Tenuto conto che secondo Frontino solo la metà di quest'acqua giungeva alla città, a causa di perdite lungo il percorso, spillamenti clandestini e furti occasionali, si può ritenere che la città po-



Percorso urbano dei due canali principali dell'acquedotto romano di Cagliari (da Maria Elena Piredda in "Studi Sardi").

tesse disporre effettivamente con il nuovo acquedotto di circa 20.000 metri cubi d'acqua al giorno.

Gli ingegneri tedeschi che hanno studiato accuratamente l'acquedotto Eifel, realizzato dai Romani nell'Ottanta d.C. per alimentare la città di Colonia, che aveva la stessa sezione ed era costruito con la stessa tecnica, sono giunti alla conclusione che, come quello cagliaritano, esso garantiva alla città un apporto medio giornaliero di 20.000 metri cubi d'acqua.

La rilevante differenza tra la portata della sorgente di Capudacquas e quella per la quale era dimensionato lo specus, suggerisce l'ipotesi che gli ingegneri romani convogliassero nella piscina limaria anche le acque di altre sorgenti, comprese quelle provenienti dai monti di Domusnovas, rendendo l'ipotesi degli studiosi settecenteschi, che hanno sempre insistito sul loro utilizzo per alimentare l'acquedotto di Cagliari, abbastanza attendibile.

7. La rete cittadina.

Dal castellum aquae situato nei pressi di piazza Sant'Avendrace avevano origine i due rami principali dell'acquedotto cittadino, che correvano in prevalenza sotterranei e si sono conservati solo nei tratti scavati nella dura roccia. Il ramo alto attraversava gran parte della necropoli punica sul colle di Tuvixeddu, intersecando anche alcune antiche tombe. Lo specus scavato in roccia ha una larghezza di 55 centimetri ed un'altez-

za che, nei punti in cui si è conservata la copertura, misura 3,10 metri. Il canale proseguiva quindi fino ad alimentare due cisternoni ed una piscina limaria probabilmente già esistente, situata nell'attuale Orto botanico. Qui doveva esistere anche un castellum che serviva gli edifici pubblici e gli abitanti della zona. Secondo la Piredda «da qui proseguiva per grande serbatoio di Santu Lemu precedentemente costruito, dove sorgeva anche una piscina limaria ed un altro castellum, da cui partiva la rete di distribuzione che riforniva la parte orientale della città e che, passando da Santa Caterina, proseguiva fino a raggiungere il quartiere cittadino che si accentrava nel luogo dell'odierna chiesa di San Saturnino».

Il ramo basso invece, considerato il più importante in quanto attraversava longitudinalmente quella parte della città sorta dopo l'occupazione romana, correva parallelamente a via Sant'Avendrace, giungeva in via Trento, passando proprio dietro il liceo Siotto, dove è ancora visibile un tratto dalle dimensioni imponenti (2,40 x 2,70), evidentemente frutto di manipolazioni successive. Lo specus correva quindi parallelamente al corso Vittorio Emanuele passando dietro la chiesa dell'Annunziata, dove alimentava un serbatoio di distribuzione. Proseguiva poi verso via Malta e tagliava il largo Carlo Felice all'altezza di via Mameli e dopo aver attraversato piazza Savoia e piazza Sant'Eulalia, giungeva fino alle pendici occidentali del colle di

Bonaria.

Questi resti dell'acquedotto sono oggi difficilmente visitabili, perché inglobati in costruzioni anche recenti, e quindi di fatto inseriti in proprietà private. Sono rare anche le indicazioni che ne consentono l'individuazione.

I tubi. Come già detto, alle *fistulae* fissate alla parete del castellum, i Romani saldavano dei tubi in piombo, dai quali si dipartivano altri tubi per alimentare utenze pubbliche e private. Vitruvio, riferendosi ad un ipotetico acquedotto in pressione, ha lasciato una minuziosa descrizione di come doveva essere costruito. I suoi consigli valevano per gli acquedotti esterni ma anche per le reti cittadine, in quanto erano prevalentemente queste ultime ad essere costruite con tubi di piombo.

La giuntura di questi tubi non è descritta da Vitruvio, ma altri autori ed i reperti archeologici dimostrano che essa era ottenuta incastrando i tubi uno nell'altro e colando del piombo, oppure con una saldatura esterna, come ad esempio nei tubi impiegati nell'acquedotto della città di Arles in Francia. Tali giunture potevano non essere in grado di resistere alla pressione dell'acqua; ma mentre Vitruvio descrive brevemente il rinforzo dei tubi in terracotta, nulla dice su quello dei tubi di piombo.

Lungo la tubazione, nel punto ove avveniva la divisione dell'acqua tra due o più utenti, si installava una cassetta di piombo alla quale erano fissati dei tubi, dalle sezioni proporzionate ai volumi di

fluido da ripartire. Nella messa in opera del tubo, la linea di saldatura era lasciata in alto, evidentemente per facilitare, in caso di perdite, il lavoro di riparazione.

Ai tubi in piombo e in terracotta ricordati da Vitruvio vanno aggiunti i tubi ricavati da blocchi rettangolari di pietra, perforati in tutta la loro lunghezza, e quelli in legno, ricavati da tronchi scavati internamente, spesso lunghi 1,5 metri, e saldati tra loro da giunti impermeabili. Plinio rammenta che «pini, abeti resinosi ed ontani vengono scavati ed usati come condotti idrici...». Ma, a parte il bronzo, adoperato raramente per lo più in impieghi ad alta pressione, il metallo più in uso era il piombo, specialmente dopo che cominciò lo sfruttamento su larga scala delle miniere in Spagna e in Bretagna.

La tecnica metallurgica era molto semplice. Il piombo fuso era colato su lastre di bronzo o di marmo, in lamine piatte a forma di sfoglia di pochi millimetri di spessore. Queste lamine erano poi avvolte attorno a cilindri di bronzo: i bordi restavano non connessi ed erano successivamente saldati mediante battitura a freddo o con un cuscinetto di altro piombo colato sulla giuntura.

I tubi avevano una lunghezza non inferiore a 2,96 metri ed il diametro variava, secondo le specifiche tramandate da Frontino, sino all'eccezionale misura di 70 cm. Le misure che ci ha tramandato Vitruvio differiscono sia da quelle di Frontino che da quelle di Faventino, Palladio e Plinio. Vitruvio dice infatti che «per un calibro di cento dita, il peso dovrà essere per ciascuno di essi di 1.200 libbre, per ottanta dita, di 960 libbre, per cinquanta di 600 libbre, per quaranta di 480 libbre, per trenta di 360 libbre, per venti di 240, per quindici di 180, per dieci di 120, per otto di 100, per cinque di 60 libbre.

È dalla larghezza delle foglie di piombo, dalla loro misura in dita prima di essere arrotolate, che i tubi ricevono le loro definizioni in rapporto alla misura. Per l'appunto, data una lamina di cinquanta dita, quando da questa piastra sarà realizzato un tubo, esso sarà chiamato «tubo di cinquanta dita», e così via».

Frontino invece, nel suo trattato, a proposito dei tubi ha lasciato descritta la prima serie di elementi standard che si conosca nella storia della tecnica. An-

Tabella 1. I tubi in piombo negli acquedotti romani

tubo	diametro (cm)	peso (Kg)	portata (litri/sec)
centenaria	20,86	390,84	39,09
octagenaria	18,66	312,672	31,27
quingagenaria	14,75	195,42	19,54
quadragenaria	13,04	165,366	15,63
tricenaria	11,42	117,252	11,72
vicenaria	9,33	78,168	7,8
quinum denum	6,93	58,626	4,32
denaria	4,62	39,084	1,92
octonaria	3,7	32,57	1,22
quinaria	2,3	19,542	0,48

che per lui le misure dei tubi in piombo avevano una lunghezza modulare di dieci piedi, ossia 2,957 metri, mentre gli altri parametri dei diametri principali, espressi nelle unità di misura oggi in uso, risultano quelli riportati nella tabella 1.

«I moduli dei tubi sono fabbricati secondo la capacità e la quantità di acqua che devono fornire», dice Isidoro di Siviglia, «e ripartiscono l'acqua in un certo numero di misure fisse come l'oncia, la quinarina, il dito quadrato, il dito circolare e le altre misure».

Nel caso di condutture molto lunghe ed orizzontali, Vitruvio consiglia di stabilire pozzetti di ispezione di tratto in tratto, onde localizzare più facilmente il luogo di eventuali perdite oppure ostruzioni.

Sul tubo stesso era riportato, in una iscrizione, il nome del concessionario e qualche altro dato, ma mai il nome dell'acqua. Queste legende erano stampate durante la formazione della lamina mediante dei caratteri tipografici mobili, posti in una cassetta fissata sulla lastra di marmo (o di bronzo), sulla quale era poi colato il piombo.

Anche a Cagliari la rete cittadina era costruita con tubi di piombo, come testimonia lo spezzone rinvenuto casualmente in un recente scavo. Una ricerca sistematica, che finora è mancata, potrebbe portare alla luce altre testimonianze di questa antica rete cittadina.

Macchine di sollevamento. I Romani disponevano di macchine di vario tipo per il sollevamento dell'acqua, non esclusi alcuni tipi di pompe, con una prevalenza anche di parecchi metri. La macchina più diffusa doveva essere la vite di Archimede, *quae magnam copiam extollit aquae sed non tam alte*, della

quale Vitruvio ha lasciato una descrizione, assieme alle minuziose istruzioni per costruirla. Essa è costituita da una grossa vite posta all'interno di un tubo, la parte inferiore del quale è immersa nell'acqua. Ponendo in rotazione la vite, ogni passo raccoglie un certo quantitativo di liquido, che viene sollevato lungo la spirale fino ad uscire dalla parte superiore dove viene scaricato in un bacino di accumulo. L'energia per la rotazione può essere fornita da una manovella, da animali o dalle pale di mulini a vento.

Abbastanza diffusa era anche la noria a catena di secchielli tenuta sospesa da due pulegge. La catena di secchielli poteva essere allungata a volontà e quindi questa macchina era in grado sollevare modeste quantità d'acqua anche a considerevole altezza. La forza motrice era fornita da un cavallo attaccato ad un timone che girava in tondo con moto continuo. Altri apparecchi di sollevamento descritti da Vitruvio erano il timpano e la ruota a modioli semplice ed idraulica.

Erone ha lasciato descritta infine una pompa di sollevamento di concezione alquanto avanzata e ne attribuisce l'invenzione a Ctesibio. Essa è costituita da due cilindri di bronzo nei quali, mediante un'asta girevole, vengono alternativamente alzati ed abbassati due pistoni a tenuta, muniti di valvole per impedire all'acqua di rifluire. La coppia cilindro pistone e la valvola sono elementi tecnologici di grande importanza, usati ancora oggi.

Sembra che una noria a catena di secchielli, di grandi dimensioni, sia stata impiegata a Cagliari per sollevare l'acqua verso alcuni edifici alti della città.

Romano Sandri