POLITECNICO DI TORINO
Repository ISTITUZIONALE

A prova di bomba. Ingegneri, architetti e teorie sulle volte in un cantiere militare di metà Settecento

Original
A prova di bomba. Ingegneri, architetti e teorie sulle volte in un cantiere militare di metà Settecento / Piccoli, E.; Tocci, C.. - In: ARCHISTOR. - ISSN 2384-8898. - 2019:12(2019), pp. 212-251. [10.14633/AHR139]

Availability:
This version is available at: 11583/2813602 since: 2020-04-20T01:53:27Z

Publisher:
Università degli Studi Mediterranea di Reggio Calabria

Published
DOI:10.14633/AHR139

Terms of use:

This article is made available under terms and conditions as specified in the corresponding bibliographic description in the repository

Publisher copyright

(Article begins on next page)

16 April 2024

Bombproof. Engineers, Architects and Theories on Vaulted Structures in a mid-18th Century Military Construction Site

Edoardo Piccoli, Cesare Tocci
edoardo.piccoli@polito.it, cesare.tocci@polito.it

The construction of the new Citadel in Alessandria, since the 1730s, sparked several debates among the different actors involved in the project. Among the themes that were discussed, there are issues that are now considered crucial to the development of construction science in the 18th Century: from foundation systems to the form of vaulted structures.
This essay considers the complex debate that developed on the best form to assign to the "bombproof" vaults of the buildings to be erected inside the fortified perimeter. In 1756, engineers, architects and State administrators met in a "congress" to discuss whether semi-circular or elliptical designs were to be preferred: while on the one hand this meeting highlighted a situation of crisis, on the other hand it became a favourable occasion of improvement, and promotion of a truly scientific approach to construction.
The need to counteract the effects of the concentrated force due to the bomb impact on the vault extrados introduced a new and never before considered factor, in a debate on vault design which was by then widespread. In respect to the theories (notably Philippe De La Hire's) then considered as "state of the art", the problem was approached by considering the newest theoretical developments in balistics. The problem is analyzed by a close reading of the expertises, leading to more general observations on the relationship between science, technology and the architectural professions in the 18th Century.

AHR VI (2019) n. 12 ISSN 2384-8898
DOI: 10.14633/AHR139

A prova di bomba. Ingegneri, architetti e teorie sulle volte in un cantiere militare di metà Settecento

Edoardo Piccoli, Cesare Tocci

La conservazione quasi integrale dell'archivio dell'Azienda generale di Fabbriche e Fortificazioni[1], ente preposto alla gestione dei cantieri di Stato, militari e civili, nel Piemonte del Settecento, rende oggi disponibili dei fondi documentari piuttosto utili per lo studio della storia dell'architettura e della costruzione. Le diverse serie dell'archivio dell'Azienda restituiscono un ritratto articolato delle pratiche di cantiere e dei saperi che intervengono nel sistema dei cantieri pubblici e piazzeforti militari[2], con particolare riferimento alla registrazione di processi decisionali e di contratti, ma anche

1. Archivio di Stato di Torino, sezioni Riunite (ASTR), Azienda generale delle fabbriche e fortificazioni, e Archivio di Stato di Torino, sezione Corte (ASTC), Materie militari per categorie, Intendenza delle Fabbriche e Fortificazioni; per un approfondimento su questa fonte, vedi Caterino *et alii* 2018. La ricerca che qui presentiamo è stata svolta nell'ambito di un contratto di ricerca tra il Politecnico di Torino, attraverso il centro interdipartimentale FULL, e il Ministero dei Beni e delle Attività Culturali e del Turismo, Segretariato Regionale per il Piemonte, sulla storia della costruzione della Cittadella di Alessandria (coordinatori, Edoardo Piccoli e Cesare Tocci; con Roberto Caterino ed Elena Zanet). Una prima versione di questo testo è stata presentata al convegno *La perizia in architettura (Francia e Italia, secoli XVII-XVIII)*, palazzo Badoer, Venezia, 20-21 maggio 2019. I paragrafi: *Introduzione*; *Il quartiere* […]; *Ritorno* […] sono di Edoardo Piccoli; il paragrafo: *Una battaglia* […] è di Cesare Tocci; l'*Epilogo* è comune.

2. Le informazioni che questa fonte restituisce devono essere interpretate tenendo conto dei fini, e delle procedure, della burocrazia di Stato che li ha prodotti. Non per caso, emerge dai documenti una costante tendenza alla conservazione dello *status quo*: i conflitti interni vengono smorzati; il funzionamento della macchina amministrativa è rappresentato come privo di inceppamenti; le comunicazioni tra centro e periferia, quasi mai perturbate da incidenti e incomprensioni.

delle diverse forme di *expertise* e di contenzioso: dalle controversie legali (cui è dedicata una serie specifica di Atti giudiziali) ai contrasti sulle tecniche costruttive; dalle prove sui materiali, fino alle perizie ordinate a seguito di dissesti o crolli.

L'accentramento dei processi decisionali e la concezione della costruzione come di un fatto complesso ma ripetibile facevano sì che, idealmente, da un problema specifico analizzato e discusso nella sede centrale si potessero trarre indicazioni per i cantieri dell'intero Stato[3]: così che una discussione intorno a una questione locale (la miglior forma di una volta, la ricostruzione dell'arcata di un ponte, la scelta di un tipo di malta) poteva essere considerata, all'interno dell'Azienda, alla stregua di un investimento, un modo per trasferire saperi tecnici aggiornati all'interno dell'amministrazione superandone le inerzie e, diremmo oggi, innescando processi di innovazione. Di questi, del resto, c'era forte bisogno. Al di là del mito della propria efficienza, le macchine tecniche che controllavano i cantieri militari di antico regime erano, come sottolineano molti studiosi da Janis Langins a Walter Barberis e Giovanni Cerino Badone, macchine fondamentalmente conservatrici[4].

Si è identificato da tempo a livello politico, nel ministro Giambattista Bogino[5], uno dei responsabili del clima favorevole alla promozione della cultura scientifica, in combinazione con la riforma amministrativa, che s'instaura nel regno sabaudo nei decenni centrali del Settecento, e in particolar modo negli anni che seguono la fine della guerra di successione austriaca (1748). Il Ministro, oltre a dedicarsi al consolidamento del corpo degli ingegneri e delle scuole di artiglieria, dove nel 1755 il diciannovenne Luigi Lagrange veniva assunto come maestro di matematica, promuoveva «i calcoli del fisico G.B. Beccaria per fissare la meridiana del Piemonte [...], gli esperimenti idraulici del professore di matematica Michelotti [...]; mandava il capitano d'artiglieria conte di Robilant […] a studiare […] le scuole di metallurgia della Sassonia, dell'Hannover»[6].

3. Così, ad esempio, si esprime l'architetto Giovanni Battista Borra nel 1761, a proposito degli "esperimenti" condotti sulle fondazioni di una nuova caserma: «I riflessi fatti sul nuovo Quartiere di St. Carlo nella Cittadella d'Alessandria *si troveranno sempre vantaggiosi al Regio Servizio qualvolta dalle osservazioni fattesi* [...] *saremo convinti che una determinata grossezza tanto di volta che di massiccio sia bastevole à resistere»* (corsivo degli autori. ASTC, Materie militari, Imprese, mazzo 13, relazione del 12 gennaio 1761).

4. Barberis 1988; Langins 2004, Cerino Badone 2014.

5. Quazza 1957; su Bogino, lo stesso Quazza è autore della voce biografica nel *Dizionario biografico degli italiani.* Bogino è dal 1742 Primo Segretario di guerra; Ministro di stato dal 1750. Negli anni '50 è l'uomo chiave del governo, il "padrone di tutta la baracca" (così Emmanuel Le Roy Ladurie definiva il ministro francese Étienne-François de Choiseul, a cui Bogino fu paragonato dai suoi contemporanei; Le Roy Ladurie 1991, p. 166).

6. Quazza 1969.

Si veniva così a costituire una élite di "scienziati-tecnocrati", corrispondenti con personalità di spicco in Europa, intorno a cui si raccoglieva un secondo cerchio di ingegneri e tecnici selezionati, magari di minor levatura, ma essenziali nel trasferimento delle conoscenze più avanzate sul piano pratico, e locale. Queste dinamiche non riguardavano soltanto la sfera militare ma erano fortemente orientate verso di essa, data la centralità che l'esercito rivestiva nel Regno di Sardegna e la volontà, da parte dello stesso Bogino, di esercitare un controllo diretto dei principali cantieri di fortificazione[7]: tra le opere infrastrutturali intraprese dallo Stato, le più importanti sul piano strategico e le più costose.

In questa congiuntura assume una certa rilevanza il cantiere della Cittadella di Alessandria, grande fortezza (figg. 1-2) edificata a partire dai primi anni trenta del Settecento a presidio dei territori sabaudi di nuovo acquisto[8]. A più riprese, e soprattutto dalla metà del secolo, dopo la fine della guerra di successione austriaca, la costruzione della Cittadella diviene occasione di dibattiti accesi tra tecnici, funzionari, impresari. Alcune delle controversie coinvolgono i vertici dello stato, e toccano temi che la storiografia oggi considera "classici" per lo sviluppo di una scienza del costruire: dai sistemi di fondazione[9] alla definizione di forma e spessore delle volte, fino alla messa a punto di metodologie analitiche di misura e stima dei costi. In questo saggio analizzeremo il dibattito che si sviluppa intorno al disegno delle volte "a prova di bomba"[10] dei grandi edifici costruiti all'interno del perimetro fortificato.

7. La scelta è da inquadrarsi nell'attività di controllo del Consiglio di Finanze, di cui Bogino era membro di diritto. Sulla centralità della cultura militare e dell'esercito nello Stato sabaudo sei-settecentesco: Bianchi 2002; Bianchi 2007.

8. Marotta 1991; Cerino Badone 2014; Piccoli *et alii* 2018, e relative bibliografie. Sui contratti nell'archivio dell'Azienda dedicati ad Alessandria: Nurpeissov 2017-2018.

9. Per il dibattito sui sistemi di fondazioni su pali vedi Piccoli *et alii* 2019.

10. Nel corso dell'età moderna la necessità di rendere "alla prova della bomba" un numero crescente di edifici militari (in aggiunta alle opere difensive pure, dai bastioni alle cortine ai ripari sotterranei, che nascevano già con questo requisito) era andata di pari passo con lo sviluppo di un'architettura via via più specializzata, oggetto di una riflessione tipologica specifica. I modi di rendere un edificio isolato "alla prova" nel Piemonte del Settecento erano fondamentalmente due, e si basavano entrambi sull'uso di massicce volte a protezione dell'ultimo piano. In un primo caso, l'estradosso delle volte poteva essere spianato a formare una terrazza, protetta da un tetto provvisorio in carpenteria: in caso di assedio il tetto veniva smantellato e la terrazza coperta da uno spesso strato di terra. Oppure, sopra le volte si realizzava un "massiccio" murario di copertura a formare due falde inclinate, su cui veniva direttamente posato il manto in coppi o lastre di pietra. Un esempio tipico – e forse l'origine – di questa seconda tipologia costruttiva è il modello di polveriera elaborato dal Vauban, ripubblicato da Bélidor nei suoi trattati, e diffuso un po' ovunque in Europa nel corso del XVIII secolo. Balliet 2018; Fara 2014, Appendice C; Lluis i Ginovart 2015.

Figura. 1. Gaetano Quaglia, Pianta della città e cittadella d'Alessandria, s.d. [fine XVIII secolo]. Archivio di Stato di Torino, Carte topografiche e disegni, Carte topografiche segrete, Alessandria 25 A I Rosso.

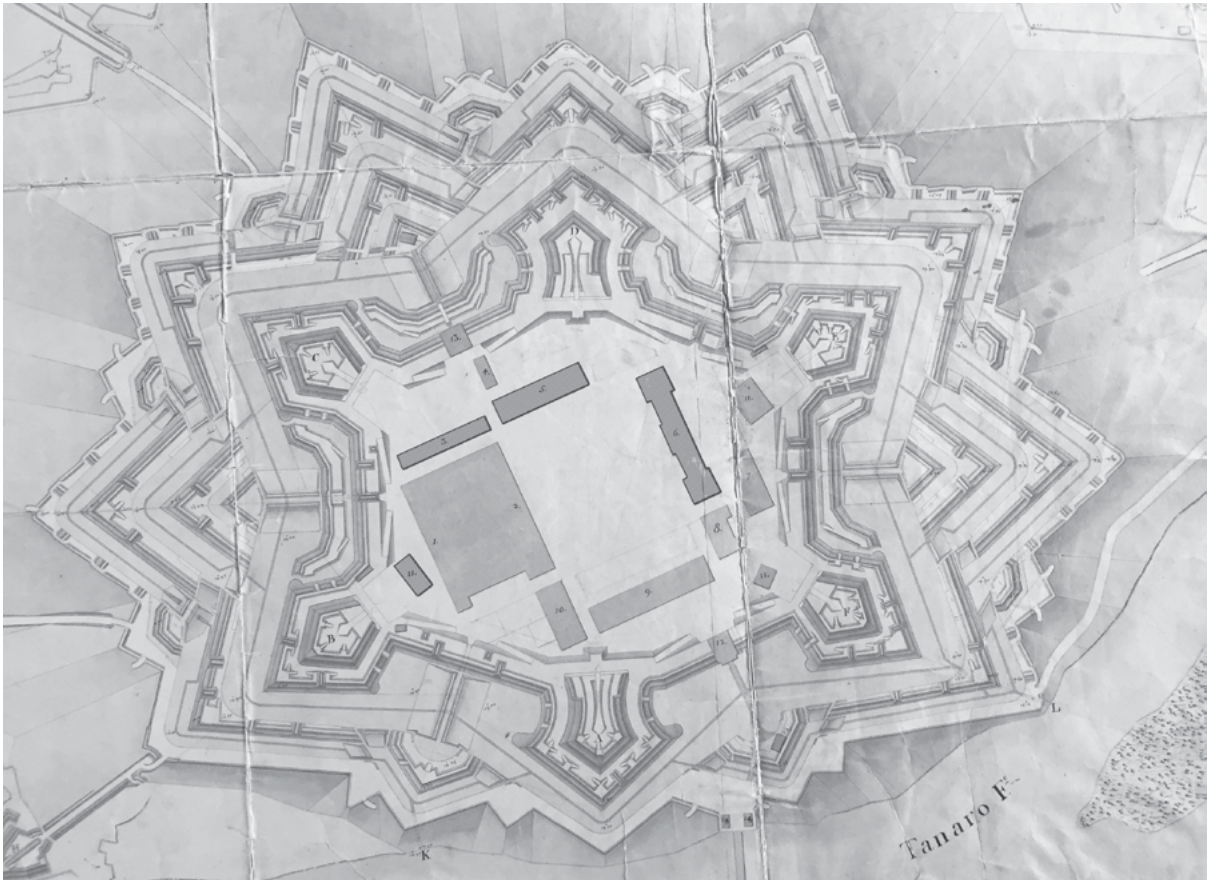

Figura 2. Giò Carbonazzo, *Piano della cittadella d'Alessandria indicante il suo stato alla fine di settembre MDCCCXV*, dettaglio; sono evidenziati gli edifici citati nel testo: i quartieri di San Tommaso (n. 3) e San Carlo (5), il palazzo del Governatore (6), la polveriera di San Michele (11). Roma, Istituto Storico e di Cultura dell'Arma del Genio, FT LXII-B, n. 3939.

Il quartiere di San Tommaso nella Cittadella di Alessandria: la messa in discussione del progetto di Bertola e il problema delle volte "alla prova"

Nella primavera del 1756 ad Alessandria si avviava la fase finale di costruzione del quartiere di San Tommaso, la prima grande caserma a prova di bomba a essere costruita all'interno della nuova Cittadella. L'edificio sorgeva nei pressi della porta verso Asti, non lontano da una polveriera, anch'essa "alla prova", costruita in quegli stessi anni seguendo quasi alla lettera il modello di magazzino da polvere pubblicato da Bélidor nel suo trattato. Anche il quartiere per i soldati si allineava ai modelli distributivi per lo più di origine francese allora in circolazione[11]. Si trattava di un edificio in linea di poco meno di 100 m di lunghezza, a manica doppia, con camerate nel corpo centrale e padiglioni leggermente rialzati alle estremità (figg. 3-7). Il sistema prescelto per rendere la fabbrica a prova di bomba era il più robusto tra quelli allora in uso, con un "massiccio" in muratura, sovrapposto alle volte sommitali, che formava le falde della copertura; i coppi appoggiavano direttamente su "coltellate" di mattoni, senza fare uso di legname. Il 28 aprile 1756, a Torino, presso la sede centrale dell'Azienda delle fabbriche e fortificazioni, si firmava un contratto pluriennale con gli impresari Giuseppe Trolli, Francesco Ambrosoglio e Giacomo Righino, volto a completare l'edificio, di cui erano state già realizzate le murature in elevato[12]. Come prescritto dai regolamenti dell'Azienda, gli impresari sottoscrissero un capitolato piuttosto dettagliato, controfirmando i disegni di progetto (oggi perduti) e prendendo impegni precisi sui tempi e costi da rispettare.

I lavori prendevano subito il via. Tuttavia, già nel mese di maggio, mentre il governatore della piazza sollecitava l'invio dei disegni esecutivi per le centine delle grandi volte "alla prova"[13], dovettero sorgere dei contrasti relativamente al tipo di curvatura da adottare. I documenti non ci consentono di ricostruire gli eventi con precisione, ma si trattò di una vera crisi, che coinvolse anche i vertici dell'Azienda, tanto che il 15 giugno un Regio biglietto autorizzava a variare la «struttura delle volte del nuovo Quartiere»[14] e a rinegoziare il contratto.

Ora, non è chiaro chi abbia per primo sollevato la questione: gli ingegneri militari non sono persone inclini al dubbio, e modificare i termini di un contratto già firmato era un atto contrario

11. Dallemagne 1990.

12. ASTR, Archivio fabbriche e fortificazioni, Contratti, 1756, c. 316; Per la cronologia del cantiere del San Tommaso, avviato nel 1749, Rossi 2018-2019.

13. *Ivi,* Lettere provincia di Alessandria, 1756: 29 maggio 1756, lettera del Commendatore Mattone: «a questo general ufficio resta necessario d'avere con la maggior prontezza possibile la nota con la misura … de centini… per le armature delle volte del nuovo quartiere di S. Tomaso».

14. *Ivi,* Regi biglietti, 1756, c. 23.

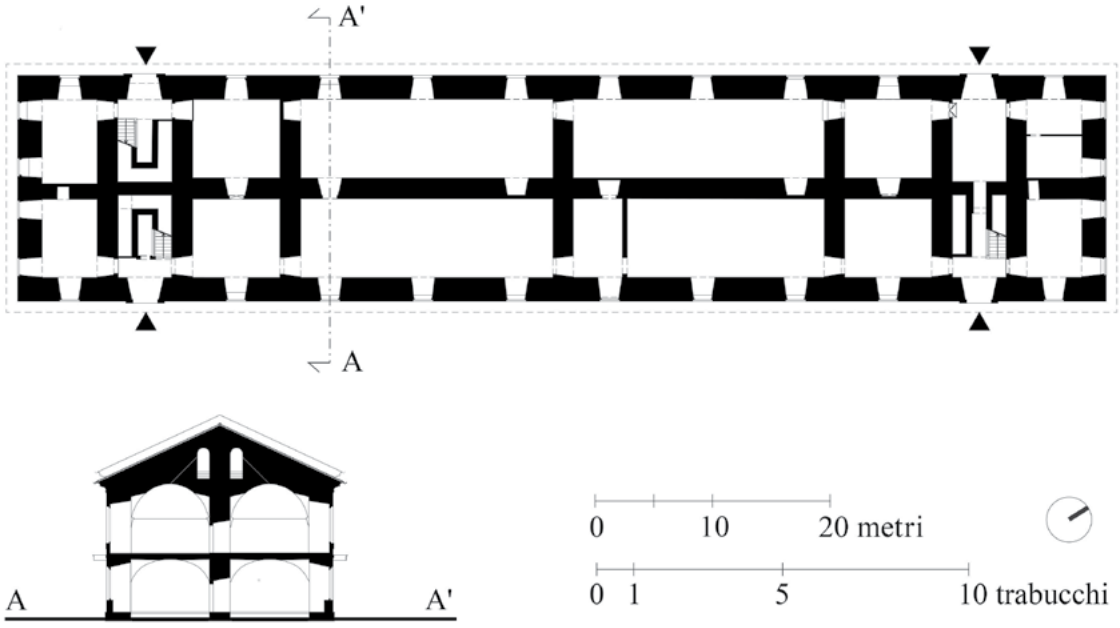

Figura 3. Il quartiere di San Tommaso nella Cittadella di Alessandria, pianta del piano terreno e sezione trasversale (disegno A. Rossi, E. Zanet).

a ogni principio di buona amministrazione. Una spiegazione per questo ripensamento potrebbe però stare nella morte, un anno prima (22 maggio 1755), del progettista del quartiere e principale responsabile di tutti i progetti per Alessandria, il settantanovenne Ignazio Bertola, Primo ingegnere di Sua Maestà, e generale di artiglieria[15]. Con la scomparsa di questa figura accentratrice forse era finito – o si era voluto che finisse – anche un modo tradizionale di comandare, una certa chiusura

15. Ignazio Bertola aveva accumulato negli anni più titoli, cariche e funzioni: Conte di Exilles, generale di fanteria, primo ingegnere di Sua Maestà, direttore del corpo degli ingegneri militari e delle scuole teoriche d'artiglieria. Di fatto, nella fase finale della sua carriera Bertola dirigeva l'integralità dell'attività di progettazione delle fortezze sul territorio dello Stato. La valutazione ex-post dell'efficacia dell'architettura militare bertoliana si attesta su posizioni pressoché opposte in Cerino Badone 2014 (che valuta molto negativamente le sue fortificazioni "alla prova del fuoco") e Fara 2015 (che è più interessato alla qualità del processo intellettuale e progettuale che le legittima).

Figura 4. Veduta da sud del quartiere di San Tommaso
(foto Rildoc - Politecnico di Torino, 2017).

Nella pagina successiva, figura 5. Quartiere di San Tommaso:
il fronte nord-ovest del padiglione verso le mura
(foto E. Piccoli, 2017).

del corpo degli ingegneri su se stesso. Nel vuoto di potere che si era creato (Bertola è sostituito in alcune sue funzioni dall'ingegnere e colonnello Bernardino Pinto[16] ma quest'ultimo, di trent'anni più giovane e di grado inferiore, non poteva ereditare anche l'autorità dell'anziano generale) erano stati subito promulgati nuovi regolamenti per le scuole di artiglieria, mentre alcuni disegni di Bertola venivano sottoposti a critiche e revisioni[17], e così dev'essere, evidentemente, avvenuto anche per il quartiere di San Tommaso.

Il pericolo di una sospensione dei lavori imponeva una decisione in tempi rapidi, e il 27 giugno 1756, di fronte al potentissimo ministro Bogino, si svolgeva un congresso che vedeva contrapposte due distinte proposte progettuali, entrambe accompagnate da disegni e stime di costi. La prima, sostenuta dall'ingegnere Pinto, prevedeva volte a tutto sesto, in continuità con il capitolato originario; la seconda proponeva di mettere in opera volte del tutto diverse, a sesto ellittico rialzato[18]. L'autore della proposta era un architetto estraneo all'Azienda, Giovanni Battista Borra, la cui carriera atipica merita di essere qui ricordata[19]. Formatosi negli *atelier* di Juvarra e Vittone, Borra si era segnalato nel 1748 alla comunità scientifica torinese con una pubblicazione tecnica, il *Trattato sulla cognizione pratica delle resistenze*, edito dalla Stamperia Reale[20]. L'anno successivo, l'architetto era stato reclutato come disegnatore per la spedizione in Levante (1749-1750) degli inglesi Wood, Dawkins e Bouverie (che potevano averlo conosciuto alcuni anni prima, nella sua funzione di insegnante di disegno all'Accademia reale): la collaborazione all'edizione dei volumi su Palmyra e Baalbek nati da quel viaggio aveva consentito a Borra di stabilirsi per alcuni anni (dal dicembre del 1751 al 1755) in Inghilterra. Qui si era costruito una reputazione di disegnatore alla moda di interni, padiglioni da giardino e tempietti all'antica; ma è anche probabile che, nella vivacissima scena londinese, egli non avesse trascurato di aggiornarsi sui temi tecnici e relativi alla costruzione a cui aveva dedicato il suo libro del 1748. Per questo, anche se non sappiamo quali relazioni altolocate gli consentirono di sedersi di fronte al ministro nel maggio del 1756, tutto fa pensare che l'architetto potesse essere considerato come un consulente di eccezione, portatore di una cultura aggiornata e internazionale, in linea con gli obiettivi della cerchia del Bogino.

16. Su Lorenzo Bernardino Pinto (1704-1788), vedi Cerino Badone 2015.

17. *Ibidem.* A Demonte e Cuneo nel 1757 i progetti di Bertola verranno accantonati e sostituiti da quelli di Pinto (Navire 2010, p. 538). Anche la cooptazione del giovanissimo Lagrange, nel settembre 1755, come insegnante alle scuole teoriche d'artiglieria, potrebbe essere stata facilitata dal cambio di direzione.

18. Ovvero volte a profilo ellittico con l'asse maggiore disposto verticalmente.

19. Dardanello 2013.

20. Borra 1748; Benvenuto 1991, II, p. 400; Piccoli 2010; Chiorino 2014, p. 64.

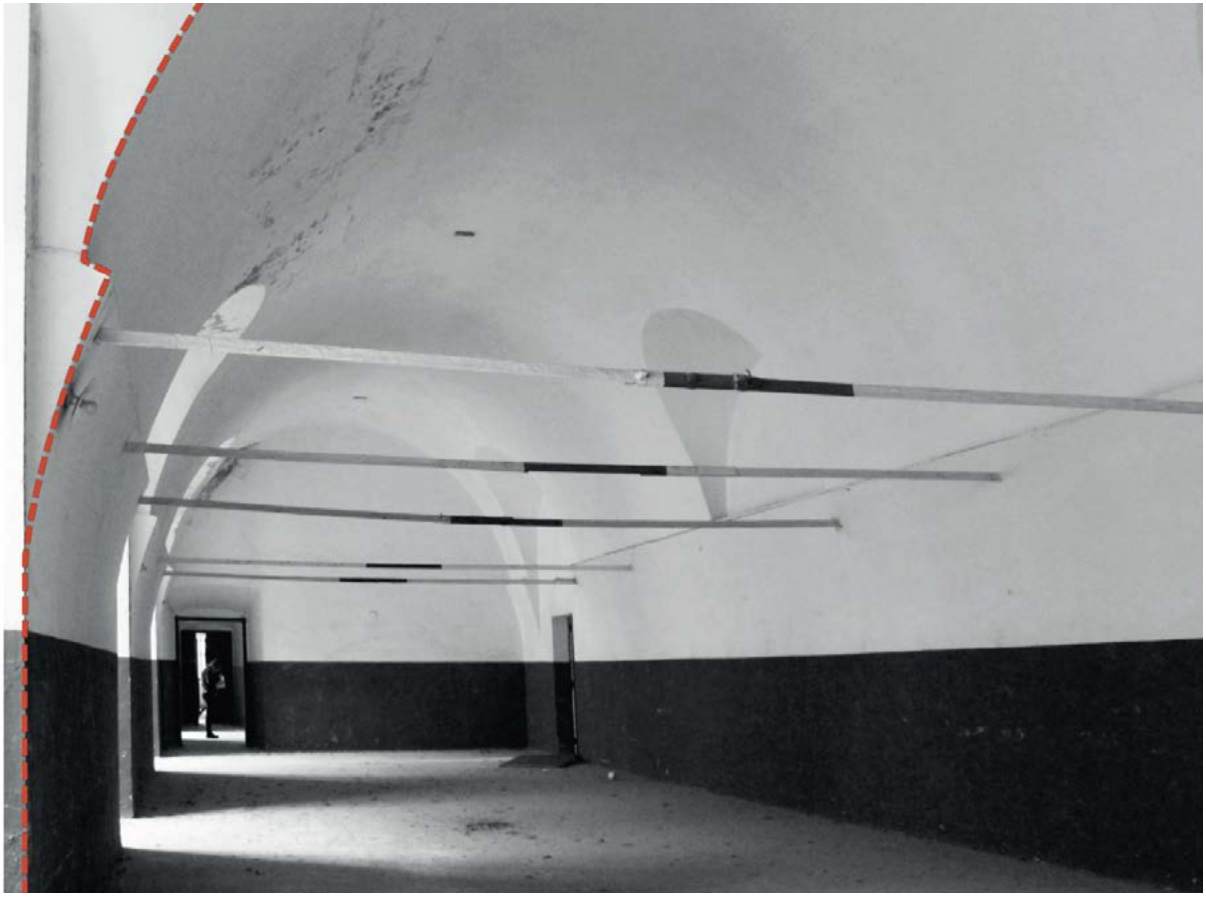

Figura 6. Le volte “alla prova”, a sesto ellittico rialzato, in un camerone al secondo piano del quartiere di San Tommaso; in evidenza, la scalettatura dell’imposta dovuta alla modifica del profilo intradossale (foto A. Rossi, 2018).

Nella pagina successiva, Figura 7.
Volte ribassate, non a prova di bomba, al primo piano del quartiere di San Tommaso (foto E. Zanet, 2018).

L'architetto e l'ingegnere si affrontavano di fronte a una ulteriore commissione di tre esperti. Ed è qui che si introduce un ulteriore scarto rispetto alla tradizione: se il primo dei tre, Antonio Felice De Vincenti, era un esperto ingegnere militare della vecchia scuola, gli altri due, Alessandro Vittorio Papacino d'Antoni e Francesco Domenico Michelotti[21], erano "uomini nuovi" boginiani: scienziati di Stato di primissimo rango, esponenti di una cultura sperimentale fondata sulle matematiche e maturata nell'ambito delle scuole di artiglieria. Il congresso, lo vedremo, avrebbe sancito l'approvazione del progetto di Borra: un nuovo contratto basato sulle raccomandazioni dell'architetto fu firmato appena tre giorni dopo, il 30 giugno. Ma a riprova dell'interesse dell'amministrazione di interinare anche le motivazioni di questa scelta, ai progettisti e ai tre "scienziati" venne comunque chiesto di consegnare alla Segreteria di Guerra le rispettive osservazioni per iscritto: le loro relazioni[22], accuratamente archiviate tra le *Materie militari* oggi all'Archivio di Stato di Torino (fig. 5), sono datate rispettivamente 27 giugno, 2 e 5 luglio 1756.

Una battaglia di pareri

Bernardino Pinto fu il primo a consegnare la propria perizia: la sua breve relazione è datata allo stesso giorno del congresso. Egli propone argomentazioni piuttosto semplici, proprie di un esperto di cantiere e di assedi, abituato al comando più che al dialogo, e sostenuto da una preparazione classica formata sui trattati. Principale autorità era il Bélidor, che nella *Science des Ingénieurs* si espresse, in effetti, a favore di volte "alla prova" a tutto sesto[23], citando anche a suo favore delle esperienze di guerra, puntualmente richiamate da Pinto: da un episodio dell'assedio di Landau (1702), dove volte a tutto sesto avrebbero resistito bene alle bombe, a un altro a Tournay (1709), dove poche cannonate avrebbero perforato una volta a sesto acuto, pur se coperta di terra.

Borra si prese qualche giorno in più, consegnando il 2 luglio una relazione più ampia, organizzata come una dimostrazione apparentemente rigorosa di statica. Il suo testo si articolava in definizioni, proposizioni e corollari secondo una consolidata tradizione dei libri di matematica dell'epoca, e

21. Su Antonio Felice De Vincenti (1690-1778), Francesco Domenico Michelotti (1710-1787), Alessandro Vittorio Papacino d'Antoni (1714-1786) vedi *infra* e inoltre Ferrone 1984; Bianchi 1996.

22. ASTC, Materie Militari, Imprese, m. 13, *1756 in 1761. Pareri tanto del Congresso, che de' Sig.i Caval.e Pinto, ed Architetti Borra, e Michelotti, con Osservazioni, e Risposte riguardanti la Cittadella d'Alessandria.* La relazione di Pinto non ha titolo; Borra intitola la sua *Osservazioni sovra le Resistenze delle volte* (d'ora in poi: *Osservazioni);* la terza relazione è titolata semplicemente *Sentimento rimesso alla Secreteria di Guerra li 9. Luglio 1756* (d'ora in poi: S*entimento*).

23. Bélidor 1729, Liv. 2, p. 33: *Trouver l'épaisseur qu'il faut donner aux piés-droits d'une Voûte Elliptique;* Liv. 4, p. 62: *Des Magazins à Poudre* […].

usava, in luogo dell'approccio algebrico che accomuna i contemporanei lavori sulla statica degli archi (Philippe De La Hire, Bernard Forest de Bélidor, ecc.), uno stile geometrico-retorico che riprendeva essenzialmente quello del suo *Trattato*[24].

È evidente che la finalità del testo di Borra non era tanto quella di dimostrare la maggiore efficienza di una tipologia voltata rispetto a un'altra – sostenendo una decisione che, comunque, era già stata presa in suo favore – quanto quella di attestare la solidità della propria competenza tecnica e per questa via rivendicare un più diretto coinvolgimento nell'immenso cantiere della cittadella. Da questo punto di vista la sua situazione era diametralmente opposta a quella di Pinto che difendeva, per così dire d'ufficio e senza nessun entusiasmo, una soluzione che era già stata scartata.

Tuttavia, le argomentazioni della perizia di Borra sono analoghe a quelle di cui egli fa uso nel suo *Trattato,* e non meno confuse.

In entrambi i casi, infatti, è evidente come nonostante una generale comprensione di alcuni comportamenti statici basilari (supportata dalla conoscenza del testo di Bélidor e, sembra, dai fondamentali della matematica)[25], i ragionamenti meccanici risultino spesso insussistenti e manchino di rigore nella successione delle argomentazioni deduttive. Per di più, mentre nel *Trattato* le proposizioni sono integralmente riportate e consentono non solo di seguire l'argomentazione ma anche di comprenderne facilmente i punti deboli, nella perizia per la Cittadella il riferimento implicito ad alcuni risultati "dimostrati" nel *Trattato* rende molti passaggi davvero criptici, quando non del tutto incomprensibili[26].

Per rispondere al quesito Borra richiama innanzitutto l'argomentazione con la quale nel *Trattato* aveva quantificato la spinta per le volte a tutto sesto[27]. Tale argomentazione parte sicuramente dalla conoscenza del sistema cinematico di De La Hire e Bélidor, del quale evidentemente Borra voleva riprodurre il risultato (spinta inclinata di 45 gradi); ma, a differenza di quest'ultimo (che, sebbene sbagliato, derivava da una

24. Borra 1748.

25. Nella valutazione del peso dei piedritti, contenuta nel *Trattato*, Borra estrae la radice quadrata con metodo grafico (*Ibidem,* parte II, tav. I, fig. 3).

26. Un esempio significativo del tenore delle argomentazioni della perizia di Borra è rappresentato dalla *Proposizione II* nella quale Borra propone (usiamo per chiarezza una terminologia moderna) la verifica a ribaltamento di una parete muraria sollecitata da una forza obliqua. Posto che si tratta di un problema di stabilità dell'equilibrio, anziché di resistenza del materiale (quest'ultima, peraltro, giustamente indicata come prerequisito necessario), Borra scompone correttamente la forza totale nelle sue componenti verticale e orizzontale ma non si accorge che, per il particolare schema esaminato, il ribaltamento è, in realtà, impossibile (qualora si escludano, come egli osserva, scompaginazioni interne del tessuto murario), poiché la forza cade all'interno della base di appoggio.

27. Aggiungendo una considerazione, non priva di interesse, a proposito della posizione effettiva del piano di imposta che consiste nell'escludere tutta la porzione di volta che insiste direttamente entro l'ingombro del piedritto (delimitata dalla retta AE; fig. 8, IV-V).

ipotesi di comportamento meccanico assai convincente, oltre che innovativa – lo scorrimento del cuneo di chiave verso il basso), il risultato di Borra viene ottenuto attraverso un ragionamento farraginoso e facilmente contestabile, privo della coerenza meccanica del modello originario degli studiosi francesi.

Nella formulazione di Borra la spinta complessiva dell'arco viene determinata combinando le direzioni di spinta dei diversi cunei[28], ovvero riducendole a una direzione comune che coincide semplicemente con la congiungente A-B i punti intradossali dell'arco in chiave e all'imposta (fig. 8). In questa formulazione non è chiara la posizione in cui la spinta deve essere applicata: la lettura del testo sembra suggerire una posizione diversa per la componente verticale (da localizzare sull'imposta dell'arco) e quella orizzontale (sul giunto a 45 gradi), a differenza del meccanismo di scorrimento di De La Hire e Bélidor, nel quale la stabilità del cinematismo era analizzata tenendo conto correttamente dei diversi bracci di leva delle forze in gioco (fig. 9)[29].

La stessa argomentazione viene poi ripetuta per la volta a sesto ellittico rialzato, evidenziando in maniera corretta, anche grazie alla espressività del disegno, il minore effetto spingente legato alla maggiore inclinazione della spinta sull'orizzontale.

Sebbene dunque sbagliata nelle ipotesi di partenza (l'effetto spingente dell'arco riprende il meccanismo di scorrimento postulato da De La Hire, quando Couplet aveva già introdotto, più di venti anni prima, il ben più pericoloso meccanismo flessionale), nella catena delle argomentazioni deduttive (la spinta totale è una incomprensibile combinazione di spinte parziali trattate separatamente) e, conseguentemente, nei risultati finali, la perizia di Borra è comunque in grado di spiegare la maggiore stabilità della volta a sesto ellittico rialzata rispetto a quella a tutto sesto, come conseguenza della minore spinta trasmessa ai piedritti. Ma, di là da questo risultato talmente ovvio da risultare quasi banale, nulla si dice sul merito del quesito che era stato sollecitato nel congresso, ovvero quale profilo fosse più adatto a resistere all'impatto delle bombe: problema concettualmente diverso, nella sua sostanza meccanica, e non completamente riducibile a quello della stabilità delle strutture di piedritto delle volte.

Eppure anche su questo problema qualcosa si poteva forse dire[30].

La statica degli archi era, all'epoca, un problema sostanzialmente noto nei suoi contenuti essenziali: ai lavori di De La Hire[31], ripresi nella *Science* di Bélidor, erano già state affiancate le due memorie di

28. Già queste di problematica definizione, indipendenti come sono da qualsiasi interazione tra i cunei stessi e identificate con la direzione della congiungente i due spigoli di intradosso di ciascuno di essi.

29. Su questo vedi, ad esempio: Benvenuto 1991; Giuffrè 1986.

30. E venne effettivamente detto nella relazione di Papacino d'Antoni, Michelotti e De Vincenti. Da questo punto di vista la trattazione statica di Borra, sia quella della perizia sia, in termini più generali, quella del *Trattato*, è decisamente deludente.

31. De La Hire 1695, 1731 (1712).

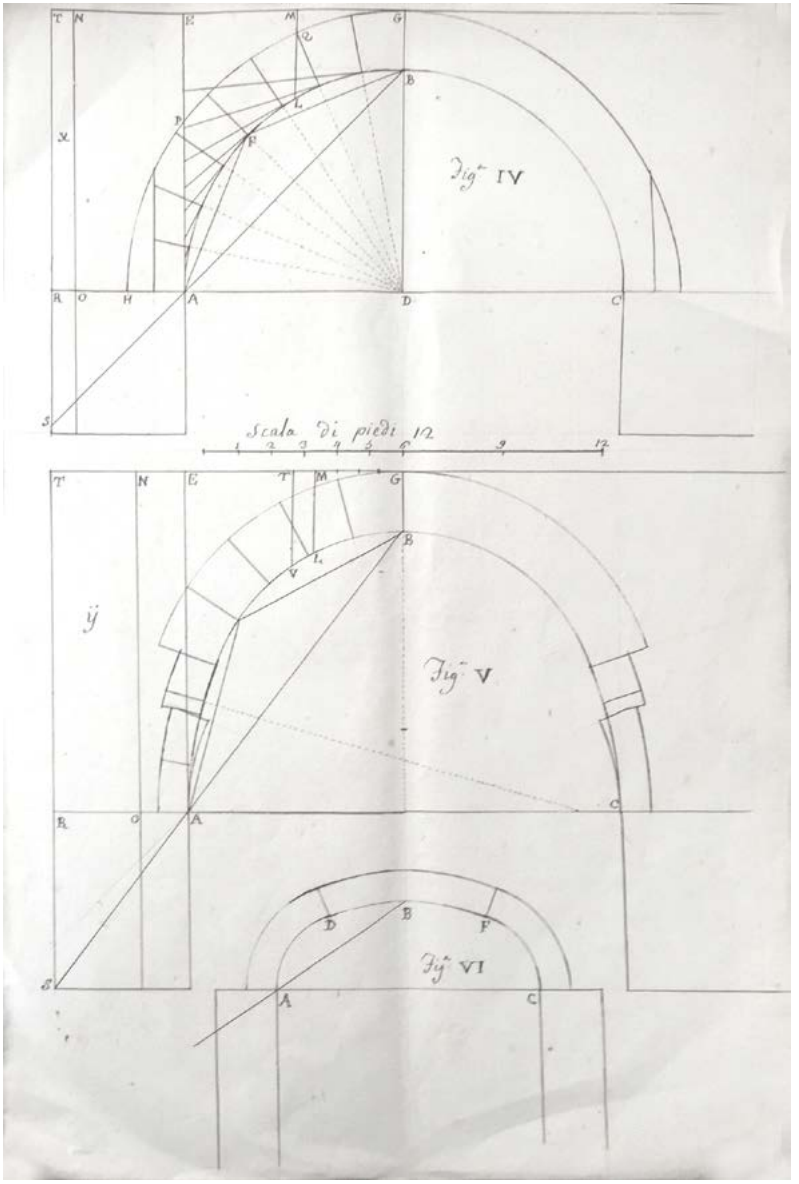

Figura 8. Giovan Battista Borra, calcolo della spinta per volte a sesto circolare ed ellittico. Archivio di Stato di Torino, Sezione Corte, Materie Militari, Imprese militari, mazzo 13, *Osservazioni*.

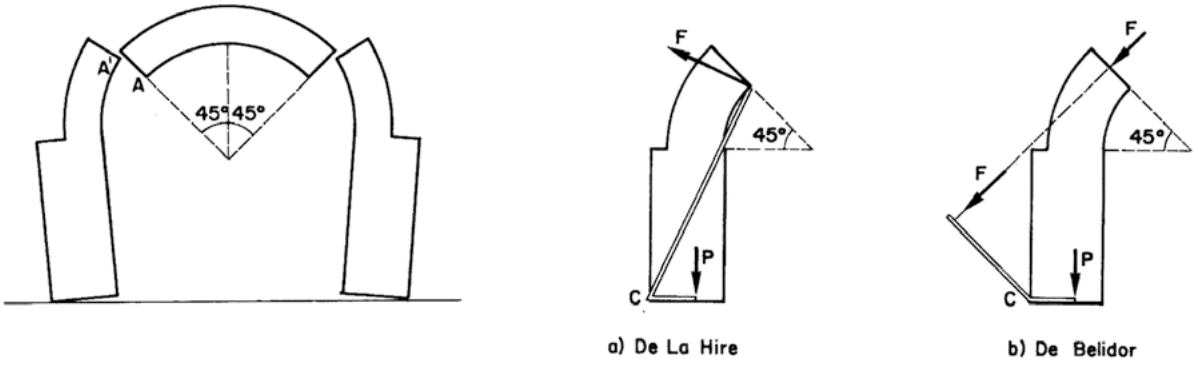

Figura 9. Meccanismo di collasso dell'arco secondo De La Hire e corrispondenti leve angolari per il calcolo di stabilità nelle ipotesi di De la Hire (a sinistra) e Bélidor (a destra) (da Giuffré 1986, pp. 204-205).

Couplet[32], e negli stessi anni in cui Borra componeva il suo *Trattato* la celebre *querelle s*ulla stabilità della cupola di S. Pietro dava origine a due delle più straordinarie (e tra le prime) applicazioni della meccanica all'architettura, ad opera di Ruggero Giuseppe Boscovich e Giovanni Poleni.[33] Il confronto tra questi lavori e quello di Borra è impietoso. Tuttavia sarebbe ingeneroso rigettare il valore delle opere di "statica" di Borra, *Trattato* e perizie, sulla base del loro modesto valore scientifico. Ciò che sembra infatti interessante è la chiara percezione da parte dell'architetto Borra della necessità di un approccio quantitativo all'architettura in cui le antiche regole di proporzionamento geometrico siano finalmente

32. Couplet 1731, Couplet 1732.

33. L'analisi dei tre matematici è una raffinatissima applicazione del principio dei lavori virtuali della quale è stata a lungo sottovalutata la ricchezza meccanica, e fraintesa la correttezza, sulla base di alcune apparenti incongruenze (su questo vedi Capecchi, Tocci 2011); la verifica di Poleni è una elegante traduzione sperimentale della analogia tra arco e fune, allora impropriamente attribuita a James Stirling (era in realtà dovuta a Robert Hooke). Si tratta, in entrambi i casi, di lavori molto specialistici, relativi a sviluppi della meccanica recenti (appena qualche decennio prima), probabilmente fuori della portata – per tornare al caso di Alessandria – non solo di Borra ma anche di Pinto. Non è un caso che Papacino d'Antoni, Michelotti e De Vincenti, due dei quali avrebbero sicuramente avuto la possibilità (e l'interesse) di conoscere quei lavori e, soprattutto, gli strumenti per maneggiarli, ricorrano al modello di De La Hire – tanto potente dal punto di vista concettuale quanto semplice nei suoi esiti applicativi – sia pure arricchendolo di quegli aspetti che costituivano la novità del problema, ovvero la considerazione delle azioni indotte dall'urto delle bombe.

supportate (o sovvertite) dai risultati rigorosi consentiti dalla *Nouvelle Mécanique*. In questo Borra è indubitabilmente allineato con alcune delle posizioni più avanzate della sua epoca, persuaso della ineludibilità di un nuovo approccio alla progettazione dell'architettura e aggiornato sulla letteratura tecnica recente anche se non dotato delle competenze necessarie per dare un personale contributo. Da questo punto di vista è emblematico il modo in cui, nella perizia di cui ci stiamo occupando, dopo aver dimostrato la minor spinta esercitata dalle volte a sesto ellittico, Borra controbatte alle "autorità" addotte da Pinto, scendendo sullo stesso campo del contendente e dando prova di essere aggiornato su temi tipicamente ingegneristici che egli non vedeva evidentemente disgiunti dal suo lavoro di architetto. Innanzitutto, fa notare che l'ingegnere piemontese ha commesso un errore: quando Bélidor parla di minor forza della volta ellittica, si riferisce infatti a una volta ellittica a sesto ribassato: «tutto all'opposto – osserva Borra – avviene nel caso nostro»[34]. Aggiunge poi altre considerazioni, anche queste finalizzate alla demolizione della tesi dell'avversario e basate su citazioni non banali[35] anche se, come si è detto, apparentemente volte più a dimostrare la propria competenza che non a sostenere reali esigenze argomentative[36].

Rispetto alle posizioni di Pinto e Borra, la posizione dei tre scienziati – Papacino d'Antoni, Michelotti e De Vincenti – chiamati ad arbitrare la controversia è l'unica che sulla natura tecnica della questione esprime un parere di grande interesse non solo per il problema in sé ma anche dal punto di vista più generale del rapporto tra meccanica e architettura.

Nel loro *Sentimento*, consegnato il 5 luglio e articolato in sei punti, essi sottolineano innanzitutto come entrambi i progettisti, sia l'ingegnere sia l'architetto, si siano allineati ai saperi condivisi delle rispettive professioni[37], suggerendo in tal modo che si tratta di approcci che, nella loro parzialità, perdono di vista la globalità e complessità del problema. Entrambe le argomentazioni, concedono, sono infatti valide limitatamente a condizioni particolari ed esse potrebbero condurre ad esiti diversi

34. Nella proposta progettuale di Borra, l'asse maggiore dell'ellisse che definisce il profilo della volta è verticale, mentre nella volta di Bélidor è orizzontale: «la volta del Bellidor è concepita ne' termini che la di lei altezza non sia, che i due terzi del semidiametro del vano, e per questo la nomina *voute elliptique où surbaissée* […] e la differenza è tale, come se all'occasione che dovessesi pontellare un muro nello stesso trave uno volesse metterlo di piatto, quando bisogna metterlo in punta» (Borra, *Osservazioni*).

35. Borra cita il *Nouveau Cours de Mathématique* di Bélidor (p. 495 e ss., e pl. 31) dove, trattando dei *magazins à poudre*, l'ingegnere francese ne propone uno archiacuto, con piedritti più snelli rispetto all'alternativa a tutto sesto.

36. Come quando riferisce il caso del «cavaliere Vembroch inglese, che fece [la cupola, NdA] di S. Paolo a Londra» e scelse di «metterli il tamburo non perpendicolare [...] ma [...] inclinato in dentro, come un cono tronco, [...] e la volta su esso è parabolica, ed ha corretto con questo la spinta delle volte coll'inclinazione dell'appoggio» (Borra, *Osservazioni*); dove non si capisce se stia storpiando il nome di Wren o confondendolo con quello di Vanbrugh.

37. «Comunemente s'adopra dagli ingegneri [...] dagli architetti poi tiensi per costante…»; ASTC, Materie Militari, Imprese, m. 13, Sentimento.

qualora cambiassero le ipotesi di partenza e le condizioni al contorno; le quali vengono elencate dai tre scienziati in modo a tal punto netto e preciso da costituire una vera e propria spiegazione scolastica – forse con un intento sottilmente polemico nei confronti di Pinto e Borra – di come si sarebbe dovuto impostare correttamente il problema meccanico[38]. Limitandosi però alle richieste del congresso, ovvero alla discussione di quale sia la forma migliore delle volte, essi dichiarano risolutamente che «nel presente caso del Quartiere d'Alessandria» sia da preferire la forma ellittica con riferimento sia alla minore spinta trasmessa ai piedritti sia alla maggiore resistenza all'urto delle bombe.

Il primo punto – sul quale, ricordiamo, Borra si era molto dilungato – viene liquidato in poche battute, riconoscendone esplicitamente (e giustamente: siamo alla metà del Settecento!) la ovvietà.

Il secondo, che costituisce la vera novità della disputa statica, viene commentato in maniera bensì sintetica ma non al punto da impedire di cogliere rimandi abbastanza evidenti alle trattazioni teoriche che già allora costituivano, con ogni probabilità, il nucleo delle lezioni di artiglieria di uno dei tre scienziati, Papacino d'Antoni, e che sarebbero confluite, nei decenni successivi, nei suoi lavori a stampa[39].

Due sono le motivazioni che supportano il parere. Innanzitutto, il confronto (fig. 10) tra la curva circolare e quella ellittica – a parità di luce, freccia e pendenza del massiccio – evidenzia il maggiore spessore di una volta del secondo tipo nel punto più a rischio (sezione GH), ciò che non solo le conferisce una maggiore resistenza all'impatto della bomba in virtù della maggiore quantità di materia che dovrebbe essere attraversata, ma incrementa anche la stabilità dei piedritti per effetto del maggior peso stabilizzante e del maggior braccio di leva di quest'ultimo. In secondo luogo, ciò che rende la volta ellittica più resistente è la sua «maggior curvità» in corrispondenza non solo della sezione GH sopra citata ma anche della sezione di chiave AB dove le due volte hanno lo stesso spessore.

Mentre la prima motivazione, relativa al maggior spessore della volta nel punto più a rischio, sembra del tutto ragionevole, al limite della banalità, la seconda, nel suo riferimento alla "maggior curvità" della volta, non è di facile interpretazione.

38. «Onde trattandosi di costrurre un quartiere a resistenza di bomba, debbonsi osservare *grossezza, ampiezza, altezza, e specie di curvatura del volto*, di poi la *grossezza, altezza figura e posizione dei piedritti* ed in particolare la *fermezza delle loro fondamenta,* indi la *quantità e posizione dei massicci od altri pesi, o forze da sostenersi* dal volto medesimo, avvegnache può questo essere bersagliato con maggiore o minor violenza a misura che *la batteria nemica può collocarsi in un orizzonte più o meno elevato* di quello in cui trovasi il quartiere, e finalmente debbonsi considerare la *qualità dei materiali ed in specie la tenacità delle calci*». ASTC, Materie Militari, Imprese, m. 13, *Sentimento* (corsivi degli autori).

39. Ci riferiamo in particolare ai sei volumi dell'*Architettura Militare* che furono pubblicati nell'arco di circa vent'anni (Papacino d'Antoni 1759-1781).

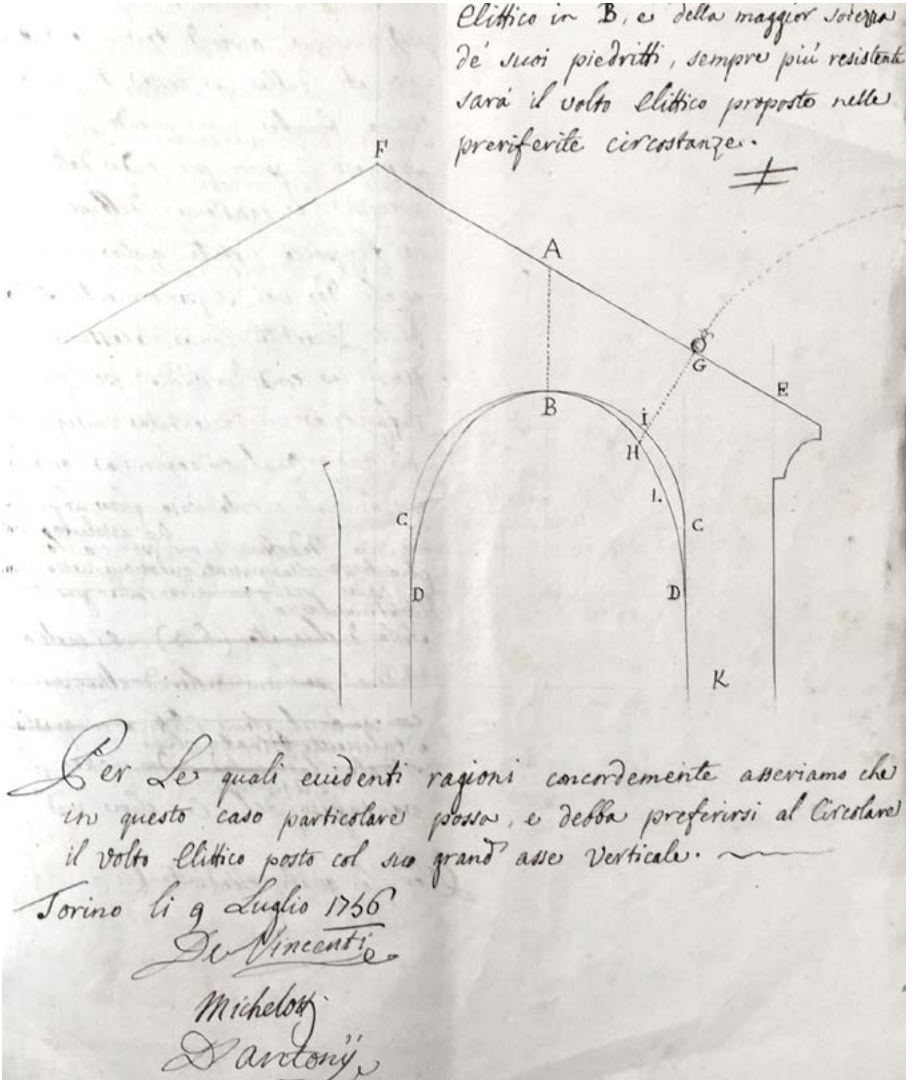

Figura 10. Antonio Felice De Vincenti, Francesco Domenico Michelotti, Alessandro Vittorio Papacino d'Antoni, confronto tra volte ''alla prova'' a sesto circolare ed ellittico soggette all'impatto di una palla di cannone. ASTC, Materie Militari, Imprese, m. 13, *Sentimento*.

In realtà le due motivazioni trovano un riscontro, come già detto, nelle argomentazioni e dimostrazioni poi contenute nell'*Architettura Militare* di Papacino d'Antoni[40]: se esaminate all'interno del quadro concettuale e scientifico lì delineato se ne riescono a comprendere la fondatezza e la rilevanza meccanica. Per questo motivo ci sembra ragionevole supporre che, nella stesura del *Sentimento*, sia stato preminente il ruolo di Papacino d'Antoni, la cui attività accademica e di ricerca, oltre ad attestarne l'interesse non occasionale per il problema, poteva ben giustificare una oggettiva maggiore competenza rispetto a quella dei suoi, pur illustri, colleghi[41].

Appare innanzitutto decisiva la conoscenza, da parte di Papacino, del pionieristico lavoro di Benjamin Robins del 1742[42]: l'ingegnere piemontese lo padroneggia al punto da ripeterne ed estenderne gli esperimenti di balistica interna ed esterna, finalizzati rispettivamente alla valutazione, mediante il pendolo balistico, della velocità di uscita dei proiettili dalle bocche da fuoco e allo studio della loro traiettoria. Grazie a questi e altri esperimenti, e al quadro teorico nel quale sono inseriti (e che concorrono a precisare), Papacino riesce a impostare in maniera rigorosa, anche se non sempre pienamente convincente, il problema del calcolo delle strutture voltate a prova di bomba dimostrando, per un verso, come la conoscenza delle leggi della balistica sia essenziale per determinare le forze che gli edifici alla prova devono essere in grado di sopportare e, per altro verso, evidenziando la necessità del ricorso alla

40. Allo stesso modo, ma con segno inverso, alcuni passaggi dell'*Architettura Militare s*embrano richiamare proprio l'esperienza alessandrina, ad esempio dove si legge, a proposito dei quartieri isolati, che nelle fabbriche a corpo doppio è preferibile evitare le volte coperte dal massiccio che verrebbe ad essere troppo pesante sul muro di mezzo (Papacino d'Antoni 1759-1781, Lib. I, Parte V, Capo VI): riferimento abbastanza evidente, ci sembra, alla tipologia, e alle disavventure, del quartiere San Tommaso (vedi *infra).*

41. Quando Papacino d'Antoni interviene nella controversia alessandrina, già da un anno dirige i corsi teorici delle Reali Scuole teoriche e pratiche d'artiglieria e fortificazioni di cui diventerà direttore generale nel 1765 (Bianchi 1998 e 2014). Nel volgere di pochi anni acquisirà un prestigio indiscusso nel panorama scientifico internazionale e le sue opere saranno tradotte in inglese, francese, tedesco (vedi ad esempio Papacino d'Antoni 1789). L'*Architettura Militare*, in particolare, fu tradotta in francese da Jacques-Antoine de Barathier, ispettore generale dell'artiglieria di Luigi XV e amico personale di Papacino.

42. I rivoluzionari studi di Benjamin Robins (Robins 1742) sull'artiglieria e la balistica circolano negli ambienti militari torinesi almeno dal 1748 (Barberis 1988, p. 215 e ss.), e non vi è da dubitare che Papacino d'Antoni li conoscesse bene: già nel 1750, d'Antoni partecipa a un dibattito scaturito dalle teorie di Robins (trovandosi in disaccordo con le posizioni più conservatrici di Ignazio Bertola), mentre nel gennaio del 1757 firma una relazione sugli esperimenti di balistica svolti nei pressi di Torino con il "pendolo di Robins", in grado di misurare la forza dell'impatto delle palle di cannone (ASTR, Azienda di Artiglieria, Regi Biglietti, Lettere e dispacci all'intendente Di Artiglieria Verani, 1748-1757. 1757, 20 gennaio, c. 567-569, *Esperimenti con il pendolo di Robins*). Secondo Prospero Balbo, almeno una traduzione manoscritta dell'opera del Robins circolava in Piemonte prima che l'edizione in francese del 1751 ne favorisse la diffusione in tutta Europa (ASTC, Archivio Famiglia Balbo, Boginiana, m. 96, punto 64); questa edizione seguiva di pochi anni la più celebre traduzione tedesca, curata e annotata da Euler (di fatto quasi un altro libro, assai più ricco dell'originale), che sarà anch'essa disponibile in francese ma solo trent'anni dopo (Johnson 1986; Steele 1994).

sperimentazione fisica non solo per le questioni impossibili da trattare per via teorica ma anche per quelle la cui analisi strutturale richiede comunque dati di ingresso che solo l'esperienza può fornire[43].

È proprio sul piano sperimentale che si può comprendere la prima delle due motivazioni della perizia del 1756 e metterne in luce, ad onta della apparente ovvietà, la potenziale ricchezza meccanica. La necessità di attraversare una maggiore quantità di materia chiama infatti in causa la prima delle due condizioni «che aver dee una fabbrica per essere a resistenza di bomba», ovvero: «che le volte siano impenetrabili alla bomba, cioè a dire che non possano mai essere da quella perforate, né fessurate».[44]

L'impenetrabilità delle volte[45] non può che essere determinata sperimentalmente. Le esperienze che Papacino riporta nell'*Architettura Militare* sono numerosissime e, con riferimento ai mortai di maggior diametro adottati negli assedi[46], sono finalizzate, per un verso, alla valutazione della resistenza delle diverse tipologie murarie all'urto delle bombe[47], per altro verso alla determinazione della velocità con la quale una palla di cannone di dato peso, sparata con data velocità iniziale e angolo di tiro, colpisce un bersaglio a distanze crescenti (fig. 11, tav. 2/11)[48].

Nota la velocità con la quale si riesce a vincere la impenetrabilità di una data tipologia, Papacino conclude, correttamente, che si possono poi usare i calcoli balistici – relativi alla variazione della velocità delle palle al crescere della distanza – per determinare la vulnerabilità di una struttura muraria

43. «L'osservazione, la sperienza, ed i principj di Meccanica debbono, come già s'è detto in più luoghi, somministrare i dati principali nella soluzione dei problemi fisico-meccanici» (Papacino d'Antoni 1759-1781, Lib. V, p. 207). Si pensi, ad esempio, a come Papacino suggerisce nell'*Architettura Militare* di arricchire, in alcuni casi, il modello di De La Hire mettendo in conto la resistenza a trazione del materiale che occorre superare alla base dei piedritti per averne il ribaltamento; resistenza che si può, evidentemente, determinare solo per via sperimentale.

44. Papacino d'Antoni 1759-1781, Lib. V, p. 206. La seconda condizione, che mette in conto la stabilità dei piedritti («Che le muraglie, le quali sostengono le volte, siano sode a segno tale, che nelle scosse prodotte dagli urti i più violenti la fabbrica non precipiti, nè si fessuri»; *Ibidem)*, chiama in causa più direttamente i «principj di meccanica» e l'estensione del modello di De La Hire che Papacino propone per mettere in conto l'impatto delle bombe.

45. Viene definita impenetrabile una struttura nella quale una palla di cannone non riesca a penetrare per almeno un diametro.

46. Si tratta dei mortai da 7 once e mezzo, con palle da 200 libbre, i più facili da movimentare. È questo un modo scientifico di circoscrivere il problema, quasi una parafrasi del galileiano «difalcare gli impedimenti», ma forse, ancor più propriamente, militare: la soluzione non viene infatti cercata per tutte le condizioni ma solo per quelle che, realisticamente, si possono riscontrare in occasione degli assedi.

47. Papacino distingue tra la impenetrabilità "assoluta" delle rocce, che non possono essere né fessurate né penetrate, e l'impenetrabilità "relativa" degli apparecchi murari, legata alla distanza di tiro e, dunque, alla velocità di impatto delle bombe, organizzando questi ultimi in tre classi di qualità decrescente ("muraglie" di pietre dure, di mattoni, con malta scadente; Papacino d'Antoni 1759-1781, Lib. V, pp. 154-158).

48. Papacino d'Antoni 1759-1781, Lib. V, p. 151.

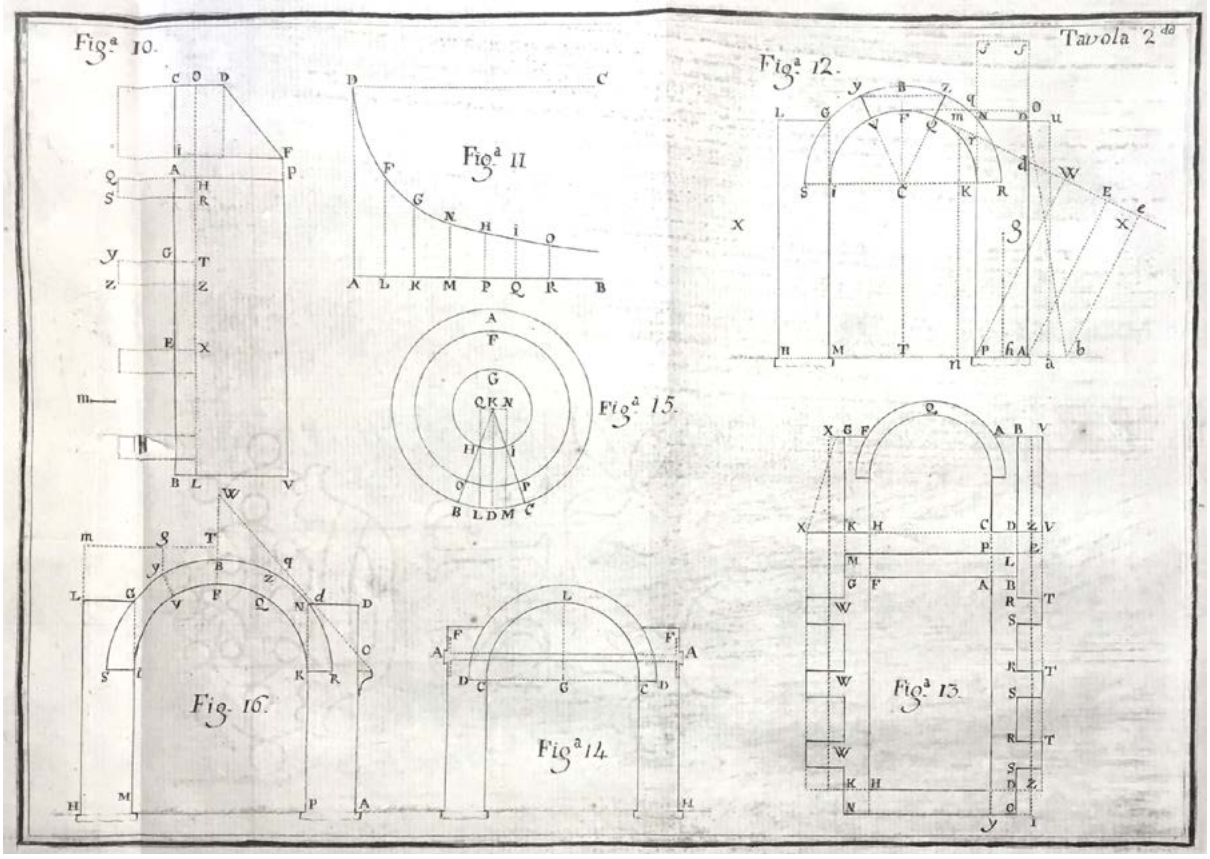

Figura 11. Alessandro Vittorio Papacino d'Antoni, curva sperimentale della diminuzione della velocità delle palle di cannone al crescere della distanza: AD è la velocità di uscita dalla bocca da fuoco, i segmenti AL, LK, … corrispondono a distanze di 600 piedi; al n. 12, calcoli di stabilità di strutture voltate con leve angolari "alla Bélidor", ma con la più realistica assunzione di De La Hire circa la posizione intradossale della spinta (da Papacino d'Antoni 1759-1781, Lib. V, tav. 2; al n. 11).

in condizioni di distanza, angolo di tiro, velocità iniziale diverse da quelle testate sperimentalmente. Si vede dunque come l'apparente semplicità della prima motivazione della perizia contenga in realtà una quantità di questioni, che Papacino affronterà compiutamente nell'*Architettura Militare* mettendo in campo un apparato sperimentale molto articolato[49] e ricorrendo a un approccio scientifico di grande maturità e sottigliezza. E quello che nella perizia è un semplice problema di verifica, per il quale si tratta di valutare, in termini comparativi, la resistenza all'urto delle bombe di due assegnate tipologie di volta (e non è dunque necessario mettere in conto tutti gli aspetti che lo definiscono), nell'*Architettura Militare* diventerà un ben più complesso problema di progetto. Papacino lo risolverà determinando le condizioni di impenetrabilità dei fabbricati suscettibili di essere bersagliati in occasione di un assedio – in funzione della loro tipologia costruttiva, delle caratteristiche della fortificazione in cui sono inseriti, della distanza da cui possono essere colpiti dall'artiglieria nemica, del potenziale distruttivo di quest'ultima – attraverso una stringente correlazione di sperimentazione fisica e modellazione meccanica.

Ed è proprio la modellazione meccanica, invero non esente, nell'*Architettura Militare*, da imprecisioni, che consente di chiarire in che senso vada interpretata la "curvità" che costituisce il nucleo concettuale della seconda motivazione della perizia, fornendo le basi per una spiegazione razionale della maggiore resistenza all'urto delle volte a sesto ellittico rialzato.

Papacino in sostanza estende il modello di scorrimento di De La Hire e Bélidor dalla condizione delle volte soggette a forze ordinarie[50] (peso proprio e spinta) (fig. 11, tav. 2/12) a quella delle volte soggette alle forze derivanti dall'urto delle bombe. L'effetto di queste ultime è quello di spingere dentro la ghiera dell'arco (fig. 12, tav. 4/23) un cuneo murario KQ, nella direzione GF. Si generano così delle spinte che, coerentemente con l'ipotesi di assenza di attrito introdotta da De La Hire, sono assunte ortogonali alle due facce laterali del cuneo (giaciture QO e KP) e risultano dunque proporzionali alla forza prodotta dall'urto della bomba secondo il rapporto QF/GQ (tra il raggio della curva di estradosso e la metà dell'arco che definisce il cuneo)[51]. Pertanto, a parità di dimensione della bomba (diametro D= KQ), volte con raggio maggiore ricevono spinte maggiori (fig. 13).

49. Possiamo qui solo accennare alla ricchezza sperimentale dell'*Architettura Militare*, nella quale sono riportati risultati riguardanti sia volte sottili sia volte alla prova che attestano, per limitarci a quanto discusso nel presente lavoro, non solo la maggiore resistenza delle volte ellittiche a sesto rialzato ma anche il più efficace comportamento delle strutture molto rigide, ovvero caratterizzate da forti spessori (Papacino d'Antoni 1759-1781, Lib. V, Parte III, Capo V).

50. Il caso delle forze ordinarie, che Papacino padroneggia magistralmente, viene risolto con una corretta applicazione del modello di scorrimento di De La Hire e Bélidor, anche se nel descriverlo sembra che egli parli in realtà del meccanismo flessionale di Couplet.

51. In questo Papacino commette un errore – irrilevante fintanto che il calcolo serve solo a rapportare volte di geometria diversa – nella valutazione della reazione ortogonale a QF, che è il doppio di quella da lui indicata.

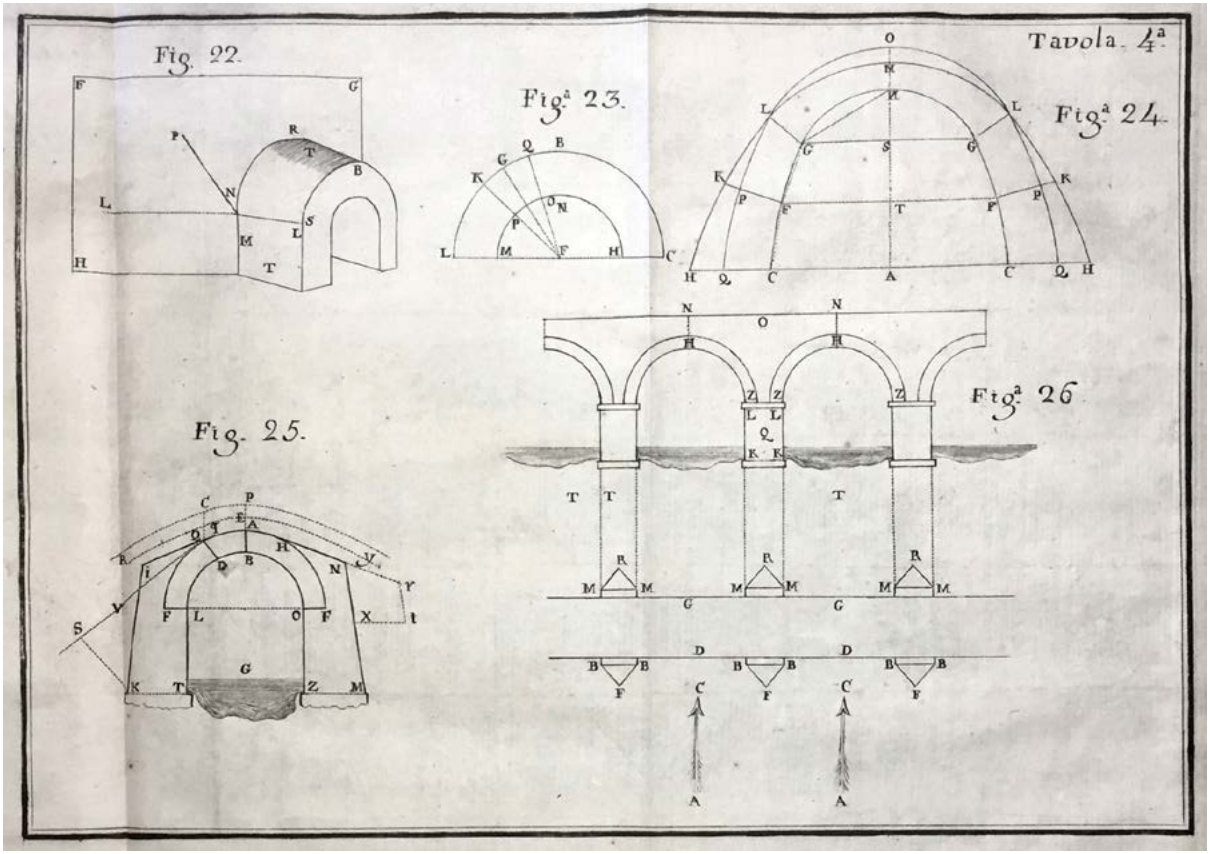

Figura 12. Alessandro Vittorio Papacino d'Antoni, cuneo murario KQ sul quale agisce, in direzione GF, l'azione generata dall'urto della bomba; al n. 24, confronto tra volte a sesto ellittico rialzato con spessore costante (profilo estradossale: QPLO) e variabile in proporzione al raggio di curvatura (profilo estradossale: HKLM) (da Papacino d'Antoni 1759-1781, Lib. V, tav. 4; al n. 23).

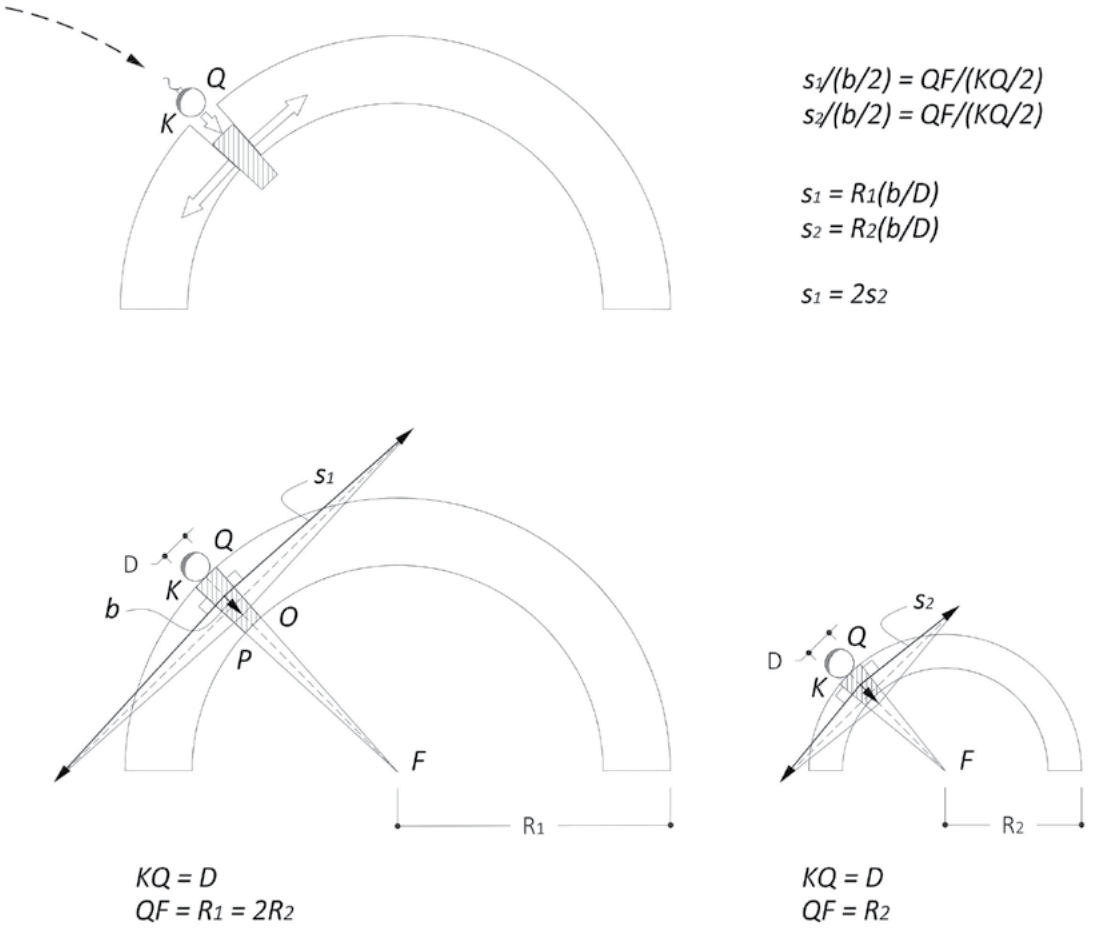

Figura 13. Confronto tra le spinte generate da una bomba di diametro KQ su volte circolari di diverso raggio: al minore angolo al vertice F del cuneo di spinta, nella volta più grande, corrispondono spinte maggiori (disegno C. Tocci).

Ora, la resistenza a tali spinte dipende, oltre che dalla stabilità dei piedritti, anche dalle forze tangenziali che si mobilitano lungo le giaciture inclinate del cuneo murario KQ: queste sono essenzialmente governate dalla tenacità del materiale[52] e sono pertanto proporzionali allo spessore della volta.

«Si scorge adunque, che due volte di diverso diametro, nelle quali la tenacità è la stessa, resisteranno egualmente alla stessa percossa, allora che le loro spessezze QO saranno proporzionali ai raggi QF, coi quali sono descritte»[53]. Papacino individua così, correttamente, nella curvatura della volta[54] – la «curvità» appunto, di cui si parla nel *Sentimento* – il parametro geometrico che ne governa la resistenza all'urto delle bombe suggerendo di assegnare spessori proporzionalmente maggiori al crescere del raggio di curvatura.

Con riferimento dunque alle volte ellittiche, poiché il raggio di curvatura è variabile da punto a punto, per ottenere una volta di uniforme resistenza occorre assegnarle spessori proporzionali ai raggi di curvatura in corrispondenza di ciascun punto, ovvero progressivamente più piccoli passando dall'imposta alla chiave (fig. 12). Se invece lo spessore è costante – e uguale a quello che compete al punto G, posto all'intradosso della volta, in corrispondenza del quale il raggio di curvatura uguaglia il semiasse minore dell'ellisse (ovvero il raggio della volta circolare avente la stessa luce) – si hanno due diverse condizioni. Per la porzione di volta al di sopra del punto G, la resistenza garantita dalla tenacità del materiale è superiore per la volta ellittica, perché per essa i raggi di curvatura risultano più piccoli di quelli della corrispondente volta circolare e sarebbero dunque sufficienti spessori minori. Per la porzione al di sotto del punto G la resistenza è inferiore, perchè i raggi di curvatura sono più grandi e la volta dovrebbe essere più spessa.

«Si scorge adunque che le volte ellittiche elevate sono preferibili alle circolari, purché s'abbia l'avvertenza di rinforzarne con un massiccio di muraglia la parte debole CFG, ognorachè quella trovasi esposta agli urti immediati delle bombe»[55]. Ragionamento impeccabile, per completare il quale

52. Che Papacino ha lungamente sperimentato: in Papacino d'Antoni 1759-1781, Lib. V, pp. 116-117 si riporta la tenacità assoluta della malta (che egli chiama calcestruzzo) di Superga i cui valori vanno da 0.15 a 0.30 MPa.

53. Ivi, Lib. V, p. 211. In realtà, come sopra accennato, le spinte non sono contrastate solo dalla tenacità del materiale ma anche dalla resistenza del piedritto, per cui volte di luce maggiore – a parità di altezza dei piedritti – sono più robuste e dunque per esse si possono anche accettare spessori minori. Tale osservazione sembra coerente con la tabella riportata in Papacino d'Antoni 1759-1781, Lib. I, p. 205, nella quale i rapporti S/R, tra lo spessore della volta e il suo raggio, variano da 0.42 a 0.25 per le volte spesse e da 0.25 a 0.19 per le volte da ricoprire con terra.

54. La curvatura è uno dei classici concetti sui quali si esercitò, dalla fine del Seicento, il neonato calcolo differenziale. Papacino usa disinvoltamente, nell'*Architettura Militare*, il calcolo differenziale (che lui chiama «analisi sublime»), in particolare – per quello che qui ci interessa – per la valutazione della curvatura dell'ellisse (Papacino d'Antoni 1759-1781, Lib. V, p. 215).

55. Ivi, Lib. V, p. 215.

occorrerebbe dire qualcosa anche della stabilità dei piedritti; problema al quale Papacino dedica giustamente uno spazio paragonabile a quello assegnato alla «curvità» ma che si colloca ben oltre lo scopo della nostra discussione[56].

Lo stupefacente lavoro teorico e sperimentale che Papacino consegna alla sua *Architettura Militare* e che viene, in un certo senso, anticipato nelle poche stringenti battute della perizia per la Cittadella di Alessandria, conferisce alla figura dello scienziato sabaudo un posto di rilievo nel panorama scientifico settecentesco. La sua importanza – non solo per il problema che qui è stato discusso ma, più in generale, per la questione della relazione tra scienza, tecnologia e architettura nel XVIII secolo – risiede essenzialmente nella chiarezza con cui viene riconosciuta la necessità di fondare il calcolo strutturale sulla realtà fisica dei fenomeni, sperimentalmente dimostrata, senza rinunciare a una trattazione matematica avanzata, per com'è consentita dagli strumenti scientifici più aggiornati dell'epoca.

Ritorno sul cantiere

Entro pochi giorni dal congresso, il nuovo contratto con gli impresari dava il via, sul cantiere del San Tommaso, alla realizzazione delle volte a profilo rialzato. Fu un'operazione complessa, che richiese, tra l'altro, un ingegnoso adattamento delle imposte, già realizzate negli anni precedenti sulla base del profilo a tutto sesto previsto da Bertola (fig. 6)[57]. Completavano l'opera anche la posa di nuove catene di ferro e un articolato sistema di aerazione, con "corridoi di sfiatamento" realizzati nel massiccio di copertura.

Il cantiere non ebbe vita facile e fu oggetto di una seconda battuta d'arresto l'anno successivo (ottobre 1756) quando, al momento del disarmo, nel corso di un'ispezione l'ingegner Pinto osservava alcune estese e preoccupanti fessure nei muri perimetrali e trasversali. Di fronte al pericolo di crollo, la direzione dell'Azienda inviava un perito da Torino, e dalle indagini che ne seguirono (fig. 14) risultò che il dissesto era da imputarsi a un cedimento delle fondazioni, dovuto all'eccessivo peso combinato

56. Ci limitiamo a ricordare che, mettendo in conto la necessità di resistere all'urto della bomba, e con le formule di Bélidor, si ottengono spessori dei piedritti superiori di circa il 30% a quelli di volte non alla prova: per volte di luce 6,14 m, spessore 90 cm e piedritti alti rispettivamente 7,70 m e 11,30 m, occorrono spessori pari a 2,14 m e 2,40 m (anziché 1,63 m e 1,80 m, come richiesto per volte non alla prova, valori questi ultimi riportati in: Papacino d'Antoni 1759-1781 Lib. I, p. 208). Le due serie di valori rappresentano praticamente le sezioni trasversali dei quartieri di San Tommaso e di San Carlo nella Cittadella di Alessandria.

57. Ignazio Bertola, *Instruzioni* […] *per riasumere e portare a Coperto La fabbrica già peravanti stata incominciata per il nuovo Quartiere della Cittadella al Borgo d'Alessandria,* 3 febbraio 1752: «Giunto agli imposti delli volti alla prova vi si darà principio ad un poco d'archeggio a potersi poscia seguitare e compire nelle campagne susseguenti tutti detti volti alla prova». ASTR, Ministero della Guerra, Azienda generale di Fabbriche e Fortificazioni, Contratti fortificazioni, 1752, cc. 139-141.

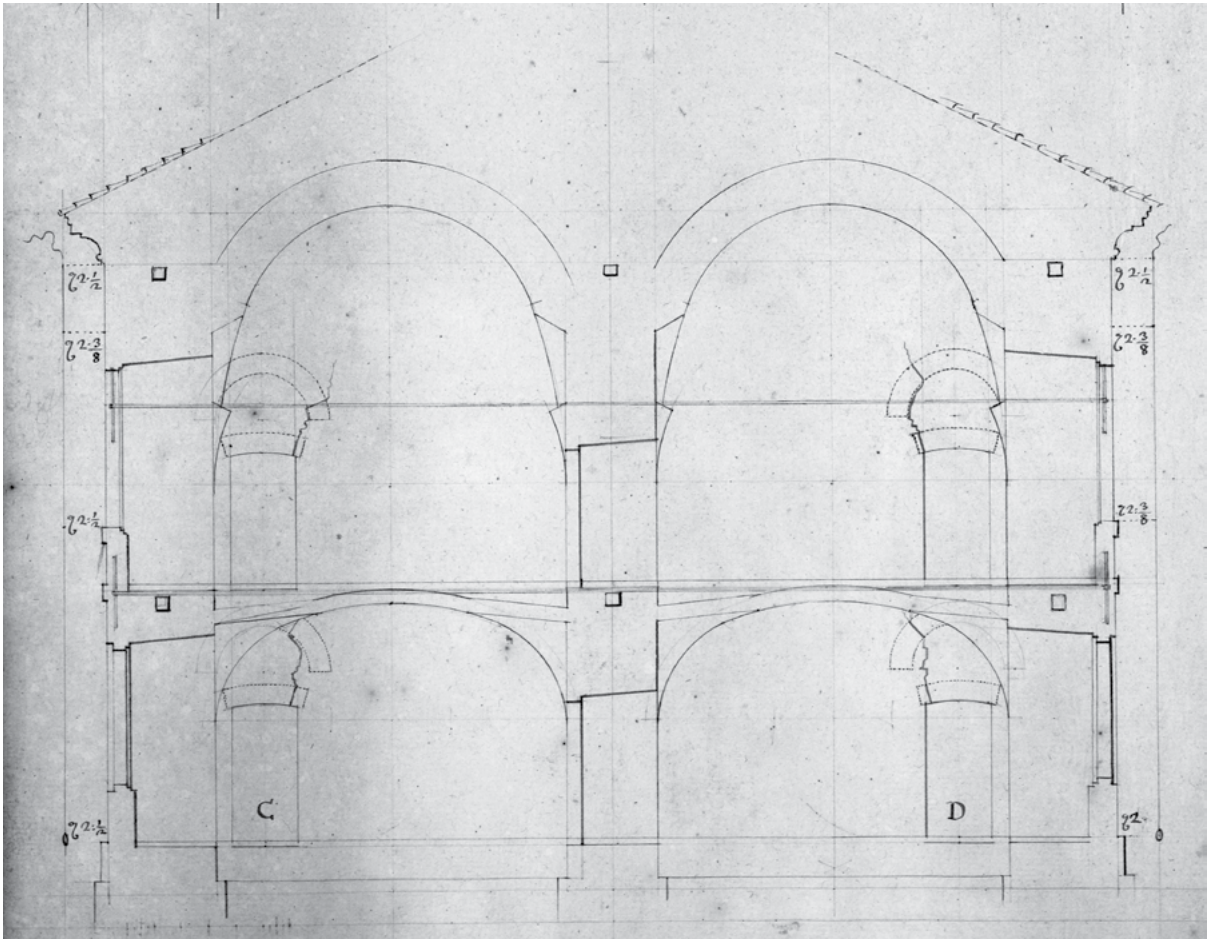

Figura 14. Giuseppe Giacinto Bays, sezione di rilievo del quartiere di San Tommaso con indicazione del quadro fessurativo, dalla perizia del 1756 effettuata a seguito del dissesto fondale. ASTR, Sezioni Riunite, Carte e disegni, Ufficio Generale delle Finanze (Tipi Sezione II), Alessandria e Barge, mazzo 261.3, tipo allegato alla Relazione della visita fatta al novo quartiere di S. Tomaso della Cittadella di Alessandria..., dettaglio.

delle murature, delle volte e del "massiccio" di copertura. Emergeva allora, in tutta la sua complessità, il problema progettuale e tecnico delle fondazioni di edifici così pesanti su un terreno soffice e acquitrinoso come quello di Alessandria. La questione darà luogo a un'ulteriore disputa tra Pinto e Borra, e nel progetto della vicina caserma di San Carlo, avviato nel 1759-1760, un sistema perfezionato di palificate ideato dall'architetto prevarrà, di nuovo, sulle proposte dell'ingegnere[58]. Per quanto riguarda il San Tommaso, invece, dove ormai le fondazioni non potevano essere modificate, solo il provvidenziale esaurirsi del cedimento fondale e il conseguente arrestarsi del fenomeno fessurativo consentivano, nel corso del 1757, di procedere al disarmo delle volte e alla ripresa dei lavori. Il cantiere si sarebbe chiuso tre anni dopo, con la posa in opera al primo piano di una balconata esterna per disimpegnare le camerate[59], ennesima modifica apportata al progetto originario di Bertola. Veniva così consegnato all'uso un edificio solido, ma che portava impresse nelle sue masse murarie le tracce dei numerosi ripensamenti che ne avevano segnato la costruzione.

Lo scacco subìto da Pinto sul cantiere del San Tommaso gli costerà il fastidioso affiancamento di Borra per diversi anni[60], sia ad Alessandria sia nel vicino cantiere di Demonte. Anche se l'ingegnere continuerà a dirigere i lavori e a progettare la maggior parte delle opere di fortificazione, sarà l'architetto a fornire i disegni degli edifici più importanti, tra cui la nuova caserma alessandrina di San Carlo (che con i suoi muri a scarpa, i sottotetti protetti dalle grandi volte e la tripla manica, si presenta come un capolavoro di distribuzione e costruzione) (fig. 15), e i palazzi per il Governatore (fig. 16) di entrambe le fortezze. Tutti questi edifici adotteranno il sistema a volte ellittiche "alla prova" approvato dal congresso del 1756, eppure la soluzione proposta da Borra non conoscerà una diffusione generale. Pinto continuerà, imperturbabile, a disegnare fortificazioni e casematte coperte da volte a tutto sesto[61]; e lo stesso Papacino d'Antoni, che pure aveva approvato i progetti alessandrini di Borra, proporrà nella sua *Architettura Militare* un modello di caserma "alla prova" più leggero, con volte a botte semicircolari, tetto in legno smantellabile e copertura a terrazza[62]. Nell'autorevole opinione di Papacino, insomma,

58. Piccoli *et alii* 2019.

59. ASTR, Ministero della Guerra, Azienda generale di Fabbriche e Fortificazioni, Contratti fortificazioni, 1760.

60. Fino al 1770, anno della morte, Borra continuerà la sua carriera di consulente, rivestendo in più occasioni il ruolo dell'*improver* "imprestato" alla sfera militare, e spuntandola sugli ingegneri in diverse occasioni, pur senza essere mai formalmente integrato nell'amministrazione statale. Lungo tutto il periodo egli continua a lavorare anche come architetto civile e, all'occasione, come insegnante di disegno (vedi i saggi di Olga Zoller e Roberto Caterino in Dardanello 2013): progetta palazzi per l'aristocrazia, altari, chiese e almeno un municipio, quello d'Ivrea; si afferma come brillante decoratore d'interni, ma dà anche consulenze sulla cappella dell'ambasciata del Re di Sardegna a Londra, sugli argini dei fiumi e sulle cupole delle chiese.

61. Viglino 1989; Barrera 2002.

62. «Ne' quartieri a doppie camere si usa poi di fare la volta circolare a tutta monta e di coprirla con piedi 2 ½ di terra ben

Figura 15. Il quartiere di San Carlo nella Cittadella di Alessandria (1760-1768), veduta dalla piazza d'Armi (foto E. Piccoli, 2017).

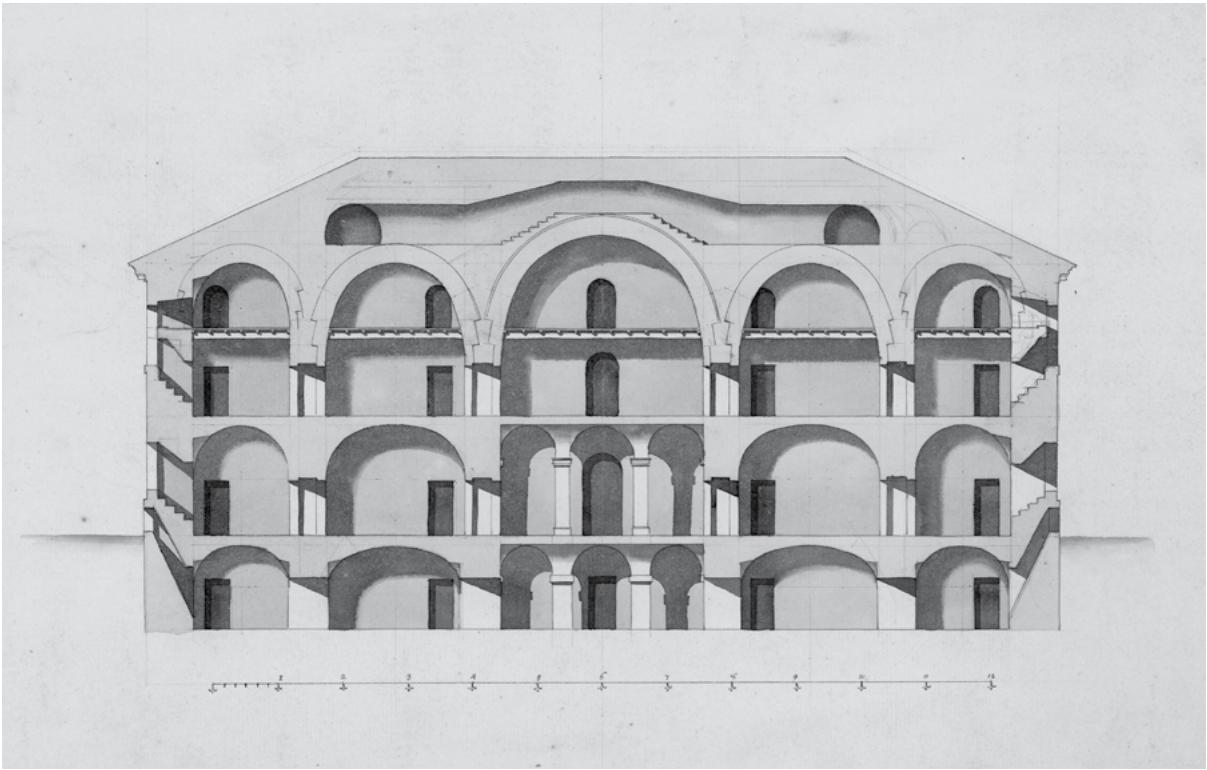

Figura 16. Giovanni Battista Borra, sezione trasversale del progetto per il Palazzo del Governatore nella fortezza di Demonte (circa 1757), con volte “alla prova” a sesto ellittico rialzato. ASTR, Sezioni Riunite, Carte e disegni, Ufficio Generale delle Finanze (Tipi Sezione II), Alessandria, mazzo 274.4.

la soluzione strutturale adottata per il San Tommaso si giustificava nelle condizioni particolari in cui si trovavano quell'edificio e il suo cantiere, ma non presentava vantaggi tali da costituirsi come un modello di validità universale.

Epilogo. Pensiero scientifico, rapporti di forza

Ancora una volta, il tema della stabilità delle strutture voltate si conferma come un problema nodale per l'evoluzione settecentesca della scienza del costruire. Il caso di Alessandria non tratta di strutture complesse come le cupole, né di grandi luci come le arcate dei ponti; eppure, ponendo il problema della resistenza delle volte rispetto a un impatto puntuale sull'estradosso si introduce una variabile del tutto originale. L'intreccio che si delinea tra statica e balistica consente ai consulenti di Bogino, da veri uomini di scienza[63], di sottoporre a trattazione matematica, ancorchè in maniera non definitiva, un problema fino ad allora non risolvibile se non in modo empirico. Al di là dei suoi risvolti pratici, la relazione dei tre esperti sposta davvero in avanti i confini del sapere, superando l'autorità costituita da Bélidor (più volte citato dagli altri due autori delle perizie) che di fronte allo stesso problema rendeva le armi:

> «benché sia quasi impossibile determinare quale spessore debba avere la volta di una polveriera per essere alla prova della bomba […] – scriveva nel *Nouveau Cours de Mathématique* l'ingegnere francese – ciò non impedisce di dare loro tre piedi di spessore alle reni, e io credo che questo spessore sarà sufficiente»[64].

È interessante rilevare come, in modi sostanzialmente confrontabili con la vicenda, di poco precedente, della cupola di San Pietro, l'ingresso della meccanica nell'architettura o, per meglio dire, le prime applicazioni storicamente riconoscibili dei principi della meccanica alla progettazione strutturale, siano dovute all'attività di uomini di scienza coinvolti in questioni tecniche da committenti illuminati, piuttosto che da architetti o ingegneri direttamente impegnati nei cantieri di architettura.

Boscovich e Poleni sono chiamati a San Pietro da Benedetto XIV Lambertini, in un clima di grande dinamismo caratterizzato dall'interesse del papa per la nuova scienza, dalla protezione da lui accordata a scienziati prestigiosi e dall'impulso dato alle università e agli scavi archeologici; allo stesso modo

battuta; imperciocchè se si facesse il massiccio coperto su queste volte, s'aggraverebbe eccessivamente la muraglia di mezzo su cui s'appoggiano le due volte a botte» (Papacino d'Antoni 1759-1781, Lib. I, p. 232-233); il vantaggio della soluzione a terrazza, prosegue, è anche nel profilo più ribassato che questi edifici assumevano in caso d'assedio. L'uso delle volte a sesto ellittico rialzato e massiccio di copertura viene consigliato solo nel caso di edifici a manica semplice, come le polveriere e caserme di montagna.

63. Ferrone 2007, cap. 10.

64. Bélidor 1725 (ed. 1757), p. 493 (traduzione degli autori).

Papacino d'Antoni è figura di punta delle Scuole di artiglieria – ne sarà il direttore dal 1765 – che rivestono una funzione strategica nella politica culturale del ministro Bogino.

E se in San Pietro i più recenti sviluppi della meccanica sono usati per l'analisi di stabilità di una struttura esistente, nella Cittadella di Alessandria si assiste a una delle prime, e convincenti, applicazioni del calcolo strutturale alla progettazione di nuove costruzioni.

Senza ancora rinunciare alla prassi empirico-sperimentale sulla quale l'arte del costruire si era fino ad allora essenzialmente fondata, nella progettazione delle caserme alessandrine si registra un innegabile spostamento verso una trattazione matematico-meccanica grazie alla quale il dimensionamento delle strutture può prescindere dal conforto del successo di fabbriche analoghe, già realizzate, ed essere condotto a priori sulla base di teorie accreditate e meccanicamente controllate.

Se la consideriamo, infine, nel panorama dell'evoluzione settecentesca delle professioni tecniche, la vicenda di Alessandria non si presta ad essere compiutamente analizzata in termini di conflitto: da un lato gli architetti, dall'altro gli ingegneri, civili o militari[65]. Il bilancio finale deve guardare al di là della contesa tra i due progettisti (che, del resto, agiscono come individui e non in rappresentanza di tipi professionali) per tenere conto di una posta in gioco più articolata, che coinvolge i vertici dell'amministrazione del Regno di Sardegna. Il conflitto che si innesca sulla forma delle volte diventa, in questo quadro, un pretesto per affrontare il problema, squisitamente politico, dell'autorità: non a caso, il dibattito mantiene il suo centro nei palazzi della capitale[66] e non sul cantiere. L'inserimento di Borra non è pensabile al di fuori di una strategia di promozione di una nuova élite, che si articola nell'arbitrato del ministro Bogino e nell'intervento della commissione di esperti da lui convocata; e la messa in discussione dell'autonomia dell'Azienda delle Fabbriche e Fortificazioni è forse l'esito più rilevante dell'intera vicenda.

Se vi è un'ambiguità, è nel modo in cui tutto si svolge nel rispetto sostanziale della stessa macchina amministrativa che viene messa sotto accusa. Dato che il dibattito incide sulla catena di comando fino al punto di metterla in crisi, con il rischio di delegittimare alcune figure chiave di tecnici e funzionari, è nell'interesse dell'amministrazione che la frattura venga subito ricomposta. Anche per questo i documenti prodotti saranno mantenuti riservati, ben custoditi nell'archivio dell'Azienda e delle Segreterie: siamo nella sfera dello Stato, e in una monarchia di antico regime ciò non implica né la pubblicità delle azioni né la trasparenza dei saperi.

65. Sulla dicotomia architetto-ingegnere, e sul suo parziale superamento da parte di una storiografia attenta a valutare figure di mediazione tra le due culture in evoluzione: Picon 1988; Middleton-Matuszek 2007; Nègre 2016.

66. Nelle settimane in cui si prendono le decisioni nessuno si muove da Torino, né si lascia che le condizioni (o gli attori) locali abbiano alcun peso.

Appendice

Archivio di Stato di Torino, Sezione Corte, Materie Militari, Imprese militari, mazzo 13, *Sentimento rimesso alla Secreteria di Guerra li 9 Luglio 1756*, fascicolo di fogli non numerati. Trascrizione.

[1r] 1756. 9. luglio / Sentimento rimesso alla Secreteria di Guerra li 9. Luglio 1756.

[2r] Nel Congresso tenutosi li 27 Scaduto Giugno avanti S.E. il Sig[no]re Conte Bogino sendosi fatta questione qual delle due forme circolare, od elittica fosse più vantagiosa e sicura per la costruzione de volti nel Quartiere d'Alessandria, ed asserendo il Sig[no]re Cavaliere, e Colonnello degli Ingegnieri Pinto essere la Circolare detta Communemente a tutta monta od à Botte, e per l'altra parte il Sig[no]re Architetto Borra essere l'Elittica da esso proposta avente il semiasse maggiore verticale ò dicasi per monta, fu ordinato da detta S.E. che ciascheduno de sud[ett]i SS. ri spiegasse in scritto la sua proporzione, con addurne tutt'assieme le prove, quali poscia dovessero da noi sottoscritti essere attentamente ponderate, affine dichiarassimo qual fosse la più opportuna delle due per accertare in questo particolare il Reggio Servizio. Il che si è da noi eseguito, come segue /2v/

1° Nelle Fabbriche militari comunemente s'adopera dagli Ingegnieri il volto semicircolare allorché queste sono sottoposte alla violenza delle Bombe, sul riflesso che tutte le parti del volto, comeche dirette ad un comun centro, quasi cospirino alla reciproca conservazione del sito da ciascheduna parte occupato, ne possa veruna d'esse moversi punto senza il consenso di tutte le altre, onde ne risulta una assai vallida resistenza ad ogni percossa che vengale impressa da qualche forza esterna; Il che pare ancora confermato da moltissime osservazioni. La medesima cosa per ugual modo, ed in parità di circostanze non potendo dirsi quando il volto sia di figura elittica, od altrimente sfiancata, cioè quando la monta è minore della metà del vano, e questo appunto è ciò che osservasi nel Lib 2. pag 14 e 35. della Scienza degl'Ingegneri del Sig. Bellidor, dove fa paragone fra il volto semicircolare, el semielittico schiacciato, in riguardo solamente al maggiore, o minore sforzo d'essi volti contro i loro piedritti.

2. Dagli Architetti poi tiensi per costante, che i volti di curvatura più svelta, cioè quelli, che dal loro nascimento s'accostano maggiormente alla verticale, ed eziandio terz'acute fanno minor sforzo contro i loro piedritti, anzichè buona parte del volto gravitando /3r/ più perpendicolarmente sopra de' medesimi, li rende più saldi, ed immobili; Il che è assai conforme alla ragione, ed alla sperienza ed accordasi con ciò, che leggesi nel citato trattato Lib. 2 pag. 38 cioè che i volti a terz'acuto fanno meno forza contro a' loro piedritti. Nell'applicazione poi alla pratica delle precedenti sue teorie ne dimostra col calcolo, che in parità di circostanze il volto semicircolare richiede la grossezza di piedi 6: 6: 7 ne' suoi piedritti. Il semielittico sfiancato con due terzi di monta richiede la grossezza di piedi 8: 8, ed il volto terz'acuto descritto col raggio uguale ai tre quarti del vano non abbisogna che di piedi 5: 3 di grossezza per porsi essi volti in equilibrio colli suoi piedritti. Ma perché poi sono questi volti più elevati, per ciò ne divengono e più esposti, e più deboli all'urto delle Bombe.

3. Questi riflessi però (§ 1. 2.) comunque sieno conformi alla ragione, ed alla sperienza, sono nulla di meno circoscritti fra certi limiti, e scambiansi assai facilmente al variare delle circostanze; Essendo cosa notissima, che l'energia d'ogni qualunque agente naturale non s'estende al di la d'un certo determinato grado, e conseguentemente può essere modificata la sua azione.

Dal che ne siegue che volendosi determinare un qualche caso particolare, debbansi porre in considerazione, e chiamarsi in computo tutte le circostanze ad esso caso spettanti; onde trattandosi di costrurre un Quartiere a resistenza di bomba debbansi osservare la grossezza, ampiezza, altezza, e specie /3v/ di curvatura del volto, di poi la grossezza, altezza, figura, e posizione dei piedritti, ed in particolare la fermezza delle loro fondamenta, indi la quantità, e posizione dei massici od altri pesi, o forze da sostenersi dal volto medesimo, avvegna che può questo essere berzagliato con maggior o minor violenza a misura che la batteria nemica può collocarsi in un orizonte più o men elevato di quello in cui trovasi il Quartiere, e finalmente debbonsi considerare la qualità dei materiali ed in specie la tenacità delle calci non trascurando quelle altre circostanze

ancora che possono in qualche maniera contribuire alla maggiore o minor sodezza della fabrica, e delle sue parti, senza le quali avvertenze e considerazioni sarà facilmente erronea ogni regola, e falso ogni calcolo di forze, e di resistenze.

4. Ma dovendosi per ora soltanto esaminare quale delle due configurazioni di volto semicircolare, od elittico sia da preferirsi, punto /4r/ non dubitiamo nel presente caso del Quartiere d'Alessandria doversi preferire l'elittica col semiasse maggiore verticale, o sii per monta; e ciò tanto per riguardo al minor sforzo d'un tal volto tendente a rovesciare i suoi piedritti, quanto ancora per riguardo alla di lui maggiore resistenza all'urto delle bombe.

E quanto al primo di questi riguardi, egli è assai chiaro da quanto sopra si è detto (§. 2) del che pure ne hanno di già convenuto li Sud[det]ti SS.ri Cavagliere, e Colonello degli Ingegnieri Pinto ed il Sig[no]r Architetto Borra, onde non abbisogni di ulteriore dimostrazione.

5. In secondo luogo poi, che maggiore sia la resistenza all'urto delle bombe nella volta elittica, apparisce ciò chiaramente dal solo confronto dei due volti semicircolare ed elittico come nella seguente figura, e mottivi. /4v/

1° Perché stando inalterate le altre cose, e facendosi della med[esim]a grossezza AB, il massiccio sopra la somità B del volto circolare CBC, e dell'elittico DBD, e ritenendosi per l'uno, e per l'altro lo stesso pendio EF, presenta il volto elittico alla percossa della bomba una grossezza di massiccio GH maggiore di GI nel volto circolare.

2° Il maggiore massiccio DCIHL essendo nel volto elittico in favore del piedritto EK, lo rende anche più fermo e resistente al medesimo sforzo della bomba qualunque sia la sua direzione GH in cui percuote il pendio del massiccio EF. Lo stesso dir si deve per il maggiore massiccio HIB il quale e col suo maggior peso e colla tenacità, maggior resistenza oppone alla forza dell'urto nel volto elittico.

3° Finalmente essendo l'arco elittico in H più curvo del circolare in I, ne diviene per ciò esso arco elittico più atto del circolare per resistere alla med[esim]a percossa in G, di /5r/ modo che se l'urto seguisse eziandio in A ove uguale è la grossezza AB dei due volti, tutta via e per causa della maggior curvità dell'arco elittico in B, e della maggior sodezza de' suoi piedritti, sempre più resistente sarà il volto elittico proposto nelle preriferite circostanze.

[il diagramma a cui fanno riferimento le lettere capitali è riprodotto nella figura 10, p. 232.]

6. Ne contro questa nostra conclusione fà veruna forza ciò, che leggesi nel lib 4 pag 62, e 63 dello stesso trattato [del Bélidor, ndr] di due volti terz'acuti coperti con piedi cinque o sei di terra, e tuttavia rovinati dalle percosse di tre o quatro bombe, non avendo l'Autore premessi i principii onde dette percosse, e resistenze debbansi calcolare, ne tanpocco notate quelle circostanze quali da noi superiormente sono state avertite come necessarie a porsi in considerazione per quindi inferirne un accertata conseguenza (§ 3); Qual conseguenza quand'anche nel caso citato fosse legitimamente dedotta, non ha assolutamente che fare colla presente questione nella quale il volto è semielittico è talmente situato, che riesce più vantaggioso e resistente del circolare medesimo.

Per le quali evidenti ragioni concordemente asseriamo che in questo caso particolare possa, e debba preferirsi al circolare il volto elittico posto col suo grand'asse verticale.

Torino Li 9 Luglio 1756

De Vincenti
Michelotti
D'Antony

Bibliografia

Balbo 1805 - P. Balbo, *Vita di Alessandro Vittorio Papacino d'Antoni comandante dell'artiglieria e tenente generale scritta da Prospero Balbo l'anno MDCCXCI*, Reale Accademia delle Scienze, Torino 1805.

Balliet 2018 - J. M. Balliet, *Casernes à l'épreuve de la bombe. Leur usage en France, du XVIIe au XIXe siècle*, s.e., Colmar 2018.

Barberis 1988 - W. Barberis, *Le armi del principe. La tradizione militare sabauda*, Einaudi, Torino 1988.

Barrera 2002 - F. Barrera, *I sette forti di Exilles. Metamorfosi architettonica di un complesso fortificato*, Museo Nazionale della Montagna - Club Alpino Italiano, Torino 2002.

Benvenuto 1991 - E. Benvenuto, *An introduction to the history of structural mechanics*, 2 voll., Springer, Berlin 1991.

Bélidor 1725 - B.F. de Bélidor, *Nouveau cours de Mathématique à l'usage de l'Artillerie et du Génie…*, Nyon, Paris 1725 (ed. 1757).

Bélidor 1729 - B.F. de Bélidor, *La Science des Ingénieurs dans la conduite des travaux de fortification e d'architecture civile,* Jombert, Paris 1729.

Bianchi 1998 - P. Bianchi, *Un artigliere nel circuito delle accademie scientifiche europee: Alessandro Vittorio Papacino d'Antoni (1714-1786) e la corrispondenza con Antonio Maria Lorgna (1735-1796)*, in C. Farinella *et alii, Anton Maria Lorgna scienziato ed accademico del XVIII secolo: tra conservazione e novità,* Accademia nazionale delle scienze, Roma 1998, pp. 275-298.

Bianchi 2002 - P. Bianchi, *Onore e mestiere. Le riforme militari nel Piemonte del Settecento,* Zamorani, Torino 2002.

Bianchi 2007 - P. Bianchi (a cura di), *Il Piemonte in età moderna. Linee storiografiche e prospettive di ricerca,* Centro studi piemontesi, Torino 2007.

Bianchi 2014 - P. Bianchi, *Papacino d'Antoni, Alessandro Vittorio*, in *Dizionario Biografico degli Italiani,* vol. 81, Istituto dell'Enciclopedia italiana, Roma 2014, http://www.treccani.it/enciclopedia/papacino-d-antoni-alessandro-vittorio_%28Dizionario-Biografico%29/ (ultimo accesso 26 dicembre 2019).

Borra 1748 - G.B. Borra, *Trattato della cognizione pratica delle resistenze geometricamente dimostrato dall'architetto Giambatista Borra ad uso d'ogni sorta d'edifizj, coll'aggiunta delle armature di varie maniere di coperti, volte, ed altre cose di tal genere,* Stamperia Reale, Torino 1748.

Capecchi, Tocci 2011 - D. Capecchi, C. Tocci, *Le perizie sulla cupola vaticana di Le Seur, Jacquier e Boscovich*, in «Palladio», 2011, 47, pp. 43-58.

Caterino *et alii* 2018 - R. Caterino, E. Piccoli, C. Tocci, E. Zanet, *Lo Stato entra in cantiere: sviluppo e utilità di una fonte seriale settecentesca*, in A. Marotta, R. Spallone (a cura di), *FORTMED 2018. Proceedings of the International Conference on Modern Age Fortification of the Mediterranean Coast*, (Torino, 18-20 ottobre 2018), Politecnico di Torino, Torino 2018, pp. 217-224.

Cerino Badone 2014 - G. Cerino Badone, *Sulla Strada di Fiandra. Storia della Cittadella di Alessandria 1559-1859*, FAI, Alessandria 2014.

Cerino Badone 2015 - G. Cerino Badone, *Pinto, Lorenzo Bernardino*, in *Dizionario Biografico degli Italiani,* vol. 83, Istituto dell'Enciclopedia italiana, Roma 2015, http://www.treccani.it/enciclopedia/lorenzo-bernardino-pinto_%28Dizionario-Biografico%29/ (ultimo accesso 26 dicembre 2019).

Chiorino 2014 - M.A. Chiorino, *La meccanica strutturale da Lagrange a oggi. Il contributo della scuola torinese*, in L. Giacardi (a cura di), *Lagrange Matematico Europeo*, Atti del convegno di studi, (Torino, Accademia delle Scienze, 14-15 novembre 2013), Centro studi piemontesi, Torino 2014, pp. 61-84.

Couplet 1731 - C.A. Couplet, *De la poussée des voûtes*, in *Histoire de l'Académie Royale des Sciences*, Année MDCCXXIX. Avec les Mémoires de Mathématique & de Physique, pour la même Année, Imprimerie Royale, Paris 1731, pp. 79-117.

Couplet 1732 - C.A. Couplet, *Seconde partie de l'examen de la poussée des voûtes*, in *Histoire de l'Académie Royale des Sciences*, Année MDCCXXX. Avec les Mémoires de Mathématique & de Physique, pour la même Année, Durand, Paris 1732, pp. 117-141.

Dallemagne 1990 - F. Dallemagne, *Les casernes françaises*, Picard, Paris 1990.

De La Hire 1695 - P. De La Hire, *Traité de Méchanique …*, Imprimerie Royale, Paris 1695.

De La Hire 1731 - P. De La Hire, S*ur la construction des voûtes dans les edifices*, in *Histoire de l'Académie Royale des Sciences,* Année MDCCXII. Avec les Mémoires de Mathématique & de Physique, pour la même Année, Imprimerie Royale, Paris 1731, pp. 69-77.

Dardanello 2013 - G. Dardanello (a cura di), *Giovanni Battista Borra da Palmira a Racconigi*, Editris, Torino 2013.

Fara 2014 - A. Fara, *L'arte della scienza. Architettura e cultura militare a Torino e nello Stato Sabaudo 1673-1859*, Olschki, Firenze 2014.

Fara 2015 - A. Fara, *Giuseppe Ignazio Bertola (1676-1755). Il disegno e la lingua dell'architettura militare*, Angelo Pontecorboli, Firenze 2015.

Ferrone 1984 - V. Ferrone, *Tecnocrati militari e scienziati nel Piemonte dell'Antico regime: alle origini della Reale accademia delle scienze di Torino*, in «Rivista storica italiana», XCVI (1984), 2, pp. 414-509

Ferrone 2007 - V. Ferrone, *Una scienza per l'uomo. Illuminismo e rivoluzione scientifica nell'Europa del Settecento*, Utet, Torino 2007.

Giuffrè 1986 - A. Giuffrè, *La meccanica nell'architettura. La statica,* NIS, Roma 1986.

Johnson 1986 - W. Johnson, *Benjamin Robins' New Principles of Gunnery*, in «International Journal of Impact Engineering», 1986, 4, vol. 4, pp. 205-219.

Langins 2004 - J. Langins, *Conserving the Enlightenment: French Military Engineering from Vauban to the Revolution*, MIT Press, Cambridge (Mass.) 2004.

Lluis i Ginovart 2015 - J. Lluis i Ginovart, *La mecánica ilustrada en los ingenieros militares españoles. El proyecto de los almacenes de pólvora (1715-1798)*, in «Informes de la Construcción», LXVII (2015), 539, http://dx.doi.org/10.3989/ic.14.109 (ultimo accesso 26 dicembre 2019).

Marotta 1991 - A. Marotta (a cura di), *La cittadella di Alessandria. Una fortezza per il territorio dal Settecento all'Unità*, Cassa di Risparmio di Alessandria, Alessandria 1991.

Middleton, Baudouin-Matuszek 2007 - R. Middleton, M.N. Baudouin-Matuszek, *Jean Rondelet. The Architect as Technician,* Yale University Press, Yale 2007.

Navire 2010 - F. Navire, *Il Regno di Carlo Emanuele III. Cronaca dell'Abate Giuseppe Pasini*, Romanistischer Verlag, Bonn 2010.

Nègre 2016 - V. Nègre, *L'Art et la matière. Les artisans, les architectes et la technique (1770-1830)*, Classiques Garnier, Paris 2016.

Nurpeissov 2017-2018 - T. Nurpeissov, *The citadel of Alessandria: Tracing the documents of a great military complex*, tesi di laurea, Politecnico di Torino, Corso di Laurea Magistrale in Architettura Costruzione Città, a.a. 2017-2018.

Papacino d'Antoni 1759-1781 - A.V. Papacino d'Antoni, *Dell'Architettura Militare per le Regie Scuole Teoriche d'Artiglieria, e Fortificazione*, 6 vol. [il vol. 2, 1779, è di I.A. Bozzolino], Stamperia Reale, Torino 1759-1781.

Papacino d'Antoni 1789 - A.V. Papacino d'Antoni, *A Treatise on Gun-powder; a Treatise on Fire-Arms; and a Treatise on the Service of Artillery in the Time of War* [translated … by Captain Thomson of the Royal Regiment of Artillery], Egerton, London 1789.

Piccoli *et alii* 2019 - E. Piccoli, C. Tocci, E. Zanet, R. Caterino, *Building on water and the Modern State. Eighteenth century foundation techniques in the fortifications of Alessandria,* in J.W.P. Campbell *et alii* (a cura di), *Water, Doors and Buildings.*

Studies in the History of Construction, Proceedings of the Sixth Conference of the Construction History Society (Cambridge, 5-7 aprile 2019), Cambridge 2019, pp. 358-373.

Piccoli 2010 - E. Piccoli, *Dialectique entre tradition et science moderne au milieu du XVIIIe siècle à Turin: Bernardo Vittone et Giovanni Battista Borra,* in R. Carvais, A. Guillerme, V. Nègre, J. Sakarovitch (a cura di), *Edifice et Artifice. Histoires Constructives*, Picard, Paris 2010, pp. 175-181.

Picon 1988 - A. Picon, *Architectes et ingénieurs au siècle des Lumières*, Parenthèses, Marseille 1988.

Quazza 1957 - G. Quazza, L*e riforme in Piemonte nella prima metà del Settecento*, 2 vol., Società tipografica editrice, Modena 1957.

Quazza 1969 - G. Quazza, *Bogino, Giovanni Battista Lorenzo*, in *Dizionario biografico degli italiani*, vol. 11, Istituto della Enciclopedia italiana, Roma 1969, http://www.treccani.it/enciclopedia/giovanni-battista-lorenzo-bogino_(Dizionario-Biografico)/(ultimo accesso 26 dicembre 2019).

Robins 1742 - Robins, *New Principles of Gunnery: Containing the Determination of the Force of Gun-powder, and an Investigation of the Difference in the Resisting Power of the Air to Swift and Slow Motions. With Several Other Tracts on the Improvement of Practical Gunnery*, Nourse, London 1742.

Rossi 2018-2019 - A. Rossi, *La lettura costruttiva dell'architettura storica dalle fonti d'archivio al rilievo diretto. Il quartiere San Tommaso nella Cittadella di Alessandria,* tesi di laurea, Politecnico di Torino, Corso di Laurea Magistrale in Architettura per il restauro e la valorizzazione del patrimonio, a.a. 2018-2019.

Steele 1994 - B.D. Steele, *Muskets and Pendulums: Benjamin Robins, Leonhard Euler, and the ballistic revolution*, in «Technology and Culture», 35 (1994), 2, pp. 348-382.

Strafella 2017-2018 - M.C. Strafella, *Forme costruttive della Cittadella di Alessandria tra lettura diretta e fonti d'archivio,* tesi di laurea, Politecnico di Torino, Corso di Laurea Magistrale in Architettura per il restauro e la valorizzazione del patrimonio, a.a. 2017-2018.

Viglino 1989 - M. Viglino, *Fortezze sulle Alpi: difese dei Savoia nella Valle Stura di Demonte*, L'Arciere, Cuneo 1989.