

Il contributo dell'École d'Artillerie et du Génie di Metz alla teoria della volte in muratura

Federico Foce

Il presente lavoro intende offrire un primo quadro generale del rilevante contributo teorico e applicativo apportato al tema della stabilità delle volte in muratura nell'ambito della École d'Artillerie et du Génie di Metz fra il 1825 e il 1870. Questo preciso intervallo temporale è definito, da un lato, dalla data della I edizione litografata del *Cours sur la stabilité des constructions* di Nicolas Persy e, dall'altro, dalla sconfitta delle armate francesi a Sedan. Dopo tale tragico evento, nel quale indubbe furono le responsabilità delle forze militari che proprio a Metz venivano formate, l'École è divenuta oggetto di una sorta di rimozione storica —perdurante in Francia sino a tempi recenti— che ha impedito di far emergere in pieno la qualità della ricerca e dell'insegnamento tecnico-scientifico svolti a Metz.

INTRODUZIONE

Il tema delle strutture voltate in muratura è divenuto negli ultimi decenni oggetto di studio da più fronti disciplinari: a partire dagli anni '60, scienziati delle costruzioni, restauratori e storici della meccanica si sono trovati a condividere, volenti o nolenti, un campo d'indagine rimasto per lungo tempo ai margini degli specifici interessi delle differenti discipline, vuoi per l'attenzione esclusiva sino ad allora riservata ai materiali «moderni» e ai metodi di analisi strutturale ad essi appropriati, vuoi per l'ancor sopito problema della conservazione del patrimonio edili-

zio storico, vuoi per la totale inesistenza di un settore di ricerca dedicato alla storia della meccanica strutturale.

Da quando Jacques Heyman (1966) —non a caso prima vera figura di strutturista, restauratore e storico— ha «ufficialmente» aperto la discussione sullo *stone skeleton*, moltissimo è stato scritto nella linea da lui tracciata, tanto che sembrerebbe difficile reperire qualcosa di nuovo e significativo sul tema in questione. Come spesso accade quando un argomento diventa di interesse generale, i primi traguardi raggiunti da pochi pionieri diventano il riferimento dei molti successori: la ripetizione prende allora il posto dell'approfondimento, la semplice citazione sostituisce la lettura critica, l'errore ripetuto assume valore di verità. Chi, ad esempio, sarebbe disposto a riconoscere che la teoria delle volte di Coulomb conduce a risultati inesatti, almeno nella forma da lui effettivamente sviluppata? Chi riterrebbe che Navier, fondatore della teoria dell'elasticità dei solidi e favorevole al suo impiego anche per l'analisi delle strutture murarie, è invece uno dei pochi autori ad aver fornito la corretta teoria dell'arco come sistema di conci rigidi, correggendo esattamente ciò che Coulomb aveva lasciato incompleto? Chi, infine, dopo più di 40 anni dal ricordato contributo di Heyman, crederebbe che gli studi più rigorosi ed esaustivi sul problema dell'equilibrio limite dell'arco sono contenuti in una serie di lavori composti nella forma di manuali didattici e rimasti sino ad oggi al di fuori dell'indagine storiografica e scientifica?

**L'ÉCOLE DI METZ E LA PRODUZIONE
OTTOCENTESCA SULLA «STABILITÉ DES VOÛTES»**

**I Cours litografati presso l'École d'Artillerie et
du Génie di Metz**

L'attuale ricerca storica e teorica sulla statica delle strutture voltate in muratura consente di affermare con certezza che, proprio presso l'École d'Artillerie et du Génie di Metz, è stato sviluppato un importantissimo nucleo di studi la cui portata merita di essere posta in giusta luce. Si tratta di un *corpus* di testi straordinariamente omogeneo, per quanto dovuto a più autori, col quale l'analisi dell'equilibrio limite dell'arco murario — inteso come sistema di conci rigidi secondo il modello della tradizione pre-elastica del XVIII secolo — è svolta in modo corretto e generale sulla base del metodo dei massimi e dei minimi applicato per la prima volta da Coulomb (1773) in forma incompleta.

Tale *corpus* è costituito dai corsi delle lezioni predisposti dai docenti dell'École per gli allievi genieri e artiglieri. Si tratta di manoscritti litografati dei quali non risultano edizioni a stampa durante l'intero periodo di esistenza della scuola, conclusosi bruscamente nel 1870 con la tragica sconfitta delle forze armate francesi a Sedan. Tale duplice circostanza è certamente all'origine della scarsa attenzione rivolta sino a tempi recenti all'École di Metz in generale e alla letteratura tecnico-scientifica elaborata al suo interno, in particolare.

In merito al tema specifico della «Stabilité des voûtes», i contributi significativi sono raccolti nei seguenti testi ad uso degli allievi dei corsi di «Stabilité della costruzioni» e di «Costruzioni»:

Persy Nicolas, *Cours sur la stabilité des constructions, à l'usage des Élèves de l'École Royale de l'Artillerie et du Génie*, Lithographie de l'École Royale de l'Artillerie et du Génie, Metz, 1825.

Persy Nicolas, *Cours de stabilité des constructions, à l'usage des Élèves de l'École Royale de l'Artillerie et du Génie*, Lithographie de l'École Royale de l'Artillerie et du Génie, Metz, 1827 II Édition.

Persy Nicolas, *Cours de stabilité des constructions, à l'usage des élèves de l'école de l'Artillerie et du Génie*, Lithographie de l'École d'Application, Metz, septembre 1831, III Édition.

Persy Nicolas, *Cours de stabilité des constructions, à l'usage des élèves de l'École d'Application*

de l'Artillerie et du Génie, Lithographie de l'École d'Application, Metz, juillet 1834, IV Édition.

Michon Pierre Felix, *Instruction sur la stabilité des voûtes et des murs de revêtement*, Lithog. de l'École Impériale d'application de l'Artillerie et du Génie, Metz, juillet 1857.

Gardier Louis Jules, *Résumé des Leçons, 1ère partie. Constructions en maçonnerie, Leçons 4,5,6,7,8 Stabilité des murs de revêtement et des voûtes*, Lithographie de l'École d'application de l'artillerie et du génie, s.d.

Chassinat Joseph Albert, *Cours de construction. Notions pratiques sur les éléments, la forme, les dimensions et la construction des maçonneries*, I Partie, Tome I, Lith. de l'École Impériale d'application de l'Artillerie et du Génie, Septembre 1865.

Dei testi elencati, il *Cours* di Persy, elaborato in quattro edizioni ampliate, è il primo in ordine cronologico ed il più importante sul piano teorico. In esso è esposta per la prima volta la teoria generale dell'equilibrio limite delle strutture ad arco (simmetriche e soggette a carichi simmetrici) attraverso l'applicazione corretta del metodo dei massimi e dei minimi già utilizzato da Coulomb in modo incompleto. Di tale circostanza lo stesso Persy si mostra perfettamente consapevole: «Cette methode très-ingénieuse et dirigée vers l'utilité pratique a l'avantage non seulement de bannir l'arbitraire tant de la position du joint de rupture, que du mode d'action des voussoirs, par conséquent de la valeur de la poussée, mais encore de conduire à une théorie aussi simple que lumineuse, qui n'a besoin pour devenir tout-à-fait rigoureuse, que d'une légère modification dans l'énoncé de son principe et qui s'accorde avec les phénomènes réels, pourvu que l'on considère les différentes positions que peut avoir la force appliquée à la clef. Coulomb n'a pas développé sa méthode; il s'est borné à quelques indications insuffisantes pour en faire aisément saisir l'esprit (...)» (Persy 1825, p. 3).

Come tra breve vedremo, la teoria di Persy ha in effetti il pregio di dedurre tutti i possibili meccanismi di collasso attraverso lo studio analitico delle sei funzioni di spinta (due di scorrimento, due di rotazione per spinta applicata all'estradosso del giunto chiave, due di rotazione per spinta applicata all'intradosso del giunto in chiave) e la conseguente determinazione delle posizioni relative dei giunti di rottura. Il passo avanti rispetto agli autori del XVIII secolo è deci-

sivo tanto sul piano teorico quanto su quello metodologico, perché l'approccio di Persy è un perfetto esempio di ciò che in filosofia della scienza va sotto il nome di metodo ipotetico-deduttivo: «Nous tâcherons d'établir la théorie des voûtes à priori ou indépendamment de l'expérience qui ne saurait embrasser tous le cas, et par là d'affranchir du reproche d'incertitude et d'empirisme, cette partie essentielle de la science des constructions» (Persy 1825, p. 4). Così scrive Persy a conclusione del *Préliminaire*. Per dirla con Truesdell, «experiment is a necessary adjunct to a physical theory; but it is an adjunct, not the master» (Truesdell *et al.* 1960, p. 229).

Altro testo di rilievo è la *Instruction* di Michon. In essa il metodo dei massimi e dei minimi è sviluppato in una forma più direttamente accessibile in quanto le forze in chiave delle quali si cerca il massimo sono intese come *spinte* che una metà di arco esercita sull'altra metà per impedire i movimenti di scorrimento o rotazione verso l'interno di un concio teorico, mentre le forze della quali si cerca il minimo sono intese come *resistenze* che il concio stesso oppone ai movimenti di scorrimento e rotazione verso l'esterno. All'esposizione teorica è inoltre affiancata una serie di *Tables* riportanti, per varie tipologie di volte e per diversi valori del rapporto K fra raggio d'estradosso e raggio d'intradosso, le spinte e le resistenze a scorrimento e rotazione e il corrispondente coefficiente di stabilità, inteso come rapporto fra la resistenza minima e la spinta massima per un dato valore di K .

Gli altri testi di Chassinat e Gardier, maggiormente legati agli aspetti costruttivi, presentano una sezione sulla stabilità delle volte che ricalca l'esposizione della *Instruction* di Michon senza sostanziali differenze.

Gli articoli pubblicati sul *Mémorial de l'Officier du Génie*

In parallelo alla produzione interna all'École di Metz e strettamente connessa ad essa per approccio, contenuto ed autori, esiste una serie di articoli stampati sulla rivista ufficiale del Genio francese, il *Mémorial de l'Officier du Génie*. Rispetto ai corsi didattici usati a Metz, tali lavori sono maggiormente emersi all'indagine storiografica anche grazie all'*Examen critique et historique des principales théories ou so-*

lutions concernant l'équilibre des voûtes pubblicato da Poncelet nel 1852. In questo importante resoconto è citato anche il *Cours* di Persy, sul quale però Poncelet si limita ad affermare che le formule in esso contenute «sont, si je ne me trompe, ici présentées pour la première fois aux ingénieurs» (Poncelet 1852, p. 531).

Audoy, Mémoire sur la poussée des voûtes en berceau, *Mémorial de l'Officier du Génie*, 1820, pp. 1-96.

De Garidel, Mémoire sur le calcul des voûtes en berceau, *Mémorial de l'Officier du Génie*, 12, 1835, pp. 7-72.

Petit, Mémoire sur le calcul des voûtes circulaires, *Mémorial de l'Officier du Génie*, 12, 1835, pp.73-150.

Poncelet, Jean-Victor, Solution graphique des principales questions sur la stabilité des voûtes, *Mémorial de l'Officier du Génie*, 12, 1835, pp. 151-213.

Michon, Tables et formules pratiques pour l'établissement de voûtes cylindriques, *Mémorial de l'Officier du Génie*, 15, 1848, pp. 7-117.

L'articolo di Audoy è probabilmente il primo in ordine cronologico nel quale sono esplicitate, per alcune tipologie di volte, le formule analitiche tratte dal metodo dei massimi e minimi di Coulomb per il calcolo delle spinte relativamente ai soli meccanismi di rotazione pura e scorrimento puro.

Gli articoli di Petit e de Garidel, in linea col precedente lavoro di Audoy, riportano alcuni sviluppi numerici e alcune tavole di dimensionamento per tipologie di volte non trattate dallo stesso Audoy. Complementare all'esposizione analitica seguita dagli autori citati è invece quella geometrica prediletta da Poncelet, la quale si differenzia dalle due precedenti per una maggiore generalità in merito all'analisi dei possibili meccanismi di collasso. A differenza dei lavori di Petit, De Garidel e dello stesso Audoy, quello di Poncelet, che certo ben conosceva il testo di Persy per aver insegnato a Metz dal 1826 al 1835, conserva infatti la stessa impostazione generale, per quanto tradotta in una formulazione grafica.

Sul procedimento geometrico di Poncelet si basa l'articolo di Michon, nel quale i valori delle spinte e delle resistenze a scorrimento e rotazione sono calcolate per via grafica e riportate, assieme ai coefficienti di stabilità e alle posizioni angolari dei giunti di rot-

tura, in 66 *Tables* relative ad altrettanti tipi di volte. Queste tavole sono in parte riprese da Michon nella menzionata *Instruction* del 1857.

RICERCA E INSEGNAMENTO FRA RIGORE TEORICO E FINALITÀ APPLICATIVE

Il quadro precedentemente delineato fa emergere un aspetto caratteristico della ricerca e dell'insegnamento svolti presso l'École di Metz. Come hanno sottolineato Antoine Picon e Bruno Belhoste, esiste a Metz «un lien extrêmement étroit entre l'aspect théorique et l'aspect pratique» che colloca la preparazione degli allievi dell'École d'Artillerie et du Génie in posizione d'avanguardia sul piano tecnico-scientifico: «Officiers, les anciens de l'École de Metz sont aussi des ingénieurs à part entière comme leurs camarades de l'École polytechnique entrés dans les Mines ou les Ponts et Chaussées» (Belhoste *et al.*, 1996, p. 20).

Nell'ambito specifico della teoria delle volte tale posizione appare anzi di assoluta leadership. È quindi opportuno approfondire l'analisi della sopraelenata letteratura alla luce dei seguenti punti, emergenti peraltro dall'organizzazione stessa dei corsi delle lezioni.

Modello meccanico, ipotesi teoriche, considerazioni costruttive

In tutti i lavori prima elencati, il modello meccanico dell'arco murario è quello della tradizione pre-elastica settecentesca: l'arco è cioè considerato come un sistema di conci rigidi sui cui giunti di contatto si applica attrito e coesione. In particolare:

- i conci sono supposti di spessore piccolissimo, ciò che consente di attribuire ai giunti di rottura una qualunque posizione angolare;
- i giunti sono considerati normali all'intradosso ed è presupposta l'esistenza di un giunto verticale sull'asse di simmetria dell'arco;
- la coesione a taglio e a trazione è messa in conto nelle formule analitiche delle spinte (supposta uniformemente distribuita sulla superficie dei giunti di rottura) ma è considerata trascurabile, soprattutto nel caso di volte disarmate poco dopo la costruzione: per la coesione a trazione Persy

(1825, p. 20) riporta i valori seguenti, ripresi da Boistard: 6960 Kg/m² «pour les mortiers de chaux et sable»; 3700 Kg/m² «pour les mortiers de chaux et ciment»;

- la resistenza dovuta all'attrito è sempre messa in conto nelle formule relative ai meccanismi di scorrimento: per il coefficiente di attrito Persy (1825, p. 20) riporta il valore 0,76 ripreso da Boistard; Poncelet (1835, p. 191) riporta i valori 0,58, ripreso da Rondelet ma considerato come minimo, e 0,66 ripreso dalle esperienze di Rennie e considerato più realistico.

Formulazione della teoria generale

Come si è detto in precedenza, spetta a Persy il merito di aver sviluppato in tutte le sue conseguenze il metodo dei massimi e minimi, facendo emergere i limiti della trattazione di Coulomb in relazione ai meccanismi di collasso per rotazione, quelli peraltro più probabili.

In breve, Persy analizza l'equilibrio di una semi-volta sotto l'azione del peso proprio e della spinta orizzontale applicata in un generico punto della chiave. Considerato un giunto qualunque definito dall'angolo formato con la verticale per la chiave, per il concio teorico così individuato egli scrive le due equazioni di equilibrio allo scorrimento verso il basso e verso l'alto e le due equazioni di equilibrio alla rotazione intorno allo spigolo d'intradosso e d'estradosso. Rispetto ai movimenti verso l'interno, l'equilibrio del concio richiede che si cerchi il massimo della spinta di scorrimento verso il basso e della spinta di rotazione intorno all'intradosso, ciò che individua i due valori estremi G e F delle spinte ed i giunti I e J ad esse associati; rispetto ai movimenti del concio verso l'esterno, l'equilibrio richiede che si cerchi il minimo della spinta di scorrimento verso l'alto e della spinta di rotazione intorno all'estradosso, ciò che individua i due valori estremi g e f delle spinte ed i giunti i e j ad esse associati. Ora, osserva nitidamente Persy, le spinte G e g di scorrimento non dipendono dal punto di applicazione in chiave, per cui affinché non avvengano meccanismi di scorrimento occorre che sia:

$$G < g .$$

Tale disuguaglianza è data anche da Coulomb (1773).

Al contrario, nel caso dei movimenti di rotazione le spinte dipendono anche dal punto di applicazione, le cui posizioni limite sono all'estradosso e all'intradosso del giunto in chiave. Conservando allora le notazioni F e f , J e j per il massimo e il minimo delle spinte applicate all'estradosso della chiave e per i rispettivi giunti di rottura e indicando, corrispondentemente, con F' e f' , J' e j' il massimo e il minimo della spinte applicate all'intradosso e i rispettivi giunti di rottura, Persy individua le due seguenti disuguaglianze il rispetto delle quali garantisce che non si attivino meccanismi di rotazione:

$F < f$ per spinta applicata all'estradosso della chiave

$F' < f'$ per spinta applicata all'intradosso della chiave

Quando $F = f$ e il giunto J si trova più in alto del giunto j , l'arco collassa con rotazione verso l'interno delle due parti superiori e verso l'esterno delle due parti inferiori; viceversa, quando $F' = f'$ e il giunto J' si trova più in basso del giunto j' , l'arco collassa con rotazione verso l'esterno delle due parti superiori e verso l'interno delle due parti inferiori.

Erroneamente, Coulomb aveva considerato soltanto le spinte F e f' , individuando l'impossibilità di meccanismi di rotazione nella disuguaglianza

$$F < f'.$$

Tale disuguaglianza è invece falsa perché la conseguente condizione di collasso $F = f$ si riferisce a spinte applicate in due distinti punti della chiave, mentre il punto di applicazione della spinta in chiave all'atto dell'uno o dell'altro meccanismo è ovviamente unico. In sostanza, mancando di considerare i due altri estremi F' e f' della spinta, il criterio espresso dalla disuguaglianza di Coulomb porta a ritenere stabile un arco che è già crollato. Questi risultati sono stati ottenuti in recenti studi sull'equilibrio delle strutture ad arco basati sull'utilizzo del principio dei lavori virtuali (Sinopoli *et al.*, 1997; Foce 1999). Essi, però, sono tutti impliciti nella teoria di Persy, della quale quegli studi hanno fatto debita menzione.

L'analisi di Persy porta inoltre a considerare tutti i

possibili meccanismi di collasso, tenendo conto che movimenti di rotazione possono combinarsi con movimenti di scorrimento dando luogo a meccanismi misti. Un quadro esauriente dei meccanismi di collasso, complessivamente in numero di otto, è svolto anche da Michon (1857), il quale descrive inoltre per quali tipologie di volte un meccanismo è più probabile di altri.

Per avere un'idea dell'ampiezza delle problematiche teoriche e applicative affrontate da Persy, riportiamo qui di seguito la serie di questioni da lui poste e risolte sulla base della sua teoria generale:

- «1re Question: Une voûte étant donnée, déterminer les joints relatifs aux limites et les valeurs de ces limites»;
- «2e Question: Vérifier si un voûte proposée se soutiendra ou non d'elle-même»;
- «3me Question: Une voûte supposée stable sur son plan de naissance, déterminer les dimensions que son pied-droit doit avoir pour résister à la poussée»;
- «4e Question: Une voûte étant stable, à cela près qu'elle peut glisser sur ses joints de naissances, supposés horizontaux, déterminer la résistance qu'il convient d'ajouter à sa partie inférieure pour empêcher cet effet»;
- «5e Question: L'intrados d'une voûte, sans pied-droit étant donné, déterminer les limites des épaisseurs sur lesquelles elle pourra se soutenir»;
- «6e Question: Vérifier si une voûte proposée est capable ou non de supporter une charge donnée»;
- «7e Question: Une voûte étant donnée, assigner les pressions que supportent les voussoirs en ses principaux points»;
- «8e Question: Une voûte étant donnée, déterminer la pression supportée par son cintre en charge, aux diverses époques de la construction».

A fianco dell'analisi limite in senso stretto, utile a determinare in funzione della geometria e dell'attrito gli spessori minimi della volta e dei piedritti corrispondenti al collasso incipiente, gli autori citati si preoccupano di quantificare il *coefficient de stabilité* da assegnare alle strutture reali, coefficiente che rappresenta un «fattore geometrico di sicurezza» nel senso esattamente inteso da Heyman (1969) in relazione alla stabilità delle strutture ad arco. Dal confronto con strutture esistenti la cui solidità è stata provata

dal tempo, Persy fornisce ad esempio un coefficiente di stabilità variabile da 1,9 a 2; altri autori indicano anche valori più, soprattutto per volte destinate a sopportare carichi modesti.

Le tipologie costruttive: formule analitiche, spessori in chiave, coefficienti di stabilità

Nel complesso, in quasi tutti i testi citati sono riportate le formule analitiche per il calcolo delle spinte delle seguenti tipologie di strutture voltate:

- volte a pieno centro con estradosso parallelo, *en chape* e orizzontale;
- volte *en anse de panier* con estradosso parallelo, *en chape* e orizzontale;
- volte ad arco di cerchio con estradosso parallelo, *en chape* e orizzontale;
- piattabande;
- volte sferiche (cupole) estradossate parallelamente;
- volte a crociera e *en arc de cloître*.

In base al tipo d'impiego ed alla resistenza richiesta, alcuni autori danno anche la seguente classificazione:

- *voûtes à l'éprouve*, sono quelle che devono resistere agli urti delle bombe;
- *voûtes très fortes*, sono quelle utilizzate per i ponti stradali e ferroviari per le quali si prevedono forti carichi con vibrazioni, ma senza urti notevoli;
- *voûtes fortes*, sono quelle per gallerie, tunnel e magazzini, destinate a sopportare carichi considerevoli ma non soggette ad urti e vibrazioni;
- *voûtes moyennes*, sono quelle impiegate nei fondi delle costruzioni per le quali si prevedono carichi analoghi a quelli che si depositano sul pavimento degli edifici;
- *voûtes légères*, sono quelle delle chiese e delle coperture dei grandi edifici, le quali, oltre al peso proprio, devono portare carichi molto modesti.

Per ogni categoria è importante tener conto del ribassamento, al cui crescere cresce anche la spinta e la sollecitazione dei materiali. È allora opportunamente introdotto il raggio medio r , cioè il raggio del cerchio passante per le imposte e la chiave. In funzione di tale raggio medio, alcuni autori (Michon

1857; Chassinat 1865) riportano per le cinque categorie sopra indicate i valori da utilizzare per lo spessore e in chiave, espresso in metri, e per il coefficiente di stabilità inteso come rapporto fra la resistenza minima e la spinta massima:

	Spessore in chiave (in m)	Coefficiente di stabilità
<i>Voûtes à l'éprouve</i>	$e = 0,50 + 0,12 r$	$1,50 \div 2$
<i>Voûtes très fortes</i>	$e = 0,40 + 0,8 r$	$1,35 \div 1,45$
<i>Voûtes fortes</i>	$e = 0,30 + 0,6 r$	$1,25 \div 1,35$
<i>Voûtes moyennes</i>	$e = 0,20 + 0,4 r$	$1,20 \div 1,25$
<i>Voûtes légères</i>	$e = 0,10 + 0,2 r$	$1,12 \div 1,20$

Le Tables di calcolo e verifica

Al di là dell'apprezzamento per l'apporto teorico riconosciuto alla produzione scientifica esaminata, occorre ricordare che le finalità principali della formazione tecnica dell'École di Metz erano rivolte alle applicazioni pratiche. Anche da questo punto di vista, peraltro, la mole di lavoro sviluppata nella letteratura sopracitata è impressionante. Nel complesso, sono reperibili Tavole precalcolate riportanti, per le tipologie prima elencate ed in funzione del rapporto K , variabile da 2 a 1, fra raggio di estradosso e di intradosso in chiave, i valori delle superfici geometriche, le distanze del loro centro di gravità, i valori delle resistenze e delle spinte a rotazione e scorrimento coi corrispondenti angoli di rottura, nonché il loro rapporto misurante il coefficiente di stabilità. Fra queste Tavole, quelle più complete sono dovute a Michon (1848).

CONCLUSIONI

Per quanto sommario, il quadro messo precedentemente a fuoco appare di grandissimo interesse non solo per la qualità e la quantità dei contenuti ma anche per l'attualità che tali contenuti possono assumere nel momento presente, nel quale gran parte degli interessi di ricerca nel campo della meccanica delle strutture e del restauro statico si appunta sul patrimonio del costruito in muratura. In tale prospettiva, il materiale sopra esaminato potrebbe rivelarsi estremamente prezioso: da un lato, perché offre all'ingegnere strutturista un supporto teorico e applicativo perfettamente coerente con la linea oggi privilegiata per

l'analisi delle strutture murarie ad arco — e cioè l'approccio in termini di teoria della plasticità introdotto da Heyman — fra l'altro senza patirne gli inconvenienti connessi all'impossibilità di trattare i casi di collasso implicanti scorrimento; dall'altro, perché consente al restauratore di avvicinarsi all'opera muraria con un'ottica più vicina a quella di coloro che ancora la progettavano e costruivano.

Se è vero, come si diceva in apertura, che l'odierna riflessione sui temi della costruzione impone l'obbligo di un confronto a figure con differenti estrazioni scientifiche, è auspicabile che quel confronto avvenga sulla base di un terreno comune e senza la tacita intenzione di nascondersi entro specialismi disciplinari. Ci sembra che una felice mediazione in tal senso possa provenire da una consapevole e meditata ricerca sulla stessa storia del costruire in relazione agli aspetti teorici, tecnici e costruttivi. Una tale propensione verso l'approccio storico ha già dato significativi risultati grazie anche all'opera di Edoardo Benvenuto, del quale la neofondata *Associazione per la ricerca sulla Scienza e l'Arte del Costruire nel loro sviluppo storico* intende proseguire le linee d'indagine scientifica: quanto qui esposto per sommi capi vuole essere un'ulteriore testimonianza in questa direzione.

BIBLIOGRAFIA

Belhoste B., Picon a.: «Les caractères généraux de l'enseignement à l'École d'application de l'artillerie et du génie

de Metz», in *L'École d'application de l'artillerie et du génie de Metz (1802-1870). Enseignement et recherches*, Actes de la journée d'étude du 2 novembre 1995, Ministère de la Culture-Direction du Patrimoine, Musée des Plans-Reliefs, 1996.

Coulomb B. C. A.: «Essai sur une application des règles de *maximis et minimis* à quelques problèmes de statique, relatifs à l'architecture», *Mém. présentés par divers savans* (1773), 1776, pp. 343-382.

Foce F.: «'Bit by bit, lacuna by lacuna', in the name of Edoardo Benvenuto», in corso di pubblicazione in *Atti del Seminario Internazionale di Studi Omaggio a Edoardo Benvenuto* (Genova, 29 novembre-1 dicembre 1999).

Heyman J.: «The stone skeleton», *International Journal of Solids and Structures*, vol. 2, 1966, pp. 249-279.

Heyman J.: «The safety of masonry arches», *International Journal of mechanical Sciences*, vol. 11, 363-385, 1969.

Poncelet J.-V.: «Examen critique et historique des principales théories concernant l'équilibre des voûtes», *Comptes rendus*, vol. 35, n° 15, pp. 494-502; n° 16, pp. 531-540; n° 17, pp. 577-587, 1852.

Sinopoli A., Corradi M., Foce F.: «A modern formulation for pre-elastic theories on masonry arches», *Journal of Engineering Mechanics (ASCE)*, vol. 123(3), 1997, pp. 204-213.

Truesdell C., Toupin R.: «The classical field theories», *Handbuch der Physik*, vol. III/1, Berlin, Springer, 1960.