

LA RELAZIONE TRA RESISTENZA AL MOTO DI UN CORPO IMMERSO NELL'ACQUA E PROFONDITÀ DI IMMERSIONE: GLI ESPERIMENTI DI TEODORO BONATI (1724-1820)

Scientia, vol. II, n. 2 (dicembre 2024)
DOI: 10.61010/2974-9433-202402-008
ISSN: 2974-9433

Received 5/07/2024 | Accepted 11/09/2024 | Published online 16/12/2024

Arrigo Pisati
Università di Ferrara
pstrrg@unife.it

Sunto

Presso la Biblioteca Ariostea di Ferrara si conservano ventiquattro volumi di manoscritti del matematico Teodoro Bonati (1724-1820). Fra le carte sono presenti alcuni appunti relativi a tre esperimenti svolti con l'assistenza di Luigi Gozzi (?-1830). Gli esperimenti, volti a studiare il rapporto tra la resistenza opposta dall'acqua al moto di un oggetto e la profondità, criticano nello specifico una teoria formulata nel 1771 dal matematico spagnolo Jorge Juan y Santacilia (1713-1773).

Nelle pagine che seguono riordineremo gli appunti di Bonati e Gozzi, mostrando i pochi risultati ottenuti e ricavabili dal testo, i motivi che li spinsero ad occuparsi del problema, dando invece ampio spazio al funzionamento degli strumenti sperimentali. Essendo fonti inedite ma brevi, si è optato di presentare estratti anche corposi di testo originale, lasciando la descrizione degli esperimenti e delle macchine direttamente agli autori.

Parole chiave: Teodoro Bonati; Jorge Juan y Santacilia; storia dell'idraulica; fisica sperimentale; resistenza dei fluidi

Abstract

The Ariostea Library in Ferrara holds twenty-four volumes of manuscripts by the mathematician Teodoro Bonati (1724-1820). Among the papers, some notes concern three experiments carried out with the assistance of Luigi Gozzi (?-1830). The experiments aimed at studying the relationship between the resistance opposed by water to the motion of an object and depth, specifically criticize a theory formulated in 1771 by the Spanish mathematician Jorge Juan y Santacilia (1713-1773).

In the following pages we will reorder the notes of Bonati and Gozzi, showing

the few results obtained and deducible from the text, the reasons that pushed them to deal with the problem, giving ample space to the functioning of the experimental instruments. Since these are unpublished but short sources, we have chosen to present even substantial extracts of the original text, leaving the description of the experiments and the machines directly to the authors.

Keywords: Teodoro Bonati; Jorge Juan y Santacilia; history of hydraulics; experimental physics; fluid resistance

Teodoro Bonati e i suoi manoscritti

Teodoro Massimo Bonati (1724-1820)¹ fu un importante scienziato e commissario idraulico, che insegnò per trent'anni presso l'Università di Ferrara. Fu autore di numerosi contributi sullo studio delle acque correnti, eseguendo anche esperimenti volti a confutare teorie, come quelle proposte dall'olandese Claude Leopold Genneté (1706-1782), dall'italiano Bernardino Ferrari (1744-1821) e dal francese Pons-Joseph Bernard (1742-1816).

Nel 1772 venne nominato professore di Meccanica e di Idraulica nell'Università di Ferrara², dove contribuì al percorso di riforma degli studi in atto da alcuni anni [Fiocca, Pepe, 1989; Fiocca, 2023, p. 45-50]. Con l'avvento di Napoleone venne nominato membro della consulta degli Juniori e, nel 1804, professore di Idraulica nella Scuola di Idrostatica di Ferrara, con l'assistenza di Luigi Gozzi. La Scuola, nata in seguito alla soppressione dell'Università, formò alcuni giovani di talento, ma ebbe scarso riconoscimento giuridico e fu chiusa nel 1816³.

Membro di numerose commissioni idrauliche, accademie e società scientifiche [Borgato, 2023; Lugaresi, 2023], fu autore prolifico sino alla morte, sopraggiunta nel 1820, all'età di 94 anni. I suoi manoscritti vennero successivamente raccolti e rilegati in ventiquattro volumi e sono oggi conservati presso la biblioteca Ariostea di Ferrara.

Fra tali carte si conservano alcuni appunti relativi ad esperimenti inediti che Bonati condusse al fine di studiare il rapporto tra la resistenza opposta dall'acqua al moto di un oggetto immerso e la profondità di immersione. In parti-

¹ Per approfondimenti sulla biografia di Bonati rimandiamo a Pozzato, 1969 e Pepe, 1992b.

² Una recente analisi dell'attività di insegnamento di Bonati a Ferrara è stata tracciata in Lugaresi, 2024.

³ Riguardo alla riforma dell'università promossa da Napoleone, alla scuola di idrostatica e al liceo di Ferrara rimandiamo a Fiocca, Pepe, 1986, p. 138-142; Fiocca, Pepe, 1989, p. 17-23; Fiocca, 2023, p. 49-50; Patergnani, 2023.

colare vi è una critica alla teoria formulata nel 1771 dal matematico spagnolo Jorge Juan y Santacilia (1713–1773). I manoscritti constano di tre fascicoli⁴. Il primo è inserito nel volume VII delle raccolte Bonati⁵, ed è composto da nove carte in cui è trascritto un estratto delle *Disquisitiones Physico-Matematicae* di Gregorio Fontana [1780] e dell'*Examen maritime* di Jorge Juan [1771]⁶. La grafia non è identificabile ma non è autografa di Bonati. I restanti fascicoli si conservano nel volume VIII della stessa raccolta. Uno è autografo di Bonati⁷, è composto da dodici carte di appunti con numerosi ripensamenti su un possibile testo per una pubblicazione sull'argomento, nonché alcuni conti⁸. Il secondo, autografo di Gozzi⁹, è composto da quattro carte ed illustra, con molta dovizia di particolari, il funzionamento degli strumenti utilizzati negli esperimenti.

Le carte non sono datate. Il fatto però che Bonati sostenga che le esperienze II e III siano state eseguite da Luigi Gozzi¹⁰ «mio sostituto alla cattedra d'Idraulica», mentre la prima da Bonati stesso in Modena, permette di datarle intorno al 1804, anno in cui a Bonati venne conferita la cattedra di Idraulica, con Gozzi come assistente. In quell'anno, infatti, si assentò dall'insegnamento, essendo impegnato in una commissione idraulica a Modena [Biancardi, 2020, p. 20]. Gli strumenti descritti sono andati perduti, e non sono segnalati nell'inventario delle macchine della Scuola d'Idraulica di Ferrara, compilato nel 1808¹¹.

Contesto storico degli esperimenti

Nel 1785 venne pubblicata in Pavia, presso la stamperia di San Salvatore, un'edizione italiana del *Traité élémentaire d'hydrodynamique* di Charles Bossut,

⁴ Parte dei manoscritti di Bonati, conservati anche nella città natale di Bondeno, è già stata studiata [Borgato, Fiocca, 1980; Pepe, 1992a; Borgato, Fiocca, 1994; Biancardi, 2021].

⁵ I volumi sono divisi in fascicoli la cui separazione è indicata da lettere al lapis in ordine alfabetico, ma le singole carte non sono numerate. Ferrara, Biblioteca civica Ariostea, manoscritti classe I, 103, volume VII, lettera *m*.

⁶ Bonati segnala erroneamente “Vol. II, Prop[osizione]17, Scolio”. In realtà il testo è ripreso dalla Scolio II della proposizione 27 del volume 1 [Juan, 1819, vol.1, p. 78–79].

⁷ Ferrara, Biblioteca civica Ariostea, manoscritti classe I, 103, volume VIII, lettera *d*.

⁸ I conti non riguardano l'argomento in questione, ma il riempimento di una vasca da un'apertura e probabilmente furono inseriti in questo fascicolo quando i volumi vennero rilegati.

⁹ Ferrara, Biblioteca civica Ariostea, manoscritti classe I, 103, volume VIII, lettera *e*.

¹⁰ Bonati e Gozzi collaborarono anche nella realizzazione di ulteriori esperienze sulla fuoriuscita di acqua dal foro in un vaso, pubblicate nel 1811 [Bonati, 1811; Di Fidio, Gandolfi, 2014, p. 251].

¹¹ L'inventario si conserva all'Archivio di Stato di Milano, Studi, Parte Antica, busta 252 ed è stato pubblicato da Alessandra Fiocca [Fiocca, 1991].

basata sulla prima edizione francese del testo¹². Curata da Giovanni Gratognini¹³, era arricchita da una sezione in appendice [Bossut, 1785, p. 499-571], contenente il testo delle lezioni di idrodinamica tenute all'Università di Pavia da Gregorio Fontana¹⁴, due articoli e uno scolio del medesimo autore¹⁵ e una memoria di Teodoro Bonati, già pubblicata l'anno precedente nelle *Memorie della Società dei Quaranta* [Bonati, 1784].

Lo scolio presentato da Fontana ripercorreva l'evoluzione storica dei saggi del quarto di secolo precedente, rivolti al problema della determinazione della resistenza subita da un oggetto in movimento all'interno di un fluido¹⁶. L'autore mostrava come le teorie proposte fino ad allora fossero in contrasto fra loro e, dunque, fosse ancora impossibile comprendere la dipendenza della resistenza dalla forma dell'oggetto, dalla velocità di movimento e dalla profondità. Fontana diede ampio spazio allo studio di una teoria proposta da Jorge Juan y Santacilia¹⁷ nell'opera *Examen marítimo* [1771], dove raccolse i risultati di anni di studio sul movimento delle navi condotto per ordine del governo spagnolo.

Juan si proponeva di studiare analiticamente la resistenza subita orizzontalmente e verticalmente dai corpi immersi in un fluido e la forma che il corpo avrebbe dovuto avere affinché fosse minima [Juan, 1819, vol. 1, p. 214-272], ampliando il discorso anche ai corpi galleggianti e parzialmente immersi [Juan, 1819, vol.1, p. 273-285].

L'impianto teorico di Juan si discostava da quelli dei matematici del XVII secolo, che lo stesso autore ripercorse in un discorso preliminare anteposto al testo, nel quale ricavò i principi fallaci delle varie teorie:

¹² Il trattato ebbe due edizioni, una nel 1771 e una nel 1786-1787 [Bossut, 1771; Bossut, 1786-1787].

¹³ Su Giovanni Gratognini (1757-1824), studente e professore di matematica all'Università di Pavia, si conosce ad oggi molto poco [Pannella, Savorini, 1904, p. 9-11].

¹⁴ Gregorio Fontana, al secolo Giovanni Battista Lorenzo (1735-1803), scolopio, fu docente a Roma e Pavia. In quest'ultima sede insegnò Logica, Metafisica, Matematica e Fisica ed assunse la direzione del primo nucleo della biblioteca dell'università [Baldini, 1997].

¹⁵ Le lezioni occupavano le pagine 149-497 del testo, mentre i due articoli (*Principj di Teoria dei Mulini a vento. Delle figure di equilibrio, alle quali si riducono i fluidi, le cui particelle sono agitate da quali forze si vogliano*), le pagine 571-648. Lo scolio (*Sopra la resistenza de' fluidi*) chiude il testo [Bossut, 1785].

¹⁶ Fontana si era già occupato cinque anni prima di determinare la resistenza di un corpo immerso in un fluido, con un capitolo dedicato all'argomento nelle *Disquisitiones Physico-Mathematicae*, di cui Bonati possedeva un estratto tradotto in italiano [Fontana, 1780, p. 323-338].

¹⁷ Jorge Juan y Santacilia (Novelda, 5 gennaio 1713 - Madrid, 21 giugno 1773) fu un ufficiale della marina e scienziato spagnolo. Esegui ricerche geodetiche, esplorazioni ed osservazioni astronomiche. Nel 1750 venne nominato responsabile dei cantieri navali e dell'armamento della flotta spagnola [Selleés, 2009].

Tutto l'errore perciò deve cadere nella supposizione, [...] che le resistenze de' fluidi siano in ragione de' quadrati delle loro velocità, e de' quadrati de' seni d'incidenza. Questo principio, per quanto sospetto egli sia, è però ricevuto dai primarj Geometri, e Fisici dell'Europa [Juan, 1819, p. xiii].

Già le ricerche di vari autori (Newton, Huygens, Jakob Bernoulli) avevano evidenziato proposte alternative e Juan, dubbioso che fossero valide, decise di eseguire degli esperimenti che permettessero di costruire una nuova teoria coerente con l'osservazione empirica, trovando che

l'azione esercitata dall' acqua corrente contro una superficie [...] dipende [...] dalla maggiore profondità della sua immersione nello stesso fluido: di modo che la stessa tavola, o superficie, della forma d'un parallelogrammo rettangolo, prova resistenza minore, avendo orizzontale il suo lato maggiore, di quello, che se lo stesso lato sia verticale [Juan, 1819, vol. 1, p. xvi].

Da qui Juan, ragionando con oggetti a forma di parallelepipedo, ricavò nuove leggi¹⁸, le quali vennero così riassunte da Fontana:

[Juan] trae [...] alcuni canoni, i quali quanto sono singolari e inaspettati [...] perché la forza, dice il Geometra Spagnuolo, non dipende soltanto dalla superficie colpita, [...] ma ancora dalla sua maggior profondità dentro il fluido: le resistenze stanno a un dipresso come le radici quadrate delle altezze o profondità della tavola nel fluido. [...] e pianta per canone, che le resistenze de' fluidi sono come le densità de' medesimi, come le superficie percosse, come le radici quadrate delle profondità di tali superficie dentro i fluidi, come le semplici velocità e come i semplici seni degli angoli d'incidenza [Bossut, 1785, p. 654-656].

Tuttavia:

questo non è ancor tutto (avverte il mentovato Autore), poiché ciò riguarda il solo caso che la superficie stia interamente immersa nel fluido,

¹⁸ Per una trattazione in chiave moderna del ragionamento di Juan, rimandiamo a Calero, 2001. Nel caso specifico del corpo parallelepipedo totalmente immerso che interessò Bonati, rimandiamo alle pagine 241 e 242.

e che la parte anteriore del corpo sia simile alla posteriore: quando una parte della superficie si trova fuori del fluido allora risulta nella resistenza una nuova quantità, la quale non ha alcuna dipendenza dalla superficie urtata, e solo deriva dalla velocità senza però essere proporzionale alle semplici velocità, né ai loro quadrati, ma sibbene ai quadrato-quadrati di quelle [Bossut, 1785, p. 656].

Il tono con cui Fontana traccia i punti principali della teoria di Juan lasciano intendere che egli avesse non pochi dubbi sulla validità della stessa. Infatti, dopo aver mostrato le posizioni di Juan, Fontana presentò quelle contrapposte di Smeaton [Smeaton, 1759], D'Alembert [D'Alembert, 1752] e Bossut [Bossut, 1777; Bossut, 1778a; Bossut, 1778b], mostrandone le notevoli differenze da quelle dello scienziato spagnolo¹⁹. Concludeva perciò:

Se dopo i penosi travagli di questi grand'Uomini resta ancora in questa delicata materia tanto d'incertezza e d'oscurità [...] mal si apporrebbe il Pirronista, il quale volesse con ciò farsi giuoco della vantata evidenza della Matematica: Questa Scienza non crea, nè inventa i dati, di cui si vale, ma li prende dalle altre Scienze ad imprestito, e non è sua colpa, se queste non le somministrano ciò che ella domanda [Bossut, 1785, p. 663-664].

L'esperimento di Bonati

Bonati, letto lo scolio, si convinse che

Lo stesso P[adre] Fontana non fosse troppo persuaso delle teorie del Juan. Che che ne sia della opinione del Fontana, io sono per addurre qui tre Sperienze[,] le quali tendono a far credere, che i corpi solidi mossi nell'acqua anche alla profondità di 35 piedi di Parigi²⁰ sotto la superficie non soffrano dall'acqua una resistenza sensibilmente maggiore, che essendo mossi poco sotto alla superficie, e sicuramente ben lontano dalla ragione sudduplicata delle profondità²¹.

¹⁹ Altri autori presentati sono Borda [Borda, 1763a; Borda, 1763b; Borda, 1767a; Borda, 1767b] e Marguerie [Marguerie, 1770], che erano già stati trattati, con Smeaton, da Juan. Fontana non analizza invece i contributi di Euler [Euler, 1778a; Euler, 1778b], pubblicati anch'essi sulle memorie dell'Accademia delle scienze di Parigi.

²⁰ Un piede parigino corrisponde a 32,484 cm [Almanacco, 1897, p. 474].

²¹ Ferrara, Biblioteca civica Ariostea, manoscritti classe I, 103, volume VIII, lettera d.

Delle tre esperienze, la prima venne eseguita dallo stesso Bonati a Modena, mentre le restanti due da Gozzi a Ferrara. L'intenzione di Bonati era quella di descrivere le esperienze «dettagliatamente ed in modo che ognuno volendo potrà ripeterle» ma, salvo quelle di Gozzi che risultano già disposte in bella copia, i risultati di Bonati vennero solamente accennati.

Il primo esperimento (Esperienza I) era volto ad indagare la resistenza opposta al movimento di un oggetto immerso in acqua stagnante. Venne eseguito in uno dei pozzi di Modena, «famosi [...] descritti dal Ramazzini»²² e può essere descritto nel seguente modo²³:

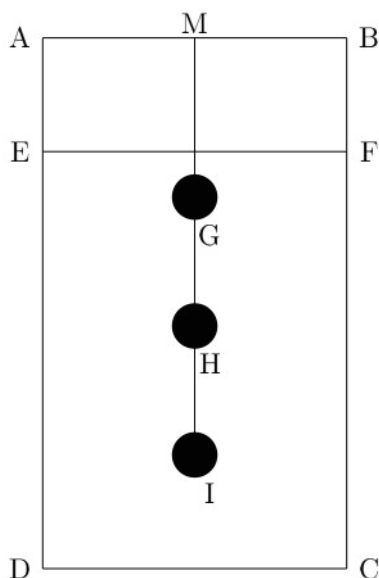


Fig. 1 - Taglio verticale del pozzo.

ABCD rappresenta la sezione verticale del pozzo. Il livello dell'acqua indicato da *EF* è misurato a 38 piedi parigini di altezza dal fondo *DC*. Viene posto un regolo *AMB* in cima al pozzo, dove *M* è il punto medio di *AB*.

In *M* è legata l'estremità di un «cordoncino di seta», alla cui altra estremità è posta una «palla di legno con entro una certa porzione di piombo [del] diametro di cinque pollici».

²² Bernardino Ramazzini (1633-1714) è stato uno scienziato e medico italiano. Bonati si riferisce in questo caso alle osservazioni eseguite da Ramazzini nel 1695 con termometri e barometri, con cui mostrò la differenza di temperatura e pressione fra i pozzi e l'ambiente esterno [Marinozzi, 2016].

²³ Bonati propone più disegni e descrizioni dell'esperimento. Presentiamo in questa sede un sunto dei vari appunti.

Il sistema è posto in equilibrio, immergendo la palla fino al punto *G*, che si trova un piede al di sotto del pelo dell'acqua. La palla è dunque lasciata libera di cadere per 17 piedi, sino al punto *H* e poi, dopo aver atteso che il sistema torni in equilibrio, si lascia cadere per altri 17 piedi, fino al punto *I*, misurando il tempo di entrambe le cadute.

La prima caduta avvenne in $7 \frac{1}{2}$ secondi, mentre nel secondo tratto in 8 secondi. L'esperimento venne «replicato più volte [...] [e] riuscì sempre assai prossimamente lo stesso».

Il primo esperimento di Gozzi

Il primo esperimento eseguito da Gozzi (Esperienza II) era intenzionato a valutare se la resistenza dell'acqua ad un corpo che si muove orizzontalmente, dipendesse dalla profondità.

Venne richiesto l'utilizzo di uno strumento «consimile a quelli del Cav[alier] Bordà». Jean Charles Borda aveva infatti realizzato una serie di esperimenti [Borda, 1763a; Borda, 1763b], con cui studiare la resistenza dei fluidi. La macchina consisteva in una serie di pale installate su una ruota ed immerse in acqua, che venivano fatte ruotare grazie alla caduta di un peso legato ad una corda avvolta intorno alla ruota stessa.

Gli appunti di Gozzi descrivono con dovizia di particolari il funzionamento del proprio apparato.

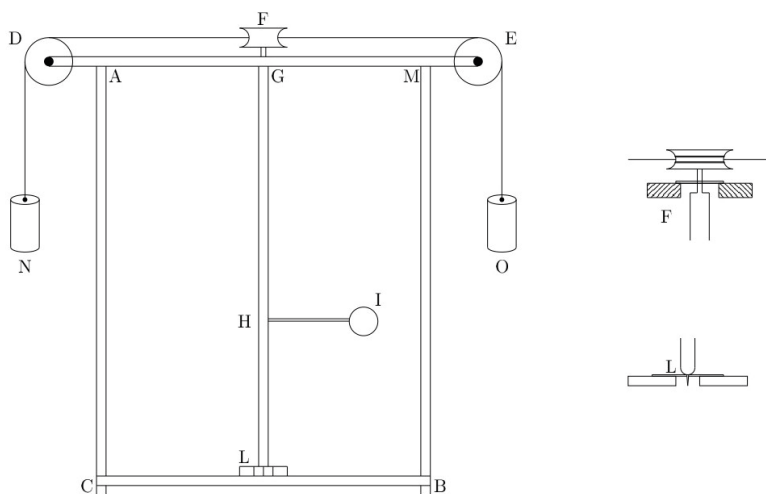


Fig. 2 - Apparato utilizzato nell'esperienza II con particolari della carrucola e del perno.

Il vaso *AB* ha la figura d'un cono troncato la cui base maggiore *AM* è di polici parigini $43 \frac{3}{4}$ e l'altra *CB* di polici $37 \frac{3}{4}$ misurati interiormente; la sua altezza verticale è di polici 33.

Nel centro *L* del fondo *CB* vi è situato un legneto con un foro piuttosto grande ed al disopra munito di una lastra di lato con altro foro minore del primo, e ciò per diminuire l'attrito del perno del[']asta che vi deve girare. *GL* è un[']asta cilindrica verticale di legno la quale ha un perno di ferro nella sua parte inferiore *L* che può girare nel sudescritto legneto *L*.

Quest[']asta ha un altro perno superiormente che porta al disopra una carucola *F* il cui diametro è di polici $2 \frac{2}{3}$. Per ritenere poi l'asta verticale ho messo un legno *AM* come diametro al[la] parte superiore *AM* nel cui mezzo evi un foro grande munito di una lastretta con foro più piccola dove gira il perno e con esso la carucola *F*.

Alle estremità di questo legno vi sono poste due carucole mobilissime le quali servano a portare un cordone *FEO* il diametro di queste e di linee 24. La parte superiore del[']asta ed inferiore è meglio espresse in *L* ed *F*. L'asta poi verticale *GL* nella sua lunghezza ha diversi fori distanti uno dal altro polici tre ne quali si può impiantare un ferro *HI* normale alla asta sudetta; questo ferro *HI* porta alla sua estremità una paletta *I* di lastra di otone e di forma circolare del diametro di polici 4 dal centro poi di questa paletta sin al centro del asta *GL* vi è costantemente polici 12.

Posto ciò quando vuole fare un'esperienza vi situa il vaso *AB* bene orizzontale e viene d'acqua s'impianta la paletta *I* a quel'altezza che piace indi alla carucola *F* si avvolge due cordoni *FDN*, *FEO* uno per un verso e l'altro per l'altro i quali passando sopra le carucole rispettive *D*, *E* portano due pesi eguali *N* [...] *O* i quali lasciati in libertà col proprio peso svolgono i cordoni facendo così girare l'asta verticale *GL* e con essa la paletta *I* [...] E così calcolato il tempo di una ho più rivoluzione con li stessi pesi *N*, *O* ma così la paletta *I* a diverse profondità sotto la superficie se ne può valutare il rapporto delle resistenze. [...] L'addoppiare due pesi in vece di uno è stato in riflesso di diminuire l'attrito nella parte superiore²⁴.

Gozzi proseguì spiegando come aveva eseguito l'esperimento:

Empito il vaso *AB* sino in *AM* ed alzata la paletta *HI* sino ad avere il

²⁴ Ferrara, Biblioteca civica Ariostea, manoscritti classe I, 103, volume VIII, lettera e.

suo centro sotto la superficie del acqua polici 3 ho attaccato in *N* ed *O* due pesi di trè oncie ognuno e posto tutto in quiete con un orologio a pendolo che batteva i secondi[,] ho lasciato in libertà i due pesi i quali hanno fat[t]o compiere un giro giro alla paletta *I* in diecisette secondi ho lasciato continuare il moto della paletta ed ha compiuto il secondo giro in secondi sedici e mezzo circa come pure un altro giro di seguito egualmente in sedici e mezzo circa cosìche essatamente ha compiuti trè intere rivoluzioni in cinquanta secondi: *OH* replicata l'esperienza ad acqua ferma otto volte ed i risultati sono stati conformi al primo[.] Ho meso poi in vece dei pesi *N* ed *O* di oncie trè ne ho messi altri due ognuno d'oncie $8 \frac{1}{2}$ i quali, ad acqua ferma hanno fat[t]o compiere alla paletta *I* il primo giro in secondi otto pocco più ed il secondo in otto e mezzo ma essatamente in diecisette secondi due rivoluzioni replicata l'esperienza dieci volte ad acqua ferma i risultati sono stati conformi. Indi ho abbassato successivamente la paletta metendola cioè a polici 6,9[,]12,15,18,21,24,27 e 30 sotto la superficie è replicate le sperienze sudette ho sempre trovato che qualunque sia la profondità dove girri la paletta sempre mi ha compito tre rivoluzioni quasi con moto equabile coi pesi piccoli in cinquanta secondi e coi pesi maggiori sud[dett]i due rivoluzioni in diecisette. Le sperienze le ho replicate più di sei volte ognuna ad acqua ferma ed i risultati sono stati conformi.

Alla descrizione dell'esperimento seguono anche alcune osservazioni personali, utili per chi avesse dovuto riprodurlo successivamente. Gozzi segnalava in particolare che dopo aver lasciato cadere il peso e aver fatto ruotare le pale, l'acqua restava in movimento per un certo tempo. Prima di poter ripetere l'esperimento bisognava attendere che l'acqua fosse ferma, altrimenti

i trè giri si compivano in meno dei 50 secondi coi piccoli pesi ed in meno dei 17 coi pesi maggiori e perciò che ho dovuto sempre aspettare una mezzora da un sperimento al altro²⁵.

Curiosamente osservava poi che, se veniva cambiato il senso di rotazione fra una prova e la successiva, il tempo necessario per compiere i tre giri aumentava. Gozzi provò inoltre a compiere esperimenti con pesi ancora maggiori ma il rapporto rimaneva invariato

²⁵ *Ibidem*.

senonche alla superficie si formavano dei piccoli vortici e dei moti diversi ed ho giudicato troppo complicato il movimento da paragonarne gl['] effetti con essatezza come ne precedenti.

Inoltre, il moto della pala risultava accelerato. Gozzi attribuì la causa al peso della corda che, srotolandosi, si aggiungeva a quello del pesetto; oltre alla differenza di attrito che

dopo il primo giro dev[']essere minore avendone per così dire spianata un po più la strada[.] tutto ciò credo sia la causa del piccolo acceleramento della paletta contando pure per la massima il moto circolare del fluido il quale dev[']esser maggiore nello terzo giro che nel primo²⁶.

Infine, osservava che il primo esperimento compiuto in assoluto

mi si compì le tre rivoluzioni in 48 secondi ma li altri sempre in 50[;] ho meditato la causa e credo ne sia stato che l'asta nella prima sperienza non era ancora penetrata dal[l']acqua e nelle sucesive ne era tutta imbevuta cioè d'un maggior peso accrescendone così la resistenza o attrito nella parte inferiore²⁷

Bonati poteva concludere che²⁸:

Una ventola [...] mossa nell'acqua da un peso ha impiegato lo stesso tempo in fare tre giri nell'acqua stagnante tanto quant'era sotto la superficie dell'acqua mezzo piede, che quand'era alla profondità di un piede, un piede e mezzo, o di due piedi.

Il secondo esperimento di Gozzi

Il secondo esperimento di Gozzi (Esperienza III) voleva valutare, similmente a quello eseguito da Bonati, se la resistenza dell'acqua dipendesse dalla profondità, nel caso di un moto verticale.

Lo strumento ideato da Gozzi era così costituito:

²⁶ *Ibidem.*

²⁷ *Ibidem.*

²⁸ Ferrara, Biblioteca civica Ariostea, manoscritti classe I, 103, volume VIII, lettera d.

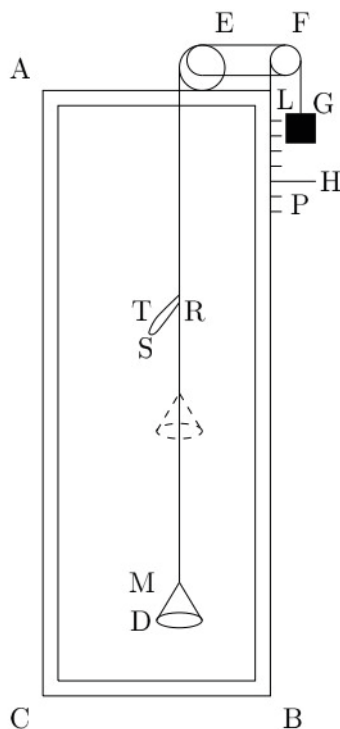


Fig. 3- Apparato utilizzato nell'esperienza III.

Il vaso *AB* è un prisma parallelepipedo retto che ha di base in quadrato di trè piedi parigini di lato e di altezza piedi dodici, misure interne, *E* ed *F* sono due carucole mobile una delle quali cioè la *E* corrisponde al centro circa del vaso è l'altra *F* sporge un pocco infuori del vaso. Un cordone *GFEM* attraversa le due carucole ed il capo *M* dentro il vaso sostiene una coppa *D* di una bilancia del diametro di polici quattro e l'altro capo *F* sostiene un peso *G* di oncie trè essteriormente al vaso qui segnato in piedi di parigi una scalla *LP* con una lastra *PH* che si puo fermare a qualunque altezza *LP*²⁹.

Anche in questo caso Gozzi descrive con precisione gli esperimenti condotti:

Posta la bilancia al fondo del vaso tutto pieno d'acqua ho ridotto il peso *G* in *L* cosichè la *GH* sia di un piedi indi messo in liberta ho osservato

²⁹ Ferrara, Biblioteca civica Ariostea, manoscritti classe I, 103, volume VIII, lettera *c*.

che il peso G ha scorso lo spazzio GH d'un piede in sette secondi e peso la bilancia D ha pure scorso uno spazzi[o] d'un piede alinsu in sette secondi. Sono andato successivamente accordiando il cordone EM , (col avvertenza di lasciarvi attaccato lo stesso cordone come si vede in RST onde non scemare il peso dalla parte della bilancia) riducendo cioè il piatto sotto la superficie[e] piedi 11, 10, 9, 8, 7, 6, 5, 4, 3, due e uno ma sempre il peso G si trovava in L distante da P un piede posto tutto in quiete ho sempre trovato che per far percore[re] un piede di spazio alla sudetta bilancia con un peso di trè oncie ferraresi vi ha sempre impiegato minuti sette sia sotto la supperficie un piede sia sotto la supperficie dodici piedi. Li stessi sperimenti li ho replicato in un pozzo con un egual apparato ma con acqua alta quindici piedi sopra il fondo ed ho trovato lo stesso con differenze di piccole frazioni di secondi d'attribuirsi al attrito o altra circostanza ignota di meccanismo che mai manca nelle sperienze³⁰.

Seguono anche in questo caso delle osservazioni ad uso di successivi sperimentatori. Si segnala che un peso maggiore a tre once faceva «sviare» la direzione verticale della coppa. Nuovamente, inoltre, nel primo esperimento svolto in assoluto si presentavano delle difformità:

Nelle prime sperienze il peso G mi percoreva lo spazzio GH di un piede in sei secondi e meno pocco più indi costantemente in sette. Io ho giudicato che fosse che il cordone nel primo sperimento non essendo ancora imbevuto pesava meno che nelli altri sperimenti (parlo di quella parte di cordone che veniva sopra l'acqua particolarmente)³¹.

Bonati poteva così concludere che:

Una lastra orizzontale³² è stata alzata dentro l'acqua dallo stesso peso per l'altezza di un piede in tempi eguali tanto quand'era sotto la superficie p[ied]i 2, e p[ied]i 5, e p[ied]i 7 ec[cetera]³³.

³⁰ *Ibidem.*

³¹ *Ibidem.*

³² Nella descrizione più completa dell'esperimento all'interno degli appunti di Bonati di fa riferimento ad una lastra orizzontale, mentre in un altro appunto ad una coppa. Come abbiamo visto, Gozzi presenta la macchina come composta da una coppa.

³³ Ferrara, Biblioteca civica Ariostea, manoscritti classe I, 103, volume VIII, lettera *d*.

Conclusioni

Grazie agli esperimenti condotti, Bonati e Gozzi ritenevano di aver mostrato sperimentalmente che la resistenza dell'acqua non dipende dalla profondità, al contrario di quanto supposto da Juan.

Bisogna notare però che il testo conservato è parziale e manca di dati sperimentali precisi, verosimilmente segnati su altri *folii* andati perduti. Le conclusioni vengono infatti tracciate a partire da dati vaghi («secondi otto poco più»). Probabilmente, trattandosi di una prima stesura di una memoria riguardante gli esperimenti, ne venne tracciata a grandi linee la struttura, rimandando l'inserimento dei dati precisi a una stesura successiva, mai realizzata, o non pervenuta fino a noi.

Contemporaneamente, il dibattito scientifico italiano proseguì, e diversi autori giunsero a conclusioni simili a quelle di Bonati e Gozzi, in particolare circa la fallacia della teoria del matematico spagnolo.

Nel 1808 Giuseppe Venturoli ebbe modo di confrontare le teorie di Newton, Romme³⁴ e Juan. Convinto che

la Teoria di Juan [si debba trattare] siccome un ipotesi, nulla meno che la precedente [Romme]. Sarà della speranza il decidere qual delle due s'avvicini di più alla vera legge della natura [Venturoli, 1809, p.167].

Venturoli presentò quindi diversi dati ricavati sperimentalmente³⁵, concludendo che la teoria del matematico spagnolo fosse falsa [Venturoli, 1809, p. 177-179].

Gli esperimenti di Venturoli, anche se vertenti sul medesimo argomento, si differenziano da quelli di Bonati, in quanto egli si concentra soprattutto sull'analizzare come la forma dell'oggetto influenzi la velocità, mentre Bonati trascura questo aspetto, analizzando unicamente il rapporto tra velocità e profondità nelle due direzioni del moto (verticale e orizzontale).

La discussione proseguì anche l'anno successivo, quando Giuseppe Avanzini dedicò una parte consistente del proprio trattato di Idrodinamica [Avanzini, 1810, p. 167-301] ad analizzare la teoria di Juan, trovandone a livello teorico diverse inconsistenze e decretandola, avvalendosi dei dati sperimentali ottenuti da Venturoli, «inesatta, imperfetta e pericolosa» [Avanzini, 1810, p. 246].

Non è chiaro perché Bonati e Gozzi non abbiano pubblicato i propri espe-

³⁴ Il testo del matematico francese Nicolas-Charles Romme (1745-1805) tratta, al pari di Juan [1771], di questioni legate alla navigazione e alla costruzione di imbarcazioni [Romme, 1787].

³⁵ I dati sono forniti con una precisione fino al millesimo di parte.

rimenti, anche considerando che lo stesso Bonati aveva già reso pubblici diversi risultati sperimentali [Bonati, 1766; Bonati, 1790; Bonati, 1799; Bonati, 1804]. Neanche l'età avanzata può essere considerata una giustificazione, poiché egli si dedicò allo studio di problemi matematici sino a pochi giorni dalla morte [Pepe, 1992b, p. 33].

Bibliografia

- Almanacco, 1897 = *Almanacco Italiano. Piccola enciclopedia popolare della vita pratica*. a. 2, Firenze, Bemporad, 1897.
- Avanzini, 1810 = Avanzini Giuseppe, *Nuove ricerche dirette a rettificare la teoria della resistenza de' fluidi e le sue applicazioni*, Bologna, Masi, 1810.
- Baldini, 1997 = Baldini Ugo, *Fontana Giovanni Battista Lorenzo*, in *Dizionario Biografico degli Italiani*, 48 (1997), [https://www.treccani.it/enciclopedia/giovanni-battista-lorenzo-fontana_\(Dizionario-Biografico\)](https://www.treccani.it/enciclopedia/giovanni-battista-lorenzo-fontana_(Dizionario-Biografico)).
- Biancardi, 2020 = Biancardi Daniele, *Teodoro Bonati: scienza e acque tra Settecento e Ottocento* [tesi di laurea magistrale], Parma, Università degli studi di Parma, 2020.
- Biancardi, 2021 = Biancardi Daniele, *Teodoro Bonati nei documenti dell'archivio storico comunale di Bondeno*, Bondeno, Lumi, 2021.
- Bonati, 1766 = Bonati Teodoro, *Esperienze in confutazione del Sig. Gennété intorno al corso de' fiumi*, in *Nuova raccolta d'autori, che trattano del moto dell'acque*, t. VI. Parma, Filippo Carmignani, 1766, p. 127-194.
- Bonati, 1784 = Bonati Teodoro, *Saggio di una nuova teoria del movimento delle acque pei fiumi e nuovo metodo per trovare colla sperienza la quantità dell'acqua corrente per un fiume*, «Memorie di matematica e fisica della Società Italiana delle Scienze», 2 (1784), f. 2, p. 676-719.
- Bonati, 1790 = Bonati Teodoro, *Della velocità dell'acqua per un foro di un vaso che abbia uno o più diaframmi, e del soffio, che si procura nelle fornaci di alcune ferriere col mezzo dell'acqua*, «Memorie della Società Italiana delle Scienze», 5 (1790), p. 501-524.
- Bonati, 1799 = Bonati Teodoro, *Delle Aste Ritrometriche, e di un nuovo pendolo per trovare la scala delle velocità di un'acqua corrente*, «Memorie della Società Italiana delle Scienze», 8 (1799), f. 2, p. 435-444.
- Bonati, 1804 = Bonati Teodoro, *Sperienze ed osservazioni potamologiche*, «Memorie della Società Italiana delle Scienze», 11 (1804), p. 680-682.
- Bonati, 1811 = Bonati Teodoro, *Alcune riflessioni critiche sui nuovi principi di idraulica di M.^r Bernard pubblicati in Parigi nel MDCCXXCVII*, «Memorie di Matematica e Fisica della Società Italiana», 15 (1811), f. 1, p. 226-253 + 1 tavola.

- Borda, 1763a = Borda Jean Charles, *Experiences sur la résistance des fluides*, «Memoires de l'Académie Royal des Sciences», a. 1763, p. 358-376.
- Borda, 1763b = Borda Jean Charles, *Sur la résistance des fluides*, «Histoire de l'Académie Royal des Sciences», a. 1763, p. 118-126.
- Borda, 1767a = Borda Jean Charles, *Experiences sur la résistance des fluides*, «Memoires de l'Académie Royal des Sciences», a. 1767, p. 495-503.
- Borda, 1767b = Borda Jean Charles, *Sur la résistance des fluides*, «Histoire de l'Académie Royal des Sciences», a. 1767, p. 145-148.
- Borgato, Fiocca, 1980 = Borgato Maria Teresa, Fiocca Alessandra (1980) *Sugli scritti matematici di Teodoro Bonati*, «Quaderni del Giornale Filologico Ferrarese», 2 (1980), n.1, p. 19-46.
- Borgato, Fiocca, 1994 = Borgato Maria Teresa, Fiocca Alessandra, *Teodoro Bonati e i suoi corrispondenti veneti*, in *Le scienze matematiche nel Veneto dell'Ottocento. Atti del terzo seminario di storia delle scienze e delle tecniche dell'Ottocento Veneto. Venezia 22-23 novembre 1991*, Venezia, Istituto Veneto di Scienze ed Arti, 1994, p. 101-150.
- Borgato, 2023 = Borgato Maria Teresa, *Le riforme e i progetti idraulici dell'Italia Napoleonica* in *L'Università di Ferrara nell'età del Riformismo pontificio e in epoca Napoleonica*, a cura di Alessandra Fiocca, Ferrara, Accademia delle Scienze di Ferrara, 2023, p. 235-276.
- Bossut, 1771 = Bossut Charles, *Traité élémentaire d'hydrodynamique*, Paris, Jombert, 1771.
- Bossut, 1777 = Bossut Charles, *Suite des Recherches sur le mouvement des fluides qui recouvrent un sphéroïde*, «Histoire de l'Académie Royal des Sciences», a. 1777, p. 50.
- Bossut, 1778a = Bossut Charles, *Nouvelles expériences sur la resistance des fluides*, «Histoire de l'Académie Royal des Sciences», a. 1778, p. 38-40.
- Bossut, 1778b = Bossut Charles, *Nouvelles expériences sur la resistance des fluides*, «Memoires de l'Académie Royal des Sciences», a. 1778, p. 353-380.
- Bossut, 1785 = Bossut Charles, *Trattato elementare d'idrodinamica*, traduzione di Giovanni Gratognini, Pavia, Tipografia di San Salvatore, 1785.
- Bossut, 1786-1787 = Bossut Charles, *Traité théorique et expérimental d'hydrodynamique*, 2 vol., Paris, Imprimerie Royale, 1786-1787.
- Calero, 2001 = Calero Julián Simón, *La mecanica de los fluidos en Jorge Juan*, «Asclepio: Revista de historia de la medicina y de la ciencia», 54 (2001), n. 2, p. 213-280.
- D'Alembert, 1752 = D'Alembert Jean Baptiste le Rond, *Essai d'une nouvelle theorie de la résistance des fluides*, Paris, David, 1752.
- Di Fidio, Gandolfi, 2021 = Di Fidio Mario, Gandolfi Claudio, *Idraulici italiani*,

- Milano, Fondazione Biblioteca Europea di Informazione e Cultura, 2014.
- Euler, 1778a = Euler Leonhard, *Essai d'une théorie de la Résistance qu'éprouve d'un Vaisseau dans son mouvement*, «Memoires de l'Académie Royal des Sciences», a. 1778, p. 597-614.
- Euler, 1778b = Euler Leonhard, *Sur la resistance des fluides*, «Histoire de l'Académie Royal des Sciences», a. 1778, p. 40-41.
- Fiocca, Pepe, 1986 = Fiocca Alessandra, Pepe Luigi, *L'università e le scuole per gli ingegneri a Ferrara*, «Annali dell'Università di Ferrara», sezione 7, 32 (1986), p. 125-166.
- Fiocca, Pepe, 1989 = Fiocca Alessandra, Pepe Luigi, *L'insegnamento della matematica nell'Università di Ferrara dal 1771 al 1942*, in *Università e cultura a Ferrara e Bologna*, Firenze, Olschki, 1989, p. 1-78.
- Fiocca, 1991 = Fiocca Alessandra, *La formazione dei giudici e dei notai d'argine a Ferrara. Dai primi provvedimenti istituzionali alla scuola d'idraulica di Teodoro Bonati*, in *La rinascita del Sapere, libri e maestri dello studio ferrarese*, a cura di Patrizia Castelli, Venezia, Marsilio, 1991, p. 367-384.
- Fiocca, 2023 = Fiocca Alessandra, *Le matematiche nell'Università riformata: nuovi docenti e nuovi programmi*, in *L'Università di Ferrara nell'età del Riformismo pontificio e in epoca Napoleonica*, a cura di Alessandra Fiocca, Ferrara, Accademia delle Scienze di Ferrara, 2023, p. 29-54.
- Fontana, 1780 = Fontana Gregorio, *Disquisitiones Physico-Mathematicae*, Pavia, Tipografia di San Salvatore, 1780.
- Juan, 1771 = Juan y Santacilia Jorge (1771) *Examen Maritimo theorico pratico*, 2 vol., Madrid, Mena, 1771.
- Juan, 1819 = Juan y Santacilia Jorge, *Esame marittimo teorico pratico*, traduzione di Simone Stratico, 2 vol., Milano, Stamperia regia, 1819.
- Lugaresi, 2023 = Lugaresi Maria Giulia, *I professori ferraresi e la questione del Reno*, in *L'Università di Ferrara nell'età del Riformismo pontificio e in epoca Napoleonica*, a cura di Alessandra Fiocca, Ferrara, Accademia delle Scienze di Ferrara, 2023, p. 141-162.
- Lugaresi, 2024 = Lugaresi Maria Giulia, *Between theory and practice: Teodoro Bonati and the teaching of hydrostatics at the University of Ferrara*, in *Normative Texts and Occupational Practices- Towards New Social Histories of Mathematics*, a cura di Senthil Babu and Roy Wagner, Springer, [in pubblicazione]
- Marguerie, 1770 = Marguerie Jean-Jacques de, *Établissement d'une nouvelle théorie de la résistance des fluides*, s.l., s.e., 1770.
- Marinozzi, 2016 = Marinozzi Silvia, *Ramazzini Bernardino*, in *Dizionario Biografico degli Italiani*, 86 (2016), https://www.treccani.it/enciclopedia/bernardino-ramazzini_%28Dizionario-Biografico%29.

- Pannella, Savorini, 1904 = Pannella Giacinto, Savorini Luigi, *Melchiorre Delfico. Opere complete*, vol. 4, Teramo, Fabbri, 1904.
- Patergnani, 2023 = Patergnani Elisa, *L'Università e il Liceo a Ferrara in età Napoleonica*, in *L'Università di Ferrara nell'età del Riformismo pontificio e in epoca Napoleonica*, a cura di Alessandra Fiocca, Ferrara, Accademia delle Scienze di Ferrara, 2023, p. 221-234.
- Pepe, 1992a = Pepe Luigi, *Teodoro Bonati. I documenti dell'Archivio storico di Bondeno*, Cento, Siaca, 1992.
- Pepe, 1992b = Pepe Luigi, *Una biografia di Teodoro Bonati*, in *Teodoro Bonati. Carteggio scientifico. Lorgna, Caterzani, Frisi, Saladini, Calandrelli, Venturi*, a cura di Maria Teresa Borgato, Alessandra Fiocca, Luigi Pepe, Firenze, Olshki, 1992, p. 1-41.
- Pozzato, 1969 = Pozzato Enzo, *Bonati, Teodoro Massimo*, in *Dizionario Biografico degli Italiani*, 11 (1969) [https://www.treccani.it/enciclopedia/teodoro-massimo-bonati_\(Dizionario-Biografico\)](https://www.treccani.it/enciclopedia/teodoro-massimo-bonati_(Dizionario-Biografico)).
- Romme, 1787 = Romme Nicolas-Charles, *L'Art de la Marine*, Parigi, Barrois, 1787.
- Sellés, 2009 = Sellés Manuel, *Jorge Juan y Santacilia*, in *Diccionario biográfico español*, vol. 28, Madrid, Real Academia de la Historia, 2009, p. 310-316.
- Smeaton, 1759 = Smeaton John, *An experimental enquiry concerning the natural powers of water and wind to turn mills, and other machines, depending on a circular motion*, «Philosophical Transactions of the Royal Society of London», 51 (1759), p. 100-174.
- Venturoli, 1809 = Venturoli Giuseppe, *Elementi di meccanica e di Idraulica*, vol. 2, Bologna, Masi, 1809.