



SAPIENZA
UNIVERSITÀ DI ROMA

Tesi di Dottorato: **Piermaria Caponi**

Università degli Studi di Roma “La Sapienza”
Piazzale Aldo Moro 5 - 00185 Roma, Italia
Facoltà di Ingegneria Civile e Industriale
Dipartimento Ingegneria Civile, Edile e Ambientale
Via Eudossiana 18 – 00184 Roma, Italia

Dottorato di ricerca 33° ciclo A.A. 2017/2018
Corso di Dottorato in: Ingegneria Edile Architettura
XXXIII ciclo
2017. 2018. 2019. 2020



Luglio 2021

Tutti i diritti riservati

*...a mio fratello e sorella,
a coloro che vivono ispirati dalle necessità.*

Scuola di Dottorato in Ingegneria Civile e Architettura

Dottorato in Ingegnerie dell'Architettura e dell'Urbanistica

Dipartimento di Ingegneria Civile Edile Ambientale



Il Dottorato in Ingegneria dell'Architettura e dell'Urbanistica si pone l'obiettivo di formare studiosi capaci di operare nel campo dell'architettura e dell'urbanistica con una visione multidisciplinare ed interdisciplinare dei problemi del settore e con la padronanza di metodologie e tecniche appropriate.

Oggi, infatti, nel panorama nazionale è fortemente avvertita l'esigenza di ricercatori specialisti, ma non settoriali, capaci di interagire con le diverse componenti del mondo produttivo, amministrativo e culturale per contribuire, mediante l'acquisita formazione alla multidisciplinarietà, al governo della complessità sia della singola opera architettonica sia del contesto urbano nel suo complesso.

The PhD program in "Engineering-based Architecture and Urban Planning" is aimed to train researchers through a high educational level to operate in the field of architecture and/or town planning by using a multidisciplinary and crossdisciplinary approach and appropriate methodologies and technologies.

Indeed, today, in the national scenario, a strong demand is felt for specialized, but not sectoral, researchers capable of interacting with the various components of the productive, administrative and cultural world in order to contribute, through their multidisciplinary training, to govern the complexity of both architectural work and urban design as a whole.



Coordinatore - Coordinator

MARIA ARGENTI - Professore Ordinario, Università degli studi di Roma "La Sapienza"

Resp. amministrativo - Roberta Cannata

Telefono - 0644585187; Email - roberta.cannata@uniroma1.it

Sede amministrativa - Dipartimento di Ingegneria Civile Edile e Ambientale

Componenti del Collegio - Teaching Staff

ILARIA AGOSTINI - Ricercatore Universitario, Alma Mater Studiorum - Università di Bologna

GIOVANNI ATTILI - Professore Associato, Università degli studi di Roma, La Sapienza

ANGELA BARBANENTE - Professore Ordinario, Politecnico di Bari

CARLO CELLAMARE - Professore Associato, Università degli studi di Roma, La Sapienza

EDOARDO CURRÀ - Professore Associato, Università degli studi di Roma, La Sapienza

FABIO CUTRONI - Ricercatore Universitario, Università degli studi di Roma, La Sapienza

LIDIA DECANDIA - Professore Associato, Alghero (Sassari)

FERDINANDO FAVA - Professore Associato, Università degli Studi di Padova

TIZIANA FERRANTE - Professore Ordinario, Università degli studi di Roma, La Sapienza

MARCO FERRERO - Professore Associato, Università degli studi di Roma, La Sapienza

ANTONIO FIORAVANTI - Professore Associato, Università degli studi di Roma, La Sapienza

EMILIA MARIA GARDA - Professore Associato, Politecnico di Torino

FRANCESCA GIOFRÈ - Professore Associato, Università degli studi di Roma, La Sapienza

ANNA MARIA GIOVENALE - Professore Ordinario, Università degli studi di Roma, La Sapienza

RUGGERO LENCI - Professore Associato, Università degli studi di Roma, La Sapienza

ANNA BRUNA MENGHINI - Professore Associato, Università degli studi di Roma, La Sapienza

GABRIELE NOVEMBRI - Ricercatore Universitario, Università degli studi di Roma, La Sapienza

MAURA PERCOCO - Ricercatore Universitario, Università degli studi di Roma, La Sapienza

BARBARA PIZZO - Ricercatore Universitario, Università degli studi di Roma, La Sapienza

MARINA PUGNALETTO - Professore Associato, Università degli studi di Roma, La Sapienza

MICHELANGELO SAVINO - Professore Ordinario, Università degli studi di Padova

PIETRO VERENI - Professore Associato, Tor Vergata

TERESA VILLANI - Professore Associato, Università degli studi di Roma, La Sapienza

Personale non accademico, enti e personale docente di università straniere

CARLO CECERE

ROBERTO DE ANGELIS

MASSIMO ILARDI

PATRIZIA RADOCCCHIA FERRI - Professore Ordinario, Accademia di Belle Arti di Roma

ENZO SCANDURRA

TIZIANA VILLANI - Professore Ordinario, Università Paris 8

Forma ed equilibrio nell'Architettura computazionale

Un *framework* teorico per la ricerca morfologico-strutturale nella fase ideativa del progetto

Form and equilibrium for the computational architecture
Performance-based structural morphology framework



L'Autore consegue la prima laurea presso la *New York University (MS - Civil Engineering, NYU Tandon School of Engineering, Brooklyn Six Metro Tech Center, New York City, 2010* - vincitore di una borsa di studio ministeriale e sponsorizzato dal programma *H2CU - Honors Center of Italian Universities*). Guadagna il titolo di ingegnere e l'abilitazione professionale dopo aver ottenuto una seconda laurea all'Università degli Studi di Roma La Sapienza (MS - Ingegneria Edile e Architettura). Con la tesi di Master ha iniziato ad approfondire le problematiche tecniche e teoriche, relative alle morfologie strutturali non convenzionali, attraverso nuove tecnologie e metodi di *computational design*. Dal novembre 2017, data d'inizio del dottorato, sviluppa ulteriormente la sua ricerca sul rapporto che intercorre tra architettura e struttura sviluppando una metodologia dialettica per la progettazione.

La qualità dei risultati è stata riconosciuta a livello internazionale mediante la partecipazione alla conferenza IASS 2019: *FORM and FORCE, the International Association for Shell and Spatial Structures*. Si aggiunge che l'attività di ricerca è stata ampliata nelle competenze, durante il periodo di dottorato, attraverso corsi di formazione negli Stati Uniti; in particolare nei settori del *structural morphology design and mixed reality representation*.

The Author is a graduate of the *New York University (MS - Civil Engineering, NYU Tandon School of Engineering, Brooklyn Six Metro Tech Center, New York City, 2010)*, sponsored by *H2CU - Honors Center of Italian Universities*). He is graduate of the *University of Rome La Sapienza (MS - Building Engineering and Architecture)* and a licensed engineer in Italy. The Master thesis began to investigate the technical issues related to unconventional structural morphologies, technological innovation, and complex structures for architectural design. Since November 2017, starting date of his Doctorate, he has been developing further his research on this subject at the edge between Structural and Architecture design. Meanwhile, a dialectic methodology has been developed in order to adapt the morphologies' configuration to varying technical performances required: a performance-based framework. The quality of the achieved results has been recognized at an international level, leading his conference paper to be selected for IASS 2019 publication: *FORM and FORCE, the International Association for Shell and Spatial Structures*.



XXXIII ciclo

Settore scientifico – disciplinare a cui di riferisce il progetto - SSD: ICAR/14

Periodo di formazione del dottorato:

Nov 2017, 2018, 2019, 2020

Periodo di formazione internazionale:

Come previsto dal regolamento del Dottorato di Ricerca

Nov. 2018, Ago.2020 (18 mesi)

Università degli studi di Roma La Sapienza

Advisor: Ricercatore Universitario, Fabio Cutroni

Dipartimento di Ingegneria Civile Edile e Ambientale



University of Miami Department of CAE

Advisor: Assist. Prof. L. Rhode Barbarigos,

Dept. of Civil, Architectural & Environmental Engineering

Dept. of Ocean Sciences (RSMAS) & School of Architecture

*Abstract***Forma ed equilibrio nell'architettura computazionale**

Un *framework* teorico per la ricerca morfologico-strutturale nella fase ideativa del progetto

key word:

Conceptual Design, Computational Design, Generative Algorithm, Theoretical framework & workflow, Structural Morphology, Tensegrity Structural System, Cells morphogenesis, Environmental analysis, Dialectic Form Finding, Urban Tensegrity Roof Project;

La filosofia del nostro tempo è il fondamento essenziale della scienza e della tecnica (che dunque ignorano il senso autentico del loro rapporto con la filosofia), perché mostra che non può esistere alcuna dimensione immutabile, cioè alcun limite inoltre passabile e dunque rende possibile la crescita indefinita della capacità di produrre scopi

E. SEVERINO, Destino della tecnica, Rizzoli, Milano (1998) p. 187

La ricerca propone un'indagine, mediante strategie di *computational design*, per la progettazione di una copertura di grande luce.

Stabilito un orizzonte culturale di riferimento di natura scientifico-filosofica, qui argomentato, è definito il concetto di *Technische wollen* (*Technik-wollen, volontà di tecnica*) come primo risultato della ricerca.

Esso costituisce lo scenario di riferimento per determinare un approccio teorico in ragione del quale, successivamente, stabilire una metodologia progettuale: un processo tecno-creativo.

Il *concept* architettonico, risultato grafico finale di questa dissertazione, rappresenta un esempio sperimentale di questa sintesi. Gli algoritmi generativi, propri della modellazione parametrica che, unitamente all'analisi grafica della statica da essi integrati, ossia con lo studio simultaneo degli equilibri delle forze, conferiscono una coerenza tra forma e struttura in una fase ancora creativa del progetto: *early stage of design*.

Pertanto, è stabilito un *framework* per la ricerca di una morfologia strutturale che consente un'indagine sistemica e iterativa di geometrie complesse. Queste, generando un dominio di soluzioni formali, in equilibrio, sono validate secondo un approccio dialettico alla progettazione: *dialectic form finding*. Altresì è costituito un *workflow* digitale con il fine di gestire il *design* che, in modo analogo ai meccanismi della morfogenesi naturale e, dunque mediante l'aggregazione di "cellule" strutturali, determina l'immagine formale di un sistema tensegrale.

Tale metodologia computazionale, in forza di considerazioni strutturali, stabilisce così un criterio *bio-inspired* per la progettazione.

Considerando che nella fase concettuale di un progetto si assumono le decisioni che avranno un peso determinante nella risoluzione positiva o negativa dello stesso, di conseguenza, scindendo il momento del *concept* architettonico da quello relativo alla scelta dei sistemi strutturali, agendo cioè secondo tradizionali metodi di *post-engineering*, non sempre si è in grado di risolvere le criticità emerse e ormai consolidate durante l'iter progettuale; pertanto, la ricerca sviluppa un metodo generale (*an-*

te-engineering) che, attraverso modellazioni parametriche, determina un processo di ingegnerizzazione, fornendo, così, le possibili alternative formali che rendono tecnicamente ed economicamente più efficaci le successive ottimizzazioni; *ex-ante* Vs *post-ante*.

Tali modellazioni consentono di ponderare simultaneamente la molteplicità degli aspetti progettuali e di valutarne le alternative geometriche più efficienti, presentando così un duplice potenziale: da un lato facilitare il compito del progettista nella scelta delle forme stesse e dall'altro mediare la ricerca formale ed espressiva. L'implementazione delle simulazioni, di cui gli algoritmi grafici ne costituiscono lo strumento operativo, rappresentano un'innovazione metodologica.

AAD, Algorithms Aid Design + **PSS**, particle spring system + **DFD**, dialectic form finding

Questa parametrizzazione del progetto si basa su di un processo tecnico-creativo appositamente ideato; una logica computazionale che esige una forte integrazione e compartecipazione multidisciplinare già nella fase ideativa.

Indice della Ricerca

INTRODUZIONE:

La Ricerca Teorica e Operativa

Capitolo 1 – Introduzione: *la Ricerca teorica e operativa*

- Organizzazione e progressione del lavoro di tesi **15**
Premessa; struttura della ricerca;
- Deduzioni e motivazioni della ricerca, il campo d'interesse
In Riff. al Capitolo 2 **20**
Premessa; motivazioni e linee guida della ricerca; ambito della ricerca; dichiarazione della problematica: *problem statement*; domande formalizzate: *formalized questions*;
- Stato dell'arte: letteratura tecno-scientifica:
i metodi computazionali per il design strutturale **29**
Premessa; letteratura tecno-scientifica: *post & ante engineering approach*
- Obiettivi generali e specifici della ricerca **40**
Premessa; obiettivi generali della ricerca; rilevanza tecno-scientifica;
- Metodologia & impostazione del problema scientifico **42**
Premessa; struttura e metodi implementati – pacchetti lavoro;

PARTE I:

Forma e Volontà

Capitolo 2 – L'orizzonte teorico

- Prefazione: pensare la realtà per comprendere l'architettura **59**
L'astrazione come promotore dei significati, la necessità di un pensiero radicale;
- Una questione teorica **63**
Téchne, Platone, Eraclito; la tecnica come essenza;
- La tecnica moderna e la "qualità" del pensiero architettonico:
"eterogenesi dei fini"? **68**
Eterogenesi dei fini; il pensiero tecnoscientifico; tratti del pensiero di: *M. Heidegger, W. K. Heisenberg*;

- **La forma in “divenire”** **78**
Sistemi complessi; variabilità differenziale: *Bernhard Riemann*;
molteplicità e divenire: *Gilles Deleuze*; algoritmi generativi; morfogenesi computazionale;
- **Une esthétique «outré» entre l'art et la science** **93**
Estetica ed etica: *Josif Aleksandrovic Brodskij*;
conflitto come meccanica creativa: *avant-garde de l'abstraction lyrique*;
il mare dell'oggettività: *I. Calvino*; devenir d'un art autre et ouvertures sur un monde 'outré':
Michel Tapié de Céleyran; forme comme structure: *Luigi Moretti*; théorie des groups: Évariste
Galois; espressionismo frattale: *Jackson Pollock*;
- **Technischewollen: la ricerca della forma o dell'informe?** **110**
Volontà di forma (Kunstwollen, Einfühlung): *Alois Riegl*; I demoni: *Dostoevskij*;
nel nichilismo l'indirizzo ontologico dell'informe (Raumgestaltung):
Emanuele Severino, Renato Rizzi, Anthony Vidler;

Capitolo 3 – L'architettura parametrica di Luigi Moretti: nuova estetica oggettiva di relazioni geometriche

- **Abstract** **121**
- **Un metodo scientifico per il progetto d'architettura** **122**
Introduzione, riferimenti culturali: *forme comme structure*;
architettura parametrica: morfogenesi dialettica,
Conclusioni teoriche; **134**
- **Apparato tecnico – Rivisitazione del progetto lo stadio M: un modello di architettura parametrica** **136**
Introduzione; sviluppo dell'equazione parametrica; IRMOU: 12^a Triennale di Milano 1960;
Costruzione del modello dello stadio M; Rivisitazione geometrica dello stadio M: il progetto,
Conclusioni operative; **151**
- Appendix_S1

Capitolo 4 – L'architettura strutturale di Sergio Musmeci come una nuova sintesi scientifica

- **Abstract** **159**
- **Un'estetica per il paradigma progettuale scientifico** **160**
Introduzione: *forma come incognita*;
La qualità della forma strutturale nelle coperture di grande luce,
Conclusioni teoriche; **174**

- **Apparato tecnico - Rivisitazione del progetto i MGR: un modello d'architettura strutturale** **177**
Introduzione teorica al progetto: *SEFA e minimo strutturale*; Il processo della modellazione
CAD - L'equazione matematica: *Laplace equation function z - z= (x, y) by solving Δ_2z=0*, CMGR:
l'equazione della superficie Δ_2z=K; Il modello virtuale, la densità di *mesh* e simulazione delle
curvature: *form-finding*, validazione della forma: *finite elements method*,
Conclusioni operative; **186**
- Appendix_S2

PARTE II:

Risultati, Progetto e Conclusioni

Capitolo 5 – Un framework teorico per la ricerca morfologica strutturale: Tensegrity Structural System

- **Abstract** **205**
- **Un framework teorico per la progettazione ideativa** **206**
Introduzione & motivazioni;
- Premessa
- Dichiarazione della problematica: *problem statement*
- Domande formalizzate: *formalized questions*
- Obiettivi specifici

Metodologia & impostazione scientifica;
- Premessa
- Triplex cell
- Platonic Cell
- Morphogenesis
- Morphogenesis cell mechanism

Background, considerazioni e definizioni: *state of art*
- Rappresentazione geometrica digitale
- Ottimizzazione, *active form & passive form*
- Tipologie strutturali per grandi luci e materiali

Impostazione del framework teorico: *i concetti*
- Premessa
- Sistema
- Struttura
- Forma
- Materiale – Forze
- Il processo progettuale
- Il ruolo dell'equilibrio
- Il ruolo della Geometria

Step 1 - Structural morphology framework	222
- Un workflow per una effettiva implementazione della progettazione: <i>early stage of design</i>	229
Step 2 - Digital workflow for effective structural design implementation	229
- Premessa	
- Why?	
- How?	
- Python - Grasshopper	
Morphology studies: digital workflow for an effective design	234
- Un sistema strutturale tensegrale: <i>Ante engineering approach early stage of design</i>	237
Introduzione al sistema tensegrale: <i>state of art</i>	
- Premessa,	
- Fondamenti teorici: <i>tensegrity system</i>	
- Fondamenti teorici: <i>cell self-equilibrium</i>	
- Fondamenti teorici: <i>morphogenesis cell self-equilibrium</i>	
- Processo progettuale: <i>morphogenesis cell - form finding</i>	
Step 3 - Risultati preliminari, la morfogenesi cellulare:	248
- Applicazione teorica: <i>PSS – Triplex Cell mechanism validation</i>	
- Applicazione teorica: <i>PSS – Platonic Cell mechanism validation</i>	
- Morphogenesis design: <i>Beam (pattern) design morphogenesis</i>	
- Morphogenesis design: <i>Roof (pattern) design morphogenesis</i>	
- Morphogenesis design: <i>Beam (pattern) design morphogenesis, pressure curve(s)</i>	
- Morphogenesis design: <i>Three Arch Hinges design morphogenesis, pressure curve(s)</i>	
- Structural design Analysis: <i>PSS - Beam design mechanism validation</i>	
- Structural design Analysis: <i>PSS - Three Arch Hinges design mechanism validation</i>	

Technical apparatus – Dialectic process for multi-disciplinary data management: *Framework, Workflow, Simulations*

- Abstract	273
- Dialectic method: a theoretical framework for multi-disciplinary simulations	274
Introduction & motivation, background, consideration & assumptions, case study: problem statement, formalized questions, objectives, methodology, quantifiable environmental data-driven indicators, set of KPI(s): outdoor micro-climate - urban performance, indoor climate - building performance, outdoor micro-climate wind pressure performance;	

- Digital performance-based workflow for effective design implementation(s)	287
Morphology studies: Miami, Rome, Vegas microclimates environmental analysis, CFD assess;	
- Appendix_S3	

Project schemes – Il sistema tensegrale dialettico

- La morfologia tensegrale per la progettazione di una copertura urbana: <i>Dialectic form finding</i>	331
--	-----

Capitolo 6 – Conclusioni teoriche e operative

- Conclusioni	375
- Conclusioni e interpretazione della ricerca	376
Premessa, conclusione teorica: il <i>Technischewollen</i> come destino; una questione aperta per i futuri indirizzi di ricerca teorica: l'etica e l'espressione formale; conclusione operativa: risultati concettuali e limiti; rilevanza tecnoscientifica; rivisitazione delle domande di ricerca e chiarificazioni; prospettive e indirizzi futuri della ricerca; referenze	
- Referenze	394