Forma e costruzione nelle volte sottili in cemento armato
le geometrie rigate di Giorgio Baroni

Martina Russo

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI ROMA "LA SAPIENZA"
Dipartimento di Ingegneria Civile Edile e Ambientale

Dottorato di Ingegneria dell'Architettura e dell'Urbanistica
Curriculum di Ingegneria Edile-Architettura | XXXI ciclo

supervisore prof. Edoardo Currà
co-supervisore prof. Stefano Gabriele

Forma e costruzione nelle volte sottili in cemento armato:
le geometrie rigate di Giorgio Baroni

Martina Russo

supervisore prof. Edoardo Currà
co-supervisore prof. Stefano Gabriele

Settembre | 2019

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI ROMA "LA SAPIENZA"
Dipartimento di Ingegneria Civile Edile e Ambientale

Dottorato in Ingegneria dell'Architettura e dell'Urbanistica
Curriculum Ingegneria Edile-Architettura | XXXI ciclo

"Le cose che voi cercate, Montag, sono su questa terra, ma il solo modo per cui l'uomo medio potrà vederne il novantanove per cento sarà un libro"

Ray Bradbury, *Fahrenheit 451*

INDICE

ABSTRACT 1

INTRODUZIONE 3

Tornare a riflettere sull'efficienza
Dal principio costruttivo alla forma architettonica
L'ottimizzazione del progetto nelle ricerche di ieri ed oggi
Una figura singolare: Giorgio Baroni
Metodologia, strumenti e svolgimento
Progettare tra forma e costruzione
Struttura della ricerca

CAPITOLO 1: un protagonista italiano del rapporto forma-costruzione
Giorgio Baroni, ingegnere progettista tra struttura e architettura

1.1. Contesto: accademia milanese e ricerche europee 10

1.1.1. La formazione e l'attività professionale con Mario Baroni

1.2. Italia: efficienza formale e costruttiva 13

1.2.1. La libera professione come strutturista degli architetti
1.2.2. Progettista di volte sottili rigate per l'industria

1.3. Stati Uniti d'America: ottimizzazione strutturale e nuovi materiali 24

1.3.1. Il trasferimento negli Stati Uniti e i primi brevetti
1.3.2. Roberts & Schaefer
1.3.3. Reynolds Metal Company
1.3.4. Kaiser Steel Corporation
1.3.5. International Nickel Company

1.4. Conclusioni: l'ingegnere costruttore 44

Bibliografia 55

CAPITOLO 2: verso la riscoperta di un patrimonio italiano
I progetti italiani di Giorgio Baroni con volte sottile in cemento armato

2.1. Volte sottili in cemento armato: geometrie, protagonisti e applicazioni 58

2.1.1. Cupole e volte cilindriche nei brevetti Zeiss-Dywidag

2.1.2. Conoidi nei progetti di Eugene Freyssinet e Bernard Laffaille

2.1.3. Paraboloidi iperbolici negli studi e applicazioni di Fernand Aimond

2.1.4. Dalla massima diffusione alla decadenza

2.2. Le coperture con falde a paraboloide iperbolico 65

2.2.1. Il teatro per il dopolavoro per la Fonderia di acciaio Vanzetti (Mi) 68

2.2.1.1. Inquadramento storico dello stabilimento di Via Nervesa

2.2.1.2. La costruzione e il collaudo del teatro del dopolavoro

2.2.1.3. Descrizione architettonica e costruttiva del teatro del dopolavoro

2.2.2. Reparto taglio e magazzino ferri dell'Alfa Romeo al Portello (Mi) 78

2.2.2.1. Inquadramento storico dello stabilimento industriale del Portello

2.2.2.2. Storia, costruzione e interventi del magazzino ferri

2.2.2.3. Descrizione architettonica e costruttiva del magazzino ferri

2.2.3. Magazzino Soc. An. Canapificio a Tresigallo (Fe) 90

2.2.3.1. Inquadramento storico del contesto urbano e industriale di Tresigallo

2.2.3.2. L'industria a Tresigallo

2.2.3.3. Descrizione architettonica e costruttiva del magazzino per la Soc. An. Canapificio

2.3. Le coperture con falde a conoide 100

2.3.1. Officine Generali Prenestina dell'ATAG a Roma 100

2.3.1.1. La storia della progettazione e dell'affidamento lavori delle Officine Centrali

2.3.1.2. Interventi successivi alla costruzione

2.3.1.3. Descrizione architettonica e costruttiva delle Officine Centrali

2.3. Conclusioni 108

Bibliografia 114

CAPITOLO 3: il rapporto tra principi costruttivi e forma architettonica
Ottimizzazione strutturale nel metodo progettuale di Giorgio Baroni

3.1. Analisi e progetto dei gusci sottili: evoluzione dello studio meccanico e influenza sulla costruzione delle coperture con falde ad HP 120

3.1.1. L'evoluzione delle teorie per l'analisi delle strutture a guscio sottile 121

3.1.1.1. La teoria della membrana e gli approcci analitici

3.1.1.2. Verso la teoria flessionale e gli approcci numerici

3.1.2. Evoluzione delle realizzazioni degli HP a timpano 130

3.1.2.1. Il progresso attraverso progetti e progettisti: Baroni, Candela e Tedesko

3.1.2.2. Il caso del crollo in Virginia e il fervore di ricerca

3.1.3. Verso la consapevolezza: il comportamento dell'HP a timpano in Schnobrich e Shaaban-Ketchum 138

3.1.3.1. Schnobrich 1972

3.1.3.2. Shaaban e Ketchum 1976

3.1.3.3. Considerazioni globali sulle analisi fem degli HP a timpano: i motivi del crollo

3.2. Il comportamento strutturale degli HP a timpano di Giorgio Baroni: una sperimentazione per comparazione 148

3.2.1. La validazione del modello agli elementi finiti e dei suoi risultati 148

3.2.2. Test 1: confronto tra gli HP a timpano di Baroni, Candela, Tedesko e Hanson 154

3.2.2.1. Scopo e metodologia

3.2.2.2. Presentazione dei risultati

3.2.2.3. Discussione dei risultati

3.2.2.4. Conclusioni

3.2.3. Test 2: la freccia ottimale 165

3.2.3.1. Scopo e metodologia

3.2.3.2. Presentazione dei risultati

3.2.3.3. Discussione dei risultati

3.2.3.4. Conclusioni

3.2.4. L'analisi dell'HP per la Fonderia Vanzetti e discussione complessiva dei risultati 171

3.2.4.1. Scopo e metodologia

3.2.4.2. Presentazione dei risultati

3.2.4.3. Discussione dei risultati

3.2.4.4. Conclusioni: il comportamento dell'HP per la fonderia Vanzetti

Appendice: modellazione e caratterizzazione 180

3.3. Conclusioni 181

Bibliografia 186

ARCHIVI 188

BREVETTI 190

BIBLIOGRAFIA GENERALE 194

In copertina: Tresigallo, copertura per il magazzino della Soc. An. Canapificio. ACS.

Per le immagini, i disegni e i grafici ove non indicata esplicitamente la fonte si intendono elaborazioni originali dall'autrice.

ABSTRACT

La ricerca ha lo scopo di inquadrare il contributo progettuale dell'ingegnere italiano Giorgio Baroni (1907-1968) nell'avvento e nella successiva diffusione dei primi sistemi costruttivi per volte sottili in cemento armato, attraverso la ricostruzione del suo profilo biografico, la documentazione e descrizione degli aspetti geometrici, costruttivi e architettonici delle sue principali opere e l'interpretazione del loro comportamento strutturale in relazione alle soluzioni costruttive proposte.

Giorgio Baroni fu il primo in Italia a depositare due brevetti per sistemi di coperture composte da paraboloidi iperbolici (HP o hypar), negli anni 1936 e 1949. Applicandoli progettò principalmente edifici per uso industriale, tra i quali il reparto taglio e magazzino ferro dell'Alfa Romeo al Portello (Mi) e il magazzino della Società Anonima Canapificio a Tresigallo (Fe). I brevetti dell'ing. Baroni, sviluppati nel periodo della politica autarchica fascista, propongono un sistema costruttivo che sfrutti le caratteristiche geometriche del paraboloide iperbolico al fine di minimizzare l'uso dei materiali e ottenere riduzione dei costi e semplicità realizzativa. Le peculiarità di questa forma, una superficie rigata a doppia curvatura inversa, consentono infatti l'ottimizzazione dell'andamento degli sforzi e la possibilità di disporre con semplicità casseforme e armature, seguendo la direzione della generatrice della geometria.

La ricerca si colloca nel campo degli studi che si occupano della relazione tra innovazioni tecnologiche, strumenti progettuali e procedimenti costruttivi. Come uno degli aspetti centrali degli studi in architettura tecnica, ci si avvale da un lato del metodo delle ricerche di storia delle costruzioni, finalizzando la ricerca verso l'individuazione di documentazione originale al fine di comprendere la genesi del progetto, dall'altro si esplora l'uso di strumenti di prefigurazione strutturale e geometrica dell'epoca accanto alle potenzialità della modellazione corrente, per identificare e supportare le relazioni tra forma e costruzione individuate da Baroni e metterle a disposizione per future esperienze progettuali.

Lo studio contribuisce sia ad arricchire il quadro conoscitivo sui protagonisti della storia dell'ingegneria strutturale italiana e sui pionieri dei gusci sottili, sia ad approfondire la consapevolezza su quali sistemi costruttivi siano stati sviluppati alla fine del periodo pionieristico del cemento armato.

Al fine di indagare il rapporto tra progettazione e realizzazione, malgrado l'estesa carenza di materiale archivistico originale relativo ai progetti in esame, ci si è avvalsi di metodologie proprie dell'ambito della meccanica strutturale. Sulla tipologia scelta come caso studio, rappresentativa del primo brevetto depositato da Baroni, si è svolta un'indagine sperimentale attraverso la definizione di un modello digitale, la sua validazione e l'analisi strutturale basata sul calcolo agli elementi finiti, al fine di interpretarne il comportamento e confrontare criticamente i dati forniti dalle analisi con le prestazioni attese dalle soluzioni costruttive originali introdotte dall'ingegnere.

INTRODUZIONE

Tornare a riflettere sull'efficienza

Nel tempo della riflessione sull'uso responsabile delle risorse naturali l'edilizia e l'architettura hanno un ruolo specifico e rappresentano un'opportunità. All'obbligo etico, supportato da quello legislativo, che incentiva progetti sostenibili nella fase di costruzione e di gestione si affianca una nuova possibilità di riflettere sul fondamento, o *fondazione*, dell'architettura.

Incoraggiati dalla necessità e affascinati dalle possibilità, progettisti e ricercatori sono negli ultimi anni tornati a considerare il criterio dell'ottimizzazione come base metodologia di approccio ad un progetto sostenibile. In questo contesto le figure sempre più distinte dell'architetto e dell'ingegnere tornano a sovrapporsi nell'idea del *progettista integrale* guidato nelle scelte formali dai principi costruttivi. Un progetto concepito a partire da queste basi metodologiche prevede nella fase della genesi della forma architettonica anche quella della definizione strutturale. Esito di questo processo progettuale basato sull'arte del costruire è un progetto efficiente, perché risultato di un processo integrato, nel quale le parti e il tutto rispondono funzionalmente, staticamente e tecnicamente ad un unico concetto.

Dal principio costruttivo alla forma architettonica

In questo contesto i gusci sottili, discendenti del principio dell'involucro globale, derivano la loro forma architettonica direttamente dall'andamento delle forze. Nelle loro geometrie è insita la loro stessa resistenza strutturale, nelle loro curvature la convenienza costruttiva e funzionale. Sebbene diversi siano stati i procedimenti costruttivi sperimentati nell'ambito di questa tipologia, l'uso del cemento armato è stato tra i materiali protagonisti. La sua essenza di pietra artificiale fluida ne fece il materiale più adatto per concepire involucri tridimensionali continui, capaci di coprire grandi luci traendo vantaggio dalla resistenza per forma. Per raggiungere massime estensioni occorre la giusta forma, il minimo spessore e la massima leggerezza: una costruzione ottimizzata.

La forma dei gusci sottili in cemento armato, che sia generata con un processo di ricerca della forma strutturale ottimale (*form-finding*) o che derivi da geometrie quadriche, è concepita in accordo con i carichi a cui è soggetta, con la superficie da coprire, con la luce da superare.

Il generale ritorno di intesse per questi sistemi costruttivi da un lato è frutto delle nuove possibilità tecnologiche computazionali e tecniche ingegneristiche, dall'altro non si può negare sia esito di un pensiero antico che trova oggi nuove ragioni di esistenza.

L'ottimizzazione del progetto nelle ricerche di ieri ed oggi

Gli studi recenti in letteratura in questo campo sono ascrivibili a diversi ambiti: storico-costruttivo, computazionale, tecnologico e progettuale. Molte le pubblicazioni e i gruppi di ricerca attivi.

Tra questi alcuni si pongono l'obiettivo della ricerca della forma rispetto all'esigenza meccanica, come il *Block Research Group* (coordinato da Philippe Block, ETH Zurigo, Svizzera) e lo *Structural Form Finding Lab* (coordinato da Sigrid Adriaenssens, Princeton University, New Jersey, USA).

Altri si dedicano ad approfondire metodi di progettazione basati sui principi della statica grafica e sulla conoscenza della costruzione come il *Structures & Technologies* (coordinato da Denis Zastavni, Université catholique de Louvain, Belgio).

Infine vi sono i gruppi di ricerca rivolti ad inquadrare il lavoro degli ingegneri pionieri nel settore attraverso ricerche storico-costruttive connesse agli esiti architettonici, tra i quali si possono citare Bernard Espion (Université Libre de Bruxelles, Belgio), Roland May e Werner Lorenz (BTU Università di Cottbus, Germania), Tullia Iori e Sergio Poretti (Università di Tor Vergata, Roma).

In particolare, l'impulso profuso negli ultimi anni in questo settore ha portato a sviluppare un sempre crescente interesse verso i primi sperimentatori dei gusci sottili, che operarono prevalentemente sulla scena europea fino alla II guerra mondiale, con l'obiettivo di inquadrare sia il contributo dei singoli progettisti sia come la tecnica e le soluzioni costruttive abbiano influenzato l'esito formale. In questo contesto, si segnala la recente *Thematic Session* dedicata alle "Early thin concrete shells - players, impulses, and effects", *chair* Roland May (BTU), nel contesto del 6th International Congress on Construction History, tenutosi nel luglio del 2018 a Bruxelles.

Una figura singolare: Giorgio Baroni

Questo è pertanto il campo nel quale la presente ricerca si colloca, con l'obbiettivo di contribuire alla riflessione sulla genesi della forma architettonica in relazione all'ottenimento di distinte finalità strutturali e costruttive.

Nello specifico l'interesse verso lo studio di progetti esemplari nel campo, ma inediti, che potessero contribuire alla ricostruzione del quadro generale dei progettisti e allo stesso tempo fornire un'ulteriore riflessione sul progetto, ha condotto ad individuare nella figura ancora in gran parte sconosciuta di Giorgio Baroni, ingegnere milanese attivo in Italia tra gli anni trenta e cinquanta del secolo scorso, un caso studio di rilevo ancora inesplorato.

Attualmente tratti dell'operato di Baroni emergono dalle più ampie ricerche di Tullia Iori, nell'ambito del progetto Sixxi (Twentieth Century Structural Engineering: the Italian Contribution), e dalle pubblicazioni di Claudio Greco (Università di Tor Vergata, Roma). Questi studi hanno individuato i brevetti di Baroni e messo in luce come la concezione costruttiva delle coperture dell'ingegnere fossero in linea con le richieste della

politica autarchica Italiana. Esiti delle ricerche hanno presentato il progetto del magazzino per lo stoccaggio della canapa di Tresigallo, descrivendone geometria e costruzione.

Un primo tentativo di tracciare nella sua globalità la vita dell'ingegnere italiano è stato condotto invece dall'ing. Fausto Giovannardi, ricercatore indipendente e libero professionista, che con l'aiuto della figlia di Giorgio, Luisa W. Baroni, ha potuto fornire un primo quadro biografico degli eventi principali della vita di Giorgio e le relazioni con diverse opere.

Metodologia, strumenti e svolgimento

A tali fini la ricerca si avvale di metodologie e strumenti propri da un lato dell'indagine storico-costruttiva dall'altro di quelli per la modellazione e prefigurazione progettuale, declinati rispetto agli obiettivi specifici individuati.

Per l'inquadramento del tema si è proceduto dapprima alla ricognizione in letteratura delle tecniche costruttive associate ai gusci sottili in cemento armato, dei principali progettisti e dell'evoluzione della tecnica del cemento armato in Italia, in particolare nella prima metà del XX secolo, anche attraverso l'individuazione dei principali manuali costruttivi del tempo, tra cui l'indispensabile "Il cemento armato nelle costruzioni civili e industriali" di Luigi Santarella.

Per una prima indagine sulla figura e i brevetti di Giorgio Baroni, ma anche per la ricostruzione del contesto storico italiano nel quale ha operato, si sono consultate le principali riviste di settore attive tra gli anni venti e cinquanta del Novecento, tra cui *Il cemento armato*, *Il monitore Tecnico*, *L'industria italiana del cemento*, il *Giornale del genio civile*, delle pubblicazioni periodiche delle associazioni di categoria nazionali ed internazionali, tra le quali gli annuari del *Politecnico di Milano*, l'*American Concrete Institute* e l'*International Association for Shell and Spatial Structures,* ma anche degli atti dei congressi attivi come il *Concrete shell roof construction* e il *Concrete thin shell* dell'ACI (American Civil Engineering).

Per ricerche dirette si sono individuati una serie di archivi nazionali, internazionali, privati, pubblici e d'impresa da consultare, al fine di cercare e raccogliere documentazione sulla biografia dell'ingegnere e sulle specifiche architettoniche e tecniche dei suoi progetti. Tra questi si possono citare, senza voler essere esaustivi, l'Archivio Centrale dello Stato, l'Archivio Storico Capitolino, il Centro Documentazione dell'Alfa Romeo di Milano e l'Anton Tedesko Collection a Princeton.

A completare il quadro relativo agli aspetti biografici dell'ingegnere, in assenza di un archivio personale conservato, si è provveduto a rintracciare la discendenza e a svolgere interviste specifiche. In tal senso la disponibilità e la dedizione della figlia Luisa Wohlgroth Baroni è stata preziosa per colmare lacune, controllare incoerenze e fornire materiale fotografico inedito.

Quando possibile, per l'approfondimento costruttivo sulle opere ancora esistenti si è svolta uno studio diretta che ha previsto l'uso di strumentazioni di indagine non distruttiva dei materiali, con pacometro e sclerometro, e della geometria, attraverso il

rilievo metrico diretto e indiretto con tecnologia laser scanner terrestre di tipo Faro Focus 3D x 330, che ha permesso di ricostruire con grande affidabilità le complesse superfici.

La riflessione sul rapporto forma-costruzione ha previsto anche una fase del percorso di ricerca che indagasse le metodologie oggi disponibili per la modellazione e la prefigurazione progettuale e strutturale. In questa parte i risultati delle indagini sul primo brevetto di Giorgio Baroni e sui progetti costruiti con questo sistema hanno condotto ad una comparazione delle specifiche soluzioni costruttive proposte dall'ingegnere e dei suoi esiti architettonici con i risultati dell'analisi strutturale condotta su un modello digitale rappresentativo del suo primo progetto (dopolavoro Vanzetti), validato confrontando i dati ottenuti dal software con quelli forniti dalla letteratura.

Progettare tra forma e costruzione

L'esito della presenta ricerca è dunque un contributo nell'ambito del percorso teorico e progettuale che vede la ricerca della forma architettonica legata alla definizione dei principi costruttivi.

La ricerca ricostruisce il profilo biografico di Giorgio Baroni, descrive l'architettura e la costruzione dei suoi progetti, ripercorrendone la genesi progettuale, l'applicazione dei brevetti, le specifiche della tecnica e l'individuazione dei vantaggi statici e funzionali del suo sistema e, in ultimo, discute come le soluzioni da lui presentate risultino globalmente vantaggiose, volte alla rapidità costruttiva, all'efficienza meccanica e alla leggerezza del sistema.

Struttura della ricerca

La struttura della tesi segue perciò questa configurazione dei risultati, ciascuno propedeutico a contestualizzare il successivo e a fornire i dati necessari per il suo sviluppo.

Il primo capitolo è dedicato a delineare un aggiornato inquadramento monografico su Giorgio Baroni, dal quale emerge in particolar modo l'approccio metodologico all'ottimizzazione strutturale e formale adottato dal progettista-ricercatore prima, nell'ambito dei gusci sottili in cemento armato in Europa fino alla II guerra mondiale, poi, nel campo delle strutture metalliche leggere negli Stati Uniti dopo il 1950, guidato sempre dal principio dalla resistenza per forma. In particolare si è cercato di tracciare le connessioni con le figure impegnate nel progetto e le imprese del tempo, individuare i percorsi e ricorrenze metodologiche nei suoi lavori e il valore specifico delle sue sperimentazioni costruttive. Nel continuo intreccio tra architettura e struttura, la ricerca nel campo della storia della costruzione permette di inquadrare le occasioni di trasferimento nel campo dell'architettura di conoscenze e tecnologie provenienti dalle scienze pure o da altre scienze applicate.

Il secondo capitolo illustra le specificità dei singoli progetti, ripercorrendo per ciascuno il contesto, prevalentemente industriale, le esigenze da quale sono scaturiti, le vicende della loro progettazione, l'approccio al calcolo, i dettagli architettonici e costruttivi e le eventuali modifiche subite negli anni. Condividendo le considerazioni di

Sergio Poretti in *Modernismi italiani*, questa parte vuole porsi come occasione di incontro ravvicinato con le opere, provando a scomporle e decifrarle con un'operazione simile a quella dell'analisi di un testo. Nell'ottica in cui il protagonista della storia delle costruzioni è l'opera, lo studio dei peculiari cantieri e delle distinte soluzioni costruttive ci avvicina a capirne i molteplici aspetti che ne definiscono l'identità.

Il terzo capitolo, che ha visto la supervisione anche del prof. Stefano Gabriele dell'Università di Roma Tre, indaga e mette in evidenza come le soluzioni di Baroni non fossero solo peculiari rispetto ai progettisti coevi che si occuparono delle medesime forme strutturali, ma anche particolarmente efficienti, riuscendo ad ottenere la massima ottimizzazione del materiale usato e a disegnare la geometria più efficace per gli elementi del sistema edilizio.

Quest'ultimo capitolo della ricerca costituisce una sperimentazione volta a valutare se è possibile e vantaggioso riappropriarsi di alcuni *saperi* progettuali propri di queste metodologie, al fine di verificare la possibilità di impiegarli anche oggi. Questa parte si articola in due sezioni. La prima comprende un esame dell'evoluzione della letteratura sul tema dello studio meccanico delle volte sottili, in particolare in forma di paraboloide iperbolico a timpano, prosegue con la descrizione di alcune opere chiave realizzata dagli anni trenta agli anni sessanta e termina con la presentazione e discussione di due contributi fondamentali alla base della comprensione del comportamento del HP a timpano. Nella seconda sezione sono stati predisposti alcuni studi per i quali ci si è avvalsi della modellazione strutturale e analisi agli elementi finiti.

Dalla lettura complessiva degli esiti presenti nel terzo capitolo si possono compiere riflessioni qualitative di diverso ordine, che appartengono al campo della progettazione, dell'architettura tecnica e della storia delle costruzioni. Tra queste vi sono considerazioni sulle ragioni delle scelte costruttive di Baroni, sulle prestazioni globali delle sue coperture, sul comportamento meccanico atteso in questo tipo di strutture rispetto a proporzioni geometriche complessive e degli elementi di bordo e infine su ulteriori accortezze da avere in fase progettuale rispetto sia alle vulnerabilità peculiari, sia all'opportunità di fare della fase pre-progettuale il momento della ricerca dell'ottimizzazione formale-meccanica.