

Alessandra Zanelli

Le volte in muratura di Martin Speth

La volta in muratura, scandita da una ricca trama di elementi laterizi, rappresenta un tema architettonico e costruttivo entusiasmante per un progettista e ancora oggi foriero di nuove sfide. Martin Speth è impegnato dal 1996 in una ricerca analitica e progettuale tesa a mettere in luce potenzialità ancora non del tutto esplorate delle volte in muratura tradizionale e a proporre un rinnovamento della tecnologia costruttiva

I gusci sperimentali appaiono all'intradosso con una tessitura analoga a quella delle volte in muratura tradizionale.



Martin Speth e un gruppo di studiosi e studenti di architettura dell'Istituto per la ricerca e la progettazione strutturale dell'Università di Hannover sono coinvolti nella sperimentazione di nuovi gusci in muratura realizzabili senza rinforzi in calcestruzzo armato e senza casseforme continue⁽¹⁾. Il loro lavoro si fonda su una approfondita conoscenza delle tecniche costruttive consolidate nelle diverse culture materiali e delle successive interpretazioni che di esse hanno dato Rafael Gaudí, Domènec y Montaner, Antoni Gaudí, Lluís Muncunill i Parellada e, in seguito, Eladio Dieste.

Quando si innesca un profondo cambiamento formale e costruttivo in architettura, il più delle volte è rintracciabile la convergenza di due fattori: la comparsa di elementi nuovi e non ancora sperimentati in un determinato contesto produttivo e una consapevolezza pratica,

sufficientemente matura, per cogliere le potenzialità dei nuovi elementi e per ardire nello sperimentarli, contaminando le forme costruttive correnti. Ciò è vero per i diversi momenti che hanno caratterizzato l'evoluzione della tecnica costruttiva in muratura: dalle volte apparecchiate a mano libera con mattoni pieni⁽²⁾ alle volte *in folio* diffuse nella tradizione costruttiva italiana (caratterizzate da un unico strato di mattoni sottili posti di piatto)⁽³⁾; dalle volte stratificate della tecnica *tabicada* tradizionale catalana⁽⁴⁾ alla loro evoluzione in chiave "modernista" in Spagna e in America⁽⁵⁾ con l'impiego di cemento Portland, fino alle volte autoportanti di Eladio Dieste, che prevedono l'interazione tra laterizio e calcestruzzo armato; dalle superfici sinusoidali in tecnica *tabicada* di Antoni Gaudí⁽⁶⁾ ai gusci in muratura stratificata ed elementi tensili in acciaio di Lluís Muncunill i Parellada⁽⁷⁾, per arrivare alle superfici

rinforzate a doppia curvatura di Eladio Dieste⁽⁸⁾.

Una analoga convergenza di istanze sembra alimentare anche la sperimentazione condotta da Martin Speth.

La sua ricerca appare interessante proprio perché in essa si può intravedere quella intuizione feconda che ha basi solide nella conoscenza scientifica del comportamento strutturale delle superfici voltate e nella consapevolezza dei limiti della manodopera attualmente impiegabile in cantiere. Tale sperimentazione vuole rinnovare dall'interno l'impianto metodologico necessario alla progettazione e realizzazione delle strutture resistenti per forma, cercando di ottimizzarne sia il comportamento statico, al fine di rendere minimo l'apporto di materiale e massima invece la sua efficienza, sia la tecnica costruttiva, adeguandola al tempo presente.

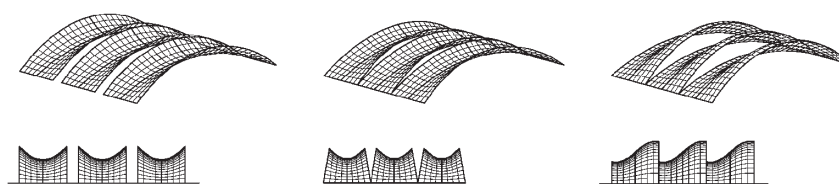
In primo luogo Speth tiene conto delle

peculiarità della manodopera oggi disponibile, ancora pratica nell'apparecchiatura dei mattoni per realizzare muri piani, poco esperta invece nel disporli a formare superfici che si sviluppano lungo una direzione curva, e per nulla in grado ormai di utilizzarli per dar vita a superfici complesse come un guscio a doppia curvatura, sul tipo di quelli progettati da Gaudì, Muncunill e Dieste. La principale fonte di ispirazione di Martin Speth sono proprio le strutture in laterizio di Muncunill e Dieste, rese più leggere e performanti dalla collaborazione dell'acciaio: sottili tiranti per le architetture del primo, barre a reticolo quadrato per quelle del secondo. Tramite il confronto accurato delle tecniche costruttive messe a punto da questi due importanti pionieri della muratura curva in tempi e contesti diversi, Speth arriva a mettere a fuoco un nucleo originale di approfondimento sulla tecnologia dei gusci in muratura, tanto più significativo perché appropriato all'odierno grado di sviluppo tecnologico e alla disponibilità di strumenti informatici sempre più precisi e raffinati di supporto all'analisi strutturale, alla progettazione e alla posa in opera.

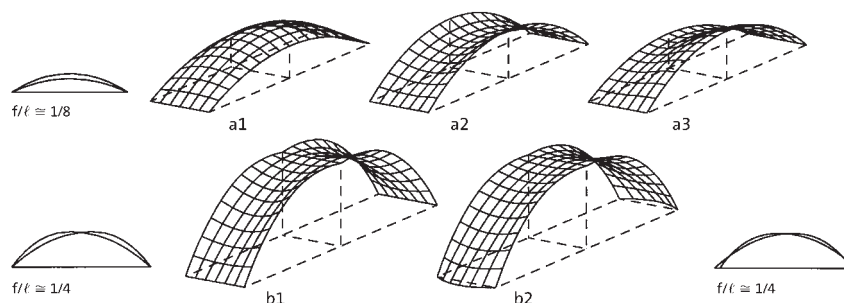
Speth analizza le volte sottili di Eladio Dieste, espressione di un inseparabile connubio tra tettonica e architettura. In contrasto con il cemento armato impiegato convenzionalmente nei gusci più moderni, il materiale utilizzato da Dieste negli anni Cinquanta - il mattone pieno, posato su una cassaforma a una sola curvatura, i cui giunti sono riempiti con rinforzi di acciaio e cemento - conferisce una scalettatura all'intradosso della volta che rappresenta una prima fonte di ispirazione per gli studiosi di Hannover. Se la regola base della progettazione strutturale insegna che le forze seguono la rigidità del materiale, la rete di rinforzo di acciaio e cemento impiegata da Dieste tende quindi a concentrare le forze sulla sezione trasversale del guscio, come risultato della aumentata rigidità del suo nucleo, se comparata con quella dei mattoni dei suoi strati pe-



Differenti segmenti di muratura a doppia curvatura sono prefabbricati e assemblati in opera mediante giunti realizzati con estrema cura e con malta a presa rapida e senza ritiro.



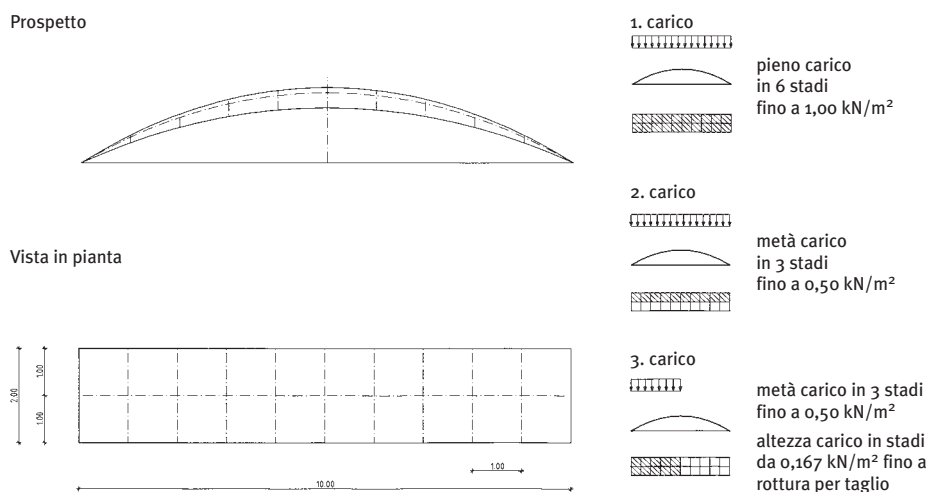
Forme spaziali realizzabili con la muratura tradizionale non rinforzata, mediante l'accostamento di moduli affiancati.



Morfologie ad arco e a sella e tipologie di rapporti tra freccia e luce indagati da Martin Speth per determinare i diversi comportamenti strutturali dei gusci in muratura non rinforzata.

riferici. L'efficienza della tecnica costruttiva messa a punto da Dieste risulta pertanto dall'uso combinato dell'acciaio, del calcestruzzo e del mattone, dove quest'ultimo non solo costituisce l'irrigidimento al taglio ma rappresenta anche il veicolo per il trasferimento dei carichi del peso proprio fino agli appoggi. Speth prende poi in considerazione le soluzioni costruttive prive di rinforzo, come la tecnica *tabicada* catalana, con la quale si possono configurare strutture a guscio di diversa forma⁽⁹⁾. Le superfici voltate dell'industria tessile Vapor Aymenrich Amat i Jover, a Terrassa, costruita nel 1908 da Lluís Muncunill i Parellada e oggi trasformata in Museo della scienza e della tecnica della Catalogna, sono un esempio emblematico dell'efficienza delle soluzioni strutturali non rinforzate e dell'alto livello di compatibilità tra la resistenza dell'acciaio e quella del mattone. Le coperture voltate di forma com-

pressa di questo edificio, determinate dallo sviluppo di una sequenza di archi ribassati lungo una direttrice a forma di sinusoidale sono il risultato di un percorso progettuale efficace sul piano architettonico e spaziale e nondimeno sul piano dell'efficienza statica. Gli archi ribassati sono soggetti a soli sforzi di compressione agenti parallelamente alla loro luce. Allo stesso tempo, essi danno forma a un guscio che si sviluppa in direzione sempre perpendicolare alla loro stessa luce, con due rilevanti conseguenze. Da un punto di vista estetico, la superficie della volta sembra liscia e omogenea e, da un punto di vista strutturale, viene incrementata la rigidità dell'insieme, mentre tutta la spinta orizzontale sviluppabile all'interno degli archi inclinati viene assorbita da esili tiranti in acciaio. Nonostante tali vantaggi, Speth intuisce che non ci sono sufficienti presupposti per riproporre una modalità



Disegno del primo prototipo di guscio, a doppia curvatura positiva.

costruttiva oggi ormai dimenticata dal mestiere. Consapevole della necessità di mettere a punto un nuovo metodo di costruzione di strutture a guscio in muratura che impieghi le tecniche correnti e le capacità della manodopera locale e le potenzialità della standardizzazione industriale, Speth guarda con rinnovato interesse la tecnica delle volte in muratura piena⁽¹⁰⁾, tradizionalmente posate a mano libera, cercando di coglierne gli aspetti oggi ancora validi (come la tecnica di posa semplice e veloce) e quelli non ancora esplorati (come la gamma di forme possibili e il loro comportamento statico).

La sfida di Martin Speth è stata pertanto verificare se e come, oggi, in un contesto altamente industrializzato come quello europeo, caratterizzato inoltre da un alto rapporto tra costo della manodopera e costo delle materie prime, sia ancora possibile costruire strutture a guscio in muratura piena, senza rinforzi e senza casseforme, facendo uso di tutto il potenziale strutturale e formale intrinseco a un elemento tecnico tra i più antichi e riusciti di tutte le tradizioni costruttive: il mattone.

A incoraggiare la ricerca nelle fasi iniziali è stato un dato peculiare del contesto produttivo in cui Speth si trova a operare: i mattoni per esterni in Germania sono solitamente cotti ad altissime temperature, per evitare i danni del gelo, e dunque possiedono un'alta resistenza,

che apparve da subito come una opportunità preziosa e non ancora del tutto sfruttata dalla tecnica della muratura tradizionale.

Dal momento che differenti modelli geometrici di apparecchiatura muraria influenzano in modo diverso anche il comportamento strutturale di una superficie muraria, un primo obiettivo del lavoro di Speth è stato quello di individuare quali fossero le forme resistenti più efficienti dal punto di vista strutturale. Partendo dal principio per cui una struttura che segue la curva funicolare dell'arco è in grado di trasferire i carichi ai suoi supporti sviluppando soltanto azioni di compressione assiale, e non di flessione, e rispettando il vincolo per cui nella maggior parte dei codici di pratica non è consentito che all'interno di una superficie curva si sviluppino sforzi di trazione perpendicolari ai letti di malta, la sperimentazione di Martin Speth ha previsto l'analisi di diverse configurazioni di gusci in muratura, tutte aderenti al medesimo principio statico basilare: quello per cui una volta in muratura deve svilupparsi all'interno di una gamma di curve che ricadano nel cuore della sua sezione trasversale⁽¹¹⁾. Perché tale principio di equilibrio sia rispettato, si può procedere in due modi: allargando l'area della sezione trasversale, ossia in pratica aumentare la quantità di materiale costituente la volta e dunque il suo carico proprio, oppure variando la forma della

sezione trasversale in modo tale che la sua area resti costante lungo tutto lo sviluppo della volta, seguendo quindi il principio delle strutture leggere⁽¹²⁾. A quest'ultimo tipo di comportamento rispondono le strutture a volte prefabbricate messe a punto da Martin Speth: in esse, la rigidità del guscio si ottiene trovando la forma sempre più appropriata alle sollecitazioni dei carichi, e non semplicemente aggiungendo materiale e massa alla costruzione.

Il lavoro di Martin Speth rappresenta dunque una sapiente contaminazione delle diverse tecniche costruttive che prevedono l'uso del mattone pieno per realizzare superfici voltate, apparecchiato di coltello, con i giunti tipici della muratura tradizionale, ma secondo morfologie e comportamento statico propri delle costruzioni leggere a cui sono ascrivibili le esperienze di Muncunill prima e Dieste poi. Recupera la tecnica di posa più semplice e veloce, ovvero quella prevista per costruire muri dritti e, con l'ausilio delle tecnologie digitali di supporto al progetto e alla produzione industriale, ricorre alla prefabbricazione di segmenti di arco dalla superficie tridimensionale, facilmente assemblabili in sito per dar vita a un unico grande guscio a doppia curvatura. Prima di affrontare la costruzione sperimentale del primo prototipo di "arco a guscio" (ossia a doppia curvatura) di 10 metri di campata, è stato necessario trovare risposte certe a due serie di vincoli. Il primo riguarda l'orientamento dei giunti di malta che deve essere perpendicolare alla direzione di sviluppo della campata; il secondo consiste nella necessità che i giunti siano realizzati in modo esperto e utilizzando una malta ad alta aderenza, al fine di ottenere il comportamento strutturale desiderato dalla muratura. Avendo deciso di utilizzare i metodi di costruzione industrializzati, si è deciso di sfruttare il vantaggio della prefabbricazione, evitando così di dover prevedere costose casseforme necessarie per la costruzione in sito. Si è pensato



Fasi della prefabbricazione e dell'assemblaggio del primo prototipo.



Tecnica di posa in verticale mediante cassaforma flessibile interfacciata con il modello computerizzato della superficie di muratura da realizzare. I cavi-guida modificano la loro posizione e aiutano il muratore nella posa precisa dei corsi di mattoni lungo curve sempre differenti.

dunque di prefabbricare il guscio in diversi segmenti di muratura realizzabili in verticale, ossia mediante le tecniche di posa standard dei muri dritti, e con tolleranze ben progettate in modo da poterli poi adattare alla geometria finale che il guscio va ad assumere durante l'assemblaggio in sito.

Per superare il trasporto senza danni, è stata utilizzata una malta di cemento con buone caratteristiche di adesione. È stata necessaria un'indagine della resi-

stenza degli elementi in muratura non caricati, specialmente per le condizioni a cui essi vengono esposti durante il trasporto.

I test per valutare la resistenza a flessione hanno dimostrato che la malta aveva sufficiente adesione. Le fratture, tipicamente, sono apparse nei mattoni non nei giunti⁽¹³⁾.

I segmenti di muratura che insieme vanno a costituire il guscio intero sono caratterizzati da differenti curvature nello spazio. È stato pertanto necessario progettare e realizzare una cassaforma flessibile, utilizzabile nella configurazione di tutti i tipi di superfici. Come è noto, la costruzione di un muro piano in mattoni prevede la posa dei corsi degli elementi lungo linee diritte, mentre nelle superfici a guscio che si sviluppano nello spazio, la muratura non ha mai giunti dritti. Il principio della cassaforma sviluppato nella ricerca di Martin Speth è basato sull'idea di sostituire le linee diritte tradizionali con barre di acciaio sottili e curve nello spazio, in grado di guidare il posatore in modo altrettanto semplice, ma lungo un differente percorso. Le barre di acciaio guida sono vincolate alle estremità libere di barre scorrevoli a sbalzo, che a loro volta sono vincolate all'interno di un telaio di acciaio. La posizione delle barre scorrevoli è stata controllata con esattezza dalle linee di un *plotter* computerizzato, in modo da ottenere un alto livello di precisione nella geometria configurabile. Le barre d'acciaio guida fungono quindi da riferimento esatto da seguire durante la posa dei mattoni, e il lavoro di posa diventa molto semplice. Il tempo richiesto per creare la muratura in questa cassaforma è circa maggiore del 50% rispetto a quello necessario per un muro in mattoni ordinario; comunque il muratore non necessita di particolare abilità per questo tipo di lavoro.

Le unità di muratura prefabbricate sono poi state rimosse dalla cassaforma dopo 24 ore. Prima di trasportarle in sito per l'assemblaggio, sono state distese su sabbia per due settimane per il completo

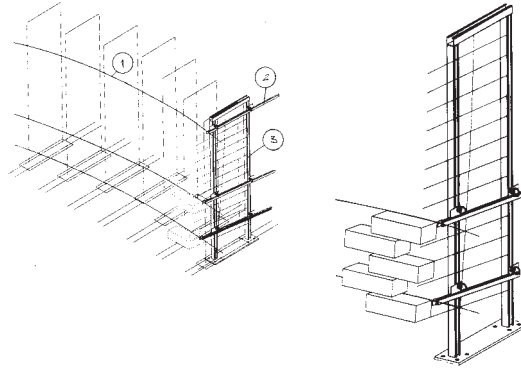
indurimento. Con l'utilizzo di cinghie di sospensione, il trasporto in sito è stato facile e sicuro. Durante la costruzione dell'arco, gli elementi prefabbricati sono stati supportati soltanto da due sottili centine di legno. I giunti tra gli elementi prefabbricati sono stati riempiti con malta a presa rapida e senza ritiro. Per contenere le spinte orizzontali, alle estremità dell'arco sono stati giuntati due elementi in acciaio messi in trazione mediante martinetto idraulico durante la fase finale dell'assemblaggio.

Il primo prototipo dell'arco a guscio

fatto di sola muratura ha una luce di circa 10 metri e uno spessore costante di 11,5 cm. I bordi lunghi liberi evidenziano la snellezza di questa struttura. La curvatura varia lungo tutta la luce libera e termina in modo regolare sui supporti.

La struttura segue il principio dell'arco a due cerniere. Anche se non è possibile ottenere una cerniera perfetta in una struttura del genere, le zone di minima curvatura vicine ai supporti sono molto simili ad aree di bassa rigidità alla flessione. Dal momento che le deformazioni della struttura sono modeste, queste zone di bassa rigidità simulano il comportamento strutturale delle cerniere.

I bordi liberi giacciono sul piano verticale, così è facile procedere all'accostamento di ulteriori moduli di arco. Se due bordi vengono connessi tra loro, dal punto di vista strutturale possono essere sfruttati anche i vantaggi delle strutture ondulate. L'esperienza acquisita con questo primo tipo di arco a guscio ha incoraggiato Martin Speth a indagare ancora sulle possibilità, i limiti e la morfologia dei gusci realizzati impiegando questa tecnica costruttiva. Naturalmente, non ci sono così tante varietà di strutture a guscio di questo tipo, se paragonate alle tipologie rinforzate in cemento armato, in quanto tali strutture seguono rigorosamente le proprietà del materiale e il suo comportamento strutturale. Comunque, esse possiedono una snellezza interessante. Sono stati successivamente realizzati due archi a forma di sella, sempre sfrut-



Secondo prototipo con superfici di muratura a doppia curvatura negativa (a sella), progettato da Speth come copertura della Lower Saxony Building Industry Confederation. L'esilità della struttura permette di coglierne da tutti i punti di vista l'andamento curvilineo.

tando la medesima tecnica di prefabbricazione e assumendo manodopera non specializzata. L'esperienza ha dimostrato che la cassaforma sviluppata dai ricercatori di Hannover è veramente facile da usare. La luce di questi archi è di circa 15 metri e il rapporto tra freccia e luce in questo caso è di 1:4. Gli elementi in trazione, deputati a resistere alla spinta orizzontale, sono previsti come parte integrante delle fondazioni e quindi non risultano visibili fuori terra e soprattutto non ostruiscono lo spazio coperto. Per rendere la copertura a tenuta d'acqua, all'estradosso degli archi sinusoidali in muratura sono stati posti due successivi strati di rivestimento: uno strato di intonaco di pozzolana, combinato con una pittura idrorepellente, e uno strato di finitura in lamierino zincato. L'indagine analitica ha messo in luce che il principio della muratura tradizionale, per cui più alto è l'arco e più basse risultano le forze al suo interno, non rappresenta necessariamente un vantaggio per il comportamento strutturale delle volte sottili. Per questo motivo, gli archi a guscio sottili con un alto rapporto freccia-luce devono essere analizzati in modo molto accurato ed esperto e, comunque, è preferibile ricorrere allo schema statico dell'arco a tre cerniere rispetto a quello più complesso e difficile da realizzare costruttivamente dell'arco a due cerniere. In merito al rapporto tra morfologia e comportamento statico di queste superfici spaziali in muratura, la ricerca di Speth arriva infatti ad affermare che, per

piccoli rapporti tra freccia e luce (per esempio 1:8), gli archi a due cerniere sono realizzabili con sicurezza fino a 20 metri di luce, sia con curvature positive (forme ad arco), sia con curvature negative (forme a sella). Per gli archi a guscio con rapporti tra freccia e luce più alti di 1:4 risulta invece preferibile seguire il principio dell'arco a tre cerniere. Utilizzando i metodi di calcolo disponibili, può essere simulato accuratamente il comportamento elastico di un arco a guscio sottoposto ai carichi di progetto, ma non c'è un metodo computerizzato che può verificare il collasso della struttura causato, per esempio, dal cedimento dei giunti. Queste simulazioni sarebbero tanto più significative in un modello costruttivo come quello messo a punto da Speth, in cui l'assemblaggio in cantiere di elementi prefabbricati prevede la realizzazione di giunti di fondamentale importanza per l'equilibrio del guscio nel suo insieme. Allo stato attuale non ci sono metodi di calcolo disponibili che descrivano in modo accurato le proprietà meccaniche della muratura con riferimento alla sua anisotropia e all'apertura dei giunti. Per trovare la capacità portante ultima di un arco a guscio, il primo prototipo è stato sottoposto a prove di laboratorio. L'obiettivo era quello di aumentare il carico fino alla rottura della struttura. Per prima cosa, è stato zavorrato progressivamente, simulando il carico della neve su tutto l'arco. In questi test, è stata osservata una buona correlazione tra l'analisi teorica e i

risultati misurati, e se ne è dedotto che il carico poteva essere incrementato per dieci volte senza che l'arco subisse alcun danneggiamento o rottura. Più critica è stata la simulazione nel caso in cui il carico agisca solo su una parte dell'arco: tale simulazione corrisponde al caso teorico, posto nella normativa tedesca, in cui metà del carico neve prescritto dallo standard DIN agisca su un solo lato dell'arco. L'analisi strutturale ha dimostrato che gli sforzi di compressione si distribuiscono sull'intero arco: sul lato in cui agisce il carico, la compressione si concentra nella parte superiore della sezione, mentre sul lato scarico si concentra ai bordi liberi, con un comportamento complessivo che combacia con la teoria delle curve funicolari dell'arco. È stato detto come sia importante evitare sforzi di trazione parallelamente alla luce, con qualunque possibilità di carico: i test hanno rivelato che, aumentando i carichi, appaiono molto presto sforzi di trazione, ma in questo caso non si è potuto constatare una correlazione con il modello analitico. Le prove effettuate, insieme a tutte le altre questioni messe a fuoco durante la costruzione dei gusci, dimostrano comunque che i tipici modelli impiegati nell'analisi strutturale dei muri in mattoni non sfruttano al meglio le potenzialità del materiale, ma una tale affermazione non deve però portare a sovrastimare le capacità strutturali dei gusci in muratura. Tenendo presente queste precisazioni, la sperimentazione condotta da Speth ha dimostrato che è

possibile realizzare strutture a guscio in muratura non rinforzata, costruita in modo tradizionale ma evoluto, nonostante sia necessario ancora molto lavoro per testarne la tipologia strutturale rinnovata dall'impiego della prefabbricazione. Ha inoltre evidenziato che la varietà di possibili strutture, forse limitata rispetto a quelle realizzabili in cemento armato, è comunque interessante e promettente, data la snellezza delle strutture in muratura piena che ne derivano. "In un certo senso – afferma Speth⁽¹⁴⁾ – noi siamo a uno stadio di sviluppo paragonabile a quello di Charles Dutert (1845-1906) e del suo progetto in acciaio per la Machine Exhibition Hall per l'Esposizione di Parigi del 1889. La cerniera perfettamente costruita garantiva una accurata previsione su un sistema staticamente determinato. Nelle strutture in acciaio le cerniere perfette sono diventate meno importanti da quando si è scoperto il pieno potenziale di questo materiale, ossia la sua duttilità. Le "quasi-cerniere" delle nostre strutture a guscio prefabbricate sono sviluppate direttamente in relazione ai requisiti del materiale e al modo in cui esso sa trasferire i carichi sui supporti. La questione se le semi-cerniere rimarranno o no nelle nostre murature senza rinforzo dovrà essere lasciata ai futuri esperimenti che andranno a indagare ulteriormente questo promettente sistema costruttivo". ¶

Note

1. Martin Speth, *Unreinforced Shell Structures in Traditional Masonry: A Contemporary Approach to Design and Construction*, in Anderson, Stanford, Eladio Dieste, Princeton Architectural Press, pp. 223-230, 2004.
2. David Wendland, *Volte in laterizio: aspetti costruttivi della tecnica tradizionale*, in *Costruire in Laterizio* n. 107, sett.-ott. 2005, pp. 55-59.
3. Riccardo Gulli, Giovanni Mochi, *Il recupero delle volte in folio attraverso la costruzione tabicada*, in *Costruire in Laterizio*, n. 82, pp. 66-73.
4. Riccardo Gulli, Giovanni Mochi, *Bòvedas tabicadas. Architettura e costruzione*, EdilStampa, 1995.
5. George R. Collins, *The Transfer of Thin Masonry Vaulting from Spain to America*, in *Journal of the Society of Architectural Historians* 27, n. 3, ottobre 1968, pp. 176-201; Daniel Lane, *Rafael Gustavo e la razionalizzazione costruttiva del la-*



Fasi di prefabbricazione e assemblaggio del secondo prototipo a doppia curvatura negativa.

terizio, in *Costruire in Laterizio*, n. 107, sett.-ott. 2005, pp. 48-54.

6. Riccardo Gulli, *Il ruolo della tecnica tabicada nell'architettura di Gaudì*, in *Parametro*, n. 197, lug.-ago. 1993.
7. M. Freixa, T. Llordés, Lluís Muncunill, Barcelona, Lanweg, 1996; Sonia Sabbadini, *Lluís Muncunill: Vapor Aymerich, Amat i Jover a Terrassa, Spagna*, in *Costruire in Laterizio*, n. 107, sett.-ott. '05, pp. 42-47.
8. Eladio Dieste, *Eladio Dieste: la estructura ceràmica*, Escala, Bogotà, 1987, pp. 31-145.
9. Nella tecnica catalana, la superficie a guscio consiste nella sovrapposizione di diversi strati di piastrelle di laterizio. Il primo strato è costruito con una malta a presa rapida o con gesso, con l'ausilio di sostegni puntuali e non di una cassaforma continua. Questo primo strato diventa la cassaforma per i successivi strati, che sono sovrapposti con angolazioni differenti rispetto allo strato sottostante, in modo che geometricamente si venga a creare un collegamento tra mattone e malta che rende efficiente, dal punto di vista strutturale, tutto l'insieme. In aggiunta a una buona resistenza agli sforzi di compressione, lo sforzo di trazione può essere assorbito dall'apparecchiatura tra i mattoni e la malta ad alta adesione. Così la sezione di laterizi stratificati con la malta approssima la resistenza a compressione e a trazione di una trave in legno lamellare nel suo comportamento strutturale principale.
10. Come nel caso della tecnica catalana, la tecnica della volta in muratura piena tradizionale sfrutta il principio della sovrapposizione sfalsata tra gli elementi di laterizio, ma in questo caso lo sfalsamento si realizza all'interno di uno stesso strato di mattoni e non tra strati successivi, come nella volta catalana. In modo simile al collegamento composito che caratterizza la tecnica catalana, il concatenamento della volta in muratura tradizionale tiene insieme la malta e il mattone a formare un tutto unico resistente. Il rendimento dell'apparecchiatura della muratura tradizionale è maggiormente influenzato dall'adesione tra malta e mattone, così come dall'azione dei carichi assiali.



Fasi di finitura dell'estradosso, con intonaco e rivestimento in lamierino zincato.

11. Martin Speth, 1999, *Schalnbogen aus unbewehrtem Mauerwerk*, in *Mauerwerk, Helf 1*, Verlag Ernst & Sohn, Berlin, 1999; Martin Speth, *Schalentragwerke aus unbewehrtem Mauerwerk*, Dissertation, Stuttgart, 2006.
12. Nel testo intitolato *Eladio Dieste e Frei Otto. Esperienze di architettura: generazioni a confronto* (Quaderni dell'Accademia di Mendrisio, Skira, 1996), il curatore Luca Gazzaniga sottolinea proprio le assonanze di approccio al progetto e alla costruzione di due grandi personaggi che hanno contribuito a innovare l'architettura, sul piano formale e strutturale: l'ingegnere Dieste e l'architetto Otto. Impegnati in tempi e contesti differenti, e utilizzando materiali apparentemente dal comportamento molto diverso come il mattone e le membrane tessili, essi hanno condotto un'analoga ricerca di bellezza e di leggerezza, facendosi strada attraverso la curiosità per le leggi che regolano la natura e l'individuazione di modi appropriati di trasferimento nella costruzione architettonica.
13. Gli sforzi di flessione di questo tipo potrebbero apparire anche in una struttura completata, soggetta a variazione delle condizioni di carico. Per prendere confidenza sia nella geometria che nella costruzione dell'arco a guscio iniziale, è stato prima di tutto costruito un modello a scala ridotta realizzato con piccoli blocchi di legno. Il modello è risultato utile in quanto ha suggerito risposte a un numero di questioni che non erano state considerate in anticipo.
14. Traduzione dell'autore da: Martin Speth, *Unreinforced Shell Structures in Traditional Masonry: A Contemporary Approach to Design and Construction*, in Anderson, Stanford, Eladio Dieste, Princeton Architectural Press, pp. 223-230, 2004.

Si ringrazia il Prof. Dr. Ing. Martin Speth, Facoltà di Architettura, Università di Scienze applicate di Brema, per la documentazione e le immagini gentilmente fornite, e l'Istituto di progettazione strutturale e tecnologie costruttive dell'Università di Hannover, promotore della ricerca.