

Il modello della piattabanda di Saint-Sulpice

The flat arch model in the Church of Saint-Sulpice

Il presente contributo riferisce degli esiti conseguiti dal lavoro condotto sotto la direzione del Prof. Gulli e dei Proff. Brocato, Porrino e Sakarovitch, nell'ambito del rapporto di correlazione di tesi di laurea e di dottorato tra il Dipartimento di Architettura dell'Alma Mater Studiorum di Bologna e il *Laboratoire GSA* dell'*École Nationale Supérieure d'Architecture Paris-Malaquais*.

Il progetto indaga sulla storia architettonica e costruttiva della chiesa di Saint-Sulpice a Parigi, illustrando una metodologia di indagine valida nell'ambito del recupero delle tecniche costruttive premoderne. Lo studio della costruzione in pietra armata è rivolto tanto all'analisi teorica e alla progettazione, quanto alla realizzazione pratica e verifica strutturale, secondo un approccio in grado di valorizzare l'incontro tra teoria e prassi del costruire.

This paper reports the results achieved by the research directed by Prof. Gulli, with the collaboration of Profs. Brocato, Porrino and Sakarovitch, within a cooperative relationship between the Department of Architecture of Alma Mater Studiorum in Bologna and Laboratoire GSA at the École Nationale Supérieure d'Architecture Paris-Malaquais.

The project investigates the architectural and constructive history of the Church of Saint-Sulpice in Paris, with the aim of developing a research methodology of the pre-modern constructive techniques applicable to the restoration and preservation of buildings. The research conducted on the construction in stone and steel is aimed both at the theoretical analysis and project as well as to the practical realization and structural verification, according to an approach which combines science and practice.



Cecilia Mazzoli

Nata a Bologna nel 1986, studia presso l'UniBO e l'UPV di Valencia, laureandosi con lode in Ingegneria Edile-Architettura a Bologna, con una tesi in Recupero e Conservazione degli edifici svolta a Parigi. Ingegnere Edile, da gennaio 2012 intraprende un Dottorato in Architettura all'Università di Bologna, in cotutela con l'*Université Paris-Est*.



Riccardo Gulli

Professore Straordinario di Architettura Tecnica presso la Facoltà di Ingegneria di Bologna. I primari indirizzi di interesse riguardano i settori delle tecniche costruttive storiche, del recupero e della riqualificazione del patrimonio costruito. È Responsabile del Centro Studi LabTeco dell'Università di Bologna e, dal 2010, è Referente Scientifico dell'Unità Operativa Recupero e Restauro del CIRI Edilizia e Costruzioni.



Maurizio Brocato

Professore di Scienza e Tecnica per l'Architettura all'*École Nationale Supérieure d'Architecture Paris-Malaquais* e di Meccanica delle Strutture all'*École des Ponts ParisTech*, membro del *Laboratoire GSA - Géométrie Structure Architecture* dove svolge ricerche nel campo dell'analisi e dell'ottimizzazione e delle strutture.

Parole chiave: restauro; teoria e prassi; pietra armata; piattabanda; modello

Keywords: restoration; science and practice; reinforced stone; flat arch; model

INTRODUZIONE

Lo studio sulla costruzione stereotomica rientra fra gli interessi di ricerca promossi dal gruppo disciplinare dell'Architettura Tecnica della sede di Bologna e che si sono sviluppati in questi anni attraverso un rapporto di collaborazione istituzionale aperto con il *Laboratoire GSA* dell'*École Nationale Supérieure d'Architecture de Paris-Malaquais*, e con i *Grands Ateliers de l'Isle d'Abeau* (Villefontaine, Banlieu Est di Lione).

Il lavoro qui presentato è incentrato sullo studio della piattabanda in pietra armata impiegata nella costruzione della chiesa di Saint-Sulpice a Parigi, mediante una indagine volta sia alle problematiche tecniche associa-

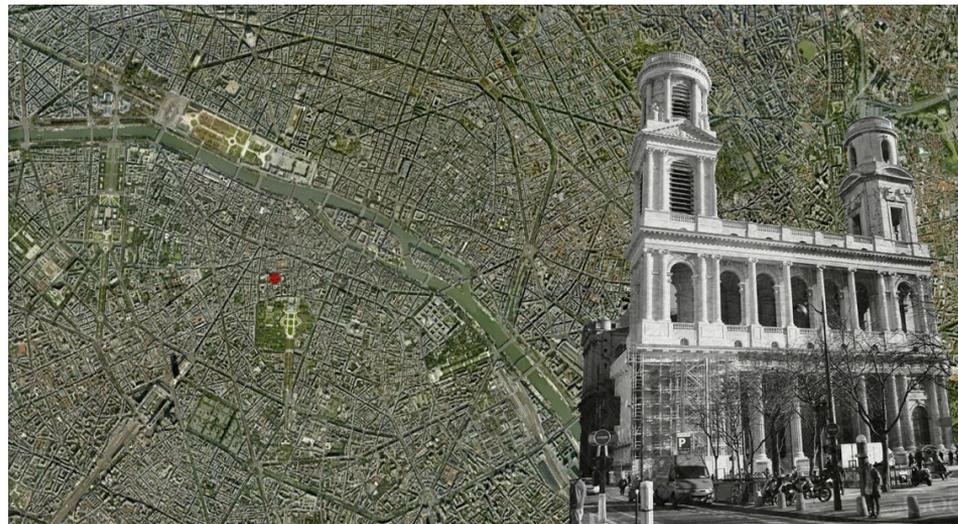
te all'uso di questa tipologia costruttiva storica, sia all'analisi del comportamento fisico-meccanico del materiale. Per tale finalità è stato attivato un percorso di ricerca che coniuga l'indagine critico-interpretativa del testo – sia documentale che materiale – con l'ambito applicativo rappresentato dal “laboratorio di costruzione”, ovvero mediante la traduzione delle conoscenze teoriche all'interno della verifica analitico-strumentale: dal dominio del pensiero al luogo della prassi.

LA CHIESA DI SAINT-SULPICE

Tra le più importanti chiese di Parigi, Saint-Sulpice è sorta nel XII secolo nei pressi dell'abbazia di Saint-Germain-des-Prés [Fig. 1] e ha

subìto numerose trasformazioni nel corso del tempo, a cui corrispondono in particolare gli interventi attuati degli architetti Gamard, Le Vau e Gittard. Restringendo l'attenzione al fronte principale, oggetto dell'intervento di restauro qui discusso, il disegno del grande portale in stile neoclassico è opera dell'architetto fiorentino Servandoni, che si aggiudicò l'incarico a seguito del concorso bandito nel 1732, con un progetto che ricalca fedelmente la tendenza architettonica del periodo, ovvero quella di giustapporre un nuovo disegno di facciata all'impianto basilicale preesistente di matrice gotica¹. Il disegno odierno della facciata occidentale è però l'esito di contributi di vari architetti: i primi due livelli di ordine dori-

Fig. 1 - Inquadramento urbanistico della chiesa di Saint-Sulpice, situata nel VI arrondissement di Parigi, e vista della facciata occidentale. [Foto C. Mazzoli]



co e ionico, progettati da Servandoni, sono coronati da una balaustra e da due torri costruite in periodi differenti. La torre Sud è stata realizzata da Mac Laurin, in aderenza al disegno di Servandoni, senza riuscire però a terminarne la costruzione; la torre Nord, di 2 metri più alta della precedente, venne invece progettata ed eseguita da Chalgrin, il cui intento di modificare la torre Sud per uniformare gli stili non poté realizzarsi per gli eventi conseguenti allo scoppio dei moti rivoluzionari, determinando di fatto la configurazione finale ed attuale della facciata² [Fig. 2].

Lo studio ha permesso di ricostruire le primarie vicende costruttive che hanno segnato lo sviluppo della chiesa e in particolare quelle

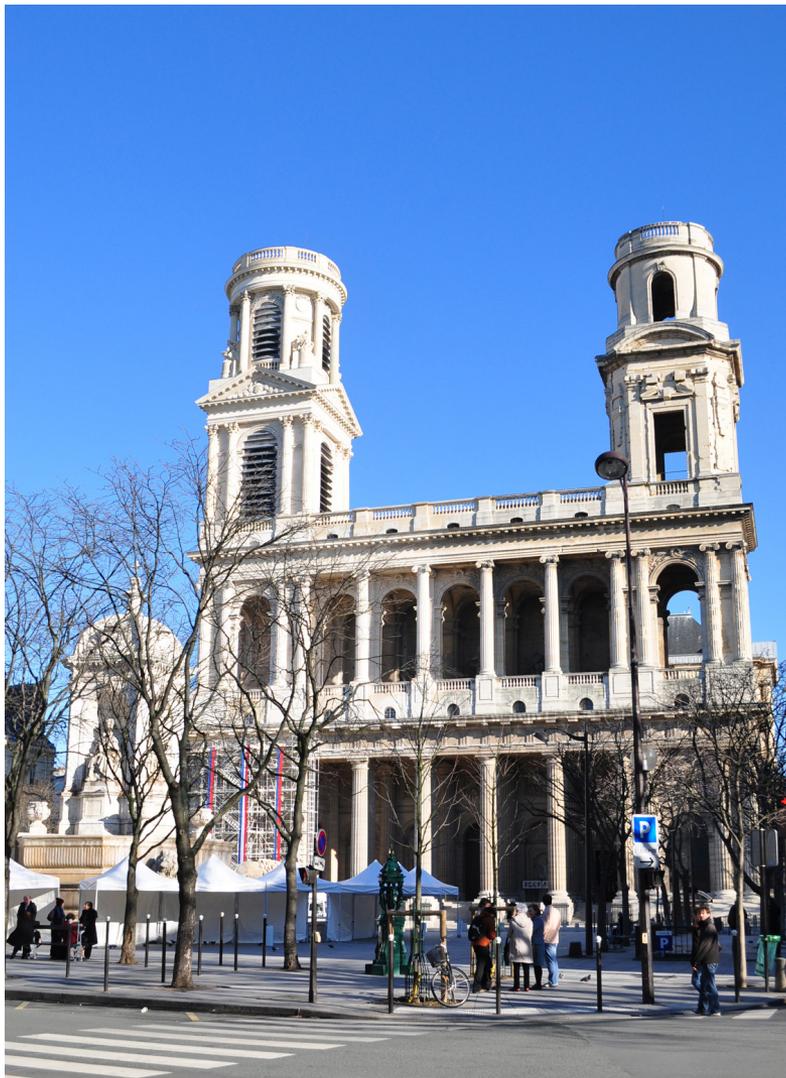
relative alla piattabanda armata del secondo livello di ordine ionico della facciata, che può essere considerata come un modello rappresentativo dell'applicazione di tale tecnica costruttiva nella Parigi del Settecento. Tra i più celebri esempi che corrispondono a tale pratica costruttiva troviamo: il colonnato Est del Museo del Louvre, realizzato nel 1667 da Claude Perrault; Piazza Luigi XV, realizzata nel 1758 da Ange-Jacques Gabriel; la chiesa di Sainte-Geneviève, oggi *Panthéon*, realizzata da Jacques-Germain Soufflot nel 1774³.

La comprensione dei caratteri costruttivi del sistema costruttivo impiegato nella facciata di Saint-Sulpice è stata pertanto in prima istanza incentrata sulla lettura e reinterpretazione dei

trattati del Settecento, a cui ha fatto poi seguito un riscontro diretto svolto in sede di cantiere, durante la fase di analisi e smontaggio parziale degli elementi degradati.

Tra i testi fondamentali che affrontano in maniera dettagliata i temi costruttivi e strutturali degli edifici dell'epoca, risalendo alle origini dell'architettura antica, si collocano le opere di Pierre Patte, architetto e incisore, con le sue *Mémoire sur les objets les plus importants de l'architecture* (1769) e quelle di Jean-Baptiste Rondelet, con il suo *Traité théorique et pratique de l'art de bâtir* (1802-1817).

In particolare, il trattato di Rondelet illustra le tipologie di piattabanda in pietra: il termine "piattabanda" deriva dal francese *plate-bande*



Il modello della piattabanda di Saint-Sulpice

C. Mazzoli | R. Gulli | M. Brocato

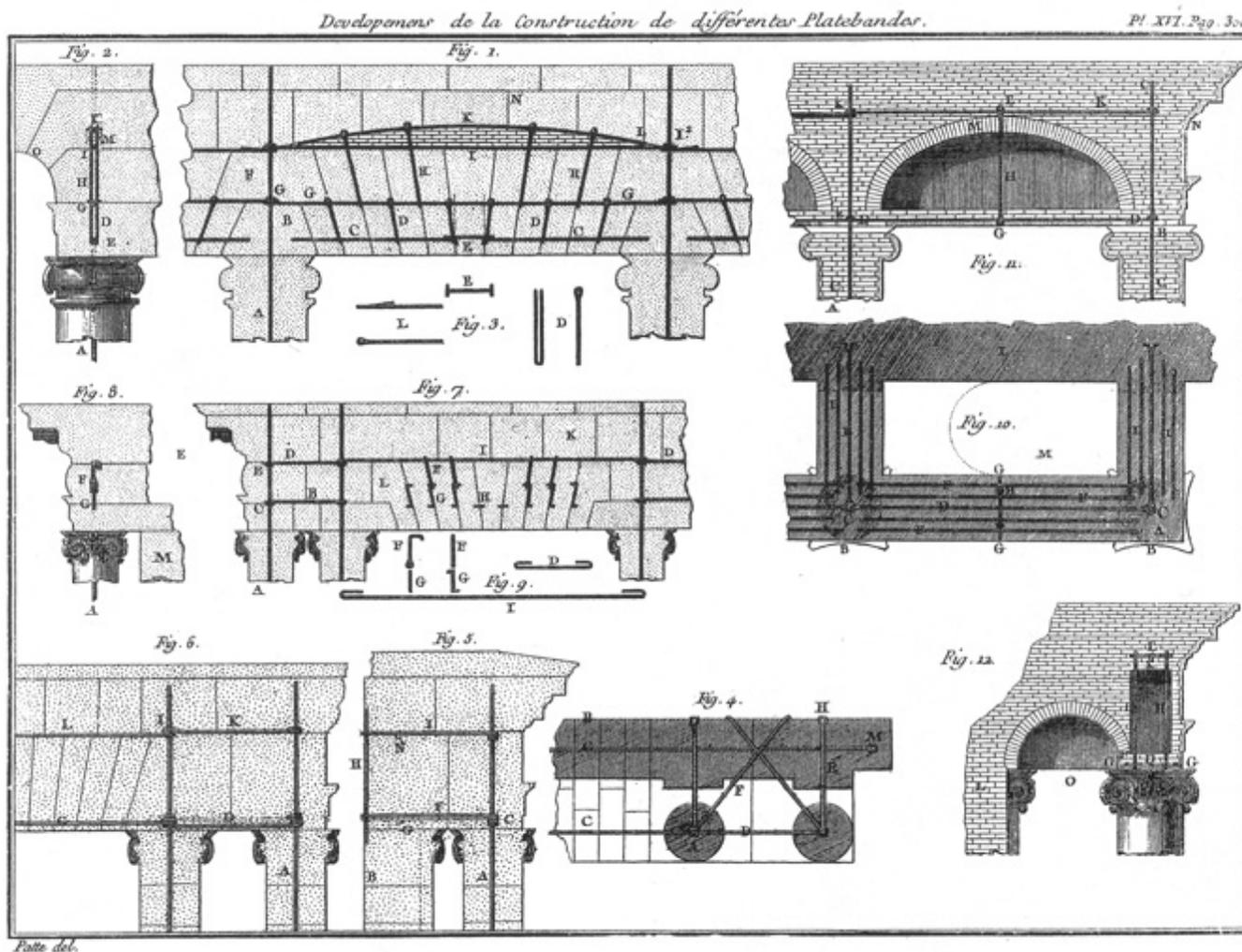
Fig. 2 - Vista della facciata della chiesa, durante la giornata di inaugurazione della fine dei lavori. [Foto C. Mazzoli]

[fascia piatta]⁴. Si tratta di un sistema costruttivo dal punto di vista formale assimilabile a un architrave, ma dal punto di vista strutturale a un arco, pertanto spingente. Si può dire quindi che la piattabanda derivi da un arco a sesto ribassato, tagliato da due piani orizzontali, che si comporta effettivamente come un arco con raggio di curvatura infinito, con intradosso retto, costituito da elementi detti “conci” che si reggono in equilibrio per mutuo contrasto. Proprio perché si tratta di un arco a freccia nulla, la piattabanda risulta essere la più debole delle strutture spingenti, e per questo non può essere utilizzata per coprire luci troppo ampie. Pertanto, fin dai tempi dei Romani, questi sistemi in muratura venivano armati con elementi in ferro, al fine di raggiungere luci maggiori.

Per un'esatta comprensione del sistema costruttivo, è risultata di fondamentale importanza la lettura e la reinterpretazione dei trattati del Settecento, e in particolare il supporto fornito dal capitolo riguardante la “*Costruzione delle Piattabande del Portale di Saint Sulpice*”, redatto da Patte, in cui egli afferma di aver assistito alla realizzazione della piattabanda, riportandone la descrizione delle fasi del montaggio⁵, affiancata dalle considerazioni teoriche che hanno ragionevolmente condotto alle scelte costruttive adottate. [Fig. 3]

La piattabanda oggetto di studio è costituita da conci in pietra, armati da tiranti orizzontali connessi tra loro da graffe metalliche verticali

Fig. 3 - Tavola illustrativa della disposizione delle armature nella costruzione di differenti piattabande. (In alto, a sinistra) Dettaglio costruttivo del modello della piattabanda armata di Saint-Sulpice. [Patte, Pierre (1769), Mémoires sur les objets les plus importants de l'architecture, Rozet, Parigi.]



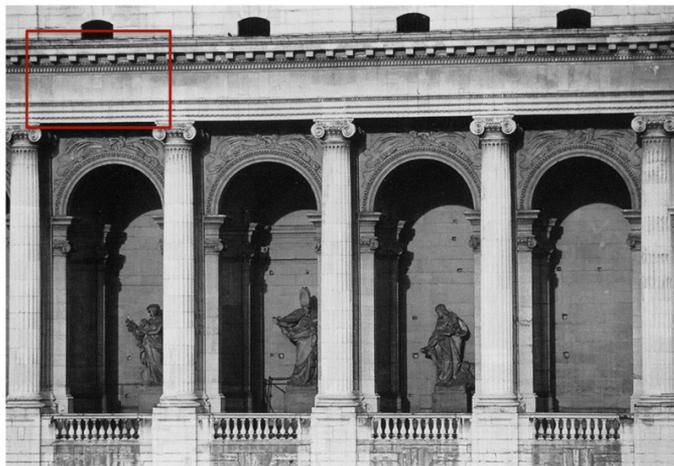
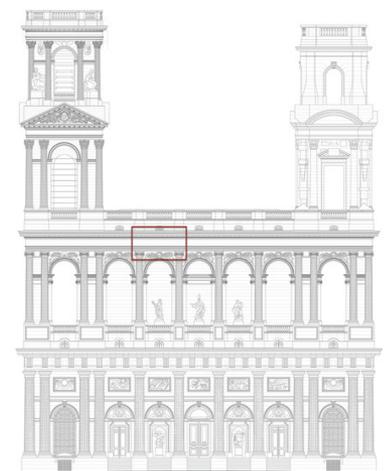


Fig. 4 - (a sinistra) Prospetto del grande portale della chiesa; (a destra) Dettaglio della piattabanda armata nel secondo livello di ordine ionico: in rosso, collocazione della piattabanda armata oggetto di studio.

inserite tra i conci, a costituire un sistema solidarizzato, a ridotta spinta laterale. Il sistema presenta un congegno costruttivo nell'armatura che, per l'esatta disposizione dei tiranti metallici orizzontali e delle staffe (*étriers*) inclinate, sembra anticipare sorprendentemente le forme alle quali Hennebique, ben cento anni più tardi, affidò le prime sperimentazioni sul cemento armato.

È importante rilevare che la scelta progettuale di disporre un tirante orizzontale superiore in corrispondenza dell'estradosso è stata presumibilmente dettata dalla scorretta interpretazione dei fenomeni di comportamento strutturale, secondo cui la spinta del sistema si manifestava in corrispondenza del livello della

chiave. Si ipotizza che una delle possibili ragioni alla base di questa scelta costruttiva risieda nella considerazione pratica per cui collocare il tirante all'estradosso permettesse di armare la piattabanda celando la soluzione costruttiva che sarebbe invece stata visibile nel caso di una sua disposizione nell'intradosso.

IL CANTIERE DI RESTAURO (2006-2010)

Lo studio è stato poi improntato sull'analisi degli interventi di restauro della facciata della chiesa di Saint-Sulpice condotti tra il luglio 2006 e il dicembre 2010 [Fig. 5, 6]. Tra le principali cause di degrado si è evidenziata la corrosione delle armature con conseguente rottura della pietra, distacco e la caduta di parti,

specialmente in corrispondenza della torre Nord [Fig. 7].

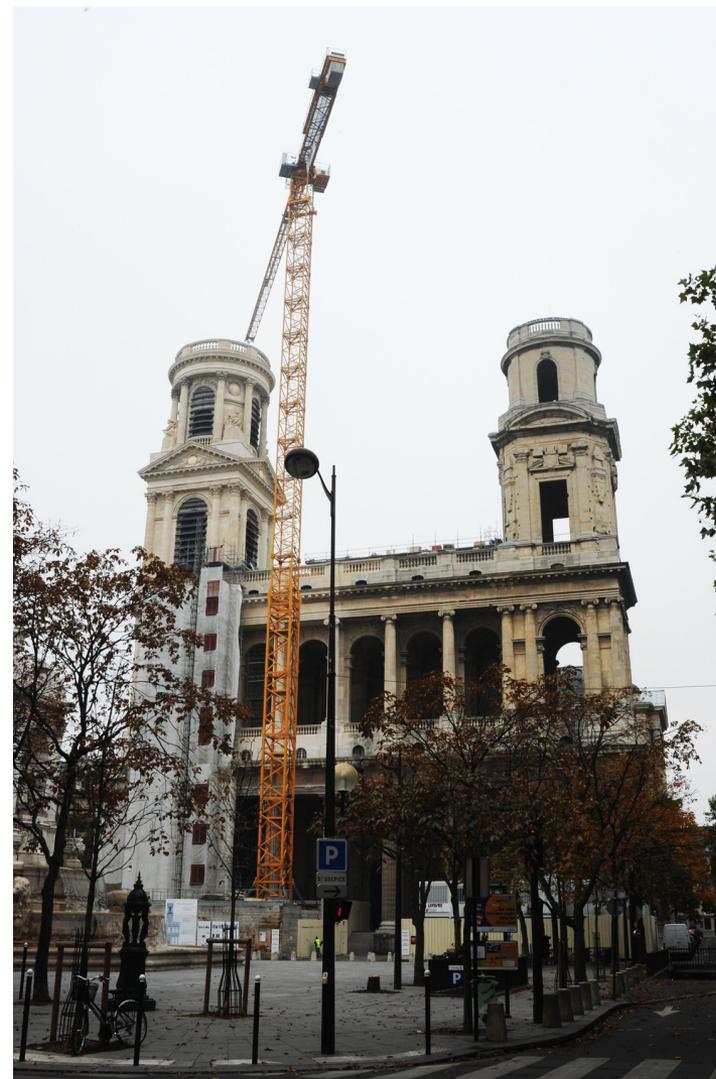
Il materiale lapideo con cui è stata interamente realizzata la chiesa di Saint-Sulpice, proveniente dalle cave di estrazione tra il paese di Saint-Maximin e la riva sinistra dell'Oise (Nord della Francia), è costituito da pietra arenaria calcarea pura e uniforme, di colore grigio-crema, caratterizzata da ottime capacità di lavorabilità. A causa dell'inserimento di armatura all'interno di tale strato lapideo, permeabile all'ossigeno, la superficie del materiale a matrice ferrosa diventa catodica, ossia sede del processo di riduzione dell'ossigeno.

Nella fabbrica di Saint-Sulpice, il processo di corrosione dei ferri dell'armatura all'interno

Fig. 5 - Vista della facciata occidentale della chiesa, in fase di cantiere [Foto C. Mazzoli, ottobre 2010].

di blocchi di pietra ha innescato fenomeni di degrado diversificati: la diminuzione della sezione resistente di tiranti e graffe metalliche; la riduzione di aderenza tra ferro e pietra, e dunque la perdita di ancoraggio, con gravissime conseguenze sulla sicurezza dell'edificio; la fessurazione del copriferro, con conseguente espulsione locale dell'elemento costruttivo lapideo; alterazioni e danni visibili all'aspetto originario dell'edificio.

Un dato rilevante riguarda i danneggiamenti che la chiesa ha subito nel corso degli anni, a partire da quelli inflitti nel 1871 durante la guerra franco-prussiana, in seguito ai quali cominciarono i primi interventi di restauro. Alcuni di questi, per la loro natura molto in-





Il modello della piattabanda di Saint-Sulpice

C. Mazzoli | R. Gulli | M. Brocato

vasiva, hanno prodotto effetti devastanti per la fabbrica, il cui stato conservativo, progressivamente aggravato dalla corrosione delle armature e dagli effetti dell'inquinamento atmosferico sulla pietra, ha subito danni irreparabili nel corso degli anni.

In seguito a studi preliminari, condotti a partire dal 1999 sotto la guida dell'*Architecte en Chef des Monuments Historiques*, il progetto di restauro della facciata di Saint-Sulpice ha previsto interventi volti a recuperare l'originale natura della chiesa, rimuovendo le parti in cemento armato inserite durante gli interventi di restauro precedenti, e sostituendole con elementi in pietra calcarea originale o in materiali compatibili con la struttura origina-

rio. L'organizzazione dei lavori si sviluppava in quattro grandi fasi, corrispondenti ai quattro livelli della facciata occidentale della chiesa, procedendo dall'alto verso il basso, a partire dalla sommità della torre Nord [Fig. 8].

Come già evidenziato, l'interesse del presente studio si è focalizzato sull'analisi degli interventi di restauro della piattabanda armata del secondo livello della facciata [Fig. 4]. La principale causa del dissesto risiede nell'elevato contenuto di armatura che, nel corso dei secoli, ha subito un processo di ossidazione diffusa, con corrosione e conseguente rottura dei tiranti connessa alla formazione di fenomeni lesivi sulla pietra per aumento di volume. Le più dirette implicazioni di natura tecnica sono

Fig. 6 - Dettaglio del secondo livello di ordine ionico della facciata al termine degli interventi di restauro. Dal forte contrasto tra la parte sinistra e la parte destra, ancora degradata, si nota l'evidente leggibilità dell'intervento [Foto C. Mazzoli, gennaio 2011].

Nella pagina seguente:

Fig. 7 - Corrosione delle armature della piattabanda, la quale ha provocato la rottura e il distacco del materiale lapideo in zone diffuse [Foto C. Mazzoli, dicembre 2010, e personale di cantiere, gennaio 2007].

dunque legate alla modifica del comportamento strutturale della piattabanda armata, relazionabile alla necessità di ripristinarne le capacità portanti originarie.

La documentazione reperita nel corso dei lavori ha permesso di comprendere i principi su cui si fondano le scelte adottate per l'intervento di restauro. I blocchi di pietra originali sono stati smontati e le armature in ferro, altamente degradate, sono state rimosse, per procedere successivamente alla ricostruzione degli elementi e al ri-assemblaggio di essi. I conci costituenti la piattabanda sono stati connessi, mediante dei ferri piegati a forma di "V" [Fig. 9], a un tirante orizzontale collocato superiormente, inserito all'interno della pie-



Il modello della piattabanda di Saint-Sulpice

C. Mazzoli | R. Gulli | M. Brocato

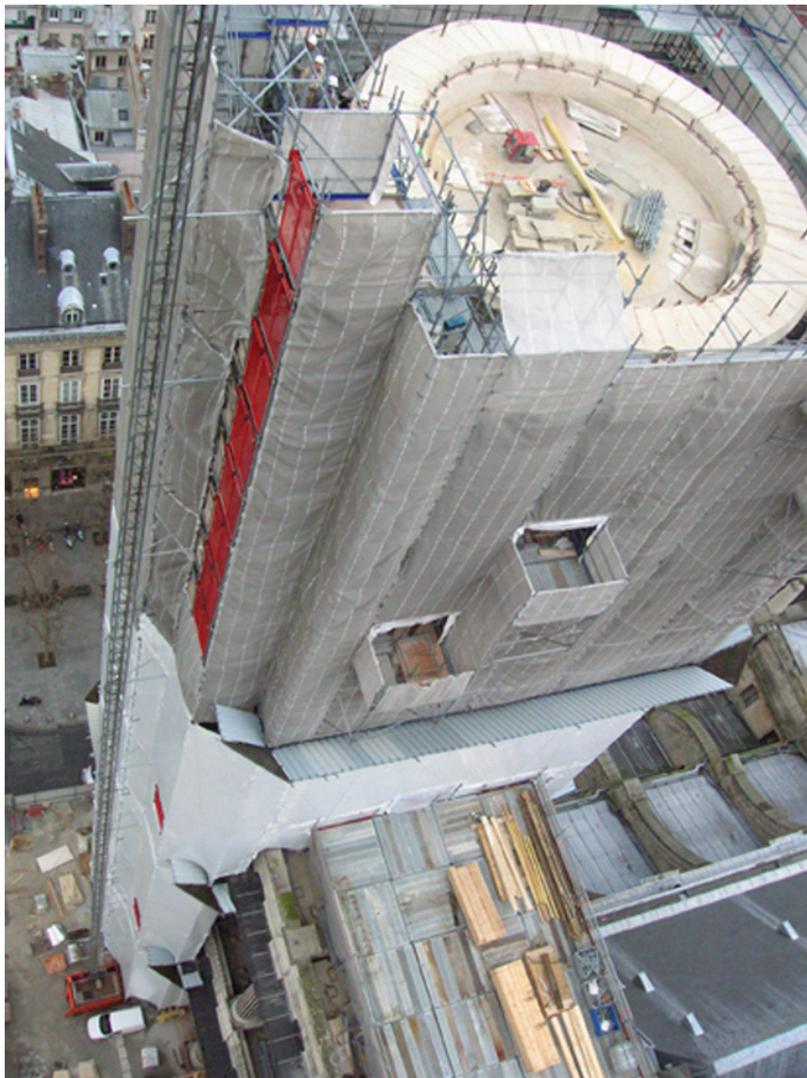


Fig. 8 - (a sinistra) Vista del cantiere dall'alto della torre Nord; (a destra, in alto) - Fase di sollevamento degli elementi lapidei ricostruiti, a sostituzione delle parti di cornice originale, danneggiate e rimosse; (a destra, in basso) - Dettaglio delle armature dell'anello superiore della torre [Mairie de Paris - <http://www.paris.fr>].

Il modello della piattabanda di Saint-Sulpice

C. Mazzoli | R. Gulli | M. Brocato

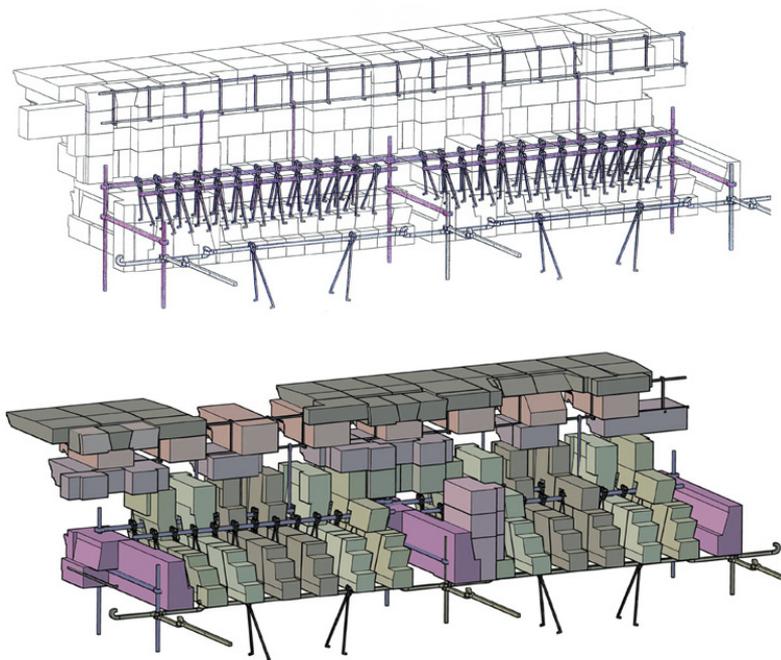


Fig. 9 - Dettaglio delle staffe inserite nella piattabanda armata del secondo livello della facciata di Saint-Sulpice durante la fase di montaggio [Foto L. Toussaint - Toussaint, Laurence (fotografie a cura di) (2011), La tour nord de l'église Saint-Sulpice. Histoire d'une restauration, La Procure, Parigi].

Fig. 10 - Vista assometrica illustrativa del sistema costruttivo realizzato durante gli interventi di restauro; dettaglio del posizionamento delle nuove armature (tiranti, graffe, spilli, e staffe) tra i conci dell'architrave del peristilio [Elaborato grafico F. Braud - Entreprise Pradeau & Morin].

tra: analogamente a quanto è stato realizzato secondo il progetto di Servandoni, dettagliatamente spiegato da Patte, si deduce che l'intento dell'intervento sia stato quello di adottare il medesimo principio di sospensione dei conci a un tirante orizzontale superiore [Fig. 10]. La primaria critica che viene formulata a tale pratica risiede nell'aver solo parzialmente seguito le regole che presiedevano alla soluzione tecnica indicata nella manualistica del tempo, ovvero che il problema del contenimento della

spinta laterale sia stato risolto con un sistema che risulti eccessivamente complesso e pesante; in altri termini il rilevante quantitativo di acciaio inossidabile impiegato, pur configurando una sorta di sistema di "sospensione dei conci", in analogia ai principi formulati da Patte e Rondelet, genera un incremento dei pesi non compatibile con le caratteristiche di funzionamento strutturale previste dalla configurazione originaria.

Di diverso tenore è invece la questione della "leggibilità" dell'intervento che viene chiaramente esibita lasciando inalterato il trattamento della torre Nord con relativa differenziazione cromatica delle superfici [Fig. 11]. A partire da queste sintetiche osservazioni si è dato avvio alla formulazione di una soluzione alternativa, tesa a soddisfare sia le esigenze di una ottimizzazione del funzionamento strutturale della piattabanda, sia alla verifica dell'applicabilità reale delle pratiche costrut-

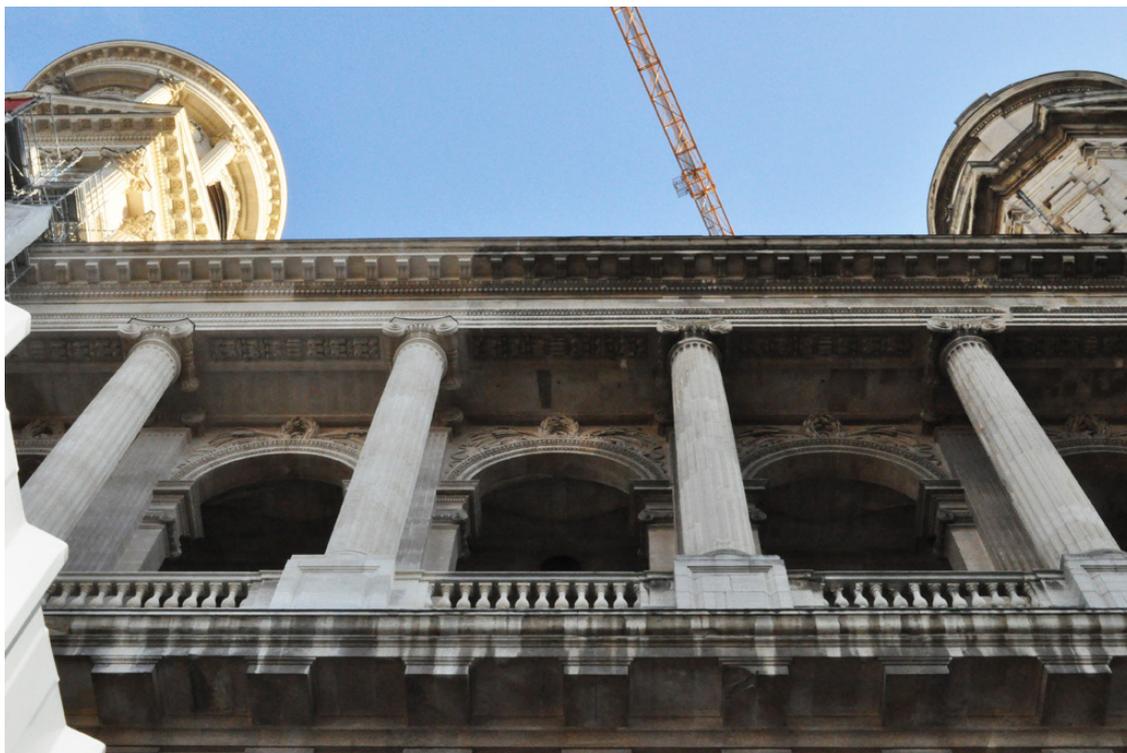


Fig. 11 - Dettaglio del secondo livello di ordine ionico della facciata della chiesa di Saint-Sulpice, al termine degli interventi: l'evidente leggibilità dell'intervento si nota confrontando la parte sinistra con quella destra, la quale non è stata oggetto di intervento [Foto C. Mazzoli].

tive storiche, così come indicate nella manualistica del tempo. Ciò anche in ragione della possibilità di intervenire operando esclusivamente all'intradosso della piattabanda, al fine di evitare il ricorso allo smontaggio dell'intera apparecchiatura muraria estradossale.

IL MODELLO DELLA PIATTABANDA ARMATA

L'indagine conoscitiva svolta sui testi si è poi tradotta nell'elaborazione del modello della piattabanda armata del secondo livello della facciata di Saint-Sulpice [Fig. 12, 13]; la traduzione e l'interpretazione della trattatistica settecentesca ha infatti consentito di comprenderne la natura costruttiva e di evidenziare il complesso sistema di montaggio al fine di ottenere un prototipo in scala 1:2,5 da realizzare presso i *Grands Ateliers de l'Isle d'A-beau* e su cui attivare le successive verifiche sul comportamento strutturale mediante l'esecuzione di prove di carico di cui di seguito si riporta la sintesi conclusiva, svolte caricando la piattabanda con un blocco di pietra di 2.382 kg di peso.

Dalla lettura dei grafici carico-freccia elaborati a partire dai valori rilevati, si evidenzia la presenza di spostamenti minori in corrispondenza di un terzo della luce rispetto a quelli in mezzzeria, in quanto il sistema costruttivo si è deformato secondo lo schema classico di una struttura appoggio-appoggio, sollecitata a flessione, pertanto reagente con la freccia massima in corrispondenza della mezzzeria.

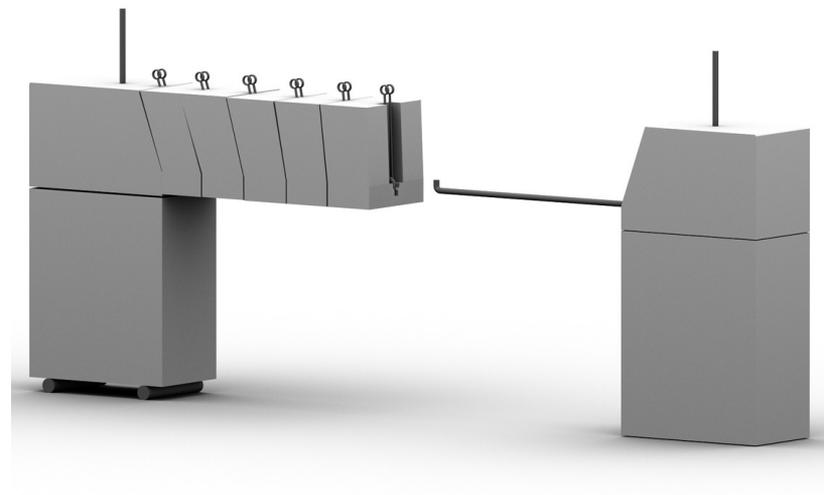
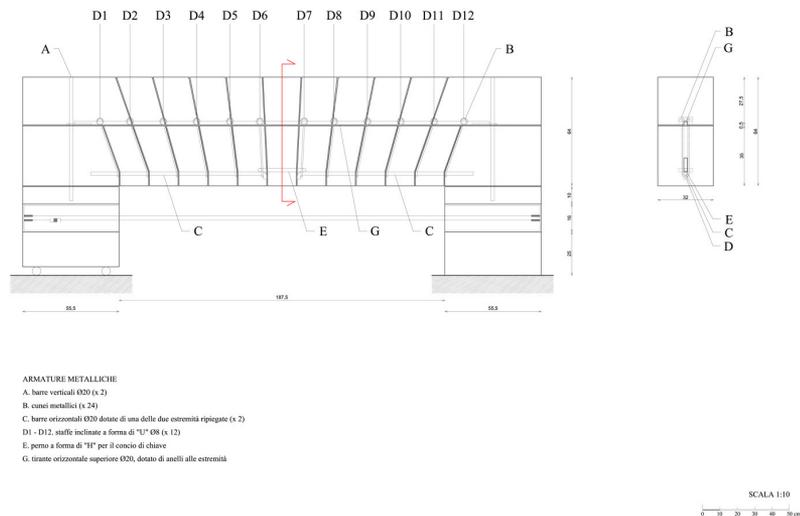


Fig. 12 - Progetto esecutivo del modello della piattabanda armata, da realizzare in scala 1:2,5 durante l'esperienza didattica costruttiva.

Fig. 13 - Simulazione del montaggio della piattabanda, mediante modello tridimensionale digitale. In particolare, fase di completamento della prima metà del livello inferiore e inizio di assemblaggio della seconda porzione: analogamente a quanto effettuato nella prima parte, si inserisce la seconda barra orizzontale inferiore che attraversa tutti i conci della porzione, inserendola all'interno della scanalatura effettuata nel conico di imposta, sempre disponendo inizialmente la piegatura di estremità rivolta verso l'alto. [Elaborati grafici C. Mazzoli]

L'andamento della curva appare infatti coerente con tale ipotesi, poiché in tutti i grafici risulta conforme alle caratteristiche costruttive della piattabanda armata, ovvero non omogenea e pertanto con un andamento crescente generato da oscillazioni localizzate - in corrispondenza delle fasi di aumento di carico e relativo assestamento - fino al raggiungimento del carico massimo. Oltre tale soglia, l'andamento della curva carico-freccia risulta invece lineare durante la fase di scarico, dimostrando così la duttilità del sistema. Inoltre, si osserva come gli spostamenti che si sono verificati in corrispondenza dei sensori siano sempre di entità minima, in particolare: durante la prima prova di carico, gli spostamenti variano entro

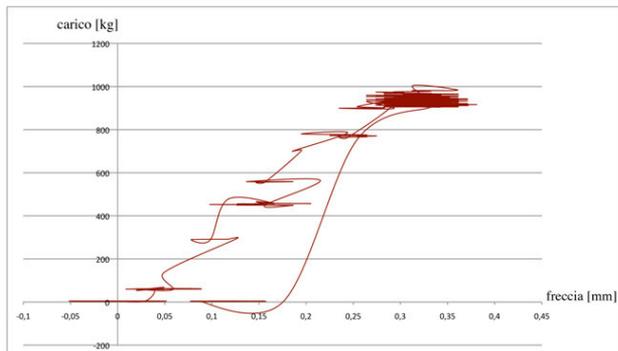
un intervallo di 0,42 mm in mezzeria e 0,46 mm a un terzo della luce; durante la seconda prova di carico, variano entro un intervallo di 0,34 mm in mezzeria e 0,42 mm a un terzo della luce [Fig. 14].

Si tratta dunque di spostamenti verticali molto ridotti, che consentono di apprezzare le elevate capacità portanti del sistema costruttivo. Infine, la verifica dell'assenza della formazione di lesioni e fessurazioni ha contribuito alla dimostrazione della resistenza della piattabanda armata al carico previsto, costituito dal peso della porzione di muratura effettivamente gravante sulla piattabanda del secondo livello della facciata di Saint-Sulpice.

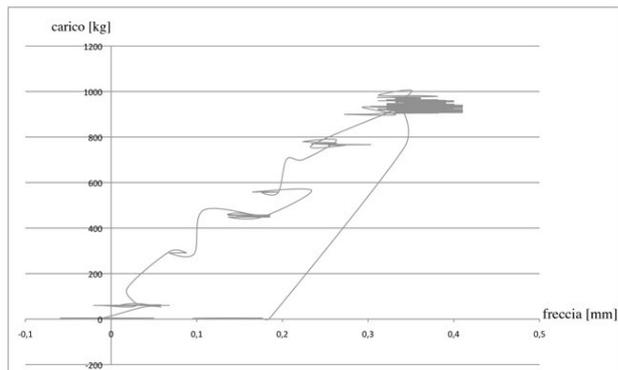
La sperimentazione costruttiva ha infatti con-

Risultati

Prima prova di carico

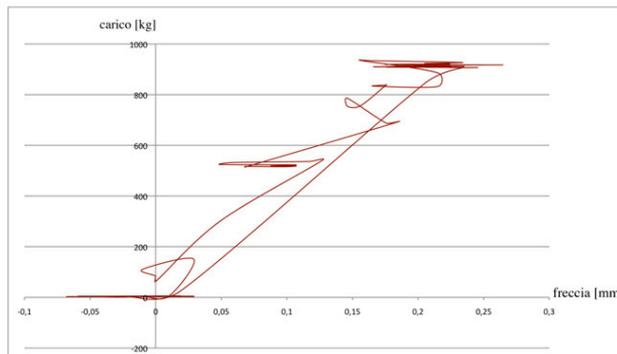


Freccia in mezzeria

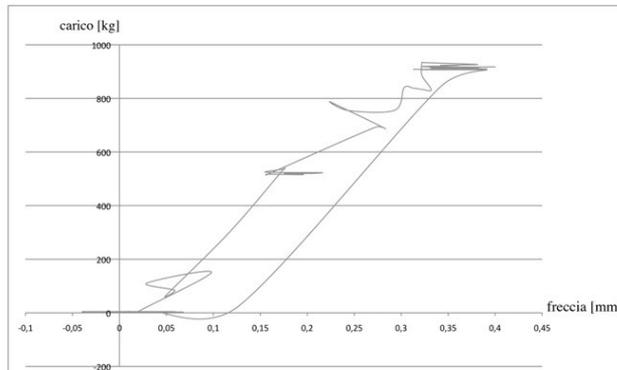


Freccia a un terzo della luce

Seconda prova di carico



Freccia in mezzeria



Freccia a un terzo della luce

Fig. 14 - Grafici carico-freccia elaborati a partire dai risultati ottenuti dalle due prove di carico effettuate. Per ogni prova, (in alto) valori in corrispondenza della freccia in mezzeria; (in basso) valori relativi a un terzo della luce della piattabanda.

sentito di comprendere il ruolo dei tiranti disposti orizzontalmente, ovvero non soltanto come barre a cui “appendere” le graffe tra i conci, ma anche come catene di contenimento delle spinte della piattabanda; l’inserimento di un tirante all’interno dei conci, al fine di evitare il mutuo scorrimento tra essi e il conseguente collasso della struttura, costituisce infatti un espediente già presente nella concezione costruttiva originaria, come portato diretto del sapere conservato nella pratica del tempo. In questo senso, la scelta di inserire tali armature come elementi resistenti a trazione prefigura la nascita di un sistema costruttivo misto, in cui si individua una separazione delle funzioni strutturali tra le parti costituenti la trave – compressione e trazione – assegnando al ferro il duplice compito di “legare” e “resistere”; ovvero prevedendo l’inserimento di staffe atte a collegare le armature tese alla pietra compressa e ad assorbire le azioni taglianti. Una intuizione strutturale che come noto anticipa di quasi due secoli, le prime formulazioni sul comportamento del sistema misto del cemento armato secondo le ipotesi teoriche messe a punto da Françoise Hennebique [Fig. 15].

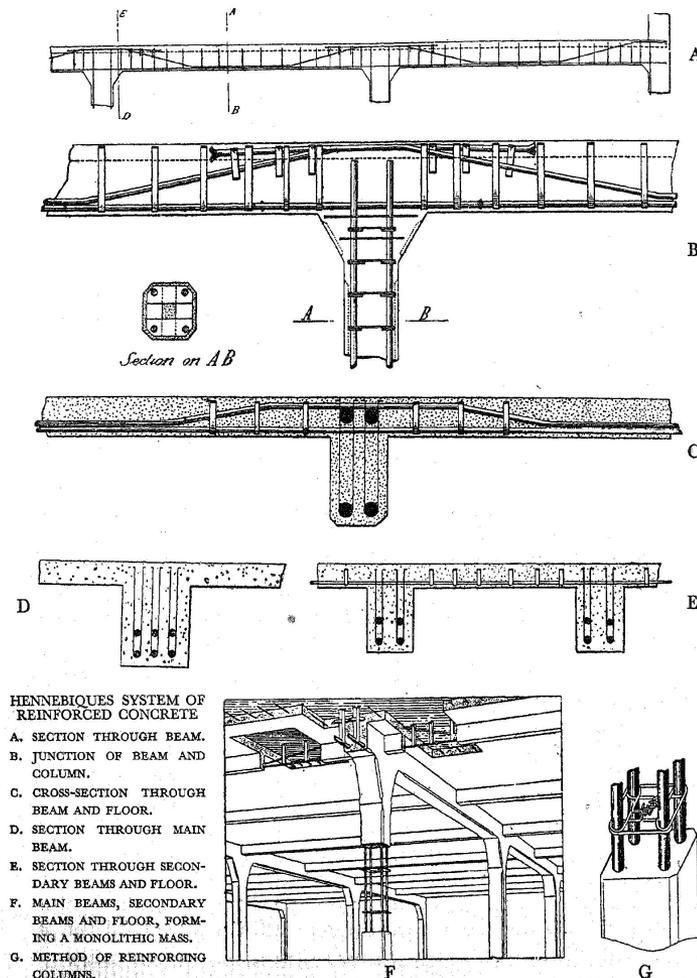
IL COMPORTAMENTO STRUTTURALE

Le verifiche sul comportamento strutturale sono state anticipate da una modellazione matematica come guida e riscontro delle prove sperimentali eseguite sul modello di laboratorio.

Fig. 15 - Sistema trave in cemento armato, brevettato da Hennebique nel 1892. *Étriers* combinati con tondini metallici sagomati, in corrispondenza dei nodi di incastro, al fine di contrastare gli stati tensionali indotti al contempo da taglio e momento flettente. [Whittick, Arnold (1950), *European Architecture in the Twentieth Century – Volume One*, Crosby Lockwood & Son, Londra].

Il modello della piattabanda di Saint-Sulpice

C. Mazzoli | R. Gulli | M. Brocato



- HENNEBIQUES SYSTEM OF REINFORCED CONCRETE
- A. SECTION THROUGH BEAM.
 - B. JUNCTION OF BEAM AND COLUMN.
 - C. CROSS-SECTION THROUGH BEAM AND FLOOR.
 - D. SECTION THROUGH MAIN BEAM.
 - E. SECTION THROUGH SECONDARY BEAMS AND FLOOR.
 - F. MAIN BEAMS, SECONDARY BEAMS AND FLOOR, FORMING A MONOLITHIC MASS.
 - G. METHOD OF REINFORCING COLUMNS.

PLATE XXVII

In prima istanza è stata condotta un'analisi di approccio statico, procedendo al calcolo a rottura con il programma *Wolfram Mathematica*, rappresentando in forma parametrica la geometria della piattabanda - senza armature - per determinare la curva delle pressioni del sistema sottoposto al carico del peso proprio e al peso della porzione di muratura gravante sulla piattabanda [Fig. 16]. L'esito di tale verifica induce dunque a ritenere la necessità strutturale delle armature.

In seconda istanza si è proceduto ad un'analisi di approccio cinematico, utilizzando il software *Cast3M 2000* che, basandosi sul Metodo degli Elementi Finiti con Elementi Discontinui, consente di ricondurre un problema

statico complesso a un sistema di equazioni algebriche con un numero finito di incognite. Tale metodo è articolato in quattro fasi: la scelta della geometria e della discretizzazione del sistema; la definizione del modello matematico, definendo il comportamento fisico del materiale, i vincoli e il carico applicato; la risoluzione del problema discreto; l'analisi e il post-trattamento dei risultati. In effetti, i valori ottenuti dall'elaborazione dei grafici carico-freccia con *Cast3M* confermano le curve ottenute elaborando i dati sperimentali, dimostrando così la validità del modello meccanico impiegato per condurre le analisi [Fig. 17].

A conferma di quanto osservato durante le

prove di dissesto statico, si evidenzia una spinta orizzontale subita dalla piattabanda armata molto ridotta, a dimostrazione dell'efficacia dell'azione dei tiranti di armatura, che contribuiscono a costituire un sistema costruttivo che risponda ai criteri di affidabilità [Fig. 18]. L'armatura metallica, anche se costituita da un unico tirante, agisce equilibrando la spinta e contribuisce a tenere uniti i conci, anche in caso di allontanamento delle imposte. La sua azione, dunque, è simile a quella prodotta dai conci dentati, soluzione spesso adottata per contrastare il loro scivolamento in caso di allentamento degli stati di compressione. Pertanto, il tirante superiore di armatura connesso con le barre inferiori,

Il modello della piattabanda di Saint-Sulpice

C. Mazzoli | R. Gulli | M. Brocato

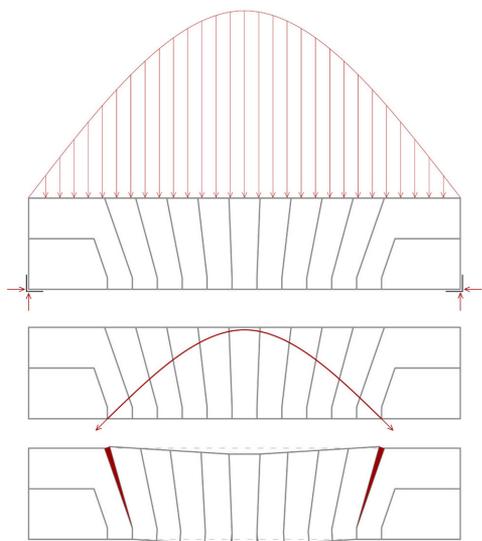


Fig. 16 - Approccio statico: Calcolo a rottura, mediante *Wolfram Mathematica*, senza considerare la presenza di tiranti e staffe.

(In alto) Schematizzazione del carico gravante sulla piattabanda, identificabile nel peso della porzione di muratura soprastante il sistema.

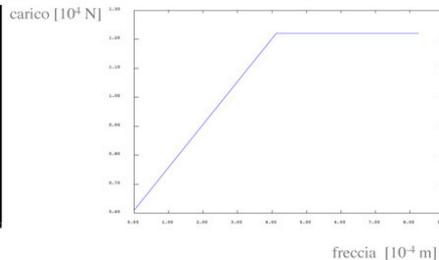
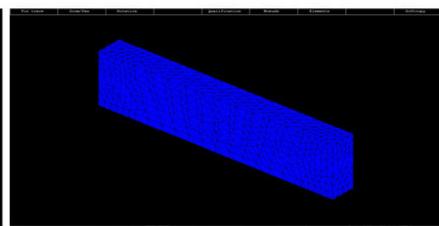
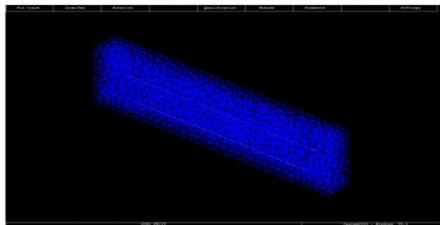
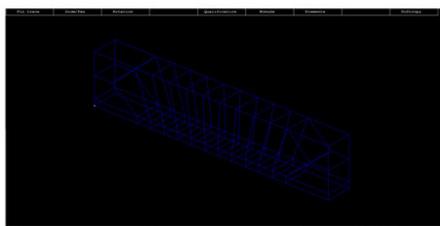
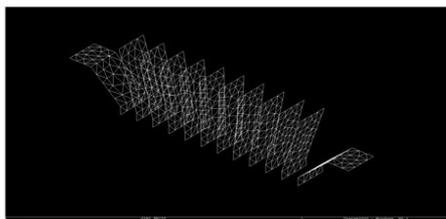
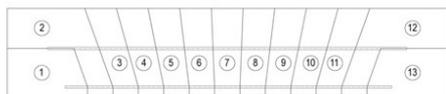
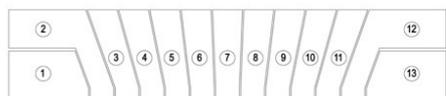
(Al centro) Una possibile curva delle pressioni al limite del collasso.

(In basso) Rappresentazione della deformata ottenuta mediante calcolo non lineare.

Fig. 17 - Approccio dinamico: Metodo degli Elementi Finitivi, mediante *Cast3M 2000*, considerando la presenza di tiranti e staffe.

(In basso a destra) Curva carico-freccia: in effetti, simulando il carico applicato durante l'esperienza costruttiva, i valori dello spostamento verticale in mezzeria confermano i valori ottenuti sperimentalmente, dimostrando l'esattezza del modello.

[Elaborati grafici C. Mazzoli]





Il modello della piattabanda di Saint-Sulpice

C. Mazzoli | R. Gulli | M. Brocato

Fig. 18 - Rilevamento della spinta orizzontale della piattabanda [Foto C. Mazzoli, gennaio 2011].

risulta essere efficace ai fini del contenimento della spinta della piattabanda. Si può dire quindi che la piattabanda armata realizzata funzioni come un elemento resistente, a spinta pressoché eliminata.

CONCLUSIONI

Gli esiti conseguiti dal lavoro qui presentato forniscono una indicazione sul ruolo assegnato alla sperimentazione costruttiva come ausilio essenziale alla comprensione delle tecniche costruttive storiche, nel rapporto istituito tra il sapere teorico e il “mondo reale” della prassi.

Il cantiere di restauro è stato infatti assunto come il luogo e l'occasione a cui far corrispon-

dere una riflessione aggiornata sull'indirizzo da assumere per le pratiche di intervento, mediando una conoscenza che oscilla tra il dominio della riflessione sui significati dell'opera con quelli di una rivisitazione della matrice costruttiva e della sua natura strutturale. In questa mediazione, il paradigma dell'indagine è rappresentato dal “modello”, qui inteso sia come esito di una esperienza costruttiva sia come veicolo assunto per la comprensione delle leggi che ne governano il funzionamento strutturale.

Oltre a questo aspetto, tale esperienza di ricerca ha posto in luce l'importanza attribuita in Francia all'arte del costruire in pietra e alla tutela di una cultura costruttiva fondata sulla

qualità del lavoro manuale e artigiano, favorendo programmi di ricerca e didattici improntati su esperienze di cantiere e di laboratorio. In particolare, l'analisi critica degli interventi per la chiesa di Saint-Sulpice si inserisce all'interno di un'ampia ricerca condotta sul tema del recupero del patrimonio architettonico in pietra da taglio, nella teoria e nella pratica dei *Tailleurs de pierre* francesi. L'interesse verso la complessa esperienza della chiesa è motivato dalla convinzione che i principi posti alla base degli interventi e i metodi impiegati per realizzarli possano assumere valore generale all'interno del dibattito attuale sul recupero dei monumenti. Lo studio assume infatti l'esperienza storica dei *Tailleurs de pierre* come

Fig. 19 - Modello della piattabanda armata al termine del cantiere didattico presso *Les Grands Aterliers de l'Isle d'Abeau* [Foto C. Mazzoli, gennaio 2011].



un possibile modello per la revisione delle teorie e delle metodologie attuali di intervento sul patrimonio edilizio. La conoscenza dei principi della scuola dei *Compagnons du Devoir*, la loro trasmissibilità e la presa di coscienza dell'enorme potenziale costituiscono i requisiti necessari per recuperare i sistemi costruttivi premoderni con cui la chiesa di Saint-Sulpice è stata realizzata, ed eventualmente aggiornarli sul piano tecnico-costruttivo ed esecutivo, senza modificarne il funzionamento originario, alle nuove architetture.

Tale approccio sollecita a interrogarsi sulla labilità dei confini segnati dalla teoria del Restauro, tra una visione che predilige pratiche di intervento votate alla minima invasività

e quella che invece persegue la strada della "sostituzione", dichiarando esplicitamente la propria identità. Ciò ovviamente esula dal profilo disciplinare e di competenze a cui corrisponde l'interesse di ricerca qui riportato, ma al contempo induce a svolgere una breve considerazione aggiuntiva sull'importanza accreditata al *Progetto* nello spazio segnato da due fronti contrapposti: da un lato, quello di una adesione acritica a un protocollo di regole orientate a garantire la tutela dei significati di un'opera attraverso azioni di natura eminentemente conservativa; dall'altro, quello di aprirsi alle potenzialità offerte dalla *Tecnica* nel decretare soluzioni progettuali in grado di fornire risposte aggiornate e coerenti con le

istanze di preservazione dei caratteri materici, costruttivi e strutturali dell'opera anche mediante interventi votati ad un miglioramento delle condizioni prestazionali originarie.

In questo alveo della riflessione trova spazio e riparo anche l'interesse per la Storia della costruzione, come espressione di un sapere che nasce e si consolida nelle pagine lasciate bianche da una Storia dell'architettura, tradizionalmente orientata alla descrizione letteraria dell'opera, in luogo di una lettura dei suoi contenuti tecnici. Ciò implica necessariamente la formazione di figure specialistiche capaci di controllare, con identica confidenza, le formulazioni analitiche che presiedono alla definizione delle soluzioni strutturali e costrut-

tive, e quelle di matrice critico-interpretativa sui significati figurativi e storici dell'opera. Un indirizzo di studio che privilegia la formulazione di letture trasversali in cui le implicazioni scientifiche e tecnologiche, come quelle relative alla pratica, risultano strettamente connesse ai contenuti architettonici, poiché ritenute inscindibili per poter comprendere, nella sua complessità, i caratteri distintivi di un'opera costruita, e gli elementi peculiari ed innovativi della sua formulazione progettuale. Proprio all'interno di tale dominio prendono dunque forma gli obiettivi di ricerca espressi dal presente contributo.

RINGRAZIAMENTI

Il lavoro di ricerca è stato svolto in collaborazione con i Proff. Brocato, Porrino e Sakarovitch del *Laboratoire GSA - Géométrie Structure Architecture* presso l'*École Nationale Supérieure d'Architecture Paris-Malaquais*, nell'ambito delle Tesi di Laurea portate avanti con la collega Martina Presepi.

Si ringraziano:

SNBR per la fornitura e la lavorazione della pietra utilizzata per svolgere l'attività didattica di cantiere presso *Les Grands Ateliers de L'Isle d'Abeau*; Luc Tamborero per la realizzazione del modello della piattabanda.

LABORATOIRE GSA

ENSA Paris-Malaquais

14, rue Bonaparte

75272 Paris Cedex 06

France

Tel: +33 01 55 04 56 50

NOTE

[1] Boiret, Yves (1996), *Architecture. Chronique d'un long chantier in De pierre et de cœur: l'église Saint-Sulpice. 350 ans d'histoire*, Les Éditions du Cerf, Parigi, pp. 25-32.

[2] Guénot, Hervé (2007), *Paris. Saint-Sulpice en chantier*, in *Le Moniteur des Travaux Publics et du Bâtiment*, Parigi, 12 gennaio 2007, n. 5381, pp. 28-31.

[3] Pérouse de Montclos, Jean-Marie (2004), *Jacques-Germain Soufflot*, Monum – Éditions du Patrimoine, Parigi.

[4] Rondelet, Jean-Baptiste (1802-1817), *Traité théorique et pratique de l'art de bâtir*, Charpente (Atlas), Parigi.

[5] Patte, Pierre (1769), *Mémoires sur les objets les plus importants de l'architecture*, Rozet, Parigi.

BIBLIOGRAFIA

Benvenuto, Edoardo (1981), *La scienza delle costruzioni e il suo sviluppo storico*, Sansoni, Firenze.

Boiret, Yves (1996), *Architecture. Chronique d'un long chantier*, in *De pierre et de cœur: l'église Saint-Sulpice. 350 ans d'histoire*, Les Édi-

tions du Cerf, Parigi, pp. 25-32.

Brocato, Maurizio (2010), *Conception d'une arche en maçonnerie. Notes des cours de l'École des Ponts de Paris*, ParisTech, Parigi.

Guénot, Hervé (2007), *Paris. Saint-Sulpice en chantier*, in *Le Moniteur des Travaux Publics et du Bâtiment*, Parigi, 12 gennaio 2007, n. 5381, pp. 28-31.

Patte, Pierre (1769), *Mémoires sur les objets les plus importants de l'architecture*, Rozet, Parigi.

Pérouse de Montclos, Jean-Marie (2004), *Jacques-Ger-*

main Soufflot, Monum – Éditions du Patrimoine, Parigi.

Rondelet, Jean-Baptiste (1802-1817), *Traité théorique et pratique de l'art de bâtir*, Charpente (Atlas), Parigi.

Rykwert, Joseph (1991), *Les Premiers modernes. Les Architectes du XVIIIe siècle*, Hazan, Parigi.

Whittick, Arnold (1950), *European Architecture in the Twentieth Century – Volume One*, Crosby Lockwood & Son, Londra.