
DUE "PROGETTI NEL CASSETTO":
L'ARSENALE DI PISA E IL MERCATO COPERTO DI NOVARA

TWO "PROJECTS IN THE DRAWER":
THE ARSENAL OF PISA AND THE COVERED MARKET OF
NOVARA

L. JURINA
POLITECNICO DI MILANO, DIPARTIMENTO ABC, MILANO

A. A. BASSOLI
INGEGNERE LIBERO PROFESSIONISTA, MILANO

FILARETTI
ARCHITETTO LIBERO PROFESSIONISTA, LODI

V. E. MOGICATO
ARCHITETTO LIBERO PROFESSIONISTA, MONZA

E. O. RADAELLI
INGEGNERE LIBERO PROFESSIONISTA, MONZA

D. RAMPOLDI
INGEGNERE LIBERO PROFESSIONISTA, MILANO

The two following cases concern the Republican Arsenal of Pisa and the Covered Market in Novara. Both are characterized by the presence of arched structures that are particularly vulnerable to horizontal load, and, at the same time, represent the connoting element of the factory itself.

In the case of the Arsenal of Pisa, the bi-directional arch structure needed to withstand both the vertical loads of the new roof, and horizontal seismic loads.

On the other hand, the Covered market of Novara, due to its public use, required a seismic improvement, according to the current regulations.

For the structural issues of the two buildings, unconventional solutions were proposed, aiming to obtain an overall improvement of the factory, in terms of static and seismic resistance, mainly focusing on the maintenance program and the visual impact.

Premessa

Nell'ambito del recupero degli edifici esistenti ci si confronta spesso con strutture estremamente differenti tra loro per epoca costruttiva, materiali impiegati e destinazione d'uso. Le origini, lo sviluppo e le modifiche che ciascun edificio subisce nel corso della sua vita utile vengono infatti tramandate fino allo stato attuale, rendendo ciascuno bene un "unicum" diverso da tutti gli altri.

Si riscontra tuttavia come alcune caratteristiche costruttive ricorrano frequentemente, talora anche in realtà e in epoche tra loro distanti. E' il caso delle strutture ad arco che, fin

dalle prime applicazioni, hanno sempre dimostrato efficacia strutturale e, al tempo stesso, gradevolezza estetica.

Tra questi esempi, il duecentesco Arsenale Repubblicano di Pisa trova nella struttura ad arco un elemento chiave, condiviso con il novecentesco Mercato Coperto di Novara. Ciò ha consentito un approccio comune nel metodo e nei criteri del progetto di consolidamento strutturale.

In particolare, per qualsiasi struttura ad arco la scelta progettuale di consolidamento deve convergere nel migliorare il funzionamento a compressione dell'arco stesso, possibilmente senza modificarne la geometria attuale e limitando l'aggiunta di massa. Scelte strutturalmente efficaci e al tempo stesso compatibili con la materia storica sono dunque da preferirsi a soluzioni invasive, che spesso si rivelano addirittura dannose.

Tra le soluzioni innovative, la tecnica denominata "Arco Armato" è stata più volte impiegata dagli autori per il consolidamento degli archi di edifici storici.

La soluzione consiste nel modificare i carichi agenti sulla struttura, adattandoli alla geometria esistente, mediante il posizionamento di cavi in acciaio post-tesati, all'estradosso dell'arco o, in alternativa, all'intradosso. L'arco ha la medesima geometria del cavo e le forze applicate dall'arco al cavo, per il principio di azione e reazione, sono uguali a quelle applicate dal cavo all'arco.

Ne consegue che se le forze applicate sul cavo lo sollecitano a sola trazione, le forze applicate sull'arco lo sollecitano a sola compressione.

Si vuole qui sottolineare la versatilità del metodo proposto, laddove i cavi sono capaci di adattarsi a differenti tipologie e geometrie di strutture, da quelle bidimensionali (cerchio o arco), alle strutture tridimensionali, quali volte e cupole.

L'efficacia del sistema "Arco Armato" è stata dimostrata attraverso numerosi calcoli numerici, modelli ad elementi finiti e campagne sperimentali su larga scala, al fine di determinarne il comportamento sia in presenza di carichi verticali statici, sia in presenza di carichi orizzontali di natura sismica.

Si riportano alcune immagini di tali campagne sperimentali e modellazioni FEM condotte (Figure 1 e 2).

Il "primo progetto nel cassetto": l'Arsenale Repubblicano di Pisa

L'Arsenale Repubblicano di Pisa si colloca sulla riva destra del fiume Arno, nel settore ovest della città medievale, all'interno della cinta muraria (denominata Tersana) edificata nella metà del XIII secolo. All'interno di questo ampio spazio poligonale si conservano i resti dell'antico arsenale, su un'area a pianta trapezoidale di circa 40m per lato, suddivisa internamente in 4 navate parallele, scandite da arcate nelle due direzioni (Figure 3 e 4).

La struttura originaria, risalente ad un periodo compreso tra la fine del Duecento e l'inizio del Trecento, ha subito nei secoli numerose trasformazioni geometriche e strutturali, riconducibili prevalentemente ai cambiamenti di destinazione d'uso.

Nel XV sec. la trasformazione dell'Arsenale ad uso militare ne ha significativamente modificato l'aspetto, riducendo le dimensioni in pianta ed operando ricostruzioni della muratura con materiali provenienti dal preesistente edificio Duecentesco.

L'attuale conformazione strutturale segue invece alla ristrutturazione integrale avvenuta nel XVI sec., nella quale si attuarono alcuni interventi di rifacimento delle chiusure perimetrali e delle coperture.

La particolare disposizione dell'attuale edificio si spiega in rapporto all'organizzazione

interna della Tersana, che prevedeva una grande arcata sul lato sud, per la comunicazione tra il fiume e i cantieri navali attraverso un canale centrale. Le navate venivano così ruotate di 50° rispetto all'asse del canale centrale per agevolare il varo delle navi.

Le recenti indagini archeologiche condotte hanno dimostrato che gli interventi eseguiti nei secoli XVIII-XX non hanno apportato sostanziali modificazioni, se non un cambio di destinazione d'uso, che ha abbandonato definitivamente l'originaria funzione navale, lasciando spazio a nuovi usi, prevalentemente legati a ricoveri per allevamento.

Lo stato di abbandono degli ultimi decenni, fatta eccezione per la parentesi iniziata dall'Arch. Michelucci negli anni '80 ma mai portata a termine, ha richiesto la ridefinizione di un progetto strutturale e la identificazione di una nuova destinazione d'uso dell'intera area.

A tal proposito si riporta nel presente articolo la proposta progettuale presentata dagli scriventi in fase di gara che, seppur risultata non aggiudicataria per pure questioni formali, si ritiene interessante ed innovativa.

Da ciò il fatto di averla chiamata un "progetto nel cassetto"...

Proposta progettuale

L'uniformità del sistema strutturale presente nell'Arsenale, il quale è costituito da pilastri in muratura collegati da un doppio ordine di archi (a sesto ribassato in una direzione e a tutto sesto nell'altra), ha suggerito un intervento anch'esso uniforme, esteso all'intera struttura e rivolto a rendere efficiente il collegamento tra i vari elementi strutturali, ossia colonne, archi e fondazione.

Quale primo tema, la rifunzionalizzazione dell'Arsenale prevedeva il ritorno della quota di calpestio a quella originaria, più bassa di circa 2 m rispetto alla attuale. La rimozione del terreno e la contemporanea liberazione della parte di pilastri in muratura, attualmente interrata, implica il venir meno di una benefica azione di contenimento alle deformazioni delle colonne presso-inflesse.

Pertanto, per sostituire tale azione di confinamento laterale è stata proposta una cerchiatura della parte basamentale dei pilastri, mediante cavetti inox di piccolo spessore, ottenendo così una sicurezza analoga, se non superiore, rispetto a quella assicurata dalla attuale presenza del terreno, in termini di carico assiale.

Tra le possibili tecniche di cerchiatura, il metodo individuato per consolidare i pilastri degli Arsenali Repubblicani di Pisa utilizza cavi inox di piccolo diametro (Φ 1 mm) inseriti nei giunti di malta, con andamento circonferenziale, capace di conferire uno stato di coazione radiale alla muratura.

Tale soluzione è stata sperimentata nel 2006 dal Laboratorio Prove del Politecnico di Milano su un campione di 6 colonne di muratura in scala reale, soggette a carico assiale di compressione, confermandone l'efficacia. In particolare, è stato riscontrato un 54% di incremento del carico a rottura per le colonne "poco cerchiata", ossia quelle con cerchiature a giunti di malta alterni, e addirittura un 95% di incremento per le colonne cerchiata in corrispondenza di ogni giunto (Figura 6).

Il secondo tema affrontato riguarda il collegamento tra la parte basamentale dei pilastri e la struttura in elevazione al di fuori dalla attuale quota di calpestio.

Il dispositivo previsto fa uso della già citata tecnica dell'"Arco Armato", ossia di cavi inox di diametro medio, disposti in verticale a lambire i pilastri, proseguendo poi all'estradosso degli archi, così da "impacchettarli" efficacemente (Figura 5).

Il sistema proposto consente dunque di creare un collegamento continuo tra la parte di pilastro sotto la quota di calpestio (basamento), la parte di pilastri sopra la quota di calpestio, gli archi compresi tra i pilastri ed il piano di fondazione (ipotizzato con la tecnica del "vespaio areato armato").

Una volta definita la modalità di consolidamento mediante cavi post-tesati esterni si è adottato un metodo di verifica che si basa sul noto teorema cinematico dell'analisi limite. E' stato assegnato alla struttura un arbitrario meccanismo di collasso cinematicamente ammissibile, introducendo nella configurazione originaria un numero sufficiente di cerniere plastiche tale da trasformare l'intera struttura, o una sua parte, in un "meccanismo" non più in grado di opporre resistenza ai carichi impressi.

Nel caso di carichi sismici, ci si è proposti di trovare il massimo carico orizzontale cui la struttura può resistere, in presenza di masse assegnate, ossia di definire il minimo moltiplicatore cinematico dei carichi μ associato a ciascuno dei 3 meccanismi considerati. Se da un lato il moltiplicatore cinematico μ definisce la quota parte data dalle masse partecipanti nel sisma all'azione orizzontale, dall'altro esso rappresenta anche la massima accelerazione orizzontale corrispondente al raggiungimento dello Stato Limite considerato, alla quale la struttura è globalmente in grado di resistere. Tale accelerazione può essere direttamente confrontata con quella massima attesa, ottenuta dallo spettro di risposta, così da ottenere l'indice di sicurezza, quale rapporto tra l'accelerazione di collasso e quella attesa.

Il teorema cinematico ha permesso quindi di quantificare l'incremento di resistenza della struttura ai carichi orizzontali (che coincide con l'incremento del moltiplicatore μ) al variare dell'azione N, ossia il tiro imposto al cavo, secondo il principio di funzionamento dell'arco armato.

E' stato poi valutato il massimo tiro N applicabile ai cavi sulla base della resistenza a rottura della muratura per compressione, oppure sulla base della resistenza del cavo per trazione.

In questo modo è stato possibile stabilire il comportamento sismo-resistente della struttura, nonché il contributo benefico dell'intervento di progetto in termini di miglioramento o di adeguamento sismico.

In particolare, le valutazioni numeriche hanno permesso di stabilire che per tiri $60\text{kN} < N < 80\text{kN}$ è possibile raggiungere un livello di "adeguamento sismico" della struttura, mentre per valori di tiro inferiore a 60kN si ottiene comunque un "miglioramento sismico".

	N=40KN	N=60KN	N=80KN	LEGENDA
Cinematismo 1	$\mu=0,310$	$\mu=0,370$	$\mu=0,430$	Adeguamento sismico
Cinematismo 2	$\mu=0,195$	$\mu=0,237$	$\mu=0,277$	Miglioramento sismico
Cinematismo 3	$\mu=0,271$	$\mu=0,329$	$\mu=0,387$	
Indice sicurezza	0,82	1,00	1,20	

Tabella 1: valori del moltiplicatore μ al variare del tiro N per i 3 Cinematismi considerati

Il "secondo progetto nel cassetto": il mercato coperto di Novara

La struttura del Mercato Coperto di Novara è stata progettata nel periodo pre-autarchico del secolo scorso, con caratteristiche costruttive di tipo tradizionale, ed è stata rivisitata

più volte nel tempo per adeguarla a precise disposizioni ed esigenze dell'epoca.

L'edificio attuale è stato così realizzato sulla scorta di un progetto redatto dall'allora Ingegnere Capo dell'Ufficio Tecnico del Comune di Novara ed in seguito ultimato alla fine del 1939 (Figura 7).

Di particolare interesse è apparsa la struttura del mercato coperto, costituita da una serie di arconi "a catenaria" di luce 13,4m, e posti ad interasse di 6,7 m, collegati da travetti SAP in laterocemento armato, i quali sorreggono sottili tavelloni in laterizio posti a chiusura dell'intradosso di copertura.

Indagini diagnostiche ed analisi numeriche hanno dimostrato che i grandi arconi a traliccio in c.a. contengono una insufficiente quantità di ferro d'armatur, e presentano proprietà meccaniche residue in termini di resistenza non in grado di sopportare i sovraccarichi accidentali (specie quelli da neve) previsti dalla vigente normativa.

A questo si aggiunge una insufficiente resistenza nei confronti delle azioni sismiche dell'intero corpo di fabbrica, dal momento che il trasferimento dei carichi orizzontali è affidato alle sole travette SAP e agli esigui 5 cm di tavelloni in laterizio.

Anche per il Mercato Coperto di Novara è stata proposta una soluzione alternativa ed innovativa rispetto a quanto indicato nel bando, che si ritiene utile presentare qui e che si è classificata al 2° posto.

Proposta progettuale

La proposte progettuale ha riguardato principalmente il consolidamento della copertura del corpo di fabbrica, con l'intento di apportare alcune migliorie rispetto al progetto da bando.

Si è optato dunque per interventi che mantenessero il più possibile inalterato l'aspetto attuale dell'edificio, ponendo attenzione alla interessante copertura ad arco, che non si voleva modificare.

In particolare, quale soluzione alternativa ai pesanti "arconi" in acciaio a vista da affiancarsi a quelli esistenti (previsti nel progetto di bando) si è proposto un intervento di tipo estradossale che utilizza cavi in acciaio disposti ad "X", secondo la tecnica dell'"Arco Armato" (Figura 8). Va sottolineato come la volta del Mercato Coperto sia caratterizzata da una particolare e favorevole geometria a "catenaria riflessa", che, sotto i carichi da peso proprio, lavora a sola compressione. Naturalmente la situazione si modifica per carichi eccentrici da neve o per carichi orizzontali da vento o sisma, che sollecitano a flessione le deboli nervature in laterizio armato. La soluzione proposta, consolidata con i cavi post-tesati dell'Arco Armato, beneficia di un diffuso incremento di compressione negli archi, in grado di centrare la curva delle pressioni. E' stato previsto inoltre di inserire nello spessore della copertura alcune costolature al disotto dei cavi, realizzate con cordoli in c.a. di dimensione 20x18 cm, in modo da realizzare bielle rigide, capaci di trasferire anche le sollecitazioni di compressione, riducendo le possibilità di schiacciamento delle sottostanti fragili tavelle in laterizio. Così facendo, il comportamento della copertura e degli archi collegati tra loro dai cavi è molto simile a quello di una trave reticolare, in cui i cavi post-tesati costituiscono le diagonali tese, mentre i cordoli in c.a. quelle compresse. Infine, quale ulteriore contributo dell'"Arco Armato" non solo alla copertura, ma anche al livello sottostante, si è proposto di prolungare in verticale fino a terra le coppie di cavi che convergono in corrispondenza del pilastro di appoggio degli arconi, correndo in aderenza al pilastro stesso fino ad ancorarsi al solaio di calpestio, senza costituire alcun ingombro

per gli utenti del Mercato Coperto (Figura 9). Nelle numerose analisi numeriche FEM eseguite sono stati valutati gli effetti benefici indotti dall' "Arco Armato" e da tale sistema di cavi prolungati in verticale fino a terra, nonché il contributo positivo fornito da alcuni controventi a "V" rovescia, posti nella direzione dell'asse delle navate, laddove non siano di impedimento per il transito. La tabella 2 riporta i miglioramenti ottenuti in termini di spostamenti orizzontali nelle due direzioni X e Y in presenza di carico orizzontale da sisma, ottenuti dalla modellazione FEM. La soluzione con arco armato e controventi a V risulta significativamente più efficace, soprattutto se confrontata con la soluzione posta a base di gara, sebbene già la soluzione con semplice arco armato fornisca risultati soddisfacenti. I risultati ottenuti permettono di affermare che il Mercato Coperto di Novara può essere adeguato alle recenti norme di sicurezza con costi limitati, aggiungendo strutture non invasive e operando nel pieno rispetto delle preesistenze, così da consentire un ri-uso sostenibile.

	Stato di fatto non consolidato	Arco armato e prolungamento verticale	Arco armato con controventi a V	Soluzione a base di gara
Spostamento X	19,29 mm	- 23%	- 39%	- 8%
Spostamento Y	20,35 mm	- 27%	- 55%	- 13%

Tabella 2: valori del moltiplicatore μ al variare del tiro N per i 3 Cinematismi considerati

Bibliografia

- L. Jurina, *Tecniche di consolidamento dei monumenti: una panoramica attuale*. In "IF-CRASC '12, V Convegno su Crolli, Affidabilità Strutturale, Consolidamento", Pisa 2012.
- E. Giuriani, *Consolidamento degli edifici storici*, UTET Scienze Tecniche
- L. Jurina, *Tecniche di cerchiatura di colonne in muratura*. In "L'Edilizia-Structural n.164", XVIII, pp.38-49.
- J.A. Castillo, *La lettura stratigrafica dell'Arsenale Repubblicano di Pisa*. In G. Biscontin, G. Driussi "Dal sito Archeologico all'archeologia del costruito, Conoscenza, Progetto e Conservazione", 1996
- Web: <http://www.jurina.it>

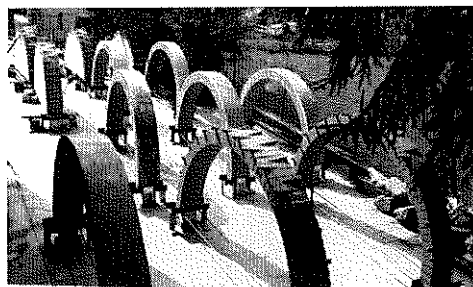


Fig. 1 - Sperimentazione in scala reale della tecnica dell'Arco Armato

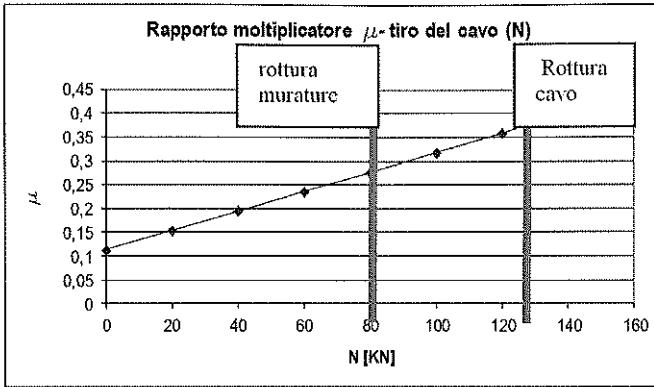


Fig. 2 - Risultati della sperimentazione dell'Arco Armato. Linearità tra il tiro N e il moltiplicatore μ



Fig. 3 - L'Arsenale Repubblicano di Pisa allo stato di fatto



Fig. 4 - L'Arsenale Repubblicano di Pisa allo stato di fatto

SEZIONE A-A

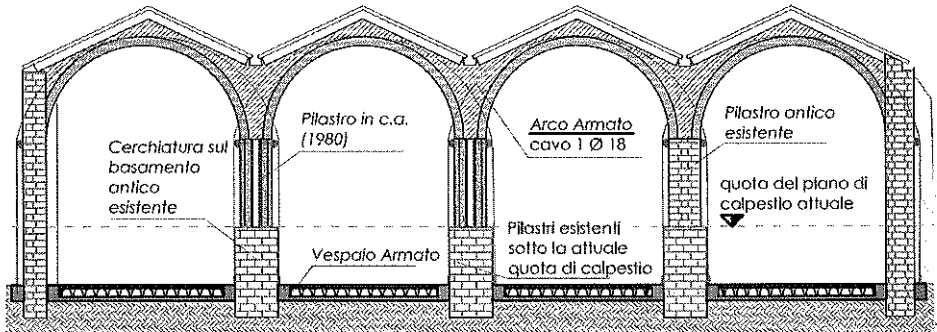


Fig. 5 - Sezione dell'Arsenale Repubblicano di Pisa proposta progettuale di rinforzo mediante cerchiature del basamento e Arco Armato



Fig. 6 - Cerchiatura di colonne in muratura mediante cavi inox di piccolo diametro posti nei giunti di malta

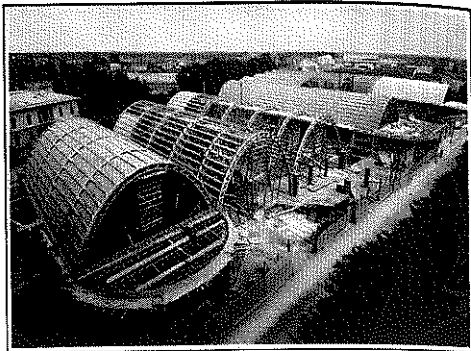


Fig. 7 - Mercato coperto di Novara durante la fase costruttiva (1939)

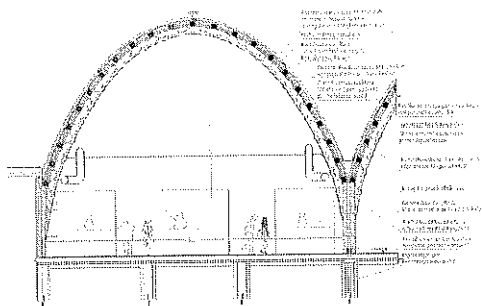


Fig. 8 - Sezione trasversale del mercato coperto di Novara. Proposta progettuale di rinforzo mediante la tecnica dell'Arco Armato

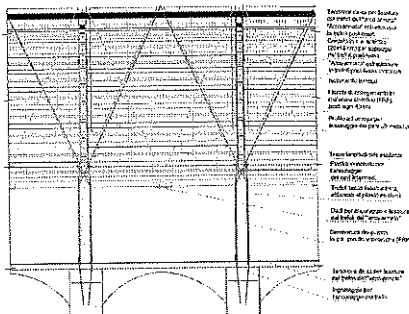


Fig. 9 - Sezione longitudinale del mercato coperto di Novara. Proposta progettuale del sistema di controventatura