

9. Sulle origini e gli sviluppi dell'idrometria del fiume Po

Stefano Orlandini

Il termine “idrometria” significa letteralmente “misurazione dell’acqua”. In passato gli idrologi erano soprattutto interessati alla misura dei deflussi nei corsi d’acqua: ancora oggi questo termine è comunemente impiegato per indicare l’insieme delle tecniche utilizzate per misurare la portata e la velocità delle correnti fluviali, la geometria degli alvei, i volumi di piena o di esondazione¹. Nel caso dell’idrometria del fiume Po, è stato coniato anche il termine specifico “padimetria”. Questa materia trova un momento di grande sviluppo proprio all’epoca della Commissione per il Po istituita nel 1873 e presieduta da Francesco Brioschi allo scopo di *“raccolgere gli elementi di fatto necessari per poter sottoporre a sicuro esame i vari progetti ventilati per menomare il pericolo ed i danni delle rotte ed inondazioni, e proporre le misure praticamente ed economicamente possibili ed efficaci”* (PALADINI, 1882; FASSÒ, 2000). Oggi, nell’epoca dei grandi progressi tecnologici, proprio in un Paese di grande tradizione idraulica come l’Italia, l’importanza dell’idrometria del Po e dei suoi tributari appare alquanto sottovalutata: scarse risorse vengono destinate alle misure idrometriche e, quel che è forse peggio, sembra talvolta ancora viva la convinzione che l’idraulica e l’idrologia sperimentale possano svilupparsi attraverso la mera installazione della strumentazione e la raccolta di dati, convinzione largamente superata nella fisica e nell’ingegneria sperimentale moderna (TAYLOR, 1997; COLEMAN & STEELE, 1999).

Questo capitolo si propone di illustrare i metodi idrometrici utilizzati all’epoca della Commissione Brioschi e di ripercorrere le fasi concettuali essenziali che hanno portato alla concezione e all’applicazione di tali metodi. Viene inoltre riservato un breve spazio all’evoluzione dei metodi di osservazione e di caratterizzazione delle correnti fluviali dall’epoca della Commissione Brioschi ai giorni nostri. Viene proposta, infine, una prospettiva per il futuro dell’idrometria, basata sui grandi progressi metodologici e tecnologici compiuti nel XX secolo e, al tempo stesso, conforme a quei principi, forse talvolta un po’ dimenticati ma ancora insuperati nel merito concettuale, i quali nel XIX secolo hanno permesso lo sviluppo dell’idrometria e dell’ingegneria idraulica italiana.

Dal Rinascimento all’epoca di Elia Lombardini e di Francesco Brioschi

Elia Lombardini (1794-1878), ingegnere idraulico insigne, sente la necessità di comprendere a fondo le basi concettuali della sua disciplina e ci rimanda a Leonardo da Vinci (1452-1519) con la sua nota *Sull’origine della scien-*

za idraulica nel milanese, e sul suo progresso in altre parti d'Italia (LOMBARDINI, 1859; 1860). Così, in questo paragrafo, seguiremo e svilupperemo il suo sguardo alle origini, cercando di mettere in evidenza alcuni aspetti che hanno contribuito alla formazione dell'idrometria padana. Per una trattazione più completa di storia dell'idrometria il lettore è indirizzato allo splendido lavoro di Arthur FRAZIER (1974).

LOMBARDINI (1872) era interessato alla figura di Leonardo per il progetto che il grande artista e scienziato aveva formulato per un canale in Lombardia. Sulla base dei testi contenuti nel *Codice Atlantico* (custodito nella Biblioteca Ambrosiana di Milano) e nel trattato *Del moto e misura dell'acqua* (LEONARDO DA VINCI, 1923), Lombardini conclude che Leonardo è il fondatore della scienza dell'idraulica.

Come documentato dalla Fig. 9.1, l'acqua, con i suoi movimenti, rappresentò per Leonardo uno dei temi privilegiati per i suoi progetti e studi scientifici nel corso di tutta la vita (1452-1519), senz'altro consapevole dell'importanza dell'acqua non solo per la navigazione e per l'irrigazione, ma anche per gli usi energetici, come ci attestano i suoi numerosi disegni e testi, fra i quali occorre ricordare, proprio per l'interesse idrografico e idraulico, gli stupendi *Disegni geografici* conservati nel Castello di Windsor, editi in un'oramai introvabile pubblicazione moderna, curata e commentata da Mario BARATTA (1941). Fu



Fig. 9.1 - Leonardo da Vinci ritrae un vecchio uomo (probabilmente se stesso) mentre osserva i movimenti dell'acqua (Codice Leicester).

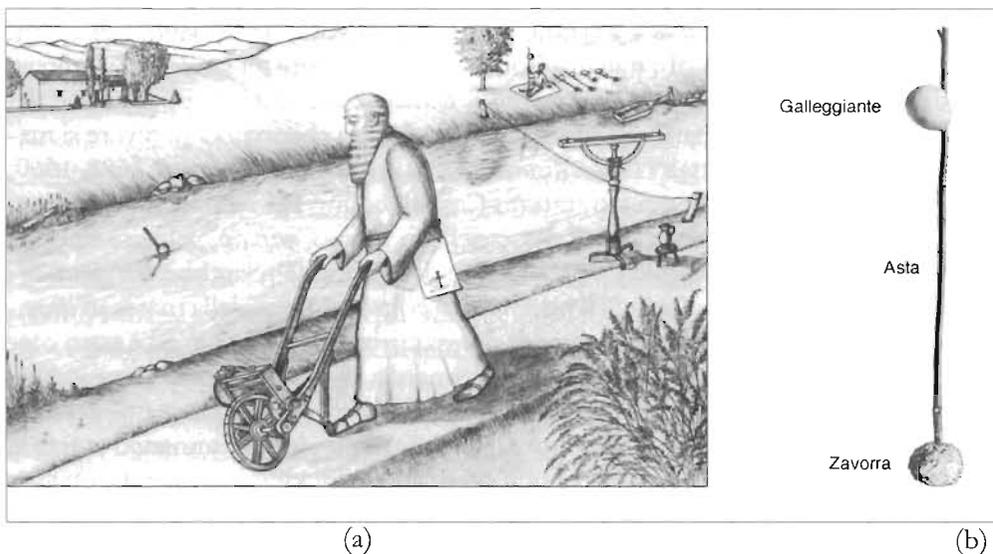
tuttavia negli anni compresi tra il 1508 e il 1511 che Leonardo focalizzò la sua attenzione ai fenomeni idraulici e alla loro misura, con l'intenzione (mai realizzata) di scrivere un trattato sull'argomento. Leonardo fu un avido osservatore dei movimenti dell'acqua: il suo interesse per tutti i casi offerti dalla natura (anche quelli complessi) costituì forse un impedimento alla sintesi di leggi idrauliche applicabili con generalità (seppure ai casi meno complessi). Sarebbe tuttavia inappropriato sminuire il mito di Leonardo in ragione della sua scarsa propensione alla sintesi. Leonardo non disponeva di modelli fisico-matematici e non poteva sintetizzare i fenomeni naturali in termini matematici, ma i suoi disegni rappresentano una sintesi grafica dei fenomeni che egli osservava, mostrando dettagli sorprendentemente conformi alle fenomenologie naturali.

Le osservazioni di Leonardo contribuiscono, quindi, allo sviluppo dei modelli matematici concepiti quasi un secolo dopo da Galileo, CASTELLI (1628) e CABEO (1646), in Italia, e da Newton e Bernoulli, in altre parti d'Europa (BERNOULLI, 1738), in una sequenza temporale che Leonardo stesso aveva ben presente: "Ricordati che quando parli di correnti d'acqua devi portare prima l'esperienza e dopo la ragione".

Leonardo ha gettato le basi anche per i metodi di misura dei fenomeni idraulici, metodi che si perfezioneranno concettualmente grazie al contributo di Galileo e dei suoi allievi, dando origine alla scienza (idraulica) nella sua accezione moderna. Per fare un esempio, e ritornare al tema centrale della

presente nota, può essere commentato il disegno eseguito da Arthur Frazier (1974, p. 11) sulla base delle note di Leonardo (Manoscritto A, foglio 42). Tale disegno è riportato nella Fig. 9.2: Leonardo è ritratto mentre misura la velocità della corrente in un corso d'acqua (a). Il galleggiante zavorrato (b) permette di seguire l'evoluzione spaziale degli elementi fluidi e fornisce un'indicazione della variazione delle velocità lungo il profilo verticale in ragione della sua inclinazione. La distanza compiuta dal galleggiante è misurata mediante un *odometro* (ovvero una ruota e un contagiri), mentre il tempo è stimato attraverso il canto ritmico.

Galileo Galilei (1564-1642) è storicamente riconosciuto come il fondatore della moderna scienza sperimentale: secondo il suo pensiero, ogni fatto,



evento o fenomeno naturale va compreso e analizzato in rapporto alla tecnica dell'esperimento, ovvero il procedimento che permette di accertare l'esattezza delle teorie fisiche mediante la riproduzione isolata e controllata del fenomeno oggetto di analisi. Solo replicando concretamente il fenomeno studiato è possibile accertare, infatti, la comprensione da parte dell'uomo del fenomeno, e quindi la capacità non solo di replicarlo, ma anche di prevederlo³. La grandezza di Galileo risiede nell'aver rivoluzionato il metodo di studio dei fenomeni naturali e, più in generale, il rapporto tra Uomo e Natura.

A differenza di Leonardo (e Aristotele: 384-322 a.C.), ma come Platone (428-348 a.C.), Galileo cerca la verità nascosta, scritta nel linguaggio matematico e comprende che la ragione, senza l'ausilio dei sensi, non è di alcun aiuto, ma che l'osservazione passiva non è più utile³. Galileo comprende che la natura non svelerà mai completamente i suoi segreti più intimi se non quando essa viene osservata con gli strumenti adeguati, rappresentata secondo corretti modelli matematici, e riprodotta attraverso l'intelligente combinazione di osservazione e modelli. Con Galileo comincia quel processo irreversibile che porterà la fisica a staccarsi dalla filosofia, la quale rimarrà pur sempre comprensione generale degli accadimenti e dei concetti legati alla speculazione, ma cederà alla fisica la possibilità di dominare concretamente la realtà mediante la riproduzione dei fenomeni naturali. Galileo si occupa di fenomeni idraulici come, per esempio, quelli necessari per realizzare gli orolo-

Fig. 9.2 - Leonardo da Vinci mentre misura la velocità della corrente in un corso d'acqua (disegno di Arthur FRAZIER, 1974, p. 11, eseguito sulla base delle note di Leonardo da Vinci, Manoscritto A, Foglio 42, Biblioteca dell'Istituto di Francia, Parigi).

gi ad acqua, che saranno fondamentali nei suoi noti esperimenti sul piano inclinato. Per non allontanarci troppo dal tema centrale di questo capitolo, non focalizzeremo tuttavia la nostra attenzione sui suoi studi idraulici, ma su quelli di due personalità legate a Galileo che sono state importanti per l'idrometria: Benedetto CASTELLI (1628), suo discepolo, e Nicolò CABEO (1646), suo oppositore per diverse questioni, ma di fatto anch'egli influenzato dalla rivoluzione intellettuale galileiana.

Benedetto CASTELLI (1587-1643), monaco Benedettino e discepolo di Galileo, riesce a coniugare il legame con il suo Maestro e con l'innovazione intellettuale da lui portata e quello con le Istituzioni Ecclesiastiche alle quali apparteneva e doveva totale obbedienza. Seguendo le disposizioni del papa Urbano VIII, Castelli interviene come esperto per la soluzione di annose questioni idrauliche relative a Ferrara, a Venezia, al Lago Trasimeno, alle Paludi Pontine e ad altri luoghi italiani. Come è noto, durante gli studi dell'idrologia del Lago Trasimeno, Castelli inventa il *pluviometro*, mentre l'applicazione del rigore logico-matematico ai problemi reali che era chiamato a risolvere si materializza nel suo trattato *Della Misura dell'Acque Correnti* (CASTELLI, 1628, 1660; BLACKMAN, 2004). In questo trattato Castelli enuncia la relazione tra sezione idraulica (che lui chiama, come d'uso nel suo tempo, *misura*), velocità e portata, relazione che discende dall'equazione di continuità⁴. Sarebbe sbagliato affermare che si deve a Castelli il principio di conservazione della massa in quanto tale principio era noto a Erone di Alessandria (I secolo a.C.) ed è stato correttamente riscoperto e descritto da Leonardo. Tuttavia, a Castelli va indubbiamente riconosciuto il merito di aver fornito con il suo trattato un'eccellente guida per gli ingegneri dell'epoca, dove rigore logico-matematico si fonde per la prima volta con l'osservazione dei problemi di idraulica fluviale. Questo emerge esplicitamente negli scritti di Castelli, abile didatta e dotato (a differenza di Galileo) di ottime capacità relazionali, richieste dal suo ruolo ecclesiastico e dai compiti a lui affidati. A pagina 3 del suo trattato (CASTELLI, 1628) si legge, a riprova del rigore logico-matematico che gli era stato trasmesso da Galileo: "*E per procedere con dovuto ordine nelle scienze prenderò alcune supposizioni e notizie assai chiare dalle quali andrò poi deducendo le conclusioni principali*". A pagina 7, Castelli dimostra di rivolgersi a ingegneri e periti idraulici con capacità divulgativa: "*Stabilito bene questo principio, e fondamento, che l'istessa acqua corrente va mutando la misura, secondo che varia la velocità, cioè minuendo la misura mentre cresce la velocità, e crescendo la misura quando scema la velocità; passo alla considerazione di diversi particolari accidenti in questa materia meravigliosi, e tutti dipendenti da quella sola proposizione, la forza della quale ho replicata più volte, acciò sia bene intesa*".

In tutta la sua opera, Castelli riesce a coniugare la capacità di osservazione dei fenomeni naturali (così come è stata introdotta da Leonardo) con la capacità di astrazione logico-matematica (così come è stata introdotta da Galileo). Tra i diversi corollari e appendici che Castelli enuncia, il Corollario Secondo e l'Appendice Quarta meritano senza dubbio di essere riportati, almeno in parte, e commentati. Nel Corollario Secondo si legge: "*E perché di mano in mano, che il fiume si ritrova più, e più pieno, viene ancora per ordinario a essere costituito in maggiore, e maggiore velocità, di qui è, che le medesime piene del torrente, che entra nel fiume fanno minori, e minori altezze, quando il fiume si ritrova più, e più pieno, poiché ancora l'acque del torrente, entrate che sono nel fiume, vanno acquistando maggiori, e maggiori velocità, e però scemano di misura, e di altezza*". Qui Castelli dimostra di aver compreso che la velocità della corrente aumenta lungo un sistema fluviale

procedendo da monte verso valle, una consapevolezza che discende presumibilmente da misure più che dalla osservazione qualitativa e che verrà formalizzata da Leopold e Maddock solamente nel 1953 (LEOPOLD & MADDOCK, 1953; LEOPOLD, 1997, p. 56). Il concetto di geometria idraulica introdotto da LEOPOLD & MADDOCK (1953) supporta le proposizioni di Castelli anche rispetto alla variazione della profondità media e della larghezza superficiale della corrente, entrambe crescenti da monte verso valle per portate con ugual probabilità di accadimento.

Castelli dà inoltre prova di saper tradurre il rigore fisico-matematico in onestà intellettuale. Dopo aver trattato, nell'Appendice Terza, del diversivo del *Reno di Bologna nel Po delle Valli*, nell'Appendice Quarta Castelli precisa: "Non meno si sono ingannati quegli Ingegneri, e Periti, che hanno affermato, che mettendosi il Reno in Po non farebbe alzamento nessuno di acqua in Po: Perché la verità è, che mettendosi il Reno in Po farebbe sempre alzamento, ma alle volte maggiore, alle volte minore, secondo, che ritroverà cò maggiore, o cò minore corrente il Po: dimodo che, quando il Po sarà confluito in gran velocità, pochissimo farà l'alzamento, e quando il medesimo Po sarà tardo nel suo corso, allora l'alzamento sarà notabile". Qui Castelli applica, forse per la prima volta in campo idraulico, il rigore fisico-matematico per mitigare le controversie accessissime in quel periodo tra Bologna e Ferrara.

Il miglioramento della conoscenza dei sistemi fluviali e del loro funzionamento rimane a tutt'oggi lo strumento più potente per la soluzione delle controversie e per l'attuazione di corrette politiche territoriali (LEOPOLD & MADDOCK, 1954, p. 232). Tra gli "Ingegneri e Periti" menzionati da Castelli, merita di essere ricordato il perito e architetto ferrarese Giovan Battista Aleotti (1546-1636), che, in veste di architetto del Municipio di Ferrara, difese la sua terra dalle acque del Reno e si schierò contro i progetti dei tecnici pontifici per ridare alla città la perduta navigazione (ALEOTTI, 1615 circa; MAFFIOLI, 1999).

Niccolò Cabeo (1586-1650), padre Gesuita e oppositore di Galileo e di Castelli, seguì diversi interessi scientifici focalizzando le sue maggiori attenzioni sulla sperimentazione. Nel 1646, Cabeo pubblica la sua grande opera *In Quatuor Libros Meteorologicorum Aristotelis Commentaria, et Quaestiones* (CABEO, 1646) dedicando nessuno spazio alla nuova scienza del moto introdotta da Galileo e alle sue implicazioni sul Copernicanesimo. Cabeo condivide sostanzialmente il pensiero Aristotelico e critica a Galileo e Castelli di riporre un'eccessiva attenzione a descrizioni matematiche astratte, trascurando in tal modo la verifica sperimentale. In tale prospettiva, Cabeo non comprende la valenza del linguaggio matematico e la necessità di semplificare la complessità dei processi naturali per poterne cogliere gli aspetti essenziali. Tuttavia, sebbene con merito intellettuale sicuramente inferiore rispetto a quello di Galileo e Castelli, Cabeo contribuisce all'avanzamento delle conoscenze e dei metodi di misura delle acque correnti. A lui è attribuita l'invenzione dell'*asta ritrometrica*, strumento che ci riporta all'idrometria del Po e al lavoro di Brioschi e Lombardini. Può essere allora interessante ricostruire le fasi essenziali che hanno portato all'invenzione dell'asta ritrometrica.

Nel suo commento al I libro di Aristotele sulla meteorologia, CABEO (1646) esprime scetticismo sull'opera di Castelli *Della Misura dell'Acque Correnti*. Aristotele giudica irrealistica l'ipotesi che le piogge e le nevi si raccolgano in qualche serbatoio, poiché l'estensione di questo serbatoio dovrebbe essere maggiore di quello dell'intera superficie terrestre. Sulla base della proposizione di Aristotele, Cabeo conduce la sua critica all'opera di Castelli⁵.

LA SISTEMAZIONE DELL'ALVEO DEL RENO: UNA VICENDA DURATA CINQUE SECOLI

Già dalla metà del XV secolo, esisteva un dissidio fra i Bolognesi e i Ferraresi: i primi volevano che il Reno fosse immesso nel Po di Ferrara (Volano) per allontanare i pericoli di inondazioni e impaludamenti delle loro terre; i Ferraresi, invece, si opponevano a tale immissione per timore di esondazioni e interimenti del loro principale corso d'acqua, unica via di navigazione sino al mare Adriatico, essendo il Po di Venezia (Grande) controllato dai Veneziani. La spuntarono i Bolognesi, convincendo, nel 1522, il Duca di Ferrara Alfonso I d'Este a eseguire l'opera. Dal 1530 al 1604, il Reno rimase convogliato nel Po di Ferrara (Volano), seguendo il percorso Sant'Agostino, Mirabello, Vigarano Mainarda e Cassana. Le limacciose acque del Reno non mancarono di provocare i temuti interimenti del Po di Ferrara (Volano), il quale ruppe diverse volte. Papa Clemente VIII (pontificato: 1592-1605), con un suo Breve del 1604, fissò le linee di politica idraulica da adottare per conservare e migliorare la produttività dei terreni del ferrarese. In tale ottica, Clemente VIII favorì la deviazione temporanea del Reno, dal Po di Ferrara (Volano) verso valli della Sammartina e Poggio Renatico, vicine a Ferrara, in modo da colmare quelle zone paludose. Il programma prevedeva inoltre considerevoli lavori sul Po di Argenta (Primaro), sottintendendo una possibile futura immissione del Reno nel Po di Venezia (Grande). Causa la morte di Clemente VIII (1605), non venne dato corso a quest'ultimo piano. I progetti idraulici del 1604 furono curati dai Gesuiti, i quali avevano un'intima relazione con Ferrara, avendo costruito lì un monastero nel 1551. La deviazione del Reno ebbe conseguenze disastrose, causando tra l'altro l'inondazione di diverse terre bolognesi appartenenti a importanti famiglie di quella regione. Era pertanto necessaria una soluzione per mitigare il rischio alluvionale nelle terre bolognesi permettendo allo stesso tempo la navigazione nel Po di Ferrara (Volano). La questione centrale era se il Reno potesse essere deviato verso il Po di Venezia (Grande) e in quale punto. Tale scelta determinava la fortuna di Bologna o Ferrara. Durante il papato di Paolo V (pontificato: 1605-1621), ripresero le discussioni e i progetti per immettere il Reno nel Po di Venezia (Grande), ma a tali progetti non venne dato corso. Nel 1625, il Papa Urbano VIII (pontificato: 1623-1644) decise di affrontare il problema del Reno e inviò Monsignor Ottavio Corsini per studiare il caso e scrivere un rapporto. In quel frangente, i Gesuiti, che non erano visti di buon grado dai Bolognesi, entrarono in conflitto anche con il Papa, a causa della loro posizione nei confronti della Francia. Inoltre, ben prima della pubblicazione dei *Dialoghi*, il Papa era sostenitore di Galileo. Urbano VIII abbandonò allora i Gesuiti di Ferrara in favore di un membro della Scuola di Galileo che fosse capace di apportare un contributo teorico innovativo al problema, supportando la causa di Bologna. Monsignor Corsini fu allora accompagnato da Benedetto Castelli. I Bolognesi proponevano di deviare il Reno verso il basso corso del Panaro, consentendo in tal modo l'allontanamento dei deflussi di piena verso il Po di Venezia (Grande). I Ferraresi temevano che tale soluzione producesse un carico idraulico eccessivo sul Po di Venezia (Grande), aumentando il rischio idraulico per Ferrara. Nel 1624, prima della visita di Monsignor Corsini, i Ferraresi avevano cercato di affidare lo studio del problema idraulico ai Gesuiti, e in particolare al nativo di Ferrara Niccolò Cabeo, ma il Padre Superiore impedì tale studio. Ciononostante, Cabeo scrisse un manoscritto intitolato *Dell'Introduzione dell'Acqua del Po in Volano e Primaro*, nel quale difendeva l'antico progetto dei Gesuiti del 1604. Nel 1628, Castelli pubblicò il suo trattato *Della Misura dell'Acque Correnti*. Nello stesso anno, Papa Urbano VIII favorì il progetto di condurre il Reno nel Po di Venezia (Grande), ma ancora una volta non venne dato corso al progetto. Tale richiesta venne avanzata nuovamente dai Bolognesi nel 1646, ma ancora nessuna attività seguì ai progetti. Con il Papa Innocenzo XII (pontificato: 1691-1700), nel 1694, si decise di immettere il Reno nel Po di Venezia (Grande). Questa volta fu però una guerra a impedirne l'attuazione. Nel 1716 si riesaminò il problema del Reno, ma intervennero, formulando pareri contrari ai progetti, Repubblica Veneta, Duca di Modena e Imperatore d'Austria. La cosa si ripeté nel 1719. Papa Benedetto XIII (pontificato: 1724-1730) decise di porre fine a questa lite proibendo di riproporre, in futuro, il progetto approvato dai suoi predecessori. Con la nomina a Papa di Benedetto XIV (pontificato: 1740-1758), della famiglia bolognese Lambertini, si riaprì nuovamente la questione del Reno, che sembrava essere stata chiusa dall'interdizione di Benedetto XIII. Questa volta, si decise di immettere il Reno nel Po di Argenta (Primaro). Si tentò con un primo canale per scolare le paludi del Reno nel Po di Argenta (Primaro): il Cavo Benedettino, iniziato nel 1724 e finito nel 1742, che nel 1750 fu già inutilizzabile. Nel 1761 si riaprì la pratica e nel 1767, con Papa Clemente XIII (pontificato: 1758-1769), si decise di modificare e completare il Cavo Benedettino, collegando così definitivamente il Reno, dal punto della rotta del Panfilio al Po di Argenta (Primaro) in località Tragheto. In questo modo il Reno trovò definitivamente la via del mare.

In particolare, Cabeo nota che nell'opera di Castelli non vi è alcuna menzione alla variazione della velocità dell'acqua corrente con la profondità. Castelli era consapevole della variazione della velocità all'interno della sezione fluviale, ma non fornisce alcuna indicazione sulla possibilità di misurare tale variazione. Nell'Appendice XI, Castelli si limita a scrivere che l'esame della velocità "si potrà fare tenendo conto per quanto spazio sia trasportata dalla corrente una palla di legno, o di altro corpo che galleggi in uno determinato tempo" (CASTELLI, 1628, p. 41). CABEO (1646) riconosce il rigore fisico-matematico di Castelli e lo attacca evidenziando la mancanza di metodi pratici di misura della velocità: "Questa cosa è accuratamente ed ingegnosamente trattata in un libro scritto in italiano dal monaco Cassinese Benedetto Castelli, un uomo di matematica che tratta questa cosa intelligentemente ed eruditamente e che io preferisco esaminare in modo più fisico che matematico". In particolare, CABEO (1646) afferma che "quando si misura la velocità della corrente non è sufficiente compiere una misura ad una singola profondità perché spesso accade che la velocità è differente alle differenti profondità".

Dopo aver descritto i problemi che discendono dal trascurare la variazione delle velocità nella sezione fluviale, CABEO (1646) propone una tecnica alternativa che fornisce indicazioni sulla variazione delle velocità con la profondità. Un bastone oblungo o una lancia di legno viene dotata di peso a una sua estremità mediante un piombo o un sasso in modo tale che, una volta disposta in acqua, il bastone si immerga parzialmente. All'estremità opposta, viene disposta una zucca vuota o una vescica di animale riempita d'aria. Quando tale dispositivo viene posizionato nell'acqua fluente, la misura della velocità può essere eseguita come descritto da Castelli, ma la variazione della velocità con la profondità potrà essere osservata attraverso l'inclinazione dell'asta (CABEO, 1646). Come il lettore avrà senz'altro notato, tale idea era stata già concepita da Leonardo (Fig. 9.2).

Domenico Guglielmini (1655-1710), medico bolognese, era particolarmente dedicato alle matematiche, all'astronomia e all'idrometria. Nominato nel 1686 intendente generale delle acque del bolognese, esordì col pubblicare nel 1691 il suo Trattato *Aquarum Fluentis Mensura*. Istituitasi nell'Università degli Studi di Bologna la cattedra di Idrometria, ne venne affidato l'insegnamento a Guglielmini, consentendogli di addentrarsi sempre più nello studio della fisica dei fiumi. Frutto di tali studi fu il libro *Della Natura de' Fiumi*, pubblicato per la prima volta nel 1697, il quale segna l'epoca in cui l'idraulica italiana è stata fondata su principi veramente positivi (LOMBARDINI, 1870).

Come riportato nelle note bibliografiche di Gabrio Piola, incluse nel libro di GUGLIELMINI (1852, p. X), "egli pubblicò il suo libro *De Aquarum Fluentium Mensura*, dedicato al Senato di Bologna: e fu quest'opera che cominciò ad acquistargli per tutt'Europa la fama del valente Idraulico. Essa è divisa in sei libri e in un'appendice; è fondata sopra una teorica non molto rigorosa, ma è in generale assai utile per tutti coloro che hanno bisogno di pratici precetti per la condotta delle acque". Nello stesso volume si trova scritto che "Le principali proposizioni elementari stabilite già dal Castelli nel suo trattato *Della Misura dell'Acque Correnti*, pubblicato nel 1628, sono riprodotte nell'opera del Guglielmini; una però (ed è la più rilevante) vi si trova contraddetta, la quale ha per oggetto la misura delle velocità medie e delle portate dei fiumi. Aveva detto il Castelli che una tale velocità doveva prendersi proporzionale all'altezza delle sezioni: e il Guglielmini, dietro il principio generale di stimare la velocità negli efflussi proporzionalmente alla radice quadrata della distanza della luce dal supremo livello (principio ricevuto poi da tutti gl'Idraulici), volle che la suddetta velocità volesse stimarsi non nel-

la semplice, ma nella sudduplicata ragion d'altezza. Oggi che per mezzo di formole analitiche si hanno delle equazioni fra la velocità media e la portata di un fiume, la pendenza e le dimensioni dell'alveo, è facile provare che quando il moto della corrente è assai rapido, vale la regola del Guglielmini; ma quando è assai lento, torna ancora meglio quella del Castelli; perché avendosi due termini di cui uno contiene la potenza semplice della velocità media, e l'altro il quadrato della velocità medesima, si può supporre senza notevole errore che svanisca il primo rimpetto al secondo nel caso di corrente rapida, ed il secondo rimpetto al primo in caso di corrente lenta".

Rispetto a Castelli, Guglielmini perde rigore nell'osservazione e nella logica matematica con cui riporta le sue proposizioni. Per esempio, la variazione spaziale della velocità lungo un sistema fluviale che Castelli aveva sorprendentemente riconosciuto, torna a essere mascherata dalle apparenze ingannevoli negli scritti di GUGLIELMINI (1852, p. XVII): "S'allontana un fiume dalla sorgente, e va perdendo successivamente l'accelerazione e il pendio; perciò più lontano dalla fonte correndo meno veloce, le acque sono sempre a maggior altezza: ivi dunque cresce la pressione e quindi la velocità, dunque per questa parte cresce la portata: vi è pertanto qui pure la concorrenza di opposti principj che s'intrecciano fra di loro". D'altro canto GUGLIELMINI (1852, p. 7) è ben consapevole che la complessità dei sistemi fluviali riesce difficilmente a essere inquadrata in schemi fisico-matematici "esatti" e scrive: "Io vi diedi, alcuni anni sono, la misura delle acque correnti, nella quale so di aver camminato con più di rigore, dal che fui obbligato a prescindere dagli impedimenti, da' quali, o non mai, o quasi mai, va scompagnata l'acqua che corre per i canali; ma ora, che ho voluto darvi una Teorica de' fiumi, non poteva io farlo con una perfetta astrazione, senz'incorrere la taccia di fingermi una materia diversa da quella della quale si vale la natura nel formare gli alvei a' fiumi medesimi".

In definitiva, dell'opera di GUGLIELMINI (1852, p. XXIII) colpisce, più che il rigore metodologico e il contributo teorico, il coraggio di affrontare lo studio di complessi sistemi naturali, quali sono i sistemi fluviali e qual è il corpo umano, al quale si dedicava con successo più per necessità di sussistenza che per passione: "Il Filosofo tanto benefico che col frenare un solo torrente salvava immense sostanze, era per ordinario corrisposto di assai bassa mercede, ed ebbe più volte a soffrir disagio in un sistema di vivere, non dirò alieno dal lusso, ma inferiore ben anco alla comune coltura e politezza". Di fronte alla complessità della Natura, GUGLIELMINI (1852, p. 9) trova le sue qualità di Uomo umile e altruista: "Ciò che di buono mi sia riuscito di fare, io non lo so; so bene di non avere avuta altra mira in questo mio assunto, che di cooperare alla pubblica utilità; e perciò, quando non vi fosse altro di considerabile in esso, vi sarà almeno il motivo di aver scritto a tal fine, e soddisfatto all'obbligo ch'a tutti corre di adoperare il proprio, qual si sia, talento in pubblico vantaggio".

Elia Lombardini (1794-1878), emerito direttore generale delle Pubbliche Costruzioni della Lombardia, pubblicò numerose memorie sopra diversi argomenti dell'idrologia fluviale, stimolato dal desiderio di spiegare i rapidi cambiamenti del fiume Po che egli stesso osservava nel tratto cremonese. Tali studi vennero incorporati ed estesi nell'opera *Guida allo Studio dell'Idrologia Fluviale e dell'Idraulica Pratica* (LOMBARDINI, 1870). In tale opera Lombardini ricerca le origini della scienza idraulica (non solo italiana) e scrive: "Sul cadere di quest'ultimo secolo [il XV] era riservato al genio incomparabile di Leonardo da Vinci l'inventare quella scienza, attenendosi al metodo sperimentale, nel proclamare ed applicare il quale, indicandone le regole, precedette di oltre un secolo Bacone e Galileo". Lombardini comprende pienamente l'importanza della sperimentazione nell'idrologia fluviale concepita da Leonardo e può trarre vantaggio al tempo stes-

so dall'impostazione fisico-matematica introdotta da Galileo e sviluppata da numerosi altri scienziati italiani e stranieri.

Con Lombardini l'idrologia fluviale raggiunge la sua maturità e inizia la sua evoluzione scientifica nel senso più moderno del termine. Merita a tal proposito di essere citato un passo (LOMBARDINI, 1870) che appare di uno spessore scientifico del tutto sorprendente per i tempi in cui è stato scritto e riveste notevole significato anche nel contesto più attuale: *“La scienza delle acque, limitando da principio le proprie ricerche a ciò che riguarda l'architettura idraulica propriamente detta, all'arte cioè di farle servire pei comodi della vita, e di frenare le loro irruzioni, ella era scienza del tutto isolata. Ma vennero frattanto a cadere sotto l'occhio dell'osservatore altri fenomeni che per la serie delle cause e degli effetti si collegavano alla meteorologia, e le potevano fornire la controprova delle sue induzioni. Altri fenomeni parvero ripetere quelli che in una più vasta scala dovevano essere avvenute in una remota età del globo, e aggiunsero un nuovo capitolo alla geologia. E finalmente nel paragone de' fiumi la geografia fisica trovò un profondo argomento d'osservazione ed un nuovo lume per determinare la complessiva natura d'ogni regione della terra. Di modo che se si avessero per un momento a dimenticare tutti i diretti servizi che la scienza delle acque può prestare alle nazioni, ella formerebbe ancora un'importante materia di studi per l'ajuto che offre a molte altre scienze naturali?”*

Francesco Brioschi (1824-1897), matematico, si interessò anche dei problemi delle acque nei diversi ambiti dell'insegnamento, della ricerca scientifica e dell'ingegneria. A differenza del campo della matematica, nel quale Brioschi portò fondamentali contributi universalmente riconosciuti, in quello delle discipline idrauliche non si riconoscono suoi importanti apporti originali, neppure negli scritti del suo allievo Ettore Paladini. Tuttavia, a Brioschi va riconosciuto il merito di aver concepito e diffuso in ambiente accademico e professionale la corretta impostazione allo studio dei problemi idraulici (e non solo), dove l'astrazione fisico-matematica si combina armonicamente con la sperimentazione per fornire le migliori rappresentazioni dei complessi sistemi naturali. Brioschi nota lo iato che si era prodotto nel secolo XVIII tra l'idrodinamica teorica (orientata all'enunciazione dei principi idraulici e basata soprattutto su astrazioni matematiche) e l'idraulica pratica (orientata alle applicazioni idrauliche e basata soprattutto su misure di campo) e comprende la necessità di combinare gli strumenti teorici con le misure sperimentali. Nella memoria postuma del suo maestro di matematiche Gabrio Piola (PIOLA, 1852) si legge: *“L'idraulica razionale o la determinazione analitica delle leggi del movimento dei fluidi, sebbene abbia formato soggetto alle speculazioni di molti e distinti geometri, è tuttora avvolta in gravissime difficoltà... D'onde tali discordanze di risultamenti e di opinioni? Forse che le equazioni fondamentali comunemente accettate non sieno sufficienti alla spiegazione dei fenomeni, come alcuni pretendono? O forse che lo studio delle teorie idrauliche non debbasi distinguere da quello dell'idraulica sperimentale, come si fece fino ad ora; anzi debbano l'esperienza e l'osservazione fornire i mezzi principali e servire di guida alle ricerche astratte?”* Questa impostazione caratterizzerà tutti gli studi idraulici di Brioschi e si troverà ribadita in molti suoi scritti. Appare inoltre sorprendente che egli, grande matematico, riconosca nell'idraulica *“una scienza sperimentale, ed in molta parte puramente d'osservazione”*, attribuendo alla matematica *“un tenue ruolo”* subordinato a quello della sperimentazione e dell'osservazione (BRIOSCHI, 1865). Tale aspetto non sfuggì ai suoi successori Ettore Paladini e Giuseppe Colombo, che, subito dopo la sua scomparsa scrissero: *“nello studio dell'idraulica... fu il continuatore di quell'illustre scuola di idraulici italiani che comincia da Leonardo da Vinci per venire a Venturoli e Lombardini. Fu Brioschi che, pur avendo una così gran*

facilità nella trattazione analitica del moto delle acque, riavviò l'idraulica al metodo sperimentale con l'insegnamento e coll'opera" (COLOMBO, 1897).

Il principale campo applicativo nel quale Brioschi ebbe modo di promuovere le sue idee fu quello dell'idraulica fluviale, soprattutto in occasione della Commissione per il Po, da lui presieduta, che operò tra il 1873 e il 1880. Egli, tuttavia, anche in precedenza aveva sottolineato la necessità di basare lo studio dei fiumi sulla misura sperimentale delle portate e soprattutto sulla costruzione di equazioni interpolari che rappresentassero adeguatamente le scale delle portate nelle diverse sezioni⁶. Nella memoria *Sulle formole empiriche per le portate dei fiumi* Brioschi confronta criticamente alcune formule proposte per le scale delle portate di fiumi italiani e francesi (BRIOSCHI, 1866, 1867, 1876)⁷. Egli esprime in particolare un certo scetticismo nei confronti della formula applicata da Lombardini per il Ticino a Sesto Calende, notando un notevole scostamento rispetto alla prima di quelle di Bazin (HAGER, 2001), che egli conosce ed evidentemente giudica affidabile. Delle espressioni riportate e discusse per il fiume Po a Pontelagoscuro, Brioschi riporta quella di Lombardini nella forma $Q = 260,1 a^{3/2} (1 - 0,006 a^2)^{1/2}$, dove Q è la portata in metri cubi al secondo, a è la profondità idraulica (profondità media) della corrente, espressa in metri. Tale relazione si basa sulle assunzioni che la portata sia proporzionale alla radice quadrata della pendenza del "pelo d'acqua" (denominata, in termini tecnici, pendenza motrice o gradiente idraulico) e che quest'ultima sia una funzione decrescente della profondità idrica del "tipo" i proporzionale a $1 - 0,006 a^2$. Brioschi critica la formula di Lombardini notando che essa fornisce il massimo della portata per la profondità pari a 10 m e che fornisce valori reali solamente per profondità non superiori a 12,91 m.

In ognuna delle scale delle portate esaminate da Brioschi compaiono coefficienti che devono essere necessariamente determinati attraverso misure di portata e della corrente. Questo motiva l'interesse di Brioschi rispetto ai procedimenti matematici d'interpolazione e, più in generale, nei confronti dell'idrometria. Per il fiume Po a Pontelagoscuro, in provincia di Ferrara, fino al 1866 le uniche misure di portata disponibili erano quelle eseguite negli anni 1811, 1812, 1815 e 1820 da Teodoro Bonati (anch'Egli sarà membro della Commissione presieduta da Brioschi) della Pontificia Scuola d'Ingegneria di Roma; quella del 1815 (l'unica eseguita in condizioni di piena) era stata giudicata, tuttavia, di dubbia affidabilità da Lombardini. Nella sua memoria del 1876, Brioschi scrive: "Spero di poter mostrare in breve l'uso di questa formola in un caso pratico di qualche importanza"⁸. In seguito egli applicò le sue conoscenze matematiche alle misure di portata eseguite nel 1878 a Fossadalbero, in provincia di Ferrara, poco a valle della stazione di Pontelagoscuro, dalla Commissione per il Po, giungendo alla "costituzione di una nuova scala padimetrica per Pontelagoscuro meglio rispondente delle ordinarie ai risultati sperimentali" (BETOCCHI, 1881). Le campagne di misura di Fossadalbero sono rappresentate nel gruppo delle Tavole Cartografiche *Idrometria del Po* (16-22), aventi per titolo *Idrometria del Po*, allegate al presente volume e che verranno descritte brevemente nel paragrafo che segue. Esse costituiscono, da un punto di vista della storia dell'idraulica padana, la parte più interessante degli elaborati della Commissione Brioschi, almeno fra quelli che si sono conservati sino ai nostri giorni.

Le misure idrometriche di Fossadalbero

Le misure idrometriche di Fossadalbero⁹ sono descritte nelle Tavole Cartografiche (16-22) allegate al presente volume. Il tratto del fiume Po in prossimità dell'abitato di Fossadalbero è rappresentato nelle planimetrie delle Tavole Cartografiche 16 e 17. Tale tratto è stato presumibilmente scelto per le sue caratteristiche di regolarità geometrica, la cui importanza era ben nota a Brioschi, come si deduce dal suo programma di ricerca per il quinquennio 1885-1889, nel quale, riferendosi alle misure di velocità delle correnti, scrive: "*Sarà meglio, visto il carattere delicato di queste esperienze, ripeterle più volte sopra canali in terra di dimensioni, rispetto alla sezione, e di portate, differenti; e forse estenderle a qualche tronco rettilineo di fiume in opportuno stato d'acqua*". Nel tratto di Fossadalbero sono state selezionate tre sezioni fluviali, distanti tra loro 50 m, che chiameremo qui "di misura" (Sezioni I, II e III). La larghezza dell'alveo in corrispondenza delle Sezioni I, II e III è pari a circa 456 m, come si desume dalle tavole successive. Nella planimetria della Tavola Cartografica 17 sono riportate anche le posizioni di 10 idrometri (5 in sponda destra e 5 in sponda sinistra) relativi a 5 sezioni fluviali, distanti tra loro 500 m, che chiameremo qui "idrometriche" (Sezioni N. 1, 2, 3, 4 e 5). La Sezione idrometrica N. 3 corrisponde alla Sezione di misura II. Tali idrometri venivano utilizzati per determinare le pendenze longitudinali del "*pelo d'acqua*", come riportato nelle tavole successive.

Nella Tavola Cartografica 17, in basso, vengono illustrati i rilievi della Sezione di misura II di Fossadalbero eseguiti nell'autunno 1879 e nell'autunno 1880. Si può notare una certa variazione del fondo del canale nel corso di ciascuna delle stagioni autunnali considerate e una notevole variazione della sezione da un anno all'altro. Sono segnati in tale tavola i diversi stati di livello idrico in corrispondenza dei quali sono state eseguite le misure di velocità descritte nelle tavole successive. Altri fattori di controllo importanti sono descritti nella Tavola Cartografica 18: in essa vengono riportate le pendenze longitudinali dei peli d'acqua e le variazioni di livello durante le operazioni di misura delle velocità lungo le sezioni trasversali. Tali caratteristiche sono infatti importanti per valutare la validità dell'assunzione di moto quasi stazionario necessaria per la formulazione di una scala di deflusso a un solo valore (ovvero di una corrispondenza biunivoca tra livelli idrici e portate), permettendo in tal modo di spiegare, almeno in parte, possibili deviazioni delle osservazioni sperimentali rispetto a leggi di variazioni polinomiali delle portate con i livelli. Le variazioni temporali dei livelli idrometrici riportati nella Tavola Cartografica 18-VI si riferiscono alla Sezione idrometrica N. 3, ovvero alla Sezione di misura III.

Il quadro grafico riassuntivo dei valori dei deflussi calcolati coi rilievi eseguiti a Fossadalbero è riportato nella Tavola Cartografica 18-VII. I punti e le linee in rosso si riferiscono alle misure eseguite con le aste ritrometriche, mentre i punti e le linee in azzurro si riferiscono ai rilievi con mulinelli idrometrici. In funzione dell'altezza idrometrica (nella Sezione idrometrica N. 3), sono riportati (oltre alla portata) l'area della sezione trasversale della corrente e la velocità media. Si può notare come la velocità media non vari molto con l'altezza idrometrica e la variazione di portata sia pertanto connessa soprattutto alla variazione della sezione trasversale. Nella medesima Tavola Cartografica si rileva, accanto a ogni livello idrometrico osservato, l'indicazione sullo stato di variazione del livello: "*stato dell'acqua permanente*", "*calante*", "*aumentando*", "*leggermente calante*" e "*leggermente aumentando*".

Nella Tavola Cartografica 19 (VIII e IX) viene illustrata graficamente la procedura di determinazione e di verifica della scala di deflusso per la stazione di Pontelagoscuro, in Provincia di Ferrara. Tale procedura assume che le portate Q osservate a Fossadalbero siano rappresentative di quelle a Pontelagoscuro (un'ipotesi ragionevole data l'assenza di contributi laterali e perdite idriche importanti nel tratto in questione) e possano essere pertanto messe in relazione alle altezze idrometriche a di Pontelagoscuro, contate a partire da un piano orizzontale posto 6 m sotto il segno di guardia. Nella Tavola Cartografica 19-VIII viene riportata la formula di interpolazione $Q = (-14174,4357 - 51761,4660a + 651573,3937a^2 - 334395,9751a^3 + 94935,2697a^4 - 8702,2085a^5)^{1/2}$.

La relativa curva viene confrontata graficamente con i 15 punti, ottenuti nella campagna di misura di Fossadalbero del 1878 e utilizzati per la sua de-

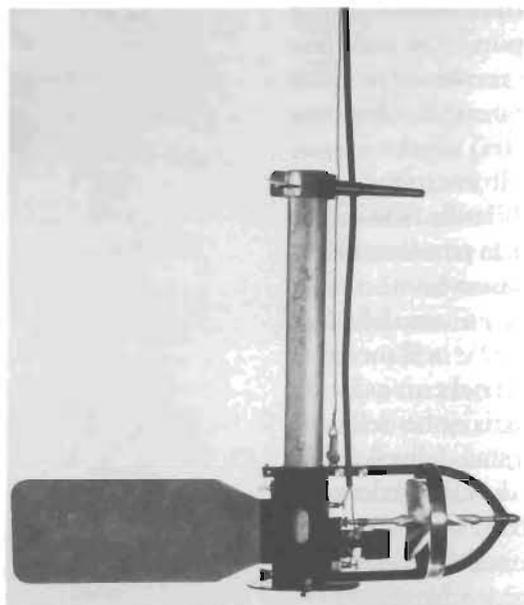


Fig. 9.3 - Mulinello idrometrico inventato dal matematico, fisico e ingegnere svizzero Jakob Amsler Laffon nel 1876, appena due anni prima delle campagne di misura di Fossadalbero. Questo mulinello fu applicato per la prima volta sul Fiume Reno presso Schaffhausen, in Svizzera, la città in cui Amsler Laffon viveva (NOAA Photo Library).

terminazione, e con quelli ottenuti in campagne di misura antecedenti al 1878. In altre parole, viene rappresentata graficamente la qualità delle operazioni di taratura (o calibrazione) e di verifica (o validazione) del modello di interpretazione del legame tra altezze idrometriche e portate a Pontelagoscuro. Tra i dati utilizzati nella taratura, vengono distinti quelli ottenuti con mulinelli e quelli ottenuti con aste ritrometriche. Tra i dati utilizzati per la verifica, vengono menzionati quelli ottenuti nelle esperienze di Bonati e degli Allievi della Scuola Pontificia, in parte corretti dal Possenti. I valori delle profondità idriche a utilizzati per la determinazione della formula variano tra 0,77 e 4,77 m.

Nella Tav. III-9 viene riportata la formula ottenuta elaborando i dati di portata relativi a 19 osservazioni idrometriche effettuate nello stesso anno (1878), ovvero $Q = (-352932 + 286808a + 670833a^2 - 361382a^3 + 84265a^4 - 5862a^5)^{1/2}$.

Le profondità idriche a utilizzate sono comprese tra 0,77 e 6,50 m. Si può notare come i coefficienti del polinomio utilizzato da Brioschi siano fortemente dipendenti dal numero e dalla collocazione dei punti sperimentali. La formula ottenuta risulta soddisfacente rispetto alle misure eseguite nel periodo compreso tra il 1878 e il 1880 dalla Commissione per il Po, ma la validità del metodo di interpolazione utilizzato da Brioschi non riceve la dovuta attenzione da parte degli idraulici del suo tempo. A proposito di tale formula, infatti, PALADINI (1898) scrive: "Sinora questa formola non ha avuto che scarsissima applicazione ma si può presumere che sarà ripresa e largamente applicata ed anche per essa il nome di Brioschi ricomparirà nel campo dell'idraulica fluviale". In realtà, questo non avvenne. Non vi sono tuttavia dubbi sul fatto che gli interessi di Brioschi nei confronti delle scale delle portate abbiano dato un notevole impulso all'idrometria italiana, già fondata sulle solide basi menzionate sopra. Alcuni dettagli sulle operazioni di misura effettuate a Fossadalbero vengono illustrate nelle Tavole Cartografiche 20-XII e 22-XVIII.

I risultati sperimentali venivano ottenuti attraverso un "doppio sistema accoppiato di misure". Ogni misura veniva ottenuta utilizzando due diversi procedimenti: attraverso i mulinelli idrometrici, generalmente di tipo Amsler (rappresentato graficamente nella Fig. 9.3), e attraverso le aste ritrometriche. Queste ultime sono state menzionate in precedenza, quando si è trattata l'opera di

Cabeo e, come si è detto, sono logicamente riconducibili ai galleggianti zavorrati introdotti da Leonardo. Le aste ritrometriche utilizzate dalla Commissione per il Po erano costruite in legno a tronchi congiungibili mediante manicotti di ferro, oppure canne diritte di giunco traforate e zavorrate con pallini di piombo. Esse venivano rilasciate nella corrente in posizione pressoché verticale in modo che il loro moto potesse risultare indicativo della velocità idrica media lungo il profilo verticale. Più precisamente, lanciando da uno stesso punto aste di diversa lunghezza poteva essere valutata per confronto la distribuzione delle velocità idriche lungo la verticale. Riguardo alle misure effettuate con i mulinelli, è il caso di menzionare la cura con la quale veniva effettuata la taratura dei mulinelli e la precisione con la quale veniva determinato l'affondamento dei mulinelli nella corrente. La taratura dei mulinelli era effettuata periodicamente attraverso esperimenti in acqua corrente o in acqua ferma. Nel primo caso la velocità della corrente veniva determinata attraverso galleggianti o aste ritrometriche. Nel secondo caso il mulinello veniva trascinato con velocità nota all'interno di un corpo idrico di grandi dimensioni (ad esempio, il lago di Lecco o la darsena di Porta Ticinese a Milano). Durante le misure, il mulinello veniva appeso a un cavo calato attraverso un argano, o "*martinetto*", e l'affondamento del mulinello sotto il pelo libero della corrente era determinato misurando la lunghezza del cavo svolto. Questa lunghezza si ricavava dal numero di giri compiuto dal tamburo dell'argano tenendo anche in considerazione della diminuzione del diametro di avvolgimento del cavo sul tamburo dovuta allo spessore del cavo stesso.

Nella Tavola Cartografica 20-XII è rappresentata la disposizione degli operatori per le misurazioni di velocità con le aste ritrometriche e con i mulinelli. Tre imbarcazioni ("*navi*"), ancorate al fondo e legate tra loro mediante una fune, servivano per definire la sezione di monte (A-A-A, Sezione di misura I), mentre le altre barche, disposte lungo la corrente e legate tra loro, servivano per determinare i tempi di passaggio dalle Sezioni di misura II e III (B-B-B e B'-B'-B'). La posizione di tali imbarcazioni poteva essere determinata da terra attraverso un teodolite posto nella posizione C e una stadia graduata posta su ciascuna di esse. Nella stessa tavola viene anche fornito il dettaglio delle "*navi doppie*" (barconi, probabilmente del tipo di quelle che erano usate per i ponti di barche), sulle quali erano posizionati i mulinelli. Nella Tavola Cartografica 20-XIII sono illustrati i dettagli sulla disposizione degli operatori per il rilievo delle velocità con le aste ritrometriche e con i mulinelli. Le "*navi*" per il lancio delle aste appaiono trainate da "*navi*" di manovra a monte della Sezione di misura I, mentre barchette di raccolta delle aste sono posizionate a valle della Sezione di misura III. Sono presenti osservatori del passaggio delle aste nelle diverse sezioni di misura (I, II e III) ed è indicata anche la presenza di un operatore con tavoletta per le registrazioni (su carta). Riguardo alle misure con mulinelli, si possono notare le barche ancorate a sostegno della fune che determina la sezione trasversale (A-A-A), le barche dei mulinelli con stadia graduata e osservatore dei tempi (B-B), l'osservatore al teodolite per la lettura delle distanze e la sistemazione delle posizioni (C).

Nelle Tavole Cartografiche 20, 21 e 22 sono riportati i dettagli sulla misura delle velocità con mulinello e sulle relative distribuzioni di velocità lungo le sezioni trasversali. Durante le operazioni di misura con i mulinelli, potevano essere misurate anche le profondità idriche mediante scandagli, secondo "passi" (= intervalli) con valore medio di circa 12 m, su una sezione con lar-

ghezza pari a 456 m. I profili di velocità erano rilevati con cadenza media di circa 30 m, ma con distribuzione addensata in corrispondenza delle variazioni di sezione e di velocità più accentuate. Lungo il profilo verticale erano eseguite numerose misure con mulinello, a intervalli con ordine di grandezza pari a circa 1 m. Le velocità rilevate appaiono variabili da valori prossimi a 0,6 m/s fino a valori prossimi a 1,7 m/s. Vengono poi confrontate le variazioni delle velocità medie (sul profilo verticale) lungo la sezione trasversale, ottenute attraverso le misure con asta ritrometrica e con mulinello. Le velocità medie variano tra valori prossimi a 0,8 m/s fino a valori prossimi a 1,5 m/s. Nella Tavola Cartografica 22 è redatto un quadro complessivo delle misure effettuate con asta idrometrica. Per ogni posizione di misura lungo la sezione trasversale, le misure con asta ritrometrica erano ripetute più volte e veniva presumibilmente riportato il valore medio delle misure del "gruppo" come valore rappresentativo della velocità in quella posizione.

La descrizione tecnica delle campagne di Fossadalbero lascia supporre che esse abbiano fornito misure di portata e di sezione trasversale della corrente del tutto soddisfacenti. La strumentazione impiegata è sostanzialmente paragonabile a quella ancora oggi in uso e i passi di campionamento sono stati scelti in modo decisamente accurato. I metodi di interpolazione utilizzati per determinare le scale delle portate sono quanto mai adeguati, essendo stato Brioschi un maestro di tale specialità. Le incertezze maggiori nell'applicazione delle scale di deflusso ottenute dalla Commissione per il Po sono state probabilmente dovute al loro eventuale uso al di fuori del campo di profondità idrometriche e portate disponibili per la taratura; un aspetto che a tutt'oggi rimane largamente irrisolto.

Dall'Ottocento ai nostri giorni

Come riportato da CAESPERLEIN (1974), non vi sono stati significativi progressi concettuali nelle misure idrometriche dall'Ottocento ai nostri giorni. Gli idrogrammi di piena vengono comunemente determinati attraverso l'uso combinato di misure di livello e di scale di deflusso tarate mediante misure di portata con mulinelli idrometrici. Altri metodi, per esempio quelli basati sull'uso di traccianti o di soluti, non hanno dimostrato la loro superiorità, soprattutto nel caso di grandi fiumi. Per una descrizione tecnica dettagliata dei metodi attualmente utilizzati, il lettore è rimandato alla pubblicazione di RANIZ *et Alii* (1982). Va tuttavia notata la continuità con la quale gli idraulici italiani hanno cercato, con il loro appassionato lavoro, di dimostrare l'importanza delle misure idrometriche (per esempio, DI MARCHI, 1914; CATI, 1981). Le stazioni idrometriche "storiche", ovvero quelle che hanno funzionato con una certa continuità dalla prima metà del XX secolo ad oggi, per il fiume Po ed i suoi affluenti, sono circa 50, di cui 7 sull'asta principale a valle di Crissolo (CATI, 1981, p. 107). Le stazioni pluviometriche storiche, nel senso specificato sopra, presenti sul bacino idrografico del fiume Po, sono circa 500 (CATI, 1981, p. 42). Vi è oggi la consapevolezza che molta dell'incertezza nelle misure delle portate rimane connessa alla variabilità spazio-temporale degli alvei naturali, specialmente di quelli montani e pedemontani. Questa consapevolezza alimenta il desiderio degli idrologi di poter giungere a misure di portata, ovvero della geometria idraulica e della velocità della corrente, continue nel tempo.

Le prospettive future

Il rammarico di Brioschi derivante dalla scarsa attenzione prestata dalle Istituzioni Italiane rispetto alla necessità di eseguire estensive campagne di misura delle correnti fluviali ha accompagnato gli idraulici italiani fino ai giorni nostri. Vi era, e vi è oggi, la consapevolezza scientifica e tecnica che le misure idrometriche fossero essenziali per la soluzione di numerosi problemi territoriali: ad esempio, comprensione innanzi tutto di quello che stava accadendo nel Po durante l'Ottocento e che era stato all'origine della stessa Commissione Brioschi; inoltre, progetti delle costruzioni idrauliche, preannuncio delle piene, gestione dei serbatoi, navigazione interna, approvvigionamento idrico, conservazione e ripristino degli *habitat* acquatici. Le misure idrometriche, effettuate in modo standardizzato, con precisione nota e per un periodo sufficientemente prolungato, sono tuttavia raramente disponibili. Un esame della situazione sino ai giorni nostri e alle prospettive future non può che fare riferimento a quanto avviene in quei Paesi che hanno dimostrato una maggiore sensibilità al problema delle misure idrometriche come, per esempio, gli Stati Uniti d'America, nella speranza che possa servire di stimolo anche all'Italia, che ha dato i natali ai pionieri dell'idrometria fluviale.

Come riportato da HIRSH & COSTA (2004), l'ente statunitense *United States Geological Survey* (USGS) gestisce 7000 stazioni idrometriche, ovvero il 90% delle stazioni che forniscono i dati idrometrici per l'uso pubblico negli Stati Uniti d'America. La maggior parte dei dati di portata non sono basati su misure dirette, ma sulla misura del livello idrico e sulla trasformazione dei livelli in portate ottenuta attraverso una scala di deflusso. La misura di livello viene ottenuta con una precisione di 3 mm e le incertezze maggiori nei dati di portata sono dovute ai limiti delle scale di deflusso derivanti dal fatto che le sezioni fluviali cambiano nel tempo. La maggiore attenzione è stata rivolta, almeno fino a 10 anni fa, all'aggiornamento delle scale di deflusso, eseguito dal personale dell'USGS attraverso misure topografiche e di velocità con frequenza di 8-10 volte all'anno (per ogni stazione). Questo procedimento ha permesso di ottenere dati di portata con una precisione pari a 5-10% e di rendere questi dati pubblici con tempi di 6-18 mesi. La possibilità di ottenere dati di portata adeguati attraverso misure di livello e scala di deflusso è condizionata dal fatto che le misure dirette di velocità con mulinello idrometrico sono molto onerose e possono risultare inaffidabili, talora poco praticabili o impossibili in certe condizioni, come, per esempio, durante le piene o in tratti nei quali la corrente è rapidamente variabile. In tali circostanze la portata viene stimata, sebbene con precisione sensibilmente minore, sulla base delle tracce lasciate dalla corrente sulle sponde (da oggetti galleggianti, vegetali o derivanti dall'*inquinamento* antropico) e formule empiriche. Oggi, la determinazione delle scale di deflusso continua a rappresentare la fase più problematica del processo di raccolta delle misure idrometriche; negli ultimi 10 anni, tuttavia, sono state introdotte alcune importanti innovazioni nella misura diretta delle velocità.

L'innovazione più importante è data dall'uso dell'*Acoustic Doppler Current Profiler* (ADCP) (SIMSON, 2001). L'ADCP utilizza onde acustiche, tipicamente con frequenza nel campo 300-3000 kHz, per misurare la velocità idrica lungo gran parte del profilo verticale della corrente, in relazione al cambiamento della frequenza del segnale acustico riflesso dal materiale trasportato in sospensione. L'ADCP determina inoltre la profondità idrica della corren-

te in funzione del tempo di transito del segnale riflesso dall'alveo fluviale e la larghezza della corrente in funzione della velocità della barca su cui viene posizionato il sensore, che è a sua volta determinata attraverso lo spostamento Doppler di un diverso segnale riflesso dall'alveo. L'ADCP ha portato tre importanti contributi alla misura diretta delle correnti fluviali: (1) una misura di portata con mulinelli idrometrici richiede almeno 20 misure puntuali e può essere completata in diverse ore, mentre la misura basata sull'ADCP richiede alcuni minuti e risulta ugualmente precisa; (2) l'ADCP permette di misurare correnti fluviali fortemente variabili nello spazio e nel tempo che non sono misurabili con misure convenzionali basate su mulinelli idrometrici; (3) l'ADCP permette di misurare direttamente la variazione della velocità lungo il profilo verticale senza dovere necessariamente assumere una variazione di tipo logaritmico. L'uso dell'ADCP è già piuttosto diffuso negli Stati Uniti d'America e permette di svolgere un numero di misure dirette delle correnti di piena circa tre volte superiore rispetto a quello ottenibile con lo stesso personale e con mulinelli idrometrici.

Le campagne sperimentali per la misura delle correnti rivelano che in natura si possono sempre realizzare condizioni nelle quali i metodi esistenti, che richiedono il posizionamento di strumenti all'interno della corrente, si dimostrano inadeguati. Esse si verificano per esempio quando l'alveo fluviale è instabile, oppure quando condizioni di trasporto di sedimenti e materiale flottante durante una piena precludono l'uso di mulinelli idrometrici o dell'ADCP. In ragione di tali limitazioni, i ricercatori dell'USGS sono oggi impegnati nello studio di tecniche di misura basate sull'uso di microonde o di radar a bassa frequenza per misurare la portata senza il bisogno di posizionare strumenti all'interno delle correnti fluviali. Per determinare la portata relativa in una sezione fluviale è necessario misurare: (1) la velocità media e (2) la sezione trasversale della corrente, ovvero la larghezza superficiale e la profondità media. I metodi studiati attualmente mirano a determinare la velocità media attraverso una serie di misure puntuali effettuate con un diffusore Bragg ad alta frequenza (10 GHz) che emette un segnale radar Doppler, mentre la sezione trasversale viene determinata sospendendo uno strumento noto con la dicitura inglese di "*ground-penetrating radar*" (GPR) a bassa frequenza (100 MHz) sulla corrente in corrispondenza di un ponte o di una teleferica (COSTA *et Alii*, 2000). In alternativa all'uso del ponte o della teleferica, il GPR può essere montato su un elicottero (MELCHER *et Alii*, 2002). Tali misure, inoltre, offrono il vantaggio notevole di non richiedere una scala di deflusso, essendo le variabili (velocità media e sezione trasversale della corrente) misurate direttamente e in modo continuo. I metodi di misura delle portate, che non richiedono il posizionamento di strumenti entro la corrente fluviale (cosiddetti "non invasivi"), offrono interessanti prospettive, anche se devono essere ancora risolti diversi problemi, per una loro applicazione come, per esempio, quello relativo alla limitazione nella penetrazione del segnale radar in acqua. Nei metodi che misurano le caratteristiche superficiali della corrente, è inoltre necessario fare un'assunzione circa la variazione della velocità idrica con la profondità della lama d'acqua; nonostante sia comunemente accettato che la velocità vari con legge logaritmica, tale circostanza non è sempre verificata in natura (per esempio, negli alvei montani).

Lo sguardo al futuro si completa considerando la possibilità di misurare le caratteristiche delle correnti dallo spazio (FRAMJI, 1974; ALDORF & LETTEN-

MAIER, 2003; ALSDORF *et Alii*, 2003). I sistemi di acquisizione delle misure idrometriche dallo spazio possono essere basati sull'uso dell'altimetria radar, per la misura dei livelli, o dei radar ad apertura sintetica di tipo interferometrico, per la misura delle velocità superficiali (GOLDSTEIN & ZIEBLER, 1987). Molti fiumi del mondo non sono provvisti di stazioni idrometriche: per questo motivo, la possibilità di misurare i corpi idrici superficiali su tutto il pianeta apre importanti prospettive al miglioramento della conoscenza del ciclo idrologico e dei relativi fattori meteoroclimatici e biogeochimici alla scala globale. La possibilità di seguire l'evoluzione spazio-temporale delle correnti fluviali, che si esplicano nelle aste fluviali principali di un bacino idrografico di grandi dimensioni, con estensione di oltre 100.000 km², inoltre, offre notevoli potenziali di miglioramento per la previsione e il preannuncio delle piene fluviali.

Si deve precisare, comunque, che l'affidabilità delle misure delle correnti fluviali dallo spazio non è ancora provata e appare in prospettiva più realistica per i grandi fiumi (VÖRÖSMARTY *et Alii*, 2002). D'altro canto, anche i corsi d'acqua di piccole e medie dimensioni, ovvero, in questo contesto, quelli che sottendono aree inferiori a 10.000 km², sono molto importanti per lo sviluppo e la protezione del territorio. Per essi le misure a terra, di tipo convenzionale (per esempio, quelle basate su mulinelli idrometrici) e di tipo avanzato (per esempio, quelle basate sull'ADCP), rimarranno verosimilmente necessarie. In generale, si può prevedere che le nuove tecnologie di misura delle correnti fluviali di piccole e grandi dimensioni costituiranno un'utile integrazione delle tecniche convenzionali e occorrerà concepire sistemi integrati di simulazione e di assimilazione delle informazioni fornite da diverse fonti; i metodi noti con la dicitura anglosassone "*data assimilation*" permettono di determinare lo stato dei sistemi idrologici (per esempio, umidità del suolo o livello idrico nei corsi d'acqua) attraverso la combinazione di diversi tipi di informazioni (per esempio, previsioni modellistiche, misure convenzionali e misure avanzate) e costituiscono l'oggetto di una delle più importanti linee di ricerca attuali in idrologia (TROCH *et Alii*, 2003).

È appena il caso di evidenziare, infine, come la visione per il futuro dell'idrometria fluviale si basi oggi sugli stessi principi ai quali si sono ispirati uomini di scienza del passato come, insieme ad altri, Brioschi, Lombardini, Guglielmini, Castelli, Cabeo, Galileo e Leonardo, e come anche gli strumenti tecnologici di cui oggi disponiamo siano stati concepiti essenzialmente grazie al merito intellettuale che loro stessi hanno fatto germinare. Il processo di formazione dell'idrometria fluviale fornisce un evidente esempio dello stretto legame tra lo slancio scientifico verso la comprensione dei fenomeni naturali, innato nell'Uomo, e lo sviluppo tecnologico, richiesto per la soluzione dei problemi reali; due fasi separate da un unico fattore essenziale: il tempo.

L'autore ringrazia il Prof. Maurizio Pellegrini e la Dott.ssa Laura Arru (Università degli Studi di Modena e Reggio Emilia), il Prof. Baldassare Bacchi (Università degli Studi di Brescia), il Prof. Stefano Piva (Università degli Studi di Ferrara) e il Prof. Stefano Mambretti (Politecnico di Milano) per le loro revisioni critiche, che hanno portato a miglioramenti del manoscritto.

Note

1. Vi è oggi la tendenza di includere altre misure relative all'acqua. Il termine anglosassone "hydrometry" comprende talvolta la misura del trasporto solido fluviale (BOITEN, 2000) o addirittura l'osservazione e la misura di tutte le variabili che descrivono il ciclo idrologico, ottenute attraverso sensori a terra o remoti, nonché i metodi di trattamento dei dati e delle relative incertezze (HERSCHY, 1998). Nel presente capitolo si considera la definizione originale di idrometria, ovvero quella che ripone l'attenzione sulle correnti fluviali.

2. In estrema sintesi, il metodo scientifico introdotto da Galileo richiede una risposta a due domande: (1) È possibile una verifica empirica? (2) È possibile fare previsioni? Se ad almeno una di queste domande non è possibile dare una risposta positiva, allora non si può parlare, in termini appropriati, di scienza.

3. Il metodo scientifico nacque ufficialmente con Galileo, ma già Platone distingueva tra "opinione" e "conoscenza scientifica". Rispetto ad Aristotele, che viene dopo, Platone pensa che le interpretazioni qualitative della natura siano superficiali e nascondano interpretazioni più profonde di carattere quantitativo. Aristotele non è interessato alle leggi matematiche che descrivono quantitativamente come si evolvono i fenomeni naturali, bensì alla spiegazione in termini qualitativi di cosa siano i fenomeni naturali e perché essi si verificano. Galileo non sembra invece interessato alle descrizioni qualitative, ma solo a quelle quantitative esprimibili in termini matematici rigorosi. Apparentemente, la visione Aristotelica è più generale e ambiziosa. In realtà, entrambe mirano a fornire risposte su come (quantitativamente) e perché (qualitativamente) i fenomeni naturali si verificano. La differenza è nel metodo, essendo quello scientifico vincolato alla verifica sperimentale (quantitativa). Tale metodo è accettato anche ai giorni nostri, come espresso in modo inequivocabile dal noto fisico Richard Phillips Feynman: "*It doesn't matter who the physicist is, or how smart he/she is, or how he/she came up with the new law. If it disagrees with experiment, then it is wrong*".

4. Equazione di continuità = esprime una legge di conservazione della massa. Per un osservatore che considera un volume di controllo fisso nello spazio (osservatore Euleroiano), tale equazione esprime che la variazione nel tempo della massa contenuta nel volume di controllo è pari alla portata in massa (massa per unità di tempo) entrante meno la portata in massa uscente. Nel caso di un tronco fluviale compreso tra le sezioni 1 e 2, assumendo che la densità dell'acqua sia uniforme e permanente e che non si abbiano contributi laterali, l'equazione di continuità esprime che la variazione nel tempo del volume idrico compreso tra le sezioni 1 e 2 è pari alla portata (volume per unità di tempo) che transita attraverso la sezione 1 meno la portata che transita attraverso la sezione 2. Se il moto è permanente (ovvero invariante nel tempo) si deduce che la portata nelle due sezioni 1 e 2 è la medesima. Si ottiene dunque che in un tratto fluviale lungo il quale i contributi laterali sono assenti, la portata $Q = \Omega U$, dove Ω è la sezione della corrente e U è la velocità media della corrente, si mantiene costante al variare della sezione fluviale.

5. Tale critica s'inserisce nel contesto della disputa tra Bologna e Ferrara sulla sistemazione idraulica del fiume Reno già menzionata sopra.

6. Lo stesso BRIOSCHI (1876) definisce la scala delle portate come "*una formola per mezzo della quale il valore della portata di una canale o di un fiume in una data località si esprime in funzione dell'altezza media dell'acqua sul fondo, o meglio dell'altezza denominata idrometrica; e nella quale i coefficienti numerici sono determinati in base ai risultati di osservazioni e di esperienze eseguite nella stessa località*".

7. Mentre l'idraulica del XVIII secolo si concentrò sui flussi idrici attraverso gli orifici, l'idraulica sperimentale del XIX secolo cercò di quantificare la velocità idrica delle correnti che si formano nelle condotte e nei canali aperti. Antoine Chézy (1718-1798) legò per primo la velocità media della corrente U , il raggio idraulico R , il gradiente idraulico S e un coefficiente di proporzionalità C (solo in seguito connesso alla scabrezza della parete) attraverso la legge di potenza $U = C (RS)^{1/2}$. Altre formule vennero in seguito proposte da Gaspard Prony (1755-1839) e da Pierre Girard (1765-1836). Un avanzamento decisivo nell'idraulica delle correnti a pelo libero si ebbe tuttavia solamente in seguito alla pubblicazione di due importanti lavori sperimentali: il primo venne svolto negli Stati

Uniti da Andrew Atkinson Humphreys (1810-1883) ed Henry Larcom Abbot (1831-1927), membri del Bureau of Topographical Engineers, e riguardò il fiume Mississippi (HUMPHREYS & ABBOT, 1861), mentre il secondo fu svolto da Frenchmen Henry Darcy (1803-1858) e da Henry Bazin (1829-1917) e riguardò il Canale di Borgogna presso Digione, in Francia (BAZIN, 1865). Questi dati vennero esaminati da diversi idraulici tedeschi e francesi, tra i quali Philippe Gauckler (1826-1905), a cui si deve la formula di Gauckler-Manning-Stickler, $U = k_S R^{2/3} S^{1/2}$, dove k_S è un coefficiente di conduttanza, comunemente usato anche ai giorni nostri (GAUCKLER, 1867a, 1867b, 1868; MANNING, 1891, 1895; HAGER, 2001). Tale formula venne subito recepita anche nella comunità scientifica e ingegneristica italiana, dove il nome di Gauckler venne però scritto erroneamente come "Gauchler" (GIORNALE DELL'INGEGNERE E DELL'ARCHITETTO, 1868).

8. In più circostanze Brioschi dimostra il suo rammarico per il fatto che in Italia, malgrado le sue esortazioni, non fossero state condotte campagne estensive di misura delle correnti fluviali come era invece stato fatto in Francia e negli Stati Uniti (BRIOSCHI, 1871).

9. La località di Fossadalbero è posta in Provincia di Ferrara, in destra idraulica del fiume Po, circa 10 km a valle di Pontelagoscuro.

