

ALMA MATER STUDIORUM · UNIVERSITY OF BOLOGNA

School of Science

Department of Physics and Astronomy

Master Degree in Physics

Domenico Guglielmini e l'idraulica nel
XVII-XVIII secolo. Analisi del trattato
"Della natura de' fiumi"

Supervisor:

Prof. Eugenio Bertozzi

Submitted by:

Davide Bertoli

Academic Year 2022/2023

Abstract

Questa tesi esplora il ruolo pionieristico di Domenico Guglielmini nell'idraulica e nella fluidodinamica nei secoli XVII e XVIII, con focus sul contesto storico e scientifico dell'epoca. Divisa in quattro capitoli, la ricerca inizia con una panoramica sulla storia della fluidodinamica, approfondendo inoltre l'importanza dell'idraulica a Bologna. Si analizza dettagliatamente il libro *Della Natura de' Fiumi*, per poi mettere in luce la figura di Guglielmini come scienziato che si colloca nel solco della tradizione galileiana. Le due appendici offrono un confronto tra Guglielmini e Galileo e analizzano le immagini presenti nel libro.

La tesi si propone di offrire un'indagine su un tema poco esplorato come quello dell'idraulica, collegandolo alla figura di Guglielmini, il primo a detenere una cattedra di Idrometria all'Università di Bologna. Emerge il ruolo fondamentale di Guglielmini come matematico e il suo contributo allo sviluppo del metodo scientifico nell'ambito idraulico, rilevante sia politicamente che culturalmente.

Indice

Abstract	1
1 Storia della fluidodinamica	6
1.1 Dall'antichità ai Greci	6
1.2 L'impero Romano	9
1.3 Il Rinascimento e Leonardo Da Vinci	13
1.4 Dopo il Rinascimento: la nascita del metodo scientifico	16
2 L'idraulica a Bologna nel XVI e XVII secolo	21
2.1 La questione del Reno	23
2.2 Biografia Guglielmini	29
3 Della natura de' fiumi, trattato fisico-matematico	34
3.1 Criteri di analisi	38
3.2 Analisi <i>Della natura de' fiumi, trattato fisico-matematico</i>	40
3.2.1 Dedicazione e introduzione	40
3.2.2 L'origine delle fonti naturali e le componenti dei fiumi	44
3.2.3 La natura e le proprietà dei fluidi	47
3.2.4 Le regole del moto delle acque correnti	52
3.2.5 Sul fondo e sulle caratteristiche dei fiumi	62
3.2.6 Sui moti delle acque dei fiumi	69

<i>INDICE</i>	3
3.2.7	Sull'unione dei fiumi e sulle conseguenze che questa comporta . . . 74
3.2.8	Aumento e diminuzione del livello d'acqua in un fiume 80
3.2.9	Riguardo i canali, gli scoli e le bonifiche 83
3.2.10	Inalveazione dei fiumi 93
4	Conclusione: Il Guglielmini matematico, aspetti galileiani nel trattato
	<i>Della natura de' fiumi</i> 96
	Appendici 101
	A Guglielmini e Galileo Galilei 102
	B Apparato iconografico: le tavole di <i>Della natura de' fiumi</i> 107
	Ringraziamenti 122
	Bibliografia 122

Elenco delle figure

1.1	Esempio di vite di Archimede.	8
1.2	Sezione trasversale acquedotto Romano	10
2.1	Progetto di Guglielmini per la gestione del Reno	25
2.2	Ritratto di Domenico Guglielmini, 1731 - Accademia delle Scienze di Torino	29
3.1	Antiporta del libro Della natura de' fiumi	41
3.2	Tavola I	48
3.3	Dettaglio figura 7	50
3.4	Dettaglio figura 8	53
3.5	Dettaglio figura 13	55
3.6	Dettaglio figura 14	58
3.7	Dettaglio figura 15	63
3.8	Dettaglio figura 17	65
3.9	Dettaglio figura 30	67
3.10	Dettaglio figura 35	68
3.11	Dettaglio figura 39	70
3.12	Dettaglio figura 42	71
3.13	Dettaglio figura 49	76
3.14	Dettaglio figura 50	77
3.15	Dettaglio figura 53	85

3.16	Dettaglio figura 57	89
3.17	Dettaglio figura 59	91
A.1	Triangolo delle velocità di Galileo, [Galilei, 1638] p.173	104
B.1	Tavola I	108
B.2	Tavola II	109
B.3	Tavola III	110
B.4	Tavola IIII	111
B.5	Tavola V	112
B.6	Tavola VI	112
B.7	Tavola VII	113
B.8	Tavola VIII	114
B.9	Tavola IX	115
B.10	Tavola X	116
B.11	Tavola XI	117
B.12	Tavola XII	118
B.13	Tavola XIII	119
B.14	Tavola XIIIII	120
B.15	Tavola XV	121

Capitolo 1

Storia della fluidodinamica

Per comprendere appieno il contesto storico e scientifico in cui si inserisce Guglielmini, si procede con una sintesi delle principali fasi della storia della fluidodinamica e dell'idraulica.

La capacità di gestire e regolare flussi d'acqua secondo le proprie esigenze è sempre stata cruciale, sia per motivi agricoli che, in generale, per il sostentamento.

1.1 Dall'antichità ai Greci

I primi esempi di sistemi idraulici realizzati dall'uomo risalgono alle civiltà più antiche¹. I primi sforzi per gestire i flussi d'acqua si manifestarono nelle popolazioni egiziane e mesopotamiche. In entrambi questi contesti, vi sono testimonianze neolitiche di comunità insediate in luoghi che sarebbero stati difficilmente abitabili senza un'attenta gestione delle risorse idriche provenienti da fonti vicine.

In Egitto l'utilizzo dell'acqua ruotava attorno al Nilo, e circa nel XIV secolo a.C., all'epoca di Ramses II, si era già sviluppato un ampio sistema di canali che ne permettevano

¹Per approfondire gli argomenti trattati in questo capitolo, fare riferimento a [Rouse and Ince, 1963] capitoli 1-6 e [Tokaty, 1994] pp.1-52.

il trasporto e il controllo.

Una situazione simile si trova in Mesopotamia attorno ai due fiumi Tigri ed Eufrate, da cui si ricavarono canali che servirono anche per definire dei confini territoriali.

In queste epoche, nonostante la presenza di notevoli esempi di ingegneria idraulica², si distingue prevalentemente una visione mitologica dei fenomeni naturali. Le inondazioni e altri eventi catastrofici venivano frequentemente attribuiti a forze segrete e divine, relegando le spiegazioni a una dimensione mistica, scarsamente utile per una comprensione concreta di tali avvenimenti.

Per immergersi in una mentalità più vicina a quella scientifica, è necessario esplorare il periodo Greco, in cui la filosofia inizia a promuovere la convinzione che l'intelletto umano possa comprendere (e in qualche modo controllare) il mondo e i fenomeni naturali circostanti.

In questo contesto, spicca la figura di Aristotele (384 a.C.-322 a.C.), che si distingue anche nel campo della fluidodinamica.

Concentrandosi sui contenuti rilevanti per questa analisi, il primo elemento da esaminare è il rifiuto della concezione del vuoto, il quale conduce a varie considerazioni erronee sulle interazioni tra aria e acqua³.

Le rilevanti osservazioni sulla caduta dei corpi, che *per natura* tendono sempre a scendere verso il basso, forniscono una spiegazione generale anche per la direzione del movimento delle acque correnti. Un concetto fondamentale per la fluidodinamica è anche la concezione di massa indistruttibile, che sottende il moderno principio di continuità.

Importantissimi poi i contributi di Archimede di Siracusa (287 a.C.-212 a.C.), che fu tra i primi a studiare la struttura interna dei fluidi.

Innanzitutto, egli postulò che i corpi liquidi non potessero contenere spazi vuoti al loro interno, ma dovessero essere continui. In uno dei manoscritti a lui attribuiti, analizzò

²Come testimonia ancora oggi il Bahr Yussef, un canale che collega il Nilo alla città di Faiyum.

³La prima vera dimostrazione dell'esistenza del vuoto si può far risalire a Torricelli, si parla quindi del XVII secolo (vedere quanto si dirà nella sezione 1.4).

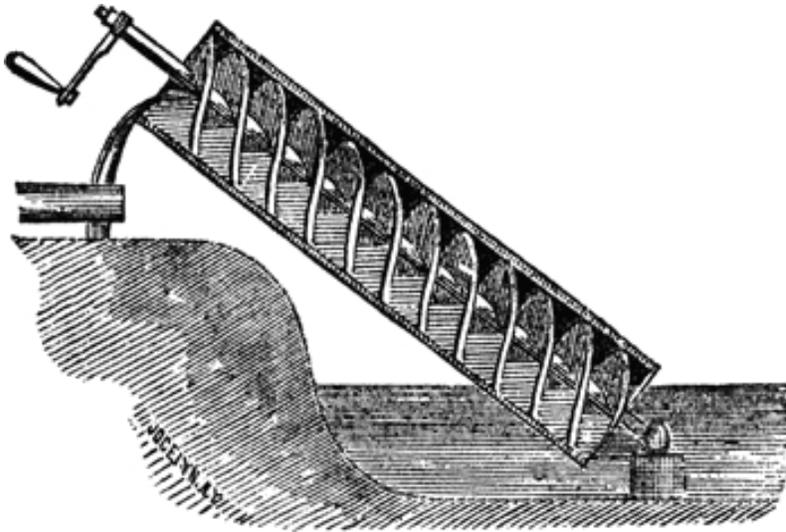


Figura 1.1: Esempio di vite di Archimede.

l'idrostatica e il galleggiamento, sviluppando un'idea dei fluidi che già li presenta con alcune delle loro caratteristiche moderne. Ad esempio, arrivò ad intuire che la pressione esercitata in un punto di essi viene trasmessa a tutto il corpo.

Tramite questi ragionamenti Archimede arriva a descrivere quella legge che oggi conosciamo con il suo nome⁴, assieme ad altre importanti considerazioni che riguardano la fluidostatica. Tra le invenzioni di Archimede è interessante notare la vite di Archimede, riportata in figura 1.1⁵, un dispositivo a forma di vite adoperabile per vari utilizzi, come estrarre acqua da un fiume o miscelare materiali solidi e liquidi.

⁴Il principio di Archimede si può descrivere come segue: qualsiasi corpo immerso in un fluido riceve una spinta verso l'alto uguale al peso del volume del fluido che esso sposta.

⁵Immagine di dominio pubblico presa da Chambers's Encyclopedia.

1.2 L'impero Romano

Il periodo rilevante conseguente ai Greci riguarda l'Impero Romano, un'era che brillò sotto gli aspetti di conquista, politica e pubblica amministrazione.

Sul piano scientifico non ci furono grandi miglioramenti, si possono però trovare spunti di riflessione per quanto riguarda soprattutto gli acquedotti⁶. Questi non brillavano per particolari novità ingegneristiche, ma piuttosto per la loro notevole estensione, infatti i Romani cercavano di diffondere le loro invenzioni tecnologiche in tutte le regioni conquistate dall'Impero, dando luogo alla creazione di impianti di notevole vastità.

Claudio Augusto e i suoi successori costruirono un sistema di tubi di piombo che percorrevano la città di Roma risultando in fontane pubbliche, oltre a un sistema di fognature. Si ritiene che allo splendore dell'Impero Romano tutte le città avessero sistemi di forniture d'acqua.

Nell'ambito idraulico due ingegneri Romani spiccano tra gli altri: Marco Vitruvio Pollio (80 a.C. circa - 15 a.C. circa) e Sesto Giulio Frontino (40 d.C. circa - 103 d.C. circa). Vitruvio aveva il compito di gestire e riparare le armi e i macchinari da guerra, ma il suo interesse si estese oltre queste branche. Il suo trattato più famoso è "*De architectura*" in cui espone molti aspetti di architettura civile e costruzioni militari.

Vitruvio discute anche dell'origine e della distribuzione dell'acqua, della posizione delle sorgenti, di come costruire fosse, acquedotti e condotti. Non viene però aggiunto molto rispetto a quanto già conosciuto e detto dai Greci.

Sesto Giulio Frontino inizia sempre la propria carriera con incarichi militari, per poi diventare sovrintendente degli acquedotti di Roma nel 97 d.C..

Il suo trattato in due volumi "*De aquaeductu urbis Romae*" fornisce una descrizione completa dei metodi di distribuzione dell'acqua utilizzati e conosciuti dai Romani.

Questo testo ci consente di ottenere un quadro generale sul funzionamento tipico della

⁶Un testo che approfondisce gli acquedotti assieme a figure di rilievo come Vitruvio e Sesto Giulio Frontino è *The Aqueducts Of Ancient Rome* di Thomas Ashby (1935) [Ashby, 1935]

gestione delle acque in una città Romana.

La sorgente d'acqua era generalmente data da una fonte naturale, dove questa non era presente si scavavano pozzi in cui si tirava fuori l'acqua tramite secchi o con altri sistemi simili. Se l'acqua era pulita veniva direttamente trasportata in città tramite un acquedotto; a volte più fonti venivano raggruppate in un bacino per poi essere trasportate in città.

La quantità di acqua che arrivava alle abitazioni private oppure ai bagni pubblici era regolata da un dispositivo di misurazione.

Per comprendere il livello di avanzamento tecnologico dei Romani ci si può focalizzare sulla struttura dei condotti di trasporto e sui dispositivi di misurazione utilizzati.

Gli acquedotti erano, in generale, formati da opere murarie che contenevano canali chiusi in modo da proteggere l'acqua da contaminazioni e dall'esposizione diretta al sole⁷, erano inoltre dotati di pozzetti di ispezione.

Sembra, dagli scritti di Frontino, che i Romani avessero consapevolezza che per ave-

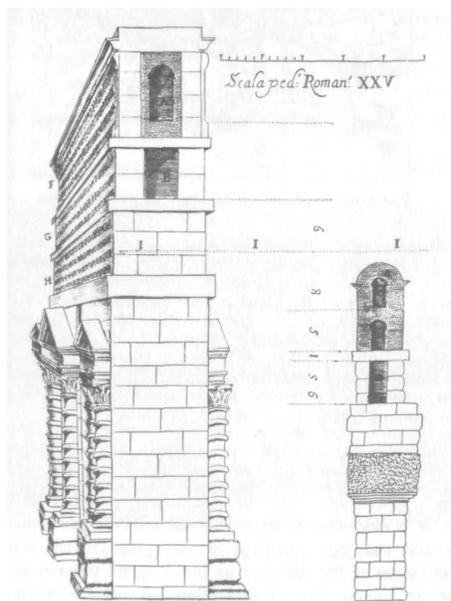


Figura 1.2: Sezione trasversale acquedotto Romano

⁷Come si può vedere dalla figura 1.2, presa da *History of Hydraulics* p.29 [Rouse and Ince, 1963].

re un flusso d'acqua continuo fosse necessaria una pendenza. Tuttavia, sembra che la pendenza utilizzata negli acquedotti fosse principalmente determinata da considerazioni topografiche rispetto ad analisi idrauliche, che appunto risultavano molto limitate e approssimative.

Tutte le osservazioni sono infatti qualitative e non sembra esserci un ragionamento ingegneristico o scientifico che giustificasse una scelta piuttosto che un'altra.

Per la distribuzione dell'acqua nelle città si utilizzavano delle condotte a pressione, composte da vari materiali in base alla pressione che queste dovevano sostenere. Anche qui non sappiamo se effettivamente le conoscenze riguardo le resistenze delle tubature erano puramente pratiche o fondate su qualche ragionamento teorico.

Infatti nel testo di Giulio Sesto Frontino le considerazioni sui principi dell'idraulica sono basate unicamente su un suo utilizzo pratico e immediato.

Per quanto riguarda i dispositivi di misurazione delle quantità di acqua, questi erano importanti per regolare il consumo rispetto alle tre destinazioni principali: fontane pubbliche, bagni e case private. Non si utilizzavano molto i rubinetti ma piuttosto l'acqua fluiva per un certo periodo di tempo in modo continuo.

Frontino evidenzia che alcuni consumatori disonesti erano in grado di modificare le tubature attraverso punzonature al fine di ottenere un flusso d'acqua maggiore rispetto a quanto previsto. Era importante quindi cercare di creare e regolare un flusso che fosse omogeneo per tutte le tubature.

Tuttavia, non sembra che ci siano sforzi particolari nel comprendere approfonditamente questi concetti, tanto che per quanto riguarda una tubatura la relazione tra: sezione, velocità e rateo di scarico non sembrava essere particolarmente chiara ai Romani.

In conclusione è importante considerare che, nonostante l'assenza di aggiunte significative dal punto di vista della teoria idraulica rispetto a quanto conosciuto dai Greci, i sistemi di distribuzione dell'acqua Romani risultavano estremamente efficienti.

In questo periodo storico quindi non si è verificato alcun vero e proprio avanzamento

scientifico, ma la pratica ingegneristica Romana ha dimostrato una notevole abilità nell'implementare sistemi funzionanti e affidabili.

1.3 Il Rinascimento e Leonardo Da Vinci

Dopo la caduta dell'Impero Romano si entra nel Medioevo, un'epoca di transizione che, per quanto si stia rivalutando come un periodo intermedio e necessario per la successiva crescita della civiltà occidentale, dal punto di vista idraulico non ha molto da offrire.

Risulta quindi interessante, per gli scopi considerati, approfondire il Rinascimento, periodo cruciale che ci avvicina a una visione di scienza più simile a quella attuale.

In realtà i veri e propri miglioramenti in ambito idraulico necessitano di una matematica e di un metodo sperimentale non ancora presenti tra gli scienziati e gli studiosi, ma c'è nello specifico una figura che è necessario introdurre.

Una personalità veramente di spicco in questo periodo risulta essere quella di Leonardo Da Vinci(1452-1519), che si impegnò con successo in un numero incredibile di campi del sapere: ingegneria, meccanica, biologia, arte, anatomia e anche fluidodinamica.

Con lo studio della caduta dei gravi Leonardo comprende che la velocità di caduta di un corpo da un piano inclinato, ad una determinata altezza, non dipende dalla pendenza dello stesso.

Importante per le nostre considerazioni è il trattato *“Del moto e misura dell'acqua”*, che tratta i seguenti temi: la superficie dell'acqua, il movimento dell'acqua, le onde d'acqua, i vortici, l'acqua che cade, la forza distruttiva dell'acqua, i corpi galleggianti, l'efflusso, i vari macchinari idraulici.

Nelle osservazioni di Leonardo emerge già un approccio al conoscere e studiare i fenomeni vicino al metodo scientifico, con una centralità dell'esperienza senza abbandonare la teoria.

Nel trattato si intravedono molti importanti concetti e fondamenti della fluidodinamica. Ragionando sulle siringhe infatti Leonardo nota che:

“le sezioni dell'ugello, attraverso il quale l'acqua fuoriesce, sono cento volte più piccole della sezione principale dello stantuffo; l'acqua fluirà nell'ugello cento volte più veloce del movimento del pistone. Immaginiamo che un secondo pistone, cento volte più piccolo del

primo, si opponga al flusso dell'acqua; certo avverrà che la forza che si applica al secondo pistone sia circa uguale alla centesima parte di quella che spinge il pistone largo; e se la forza supera le cento parti, il piccolo pistone avanza e quello grande recede"⁸.

In questo passaggio si può notare in nuce sia il principio di continuità sia il principio di Pascal, che verrà enunciato solo un secolo dopo.

Leonardo arriva anche a comprendere i concetti che stanno alla base delle presse idrauliche.

Riguardo il problema dell'efflusso⁹ Leonardo arriva a conclusioni che oggi sappiamo essere errate, credendo che la velocità di uscita dell'acqua dal foro sia proporzionale all'altezza dell'acqua presente sopra all'orifizio.

Le sue osservazioni invece sulla distribuzione delle velocità in un fiume sono parecchio accurate:

*"Nei fiumi rettilinei è più rapida l'acqua più lontana dalle sponde a causa della resistenza. L'acqua ha una velocità maggiore in superficie che sul fondo. Questo avviene perché l'acqua alla superficie lambisce l'aria che è di poca resistenza, perché più leggera dell'acqua e l'acqua sul fondo tocca la terra che è molto più resistente perché più pesante dell'acqua ed immobile. Da questo discende che la parte che è più distante dal fondo ha minore resistenza che quella sotto."*¹⁰

Leonardo risulta essere molto conscio di quello che oggi conosciamo come principio di continuità, spiegando accuratamente i fenomeni da lui osservati:

*"Un fiume in ogni parte del suo percorso nello stesso tempo dà passaggio ad una eguale quantità di acqua, nonostante la larghezza, la profondità, la corrente, la irregolarità, la tortuosità... Un fiume di profondità uniforme avrà una più rapida corrente nella sezione più ristretta che in quella più larga"*¹¹

⁸[Rouse and Ince, 1963] p.48

⁹Con efflusso si intende il passaggio di un fluido dall'interno all'esterno di un recipiente, attraverso un foro praticato nello stesso recipiente.

¹⁰[Rouse and Ince, 1963] p.49

¹¹[Rouse and Ince, 1963] pp.49-50

Alcune intuizioni di Leonardo sono estremamente interessanti per la correttezza con cui sono eseguite, e ben si presentano come punto di partenza di una nuova e dinamica crescita della scienza fluidodinamica e idraulica dei secoli successivi.

1.4 Dopo il Rinascimento: la nascita del metodo scientifico

Si passa ora al periodo critico successivo al Rinascimento, dove la nascita del metodo e della mentalità scientifica portano a grandi cambiamenti in tutti gli ambiti del sapere.

Si discutono le figure europee più importanti e influenti, evidenziandone gli aspetti che ritroveremo poi nella storia e nel trattato di Guglielmini.

Lo sviluppo scientifico italiano di questo periodo è centrale per quanto riguarda la nascita della tecnica sperimentale in tutta Europa, grazie ai contributi di figure come Galileo Galilei.

Si può individuare una scuola Italiana di Idraulica¹², che risulta essere un punto di riferimento per tutti gli studiosi Europei dell'epoca.

Benedetto Castelli (1578–1643), allievo di Galileo, si può considerare come il padre della scienza idraulica, data l'importanza del suo lavoro *“Della misura delle acque correnti”* del 1628.

Tra le proposizioni più importanti presenti in questo libro ricordiamo il principio di continuità, che pur non aggiungendo molto rispetto a quanto già Da Vinci aveva scoperto, risulta essere importante soprattutto per la sua ampia diffusione tra gli ingegneri e i fisici del tempo.

Le così dette *leggi di Castelli* si estesero sia in Italia che in Europa, anche se alcune di esse saranno velocemente considerate errate e lasceranno spazio a delle loro rivisitazioni.

Per quanto riguarda l'efflusso infatti Castelli riprese parimenti le erronee posizioni di Da Vinci.

Per risolvere questo problema servirà l'apporto di Evangelista Torricelli (1608–1647), allievo di Castelli. I suoi studi ruotano attorno al moto dei gravi, come si può vedere nel

¹²Questa denominazione è dovuta a René Dugas, che ne trova l'origine negli studi protratti da Galileo [Calero, 2008] p.10

libro *“De motu gravium naturaliter descentium et proiectorum”* del 1641¹³, ma non si tralascia lo studio dei fluidi. Infatti nella sua *“Opera Geometrica”* del 1644 viene enunciata la legge di Torricelli, che spiega l’efflusso nelle proporzionalità che conosciamo oggi: la velocità di uscita dell’acqua è legata alla radice quadrata dell’altezza d’acqua sopra all’orifizio.

Inoltre si paragona la velocità di uscita di un liquido dal foro a quella che un corpo grave acquisirebbe cadendo da un’altezza corrispondente a dove è presente l’apertura. Questa legge deriva proprio da studi di balistica sul moto dei proiettili: Torricelli nota che il getto dell’efflusso da un orifizio laterale segue una figura parabolica simile al caso del moto di un proiettile.

Nel testo è perciò presente la prima formalizzazione matematica dell’efflusso (seppur solo ragionando per proporzioni).

La verifica di questa legge non è stata affatto semplice, e in molti hanno provato sperimentalmente a dimostrarla (Mariotte, Huygens, Guglielmini, Poleni. . .), cercando quindi di capire se era giusto seguire la proporzione fornita da Torricelli o quella precedente di Castelli.

Importante per la fluidodinamica anche le sue considerazioni sull’interazione dell’aria con il moto di un fluido. Secondo Torricelli l’aria è una sostanza che possiede una densità e quindi anche un certo peso, da queste riflessioni nasce l’invenzione del barometro.

Il famoso tubo di Torricelli, nella sua giusta interpretazione, presuppone inoltre l’esistenza del vuoto, andando a mettere in dubbio le posizioni aristoteliche che invece ne negavano l’esistenza.

Lo scienziato è considerato anche il padre della meteorologia, che inizia a svilupparsi proprio in seguito a queste nuove considerazioni sull’aria e sulle sue caratteristiche.

Passando ai contributi esterni all’Italia, bisogna prima di tutto citare Marin Mersenne

¹³T Trattato dove Torricelli è dichiaratamente ispirato dai *“Dialoghi sopra i massimi sistemi del mondo”* (Galileo Galilei, 1632)

(1588–1648), non tanto per i suoi comunque presenti studi sull'idrostatica e l'idrodinamica, ma piuttosto per il suo costante e importante impegno come corrispondente fra i vari scienziati Europei dell'epoca.

Mersénne diventò centrale per lo scambio di informazioni nella ricerca scientifica, essenziale è il suo contributo alla diffusione delle opere di Galileo Galilei in Francia, ponendosi anche a difesa delle sue posizioni pur non intaccando l'essenza della fede cristiana (Mersénne era infatti un frate francescano).

Importante anche le informazioni che portò sempre in Francia dopo aver incontrato Torricelli in un viaggio che fece a Firenze nel 1644.

Grazie al suo apporto la Scuola Italiana di Idraulica non rimase isolata, e le scoperte qui realizzate contribuirono al dibattito scientifico di tutta Europa.

Il primo idraulico di rilievo al di fuori dell'Italia nel XVII secolo fu Edme Mariotte (1620–1684). Fu uno dei primi membri dell'Accademia Reale di Parigi¹⁴, e viene considerato tra i fondatori del metodo sperimentale in Francia, oltre che capostipite della Scuola Idraulica Francese.

Il suo trattato più importante è *“Traité du mouvement des eaux”*, pubblicato nel 1686, due anni dopo la sua morte. In questo trattato vengono discusse molte regole con l'intenzione di comprendere e spiegare le leggi che regolano il comportamento dei fluidi e dei gas. Il testo è estremamente pratico, arricchito da numerose misurazioni, effettuate personalmente da Mariotte, e da numerosi riferimenti ad applicazioni concrete.

Un altro membro dell'Accademia di Parigi (ne fu il primo direttore), anche se di origini olandesi, è Christiaan Huygens (1629-1695), che si interessò di fluidi comparandoli con i gravi, similmente a quanto fatto da Torricelli.

Nel 1668 prova sperimentalmente che la legge corretta per spiegare il fenomeno dell'efflusso è proprio quella di Torricelli.

Un'altra importante figura nello studio dei fluidi è sicuramente Blaise Pascal (1623–1662).

¹⁴Istituita da Luigi il Grande nel 1666

Si interessò particolarmente allo studio dell'idrostatica, andando a migliorare le teorie e gli esperimenti di Torricelli.

Il suo testo in tal senso di maggior rilievo è "*Nouvellese expériences touchant le vide fait dans les tuyaux avec diverses liqueurs*" del 1647, dove si vede un'attenzione per i tanti esperimenti da lui eseguiti, che vengono qui descritti.

Un anno dopo la sua morte, nel 1663, viene pubblicato "*Traité de l'équilibre des liqueurs*", in cui si ha il completamento della sua teoria idrostatica.

Qui Pascal, tramite il famoso esempio della botte¹⁵, dimostra le leggi di Simon Stevin (1548-1620), e, allo stesso tempo, offre una spiegazione del funzionamento della pressa idraulica. Sostanziale quindi il principio da lui spesso rimarcato: un fluido in quiete trasmette equamente la pressione in tutte le direzioni.

Concludiamo questa carrellata con due figure essenziali del panorama scientifico del XVII secolo: Newton e Leibniz.

Isaac Newton (1642–1728) è sicuramente tra le personalità di maggior spicco dell'intera storia della fisica e della matematica. Guglielmini infatti inciterà gli altri scienziati a perseguire quanto fatto da Newton per la meccanica anche per lo studio dei fiumi¹⁶.

Nell'ambito fluidodinamico le osservazioni di Newton risultano essere varie. Newton si concentrò sulla resistenza dei fluidi, andando a sperimentare lo smorzamento del pendolo immerso in varie sostanze come aria e acqua. La resistenza al moto che si manifesta tra un liquido e un solido, che devono essere in movimento relativo tra loro, può dipendere da varie cause: elasticità, *tenacia del fluido*, mancanza di lubrificazione e inerzia.

Le prime due cause sono quelle meno importanti. La mancanza di lubrificazione invece corrisponde ad una concezione moderna di viscosità, e per la prima volta si comprende che la resistenza di un fluido è proporzionale alla differenza di velocità tra le varie zone

¹⁵La botte di Pascal consiste in una botte di legno che viene riempita d'acqua tramite un lungo tubo presente sopra di essa. Se si continua a far salire il livello dell'acqua in questo tubo, si arriverà ad un punto in cui la botte esplose, data la crescente pressione esercitata sulle pareti della botte.

¹⁶Vedere l'introduzione di [Guglielmini, 1697]

adiacenti dello stesso.

Prendendo infatti l'esempio di un cilindro di lunghezza infinita che ruota attorno al proprio asse ed è immerso in un fluido, si avrà che le parti del fluido più vicine alle pareti del cilindro si muoveranno con una velocità angolare simile al cilindro, mentre la velocità del fluido diminuisce man mano che ci si allontana dal cilindro.

Inoltre Newton enunciò correttamente il principio di reciprocità, che sta alla base delle gallerie del vento:

*"Poiché l'azione del mezzo è la stessa su ogni corpo.. se un corpo si muove in un mezzo in quiete oppure se le particelle del mezzo si spostano con la stessa velocità attorno allo stesso corpo in queste; possiamo considerare il corpo come se fosse in quiete ed osservare con quale forza esso sia soggetto dal movimento del mezzo"*¹⁷

Newton cercò anche di modellizzare matematicamente il problema dell'efflusso, non arrivando però a delle conclusioni definitive.

Contemporaneo di Newton è Gottfried Wilhelm von Leibniz (1646-1716), che fu il padre del calcolo infinitesimale assieme allo stesso Newton.¹⁸

Leibniz è considerato come una figura di genio universale, data la sua ampia influenza in moltissime aree del sapere. I suoi ottimi rapporti con gli accademici Italiani e in particolar modo con Guglielmini sono discussi nella sezione 2.2.

¹⁷[Rouse and Ince, 1963] p.84

¹⁸Tra i due vi fu una forte diatriba riguardo la natalità dell'idea, Leibniz infatti accusò Newton di plagio. Molto probabilmente entrambi svilupparono il proprio modello di infinitesimi in maniera indipendente.

Capitolo 2

L'idraulica a Bologna nel XVI e XVII secolo

La città di Bologna non è attraversata da nessun fiume, e oggi non presenta un sistema di canalizzazioni visibili. È un paesaggio distante da molte città che ancora oggi presentano aggraziati scenari di acque correnti, ma in realtà Bologna risultò un fulcro per l'idraulica del XVI e XVII secolo, riuscendo a creare e sfruttare un sistema idraulico artificiale che favorì molto alcune industrie, come quelle della seta, e consentiva anche i trasporti di una intensa navigazione con Venezia.¹

Bologna, situata nel cuore dell'Italia, fu un centro di notevole fervore intellettuale e scientifico durante il periodo rinascimentale. L'importanza dello studio dell'idraulica in questo contesto può essere compresa attraverso vari motivi chiave.

In primo luogo, Bologna era un centro di apprendimento e innovazione, con l'Università che rappresentava una delle istituzioni accademiche più antiche d'Europa. Questa atmosfera intellettuale fece sì che la città diventasse un terreno fertile per la ricerca e lo sviluppo di nuove idee nell'ambito dell'idraulica.

¹Per approfondire le tematiche di questo capitolo fare riferimento a [Fontana, 2001], in particolare modo pp. 7-13, pp. 28-102

In secondo luogo, il XVI e XVII secolo segnarono in generale un periodo di grandi cambiamenti scientifici e tecnologici. Gli studiosi del tempo si dedicarono all'indagine sistematica delle leggi che governano il comportamento dei fluidi, cercando di applicare tali principi all'ingegneria e alla progettazione idraulica. Questo periodo fu testimone di importanti progressi nelle tecniche di canalizzazione, nella costruzione di fontane e nella gestione delle risorse idriche.

In conclusione, l'idraulica a Bologna in questo periodo ha rivestito un ruolo fondamentale nella gestione delle infrastrutture cittadine e nell'affrontare le sfide legate all'approvvigionamento idrico, al drenaggio e alla navigazione. Gli ingegneri e gli esperti dell'epoca contribuirono in modo significativo allo sviluppo di sistemi avanzati, contribuendo alla crescita e alla prosperità della città.

2.1 La questione del Reno

Uno degli aspetti più interessanti e controversi nel contesto della scienza delle acque a Bologna riguarda la questione del Reno. Per arrivare infatti alla conformazione attuale del fiume si è passati per varie discussioni e contese che riguardarono principalmente la città di Bologna e quella di Ferrara², e che hanno coinvolto i più importanti idraulici italiani del tempo.

La pianura compresa tra Bologna, Ferrara e Ravenna presenta gravi difficoltà di scolo, portando alla formazione di ampie paludi³, senza contare le periodiche inondazioni del Reno che spesso risultarono disastrose.

Durante il Medioevo il Reno era un affluente del Po, e le sue piene portarono gravi e costanti problemi alle campagne e alle cittadine tra Bologna e Ferrara. Nel 1526 il Reno viene inalveato nel Po di Ferrara (facendolo prolungare quindi fino all'altezza della frazione di Porotto), avvantaggiando i bolognesi che videro i loro terreni più al sicuro rispetto invece ai ferraresi. Questo cambiamento comporta inoltre che la navigazione tra Ferrara e il mare risulta compromessa, a causa delle torbide che si andavano a depositare.

Si ha quindi che nel 1604, più di ottant'anni dopo, il fiume venne disalveato nel Po, facendolo deviare nel confine tra Bologna e Ferrara, nelle zone di Torre Verga e Torre dell'Uccellino, conducendolo verso le valli di San Martino⁴.

Questo cambiamento di rotta avrebbe sfavorito notevolmente i bolognesi, che protestarono fortemente a questa risoluzione, senza alcun successo. La decisione era stata infatti presa dalla curia romana, che sotto un'ottica centralizzatrice voleva depotenziare il controllo delle foci del Po da parte di Venezia, nel quadro di un progetto dove Ferrara si delinea come nuovo centro del traffico fluviale⁵.

²Si consideri che nel 1763 si compilò un *Indice della Raccolta delle Scritture, Atti, Decreti fatti nella Controversia dell'Acque del Bolognese* che contava oltre 850 pezzi archivistici riguardanti appunto questa tematica. [Saccone, 1982]

³L'ultimo residuo di queste paludi sono le Valli di Comacchio.

⁴Per approfondire questo passaggio consultare [Maffioli, 1998]

⁵Come fa notare Giacomelli in [Giacomelli, 1983]

I risultati, come previsto, furono disastrosi: nelle zone bolognesi si stima una perdita di terreni di 60.000 ettari⁶, oltre ad una carestia che portò a molte morti.

Furono proposte varie soluzioni per cercare di migliorare la situazione, tra cui quella presentata nel 1621-1622 dal cardinale Luigi Capponi, successivamente ripresa anche da Castelli. Questa proposta prevedeva lo scavo di un canale che collegasse il Reno al Panaro (un affluente del Po), per poi confluire insieme nel Po in zona Stellata.

Guglielmini si dimostrò un fervente fautore di questa linea d'azione, andandola a perfezionare ulteriormente⁷. L'immagine 2.1 rappresenta uno schizzo del progetto di Guglielmini proposto nel 1693. Andando a percorrere le linee da lui definite: in primo luogo c'è il collegamento tra il Reno e il Po di Ferrara, si parte quindi da Ghislieri (sud della cartina, punto A), per arrivare al Po di Ferrara (punto B). Andando poi a sfruttare il tratto BCD di quest'ultimo, si va a creare il drizzagno⁸ DE che va a ridurre le tortuosità del fiume Panaro (si veda appunto la linea DE, più leggera, tracciata nella mappa). Il Reno quindi prosegue assieme al Panaro nel tratto EF, andando ad immettersi nel Po in zona Stellata (punto G).

Il perseguimento di questa proposta avrebbe portato grande prestigio alla figura di matematici come Castelli e Guglielmini, ma purtroppo l'idea fu accantonata.

Sembra infatti che per tutto il Seicento i ferraresi non siano disposti a trattare la disalveazione effettuata nel 1604; era in loro ancora ben presente il sentimento di una Ferrara splendente in quanto a commerci e navigazioni, e dare ragione ai bolognesi avrebbe inficiato questo status.

Ma la diatriba tra Bologna e Ferrara non si limitava solo a due visioni divergenti rispetto alla gestione del territorio; si evidenzia uno scontro di fondo tra tecnici e matematici, con le loro rispettive concezioni della scienza idraulica.

⁶Questa stima è fornita da Salaroli in [Salaroli, 1624]

⁷Questa ed altre soluzioni sono ben analizzate da Maffioli in [Maffioli, 1994], pp.44, 136-138 e 240-242

⁸Il drizzagno è un tratto di letto artificiale scavato in linea retta, così da ottenere un accorciamento dell'alveo.

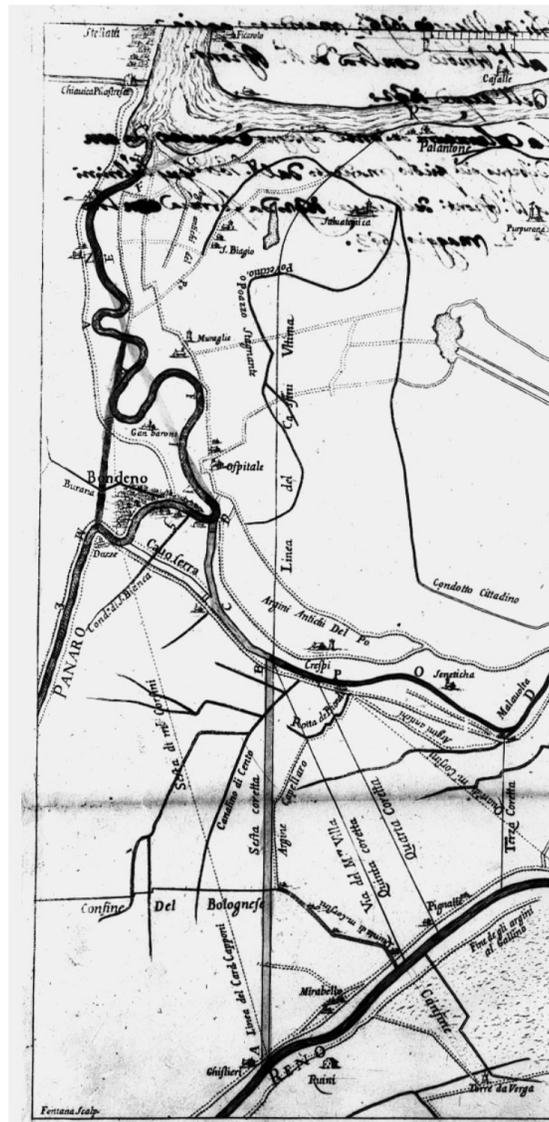


Figura 2.1: Progetto di Guglielmini per la gestione del Reno

Ferrara mostrava una certa chiusura verso le innovazioni scientifiche e, di conseguenza, affrontava la questione del Reno mantenendo una posizione fedele a una consolidata tradizione tecnica nella gestione delle acque.

Una tradizione quindi di architettura delle acque di sapore rinascimentale si scontra con una prospettiva matematica supportata invece da Bologna.

Cassini nel 1657⁹ infatti critica i tecnici idraulici che non supportavano la sua proposta¹⁰, ricevendo una risposta emblematica dai ferraresi:

*”Se li benefici dell’introduzione del Pò di Lombardia [nel Po di Ferrara], e danni, che potesse causare la remozione del Reno in quello, si fossero dovuti discutere, e giustificare per mezzo di discorsi teorici, matematici, e speculativi, e autenticare con l’auttorità d’auttori interessati, (...) , havrebbero procurato li ferraresi (...) con i medesimi mezzi rappresentare le loro ragioni; ma perche gl’ultimi sono dannati affatto da tutte le leggi, e li primi più adattati per le catedre, che per provare affari di tanto rilievo, (...) hanno tralasciato detti mezzi, e applicato solo à quelli dell’esperienza, pratica, e dell’auttorità de i Brevi de’ Sommi Pontefici, decreti, e risoluzioni di questa Sac. Congregazione, (...).”*¹¹

Per i ferraresi la questione è chiara, esistono questioni utili *per le catedre* e invece questioni che servono a risolvere i problemi pratici.

Questa contrapposizione si può notare anche considerando i due intellettuali di riferimento di quel momento: Castelli per Bologna e Gian Battista Aleotti per Ferrara. Quest’ultimo nella sua *Hidrologia* tratta principalmente l’idraulica pratica che riguarda le foci del Po, con considerazioni teoriche per nulla innovative e spesso errate¹². Invece *Della misura dell’acque correnti* di Castelli si posiziona come un testo fondativo per la scienza delle acque in generale, data la ricerca di solide basi teoriche su cui fondare anche la pratica idraulica.

⁹In questo periodo Cassini risulta tra i matematici più importanti della città di Bologna.

¹⁰Per approfondire questo scambio: [Maffioli, 2000] pp.122-123

¹¹[Fontana, 2001] p.32

¹²Per approfondire la figura di Aleotti nello specifico di quanto detto in questo paragrafo: [Maffioli, 1995]pp.173-178 e [Fiocca, 1998] pp.59-69

I ferraresi manifestavano una certa riluttanza verso questo nuovo approccio scientifico e mostravano costantemente l'importanza di sottolineare la differenza tra teoria ed esperienza concreta.

La questione del Reno interessò direttamente anche Guglielmini, che sostituì Cassini in un momento importante anche a livello istituzionale¹³. Con Guglielmini i senatori bolognesi riconobbero la necessità di inserire un matematico come sovrintendente agli affari riguardanti le acque, in modo che potesse guidare i periti.

L'attenzione di Guglielmini alla questione del Reno non è presentata direttamente ne *Della natura de' fiumi*¹⁴, ma era sicuramente un problema per lui centrale, tant'è che nel 1692 la sua relazione di visita delle valli bolognesi si apre con:

*"Perché dal Regolamento dell'Acque di Reno unicamente dipende la salvezza del nostro Territorio sempre più pregiudicato, e sottomesso da nuove inondazioni; quindi se bene da tanto tempo in qua si stà aspettando vanamente il remedio contrastatoci dalla pertinacia Ferrarese(...)"*¹⁵

Guglielmini non era solamente un abile scienziato, ma era anche accorto dal punto di vista politico. Infatti nel 1692-1693, chiese ai cardinali Ferdinando D'Adda e Francesco Barberini, in rappresentanza di Papa Innocenzo XII e quindi dello Stato Pontificio, di condurre una visita alle acque di Ferrara e Bologna.

La disalveazione del 1604 fu deliberata dallo Stato Pontificio, e Guglielmini cercava di persuadere i cardinali sulla bontà del suo progetto di gestione delle acque.

I cardinali giunsero accompagnati da molti tecnici, con l'obiettivo di porre fine alle varie problematiche che da anni affliggevano queste zone a causa del Reno. Fu proprio durante questa visita che Guglielmini si guadagnò la preferenza degli ecclesiastici, soprattutto di D'Adda, che supportava pienamente il suo piano tecnico di divergenza del Reno. I pro-

¹³Pallotti analizza i problemi relativi all'organizzazione delle acque Bolognesi attraverso la figura di Guglielmini in [Pallotti, 1983], pp. 9-62

¹⁴Per quanto vi siano continui rimandi nel corso di tutta l'opera

¹⁵Biblioteca Universitaria di Bologna, Manoscritto 1102:1692, n.2

blemi politici e diplomatici furono però troppo grandi, e data la necessità del papato di posizionarsi in una posizione intermedia tra le due parti di Ferrara e Bologna, alla fine non ci si mosse in questa direzione.

Sicuramente questa visita dei cardinali servì per rendere palese l'importanza dell'idraulica per Bologna in questo periodo storico, e fu uno dei motivi che portarono all'istituzione della prima cattedra universitaria della disciplina in cui insegnò proprio Guglielmini.

2.2 Biografia Guglielmini



Figura 2.2: Ritratto di Domenico Guglielmini, 1731 - Accademia delle Scienze di Torino

Domenico Guglielmini¹⁶ nacque il 27 Settembre del 1655 a Bologna.

Studiò matematica sotto Germiniano Montanari (1633-1687) e medicina sotto Marcello Malpighi (1628-1694), riuscendo ad ottenere buoni risultati in entrambi gli ambiti.

I suoi primi interessi riguardarono questioni astronomiche: tra le prime opere si cita nel 1667 la *Volantis flammae epitropeia*, che parla di comete e verrà seguita da altre dissertazioni sulla natura delle stesse.

La sua passione per l'idraulica però era già nota, e infatti nell'anno 1686 gli venne affidata la cattedra di matematica a Bologna assieme al titolo di "sovrintendente generale delle acque di stato".

Pubblicò il suo primo trattato su questo tema: *Aquarum fluentium mensura nova me-*

¹⁶Come approfondimenti sulla biografia di Guglielmini si può consultare [Manfredi, 1821], introduzione pp. VII-XXXVI

thodo inquisita in due riprese tra il 1690 e il 1691¹⁷. Diviso in sei libri più un'appendice, risulta essere un'opera molto tecnica e poco incentrata sugli aspetti teorici, all'interno vi è un'ampia analisi degli acquedotti e di come ottenere un loro funzionamento ottimale. Le proposizioni che vengono seguite riprendono quelle già elencate da Castelli in *Sulla Misura delle acque correnti* del 1628, anche se qui Guglielmini riporta la corretta legge dell'efflusso, a differenza di quanto sostenuto da Castelli¹⁸. Questo scritto fu recensito negli *Acta eruditorum Lipsiae*, periodico tedesco fondato da Leibniz e Otto Mencke, e gli valse l'attenzione di Leibniz stesso, con cui iniziò una lunga amicizia e corrispondenza. Nel 1692 fu creata appositamente per lui la cattedra *ex novo* di Idrometria, a rimarcare la crescente importanza di questa branca di cui Guglielmini risulta uno dei principali padri fondatori.

La crescente fama gli valse l'entrata all'Académie royale des sciences di Parigi nel 1696, e l'anno successivo anche alla Royal Society di Londra. È proprio nel 1697 che Guglielmini scrive il suo capolavoro idraulico: *Della natura de' fiumi*.

Nel 1698 gli viene affidata una cattedra di matematica e astronomia a Padova (mantenendo comunque gli incarichi a Bologna), seguendo un migliore stipendio e lasciandosi alle spalle un clima tra gli intellettuali bolognesi diventato per lui avverso.¹⁹

In questo periodo si attivò per alcune questioni pubbliche che riguardavano la gestione delle acque, tra cui la sovrintendenza al restauro delle fortificazioni di Castelnuovo in Dalmazia (città dell'attuale Montenegro).

Il suo interesse in questi anni si sposta sul campo medico, e nel 1701 pubblica *De sanguinis natura et constitutione*, in cui si indaga il coagulamento del sangue andando ad

¹⁷In questo testo si vedono già incrociarsi i due principali interessi di Guglielmini: l'idraulica e la medicina. Infatti paragona il moto dell'acqua dei fiumi al moto dei fluidi nei vasi sanguigni. Interessante quindi come si utilizzino gli strumenti matematici e meccanici per trattare la scienza medica.

¹⁸Fare riferimento a quanto osservato in sezione 1.4

¹⁹Specifica infatti Manfredi nell'introduzione di [Manfredi, 1821] p.XXVIII: "(...)l'anno 1698, partito da Bologna, accettò nell'Università di Padova la cattedra di Matematica collo stipendio di mille ducati, e il motivo principale per cui determinassi a cedere agli onorevoli inviti della Repubblica di Venezia fu l'amor della pace turbata in que' tempi fra i Dottori Bolognesi da forti dissensioni e da reciprochi oltraggi."

applicare teorie idrauliche alla circolazione nei vasi sanguigni.

L'anno successivo riceve la cattedra di medicina teorica a Padova, tra le più prestigiose del tempo. Questo gli permise di promuovere una medicina razionale, dove cioè si utilizzano teoremi fisico-matematici per lo studio della stessa, in contrapposizione alla medicina galenica molto in voga in quel periodo²⁰.

Importante anche ricordare le sue considerazioni nell'ambito della chimica e in particolare modo della cristallografia²¹. Nota Guglielmini infatti che i sali hanno delle forme costanti, assimilabili a solidi geometrici come il cubo e il parallelepipedo. Nel 1705 pubblica *De salibus dissertatio*, che può considerarsi tra i primi testi di cristallografia moderna al mondo.

La fama di Guglielmini si estendeva ben oltre i confini italiani. Il suo rilievo nel contesto Europeo è testimoniato dall'attenzione degli altri scienziati suoi contemporanei: Willem's Gravesande²² lo cita nel suo *Physices Elementa Mathematica*, Jacob Hermann lo cita nel suo trattato di meccanica avanzata *Phoronomia*, e Leibniz consiglia la lettura di *Della natura de' fiumi* a Bernoulli, che infatti lo menzionerà nella Sectio Prima del suo *Hydrodynamica*.

Bernard le Bovier de Fontenelle²³, nel suo *Eloge de M. Guglielmini*, scrive che dopo aver letto il testo di Guglielmini gli scienziati dell'epoca devono confessare di non conoscere affatto l'idraulica fluviale.²⁴

Molto echeggiante in Europa fu anche l'istituzione della cattedra di Idrometria a Bolo-

²⁰La medicina galenica, basata sulla teoria di Galeno, si concentra sull'equilibrio dei quattro umori del corpo umano -sangue, flemma, bile gialla e bile nera- per mantenere la salute. I trattamenti seguono il principio di preparare farmaci da sostanze naturali, utilizzando tecniche come la distillazione e la miscelazione di erbe. Le prescrizioni riflettono la teoria dei quattro umori, e l'approccio è più tradizionale e teorico, spesso distante dalla metodologia scientifica. Questo contrasta con l'approccio razionale di Guglielmini, che si basa sull'osservazione empirica, sulla sperimentazione e sui principi scientifici per la diagnosi e il trattamento medico.

²¹Un approfondimento della figura di Guglielmini dal punto di vista del suo contributo come chimico si trova in [Guareschi, 1914]

²²Willem Jacob 's Gravesande (1688-1742) fu uno scienziato e filosofo olandese che approfondì molto la scienza newtoniana.

²³Bernard le Bovier de Fontenelle (1657-1757) fu uno scrittore francese.

²⁴[le Bovier de Fontenelle, 1710]

gna, essendo la prima nel suo genere.

In questo periodo si assiste a una proliferazione delle accademie in Europa, che, insieme alle università, si affermano come nuovi punti di riferimento intellettuali del continente²⁵.

Tra le figure più importanti che fecero da tramite fra l'università bolognese e il contesto scientifico europeo bisogna ricordare Leibniz. Gottfried Wilhelm Leibniz (1646-1716) è stato un filosofo, matematico e scienziato tedesco. È noto per aver sviluppato il calcolo infinitesimale, oltre a contributi significativi alla filosofia, alla logica e a molti campi scientifici. Leibniz era infatti un pensatore poliedrico, influente nella sua epoca per le sue idee originali e il suo lavoro interdisciplinare.

Leibniz manifesta un notevole interesse per la scienza italiana, con particolare attenzione a quella bolognese. Questo interesse è evidente nelle sue frequenti corrispondenze con diversi intellettuali italiani e nel suo apprezzamento per le opere degli algebristi bolognesi, tra cui cita il metodo degli indivisibili di Bonaventura Francesco Cavalieri.

Gli scambi tra Guglielmini e Leibniz risultano concitati dopo la visita di quest'ultimo a Bologna nel 1689, grazie anche al contributo di mediazione del fiorentino Antonio Magliabechi²⁶; purtroppo gran parte delle lettere sono perdute.

Come detto in precedenza, Leibniz si adoperò attivamente per recensire il trattato *Aquarum fluentium mensura nova methodo inquisita* nella rivista da lui fondata, gli *Acta Eruditorum*. Inoltre, svolse un ruolo di mediatore in una discussione tra Guglielmini e Denis Papin²⁷, quest'ultimo critico di alcune parti dell'opera. La disputa che ne derivò, benché non particolarmente innovativa in sé, rappresenta un esempio significativo del clima di scambi e apertura tra le personalità scientifiche europee di quel periodo²⁸.

In seguito a questo episodio, Leibniz incoraggiò Guglielmini a continuare la sua ricerca

²⁵Per un approfondimento in particolare sulle accademie bolognesi confrontare [Cavazza, 1988] pp. 47-77

²⁶Antonio Magliabechi (1633-1714) fu bibliotecario della Palatina, e per tutta la vita sostenne rapporti molto attivi con vari dotti in tutta Europa, tra cui Leibniz stesso.

²⁷Denis Papin (1647-1714) era un medico e fisico collaboratore di Boyle e discepolo di Huygens. Studiò con approccio molto ingegneristico-tecnico l'idraulica ma anche le macchine a vapore.

²⁸Per approfondire la disputa fare riferimento a [Maffioli, 1984].

sulla fluidodinamica applicata alla medicina, un argomento di grande interesse anche per lo scienziato tedesco. Leibniz riconobbe in Guglielmini un notevole meccanicista, apprezzando la sua inclinazione a esplorare ogni aspetto della natura attraverso l'utilizzo degli strumenti matematici.

Leibniz cercava attivamente un canale per introdurre il calcolo infinitesimale anche in Italia, un concetto che, come sappiamo oggi, avrebbe rivoluzionato radicalmente il modo di concepire e praticare la scienza.

Purtroppo però Guglielmini trovò molto fatica a comprendere il calcolo differenziale ed integrale, molto esplicitivo risulta infatti il suo commento:

"mihi saltem obscura sunt, quin et multis aliis".²⁹

Nel 1703, al momento in cui Guglielmini rinunciò alla cattedra di matematica a Padova, Leibniz venne contattato. Fu proprio Leibniz a promuovere l'idea di sostituire Guglielmini con il matematico Jacob Hermann³⁰, un esperto di calcolo infinitesimale, ritenuto da Leibniz come la figura di riferimento tanto auspicata.

Guglielmini, purtroppo, non fu in grado di sfruttare l'opportunità offertagli da Leibniz. Tuttavia, dalle loro interazioni emerge inequivocabilmente il rispetto reciproco tra questi due scienziati.

Considerato un lavoratore instancabile, con un costante impegno sociale e politico che rispecchiavano il suo grande amore per la patria, Guglielmini muore il 12 luglio 1710, a seguito di una forte malattia all'età di cinquantaquattro anni.

Venne sepolto nella chiesa di San Massimo a Padova, e poco dopo viene eretto in suo onore un monumento nella basilica di San Antonio.

²⁹AA.VV., Studi e Memorie per la storia dell'Università di Bologna, cit., p.40. La frase può essere tradotta come "[i concetti di infinitesimo]almeno per me sono oscuri, e credo lo siano anche per molti altri"

³⁰Jacob Hermann (1678-1733) era già membro dell'Accademia di Berlino, sempre per intercessione di Leibniz

Capitolo 3

Della natura de' fiumi, trattato fisico-matematico

Della natura de' fiumi è il trattato più importante e risonante tra le opere scientifiche di Guglielmini che riguardano l'idraulica.¹

Pubblicato nel 1697, il testo ricevette una vasta diffusione sia nel bel paese sia in tutta Europa, dove si diffuse fra molti grandi studiosi dell'epoca, non solo quelli dediti all'idraulica.

Il trattato presenta salde radici nella cultura scientifica italiana, difatti Guglielmini ci tiene a marcare l'importanza di contributi a lui precedenti come quelli di Giambattista Barattieri (*Architettura d'acque*) e Famiano Michelini (*Trattato della direzione de' fiumi*).

Lungi quindi dall'essere un'opera figlia di un genio isolato, il testo di Guglielmini è importante perché vuole riassumere tutte le conoscenze fluviali dell'epoca, raccogliendole e organizzandole in quattordici capitoli che trattano i fiumi e tutto ciò che li riguarda, cercando di fornire al lettore una visione chiara delle conoscenze in tal materia.

¹Per approfondire i temi trattati in questa introduzione vedere in generale [Fontana, 2001], [Loffi, 2005], [Rouse and Ince, 1963]

Particolarmente rilevante infatti sembra essere per l'autore non solo il fornire degli strumenti pratici accompagnati da basi teoriche, ma anche che il tutto risulti essere il più comprensibile possibile. Si può rilevare un aspetto quasi divulgativo, che porta il testo ad essere scritto in italiano e a presentare come sottotitolo:

“[trattato] *In cui si descrivono le principali proprietà dei fiumi, se ne indicano molte che finora erano sconosciute, e si dimostrano in modo facile le cause delle stesse*”².

Ci si trova in un'epoca poco postuma a Galileo, in cui molti scienziati partecipano alla nascita e allo sviluppo di un metodo scientifico che cerca di utilizzare la matematica per descrivere i vari fenomeni del mondo.

Guglielmini parla di come sia importante che la fisica differisca dalla matematica in quanto il suo utilizzo dev'essere pratico, rispetto ad uno più astratto di quest'ultima. È probabilmente questo tentativo di creare un trattato che sia il più possibile applicabile ai casi reali, ma senza tralasciare un aspetto di modellizzazione matematica, che lo ha reso così importante ed echeggiante nella comunità scientifica.

Paolo Rossi ne “*I filosofi e le macchine 1400-1700*” ben riassume il cambiamento di paradigma in atto: da una scienza astratta e contemplativa si passa ad una scienza pratica e utile. Da questo deriva quasi necessariamente un aspetto collettivo di scambio del sapere:

“La difesa delle arti meccaniche (...) implicavano in realtà l'abbandono della concezione della scienza come disinteressata contemplazione della verità. . .

Gli scrittori di cose tecniche e i filosofi naturali insistono concordemente su un punto: il sapere ha carattere pubblico e collaborativo, si presenta come una serie di contributi individuali, organizzati nella forma di un discorso sistematico, offerti in vista di un successo generale che dev'essere patrimonio di tutti gli uomini.”³

Guglielmini, e in particolare modo questo testo, rappresentano appieno quanto sopra

²[Guglielmini, 1697] Frontespizio

³[Rossi, 2017] pp.21-22. Sempre dello stesso autore si può consultare come approfondimento il capitolo 9 di “*La nascita della scienza moderna in Europa*” (Rossi,2000,Economica Laterza)

descritto, e nella lettura dell'opera si percepisce fortemente questa necessità e volontà di costruire una conoscenza comune che porti al benessere dell'uomo.

Entrando nello specifico dei contenuti del trattato, i capitoli risultano tra loro ben divisi e forniscono un'ampia comprensione dell'idraulica fluviale.

I primi quattro capitoli sono i più teorici e introduttivi, Guglielmini parla della dinamica dei fluidi in contrapposizione a quelle dei solidi, e in generale delle differenze che si hanno tra queste due categorie di oggetti. Deduce quindi il moto delle correnti basandosi sulla legge di caduta dei gravi di Galileo. Vi sono anche delle nozioni preliminari riguardanti i fiumi: denominazioni, le loro origini e quelle delle fonti.

In particolare il quarto capitolo è molto importante in quanto descrive le regole principali del moto delle acque, andando quindi a creare un impianto teorico che servirà come impalcatura per sostenere gli argomenti successivi.

Dal capitolo quinto si inizia a parlare degli aspetti caratteristici dei fiumi, partendo dalle profondità, altezze e pendenze; da qui nasce un'analisi dettagliata dell'alveo del fiume, che risulta formarsi da un equilibrio tra varie forze e resistenze.

Nel sesto capitolo viene trattato sempre l'alveo considerandone principalmente la sua direzione, e le ragioni che lo portano ad avere una conformazione rispetto ad un'altra.

Il capitolo settimo invece è incentrato sul movimento delle acque, si sofferma sulla velocità delle stesse in base all'altezza del corso d'acqua, per poi andare a trattare i problemi dei gorghi e dei vortici.

Il capitolo ottavo si concentra sullo sbocco di un fiume in un altro fiume oppure nel mare, ed è legato al capitolo successivo in cui si tratta nello specifico l'unione di più fiumi in un unico corso.

Il capitolo decimo affronta le problematiche delle piene, molto rilevanti nel periodo di Guglielmini.

Il capitolo undicesimo si sofferma sui canali di scolo delle campagne, quando il dodicesimo tratta invece i canali di derivazione, soffermandosi su quelli navigabili.

Il capitolo tredicesimo tratta il problema delle bonificazioni fornendo due possibili alternative per effettuarle: l'essiccazione e l'alluvione.

L'ultimo capitolo, il quattordicesimo, si sofferma sulla delicata questione della modifica degli alvei dei fiumi, in particolare modo trattando le inalveazioni.

3.1 Criteri di analisi

Il testo analizzato si divide in quattordici capitoli, tutti estremamente ricchi di contenuti riguardanti i vari aspetti dell'idraulica fluviale.

Rispetto all'organizzazione dei temi trattati, Guglielmini risulta essere molto lineare e la suddivisione degli argomenti è molto chiara in tutta l'opera.

Il titolo di ogni capitolo ben descrive quello che l'autore andrà ad affrontare all'interno dello stesso, e per quanto siano presenti delle inevitabili sovrapposizioni sulle tematiche trattate, Guglielmini è sempre preciso nel rimandare alla diversa sezione in cui queste sono meglio spiegate. Infatti ogni paragrafo si apre con una breve indicazione di cosa si andrà a esporre nel contesto di quanto detto precedentemente.

Perciò si è scelto di esporre gli argomenti seguendo per buona parte l'ordine scelto dall'autore, con alcune variazioni significative ritenute utili per offrire una migliore coerenza generale. Questo non inficia la facilità nel rintracciare dove i temi discussi in questo luogo vengono trattati nel libro originale, dato che ci saranno sempre riferimenti ai capitoli del libro che si stanno analizzando.

Nel processo di analisi del trattato si è cercato di identificare i punti focali della discussione, con l'obiettivo quindi non di fornire un resoconto pedissequo e poco interessante riguardo i tanti argomenti esposti nel libro, ma piuttosto di ricercare quegli aspetti che si possono dichiarare più importanti da un punto di vista storico e scientifico.

Per quanto dichiarato dallo stesso autore nell'introduzione, e per quanto anche detto nella sezione 3 riguardo l'importanza dell'opera nel panorama scientifico Sei-Settecentesco, ci si è concentrati su una contestualizzazione dell'opera di Guglielmini che mettesse in luce la sua rilevanza e peculiarità all'interno di quest'epoca di transizione scientifica e culturale.

I passaggi del testo selezionati e riportati sono sempre accompagnati da commenti atti a fornire un quadro generale secondo quanto detto sopra, in modo da guidare in una lettura giudiziosa e coerente del testo e anche del suo rapporto con il periodo storico in

cui è stato scritto.

Nello specifico quindi ci si è soffermati sugli aspetti che rimarcano il complesso rapporto tra matematica e fisica. Sappiamo infatti oggi che la modellizzazione dei corsi d'acqua è un qualcosa di estremamente complesso, che richiede conoscenze e strumenti analitici che ai tempi dell'autore non erano presenti. Risulta quindi assai interessante capire come, all'emergere di una fisica che vuole fare della matematizzazione del mondo osservabile uno dei suoi pilastri, ci si approccia ad un fenomeno così complesso e variegato, difficilmente riducibile e pieno di eccezioni. Guglielmini si può definire un meccanista convinto, e quindi gli aspetti appena descritti ben si ritrovano in tutta l'opera.

Si è inoltre cercato di risaltare, dove possibile, l'algebra e la geometria utilizzata, mettendo in rilievo l'organizzazione delle proposizioni, delle dimostrazioni e in generale della metodologia d'analisi impiegata.

Infine si è prestato attenzione agli aspetti pratici e applicabili, centrali per l'autore in quanto sovrintendente delle Acque Bolognesi.

Le bellissime quindici tavole⁴ che accompagnano i vari capitoli sono tutte disegnate a mano, e verranno di seguito utilizzate come guida per spaziare tra i vari temi; restituendo anche un gusto di fare scienza ormai molto lontano se non dimenticato. Per approfondire l'aspetto iconografico si è dedicata l'appendice B all'esposizione di tutte le immagini, con delle brevi descrizioni per poterle comprendere al meglio.

In conclusione si tiene a precisare che alcuni modelli presentati da Guglielmini, sia per quanto riguardano le proprietà dei fluidi in generale sia dei fiumi e delle loro caratteristiche, sono parzialmente o totalmente errati. Non si è ritenuto necessario rimarcare e focalizzarsi continuamente su questo aspetto, ma piuttosto si è voluto approfondire le teorie proposte dall'autore rispetto a quelle a lui precedenti, così da evidenziarne gli aspetti innovativi.

⁴Per un totale di 59 immagini

3.2 *Analisi Della natura de' fiumi, trattato fisico-matematico*

3.2.1 Dedicà e introduzione

Il trattato è dedicato all'abate di S. Quintino Paolo Bignon.⁵ Assieme ai classici ringraziamenti e alle lodi, Guglielmini desidera sottolineare l'obiettivo del testo, cioè quello di ricercare *"pubblico beneficio"* in un ambito scientifico, quello dell'idraulica fluviale, in cui manca un'organizzazione matematica e fisica chiara e precisa⁶.

È interessante notare come nel libro non venga mai trattata direttamente la questione del Reno, ma questa fa comunque capolino in molti esempi e allegorie, infatti l'anticamera del volume si apre con l'immagine presentata in figura 3.1. Questa immagine è carica di simbolismo, e come detto da Cesare S. Maffioli⁷:

"È lo stesso simbolismo dell'antiporta del volume, - raffigurante il fiume Achelò della Grecia antica che sotto le sembianze di un toro venne domato da Ercole ed il cui corno, perso nella lotta, divenne simbolo dell'abbondanza - a richiamare inequivocabilmente la necessità dell'unione del Reno con il Po. Sullo sfondo si vedono le due città turrette di Bologna e Ferrara e nel cartiglio si legge "tantae molis erat bifidum compellere in unum" (quanta fatica costò riunire in uno ciò che era diviso in due)"

L'introduzione, rivolta *"A' benigni lettori"*, inizia con un ragionamento sul rapporto tra matematica e fisica, che un tempo erano considerate come dottrine separate: la matematica è evidente, mentre la fisica è incerta.

In particolare modo la matematica sta avanzando moltissimo, mentre la fisica sembra rimanere stagnante, con pochi sviluppi interessanti.

⁵Jean Paul Bignon in questi anni è il presidente dell'Académie royale des sciences di Parigi, prestigiosa accademia in cui Guglielmini è entrato a far parte un anno prima della pubblicazione del trattato, quindi nel 1696.

⁶In questa sezione tratteremo la dedica e l'introduzione iniziale del libro

⁷[Fontana, 2001] p.36



Figura 3.1: Antiporta del libro Della natura de' fiumi

La fisica però sta giovando dell'utilizzo della matematica in vari ambiti: la meccanica, l'ottica, l'astronomia.

Secondo Guglielmini la differenza tra la matematica e la filosofia naturale⁸ è che la prima lavora in pura astrazione nelle sue dimostrazioni, mentre la seconda deve rendere conto di tutto quello che *"può attualmente concorrere alla produzione di un effetto"*. Nell'applicare la fisica si ha a che fare con la diversità che si presenta nel mondo reale, come ad esempio l'impurità della materia.

Si arriva quindi alla conclusione che l'unico modo per trattare e studiare le *"opere della natura"* è quello di considerare i fenomeni individualmente (rispetto invece ad una visione universale tipica della matematica e dei suoi modelli). Nel caso infatti si vogliono dare proposizioni assolute anche in fisica, queste devono essere sempre utilizzate con cognizione di causa, considerando caso per caso.

⁸L'autore utilizza indistintamente il termine fisica o filosofia naturale

Ci sono poi oggetti che possono essere più facilmente modellabili con la matematica: “*il raggio di luce, i tremori del suono, il moto dei grani, etc.*” ma altri invece sono più complessi e più soggetti ad alterazioni.

Gugliemini precisa il motivo che l’ha portato a scrivere questa introduzione: vuole che i suoi lettori siano preparati alla tipologia di testo da lui presentata, cioè appunto all’incertezza della filosofia naturale.

La sua opera è un trattato fisico che riguarda la natura dei fiumi. Per quanto detto non bisogna quindi aspettarsi né il rigore di un geometra né l’universalità delle affermazioni più astratte.

Il trattato si concentrerà molto sullo studio degli alvei. L’autore trova che l’architettura delle acque fino a quel momento “*ha camminato con piede poco sicuro*”, dato che nessuno le ha fornito il giusto supporto delle scienze.

Invita poi i matematici ad utilizzare la meccanica, la scienza del moto e la geometria per far avanzare questa branca. Bisogna agire in modo fruttuoso, cioè lavorando attorno a quella meccanica che finora è stata toccata solo da Newton, ma senza alcuna applicazione riguardo i fiumi, che secondo l’autore sono parte della natura tra le più necessarie per gli uomini (data la loro utilità).

Guglielmini comunque non considera il suo apporto come definitivo o assoluto.

“*Ciò che di buono mi sia riuscito di fare, io non lo so*”, però il suo obiettivo è sempre quello di operare alla pubblica utilità.

Con questa concezione quindi ha ricercato sempre un’applicazione pratica riguardo gli argomenti esposti, rigettando le pure speculazioni teoriche.

Le figure e le illustrazioni ricorrenti in tutto il testo sono disegnate da Egidio Bordoni, e servono a rendere alcuni passaggi più facilmente comprensibili.

Riguardo il metodo utilizzato per la stesura del testo, lo scrittore dice di aver diviso il tutto in 14 capitoli, divisi in proposizioni, da cui sono derivati alcuni corollari.

“*Infine voglio avvertirvi che una gran parte delle Proposizioni non sono solo fondate sulla*

ragione... ma sono inoltre confermate dall'Osservazione e dall'Esperienza."

Sempre nell'ottica di una costruzione condivisa del sapere, infine l'autore invita a riscontrare se le leggi esposte valgono anche per tutti i fiumi italiani.

3.2.2 L'origine delle fonti naturali e le componenti dei fiumi

L'origine e le varie componenti dei fiumi sono due aspetti fondamentali che vengono trattati nel secondo e nel terzo capitolo dell'opera⁹, che risultano essere organizzati in modo molto discorsivo e introduttivo.

Guglielmini spiega che non esiste un consenso univoco sull'origine delle fonti fluviali: alcuni ritengono che l'acqua delle fonti derivi dalla pioggia, mentre altri la collegano al mare.

I signori dell'Accademia Reale delle Scienze di Parigi hanno calcolato qual è la quantità d'acqua che cade dalla pioggia o dalla neve rispetto a quella che scorre negli alvei dei fiumi fino al mare.

Le previsioni teoriche degli studiosi sono abbastanza concordi con le osservazioni pratiche. I valori trovati portano a dire che l'acqua piovana contribuisce ad un accrescimento delle sorgenti, ma con un quantitativo che non basta per mantenere l'acqua in tutti i fiumi; bisogna quindi anche considerare l'acqua evaporata dai mari.

Però gli studiosi che fanno derivare l'origine dell'acqua delle fonti dal mare non sono concordi sul spiegare il funzionamento di questo fenomeno, ci si chiede cioè come le acque marine ascendano alle cime dei monti.

Alcuni considerano una circolazione perenne comandata da Dio nella creazione dell'universo, altri una forza di pulsione che spinge l'acqua verso l'alto (senza però spiegare come poi questa sia spinta nuovamente verso il basso).

L'ingegnosissimo Descartes propone una spiegazione che secondo l'autore risulta essere la più plausibile: si suppone che la terra, nelle viscere dei monti, sia cavernosa (questo è anche supportato da diverse osservazioni).

Alcune concavità collocate ad un livello più basso ricevono acqua, direttamente o indirettamente, dai mari, e dato il calore presente nelle viscere della terra, l'acqua qui presente

⁹Il secondo capitolo è intitolato "*Dell'origine de' fonti naturali*" [Guglielmini, 1697], pp.38-44; il terzo capitolo "*Della divisione de' fiumi, loro parti, attinenze, e denominazioni*" [Guglielmini, 1697] pp.45-51.

evapora ascendendo in aria.

Questo vapore, presente nelle caverne inferiori, sale fino ai ricettacoli superiori, che la somministrano quindi alle fonti. Questo spiega anche il collegamento con le acque piovane: i ricettacoli superiori possono ricevere anche l'acqua piovana, andando quindi sempre a riversarla nelle fonti.

Questa spiegazione è accettata dall'autore poiché a suo avviso può spiegare qualsiasi fenomeno riguardante la natura delle sorgenti.¹⁰

Guglielmini infine parla dell'esistenza di fiumi sotterranei, che a volte emergono in superficie. Questi trovano quindi sotto terra alveoli e laghi, proprio come si osservano in superficie, per poi appunto uscire nuovamente visibili in prossimità di uno sbocco. La prova della loro esistenza deriva dall'osservazione dei fiumi che in estate si seccano: andando qui a scavare una buca si nota la formazione di una sorgente d'acqua.

In questa parte si può notare come l'aspetto di conferma sperimentale che l'autore ricerca per supportare le sue ipotesi può dividersi in due tipologie: dei veri e propri esperimenti, come quelli eseguiti dall'Accademia di Parigi e di cui Guglielmini riporta i risultati numerici; e invece delle osservazioni che hanno validità propria senza la necessità di presentare alcun dato oggettivo¹¹.

Si nota quindi che, per quanto ci sia molta attenzione a riportare osservazioni supportate da indagini, non vi è una strutturazione precisa di come si debbano svolgere degli esperimenti in modo da ottenere una validità il più possibile oggettiva.

Di seguito Guglielmini chiarisce che cosa si intende per fiume con tutte le sue componenti,¹² in modo da avere una nomenclatura precisa a cui fare riferimento.

La acque che corrono dentro alla superficie della terra esercitano il loro moto all'interno di cavità che si chiamano alveo, letto o canale. La parte inferiore dell'alveo è il fondo, le parti laterali sono le sponde o rive.

¹⁰Guglielmini non dimostra questa affermazione, prendendola quasi per un'ovvietà

¹¹Come la struttura delle viscere dei monti e l'esistenza dei fiumi sotterranei

¹²Qui si tratta quanto esposto nel capitolo terzo

Le sponde poi si dividono in artificiali e naturali, in base al fatto che siano state costruite o meno dagli uomini.

Le sponde naturali poi si dividono in quelle di *escavazione*, nate appunto dallo scavare dell'acqua; oppure quelle di *alluvione*, nate dal limo che ivi depositandosi innalza le pareti laterali del corso d'acqua.

Le sponde artificiali sono invece principalmente chiamate argini, e consistono soprattutto in ammassi di terra.

Vi è poi un elenco delle varie parti del fiume, mentre per quanto riguarda il fiume stesso si distinguono vari tipi di corsi d'acqua che nascono dalle fonti: i *Rivi* sono le piccole acque che nascono dalle fonti, l'unione di diversi *Rivi* crea un *Fiumicello*, e solo l'unione di più *Fiumicelli* diventa Fiume. Così via si elencano varie strutture che verranno riprese successivamente negli altri capitoli del trattato.

3.2.3 La natura e le proprietà dei fluidi

Il concetto di fluido viene presentato contrapponendolo a quello di solido. Guglielmini nel primo capitolo¹³ del trattato afferma che è impossibile comprendere la natura dell'acqua se prima non si capisce bene la natura dei fluidi in generale.

L'organizzazione dell'esposizione è quella che ritroveremo in molte altre parti del trattato, e risulta essere molto schematica e semplice: si alternano introduzioni o approfondimenti discorsivi a delle proposizioni che vengono subito dimostrate; seguono a queste vari corollari non dimostrati, che ampliano e meglio contestualizzano la proposizione a cui fanno riferimento.

In totale nel primo capitolo si hanno sei proposizioni, accompagnate dalle immagini presenti nella prima tavola del libro, presentata in figura 3.2.

Il capitolo inizia con una definizione di cos'è un corpo solido. L'autore, in queste dissertazioni teoriche, presta molta attenzione nel rimarcare la differenza tra le considerazioni che possiamo considerare puramente teoriche/astratte rispetto invece a quelle più reali/pratiche.

Si precisa infatti che queste valutazioni iniziali riguardano un'idea irrealistica della materia, necessaria per introdurre un'idea invece più fisica, reale.

Generalmente i solidi sono composti duri che non possono essere penetrati da altri oggetti. Se davvero nessun agente naturale può separare questi composti, possiamo chiamarli perfettamente duri, ma tali oggetti in realtà non esistono, quindi li chiameremo più o meno duri in base a questa loro resistenza ad essere separati.

Si descrivono poi i corpi liquidi¹⁴, che per essere tali devono presentare due condizioni essenziali:

¹³Il primo capitolo è intitolato *"Della natura de' fluidi in generale, e specialmente dell'acqua, e delle di lui principali proprietà necessarie a sapersi per la perfetta cognizione di questa materia"*, [Guglielmini, 1697] pp.1-37.

¹⁴La terminologia utilizzata da Guglielmini è differente da quella moderna: i fluidi sono definiti come dei *liquidi gravi*, cioè liquidi che possono per alcune loro caratteristiche essere assimilabili ai *gravi*. Con il termine "grave" Guglielmini intende un corpo solido che risponde alle leggi scoperte da Galileo

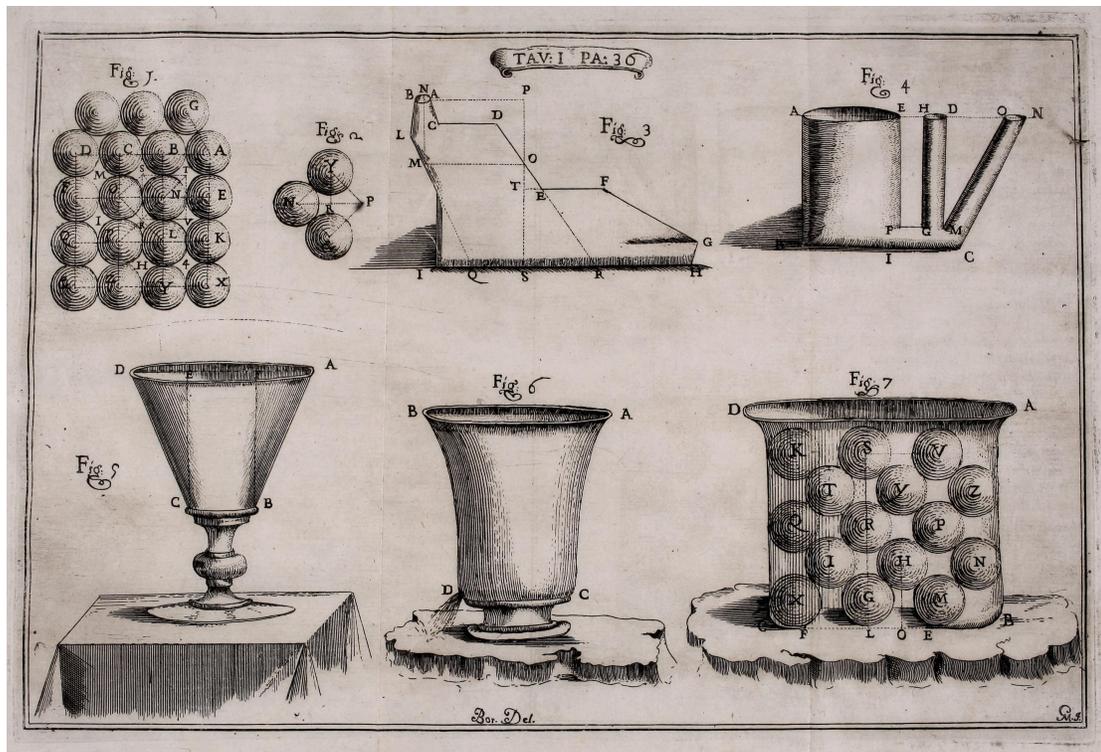


Figura 3.2: Tavola I

- Il liquido dev'essere considerato come un'unità. Si deve quindi distinguere un liquido vero e proprio da una massa di più corpuscoli, come ad esempio i cumuli di miglio o altri cereali. Questi cumuli sono denominati in base alla singola parte componente (come appunto il miglio) mentre nei liquidi la singola parte componente non ha nome diverso dall'unità totale.¹⁵
- Il liquido dev'essere permeabile, senza però lasciare aperto il luogo del passaggio: il corpo permeante deve cioè sempre essere abbracciato e circondato dal liquido permeato. Ci sono corpi più o meno liquidi, in base a quanto velocemente essi riempiono il vuoto lasciato dietro dai corpi penetranti.

L'autore inizia a parlare dell' *idea fisica dei fluidi* ¹⁶, parlando di come sulla natura degli stessi non ci sia una posizione univoca da parte degli scienziati: alcuni credono che le

¹⁵Qui si nota una visione prettamente atomistica, caratteristica di Guglielmini

¹⁶Con idea fisica si intende una concezione reale dei fluidi, sempre contrapposta ad una invece più astratta

sue componenti siano in perenne agitazione, altri invece non ritengono necessaria questa condizione.

Guglielmini propende per quest'ultima visione, e fornisce una modellizzazione dei fluidi riprendendo il caso dei cumuli di miglio: questi sono più simili ad un fluido tanto più le singole granella sono piccole. Il nostro modello dei fluidi è quindi proprio di questo tipo, dove le singole parti dello stesso hanno una determinata forma geometrica, e in particolare modo per l'acqua questa sarà sferica.

Importante inoltre che le unità costituenti dell'acqua si possano considerare come dei piccoli *gravi*, che rispondono quindi alle stesse leggi di gravità degli oggetti solidi.

La sfericità delle componenti dell'acqua spiega, secondo l'autore, anche le principali caratteristiche della stessa: trasparente, fluida e incompressibile.

Le proposizioni del capitolo hanno proprio lo scopo di dimostrare come questo modello sia davvero quello che meglio rappresenta la realtà.

Una realtà che non è direttamente rilevabile dai nostri sensi, e sulla cui indagine ci dovremo basare allora su una "*coerenza degli effetti sensibili rispetto alle idee fisiche formulate per spiegarli*".

Le prime cinque proposizioni si riferiscono alle figure dalla 1 alla 6 della prima tavola, e descrivono in generale come la struttura dell'acqua rappresentata in figura 1 (quindi composta da tante sfere), reagisca all'interazione con altre sfere (quindi con altra acqua), e come questo va a spiegare i fenomeni che avvengono nei vasi riempiti d'acqua.¹⁷

Di seguito si presenta la proposizione che Manfredi¹⁸ commenta ed elabora ampiamente nella sua versione annotata dell'opera di Guglielmini. Enunciato che risulta essere molto importante per comprendere successivamente molti aspetti delle proprietà dei fiumi:

¹⁷Nella figura 6 si vede il famoso caso della velocità di efflusso di un liquido da un contenitore con un foro laterale. Torricelli aveva già presentato il fatto che la velocità di uscita dell'acqua è proporzionale alla radice quadrata dell'altezza di acqua sovrastante al foro, senza però determinare il valore della costante che oggi sappiamo essere legata alla gravità g .

¹⁸[Manfredi, 1821] pp.76-93. Eustachio Manfredi (1674-1739) è allievo di Guglielmini e prenderà il suo posto come sovrintendente delle Acque Bolognesi nel 1704

Proposizione VI (capitolo I): "Se un vaso sarà pieno di sfere, e nel fondo di esso ci sia un foro per il quale possano uscire con libertà alcune di queste sfere, e che il sito lasciato dalle sfere, che escono, venga riempito da altrettante, aggiunte nel tempo medesimo al di sopra, in modo che il vaso resti sempre pieno; usciranno esse dopo qualche tempo con la stessa velocità come se fossero discese da tanta altezza, quanta è la distanza dello strato superiore dal foro."

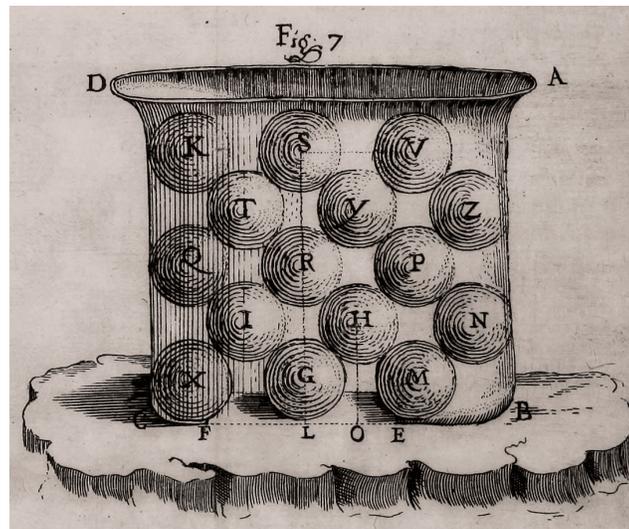


Figura 3.3: Dettaglio figura 7

Per la dimostrazione di questa proposizione si fa riferimento alla figura 3.3 della prima tavola, in cui si ha un vaso ABCD al cui interno sono situate le sfere G,H,M,X,N, ecc.. Si consideri nel fondo BC l'apertura di un foro EF.

Questo comporta che la sfera G, trovandosi senza sostegno, cadrà perpendicolarmente nell'apertura. Giunta quindi questa sfera nel punto L, essa avrà la velocità corrispondente alla *caduta*¹⁹ GL. Essendo poi che la sfera G è caduta, le sfere H, I saranno senza sostegno e quindi cadranno a loro volta nel posto precedentemente occupato da G.

Il risultato è che una sfera che arriva dallo strato superiore al punto L, avrà una velocità dovuta alla *caduta* HO. Allo stesso tempo ovviamente le sfere dello strato ancora superiore (PQ), scendendo ed arrivando nel punto L, avranno una velocità relativa alla *caduta* RL,

¹⁹Con il termine *caduta* si intende l'altezza rappresentata geometricamente da un segmento

e così fino allo strato superiore VS dove si avrà una *caduta* SL.

Dunque la velocità con cui le sfere usciranno dal foro EF dopo un certo periodo di tempo corrisponde alla velocità che avrebbero le stesse se dallo strato superiore VS fossero cadute fino al foro presente nel fondo. Mantenendo quindi, come nelle ipotesi, un continuo afflusso di sfere che conserva lo strato superiore VS costante, le sfere continueranno ad uscire con una velocità dovuta alla *caduta* SL.

Dato che quindi l'acqua può essere modellizzata come un insieme di sfere, abbiamo che questa proposizione si può utilizzare nel caso di un contenitore pieno d'acqua che presenta un foro nel sul fondo.

Guglielmini qui non parla propriamente del concetto di pressione, e non si interroga su quanto debba essere lungo il periodo di tempo per arrivare ad una situazione di stabilità. Lo stesso Manfredi²⁰ commenta questa proposizione dicendo che ci sono molti dubbi sulla veridicità di quanto affermato, ma ciò non inficia i successivi corollari (in particolare modo il secondo), che invece sono dei principi saldi della “*dottrina delle acque*”.

Il corollario di questa proposizione esplicita proprio il caso dell'acqua:

Corollario II, proposizione VI (capitolo I): “*Le velocità, con le quali le sfere escono dai fori sottoposti allo strato superiore, sono tra loro in proporzione dimidiata²¹ delle altezze, come si osserva appunto nei getti d'acqua*”

²⁰[Manfredi, 1821] p.84

²¹Con *dimidiata* si intende qui la radice quadrata del termine

3.2.4 Le regole del moto delle acque correnti

Si entra nel vivo della discussione teorica²² andando a parlare del moto dei fiumi. Qui si vede un Guglielmini prettamente meccanicistico, data la volontà di utilizzare la geometria e la fisica per rappresentare e spiegare aspetti cruciali che riguardano la dinamica dei fiumi.

Si possono notare due tematiche principali che si ritrovano nella lettura del capitolo: in primo luogo il parallelismo tra la caduta di un grave in un piano inclinato, il percorso di un fiume nella discesa attraverso un alveo, e l'efflusso d'acqua da un vaso. Tutti questi casi possono essere studiati utilizzando la *parabola delle velocità*²³.

Un secondo aspetto molto importante riguarda la concezione di moto uniforme del fiume, data dall'equilibrio che si viene a formare tra forze attive e passive, rispettivamente la forza di gravità e le resistenze dell'alveo.

La struttura del discorso non presenta in questo caso delle proposizioni ma piuttosto delle vere e proprie regole, che non vengono dimostrate ma sono giustificate dalle premesse esposte.

L'autore spiega che il moto delle acque è effetto della gravità, questo si rende manifesto a chiunque consideri l'acqua in parallelo agli altri *gravi* solidi, come nei modelli da lui proposti.

Vi è quindi un'importante analogia: la gravità a cui sono soggetti i corpi solidi ha la stessa origine e natura di quella che agisce sui fluidi, e quindi con le stesse regole spinge gli uni e gli altri verso il basso.

Questo però non implica che si possano applicare parimenti le leggi che riguardano i gravi, scoperte da Galileo, ai liquidi, dato che comunque vi è una diversa qualità degli uni rispetto agli altri.

²²Si tratteranno gli argomenti del quarto capitolo, intitolato "*Sul principio del moto delle acque correnti, e le sue regole principali*", [Guglielmini, 1697] pp.52-83

²³Per i primi due casi questa parabola si può osservare sia nella figura 3.4 (parabola AED) che nella figura 3.6 (parabola EBDP)

Guglielmini cita la legge che mette in relazione le distanze percorse da un grave in caduta libera (oppure lungo la discesa su un piano inclinato) con i quadrati delle velocità dello stesso.

Facendo riferimento alla figura 3.4, presente nella seconda tavola:

”Quindi è, che, per avere un’idea di tutti i gradi di velocità, per i quali passa un grave

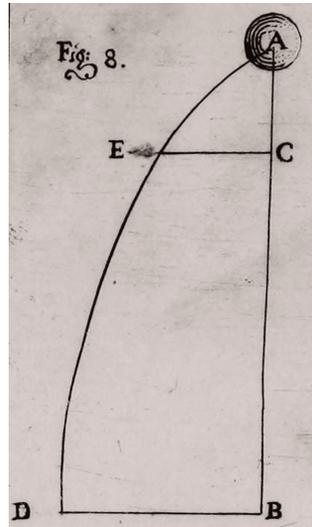


Figura 3.4: Dettaglio figura 8

cadente dall’alto al basso, basta dal principio della caduta descrivere una Parabola, che abbia per asse la perpendicolare ch’egli ha da descrivere; poiché allora le linee tutte tirate da ogni punto di questa perpendicolare, e terminate alla circonferenza parabolica, purché ad angolo retto con la AB, esprimeranno ciascuna la velocità che avrà il grave nel punto, che ad essa appartiene.”²⁴

Passa poi al caso del piano inclinato: anche qui il moto viene descritto seguendo le scoperte già fatte da Galileo, e quindi si può sempre utilizzare la stessa *parabola delle velocità*.

Guglielmini ci tiene a precisare che le considerazioni teoriche da lui riportate valgono

²⁴[Guglielmini, 1697] p.53. Viene utilizzata la *parabola delle velocità*. Il ragionamento seguito è che in una parabola verticale, del tipo che oggi possiamo scrivere come $y = a \cdot x^2$, le ordinate sono proporzionali al quadrato delle ascisse; quindi si avrà un parallelo della proporzionalità tra l’altezza percorsa e la velocità acquisita da un grave in caduta libera (o che discende lungo un piano inclinato)

solamente in un caso ideale, nella realtà vi è una resistenza data dall'aria che cambia le carte in gioco. L'aria secondo l'autore prende in sé una parte *dell'impressione* data dalla gravità, levandola all'oggetto che sta cadendo. Le velocità reali risultano essere quindi un po' minori rispetto a quelle attese teoricamente.

Si cerca quindi di capire come si possano utilizzare queste conoscenze nel caso dei fluidi. Innanzitutto il moto dei corpi solidi è descrivibile da un *centro di gravità*²⁵, mentre non è possibile fare una cosa simile per i fluidi. Come detto questi ultimi sono formati da un insieme di corpuscoli, che sono anch'essi soggetti alla gravità, ma non si può individuare nel loro insieme un *centro di gravità*.

Si elencano quindi una serie di differenze e similitudini tra il moto di discesa dei solidi e quello dei fluidi, di cui si riportano gli estratti più importanti:

- Così come per i solidi, anche i fluidi non cambiano la propria legge di caduta nel caso di un moto verticale rispetto ad un moto su un piano inclinato.
- Pur essendo l'acqua formata da varie parti, queste sono tra loro ben legate, e infatti quando una porzione d'acqua si muove anche le altre si muoveranno, e se ad una parte d'acqua è *impedito* il moto²⁶, anche le parti a lei contigue ne risentiranno.

Se invece consideriamo, come spesso si usa nella teoria, l'acqua come un fluido perfetto, quando questa scorre in un percorso che presenta degli *impedimenti* (sassi, sponde..) allora questi saranno risentiti solo dalle parti dell'acqua a stretto contatto con essi.

Invece quello che succede nella realtà è che se una parte d'acqua incontra una resistenza, anche le altre parti ne risentiranno: in modo che le porzioni d'acqua più prossime alla resistenza ne risultino più influenzate rispetto a quelle più distanti.

Molto importante questa considerazione sia per spiegare poi il moto del fiume in toto, sia per come l'autore sempre rimarchi l'importanza dell'usare criticamente la

²⁵Con centro di gravità si intende il baricentro.

²⁶Un moto risulta essere *impedito* quando trova delle resistenze.

teoria, così da ottenere qualcosa di utilizzabile a livello pratico.

Infatti Guglielmini commenta: " *Questa è la prima delle diversità che si incontrano nella discesa dei corpi solidi paragonata a quella dei fluidi; se pure si può chiamare diversità quella che nasce dall'errore commesso di volere considerare il moto di più solidi disuniti come fosse fatto di un solo solido*"²⁷

- Si fa riferimento alla figura 3.5 della seconda tavola. È rappresentata una serie di

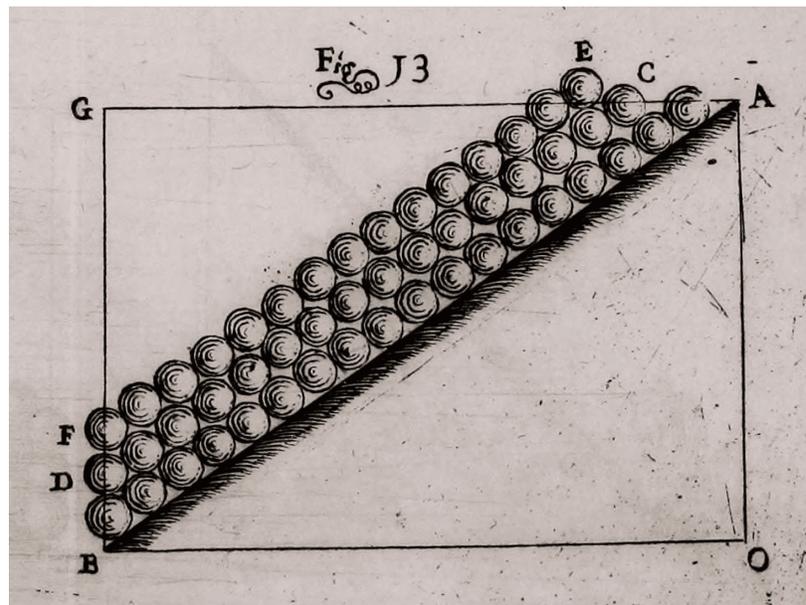


Figura 3.5: Dettaglio figura 13

sfere una sopra all'altra: AB, CD, EF; tutte poste sopra ad un piano inclinato.

Immaginando il moto di questa configurazione, la pallina B sarà la prima a partire, mentre la pallina A sarà l'ultima. Se consideriamo una singola sfera, sappiamo che questa *percorre gli spazi seguendo l'ordine dei numeri dispari*²⁸.

Abbiamo quindi che la distanza che la sfera A avrà percorso, rispetto alla sfera a lei appena successiva, aumenterà di secondo in secondo. Si creano quindi degli spazi tra le sfere della serie AB, che saranno colmati dalle sfere nelle linee CD ed EF, che

²⁷[Guglielmini, 1697]p.65

²⁸Come spiegato da Galileo in [Galilei, 1638], spazi percorsi in tempi uguali staranno tra di loro come i numeri impari ab unitate, cioè come 1,3,5,7

riempiranno i vuoti sottostanti.²⁹

Queste riflessioni spiegano perché i fluidi nel loro percorso di discesa si assottigliano e si abbassano di superficie.

- Un altro aspetto importante è che, se consideriamo un corpo solido, il rallentamento che questo subisce a causa delle varie resistenze non può essere in alcun modo recuperato. Nel caso dei fluidi invece, dato che il loro moto non è altro che un moto di alcuni solidi sopra ad altri, la pressione dei solidi superiori può restituire tutta o parte di quella velocità ai corpi inferiori che gli era stata tolta dagli *impedimenti*. Quanto detto dimostra *l'assioma degli Idrostatici* per cui l'acqua tanto risale quanto è scesa, mentre può essere che un corpo solido scendendo per un certo percorso non riesca a risalirne altrettanto.

Una peculiarità consiste che nelle superfici perfettamente orizzontali i solidi non si muovono, mentre i fluidi sì, dato che risolvono il problema della mancanza di inclinazione tramite la pressione che le parti superiori del corpo imprimono a quelle inferiori.

Considerando quindi che l'analogia tra solidi e fluidi deve tenere presente alcune accortezze, resta comunque possibile un utilizzo ragionato delle leggi di Galileo per lo studio dei fluidi.

Guglielmini quindi elenca alcune regole che riguardano il moto dei fiumi:

Regola I (capitolo IV): *L'acqua che passa dalla quiete al moto, o quando esce dalle vasche delle proprie fonti, o quando si forma nello sciogliersi delle nevi o in qualsiasi altra maniera, acquisisce durante la discesa negli Alvei un qualche grado di velocità, che ben presto si riduce all'equilibrio. Questo è dovuto alle grandi resistenze che l'acqua incontra nel suo moto (sassi, ghisa, inegualità fondi..).*

²⁹Interessante notare come qui Guglielmini utilizzi un'espressione molto vicina ad una visione di infinitesimi: "Supponiamo che nello spazio di tempo, il più piccolo che si possa concepire, la prima sfera abbia percorso uno spazio.". Questo concetto non verrà però approfondito, e in generale il ragionamento non sembra necessitare di questa considerazione

Questa prima regola risulta essere molto importante poiché Guglielmini è tra i primi ad evidenziare l'esistenza di uno stato di equilibrio che viene raggiunto da una corrente tra la tendenza dell'acqua ad aumentare la propria velocità, per effetto dell'accelerazione di gravità, e l'effetto della resistenza dell'alveo che si oppone al movimento.³⁰

Pur utilizzando questo concetto in altre parti del trattato, non verrà mai approfondito da un punto di vista matematico, restando quindi una considerazione puramente qualitativa.

La matematizzazione di questa idea avverrà solo nel 1768 grazie al fisico francese Antoine de Chézy, che eguagliando la forza di gravità con la forza di attrito arriva a calcolare la velocità media della sezione trasversale di un corso d'acqua.

La regola numero sei precisa le approssimazioni reali della regola precedentemente esposta:

Regola VI (capitolo IV): *L'equilibrio della velocità raggiunta da un fiume non sarà mai davvero stabile, dato che ci saranno sempre nuovi impedimenti che lo rallenteranno maggiormente, e invece quando questi saranno minori il fiume riprenderà velocità.*

I fiumi che corrono nella ghiaia sono più soggetti a questa instabilità rispetto a quelli che corrono in sabbia (dato che i primi hanno un maggior numero di impedimenti).

Si analizza di seguito la regola numero sette, in cui Guglielmini spiega come si può calcolare la velocità dell'acqua rispetto al percorso di un alveo inclinato.

Regola VII (capitolo IV): *Quindi è che ne fiumi, presso le loro origini, dove regolarmente hanno pendenza considerabile, la velocità dell'acqua si desume più dall'accelerazione che dall'altezza del corpo dell'acqua medesima... perciò i fiumi con poca pendenza sono tanto più veloci quanto maggiore è l'altezza viva dell'acqua che portano.*³¹

Secondo l'autore le due principali cause della velocità dei fiumi sono la pendenza dell'alveo e l'altezza del corpo d'acqua.

³⁰[Rouse and Ince, 1963] p.70

³¹Manfredi in [Manfredi, 1821] p.194 commenta che "Per altezza viva d'acqua si deve intendere, qui e altrove, quella parte dell'altezza che in una data sezione resta superiore al fondo regolare del fiume"

Queste però non operano mai congiuntamente: la velocità dell'acqua in un punto è dovuta o all'una o all'altra causa, in base a quale prevale.

Può essere che contemporaneamente una parte d'acqua abbia una certa velocità a causa della pendenza, mentre un'altra parte a causa dell'altezza del corso d'acqua.

Si introduce la figura 3.6 della terza tavola, l'analisi della quale racchiude molte delle principali osservazioni della dinamica dei fiumi nel loro percorso lungo l'alveo. Si ha la

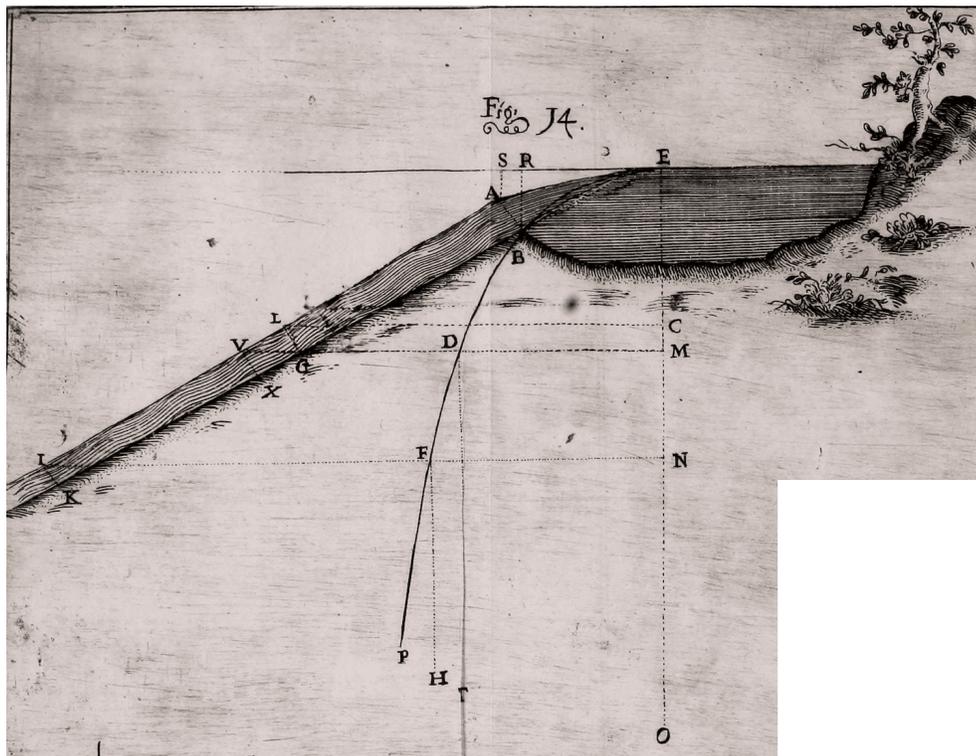


Figura 3.6: Dettaglio figura 14

fonte ABE (che si può considerare come un lago), dal quale esce acqua che va a scorrere nel canale inclinato BK. L'acqua nella prima sezione ha altezza BA, e sia ES l'orizzontale della superficie dell'acqua del lago.

Essendo l'acqua in B nel primo punto della pendenza BK, qui non si potrà avere altra velocità se non quella dovuta all'altezza del lago sopra il fondo B dell'emissario, quindi la velocità nel punto B sarà data dall'altezza BR (o equivalentemente da EB).

Invece la velocità nel punto A sarà quella dovuta alla discesa AE (o equivalentemente a

SA).

Proseguendo il moto nel canale BK, e considerando che tutte le parti dell'acqua andranno ad accelerarsi, la superficie dell'acqua si disporrà lungo una curva ALI, con un fondo BK. Tiriamo perciò dal punto E la linea EO perpendicolare all'orizzonte, e usandola come asse si descriva la curva parabolica EBDFP.

Si immagini che l'acqua del fondo, nel punto G, incontri delle resistenze che la riducano all'equilibrio; si tiri la linea orizzontale GDM, dove la linea MD rappresenta la velocità del punto G. Se le resistenze che incontra il fiume dal punto G fino ad arrivare al punto K non cambiano, la velocità in G sarà la stessa che troveremo nel punto finale K della discesa.

Perciò possiamo tracciare dal punto D la perpendicolare DT, e avremo quindi per quanto detto che tutte le velocità del fondo seguiranno la figura EBDT, composta dalla curva ED e dalla retta DT.

Considerando nella stessa sezione il punto di superficie L, non sarà questo veloce tanto quanto il fondo G. Tra i due punti infatti c'è una differenza di altezza CM. Quindi il punto L continuerà ad accelerarsi fino al punto V, il cui orizzontale coincide col punto G. Perciò l'acqua nella sezione perpendicolare VX avrà la stessa velocità sia nel fondo che nella superficie.

Questo caso però è molto raro se non impossibile, dato che nel fondo si avranno maggiori resistenze rispetto alla superficie. Questo comporta che in realtà la velocità della superficie in V crescerà e supererà la velocità del fondo in G, che invece resterà stabile.

Immaginiamo che questo aumento di velocità della superficie continui fino al punto I, dove infine anche la superficie raggiungerà un'equità. Tiriamo quindi la linea orizzontale IN, e quindi FN rappresenterà la velocità del punto I.

Svolgiamo quindi lo stesso procedimento prima fatto per G: tiriamo da F la linea FH perpendicolare, che rappresenta il fatto che da questo punto in poi la velocità della superficie non andrà più aumentando.

Possiamo quindi visualizzare le velocità della superficie con la linea EBFH, composta dalla retta FH e dalla curva EBF.

Mentre la velocità di tutte le altre parti dell'acqua della sezione trasversale, nelle altezze comprese tra la superficie e il fondo, raggiungeranno l'equità nei punti fra D e F.

Nella parte quindi del fiume inferiore al punto V la maggiore velocità è nella superficie dell'acqua, la minore invece nel fondo; e nei punti di mezzo è tanto più veloce quanto è distante dal fondo.

Guglielmini qui fa proprio un parallelo tra piano inclinato in cui scorre un *grave* e alveo inclinato in cui scorre l'acqua. In particolare modo EBDFP è la *parabola delle velocità* che, in ugual modo, potrebbe rappresentare il moto di un corpo solido che discende per il piano inclinato BK. Si può osservare infatti la similitudine tra la figura 3.4 (parabola AED) e la figura 3.6 (parabola EBDFP)³².

Guglielmini infine presenta un'analogia con l'efflusso, per cui la situazione del fiume che scende dall'alveo inclinato corrisponde a quella di un vaso che presenta un foro da cui fuoriesce acqua.

Il commento di Manfredi a questa regola³³ dice che le conclusioni a cui arriva Guglielmini erano già presenti nella sua opera *Misura delle acque correnti*: “Nel libro 2 proposizione 2 mostrava che la velocità dell'acqua in qualsivoglia sezione d' un canale inclinato è la medesima che avrebbe all'uscire da un vaso, per una luce eguale simile, e similmente posta con la sezione, e altrettanto immersa sotto la superficie dell'acqua del vaso, quanto è la distanza della sezione dall'orizzonte dell'origine dell'alveo. La medesima dottrina viene comunemente seguita dagli scrittori che dopo di esso hanno trattato di tal materia, come il Signor Varignon, il Signor Ermanno, il Padre Abate Grandi, il Signor di Gravesande, ed altri.”

Ci tiene poi Manfredi ad elencare i dubbi che si sono mossi o si potrebbero muovere

³²Si ricordi che il moto in caduta libera rappresentato in figura 3.4 ha le stesse caratteristiche del moto su un piano inclinato.

³³[Manfredi, 1821], nello specifico fare riferimento alle pp.183-188 e pp.199-201

riguardo questa teoria. Sembra che alcune esperienze³⁴ portino a dubitare di questa analogia: nel caso di un fiume infatti l'acqua deve incamminarsi tra due sponde e un fondo, cosa che ovviamente non succede nel getto libero che avviene in un contenitore forato.

³⁴Manfredi cita in particolare il Signor Marchesi Poleni (1683-1761). Altro grande esponente degli studi sull'idraulica fluviale, anche lui prestò molta attenzione agli aspetti sperimentali e pratici rispetto a quelli teorici (per approfondimenti sulla sua figura fare riferimento a [Rouse and Ince, 1963])

3.2.5 Sul fondo e sulle caratteristiche dei fiumi

Il quinto e il sesto capitolo sono dedicati all'esame di alcune proprietà dei fiumi, tra cui la profondità, l'inclinazione, la larghezza degli alvei e la loro disposizione sulla superficie terrestre.³⁵

Questi capitoli presentano una serie di proposizioni accompagnate da conseguenti corollari, intervallati da parti più discorsive. Le proposizioni contengono informazioni molto pratiche che, sebbene possano sembrare ovvie, furono di fondamentale importanza per organizzare un sistema che altrimenti risultava poco definito e contraddittorio³⁶. Le dimostrazioni non richiedono l'uso di un'algebra avanzata, e si basano spesso su un aspetto intuitivo.

Successivamente, esamineremo gli enunciati più rilevanti, i quali contribuiscono a delineare un quadro coerente delle diverse proprietà dei fiumi.

Di solito si ritiene indispensabile che, affinché un fiume scorra, il suo percorso presenti una certa pendenza. Tuttavia vari autori, tra cui Vitruvio, Cardano, Leon Battista Alberti e Scamozzi, individuano valori differenti per l'inclinazione necessaria al movimento dei fiumi.

Guglielmini, al contrario, trova molto intuitivo il concetto che un fiume possa fluire senza possedere alcuna pendenza. Infatti alcuni autori come Baratteri, sostengono che una certa inclinazione sia necessaria affinché il fiume possa fluire in modo *"comodamente efficiente"*, accettando in qualche modo un movimento privo di pendenza.

Per confutare le concezioni degli scienziati antichi sulla necessità di una pendenza per il movimento del fiume, si fa sempre riferimento all'esperienza pratica.

La prima proposizione giustifica la tesi dell'autore, e necessita come premesse solamente

³⁵Il capitolo quinto è intitolato *"Della situazione del fondo de' Fiumi, cioè delle 'Profondità, Larghezze, e Declinità de' medesimi"* [Guglielmini, 1697] pp.84-124. Il sesto capitolo *"Della 'Rettitudine, e Tortuosità degli Alvei de' Fiumi"* [Guglielmini, 1697] pp.125-182

³⁶In tutta l'opera, si verifica frequentemente che Guglielmini, prima di affrontare un particolare argomento, fornisca spiegazioni sulle concezioni precedenti in materia, sottolineandone la loro confusione ed errori.

la legge di Archimede:

Proposizione I (capitolo V): *Affinché un fiume scorra fino al suo termine, non è necessario che il suo fondo abbia una inclinazione*

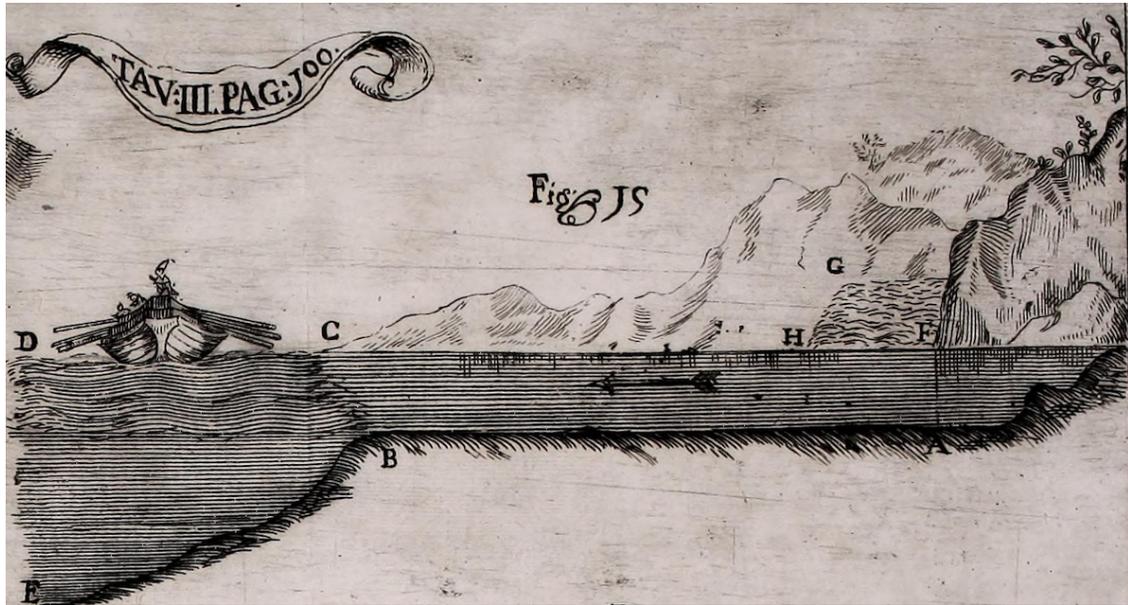


Figura 3.7: Dettaglio figura 15

Si fa riferimento alla figura 3.7, in cui è rappresentato un fiume (sulla parte destra) che si collega al mare (sulla parte sinistra). Guglielmini ipotizza la presenza di una quantità di acqua aggiunta sopra al livello del fiume (linea tratteggiata HG), il che induce un movimento del fiume nella direzione della freccia disegnata. Pertanto, il fiume si sposta verso sinistra senza la necessità di una pendenza, poiché ciò è dovuto esclusivamente all'innalzamento del livello dell'acqua nel fiume.

Successivamente, si riflette sui fondali e sulle larghezze degli alvei. In entrambi i casi, si osserva il risultato come un equilibrio tra la forza dell'acqua, che scava con violenza, e la resistenza del materiale presente, che si oppone a questo processo sia sul fondo che sulle sponde.

“Tanto i fondi quanto le larghezze degli Alvei, vengono ad essere determinati dalla Natura”, dove con Natura si intende la combinazione delle cause operanti e resistenti.

Fino a quando l'acqua non incontra un ostacolo resistente che pareggi la sua forza, essa

proseguirà nell'allargarsi e nello scavare in profondità. In un determinato momento, si raggiungerà un equilibrio in cui la forza di spinta del fiume si eguaglia con la resistenza del materiale presente nell'alveo.

Si osserva che la resistenza del fondo pareggia più rapidamente la forza avversa dell'acqua rispetto alle sponde. Ciò implica che molti alvei presentano una larghezza notevolmente superiore rispetto alla loro profondità. A titolo di esempio, si cita il caso del Po e del Reno, in cui entrambi presentano un rapporto di 1:20 tra la profondità dell'alveo e la sua larghezza.

Però ci sono numerose variabili accidentali che ostacolano una predizione accurata di questo rapporto, sia tra fiumi differenti che all'interno di diverse sezioni dello stesso corso d'acqua.

Tre fattori concorrono a determinare la forma degli alvei dei fiumi:

- Il materiale di cui sono composte le rive e i fondali: le terre arenose³⁷ cedono più facilmente alla forza dell'acqua rispetto a quelle cretose³⁸.
- La situazione del fondo e delle rive del fiume, cioè tanto più un fondale sarà inclinato e tanto più sarà scavato dall'acqua.
- L'ultima e più importante causa è la forza dell'acqua. Questa forza dipende dalla velocità, e questa a sua volta dipende o dall'altezza dell'acqua o dalla pendenza dell'alveo.

Si analizza la figura 3.8, che rappresenta le varie inclinazioni di un fondale. Immaginandosi un fondale che inizialmente ha inclinazione DB, la forza dell'acqua lo porterà a inclinarsi fino ad esempio a FB.

Questo quindi giustifica la seguente proposizione:

³⁷Con arena si intende un materiale sabbioso.

³⁸La creta è un tipo di materiale sedimentario composto principalmente da particelle molto fini, la sua composizione può variare anche se principalmente è composta da materiali argillosi.

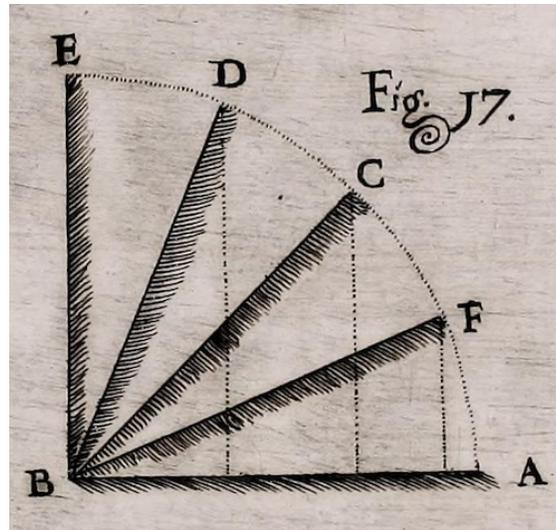


Figura 3.8: Dettaglio figura 17

Proposizione II (capitolo V): *Nei fiumi maggiore è la forza dell'acqua, minore sarà l'inclinazione dell'Alveo.*

Questa proposizione porta ad una serie di corollari tra cui l'importanza di prestare attenzione quando due fiumi si uniscono: aumentando la forza dell'acqua il nuovo fondale si appianerà.

L'inclinazione del fondo di un fiume non è sempre costante, infatti come si precisa nella seguente proposizione:

Proposizione VI (capitolo V): *Un fiume che scorre sopra ad un fondo richiede un certo tempo affinché lo scavi con la propria forza. Se nel frattempo arriva all'Alveo altra materia della stessa natura del fondo, allora l'inclinazione del fondo del fiume oscillerà tra due estremi: un'inclinazione minima (quando l'acqua ha scavato e ancora non è stato portato nuovo materiale) e una massima (quando è appena arrivato il nuovo materiale e quindi l'inclinazione è tornata quella iniziale).*

Alla luce di tutte le considerazioni presentate da Guglielmini, è essenziale prestare molta attenzione quando si tenta di modificare la pendenza del fondo di un fiume. Si deve sempre tenere conto delle numerose variabili legate alla *necessità del fiume*, al fine di evitare errori che potrebbero portare a inondazioni delle province.

Nel sesto capitolo, l'autore affronta la disposizione dei fiumi nel loro percorso.

“Se io considero la natura nella sua semplicità, mi è difficile credere che [i fiumi] seguano una strada diversa rispetto ad una linea retta. Dato che c'è un'assioma comune tra i fisici per cui la natura opera sempre con i mezzi e le strade più compendiose”

La tortuosità dei fiumi si può spiegare considerando il diverso numero di variabili che influiscono sulla formazione dell'alveo, portandoli a preferire diramazioni più lunghe piuttosto che quelle intuitivamente più corte. Questo argomento è strettamente collegato a quello delle inondazioni.

È infatti sempre stato di vitale importanza per l'uomo prevenire che le piene dei fiumi, spesso causate dalle erosioni delle rive, generino catastrofi per le abitazioni e il commercio. Tuttavia, le iniziative intraprese per migliorare questa situazione spesso non hanno portato a risultati soddisfacenti, e finora non si è completamente compreso il funzionamento di questi fenomeni.

Guglielmini è consapevole della complessità e delle molte precauzioni richieste nel perseguire la pratica del controllo dei fiumi. L'esperienza del singolo fiume e delle sue proprietà individuali insegna molto, ma non deve questa esperienza proseguire senza essere accompagnata dal *lume delle cognizioni teoriche*. L'obiettivo dell'autore è quindi quello di *porgere qualche lume alla pratica cieca degli architetti delle acque*.

Per illustrare i fenomeni che determinano la diversa disposizione dei fiumi lungo il loro percorso, Guglielmini inizia sempre discutendo del caso del moto dei gravi, per poi estendere per similitudine il ragionamento al contesto dei fluidi.

Nella proposizione successiva, ci si focalizza su un caso molto comune che potrebbe condurre a potenziali inondazioni:

Proposizione VII (capitolo VI): *Se un fiume, retto o tortuoso, che scorre con una velocità distinta, incontrerà una resistente, l'acqua perderà qualche grado di velocità; si eleverà l'acqua che spingerà il corso del fiume dalla parte opposta del resistente.*

Facendo riferimento alla figura 3.9 si ha un fiume che scorre nella direzione indicata

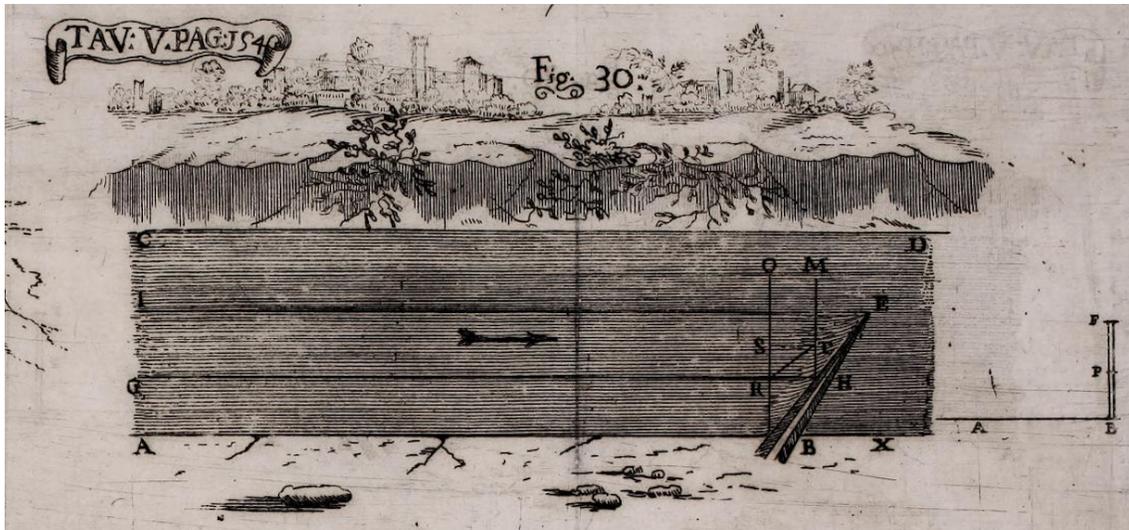


Figura 3.9: Dettaglio figura 30

dalla freccia, si presupponga che questo incontri il resistente BE: l'acqua del fiume si eleverà e il corso dello stesso si spingerà verso la sponda CD.

Il punto D della riva sarà quindi soggetto a erosione e a un probabile allargamento di alveo.

La resistente BE può essere di origine artificiale, creata per modificare il percorso di un fiume. Nel corollario successivo, vengono elencati gli aspetti da tenere in considerazione durante tali lavori:

Corollario V proposizione VII (capitolo VI): (...) *quanto più veloce sarà il fiume, e quanto più il resistente [BE] ribatterà il corso d'acqua, cioè quanto meno impeto assorbirà in sé stesso, tanto maggiore sarà la corrosione della riva opposta [CD]. E perciò nei lavori che si eseguono per cambiare il corso dei fiumi, si devono considerare: la robustezza del resistente, la loro direzione rispetto al moto del fiume³⁹, la velocità del fiume, e la lunghezza della resistenza, in modo da cercare di prevedere il risultato di tale operazione.*

Sono esaminati vari scenari che riguardano l'eventuale impiego e l'ottimizzazione delle

³⁹Più l'angolo tra la sponda AB e la resistente BE si avvicina a 90° , maggiore sarà l'erosione che l'acqua provocherà alla sponda CD

resistenze applicate al flusso di un fiume.

La proposizione successiva spiega:

Proposizione VIII (capitolo VI): (...) *se il resistente sarà composto da parti amovibili, e se sarà sufficientemente alto⁴⁰, allora sarà corrosivo inegualmente e si formerà una concavità.*

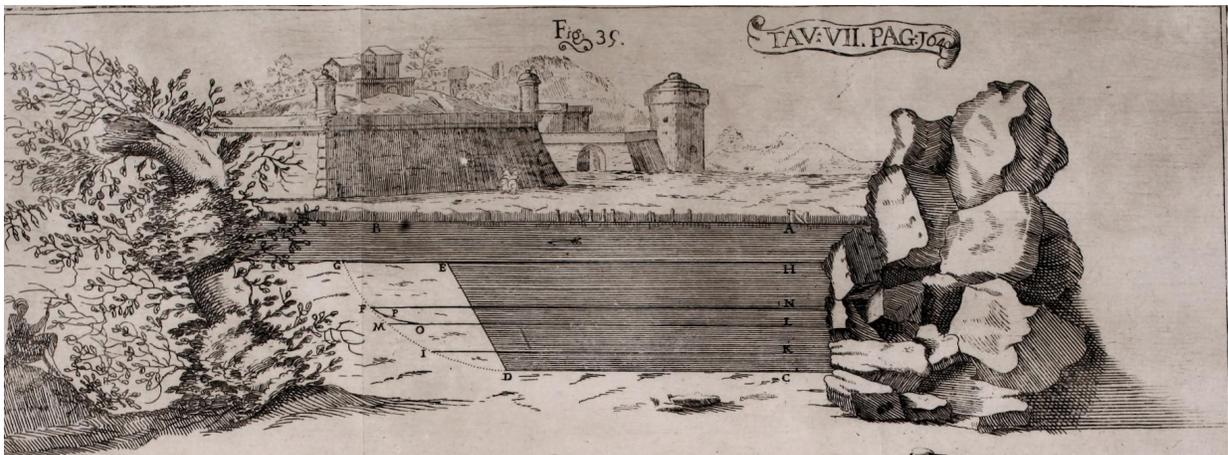


Figura 3.10: Dettaglio figura 35

La figura 3.10 rappresenta proprio questa situazione: si ha un fiume che scorre da destra verso sinistra e si imbatte nella sponda DE. Quest'ultima non può rimanere invariata e sarà soggetta all'erosione fino a prendere la nuova forma DFG.

È importante quindi notare che le corrosioni del fiume, una volta che hanno formato questa concavità DFG, non cresceranno più e rimarranno stabili.

⁴⁰Stiamo considerando una sponda di terreno sufficientemente alta in modo che non possa essere sormontata dall'acqua

3.2.6 Sui moti delle acque dei fiumi

Nel settimo capitolo⁴¹ si esamina il movimento delle acque, analizzandone le velocità e cercando di tenere conto di tutte le variabili pertinenti⁴².

Viene adottato un approccio basato sulla geometria, con l'utilizzo dello stesso strumento matematico già menzionato in sezione 3.2.4 e approfondito in appendice A: la parabola delle velocità. Molto rilevante è l'affinamento del modello teorico considerando le diverse esperienze pratiche. Questo processo di revisione e correzione è cruciale per allineare il modello teorico con le osservazioni empiriche.

Si inizia analizzando la velocità dell'acqua in una sezione perpendicolare del fiume. Guglielmini trova che la disposizione teorica di queste velocità dovrebbe seguire un profilo parabolico, come mostrato nella figura 3.11: AB è l'altezza dell'acqua in un determinato canale, la parabola ABC rappresenta le velocità che possiede l'acqua alle varie altezze⁴³.

In questo caso, si osserva nuovamente una sorta di parabola delle velocità. Il profilo parabolico si manifesta qui poiché le porzioni d'acqua più basse subiscono la spinta della pressione esercitata dalle porzioni d'acqua in superficie, che conferiscono loro una maggiore velocità.

Secondo Guglielmini la velocità dell'acqua in superficie deriva esclusivamente dalla pendenza della discesa dell'alveo, mentre nelle porzioni d'acqua inferiori la velocità è causata dalla pressione esercitata dalle porzioni d'acqua superiori. Nel caso ideale quindi si ha una situazione come in figura 3.11, dove nella superficie (punto A) la velocità dell'acqua

⁴¹Il settimo capitolo è intitolato *"De' moti che s'osservano nell'acque de' fiumi in diverse circostanze"*, [Guglielmini, 1697] pp.183-208

⁴²Manfredi in [Manfredi, 1821] (introduzione, p.XXVI), dichiara questo come il capitolo più debole dell'intero libro, affermando che Guglielmini presenta solo un'idea generale del moto delle acque. Effettivamente qui l'autore non cercherà di fornire delle regole e tenterà piuttosto di elencare una serie di possibili scenari. Oggi conosciamo bene la complessità dello studio di questi fenomeni e, sebbene siano presenti modelli matematici molto avanzati sulla dinamica dei fluidi, per ottenere valori affidabili e precisi della velocità di un fiume nelle varie sezioni si utilizzano spesso misure dirette effettuate con dei sensori.

⁴³Per avere un'idea qualitativa della velocità dell'acqua ad una determinata altezza, bisogna fare lo stesso ragionamento utilizzato per la parabola delle velocità. Quindi la velocità dell'acqua nel punto D sarà proporzionale al segmento ED, mentre nel punto B sarà proporzionale a CB.

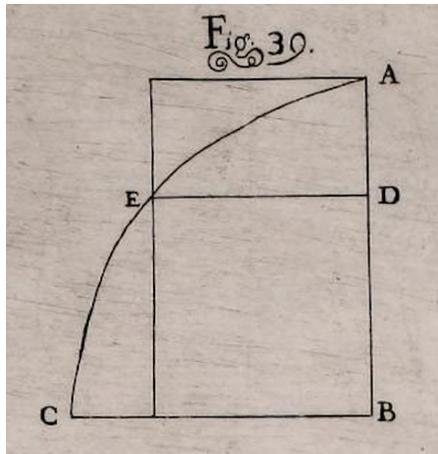


Figura 3.11: Dettaglio figura 39

è nulla (segmento degenere AA), mentre nel fondo (punto B) la velocità è massima (segmento CB).

Guglielmini è consapevole che nei casi reali la situazione si discosta significativamente da questa descrizione, a causa delle numerose variabili che devono essere prese in considerazione.

Si analizza la figura 3.12. Inizialmente, si consideri l'acqua avente un'altezza AB ⁴⁴, con una velocità rappresentata dalla parabola ABC . Si supponga ora che l'acqua incontri delle resistenze nel fondo, in modo che, nel punto B (che rappresenta il fondo), la velocità cambi da BC a una velocità ridotta BD . A causa delle resistenze, si avrà una transizione da un profilo di velocità ABC a un nuovo profilo AED .

In questo contesto l'acqua si solleverà di livello, passando dal punto di superficie A al punto di superficie N . Questo innalzamento comporta un aumento delle velocità nelle varie sezioni, culminando in un profilo finale di velocità rappresentato dalla curva NOP . Guglielmini sostiene che se la quantità d'acqua che fluisce dalla fonte al fiume rimane invariata, allora la somma delle velocità nelle diverse altezze di una sezione del fiume deve mantenersi costante⁴⁵. Quindi, se si parte da una configurazione di velocità ABC

⁴⁴Quindi il fondale è rappresentato dal segmento CB , mentre la superficie dal punto A .

⁴⁵Guglielmini precisa che la proposizione per cui la quantità d'acqua è proporzionale alla somma delle velocità di tutta la sezione è già nota.

Il problema dei vortici è che le navi che vi passano sopra sono risucchiate al loro centro, spinte dall'aria sopra di esse. Questi vortici si trovano sia nei fiumi sia nei mari, e sono stati ampiamente studiati da Geminiano Montanari (1633-1687) ne *Le forze d'Eolo* (1694).

Ci sono anche i vortici noti come "*Ciechi*", che sono circolazioni d'acqua senza alcun assorbimento. Questi vortici si originano a causa dell'ineguaglianza nelle diverse direzioni dell'acqua, e tale disuguaglianza può essere provocata da tre fattori: disparità nel fondale, l'incontro delle rive con altri ostacoli, o l'irregolarità nei livelli delle varie parti dell'acqua.

Questi vortici possono formarsi sia negli stessi luoghi che cambiare di posizione ad ogni manifestazione. Quelli che cambiano posizione sono i più comuni e tendono a cessare dopo un breve periodo, mentre quelli che si stabiliscono in un punto fisso sono i più pericolosi, in quanto possono causare un'escavazione anomala del fondo e delle rive.

- Gorghi⁴⁷: fenomeni che più comunemente si presentano vicino ai pilastri dei ponti. Questi eventi vengono spiegati in maniera molto qualitativa, senza ricorrere a una modellizzazione specifica. L'autore fornisce una descrizione quasi enciclopedica delle diverse situazioni che possono verificarsi, tutte dovute alle molteplici variabili che caratterizzano i fiumi e i loro alvei.

Vengono esaminati anche i movimenti dei laghi, i quali solitamente ricevono acqua da un fiume in ingresso e la rilasciano attraverso uno di deflusso. Secondo Guglielmini, sebbene il lago possa apparire immobile, in realtà si verifica un lento movimento dall'imbocco del fiume di ingresso a quello di uscita. Affinché ciò sia possibile, è necessario che il fiume di ingresso sia a un livello più elevato rispetto al lago, mentre il fiume di uscita si trovi a una quota più bassa. Di conseguenza, la superficie del lago sarà tanto più orizzontale

⁴⁷I gorghi sono dei tipi specifici di vortici acquatici che si formano in zone circoscritte dei fiumi.

quanto più ridotto è il dislivello tra ingresso e uscita.

Interessante l'analogia dove un alveo allargato viene equiparato a una sorta di lago: *“Il lago altro non è che un fiume dilatato, e il fiume non è altro che un lago ristretto”*.

3.2.7 Sull'unione dei fiumi e sulle conseguenze che questa comporta

Guglielmini sostiene che il tema degli sbocchi dei fiumi sia uno degli argomenti più controversi, poiché molti studiosi commettono errori considerando universali delle regole che, in realtà, non lo sono⁴⁸.

Le considerazioni presenti sono molto concrete, orientate a stabilire regole per la corretta implementazione di pratiche complesse. I risultati descritti dalle proposizioni sono sempre accompagnati da ragionamenti teorici, non si tralascia una prospettiva globale pur pervenendo a considerazioni molto tangibili.

La prima regola erroneamente ritenuta universale è quella secondo cui l'acqua non può fluire senza una certa pendenza dell'alveo. Da questo assioma i periti deducono che un fiume non può sfociare in un mare *gonfio* o in un altro fiume in piena. Questa considerazione però risulta assurda, poiché implicherebbe che un fiume perenne, quando raggiunge l'imbocco in un mare ricolmo, dovrebbe inondare le campagne molto frequentemente. Questo accade occasionalmente, ma non perché il fiume non riesce a superare la resistenza del mare e a confluire in esso, bensì perché le sponde non sono all'altezza necessaria o non vengono mantenute a tale livello.

Prima di presentare una serie di proposizioni seguite da corollari, Guglielmini richiama due "*proposizioni di eterna verità*":

- Se la superficie di un fiume non si alza né si abbassa di livello, allora per ogni sezione del fiume passano le stesse quantità di acqua;
- Di conseguenza, osservando la superficie di un fiume perenne, si deduce che la quantità di acqua che entra dalle sorgenti è la stessa che esce dallo sbocco finale del fiume.

⁴⁸Si tratteranno qui il capitolo ottavo, intitolato "*Dello sbocco d'un fiume in un altro, o nel mare*", [Guglielmini, 1697] pp.209-232; e il capitolo nono, intitolato "*Dell'unione di più fiumi insieme, e loro effetti*" [Guglielmini, 1697] pp.233-251

Queste osservazioni apparentemente ovvie conducono a riflessioni interessanti che spieghino l'origine di alcuni fenomeni di piena. L'innalzamento o l'abbassamento dei livelli dell'acqua di un fiume è infatti strettamente legato alle resistenze che il fiume incontra nella sua foce. Se queste resistenze aumentano, si verifica un aumento dell'altezza dell'acqua, ma tale altezza raggiunge poi uno stato stabile quando si ripristina l'equilibrio tra l'acqua che entra e quella che esce dal fiume.

Un'altra proposizione significativa da considerare è che nei fiumi stabili, ossia quelli in cui ogni sezione scarica la stessa quantità d'acqua nello stesso intervallo di tempo, le velocità medie devono essere sempre inverse alle aree delle sezioni.⁴⁹

Considerando la situazione in cui le resistenze aumentano, causando una diminuzione della velocità dell'acqua nella sezione della foce, ciò comporterà un aumento dell'area della sezione. Poiché generalmente la larghezza dell'alveo non può aumentare, l'area della sezione aumenterà in altezza, provocando così fenomeni di piena. Quindi, il concetto dell'equazione di continuità offre una spiegazione qualitativa al fenomeno delle piene.

Seguono una serie di proposizioni che parlano dei diversi modi in cui un fiume confluisce in un altro fiume o nel mare, e dei casi in cui il livello dell'acqua si innalza, dando luogo alle piene. Guglielmini elenca vari scenari, cercando di considerare le molte variabili coinvolte, come il materiale di cui è composto l'alveo, l'inclinazione del fiume, e la forma dell'alveo.

Si analizza ora la quarta proposizione, che presenta molte ricadute pratiche:

Proposizione IV (capitolo VIII): *Le foci dei fiumi affluenti devono assecondare con la direzione dell'ultimo tronco del loro alveo il filone del fiume recipiente.*⁵⁰

Per la dimostrazione si fa riferimento alla figura 3.13, dove AB è la direzione del fiume principale, che scorre da A verso B. Si immagini che il fiume affluente sia perpendicolare a questo, nella direzione DC. Secondo i *principi della statica*, i moti si ostacolano reci-

⁴⁹Qui si sta parlando della moderna equazione di continuità, che era già qualitativamente conosciuta anche da Leonardo Da Vinci (confrontare la sezione 1.3)

⁵⁰Con fiume recipiente si intende il fiume principale, a cui va ad unirsi l'affluente

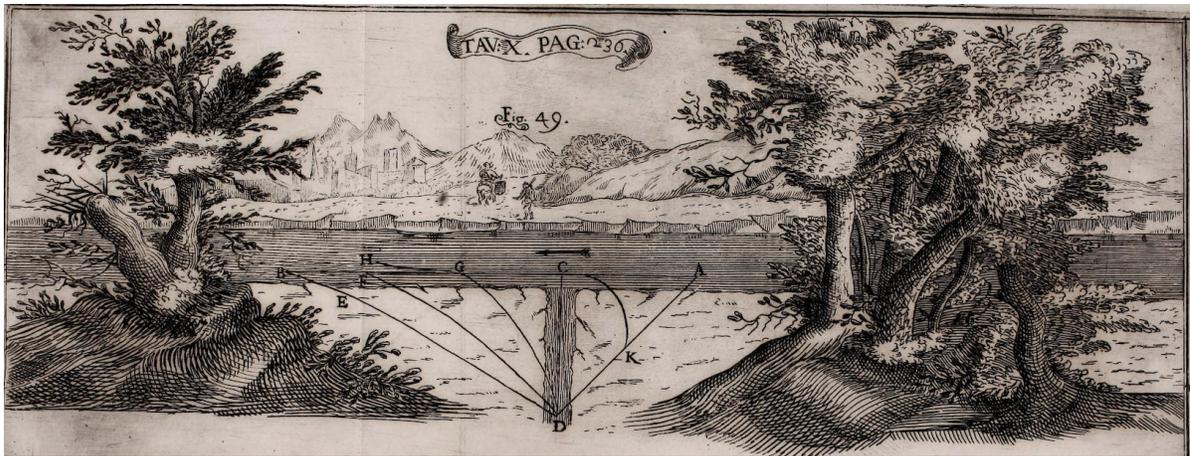


Figura 3.13: Dettaglio figura 49

procamente in misura minore quando l'angolo tra le loro direzioni è piccolo, quindi nel nostro caso ci sarà un grande intralcio tra i due movimenti.

Questo comporterà che l'affluente non potrà mantenere la sua direzione originale e passerà a corrodere la riva, inizialmente seguendo la direzione DG, fino a raggiungere la direzione DE.

Guglielmini sostiene che spesso si verificano ostinati tentativi di unire due fiumi senza tenere conto di queste considerazioni, il che porta ad allagamenti e vari disastri. Pertanto, è sempre cruciale considerare attentamente la direzione tra l'affluente e il fiume principale in cui esso si immette.

Si analizzano in maniera più approfondita le conseguenze che si ottengono quando due fiumi si uniscono tra loro.⁵¹

Osservando una cartina geografica che presenta tutti i fiumi, i rivoli e i torrenti, si potrebbe pensare che la natura abbia commesso degli errori grossolani. Molti, infatti, ritengono che il metodo migliore per far confluire un fiume verso il mare sia quello di farlo proseguire in linea retta, dato che unire più fiumi comporta la creazione di un tragitto più lungo rispetto a mantenerli separati.⁵²

⁵¹Argomento che viene esposto nel capitolo numero nove [Guglielmini, 1697]

⁵²Coloro che aderiscono a questa visione la fondano principalmente sulla proposizione del triangolo, per cui la somma di due lati è sempre maggiore del terzo lato.

La questione non è così banale, e in molte situazioni, due fiumi sono portati ad unirsi anche per ottenere dei vantaggi. Questi benefici vengono esposti in diverse proposizioni.

La prima proposizione:

Proposizione I (capitolo IX): *”Se saranno due fiumi eguali di larghezza, e profondità, ed affatto simili l’un all’altro, i quali scorrano, e sbocchino separatamente nel mare, sarà la somma delle loro larghezze maggiore di quella che avrebbero, se uniti insieme corressero dentro un sol alveo”*

A dimostrazione di questa proposizione si segue la figura 3.14. Si hanno due fiumi

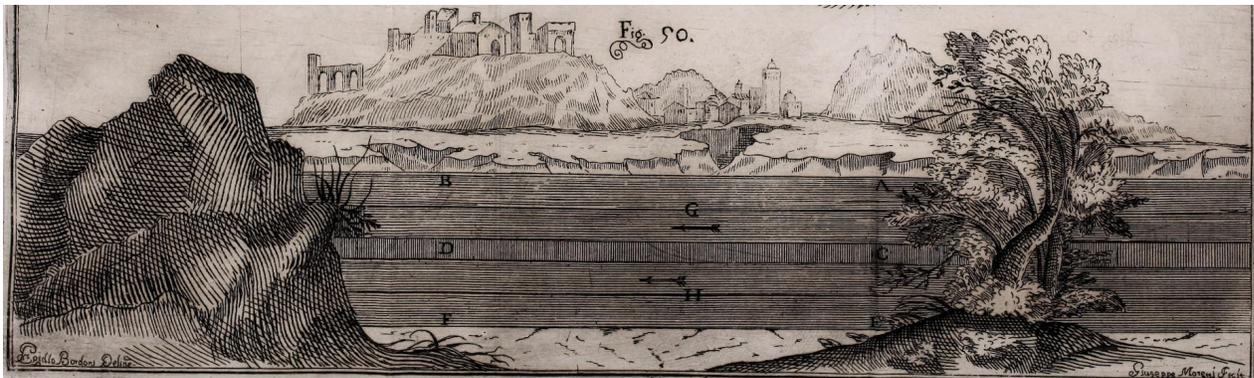


Figura 3.14: Dettaglio figura 50

che scorrono in orizzontale uno sopra l'altro. Il fiume ABCD è separato dal fiume CDEF dalla sponda CD, che può essere un argine. Supponiamo che i due fiumi siano simili tra loro per quanto riguarda: profondità, portata d'acqua, pendenza.

Ciò che Guglielmini sostiene è che i due fiumi che scorrono separatamente in questo modo avranno una larghezza totale maggiore (quindi AC sommato a CE) rispetto al caso in cui si tolga l'argine e i due fiumi confluiscano in un solo alveo.

Nel caso dei due corsi separati sia il fiume superiore che quello inferiore risentono della resistenza della sponda CD. Quindi, l'acqua dei due fiumi separati scorre sperimentando la resistenza di quattro sponde. Se invece andiamo ad unire i corsi, il risultato risentirà della resistenza solamente delle sponde AB, EF.

Inoltre questo fiume avrà la velocità maggiore nella fascia CD, superiore a quella pre-

cedentemente posseduta dai due fiumi singolarmente, poichè la distanza dalle sponde (e quindi dalle resistenze) sarà maggiore.

Questo comporta anche una diminuzione delle velocità nelle parti d'acqua adiacenti alle sponde AB ed EF, con conseguente maggior accumulo di deposizioni, portando a un restringimento dell'alveo AE.

La validità di questa proposizione può essere verificata osservando l'esperienza, come già avevano notato Castelli e Fontana.

Questa prima proposizione comporta che due fiumi uniti creeranno un alveo che è più profondo rispetto ai due alvei separati. Inoltre la pendenza del fiume unito sarà sempre minore rispetto a quella dei due fiumi disgiunti.

È importante quindi considerare questi aspetti, dato che spesso la decisione di separare un fiume secondario da uno principale ha comportato un innalzamento delle acque con conseguenti piene.

Le acque dei fiumi uniti quindi, avendo maggiore profondità e minore pendenza, risultano essere più efficienti per la navigazione e la creazione di porti.

Ma sebbene questi vantaggi evidenti, l'autore ci tiene a precisare che non sempre la soluzione corretta è quella di unire più fiumi in un unico corso, come sempre le variabili da considerare sono molte:

"Insomma è necessario un ben pensato giudizio di tutte le circostanze, ed una ben distinta cognizione di ciò che succede all'unione de' fiumi, prima di terminare, quali siano i benefici che possono ricavarsi, dal mandare un fiume a sboccare nel mare, o pure in un altro maggiore"

Vengono menzionati degli svantaggi connessi all'unione di più fiumi, soprattutto in relazione alla difficoltà di gestire la maggior quantità e velocità d'acqua in un unico corso, con il rischio di piene più disastrose e argini più difficili da costruire e mantenere.

Guglielmini in chiusura riprende delle considerazioni che ben riflettono la sua visione di conoscenza scientifica, incentrata sulla descrizione e comprensione di ciò che la natura ci

presenta, senza eccessivi preconcetti:

"Noi abbiamo detto nel principio di questo capitolo, che molte volte l'unione de' fiumi è fatta per una necessità di natura. Ciò è manifesto in tutte le congiunture; perché non essendo altro la natura che la combinazione delle cause operanti, senza la direzione artificiosa della mente umana; tutte le volte che più fiumi si sono uniti insieme senza opera degli uomini, ciò è succeduto per virtù di cause necessariamente operanti, le quali sempre agiscono verso quella parte dove trovano maggiore facilità"

3.2.8 Aumento e diminuzione del livello d'acqua in un fiume

Uno degli aspetti più cruciali legati alla gestione e alla comprensione dei fiumi riguarda le piene, strettamente correlate al livello d'acqua dei fiumi. Per affrontare questa tematica, Guglielmini, nel capitolo decimo⁵³, presenta una serie di riflessioni di grande praticità, con l'obiettivo di migliorare la gestione delle inondazioni e, più in generale, la sicurezza degli argini.

Va tenuto presente che non esistono fiumi i cui livelli d'acqua rimangano costanti. È inoltre importante considerare la differenza tra il volume totale d'acqua di un fiume e il livello d'acqua in una specifica sezione di esso.

Il volume totale d'acqua aumenta a causa della maggiore forza delle sorgenti durante le piogge, lo scioglimento delle nevi e l'apporto d'acqua da fiumi affluenti. Per quanto riguarda la quantità d'acqua in una specifica sezione, è necessario considerare altri fenomeni come il ristagno del mare e dei fiumi principali, la riduzione delle dimensioni dell'alveo e tutti gli ostacoli presenti sul fondo.

Se un fiume è sufficientemente lungo, è possibile che alcune parti di esso subiscano un notevole aumento del livello, mentre altre rimangano relativamente stabili. In generale, le cause che portano all'incremento della quantità d'acqua nella parte superiore dell'alveo possono essere temporalmente separate da quelle che causano un aumento dell'acqua nella parte inferiore. Secondo Guglielmini, esiste un limite massimo che impedisce che tutte queste cause si verificano simultaneamente. Di conseguenza, è possibile definire un termine massimo per l'altezza delle acque del fiume. Con questa conoscenza, è necessario costruire rive o argini per prevenire inondazioni.

Ci sono diverse considerazioni: le piene dei fiumi minori hanno una durata più breve rispetto a quelle dei fiumi maggiori; le piene causate dal disgelo delle nevi hanno una durata più prolungata (poiché il processo è graduale, a volte si osservano piene anche

⁵³Il capitolo decimo è intitolato *"Dell'escrescenze, e decrescenze de' fiumi e della proporzione con la quale s'aumentano l'acque de' medesimi."* [Guglielmini, 1697] pp.252-273

quando il sole splende); un fiume che si immette in un altro alzerà il suo livello d'acqua in base alle condizioni dell'alveo del fiume ricevente. Secondo l'autore, è una regola universale che i fiumi affluenti aumentino maggiormente il livello dell'acqua nel fiume ricevente se quest'ultimo è in una situazione di acqua bassa rispetto a una situazione di piena.

È essenziale, pertanto, considerare non solo la piena del fiume affluente, ma anche le condizioni del fiume ricevente quando si stimano gli innalzamenti del livello dell'acqua.

Seguono una serie di considerazioni sulla natura delle piene: le piene maggiori sono sempre più veloci di quelle minori, considerando lo stesso fiume nelle stesse condizioni; i fiumi che crescono rapidamente durante le piene si svuotano altrettanto velocemente, e viceversa; le grandi piene sono più frequenti in un fiume minore rispetto a uno maggiore (poiché per avere una piena in un fiume maggiore è richiesto un considerevole afflusso d'acqua da tutti gli affluenti minori, ed è meno probabile che ciò accada).

In genere, i fiumi manifestano periodi specifici di piena, determinati dalle cause delle escrescenze. Ad esempio, quelli che ricevono una maggiore quantità d'acqua a seguito del disgelo delle nevi sperimentano piene nei mesi di marzo e aprile, mentre quelli influenzati dalle piogge mostrano aumenti nei livelli d'acqua in autunno. Tuttavia, alcuni fiumi manifestano escrescenze più irregolari, che possono derivare da cause molteplici e complesse.

In generale l'aumento del livello dell'acqua è facilmente attribuibile all'aumento delle precipitazioni, allo scioglimento delle nevi o, in generale, all'aumento dell'apporto d'acqua alle sorgenti del fiume.

Tutte queste considerazioni sono cruciali per la salvaguardia degli argini, messi a dura prova durante le piene.

Guglielmini conclude affermando che per quanto riguarda la proporzione con cui si innalzano le acque nei fiumi durante le piene, Castelli ha già dimostrato molte cose in merito. Viene quindi tracciato un parallelo tra queste scoperte teoriche e la realtà pratica. *"Tutte*

queste proposizioni sono vere in teorica”, ma nella pratica è difficile verificare la validità di quanto affermato da Castelli, infatti: *”essendo per altro difficile , anzi impossibile il rinvenire detta proporzione col mezzo dell’esperienza”*.

3.2.9 Riguardo i canali, gli scoli e le bonifiche

Negli ultimi capitoli del trattato, Guglielmini dedica particolare attenzione all'analisi di diversi tipi di canali, esplorando le modalità costruttive e strategie per massimizzarne i benefici riducendo al minimo i rischi connessi.

La gestione delle acque a Bologna durante il XVI e XVII secolo si rivelò cruciale per ottenere vantaggi commerciali e industriali⁵⁴, motivo per cui gli argomenti successivi sono trattati dall'autore in modo approfondito.

In queste sezioni, le proposizioni lasciano spazio a delle parti più scorrevoli, in cui Guglielmini si sforza di offrire una panoramica completa dei vari problemi affrontati.

Rispetto ai primi capitoli, generalmente più teorici, qui ci avviciniamo maggiormente all'applicazione pratica di tutto l'apparato concettuale che è stato presentato in precedenza. Le tavole, in questo contesto, mostrano principalmente situazioni reali o verosimili, offrendo al lettore esempi pratici su come effettuare specifiche costruzioni.

Oltre ai fiumi maggiori e ai torrenti, esistono anche fiumicelli di costruzione artificiale che sorgono e attraversano le pianure. Questi canali sono creati dall'uomo con l'obiettivo di rendere le campagne più adatte alle coltivazioni, in particolare per renderle più asciutte. Tali canali possono confluire tra loro e concludersi in un alveo comune, spesso di origine artificiale, noto genericamente come "scolo".⁵⁵

La realizzazione degli scoli è spesso indispensabile poiché la pendenza naturale delle pianure è generalmente così lieve che, senza di essi, le acque piovane faticano a defluire dall'alto verso il basso. Grazie agli scoli, è possibile mantenere le campagne in condizioni ottimali per le coltivazioni.

Anche se le acque seguono la massima per cui tendono sempre a scorrere verso il basso, questo può richiedere molto tempo, in cui la terra si imbeve di acqua e diventa sterile,

⁵⁴Confrontare in merito la sezione 2

⁵⁵Questi argomenti vengono trattati nel capitolo numero undici, intitolato "*Degli scoli delle campagne, e loro regole*" [Guglielmini, 1697] pp.274-294

cosa che si vuole prevenire con gli scoli.

Questi condotti possono concludersi nel mare, nei fiumi o negli stagni. Nel caso in cui si riversino nei fiumi, è fondamentale prevenire i rigurgiti, ovvero il fenomeno in cui l'acqua di un fiume principale risale in uno dei suoi affluenti. Pertanto, è essenziale regolare l'apertura dell'uscita del canale di drenaggio mediante l'utilizzo di dispositivi che impediscono alle piene dei fiumi principali di riversarsi nel condotto di scolo.

Guglielmini affronta il caso delle Chiaviche⁵⁶: nella figura 3.15, la Chiavica è rappresentata esternamente nel punto A, la piantina è evidenziata nel punto B, mentre nel punto C è presentata una sua sezione. Il suo funzionamento è molto semplice: sono presenti degli archi che possono rimanere aperti o essere chiusi da *tavoloni* (cioè paratoie), i quali vengono alzati o abbassati tramite l'utilizzo di corde. Si vanno così a regolare i flussi d'acqua evitando i rigurgiti.

Le considerazioni relative alle foci degli scoli variano notevolmente a seconda del luogo in cui questi canali artificiali trovano termine.

Ad esempio gli scoli che si riversano in paludi o stagni non richiedono l'uso delle Chiaviche. Pertanto, possono presentare uno sbocco aperto, poiché le differenze di altezza dell'acqua nei casi di piena o asciutta in questi contesti non sono considerevoli, evitando così evidenti problemi legati al rigurgito.

Oltre all'importanza delle foci degli scoli, è cruciale garantire che l'acqua delle campagne fluisca in modo consistente all'interno di tali canali e che gli alvei siano progettati in modo tale da evitare la dispersione laterale dell'acqua.

Dato che l'acqua degli scoli è spesso limitata, non ci si può aspettare che essa crei un'escavazione del fondo come avviene nei fiumi principali. Pertanto, è necessario un intervento manuale da parte dell'uomo per garantire un corretto flusso degli scoli.

L'importanza dell'escavazione riguarda la necessità che essa sia sufficientemente profonda

⁵⁶Una trattazione approfondita su come evitare i rigurgiti degli scoli antecedente a Guglielmini è quella di Barattieri in *Architettura delle acque* del 1656[Barattieri, 1656], testo che Guglielmini cita come riferimento.

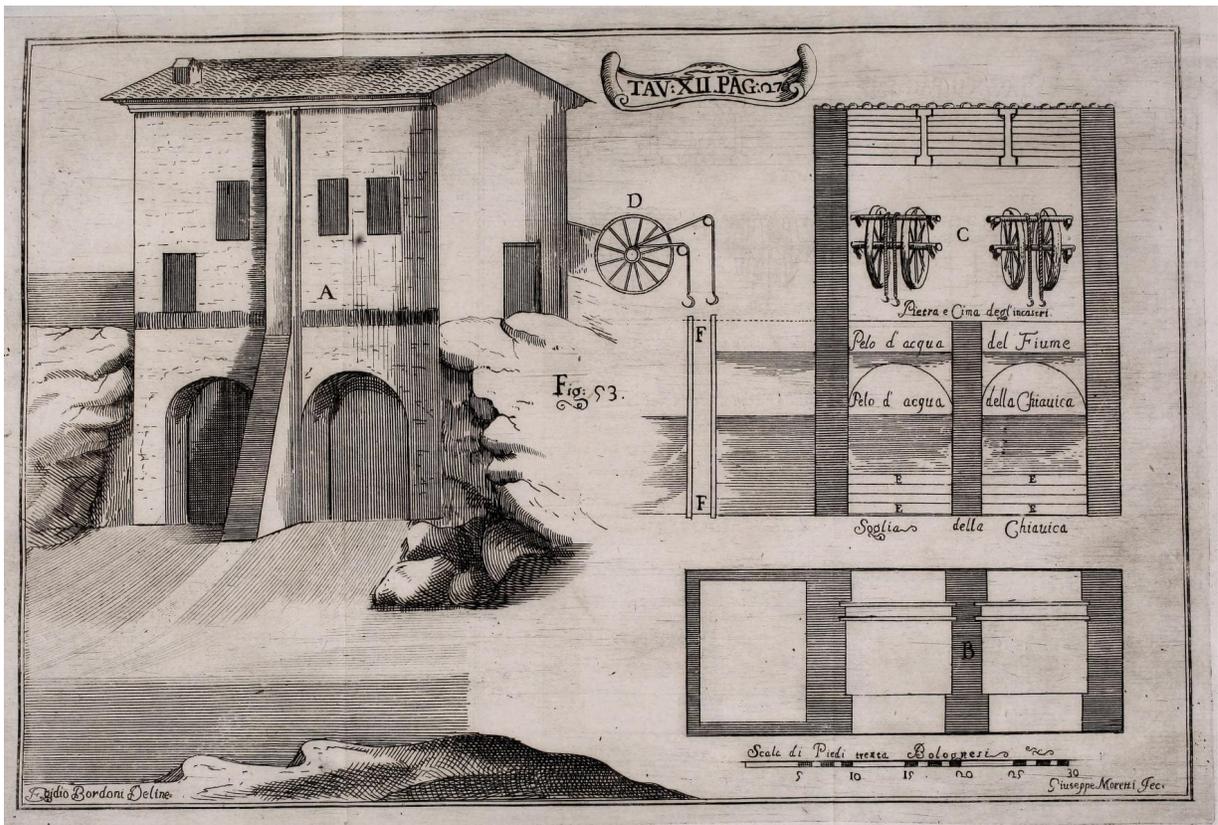


Figura 3.15: Dettaglio figura 53

per evitare che l'acqua all'interno degli alvei non raggiunga mai il livello della campagna circostante: *"nell'escavazione di questi condotti è meglio abbondare nel molto, che mancare anche in poco"*.

In aggiunta, si verificherà l'accumulo di sedimenti sul fondo, e poiché gli scoli non hanno la potenza di scavare e rimuovere tali sedimenti, diventa essenziale un intervento umano regolare per ridurre i rischi di inondazione.

Un tema frequentemente oggetto di dibattito riguarda la convenienza di unire o meno tutti gli scoli in un unico tratto. In sezione 3.2.7 si è proprio parlato dell'unione di più fiumi in un unico corso, evidenziando che un fiume unito presenta una profondità e quindi un'altezza minore durante i periodi di piena rispetto ai fiumi separati.

Tuttavia, questa logica non può essere applicata agli scoli poiché, a differenza dei fiumi che hanno una profondità stabile determinata dalla loro escavazione naturale, per gli scoli l'escavazione è effettuata manualmente. In particolare era l'acqua aggiuntiva che, nel congiungimento di due fiumi, portava a un abbassamento del fondo e, di conseguenza, a un'altezza complessiva dell'acqua inferiore rispetto ai fiumi separati.

Invece per gli scoli l'acqua non dispone mai di una quantità e di una forza sufficiente per effettuare un'escavazione significativa. Pertanto, per gli scoli, all'aumentare della quantità d'acqua, aumenterà anche l'altezza dell'acqua.

I vantaggi però di unire più scoli sono molteplici: si riduce il consumo di terreno, si evita di tagliare le campagne con condotti separati e si semplifica la manutenzione dell'alveo dello scolo.

La decisione di unire o meno più scoli non è una questione semplice, e Guglielmini sottolinea l'importanza di valutare attentamente tutte le condizioni al contorno prima di intraprendere azioni pratiche: *"Bisogna dunque, quando si tratta di aggiungere nuova acqua ad un condotto di scolo, né subito rigettare la proposizione, né subito approvarla, ma bensì ponderare gli effetti che possono succedere; e rinvenuti, mettere in bilancia i vantaggi, ed i pregiudizi che se ne possono ricevere; e secondo la prevalenza, o degli uni,*

o degli altri risolversi, o ad ammettere la proposizione con equità, o a rigettarla con giustizia.”

Anche quando affronta aspetti molto pratici, l'obiettivo dell'autore non è mai quello di stabilire regole universali che devono essere seguite in ogni situazione. I casi reali sono estremamente complessi, e Guglielmini mira a fornire una descrizione sufficientemente dettagliata delle variabili da considerare, in modo da portare a valutazioni diverse in base al contesto in esame.

Un caso simile agli scoli, ma allo stesso tempo molto differente, riguarda la deviazione di un fiume maggiore in un canale secondario. Questa pratica può risultare utile per diversi scopi, come la costruzione di canali di irrigazione, per le navigazioni o la costruzione di fontane.⁵⁷

Questi canali sono denominati *canali regolati* e si distinguono da un ramo naturale di un fiume poiché la quantità di acqua negli alvei è costantemente regolata dall'intervento umano.

Guglielmini afferma che per comprendere la natura dei canali regolati è opportuno prima comprendere la natura generale dei rami dei fiumi.

La prima regola per deviare il corso di un fiume al fine di costruire un canale è quella di superare in qualche modo la forza con cui il fiume scorre nel suo alveo.

Questo è più facile nei fiumi che hanno argini, dato che l'acqua costantemente li colpisce, permettendo la creazione manuale di percorsi alternativi facilmente seguiti dall'acqua. È fondamentale, tuttavia, evitare di danneggiare gli argini e, anzi, rafforzarli con costruzioni come muri.

La costruzione di questi canali è comunque generalmente sconsigliata, a meno che non vi sia un netto vantaggio a livello commerciale.

Rispetto ai fiumi con argini bisogna invece considerare che per i fiumi *incassati*⁵⁸ è molto

⁵⁷Questo argomento è trattato nel capitolo dodicesimo, dal titolo *"De' canali regolati, e delle regole più principali da osservarsi nella derivazione di essi"* [Guglielmini, 1697] pp.295-330

⁵⁸Con fiumi *incassati* Guglielmini probabilmente intende quei fiumi che presentano un alveo a livello

più difficile creare percorsi alternativi, poiché le sponde spesso sono significativamente più elevate rispetto al livello dell'acqua del fiume. In questo contesto, vengono impiegati macchinari che sollevano il livello dell'acqua dei fiumi in modo che possa confluire nel canale desiderato.

In questo esempio, l'autore analizza un fiume *incassato*, il Reno a Casalecchio, concentrandosi su una chiusa. La chiusa non solo aumenta il livello dell'acqua, ma guida anche il suo flusso verso l'inizio del canale, come mostrato nella figura 3.16. Le chiuse sono strutture idrauliche utilizzate per regolare il flusso d'acqua, e tra i loro molteplici scopi si include la distribuzione dell'acqua in sistemi di irrigazione. Le chiuse possono collegare un fiume a un canale di irrigazione, consentendo una deviazione controllata dell'acqua dal corso principale del fiume al canale.

La figura 3.16 mostra proprio la chiusa di Casalecchio, opera idraulica di origine medioevale, essenziale per la fornitura di acqua ai filatoi da seta.⁵⁹

La parte delineata dalla linea AB rappresenta il piano superiore della chiusa, che porta l'acqua ad entrare tramite l'incile G, detto il *Boccaccio*, nel canale LM.

L'alveo del fiume Reno è quello descritto dalla linea DE.

Il punto F indica il primo paraporto⁶⁰ che collega l'acqua del canale a quella del fiume principale.

H ed I sono due *sfogatori*, utilizzati per rilasciare nel fiume principale l'acqua in eccesso presente nel canale.

K è il secondo paraporto, con la stessa funzione del primo. I paraporti risultano essere utili anche perché utilizzano la forza della corrente d'acqua per scavare il fiume nei punti in cui questi scendono, erodendo così naturalmente i depositi accumulati negli alvei.

più basso rispetto all'ambiente circostante.

⁵⁹Per comprendere l'importanza della gestione dell'acqua a Bologna confrontare quanto detto nel capitolo 2

⁶⁰Nelle opere idrauliche, il paraporto è l'elemento strutturale integrante di una presa di un canale derivato. È utilizzato per convogliare le acque in eccesso durante i periodi di piena del corso d'acqua principale e per liberare l'imbocco del canale derivato da sedimenti accumulati durante le fasi di magra.

Le accortezze da considerare riguardo la creazione dei *canali regolati* riguarda anche la loro successiva reintroduzione nei fiumi, stagni o lagune. È possibile anche che un canale inizi in un fiume e si concluda in un altro, in quest'ultimo caso le difficoltà aumentano. È fondamentale ricordare che la gestione di questi canali è totalmente dipendente dall'intervento umano. È essenziale adottare pratiche di manutenzione per garantire che il canale rimanga funzionale e sicuro. Dato che i canali hanno minor flusso d'acqua rispetto ai fiumi, il compito di mantenerli in buone condizioni non risulta eccessivamente complesso.

I *canali regolati* hanno svariati utilizzi, principalmente vengono impiegati per alimentare *edifici idraulici* come i mulini. In tali contesti, è essenziale che il canale abbia una pendenza adeguata affinché l'acqua in movimento possieda la forza necessaria per metterli in movimento.

Un secondo vantaggio derivante dall'utilizzo dei canali riguarda le navigazioni. È importante garantire che la larghezza e la profondità dei canali consentano una navigazione agevole delle imbarcazioni, anche se talvolta può essere utile impiegare barche più piccole appositamente progettate per questi tratti. È essenziale però raggiungere un livello minimo d'acqua che non è sempre facilmente ottenibile nei canali. A tal fine, si possono impiegare i *sostegni*, come illustrato nella figura 3.17. Qui viene descritto il *sostegno* del Battiferro, posto sempre sul fiume Reno e visibile tutt'oggi.

Questi *sostegni* sono costituiti da due coppie di porte, una rivolta verso il canale superiore e una rivolta verso il canale inferiore. All'interno delle porte c'è uno spazio sufficiente per consentire la sosta di una o più barche. Il loro funzionamento è facilmente comprensibile: aprendo le porte superiori, indicate nella figura 3.17 con le lettere B e C, l'acqua riempie la parte intermedia H, portandola al livello del canale superiore ABCK. Successivamente, si chiudono le porte superiori e si aprono quelle inferiori, consentendo all'acqua in H di raggiungere il livello del canale inferiore. In questo modo, la barca può passare dal canale superiore a quello inferiore, e naturalmente, con un procedimento speculare, può avvenire

il contrario.

Guglielmini riconosce la difficoltà di modificare i canali già esistenti, ma suggerisce che,

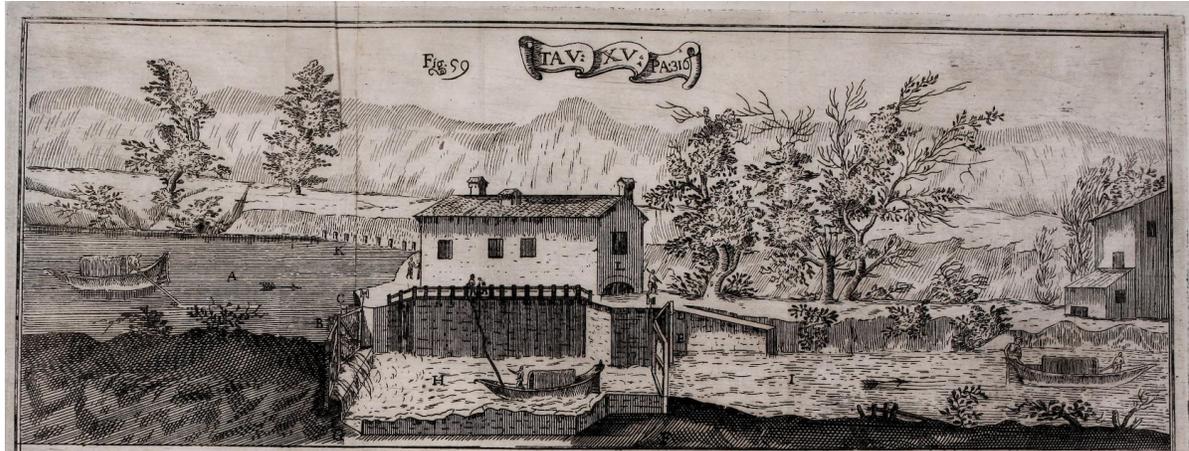


Figura 3.17: Dettaglio figura 59

seguendo le sue regole, è possibile costruirne di nuovi in modo più efficiente.

I canali regolati sono utilizzati anche per le Bonificazioni⁶¹. Con questo termine si fa riferimento all' *"atto di rendere buono il terreno"*, che è reso infruttifero a causa delle acque stagnanti.

Due sono le tecniche principali con cui si può svolgere una bonificazione: l'alluvione e l'essiccazione.

Le bonifiche effettuate per essiccazione del terreno non comportano modifiche dirette al terreno. Piuttosto, si tratta di deviare le acque in eccesso o di garantire che scorrano regolarmente fino alla loro destinazione finale senza occupare altre aree oltre al loro condotto designato.

È possibile allontanare le acque dalla zona allagata trattenendole all'interno del loro alveo originale e apportando eventuali lavori di miglioramento. In alternativa, si può fornire loro una nuova via d'uscita mediante la creazione di nuovi canali. Tra i metodi più efficaci per l'essiccazione dei terreni figurano gli scoli, già esaminati in precedenza.

⁶¹Le bonificazioni sono trattate nel capitolo numero tredici, intitolato *"Delle bonificazioni, e del modo con che esse possano farsi utilmente"* [Guglielmini, 1697] pp.331-341

Per quanto concerne la tecnica dell'alluvione, questa è impiegata in zone così basse che non sono in grado di scaricare l'acqua da nessuna parte, risultando quindi paludose. In tali circostanze, è necessario innalzare la superficie di questi luoghi, una soluzione che può essere realizzata portando del terriccio, soprattutto in ambienti più limitati. Tuttavia, in generale, questa non costituisce una soluzione efficiente, e risulta preferibile utilizzare le acque dei fiumi. È infatti possibile prelevare acqua da un fiume nelle vicinanze in modo che questa favorisca il deflusso nelle zone stagnanti, consentendo loro di raggiungere una conclusione favorevole.

Esistono due approcci per implementare questo processo: il primo è conosciuto come il metodo *a fiume aperto*, in cui si consente a un intero corso d'acqua di defluire nella zona stagnante. Tuttavia, ci sono molteplici aspetti critici e considerazioni che, secondo Guglielmini, rendono questo metodo poco efficiente.

Un'alternativa a questo tipo di bonifiche sono quelle regolate, dove l'acqua è prelevata dai fiumi o da altri canali in modo più controllato, evitando di deviare l'intero corso d'acqua. Seguendo una serie di regole è possibile realizzare bonifiche di quest'ultimo tipo, che sebbene siano più costose, consentono la creazione di aree di terreno perfettamente coltivabili, garantendo un ritorno economico sulla spesa effettuata. Secondo l'autore, è preferibile optare per la sicurezza di queste azioni rispetto al metodo *a fiume aperto*, che, sebbene più celere, comporta rischi significativi.

3.2.10 Inalveazione dei fiumi

L'inalveazione⁶² dei fiumi rappresenta un'operazione estremamente complessa da realizzare, sia a causa delle necessarie competenze teoriche, sia perché all'epoca dell'autore esisteva una limitata disponibilità di esempi funzionali già attuati a cui fare riferimento⁶³.

Guglielmini metterà a disposizione degli strumenti per evitare spese superflue e prevenire gravi danni, come purtroppo accaduto in passato. Nel capitolo non sono presenti proposizioni o ragionamenti astratti, aspetto ricorrente in tutta la parte finale del libro. L'autore dimostra costantemente una profonda attenzione al contributo alla discussione e al benessere pubblico:

”Quindi è, che noi avremo creduto di mancare gravemente al debito che hanno tutti gli uomini di comunicare, e contribuire alla pubblica felicità i propri trovati, se in questo trattato ci fossimo astenuti dal discorrere di una materia così importante, e dal donare al mondo la notizia di quegli avvertimenti, che le occasioni, l'esperienza, e le dimostrazioni proposte nei precedenti capitoli, ci hanno fatto credere doversi avere, quando si hanno simili proposizioni da esaminare (...)”

In generale, le mutazioni dell'Alveo possono essere raggruppate in due grandi categorie: si modifica l'Alveo senza cambiare lo sbocco, oppure si fa sboccare il fiume in un luogo diverso rispetto al precedente.

Si analizza la categoria più interessante, cioè la prima: queste modifiche si chiamano *tagli* e vengono effettuate quando si desidera allontanare un fiume da un luogo pericoloso o avvicinarlo a una zona che comporta maggiori vantaggi.

Bisogna considerare due diversi casi: il nuovo corso d'acqua giunge a conclusione senza l'interferenza di altri fiumi, oppure lungo il percorso il nuovo corso d'acqua riceverà altri

⁶²L'inalveazione, o inalveamento, rappresenta la deviazione completa di un corso d'acqua naturale.

⁶³Questo argomento è trattato nell'ultimo capitolo del libro, il quattordicesimo, dal titolo *”Delle considerazioni d'avarsi, quando si vogliono fare nuove inalveazioni de' fiumi”* [Guglielmini, 1697] pp.342-355

affluenti.

Il primo caso è il più semplice, poiché per una buona riuscita del *taglio* è sufficiente prendere in considerazione le condizioni del fiume di partenza.

Nel secondo caso si distinguono invece due situazioni: la prima riguarda i fiumi di natura simile, ovvero quelli che trasportano nelle confluenze materiale omogeneo, mentre la seconda coinvolge i fiumi che portano materia di sostanza diversa l'uno dall'altro.

I fiumi di natura simile generalmente trasportano sostanze come sabbia o ghiaia. In questa situazione il successo della nuova inalveazione è più probabile, e l'unico elemento incerto da valutare riguarda la larghezza ottimale dell'alveo. Guglielmini consiglia di sbagliare per eccesso piuttosto che per difetto.

Tuttavia, è importante notare che i fiumi che abbiamo considerato omogenei (nel senso che trasportano materiale omogeneo) potrebbero iniziare a trasportare materiale eterogeneo. Ciò si verifica quando il fondo dell'affluente, nel punto in cui si interseca con il nuovo alveo, è significativamente più alto rispetto alla linea di fondo dell'inalveazione. In questo modo, si aggiunge pendenza al letto superiore, il quale inizia a spingere la ghiaia e altri materiali del fondo, cosa che non accadeva prima a causa del limitato impeto.

Si passa ora a considerare il caso in cui i fiumi trasportino materiali di natura differente. Sono presenti diverse situazioni da considerare.

Il primo scenario considera il caso in cui i fiumi superiori trasportano materiale più pesante rispetto a quelli inferiori. Ad esempio, si parte dal fiume principale che trasporta ghiaia grossa, per poi passare a ghiaia sempre più fine negli affluenti successivi. In questa situazione, dato che il fiume principale è in grado di trasportare materiale pesante, sarà sicuramente in grado di gestire senza problemi materiale più leggero nel suo alveo.

Il problema sorge quando i fiumi affluenti trasportano, nel punto di intersezione, materiale più pesante rispetto al fiume principale. Per assicurarsi che ciò non costituisca un problema, sarebbe necessario verificare la pendenza dei fiumi uniti (che quindi comporta un maggiore o minore impeto dell'acqua), ma purtroppo questa operazione non è realiz-

zabile in pratica.

Pertanto, occorre trovare un approccio alternativo per garantire l'efficacia di questa azione. Secondo l'autore, basandosi sulle osservazioni, è possibile calcolare la pendenza minima necessaria per non incorrere in complicazioni, considerando anche la dimensione del materiale che compone il fondo.

In generale, è necessario valutare attentamente i pro e i contro di un'inalveazione prima di prendere una decisione, evitando semplificazioni eccessive.

Capitolo 4

Conclusione: Il Guglielmini matematico, aspetti galileiani nel trattato *Della natura de' fiumi*

Il XVII e il XVIII secolo rivestono un notevole interesse scientifico in quanto sono gli anni in cui nasce e si sviluppa il metodo scientifico.

In questo contesto, Guglielmini emerge come una delle figure di scienziato che meglio incarna questa epoca, e la presente tesi ha messo in evidenza le sue caratteristiche più significative.

La comparazione tra Guglielmini e Galileo Galilei è inevitabile¹, considerando che quest'ultimo viene frequentemente menzionato nel trattato *Della natura de' fiumi*, soprattutto per quanto riguarda l'uso e lo sviluppo dei modelli teorici presenti nel testo.

Per comprendere la continuità tra i due scienziati, si esaminano le riflessioni di Bellone² sulla figura di Galileo e sul suo contributo alla nascita del pensiero scientifico:

"Se sotto la dicitura metodo sperimentale si vuole collocare la tendenza a emettere

¹Confrontare anche l'appendice A

²Enrico Bellone (1938-2011) è stato uno storico della scienza e divulgatore scientifico italiano.

giudizi sulla natura basandosi su osservazioni accurate, allora va detto che quel metodo era ampiamente diffuso nel periodo che precedette la svolta seicentesca (...) Non fu dunque la filosofia – attraverso la mediazione del metodo – a partorire la nuova fisica. Quest’ultima fece leva su manufatti quali il telescopio o il piano inclinato, grazie ai quali furono scoperte intere e inaspettate aree di fenomeni, e su modi di ragionare centrati sulla geometria e sul calcolo delle flussioni, grazie ai quali le nuove metodologie rientravano in ambiti dimostrativi.”³

Secondo Bellone quindi la scienza moderna nasce grazie a determinati apparati, che svolgono due funzioni fondamentali. Il primo ruolo, comunemente riconosciuto, è quello di facilitare lo studio di proprietà che sarebbero altrimenti invisibili a occhio nudo, semplificandole. Un esempio classico è rappresentato dal piano inclinato di Galileo (o anche dai canocchiali), che consente di rallentare il movimento di caduta di un oggetto rispetto a quello in caduta libera⁴. Tuttavia, secondo Bellone, il ruolo dei manufatti non si limita a questo. Egli precisa che tali strumenti servono anche a inserire i fenomeni osservati in ambiti dimostrativi che fanno uso della geometria.

Galileo considera infatti il piano inclinato come un triangolo euclideo, stabilendo una connessione tra grandezze fisiche, come il tempo di percorrenza, e grandezze matematiche, come i cateti del triangolo.

Quello che riesce a realizzare Galileo è la matematizzazione del moto di un grave attraverso una teorizzazione che impiega il triangolo delle velocità⁵. In questo processo, l’apparato di studio del piano inclinato riveste un ruolo essenziale, poiché può essere rappresentato in termini geometrici. Bellone fa notare che è proprio questa geometrizzazione del mondo osservabile che contraddistingue il metodo galileiano rispetto a quello dei suoi predecessori.

³[Bellone, 1990] pp.7-8

⁴Galileo sembra considerare un moto verticale alla stregua di un moto sul piano inclinato. Oggi sappiamo che le due tipologie di moto sono in realtà differenti, ma occorrerà aspettare il Settecento per avere questa divisione.

⁵Fare riferimento a quanto detto in appendice A

Geymonat⁶ completa il quadro delle innovazioni del pensiero galileiano rispetto a quello aristotelico aggiungendo:

“Egli [Galileo] si dichiara d’accordo con Aristotele nel momento in cui egli afferma: “quello che l’esperienza e il senso ci dimostra si deve anteporre ad ogni discorso, ancorché ne paresse assai fondato”. Il punto in cui Galileo si discosta è però questo: egli non pensa che l’esperienza, oltre ai fatti di natura, ci offra anche la loro interpretazione. Ritiene invece che a volta, la discordanza tra fatti e teorie sia una conseguenza della nostra interpretazione “grossolana”. Di qui la necessita’ di spogliare i fatti (in se’ incontrovertibili) dalla veste in cui li avevamo avvolti (...) A tale scopo e’ necessario non fermarsi alle prime apparenze qualitative, ma ideare e costruire dei dispositivi tecnici, o modelli, ove la risposta della natura emerga con chiarezza, al di fuori di ogni possibile malinteso.”⁷

Sotto questa prospettiva, si può osservare come sia Galileo che Guglielmini abbraccino questo rapporto tra esperienza e teoria, un aspetto che emerge chiaramente dall’analisi svolta nel capitolo 3.

Guglielmini si avvale di dispositivi tecnici nel tentativo di confermare le sue teorie, come ad esempio per misurare la distribuzione delle velocità in una sezione trasversale di un fiume. Tuttavia, la limitata tecnologia dell’epoca non consente la realizzazione di strumenti sufficientemente efficaci⁸. Invece nelle sue opere è sempre evidente, analogamente a Galileo, un’attenzione particolare nella costruzione di modelli geometrici e matematici. Quanto compiuto da Guglielmini, come emerge dallo studio di *Della natura de’ fiumi*, è simile a quanto realizzato da Galileo, ma applicato al moto delle acque. Guglielmini, infatti, matematizza l’idraulica fluviale mediante l’impiego di concetti come la parabola delle velocità, adottando sempre una modellizzazione prettamente geometrica.

⁶Ludovico Geymonat (1908-1991) è stato un filosofo, storico e matematico. Il primo a detenere una cattedra di filosofia della scienza in Italia.

⁷[Geymonat, 1963]

⁸Per tutto il Settecento, in Italia e in Europa, si cercarono di realizzare strumenti capaci di misurare in modo preciso quantità importanti come la velocità dell’acqua nelle varie sezioni di un fiume. I risultati spesso contraddittori mostrano come la loro costruzione risultasse difficoltosa e complessa.

Il tratto distintivo di Guglielmini, presente in altri suoi contemporanei ma che vede in lui il massimo esponente, consiste nella capacità e volontà di individuare in ogni fenomeno naturale oggetto di studio una descrizione geometrica che possa non solo descriverlo, ma anche caratterizzarlo nel modo più accurato possibile.

Così l'alveo di un fiume si trasforma in un piano inclinato, il suo percorso tortuoso si rappresenta come un insieme di linee spezzate, l'acqua si concepisce come un insieme di sfere gravi che interagiscono seguendo precise linee geometriche, gli ostacoli che il fiume incontra si raffigurano come segmenti, mentre alcune sponde possono assumere la forma di semicerchi a causa dell'azione della forza dell'acqua.

Tutti questi oggetti naturali possono essere analizzati attraverso la loro rappresentazione geometrica, da cui è possibile dedurre conclusioni che possono poi essere applicate nella pratica.

Guglielmini prosegue il lavoro iniziato da Galileo, contribuendo alla costruzione delle fondamenta per lo sviluppo del metodo scientifico in un ambito estremamente rilevante a livello politico e culturale, quello idraulico.

Infine Guglielmini, rispetto agli scienziati della sua epoca, emerge in quanto a matematico che si presta allo studio delle acque correnti, seguendo l'approccio teorico delineato precedentemente da Castelli⁹, ma integrandolo con un criterio pratico utilizzato dai vari periti e tecnici del settore¹⁰.

Nel contesto storico contraddistinto dal conflitto tra una visione che privilegia lo studio dei fiumi attraverso un approccio matematico e una visione che enfatizza l'importanza di unicamente un approccio concreto, la forza della figura di Guglielmini risiede proprio nella sua capacità di incarnare la giusta via di mezzo. Da un lato, egli agisce come un tecnico, impegnato nelle prove e nelle misurazioni sul campo; dall'altro, si dimostra un

⁹Il libro *Della misura dell'acque correnti* di Castelli si può definire come il primo vero testo che fonda la scienza matematica delle acque. Il trattato però risulta essere puramente matematico, senza attenzione agli aspetti sperimentali e pratici.

¹⁰Confrontare quanto detto in sezione 2.1

teorico dotato di vaste conoscenze matematiche e fisiche. Questa dualità gli conferisce una notevole reputazione tra i suoi contemporanei europei e porta alla creazione della prima cattedra universitaria di Idrometria. Al contempo, riceve anche un riconoscimento da parte della città di Bologna, che lo nomina sovrintendente delle acque e lo colloca a capo dei periti idraulici.

Appendici

Appendice A

Guglielmini e Galileo Galilei

Guglielmini cita spesso Galileo quando parla della costituzione del suo apparato teorico. Le leggi del moto dei gravi, in caduta libera e su un piano inclinato, sono riprese passo passo e risultano la base fondamentale per il sistema di Guglielmini che va a spiegare tutto il movimento delle acque.

Per questo si approfondiscono due parallelismi tra Galileo e Guglielmini:

- Confronto tra due strumenti teorici molto simili: il "triangolo delle velocità" di Galileo e la "parabola delle velocità" di Guglielmini;
- Concezione corpuscolare della materia e dei fluidi da parte dei due autori.

Per questo confronto ci si riferirà ai *Discorsi e dimostrazioni matematiche intorno a due nuove scienze*¹ di Galileo Galilei, una delle sue opere più importanti pubblicata nel 1638. In questo libro, Galileo espone i suoi studi sulla meccanica e sulla cinematica, andando a spiegare il moto uniformemente accelerato. Il testo si presenta sotto forma di dialogo, diviso in quattro giornate, tra tre personaggi: Salviati, Sagredo e Simplicio. Come nei *Dialogo sopra i due massimi sistemi del mondo* (1632), i tre personaggi sostengono punti di vista differenti: Salviati è il personaggio che incarna il ricercatore innovatore

¹[Galilei, 1638]

e progressista, Simplicio rappresenta l'accademico tradizionalista e aristotelico, mentre Sagredo cerca di trovare un equilibrio tra questi due orientamenti contrastanti.

Attraverso questo dialogo, Galileo discute le leggi del moto, la caduta dei gravi, e introduce il concetto della scienza dei materiali. L'opera è una pietra miliare nella storia della fisica e ha contribuito significativamente allo sviluppo della scienza moderna.

Si trova che Galileo, nella spiegazione del moto nel piano inclinato da parte di un grave, utilizzò il così detto triangolo delle velocità. Nella terza giornata, focalizzata principalmente sulla dinamica dei gravi, enunciò un teorema che afferma che il tempo impiegato per percorrere una determinata distanza con un moto uniformemente accelerato da un punto di partenza in quiete è lo stesso tempo necessario per percorrere la stessa distanza con un moto uniforme, a condizione che la velocità iniziale del moto uniforme sia la metà della velocità massima raggiunta dal corpo nel moto uniformemente accelerato. In altre parole, il tempo di percorrenza dipende solo dalla velocità iniziale e finale, indipendentemente dalla modalità specifica (uniformemente accelerato o uniforme) del moto.

Un altro teorema afferma che se un oggetto inizia a muoversi verso il basso con un moto uniformemente accelerato partendo dalla quiete, la relazione tra gli spazi percorsi in tempi diversi è una proporzione quadraticamente crescente rispetto ai tempi stessi. In altre parole, la distanza percorsa è proporzionale al quadrato del tempo trascorso.

In conclusione, tramite un corollario si nota che, se ciò che è stato affermato precedentemente è valido, esaminando un piano inclinato e misurando gli spazi tra i battiti successivi di un metronomo, si otterrà la sequenza dei numeri dispari (1, 3, 5, 7, ...).

Ed è qui che Sagredo interviene andando a fare un disegno per spiegare meglio la situazione, come si vede in figura A.1; con linguaggio moderno possiamo dire che l'asse delle ordinate rappresenta i tempi, mentre quello delle ascisse le velocità.

Salviati fa riferimento al triangolo ABC, sostenendo che lo spazio percorso da un corpo nel tempo AC è lo stesso, sia che il corpo parta da fermo e segua un moto uniformemen-

ta, dedica riflessioni alla composizione dei corpi solidi e a quella dei liquidi. Nonostante Galileo non si impegni mai in una discussione sistematica sulla composizione della materia nei suoi scritti, è possibile individuare passaggi che delineano la sua visione e che lo avvicinano alla corrente dell'atomismo.²

Nei *Discorsi* infatti Salviati osserva il comportamento di un corpo solido, come una pietra o un metallo, quando viene frantumato in polvere molto fine. Anche se le particelle risultanti sono troppo piccole per essere percepite individualmente dalla vista o dal tatto, sono ancora distintamente presenti e numerabili. Queste particelle più piccole possono aggregarsi insieme, sostenendosi reciprocamente, e quando vengono *scavate*, lasciano una cavità senza che le particelle circostanti riempiano lo spazio vuoto. Inoltre, quando queste particelle vengono agitate, si fermano immediatamente una volta cessata la forza esterna. Tuttavia, quando si va ad esaminare l'acqua, si nota un comportamento molto diverso. L'acqua, quando sollevata, si spiana istantaneamente se non è sostenuta da un contenitore esterno; se viene creata una cavità nell'acqua, essa fluisce immediatamente per riempirla. Quando l'acqua è agitata, continua a fluire e ad estendersi.

Da queste osservazioni, Salviati suggerisce che i minimi costituenti dell'acqua sono molto diversi da quelli dei solidi. Mentre i solidi possono accumularsi e supportarsi a vicenda, l'acqua sembra non avere minimi divisibili. La sua minima unità sembra essere indivisibile, e questo spiegherebbe il comportamento fluido dell'acqua rispetto alla polvere di solidi che può essere separata in particelle individuabili.

Rispetto quindi a quanto visto con Guglielmini in sezione 3.2.3, si nota sempre un'attenzione al comportamento dei solidi e dei liquidi per quanto riguarda la creazione di cavità all'interno dei rispettivi corpi; questa sembra essere una differenza importante che caratterizza i due diversi stati. Anche Guglielmini riconosce le diversità tra i solidi e i fluidi, però la grande differenza nel suo pensiero, rispetto a quello galileiano, è il riconoscimento che le componenti infinitesime sono uguali in entrambi i casi, e quindi per

²Per un'analisi più approfondita di Galileo atomista consultare [Shea, 2001]

descrivere il moto delle acque bisognerà sempre fare riferimento alla gravità.

Questo perciò gli permetterà di fondare il suo sistema teorico considerando l'acqua formata da una serie di piccole sfere gravi.

Appendice B

Apparato iconografico: le tavole di *Della natura de' fiumi*

Verranno di seguito riportate tutte le tavole presenti nel trattato *Della natura de' fiumi*, facendo riferimento alle sezioni precedenti dove le singole immagini sono state approfondite. Tutte le figure sono disegnate a mano da Egidio Bordoni.

La prima tavola presenta diverse illustrazioni che riguardano la natura dei fluidi, in particolare dell'acqua.

Secondo Guglielmini, l'acqua è costituita da particelle elementari di forma sferica, come si vede nelle varie rappresentazioni. Queste immagini servono a introdurre considerazioni generali sulle sfere come corpi pesanti, per poi derivare risultati utili specificamente per l'acqua. Guglielmini utilizza il modello delle sfere per discutere concetti noti della fluidodinamica, come ad esempio il caso dei vasi comunicanti illustrato nella figura 4, e il caso dell'efflusso da un vaso mostrato nella figura 6; la figura numero 7 è trattata in dettaglio nella sezione 3.2.3.

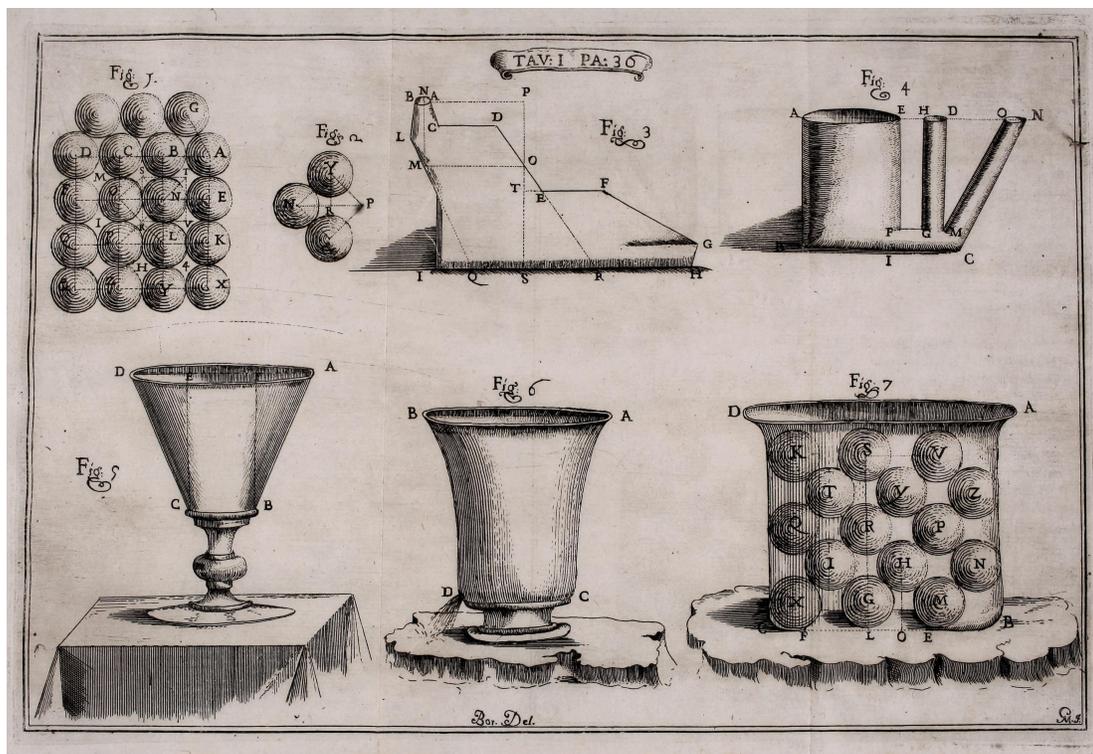


Figura B.1: Tavola I

Nella seconda tavola vengono introdotti strumenti geometrici e matematici molto importanti per l'autore, come la parabola delle velocità, analizzata in dettaglio nell'appendice A e nella sezione 3.2.4: figura 3.4 e figura 3.6. È evidente l'approccio altamente geometrico di Guglielmini, che, evitando un ricorso a un'algebra complessa nelle dimostrazioni, presenta sempre apparati geometrici ben definiti.

Nelle figure 9 e 10, viene ripreso lo studio del piano inclinato utilizzando le regole scoperte da Galileo. È interessante notare come, in figura 9, si analizzi questo caso ricorrendo alla parabola delle velocità, poiché il moto di un corpo in caduta libera subisce la stessa accelerazione del moto di un corpo lungo un piano inclinato.

Le figure 11 e 12 vengono utilizzate da Guglielmini per descrivere le differenze del moto dei corpi pesanti rispetto a quello dei liquidi. Nell'immagine 11, si illustra il caso di un corpo che scende da un piano inclinato, presentando anche delle risalite: non possiamo essere certi che il corpo, disceso per AB, riesca a risalire per BC. Al contrario, per un

fluido possiamo essere sicuri che ciò accada, poiché vale *l'assioma degli idrodinamici*, secondo il quale un fluido risale tanto quanto è sceso.

La figura 12, invece, illustra il caso in cui si verifichi un impedimento al movimento di un corpo. Se immaginiamo la sfera rappresentata nella figura essere fatta di ghiaccio, il suo comportamento allo stato solido sarà diverso rispetto al comportamento allo stato liquido, dato che verranno occupati degli spazi differenti.

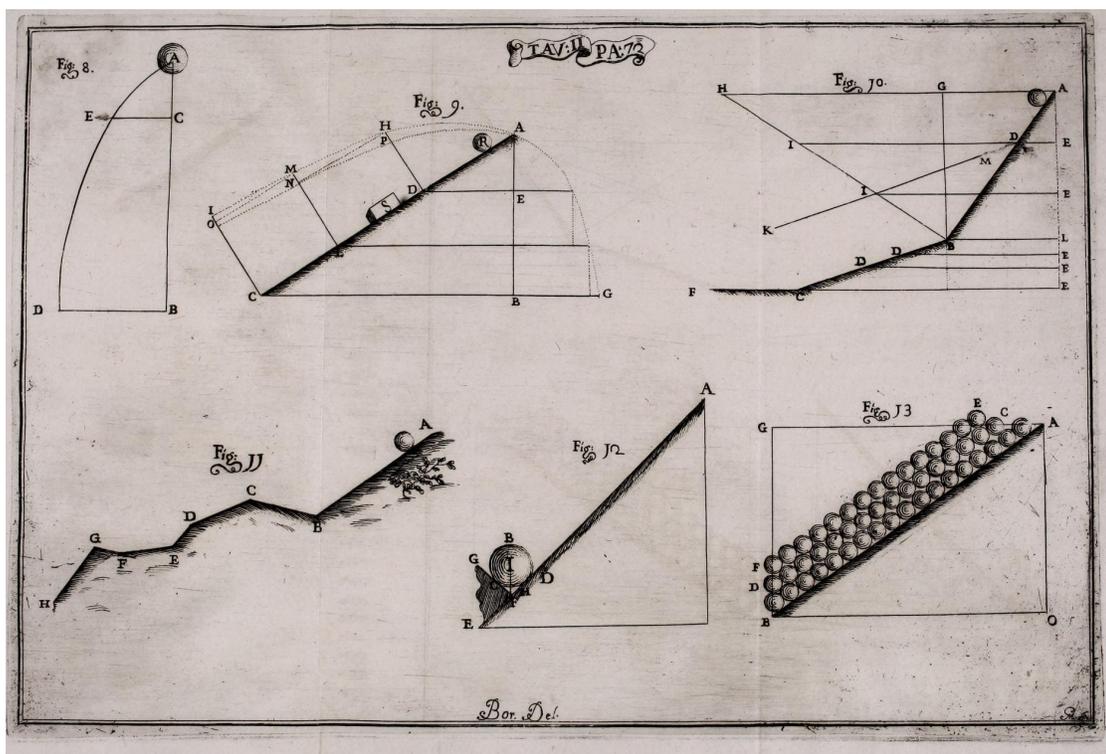


Figura B.2: Tavola II

Con la terza tavola, si affronta una transizione dalle considerazioni teoriche sui fluidi ad aspetti legati alla natura dei fiumi e al movimento delle acque. La figura 14 è esaminata attentamente nella sezione 3.2.4: figura 3.6, la numero 15 e la 17 nella sezione 3.2.5: figura 3.7, figura 3.8. Guglielmini spiega come tutte le premesse sulla composizione dell'acqua possano fornire spiegazioni per i vari fenomeni riscontrati nei fiumi. In particolare, si analizza il fondo dei fiumi e come questo si modifichi in relazione alle resistenze

del fondo stesso e alla forza impressa dall'acqua nel suo movimento.

Le figure 18 e 19 infatti mostrano come l'acqua agisce sul fondale dell'alveo, andando eventualmente a modificarne la pendenza.

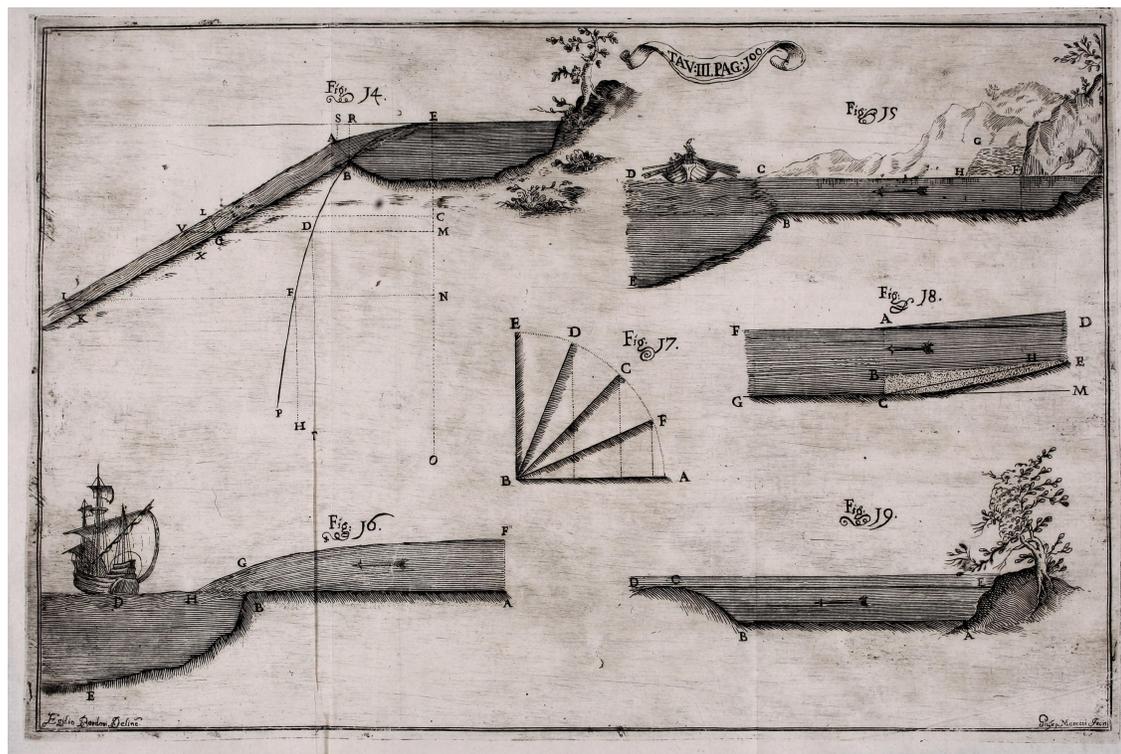


Figura B.3: Tavola III

Le prime due figure (figura numero 20 e 21) della quarta tavola descrivono ancora le caratteristiche del fondo del fiume.

Guglielmini procede quindi descrivendo la disposizione dei fiumi sulla superficie terrestre. Per farlo, inizia esponendo le regole che seguono i corpi gravi nel loro scorrere lungo piani inclinati, come evidenziato nelle figure 22 e 25. Da queste considerazioni, per analogia, derivano direttamente i principi che regolano il movimento delle acque, come illustrato nella figura 28, che rappresenta l'alveo di un fiume, in una rappresentazione molto simile a un piano inclinato.

Continuano anche le riflessioni sui fondi degli alvei, rappresentati nelle figure 26 e 27.

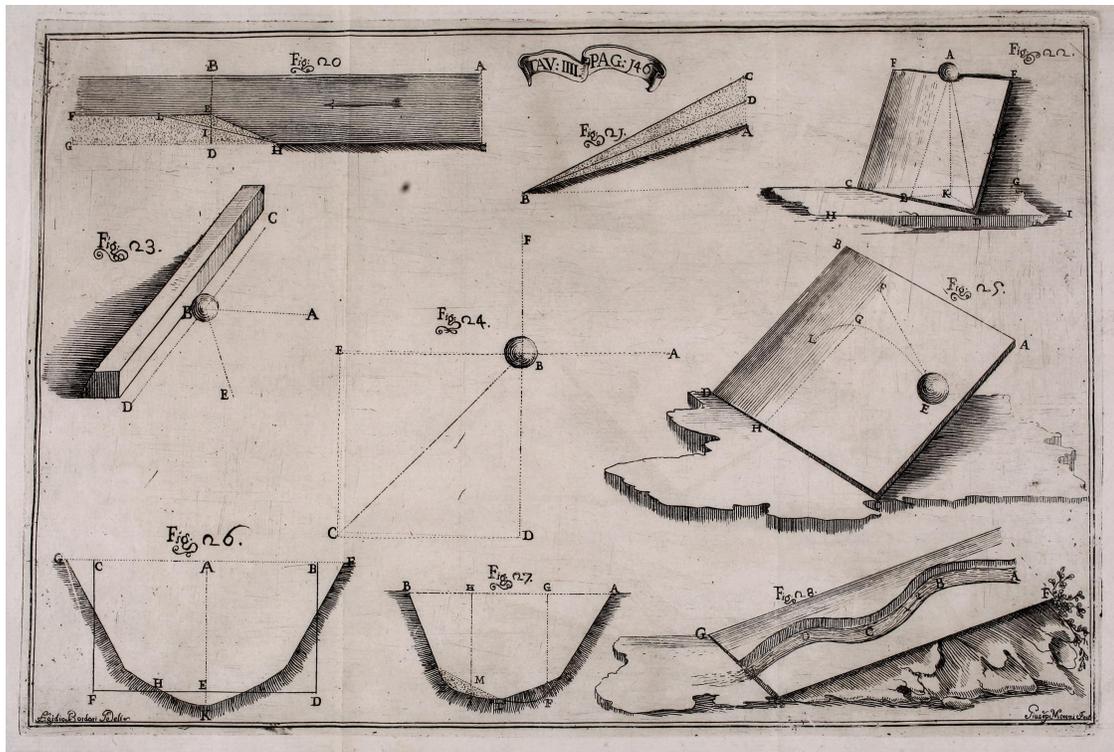


Figura B.4: Tavola IIII

La quinta, sesta e settima tavola continuano a descrivere la disposizione dei fiumi nel loro percorso, analizzando come rispondono in presenza di varie resistenze poste nel loro percorso, che possono essere di origine naturale o artificiale, come si può osservare nelle figure 33 e 34 rispettivamente con le resistenze DIF e BD. Le figure 30 e 35 sono analizzate nella sezione 3.2.5: figura 3.9, figura 3.10.

Le riflessioni presentate in queste figure sono molto incentrate sulla salvaguardia delle sponde, al fine di evitare deterioramenti e successivi problemi di alluvioni.

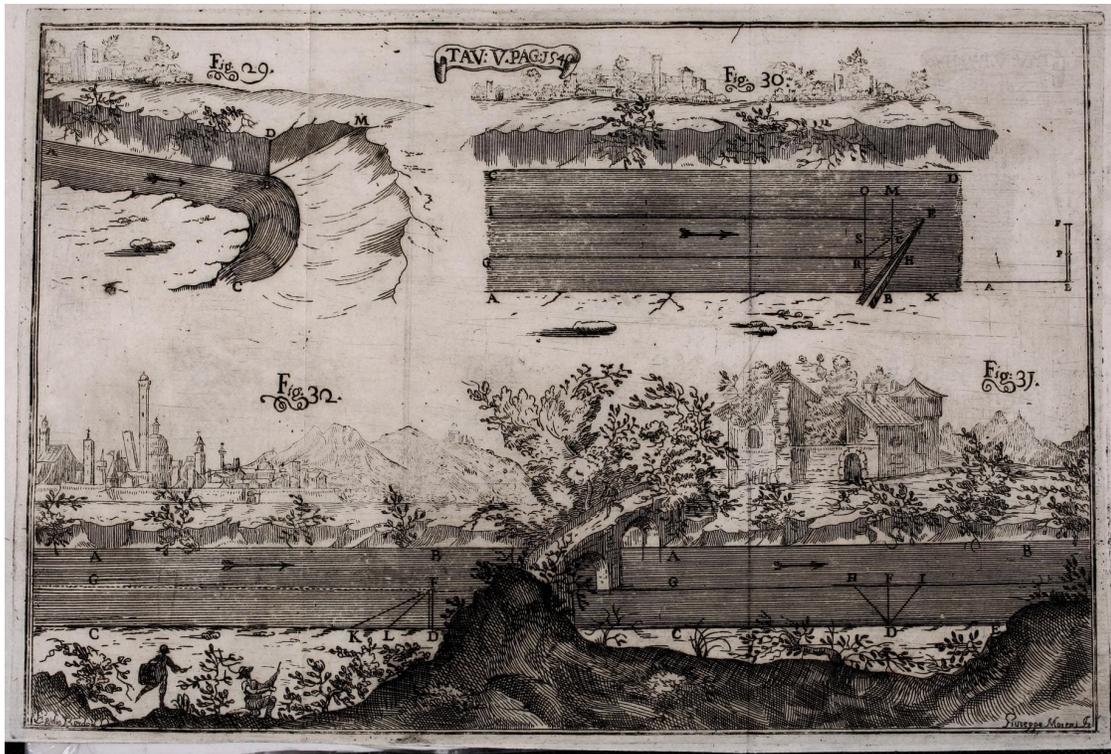


Figura B.5: Tavola V

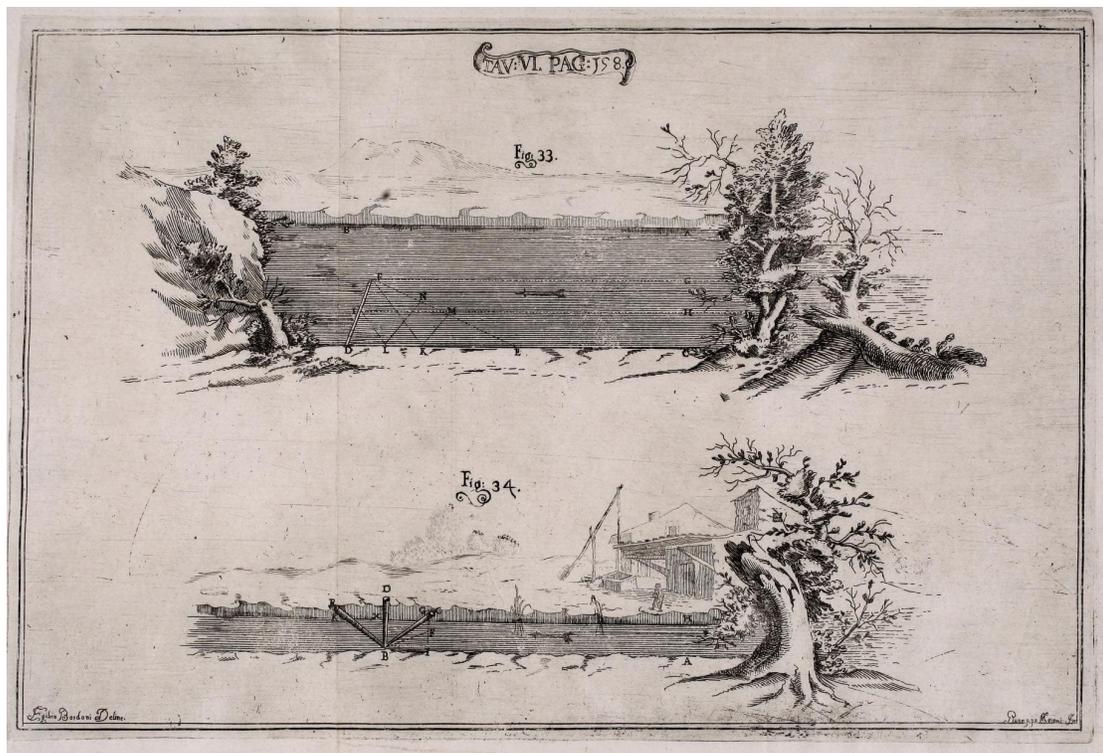


Figura B.6: Tavola VI

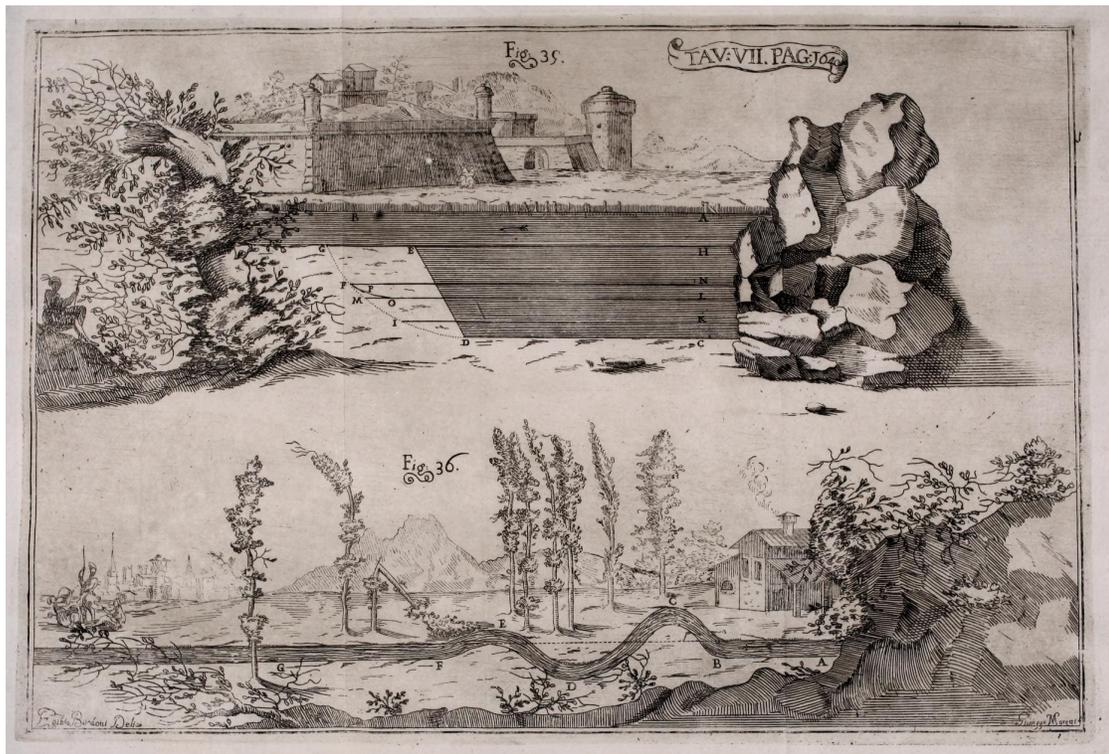


Figura B.7: Tavola VII

La tavola ottava si apre con due figure (numero 37 e 38) che descrivono il caso in cui un fiume entra in una zona paludosa, sia nel caso generale che quando c'è una pendenza dell'alveo. Le immagini successive indagano la disposizione delle velocità in una sezione verticale del fiume, come approfondito nella sezione 3.2.6: figura 3.11, figura 3.12.

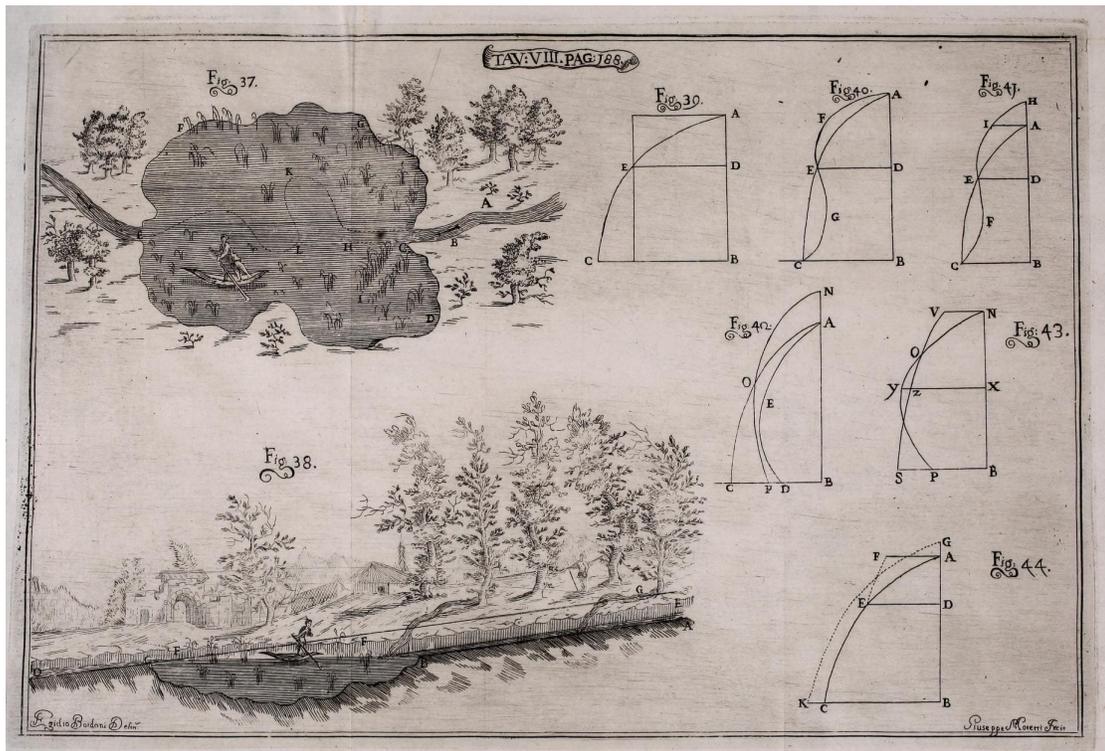


Figura B.8: Tavola VIII

Le prime due figure della nona tavola illustrano come il percorso di un fiume si modifichi a seguito dell'incontro con varie resistenze, come analizzato nella sezione 3.2.6. Si evidenzia anche come il corso d'acqua tenda naturalmente a formare curvature nel proprio cammino (figura 45) oppure a presentare parti dell'alveo più o meno larghe (figura 46).

Le figure 47 e 48 riguardano invece quanto esaminato nella sezione 3.2.7, dove vengono studiate le unioni di più fiumi. Le immagini rappresentano la sovrapposizione delle velocità delle sezioni trasversali di due corsi d'acqua (sempre utilizzando il modello delle parabole delle velocità): l'affluente e il fiume maggiore, e mostrano come le velocità dei

fiumi principali siano rappresentate da triangoli, mentre quelle degli affluenti da parabole. Ciò indica che l'eventuale maggiore velocità dei fiumi affluenti comporta la capacità di riversarsi sui fiumi principali, a causa del maggiore impeto.

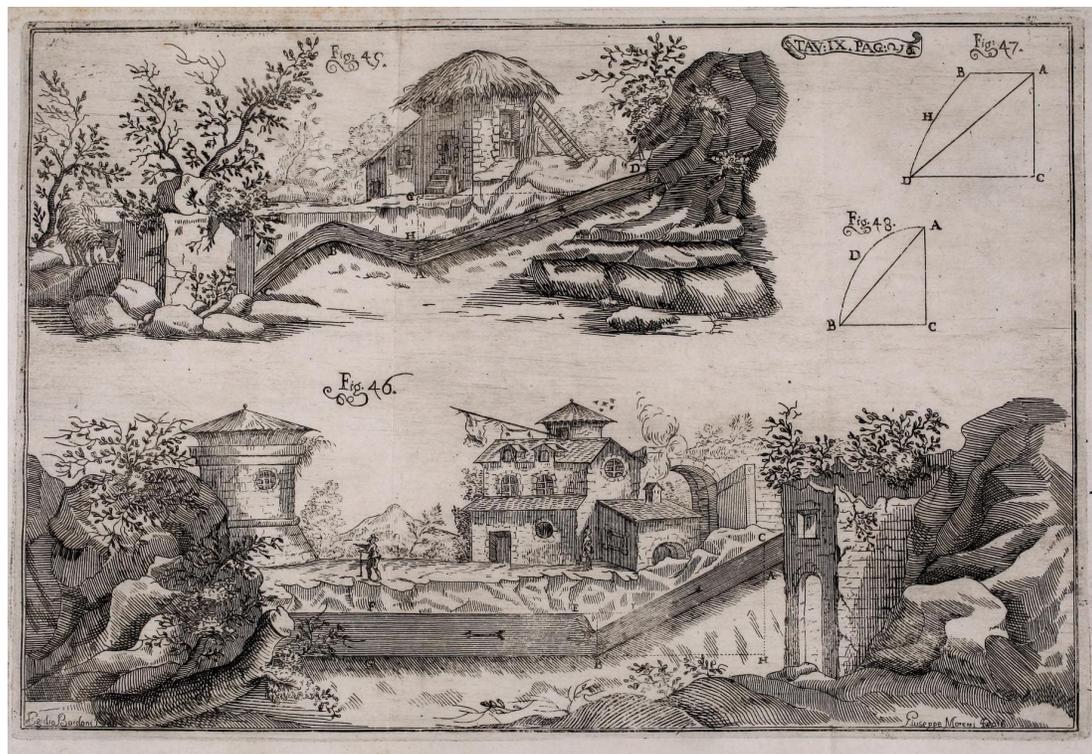


Figura B.9: Tavola IX

La decima tavola tratta l'unione di più fiumi, ed entrambe le figure sono state analizzate con attenzione nella sezione 3.2.7: figura 3.13, figura 3.14.

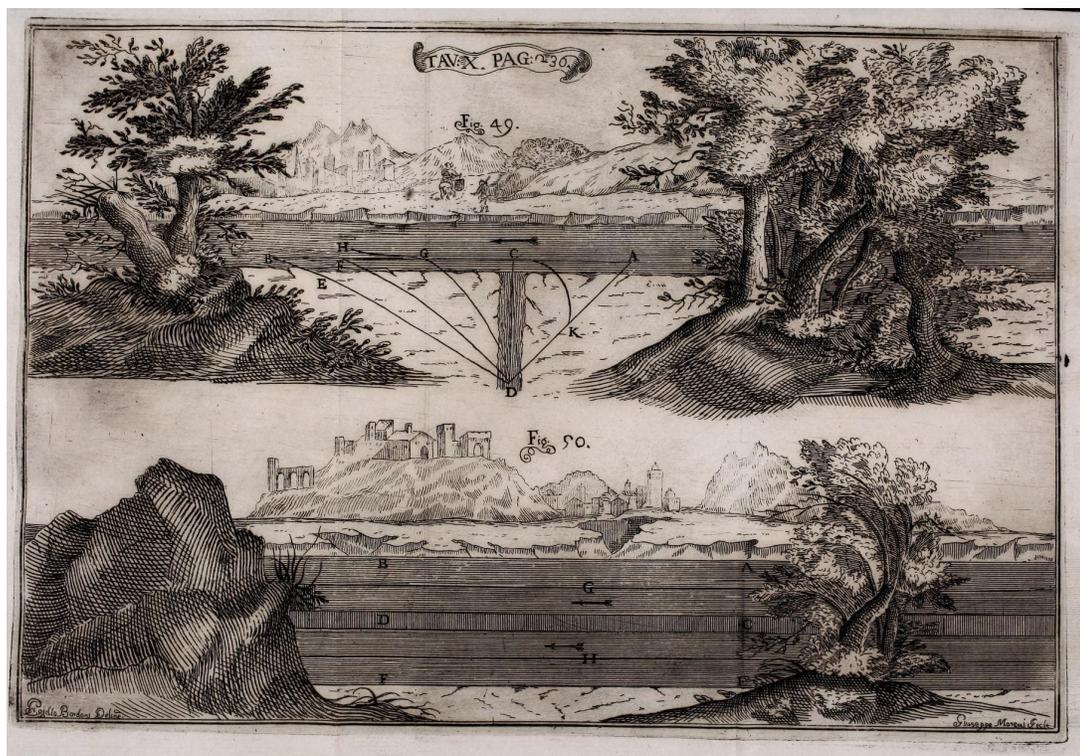


Figura B.10: Tavola X

La figura superiore dell'undicesima tavola discorre dell'unione di più fiumi (fare riferimento alla sezione 3.2.7), e mostra come tale unione non comporti solo un aumento della profondità dell'alveo unito, ma anche un abbassamento della parte dell'alveo vicina al punto di unione dei due fiumi. Inizialmente, il fiume con altezza FE si unisce a un altro nel punto BD, creando un fiume unito con profondità BG, ma ciò comporta anche un abbassamento del fondo del fiume da DE a GI.

Nella figura 52 si osserva che un fiume principale, rappresentato da CDEFI, se ha poca inclinazione, tende a sviluppare un percorso molto tortuoso a causa dell'azione dei vari affluenti (AB,GF,HI) che introducono sassi e altri materiali nell'alveo principale. Questo fenomeno spiega la forma apparentemente innaturale di alcuni fiumi.

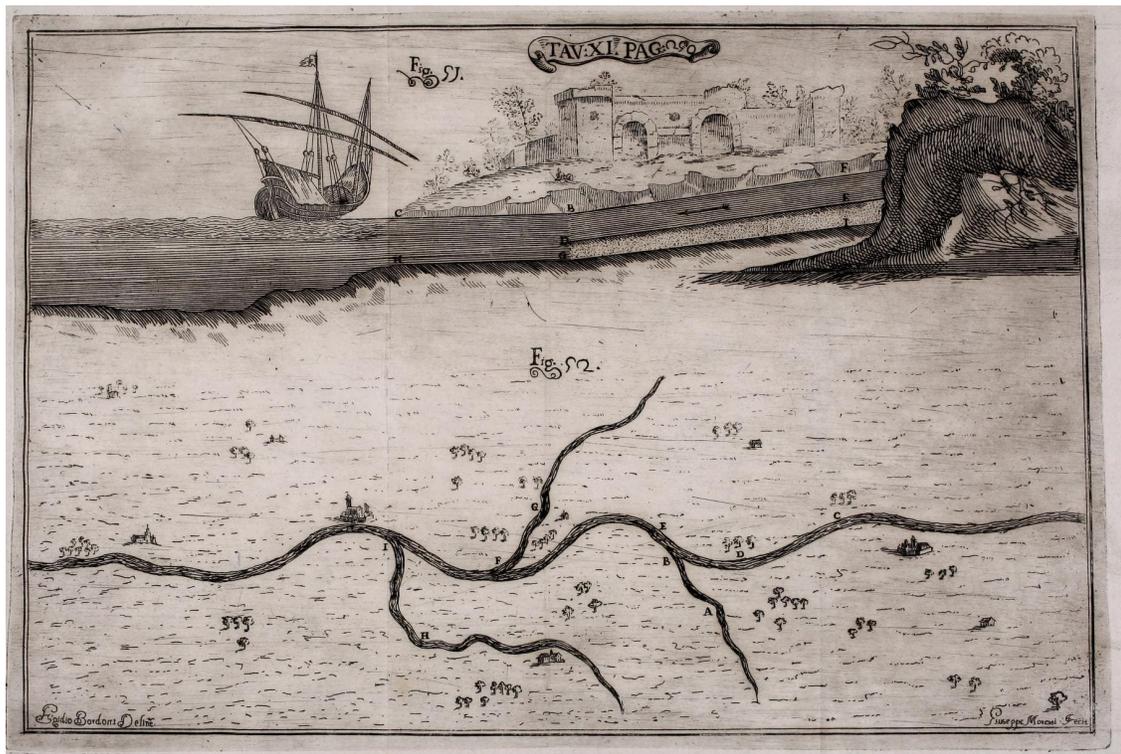


Figura B.11: Tavola XI

La tavola dodicesima presenta una Chiavica, analizzata nella sezione 3.2.9: figura 3.15.

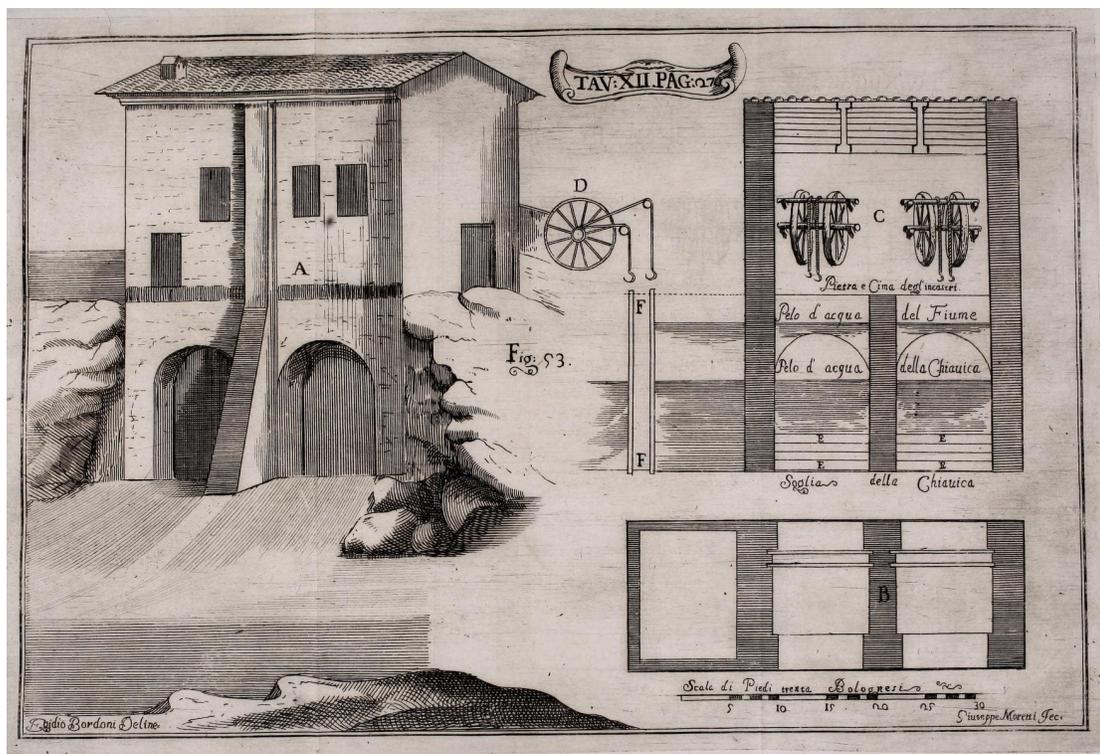


Figura B.12: Tavola XII

La tredicesima tavola tratta gli scoli delle campagne, come analizzato nella sezione 3.2.9. Esplora due possibili approcci per evitare l'intersezione del percorso degli scoli con quello di un altro scolo o di un fiume.

Nella figura 55, vengono illustrate le *botti sotterranee*, strutture ottenute scavando al di sotto di un alveo per permettere il proseguimento dello scolo. Esistono due tipi di botti: piane e concave. Le botti piane, rappresentate in alto a destra, non modificano il percorso dello scolo nel canale sotterraneo. Le *botti concave*, illustrate in basso a destra, presentano una forma concava che può facilitare il trasporto di alcuni detriti del fondo, che altrimenti andrebbero a depositarsi. Inoltre, in questo caso, la *botte* può deviare il corso dello scolo, come mostrato nella figura.

Nella figura 56, vengono presentati i *ponti-canali* come soluzione al problema dell'interse-

zione di due corsi d'acqua, mediante la creazione di ponti sovravelevati rispetto all'alveo. Si distinguono due casi: *ponti-canali* liberi o ristagnati. Nel primo caso, indicato nell'immagine in basso a sinistra, la struttura è così alta che l'acqua dei due corsi non si mescola facilmente. Nel secondo caso, mostrato nell'immagine in alto a sinistra, durante le fasi di piena, il fiume inferiore può invadere il corso d'acqua nel ponte, creando ristagni e potenziali complicazioni come la formazione di gorghi.

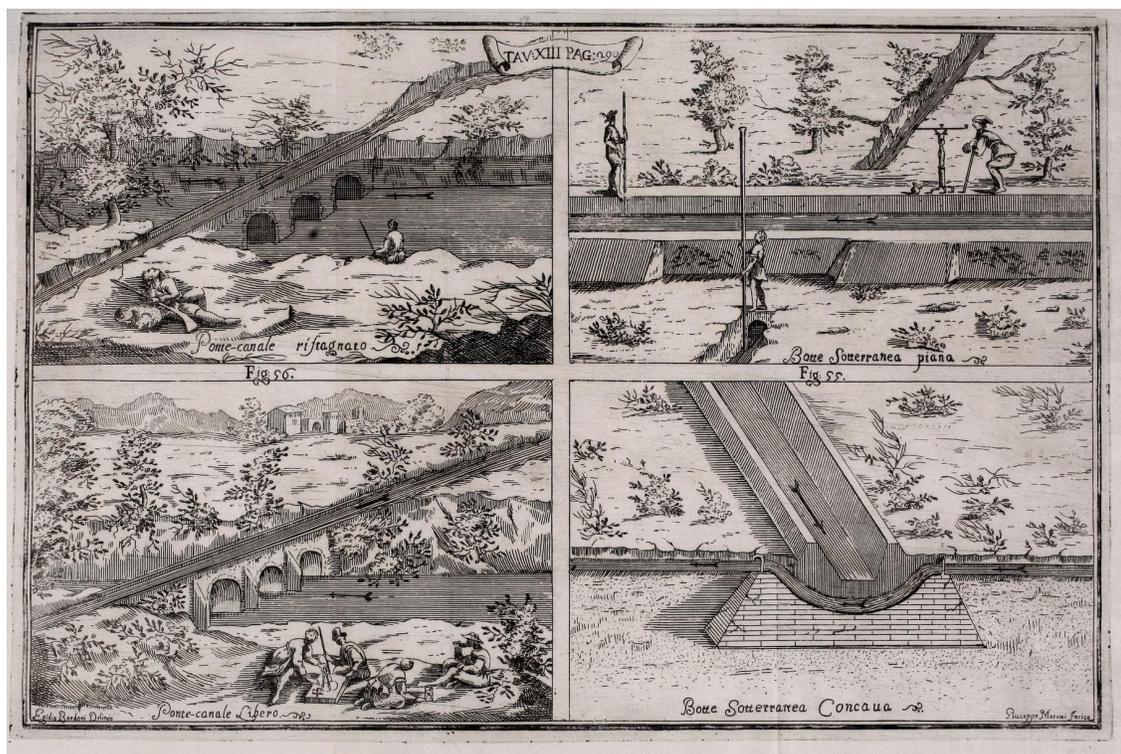


Figura B.13: Tavola XIII

La tavola quattordicesima contiene una sola figura, che è stata analizzata in dettaglio nella sezione 3.2.9: figura 3.16; si studia la chiusa del Reno di Casalecchio.



Figura B.14: Tavola XIII

L'ultima tavola presente nel libro è la quindicesima. La figura 59 è trattata nella sezione 3.2.9: figura 3.17, e riguarda il *sostegno* del Battiferro.

Nella figura 58, viene illustrato il caso di un fiume principale ABCD che, attraverso una chiusa nel punto A, genera il canale AD. Guglielmini spiega che, poiché il canale ha un flusso d'acqua inferiore, si verificherà una maggiore deposizione di detriti sul fondo, con un potenziale pericoloso aumento del livello dell'acqua. Questo problema può essere parzialmente risolto aumentando la pendenza del canale AD, ma in generale è sempre necessaria una buona escavazione del fondo tramite azioni manuali di manutenzione.

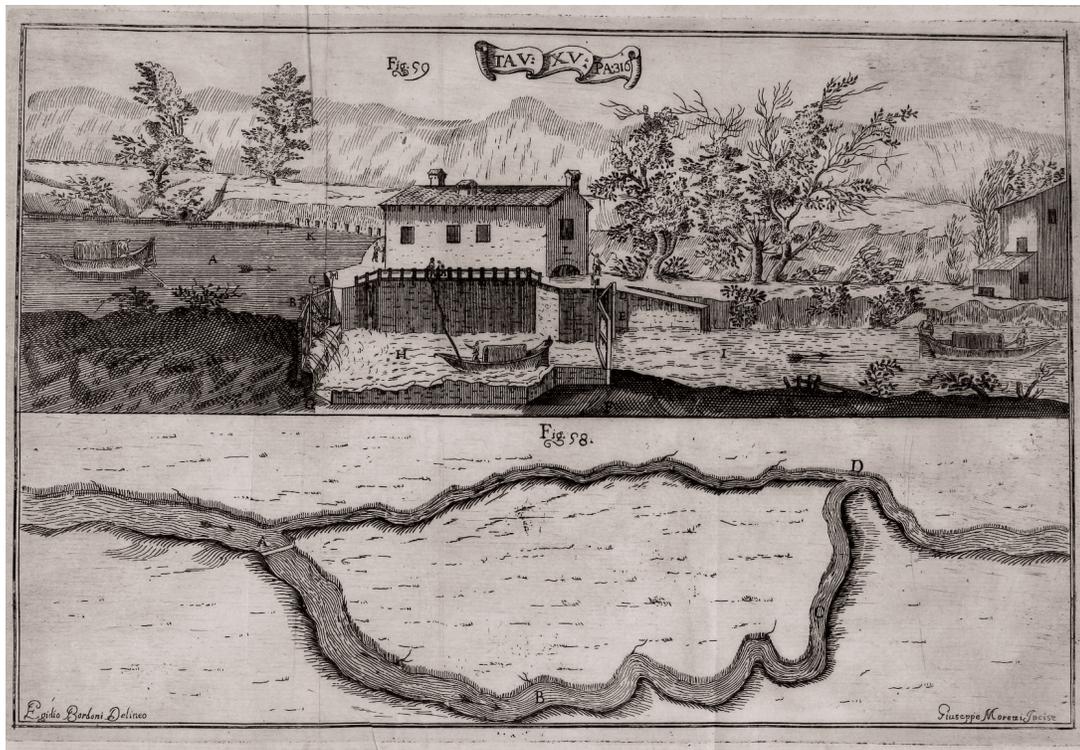


Figura B.15: Tavola XV

Ringraziamenti

Vorrei innanzitutto ringraziare il Prof. Eugenio Bertozzi, che non solo mi ha proposto il tema di questa tesi, ma ha anche fornito una guida preziosa durante il suo sviluppo.

Ringrazio la mia famiglia, per il loro sostegno costante e per aver sempre creduto nelle mie capacità e scelte.

Ringrazio i miei amici, che considero una seconda famiglia. Nella tesi triennale mi sono dimenticato di ringraziare Scott, anche se probabilmente era già compreso nella categoria degli amici.

Condivido l'augurio con cui Guglielmini concluse la sua prefazione: "E vivete felici".

Bibliografia

[Ashby, 1935] Ashby, T. (1935). *The Aqueducts Of Ancient Rome*. Clarendon Press.

[Barattieri, 1656] Barattieri, G. B. (1656). *Architettura d'acque*. stampa Camerale di Giovanni Bazachi.

[Bellone, 1990] Bellone, E. (1990). *Caos e armonia. Storia della fisica moderna e contemporanea*. UTET libreria.

[Calero, 2008] Calero, J. S. (2008). *The genesis of fluid mechanics 1640–1780*. Springer.

[Cavazza, 1988] Cavazza, M. (1988). Le accademie scientifiche. *Le sedi della cultura nell'Emilia Romagna*.

[Fiocca, 1998] Fiocca, A. (1998). Giambattista aleotti e la “scienza et arte delle acque”. *Giambattista Aleotti (1546-1636) e gli ingegneri del Rinascimento*, pp.47-101.

[Fontana, 2001] Fontana, M. T. (2001). *Bologna e l'invenzione delle acque. Saperi, arti e produzione tra '500 e '800*. Compositori.

[Galilei, 1638] Galilei, G. (1638). *Discorsi e dimostrazioni matematiche intorno a due nuove scienze*. Ludovico Elzeviro.

[Geymonat, 1963] Geymonat, L. (1963). *Galileo Galilei*. Piccola Biblioteca Einaudi.

- [Giacomelli, 1983] Giacomelli, A. (1983). Appunti per una rilettura storico-politica delle vicende idrauliche del primaro e del reno e delle bonifiche nell'età del governo pontificio. *La pianura e le acque tra Bologna e Ferrara. Un problema secolare*, pp.101-254.
- [Guareschi, 1914] Guareschi, I. (1914). *Domenico Guglielmini e la sua opera scientifica*. Unione Tipografico Editrice Torinese.
- [Guglielmini, 1697] Guglielmini, D. (1697). *Della natura de' fiumi, trattato fisico-matematico*. Ruinetti, Ludovico Maria.
- [le Bovier de Fontenelle, 1710] le Bovier de Fontenelle, B. (1710). Éloge de domenico guglielmini par fontenelle. *Histoire de l'Académie royale des sciences*.
- [Loffi, 2005] Loffi, S. G. (2005). *Piccola storia dell'idraulica*.
- [Maffioli, 1984] Maffioli, C. (1984). Guglielmini vs. papin (1691-1697). science in bologna at the end of the xviith century through a debate on hydraulics. *Janus*.
- [Maffioli, 1994] Maffioli, C. (1994). *Out of Galileo: The Science of Waters 1628-1718*. Erasmus Publishing.
- [Maffioli, 1995] Maffioli, C. (1995). L'idraulica di giovan battista aleotti. appunti preliminari. *Giovan Battista Aleotti (1546-1636), Seminario di Studi, III sessione*, pp.166-180.
- [Maffioli, 1998] Maffioli, C. (1998). La controversia tra ferrara e bologna sulle acque del reno. l'ingresso dei matematici (1578-1625). *Giambattista Aleotti e gli ingegneri del Rinascimento*, pp.239-267.
- [Maffioli, 2000] Maffioli, C. (2000). Gli albori della fisica moderna e l'idraulica del tardo rinascimento. *Atti del XIX Congresso Nazionale di Storia della Fisica e dell'Astronomia*, pp.109-128.

- [Manfredi, 1821] Manfredi, E. (1821). *Della natura de' fiumi trattato fisico matematico di Domenico Guglielmini con le annotazioni di Eustachio Manfredi*. Dalla Società Tipografica de' Classici Italiani.
- [Pallotti, 1983] Pallotti, V. (1983). Domenico guglielmini soprintendente alle acque. *Problemi d'acque a Bologna in età moderna, Bologna, Istituto per la storia di Bologna*.
- [Rossi, 2017] Rossi, P. (2017). *I filosofi e le macchine 1400-1700*.
- [Rouse and Ince, 1963] Rouse, H. and Ince, S. (1963). *History of hydraulics*. Dover Publications, unabridged and corrected republication of 1957 edition.
- [Saccone, 1982] Saccone, S. (1982). Giovanni fantuzzi e il fondo “affari d'acque” nella biblioteca comunale dell'archiginnasio. *L'archiginnasio*, pp.383-423.
- [Salaroli, 1624] Salaroli, O. (1624). *Discorso sopra l'inondatione dell'acque del bolognese*, pp.6-8. Nicolò Tebaldini.
- [Shea, 2001] Shea, W. R. (2001). Galileo and atomism. *Acta Philosophica*, 10(2):257–272.
- [Tokaty, 1994] Tokaty, G. A. (1994). *A History and Philosophy of Fluid Mechanics*. Dover Publications.