POLITECNICO DI TORINO
Repository ISTITUZIONALE

Who will dominate the global fossil fuel trade?

Original
Who will dominate the global fossil fuel trade? / Ostadzadeh, E.; Elshorbagy, A.; Tuninetti, M.; Laio, F.; Abdelkader, A.. - In: ECONOMIC SYSTEMS RESEARCH. - ISSN 0953-5314. - (2023), pp. 1-22. [10.1080/09535314.2023.2174002]

Availability:
This version is available at: 11583/2978857 since: 2023-05-27T09:38:20Z

Publisher:
Routledge

Published
DOI:10.1080/09535314.2023.2174002

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)

17 December 2025

La collana dei Quaderni Future *Urban Legacy* Lab **è pubblicata da Politecnico di Torino. Fanno parte della collana: #1 *Re-Housing. La casa come dispositivo di integrazione* (2018), #2 *Abitare oltre la proprietà* (2019), #3 *Re-Coding. Ripensare le regole della città* (2020), #4 *Riattivazione di beni culturali non performanti // Non-performing cultural heritage reactivation* (2020)**

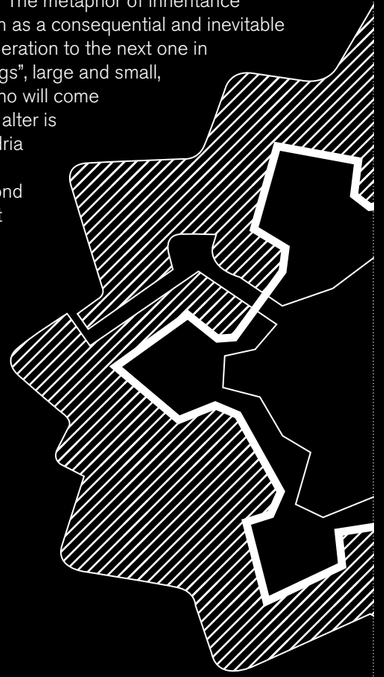
//

Quaderni Future *Urban Legacy* Lab is published by Polytechnic of Turin. The series of books is composed by: #1 *Re-Housing. La casa come dispositivo di integrazione* (2018), #2 *Abitare oltre la proprietà* (2019), #3 *Re-Coding. Ripensare le regole della città* (2020), #4 *Riattivazione di beni culturali non performanti // Non-performing cultural heritage reactivation* (2020)

Nasciamo eredi o scegliamo di esserlo? La metafora dell'eredità porta con sé il rischio di considerare la successione come un fatto consequenziale e inevitabile. Uno stock di beni passerebbe da una generazione a quella successiva in modo impersonale e meccanico. Una mole immensa di "cose", grandi e piccole, talvolta "ingombranti", da conservare per coloro che verranno dopo. Ma davvero basta non interferire, non danneggiare, non alterare? Ci permettiamo di dubitarne. La Cittadella di Alessandria è una architettura oversize, un complesso edilizio fortificato, la cui edificazione si avvia nella seconda metà del Settecento, posto a protezione della Città e del suo territorio, oggi in stato di abbandono. Come è possibile immaginare la conservazione di un monumento così grande e così periferico?

//

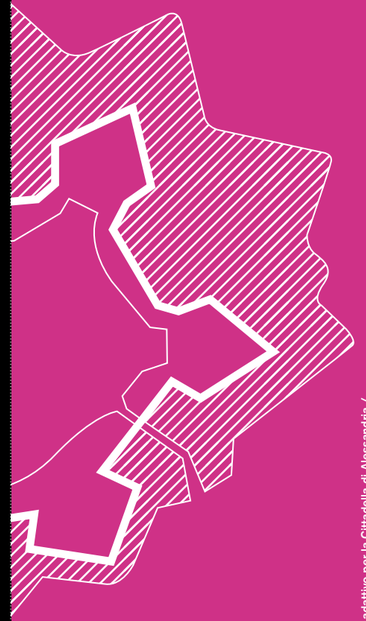
Are we born heirs or do we choose to be heirs? The metaphor of inheritance carries with it the risk of considering succession as a consequential and inevitable act. A stock of assets would pass from one generation to the next one in a mechanical way. An immense amount of "things", large and small, sometimes "bulky", to be preserved for those who will come later. But not to interfere, not to damage, not to alter is sufficient? We doubt it. The Citadel of Alessandria is an oversize architecture, a fortified building complex, whose construction began in the second half of the eighteenth century, placed to protect the city and its territory, today abandoned. How can we imagine the preservation of this large and peripheral monument?



POLITECNICO DI TORINO | Future *Urban Legacy* Lab

ISBN 978-88-85745-54-4

FULL



un progetto adattivo per la Cittadella di Alessandria /
an adaptive project for the Citadel of Alessandria /

Riuso del patrimonio oversize /
Oversized heritage reuse /

a cura di Elena Vigliocco
con testi di Matteo Robiglio, Nicola Russi, Giulio Zotteri, Edoardo Piccoli, Cesare Tocci, Luigi Sambuelli

Quaderni Future *Urban Legacy* Lab

FULL
Future *Urban Legacy* Lab

FULL – Future *Urban Legacy* Lab – **è un Centro Interdipartimentale del Politecnico di Torino che esplora, immagina e progetta il futuro delle eredità urbane globali e locali incarnate in forma di città. Le attività di ricerca si basano sullo scambio e sull'intersezione di saperi; sulla collaborazione e sul metodo sperimentale; sul confronto di livello internazionale multidisciplinare; sull'analisi e progettazione; sull'equilibrio tra teoria e pratica**

//

FULL – Future *Urban Legacy* Lab – is an Interdepartmental Centre of the Polytechnic of Turin that explores, imagines and designs the future of global and local urban legacy embodied in city form. Research activities are based on cross- and interdisciplinary methods; collaboration and experimentation; internationalization and comparison; analysis and design; theory and practice

Il volume presenta i risultati della ricerca dal titolo Cittadella di Alessandria_Scenari di riuso adattivo //
The volume presents the results of the research entitled Citadel of Alessandria_Adaptive reuse scenarios

Contratto di ricerca // Research contract
Compagnia di San Paolo
Dipartimento Architettura e Design del Politecnico di Torino, FULL - Future *Urban Legacy* Lab

Responsabile scientifico // Scientific director
Matteo Robiglio

Gruppo di lavoro // Team work
(in ordine alfabetico // in alphabetical order) Matteo Robiglio, Nicola Russi, Roberta Taramino, Elena Vigliocco, Giulio Zotteri con // with Chiara Iacovone, Riccardo Ronzani, Alberto Valz Gris

Supporto operativo // Operational support
Laura Martini

Fotografie di // Photos by
MultimediaLab del Dipartimento di Architettura e Design del Politecnico di Torino

POLITECNICO DI TORINO | Future *Urban Legacy* Lab

Riuso del patrimonio oversize

Un progetto adattivo per la Cittadella di Alessandria

//

Oversized heritage reuse

An adaptive project for the Citadel of Alessandria

Quaderni Future *Urban Legacy* Lab

Collezione Quaderni Future *Urban Legacy* Lab,
n. 5, 2021

Editore // Editor Politecnico di Torino
Volume a cura di // Edited by Elena Vigliocco
con testi di // with texts by Edoardo Piccoli, Matteo Robiglio, Nicola Russi, Roberta Taramino, Cesare Tocci, Giulio Zotteri
Correzione testi di // texts review by Elena Vigliocco
Layout grafico e disegni di // Graphic layout and drawings by Simone Parola, Riccardo Ronzani
Dove non specificato i testi sono stati scritti da // If not specified, texts are by Elena Vigliocco

Deposito legale // Legal deposit
ISBN: 978-88-85745-54-4

Stampato in Italia da // Printed in Italy by SIREA S.r.l., Torino
Tutti i diritti sono riservati. Nessuna parte di questa pubblicazione può essere fotocopiata, riprodotta, archiviata, memorizzata o trasmessa in qualsiasi forma o mezzo se non nei termini previsti dalla legge che tutela il Diritto d'Autore // All rights reserved. No part of this publication can be photocopied, reproduced, archived, stored or transmitted in any form or medium except in the terms provided by law that protects Copyright

indice // index

introduzione // introduction 6

il conflitto della memoria // conflicting memory Matteo Robiglio, Elena Vigliocco 8

patrimonio oversize = progetti oversize? / 14
/ oversize heritage = oversize projects? Elena Vigliocco

Cittadella di Alessandria - scenario di riuso adattivo /
/ Citadel of Alessandria - adaptive reuse scenario 22

c'est ci n'est pas un projet de restauration Matteo Robiglio 26

progetti e processi // projects and processes 30

sintesi cronologica della costruzione // cronological synthesis of the construction 32

dalla dismissione militare a oggi // from military decommissioning to present 34

stato dell'arte // state of the art 40

spazi aperti // open spaces 42

edifici // buildings 46

usi // uses 60

approfondimenti // insights 66

l'architettura parlante di una fortezza settecentesca / 68
/ *the* architecture parlante *of an 18th-century fort* Edoardo Piccoli

fabbriche a resistenza di bomba // bomb-proof buildings Cesare Tocci 80

indagini geofisiche-archeologia preventiva / 94
/ *geophysical surveys and preventive archaeology* Luigi Sambuelli

strategia di riuso adattivo // adaptive reuse strategy **104**

introduzione // introduction Nicola Russi 106

3 paesaggi // 3 landscapes 110

8 ambienti // 8 open air spaces 118

26 edifici // 26 buildings 138

attivazione // activation **178**

atto I: preservare e rendere accessibile // act I: to preserve and to make accessible 180

modello di business // management Roberta Taramino, Giulio Zotteri 184

bibliografia // bibliography 200

approfondimenti /
/ insights

"Il lavoro della ricerca scientifica è qui inteso come una rete intricata di attività pratiche che fanno presa sul mondo, e non come la creazione di una serie di assunti teorici verificati con la semplice osservazione."

S. Schaffer, *La fabrique des sciences modernes*, Parigi 2014.

L'elaborazione di una strategia adattiva volta alla preservazione della Cittadella di Alessandria impone il convolgimento di discipline scientifiche che, ciascuna all'interno del suo specifico ambito, possano contibuire a implementare la conoscenza di questo sistema complesso e articolato. Lo studio della storia, dell'uso delle tecniche costruttive e dei materiali così come lo sviluppo delle indagini non invasive condotte con il georadar, permettono di svelare realtà inattese e capaci di introdurre verso ulteriori livelli di approfondimento /

/ The development of an adaptive strategy aimed at preserving the Citadel of Alexandria requires the involvement of scientific disciplines that can contribute to implementing the knowledge of this complex and articulated system. The history of the construction, the materials and techniques analysis as well as the development of non-invasive investigations conducted with the georadar, allow us to reveal unexpected elements capable of introducing towards further levels of deepening.

fabbriche a resistenza di bomba /
/ bomb-proof buildings

Due sono le maniere di impedire, che l'urto delle bombe non produca effetti perniciosi in una fabbrica. La prima di quelle maniere consiste nell' accrescere la grossezza della volta, e la resistenza de' piè dritti (§. 192) affine di dare in tal guisa maggior confidenza alla fabbrica; e si pratica la seconda maniera col sovrapporre alla volta una quantità di terra stacciata, e ben battuta, imperciocché, qualora la terra sovrapposta alla volta è in altezza di piedi 2 ½ in 3, l'urto della bomba s'ammortisce in quella terra, e la fabbrica ne prova una scossa molto minore.[1]
(Alessandro Vittorio Papacino d'Antoni)

Gli edifici interni alla fortificazione alessandrina, costruiti tra il 1740 e il 1820, sono stringentemente definiti nella loro sostanza costruttiva, oltre che nella loro immagine architettonica, dalla funzione che ad essi era richiesta, ovvero quella di resistere all'urto delle bombe senza essere né rovesciati né perforati e, alla quale ci si riferisce definendo gli edifici stessi "alla prova".
Indipendentemente dal modo in cui tale essenziale requisito viene conseguito – opponendosi all'impatto dei proiettili con la impenetrabilità di una apparecchiatura di straordinaria tenacia (nella quale le volte sommitali sono coperte da un massiccio murario il cui estradosso inclinato realizza direttamente le falde di copertura); oppure smorzandone gli effetti grazie alla cedevolezza di un ricoprimento temporaneo di terra (sovrapposto alle volte in occasione degli assedi) – esso comporta l'adozione di spessori murari eccezionali e il ricorso ad apparecchi costruttivi e modalità tecniche di assemblaggio peculiari.
Questi aspetti, benché coerenti con un consolidato quadro interpretativo delle costruzioni murarie storiche, introducono alcuni elementi di differenza che meritano di essere precisati.

La qualità di un edificio murario ben costruito, o più propriamente eseguito a regola d'arte, risiede nella corretta organizzazione complessiva

Two are the methods of preventing the shock of shells from having harmful effects on a building. The first is to increase vault thickness and counterforts resistance (§ 192) to strengthen the construction. The second method is to pack the vault with a quantity of firm and well-beaten earth. If the earth packed onto the vault is 2½ to 3 feet high, the shells bury themselves on it and the building is subject to a much smaller shock. [1]
(Alessandro Vittorio Papacino d'Antoni)

The constructional substance and architectural image of the buildings inside the Alessandria fortification, built between 1740 and 1820, are strictly determined by the function required of them, which is to withstand the shock of shells without being overturned or penetrated, and which is referred to defining those buildings as bomb-proof ("alla prova").
Regardless of the way in which this essential requirement is achieved – either by resisting the shock thanks to the extraordinary structural strength of a solid work of masonry built over the vaults (and whose sloping extrados directly creates the roof slopes) or by dampening the effects of the falling shells, dulled by a temporary covering of earth (packed on the vaults during sieges) – exceptionally thick walls and peculiar technical assembly methods are required.
These aspects, although consistent with a consolidated framework of interpretation of historical masonry constructions, introduce some differences that are worth considering.

The quality of a well-built (or, more properly, built in a workmanlike manner) masonry building, depends on a rigorous overall organisation (structural layout) of the individual elements that make up the whole, and in the static efficiency of each of the elements and their reciprocal connections.
A well-conceived and well-executed structural layout is the first and most essential requirement of any historic building. Its importance is increased by the need to build "bomb-resistant constructions", meeting one of the two conditions

– l'impianto strutturale, o maglia muraria – dei singoli elementi che lo compongono e, nella efficienza statica di ognuno di essi e delle loro reciproche connessioni.
Un impianto strutturale ben concepito e realizzato, impostato su una rigorosa strutturazione della maglia muraria, costituisce il primo ed essenziale requisito di qualunque edificio storico. La sua importanza è esaltata, ad Alessandria, dalla necessità di realizzare "fabbriche a resistenza di bomba" poiché governa una delle due condizioni dalle quali la resistenza stessa dipende, vale a dire la stabilità d'assieme nei confronti delle scosse e delle spinte generate dall'urto[2].
L'impianto strutturale degli edifici della Cittadella è impeccabilmente riferibile alla classica organizzazione a maglia chiusa, con un doppio ordine di pareti mutuamente ortogonali aventi luci libere commisurate al loro spessore. Laddove, per esigenze funzionali, erano richiesti corpi di fabbrica completamente passanti, ovvero del tutto privi di pareti di telaio (trasversali), come nelle due maniche destinate nel S. Michele a ospitare le camerate dell'ospedale, l'irregolarità della maglia viene compensata dalla presenza di poderose lesene che contraffortano le pareti di facciata definendone al contempo il partito architettonico (figura 1). Fanno eccezione le fabbriche realizzate nel periodo napoleonico, come l'arsenale o l'edificio dei forni, con i loro spazi continui scanditi all'interno solo dalla presenza di pilastri isolati, sui quali non a caso sono state operate delle correzioni immediatamente dopo la loro costruzione.

La seconda condizione richiesta alle fabbriche alla prova, e cioè la impenetrabilità del materiale, chiama invece in causa la qualità degli elementi costruttivi[3], per i quali il discorso è più articolato. La lettura delle Istruzioni generali di Giuseppe Ignazio Bertola[4] non lascia dubbio sul fatto che l'immagine laterizia della Cittadella non rappresenti un fatto semplicemente epidermico e corrisponda alla vera sostanza costruttiva

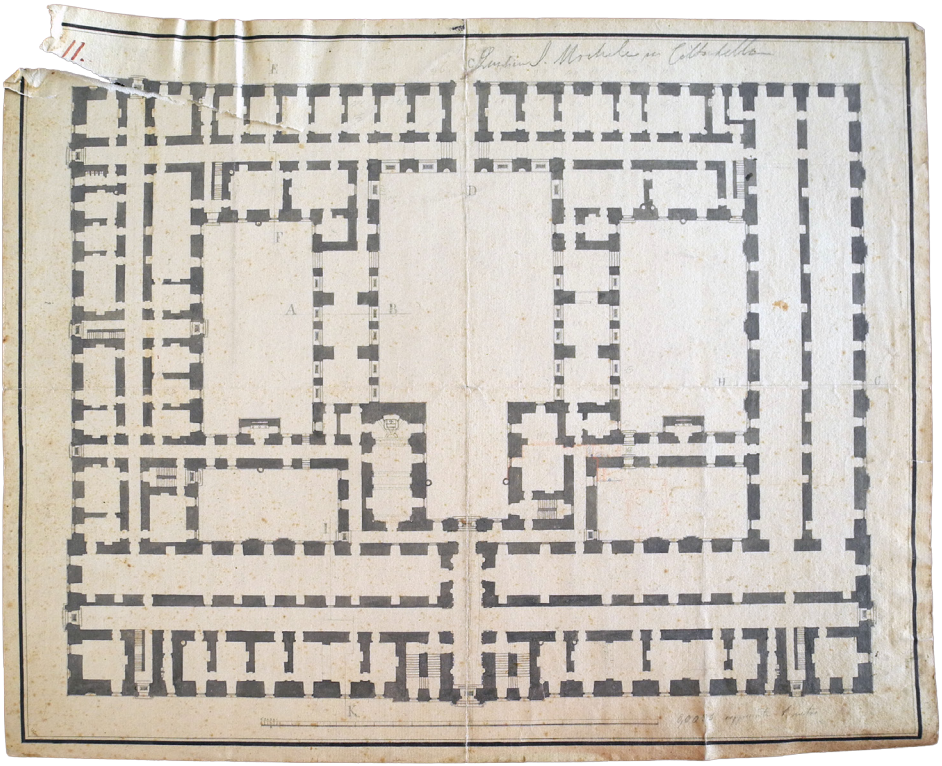
on which resistance itself depends, namely the stability of the structure against the shocks and thrusts generated by shells[2].
The structural layout of the Citadel buildings is an impeccable example of the classic box-like organisation, with a double row of walls at right angle to one another with free spans commensurate with their thickness. Where, due to functional requirements, the buildings had to be completely pass-through, i.e. with no shear walls, as in the two San Michele barracks' wings intended to house the hospital's dormitories, the irregular wall structure was compensated for by mighty pilasters defining the architecture of the facades and, meanwhile, buttressing them (Figure 1). Exceptions to this are the buildings erected during the Napoleonic period, such as the arsenal or the oven building, with their continuous spaces marked on the inside only by the presence of isolated pillars, to which, not by chance, reinforcement were introduced immediately after their construction.

The second requirement for bomb-proof buildings, namely impenetrability, depends on the quality of the construction elements[3], for which the discussion is more complex.
A reading of Giuseppe Ignazio Bertola's General Instructions[4] leaves us in no doubt that the bricks of the Citadel do not merely constitute a surface veneer but make up the true structural substance not only of the fortified enceinte, but also of the imposing barracks built within. Extremely thick walls ("muraglie"), almost two metres thick in the case of the external walls, are made entirely of bricks from the outer face to the inner core. New bricks (well fired, known as mezzanelle) were used for the external walls and the top vaults, which had to withstand the shock of shells; while the interior walls were built with bricks coming from the demolition of the old Bergoglio neighbourhood (Figure 2). The Instructions set out strict rules for reusing these bricks, which involved completely cleaning them of residues of old binding agent and orderly stacking them in areas of the site

non solo del perimetro bastionato ma anche delle imponenti caserme edificate al suo interno. “Muraglie” di grande spessore, che arrivano a misurare nelle pareti perimetrali quasi due metri, sono interamente realizzate, dalla cortina al nucleo interno, di mattoni: riservando i mattoni nuovi (ben cotti, le mezzanelle) alle pareti perimetrali e alle volte sommitali che devono opporsi all’urto delle bombe, e i mattoni di recupero – derivanti dalla demolizione del vecchio Bergoglio e per i quali nelle Istruzioni si prescrivono severe regole di riutilizzazione, prevedendo la loro completa pulitura da residui del vecchio legante e l’accatastamento ordinato in zone del cantiere a ciò appositamente deputate – alle pareti interne (figura 2).
Le regole da osservare per la costruzione delle muraglie sono condensate in poche stringenti prescrizioni nelle quali non è difficile riconoscere i due principali obiettivi della classica regola dell’arte muraria: il monolitismo della tessitura, garantito dalla semplice disposizione alternata degli elementi (“Si murerà ben intrecciato tanto in copertina, che in dentro; acciochè le muraglie restino ben legate ed inchiavate …”; Istruzioni, punto 59), e l’orizzontalità dei ricorsi (“… corso per corso si distenderanno le dovute lacinate, e si murerà sottilmente in calcina …”; Istruzioni, punto 60).
Alla corretta disposizione degli elementi si aggiunge però, nella Cittadella, la straordinaria qualità del legante la cui “tenacità” (così è chiamata nelle fonti settecentesche la resistenza a trazione), associata allo spessore poderoso delle strutture (di elevazione e voltate), trasforma l’assemblaggio intrinsecamente discontinuo dell’opera muraria tradizionale, monolitica per virtù di apparecchio, in una materia continua e tenace, come scavata in una roccia omogenea.
I valori di resistenza a trazione[5], variabili da 0.15 a 0.30 MPa, sono davvero sorprendenti e tali da consentire comportamenti paragonabili a quelli della migliore concrezione romana: i monconi in aggetto di molti ruderi di volte romane, il cui equilibrio non si potrebbe spiegare prescindendo

specifically set aside for this purpose.
The rules to be observed for the construction of the walls are detailed in a few stringent provisions in which it is not difficult to recognise the two main aims of the standard masonry workmanlike manner: the monolithic nature of masonry work, achieved by simply alternating the elements (“Masonry must be well arranged both internally and externally, so that the walls remain well-bound and interlocked…”; Instructions, point 59), and the horizontality of the courses (“… course by course the necessary mortar will be laid, and finely clad in lime mortar…”; Instructions, point 60).
In addition to the precise arrangement of the elements, the buildings in the Citadel also features a high quality mortar, whose tensile strength (“tenacità”, as it is called in eighteenth-century sources), associated with the massive thickness of the structures (walls and vaults), transforms the intrinsically discontinuous assembly of traditional masonry, monolithic by virtue of its constructional rule, into a continuous and firm material, as if hewn from a single rock.
The tensile strength values[5], varying from 0.15 to 0.30 MPa, are truly surprising and allow for structural behaviours comparable to that of the best Roman opus caementicium: the projecting remains of many Roman vault ruins, the equilibrium of which could not be explained without the material’s tensile strength, are extraordinarily similar to some remains of the Brunetta fort in Val di Susa – to quote an example that has very strong analogies with the Citadel – or fragments of the Alessandria masonry itself (figure 3).

The same rule of construction presides over the bomb-proof vaults, which, with their mighty three to four brick thicknesses, seem to sum up Vittone’s sensational (and only apparently paradoxical) statement in the most convincing way: “The vaults are curved walls, which springing from the straight walls… stretch out to cover with their own bodies the spaces between them”[6].
An assertion that is reinforced by the way the



1. pianta del quartiere San Michele, inizio Ottocento (Roma, ISCAG, Edifici Militari, XX-F, 1442/01) // Plan of the San Michele barracks, early 19th-century (Roma, ISCAG, Edifici Militari, XX-F, 1442/01).

dalla resistenza a trazione del materiale, sono straordinariamente simili ad alcuni resti del forte della Brunetta, in Val di Susa – per restare a un esempio che ha fortissime analogie con le murature della Cittadella – o a frammenti delle stesse murature alessandrine (figura 3).

La stessa regola costruttiva presiede alla realizzazione delle volte alla prova che, con le loro poderose ghiere da sei a sette teste di spessore, sembrano riassumere nella maniera più convincente la sensazionale (e solo apparentemente paradossale) affermazione di Vittone: "Le volte sono muri arcuati, li quali spiccandosi dai muri dritti, … si stendono a coprire col proprio corpo i vani esistenti tra essi"[6]. Affermazione che le stesse modalità di connessione delle volte con i muri di spiccato rafforzano. Le volte alla prova si possono realmente considerare come la prosecuzione, su superfici non più verticali, delle pareti di elevazione, sotto diversi riguardi (che, per inciso, corrispondono ad altrettante differenze con le volte ordinarie): innanzitutto perché di spessore confrontabile, in secondo luogo per la realizzazione contestuale dei due apparecchi murari, infine per le specifiche modalità costruttive – che si possono ad esempio rilevare nel quartiere S. Michele, sotto l'intonaco scrostato di alcune camerate – in virtù delle quali è di fatto impossibile distinguere i diversi elementi e, pareti e volte realizzano una "massa coniata e gettata" (è l'immagine con cui Leandro Caselli descrive archi e pennacchi della cupola di San Gaudenzio). (figura 4)
Le volte intermedie sono invece volte ordinarie a due teste realizzate, al pari dei muri interni, con "mattoni vecchi" e per esse è evidente il ricorso a una modalità di connessione sistematicamente rilevabile nelle fabbriche murarie storiche consistente nel predisporre sulle pareti di elevazione, durante la costruzione, le sedi che ospiteranno le imposte delle volte, in aggetto o incassate, e nel costruire le volte stesse solo quando l'altezza dell'edificio è tale da opporsi, in

vaults are connected to the impost walls. The bomb-proof vaults can really be considered as the continuation of the walls on surfaces that are no longer vertical in a number of respects (which, incidentally, correspond to as many differences with ordinary vaults): first, because they are of comparable thickness; secondly, because of the simultaneous construction of the two masonry works; and thirdly, because of the specific construction methods that can be surveyed, for example, in the San Michele barracks (under the peeling plaster of some dormitories), and make it impossible to distinguish the different elements, walls and vaults, which form a kind of "molten and cast mass" (this is the image used by Leandro Caselli to describe the arches and pendentives of the dome of San Gaudenzio) (Figure 4).
The intermediate vaults, on the other hand, are ordinary one brick vaults built, like the internal walls, with "old bricks". They are connected to the impost walls using a method systematically found in historical masonry constructions that involves providing housings (either projecting or recessed) for the vault imposts on the walls during construction, and building the vaults themselves only when the height of the building is such as to oppose their thrust by virtue of its own weight (Figure 5).

In spite of the continuity of the elements ensured by the construction quality of the materials and the assembly methods, the Citadel barracks are nevertheless equipped with additional connection devices, which can either be surveyed in the buildings themselves or deduced from archive sources, and express, almost paradigmatically, an idea of masonry building in which the most important structural requirement is the capacity to act as a whole; idea all the more interesting in that the concept of the Citadel's mighty walls is different from that of ordinary walls.
These connection devices consist first and foremost of wooden elements (radiciamenti, according to later terminology) embedded in the masonry walls during construction in order to

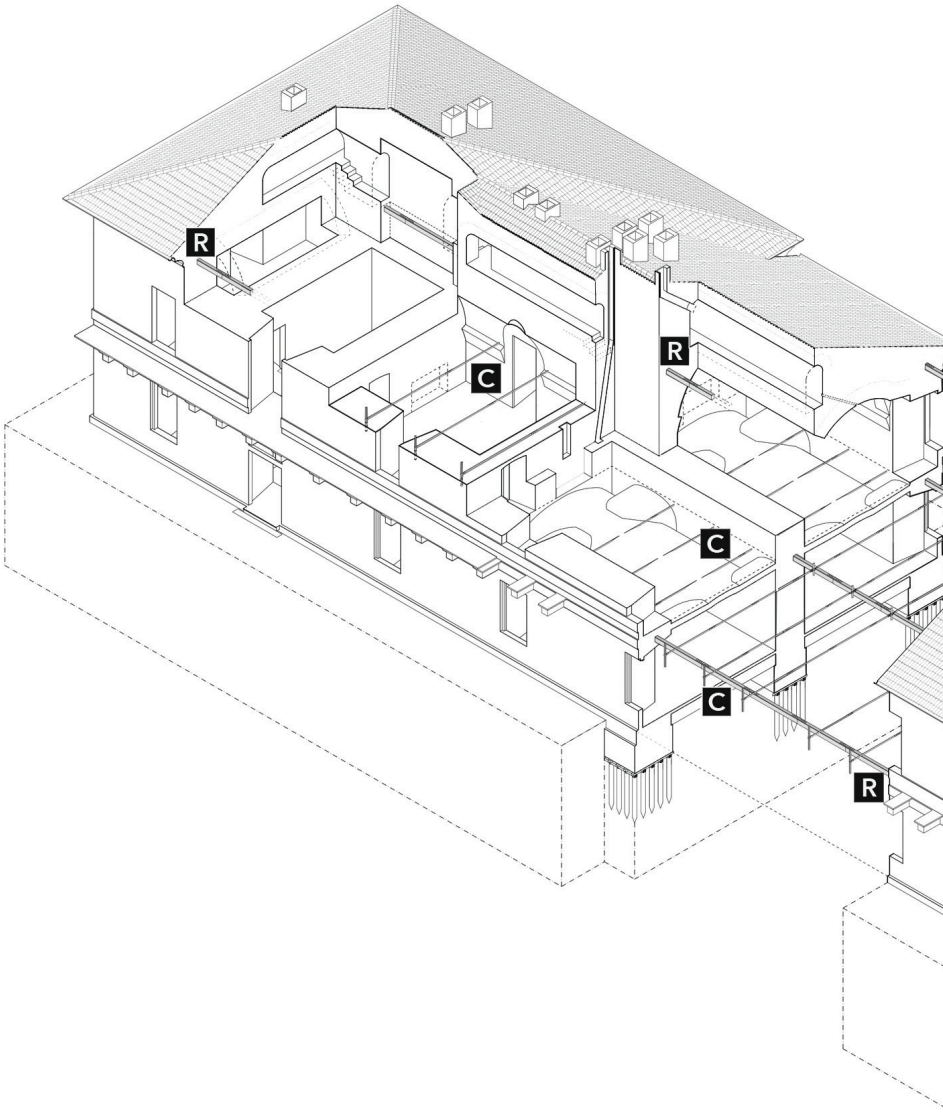
2

3

4

5

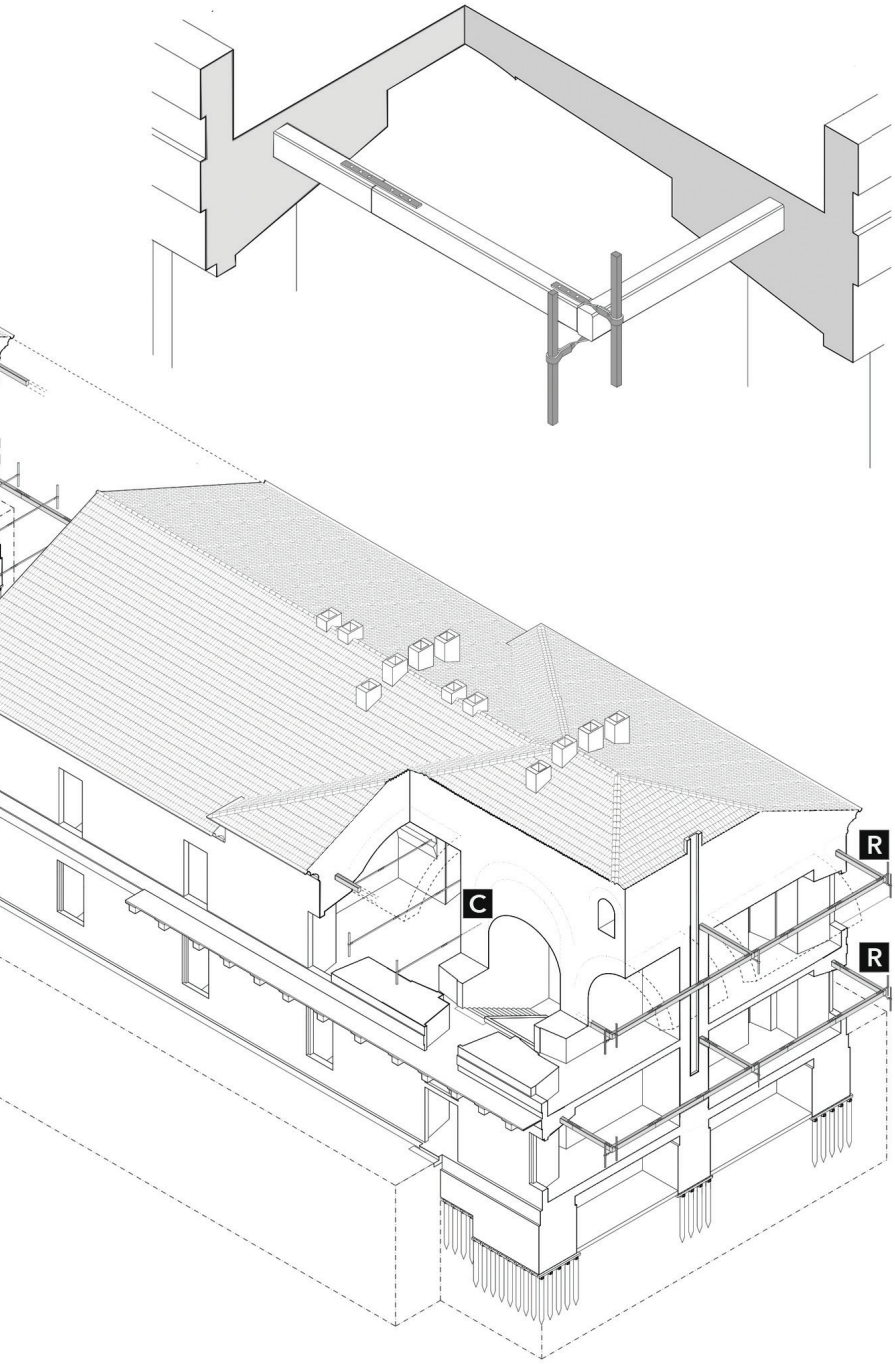
2. tessiture laterizie a tutto spessore visibili in corrispondenza delle morse di attesa delle pareti longitudinali interne ed esterne, nella manica Est del San Michele rimasta incompiuta // Full-thickness brickworks visible on the toothings for the internal and external longitudinal walls, in the unfinished east wing of the San Michele barracks. 3. la *concrezione* laterizia in un frammento murario, dietro il quartiere San Carlo // the brick *opus caementicium* in a wall fragment, behind the San Carlo barracks. 4. continuità delle tessiture murarie della volta alla prova e della parete esterna, in corrispondenza dello stipite di una finestra nella manica Nord-Est del San Michele // Continuity of the masonry work of the bomb-proof vault and the external wall at a window's jamb in the North-East wing of the San Michele barracks. 5. sede per l'imposta di una volta ordinaria a due teste, visibile in corrispondenza di una lunetta, nell'interrato del quartiere S. Carlo // housing for a one-brick common vault's impost, visible at a lunette, in the basement of the San Carlo barracks.



R “radiciamenti”: elementi lignei immersi nelle pareti perimetrali e di spina, giuntati con piatti metallici, e vincolati alle pareti ortogonali con ancoraggi metallici // “radiciamenti”: wooden elements embedded in perimeter and spine walls, joined to each other with metal strips and restrained to the side walls with metal anchors.

C catene: barre metalliche con ancoraggi terminali incassati nelle pareti // tie-rods: metal bars with side anchors housed in walls’ recessed.

6. l’organismo strutturale del quartiere San Tommaso con il suo sistema di connessioni, radiciamenti lignei e catene metalliche (disegno di A. Rossi) // the overall structural body of the San Tommaso barracks with its system of connections – wooden radiciamenti and iron tie-rods (drawing by A. Rossi).

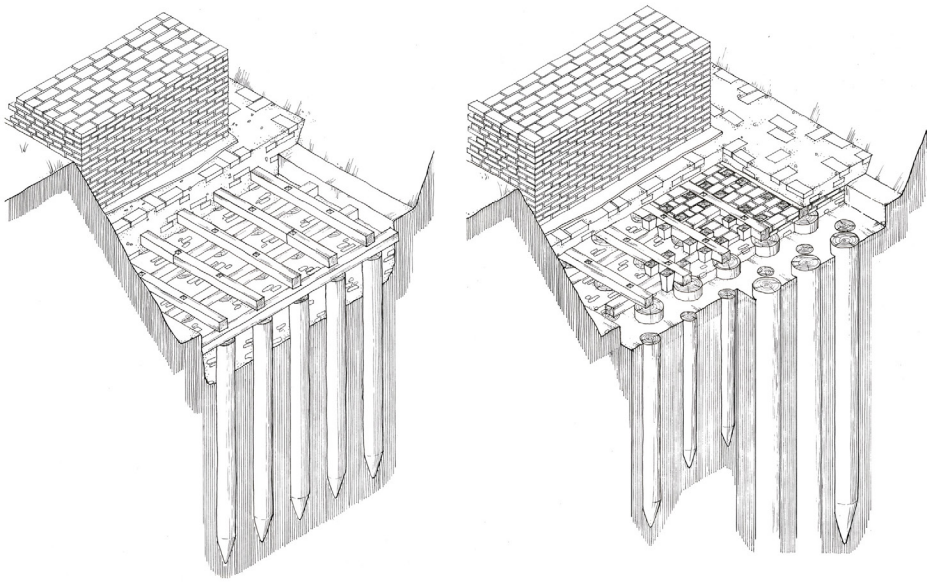

C
R
R

virtù del proprio peso, alla loro spinta (figura 5).

Nonostante la continuità delle membrature garantita dalla qualità costruttiva dei materiali e dalle modalità tecniche del loro assemblaggio, le caserme della Cittadella sono comunque dotate di dispositivi di connessione aggiuntivi, rilevabili direttamente negli edifici o desumibili dalle fonti d'archivio, che esprimono in maniera quasi paradigmatica una idea di fabbrica muraria in cui il primo e più importante requisito costruttivo e strutturale risiede nella possibilità di esibire un funzionamento unitario; idea tanto più interessante quanto diversa sembra la concezione delle poderose murature della Cittadella rispetto a quelle ordinarie. Questi dispositivi di connessione consistono innanzitutto in elementi lignei (*radiciamenti*, secondo una terminologia posteriore) immersi nelle murature all'atto costruttivo in modo da collegare i diversi ordini di pareti ortogonali e realizzare ciò che, nell'ideale pseudo-gotico dell'Alberti, erano i "nervi e legamenti" capaci di assicurare che tutti gli elementi potessero "prestarsi un reciproco soccorso", per usare questa volta le evocative (ma precise) parole di Rondelet.
Prescritti nelle Istruzioni di Bertola del 1749 (è il "telaro da formarsi tanto di longo che di traverso con grosse radici di rovere rosso"[7]) per il quartiere S. Tommaso, dove sono presenti alle quote del primo piano e del cornicione, per tutte le pareti perimetrali e le pareti interne longitudinali (figura 6), i radiciamenti sono confermati nelle Istruzioni successive anche per i quartieri S. Carlo e S. Michele (sicuramente alla quota del cornicione, per tutte le pareti perimetrali).
Il "telaro" di Bertola è elementare nella concezione ma la sua esecuzione a regola d'arte è a tal punto raffinata da destare lo stupore degli osservatori moderni, abituati a materiali e tecniche sempre più sofisticati ma sostanzialmente estranei al saper fare artigianale del cantiere storico che nulla lascia al caso: non il modo in cui i legni sono giuntati tra loro, non il loro ancoraggio terminale, non la loro sostituzione

bond them and create what, in Alberti's pseudo-Gothic ideal, were the "nerves and ligaments" capable of ensuring that all the elements could "come to each other's aid", to use Rondelet's evocative (yet precise) words.
Set out in Bertola's Instructions of 1749 (it is the "telaro to be formed both lengthwise and crosswise using large red oak roots"[7]) for the San Tommaso barracks, where they are found at the height of the first floor and cornice, for all the external walls and only the longitudinal internal ones (Figure 6), the radiciamenti are also confirmed in subsequent Instructions for the San Carlo and San Michele barracks (certainly at the height of the cornice, for the external walls).
Bertola's "telaro" is elementary in its design, but its workmanship is so refined as to astonish modern observers, who are accustomed to increasingly sophisticated materials and techniques but fundamentally distant form the craftsmanship of the historic building site, where nothing is left to chance: not the way the woods are joined together, not their terminal anchorage nor their replacement with metal elements where the flues cross.
The connections system is then completed by traditional metal tie-rods, embedded in the vaults or visible at the intrados, as refined in some construction solutions, such as the perfect intermediate joints with nails stopped by riveted pins, as carefully positioned so as not to preclude the possibility of building mezzanine floors in the large vaulted rooms during sieges.

The importance of connections in constructions in which the continuity and homogeneity of the building structure is functional to surviving the dynamic actions produced by shells, can also be seen in the foundations, where the system of "pilottaggi" - foundations on piles driven into the "light" soil (as the archival sources call the soft soil near the River Tanaro) - extends the same logic to the ground anchoring of the buildings as the radiciamenti used for the elevated parts and seems to be a transposition, in this case very literal, of the naturalistic metaphor of Scamozzi,



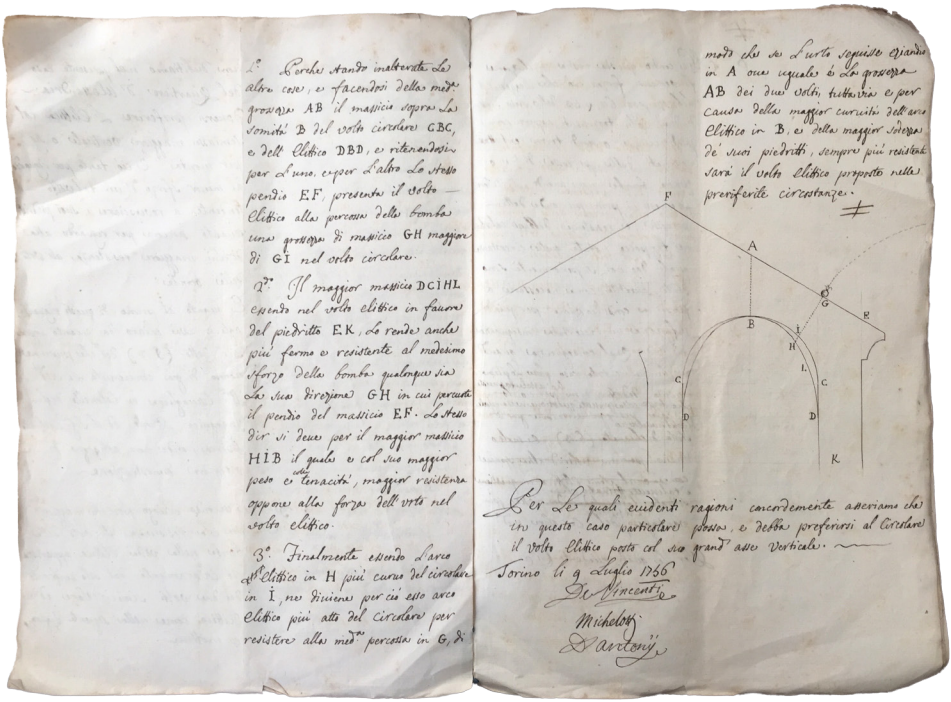
7. confronto tra i sistemi di fondazione di Bertola e Borra (disegno di E. Zanet) // comparison of the Bertola and Borra foundation systems (drawing by E. Zanet).

con elementi metallici in corrispondenza dell'attraversamento delle canne fumarie.
Il sistema di connessione è poi completato dai tradizionali incatenamenti metallici, immersi nelle volte o visibili alle reni, tanto raffinati in alcune soluzioni costruttive, come le perfette giunzioni intermedie con chiodi fermati mediante caviglie ribattute, quanto accuratamente posizionati per non precludere la possibilità di soppalcare le grandi sale voltate in occasione degli assedi.

L'importanza delle connessioni, all'interno di fabbriche nelle quali la continuità e omogeneità della compagine costruttiva è funzionale a garantire la sopravvivenza alle sollecitazioni dinamiche prodotte dall'urto delle bombe, si può rileggere anche a livello delle fondazioni dove il sistema dei "pilottaggi" – fondazioni su pali infissi nel terreno "leggero" (così è chiamato nelle fonti d'archivio il suolo cedevole in prossimità del Tanaro) – estende all'attacco a terra delle fabbriche la stessa logica dei radiciamenti usati per le parti in elevato e sembra una trasposizione, in questo caso davvero letterale, della metafora naturalistica di Scamozzi che paragonava le palificate alle radici, appunto, degli alberi.
Per gli edifici interni al perimetro fortificato sono stati riconosciuti due diversi sistemi di fondazione su pali. Il primo, descritto nelle Istruzioni generali di Bertola del 1732 e sostanzialmente riferibile alle classiche regole dimensionali e costruttive dei Trattati storici (Vitruvio, Alberti, Palladio) – in tema di snellezza (1/12) e interasse (almeno 2 diametri) dei pali e rapporto tra lunghezza dei pali e altezza dell'edificio (1/8) –, venne adottato nel quartiere S. Tommaso e riproposto, con varianti inessenziali (relative solo alla maggior lunghezza dei pali), nel S. Michele; il secondo, ideato da Giovanni Battista Borra e finalizzato a ottenere una maggiore condensazione del terreno ("che si fa colla molteplicità de' pali"), molto più articolato del precedente, venne adottato nel S. Carlo e nel palazzo del Governatore (figura 7).

who compared the piles to the roots of trees.
For the building inside the fortified enceinte, two different pile foundation systems were recognised. The first, outlined in Bertola's 1732 General Instructions and substantially in line with the classic dimensional and construction rules of the historical treatises (Vitruvius, Alberti, Palladio) - regarding the slenderness (1/12) and spacing (at least two diameters) of the piles and the ratio between pile length and building height (1/8) - was adopted in the San Tommaso barracks and proposed, with minor changes (relating only to increased piles length), in San Michele. The second, conceived by Giovanni Battista Borra and aimed at obtaining a greater ground condensation ("which is done by using a large number of piles"), was much more articulated than the previous one, and was adopted in San Carlo barracks and in the Governor's Palace (Figure 7).

The transition from the first to the second foundation system (which could only be reconstructed on the basis of archival sources) occurred at a crucial moment in the Citadel's history.
In October 1756, a foundation settlement in the San Tommaso barracks, which is still perfectly visible today, triggered the process that led to changing the pilottaggio system proposed by Bertola in favour of Borra's new system[8].
A few months earlier, between June and July, there had been an interesting scientific dispute over the best shape for the bomb-proof vaults, with the final choice of a raised elliptical profile (i.e. with the major axis of the ellipse placed vertically), which was adopted in the San Tommaso barracks (interrupting the circular profile that had just been sprung) and proposed again, with some rethinking, in subsequent barracks, starting with San Carlo[9]. (Figure 8).
The two events should be read as part of a general process of reorganisation of roles and redefinition of strategies following Bertola's death in 1755. At the same time, they indicate changes in the approach to design.
By the mid-eighteenth century, the time was



8. una delle perizie redatte in occasione del dibattito sulla miglior forma da assegnare alle volte alla prova (AST, Sezione Corte, Materie Militari, Imprese, m. 13) // one of the reports drawn up during the debate on the best form of bomb-proof vaults (AST, Sezione Corte, Materie Militari, Imprese, m. 13).

Il passaggio dal primo al secondo sistema di fondazione (che è stato possibile ricostruire esclusivamente sulla base delle fonti archivistiche) si colloca in un momento cruciale per la storia della Cittadella.
Nell'ottobre del 1756, un cedimento fondale verificatosi nel quartiere S. Tommaso, ancora oggi perfettamente riconoscibile con chiarezza da manuale, innescò il processo che portò alla modifica del sistema di pilottaggio proposto da Bertola in favore del nuovo sistema di Borra[8].
Qualche mese prima, tra giugno e luglio, si era svolta una interessante disputa scientifica sulla miglior forma da assegnare alle volte alla prova, con la scelta finale di un profilo a sesto ellittico rialzato (ovvero con l'asse maggiore dell'ellisse disposto verticalmente) che venne adottato già nel quartiere S. Tommaso (interrompendo il profilo circolare appena impostato) e riproposto, con qualche ripensamento, nei quartieri successivi, a partire da quello di S. Carlo[9]. (figura 8)
Le due vicende vanno lette all'interno di un generale processo di riassetto di ruoli e ridefinizione delle strategie conseguenti alla morte di Bertola, avvenuta nel 1755, e testimoniano al contempo di un mutato clima nell'approccio alla progettazione.
A metà Settecento i tempi erano ormai maturi per un più intimo coinvolgimento delle competenze statiche nella progettazione architettonica. E se per le fondazioni questo coinvolgimento non poteva, realisticamente, andare oltre una pur netta affermazione del ruolo imprescindibile della sperimentazione sul campo per la calibrazione delle caratteristiche tecniche e dimensionali dei pilottaggi, per le volte alla prova esso raggiunse livelli di straordinaria modernità.
Le argomentazioni emerse in occasione della disputa sul miglior profilo delle volte e i riferimenti alla letteratura scientifica dell'epoca dimostrano infatti come nel dimensionamento delle strutture murarie della Cittadella si sia fatto esplicitamente ricorso (tra le prime volte nella storia dell'architettura) a criteri di verifica strutturale, riconducibili non solo ai consolidati modelli di

ripe for greater involvement of static skills in architectural design. Although for the foundations this involvement could not, realistically, go beyond a clear affirmation of the indispensable role of on-field experimental tests for tuning the technical and dimensional characteristics of the pilottaggi, for the bomb-proof vaults, it reached levels of extraordinary modernity.
In fact, the arguments that emerged during the discussion over the best profile for the vaults and the references to the scientific literature of the time show how the masonry structures of the Citadel were explicitly designed (for one of the first times in the history of architecture) on the grounds of structural verification criteria that could be traced back not only to De La Hire's and Bélidor's[10] classic models on the statics of arches (which would be interesting in itself), but also to (by then recent) developments in ballistics, a science born in the middle of the century[11].
The bomb-proof vaults and their supports were 'calculated' on a strictly scientific basis, as shown by the surprising similarities in the dimensions of the cross-sections of the San Tommaso and San Carlo barracks with the figures of the example given in the *Architettura Militare*[12] by Alessandro Vittorio Papacino d'Antoni, who, not by chance, played a major role in the mid-century debate.

De La Hire e Bélidor[10] sulla statica degli archi (ciò che sarebbe già di per sé interessante) ma anche ai recenti sviluppi della balistica, scienza nata proprio alla metà del secolo[11].
Le volte a prova di bomba e i loro sostegni furono 'calcolati' su basi rigorosamente scientifiche, come dimostra la sorprendente coincidenza delle dimensioni delle sezioni trasversali dei quartieri S. Tommaso e S. Carlo con i valori dell'esempio riportato nell'*Architettura Militare*[12] di Alessandro Vittorio Papacino d'Antoni, non a caso uno dei protagonisti della disputa di metà secolo /

[1] 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. La citazione è in vol. I, p. 203.
[2] *Ibidem*, Lib. V, p. 206: "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".
[3] *Ibidem*: "Che le volte siano impenetrabili alla bomba, cioè a dire che non possano mai essere da quella perforate, né fessurate".
[4] *Istruzioni da applicarsi nella condotta delli travagli che si devono mandare in esecuzione nell'anno corrente 1732 a beneficio delle Fortificazioni di Alessandria*, Giuseppe Ignazio Bertola, 7 maggio 1732.
[5] Estese campagne sperimentali sulla resistenza delle malte sono riportate in Papacino d'Antoni, *Dell'Architettura Militare* …, op. cit. vol. 5, parte III.
[6] B. Vittone, *Istruzioni elementari per l'indirizzo dei giovani allo studio dell'architettura civile*, Lugano 1760.
[7] *Istruzioni per li travagli da farsi alla Cittadella del Borgo d'Alessandria nell'anno 1749*, Giuseppe Ignazio Bertola, 20 marzo 1749.
[8] Una discussione dettagliata dei sistemi di fondazione e della vicenda che dal sistema di Bertola condusse a quello di Borra è contenuta in: 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.
[9] Il dibattito sul profilo da assegnare alle volte alla prova è ricostruito in: E. Piccoli & C. Tocci, *A prova di bomba. Ingegneri, architetti e teorie sulle volte in un cantiere militare di metà Settecento*, ArcHistoR, anno VI (2019), 12.
[10] P. De La Hire, *Sur 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.
[11] B. 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.
[12] Papacino d'Antoni, *Dell'Architettura Militare* …, op.cit., Libro I, p. 208.

[1] A.V. Papacino d'Antoni, *Dell'Architettura Militare per le Regie Scuole Teoriche d'Artiglieria, e Fortificazione*, 6 vol. [vol. 2, 1779, is by I.A. Bozzolino], Stamperia Reale, Torino 1759-1781. The quotation is in vol. I, p. 203.
[2] *Ibidem*, Lib. V, p. 206: "That the walls, which support the vaults, are firm enough so that in the shakes produced by the most violent shocks the building does not collapse or crack".
[3] *Ibidem*: "That the vaults are bomb-proof, i.e. that they can never be penetrated or shattered by shells".
[4] *Istruzioni da applicarsi nella condotta delli travagli che si devono mandare in esecuzione nell'anno corrente 1732 a beneficio delle Fortificazioni di Alessandria*, Giuseppe Ignazio Bertola, 7 maggio 1732.
[5] Extensive experimental tests on the tensile strength of mortars are documented in Papacino d'Antoni, *Dell'Architettura Militare* …, op. cit. vol. 5, parte III.
[6] B. Vittone, *Istruzioni elementari per l'indirizzo dei giovani allo studio dell'architettura civile*, Lugano 1760.
[7] *Istruzioni per li travagli da farsi alla Cittadella del Borgo d'Alessandria nell'anno 1749*, Giuseppe Ignazio Bertola, 20 marzo 1749.
[8] A detailed discussion of the foundation systems and the sequence of events that led from Bertola's system to Borra's can be found in: 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 (ed.), *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.
[9] The debate on the profile to be given to the vaults is reconstructed in: E. Piccoli & C. Tocci, *A prova di bomba. Ingegneri, architetti e teorie sulle volte in un cantiere militare di metà Settecento*, ArcHistoR, anno VI (2019),12.
[10] P. De La Hire, *Sur 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.
[11] B. 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.
[12] Papacino d'Antoni, *Dell'Architettura Militare* …, op.cit., Libro I, p. 208.