

## DA LOUIS KAHN A RHINO VAULTS: LA MATRICE STRUTTURALE DELLE FORME ARCHITETTONICHE

### FROM LOUIS KAHN TO RHINO VAULTS: THE STRUCTURAL MATRIX OF ARCHITECTONIC FORMS

Michela Barosio\*, Ludovica Rolando\*\*

#### ABSTRACT

La mancata corrispondenza, tra i profili dei laureati e i profili richiesti dal mercato del lavoro, ha portato il Politecnico di Torino a sperimentare nuove forme di didattica del progetto capaci di formare professionisti con profili marcatamente interdisciplinari. Il Corso di Laurea magistrale Architettura Costruzione Città da forma a questo approccio interdisciplinare attraverso le unità di progetto che coordinano da due a quattro discipline intorno ad un unico progetto. L'esperienza dell'unità di progetto *Architecture and Structural Forms* viene qui proposta come esempio di questo approccio al progetto attraverso il riconoscimento della interrelazione tra tipo architettonico e tipo strutturale e l'uso coordinato di modelli fisici e modelli virtuali come strumento didattico.

The mismatch between the profiles of graduates and profiles required by the labour market has led the Politecnico di Torino to experiment with new forms of project's teaching able to train professionals with markedly interdisciplinary profiles. Master's Degree Programme *Architecture Construction City* gives shape to this interdisciplinary approach through the design units, which coordinate two to four disciplines around a single project. The experience of the Design Unit *Architecture and Structural Forms* is presented here as an example of this approach to the project through the recognition of the interrelation between the architectural and structural types and the coordinated use of physical and virtual models as a teaching tool.

#### KEYWORDS

interdisciplinarietà, didattica radicale, ridisegno concettuale, progettazione parametrica, concezione.

interdisciplinarity, radical teaching, conjectural redesign, parametric design, conception.

La mancata corrispondenza, che gli anglosassoni definiscono efficacemente 'mismatch', tra i profili dei laureati e i profili richiesti dal mercato del lavoro è da tempo uno dei temi al centro delle riflessioni sui programmi didattici dei percorsi di laurea non solo in architettura. Il Politecnico di Torino ha da oltre un decennio imperniato i programmi didattici in architettura, sia triennali che magistrali, su ateliers (o unità di progetto) interdisciplinari che, se da un lato cercano di rispondere alle richieste del mercato delle costruzioni, dall'altro mirano dichiaratamente a fornire agli studenti una preparazione culturale e tecnica ampia che permetta loro di ambire anche ad ambiti professionali non strettamente legati al mondo dell'architettura (Bates, 2016).

Nel caso specifico della sperimentazione didattica qui presentata, l'unità di progetto *Architecture and Structural Forms*<sup>1</sup> è incentrata su una forte interdisciplinarietà che, attraverso il ridisegno compositivo e strutturale dei riferimenti, con l'ausilio anche dell'uso integrato dei modelli fisici e virtuali come strumento di concezione, mira a sviluppare la consapevolezza dell'origine strutturale e costruttiva delle forme e degli spazi dell'Architettura. Consapevolezza che può contribuire a formare progettisti esperti nella progettazione strutturale, preparati ad avere un dialogo costruttivo con ingegneri e maestranze, ma anche a formare figure con un approccio fortemente transdisciplinare, nel senso più compiuto del termine (Bernstein, 2015), spiccatamente scientifico, capaci quindi di inserirsi nel mondo della produzione, non solo edilizia, ma anche manifatturiera e ambientale.

*Il Corso di Laurea magistrale Architettura Costruzione Città: un modello di didattica interdisciplinare* – Il Corso di Laurea magistrale Architettura Costruzione Città del Politecnico di Torino ha come obiettivo la formazione di una figura intellettuale e professionale di architetto (così come previsto dalla direttiva 36/2005/UE) che abbia un'alta preparazione culturale sia umanistica, sia scientifico-tecnica: una figura professionale 'generalista', che troverà nello sviluppo della propria carriera diversi modi di specializzarsi e differenziarsi. L'importanza di formare gli studenti alla transdisciplinarietà è ormai condivisa a livello internazionale, così come è condivisa l'idea che il laboratorio di progettazione sia l'esperienza didat-

tica ottimale per tale formazione (Morales, 2017). Al Politecnico di Torino la modalità didattica messa a punto per perseguire questo obiettivo è l'alternanza di unità di progetto multi ed interdisciplinari con corsi mono disciplinari. Le unità di progetto assumono pesi e tagli differenti a seconda dei semestri. Così se la composizione architettonica rappresenta la costante di tutte le unità di progetto ad essa si abbinano di volta in volta la tecnica delle costruzioni, la tecnologia dell'architettura, l'urbanistica o l'estimo. Nel caso poi delle unità di progetto che prevedono il contributo dell'urbanistica o dell'economia urbana, a queste discipline vengono affiancate anche altri due ulteriori contributi, scelti in funzione degli specifici temi di progetto, tra i quali figurano la sociologia dell'informazione, la sociologia del territorio e dell'ambiente, la geografia politica ed economica, l'economia urbana, la fisica tecnica e ambientale, la progettazione del paesaggio, la tecnologia dell'architettura e la storia dell'architettura.

L'offerta formativa che viene così a configurarsi presenta allo studente una forte interazione tra le diverse discipline che ragionano intorno a un tema comune, con un programma unitario e producono proposte progettuali in cui si integrano punti di vista e metodi di lavoro di ognuna delle discipline coinvolte, allenando così gli studenti ad un vero e proprio approccio interdisciplinare. In questo senso alcuni contributi potranno essere maggiormente basati su lezioni frontali, altri su esercitazioni in aula o fuori, ma tutti i contributi interverranno nella discussione e nella soluzione di progetto elaborata dagli studenti talvolta in gruppo, talvolta singolarmente. L'interdisciplinarietà è ancora rafforzata da due momenti di discussione collettiva in cui tutte le unità di progetto attive nel semestre espongono e discutono, insieme ad ospiti esterni, i risultati intermedi del proprio lavoro. L'organizzazione di un ciclo di conferenze tematizzate, tenute da relatori di provenienze geografiche e culturali anche molto lontane chiamati a portare il loro punto di vista sul progetto, sottolinea ulteriormente la varietà di prospettive proposte.

In questo quadro complessivo, l'unità di progetto 'Architecture and Structural Forms', erogata in lingua inglese, coniuga gli insegnamenti della composizione architettonica e dell'ingegneria strutturale. L'interazione tra le due discipline, che hanno un peso quasi paritario all'interno dell'u-

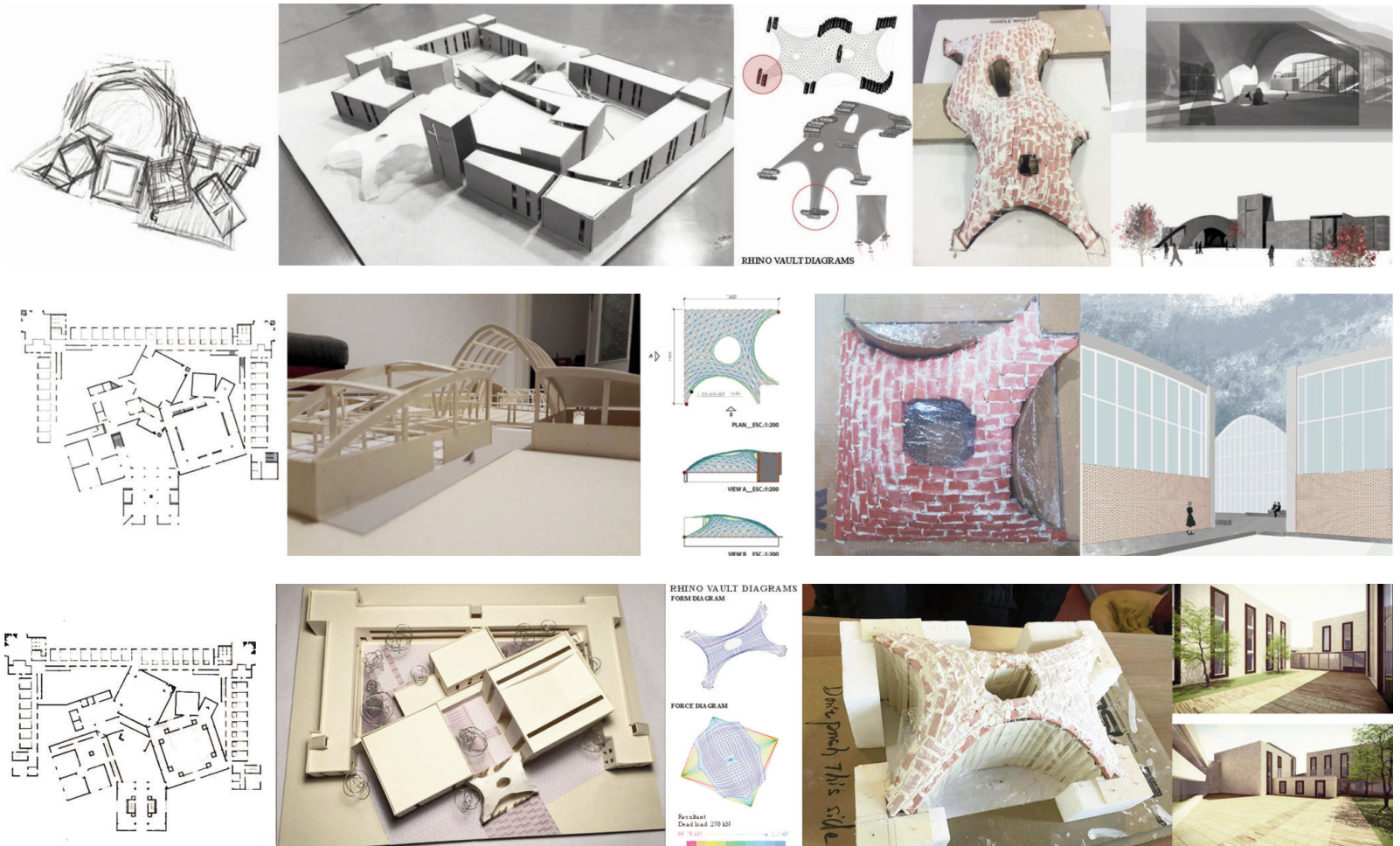


Fig. 1-3 - Work phases in the Design Unit Architecture and Structural Forms: 1) the original project by Louis Kahn; 2) physical model of the students' project proposal; 3) virtual model for verification and remodelling of the project proposal; 4) physical model of the masonry vault as a verification of construction techniques; 5) virtual model of the final architectural proposal (students: M. Di Chiara and V. Attieh; J. Da Costa Real and A. Herrera; H. Liu and G. Piccitto).

nità di progetto e che sviluppano il loro contributo parallelamente con revisioni collettive frequenti, ben rappresenta l'efficacia dell'approccio multidisciplinare che permette agli studenti di comprendere a fondo le origini strutturali della forma architettonica e al tempo stesso di padroneggiare tecniche di verifica strutturale grazie alle quali potranno, in un futuro professionale, sostenere con competenza le proprie istanze progettuali.

*Architecture and Structural Forms: dal ridisegno al riconoscimento e all'uso del tipo architettonico e strutturale nel progetto* – L'approccio progettuale proposto dall'unità di progetto tende a mettere in evidenza la matrice strutturale e costruttiva delle forme architettoniche (Torroja, 1966) rispetto alle quali viene poi chiesto allo studente di impostare il proprio progetto scegliendo consapevolmente se, e come, esplicitare o meno i principi strutturali. L'unità di progetto si basa sull'approccio progettuale di matrice tipologica (Muratori, 1960; Rossi, 1986) recentemente spesso ripreso a livello internazionale come strumento didattico che ben si presta ad una strutturazione dei laboratori progettuali per fasi successive invece che come sviluppo di un unico progetto senza soluzione di continuità (Grover, 2017).

Il primo step di lavoro è costituito dalla lettura analitica di un progetto, mai realizzato, ideato da Louis Kahn nel corso degli anni Sessanta per la Dominican Motherhouse in Pennsylvania.

L'oggetto dell'analisi è stato scelto per la varietà di tipi architettonici che offre e per la complessità delle forme spaziali e delle loro relazioni che permettono di ipotizzare una pluralità di soluzioni strutturali. L'analisi viene condotta attraverso il ridisegno del progetto originario. Ciascun gruppo, formato da due studenti, formula una ricostruzione congetturale a partire dalla grande quantità di schizzi di progetto esistenti, nei quali le soluzioni strutturali sono abbozzate solo in alcune parti. In questo modo gli studenti sviluppano una comprensione approfondita dei caratteri peculiari del tipo proposto da Kahn: una corte aperta i cui angoli sono caratterizzati da torri e in cui sono inseriti cinque elementi a base quadrata, tre dei quali a pianta centrale, disposti secondo logiche apparentemente casuali e conflittuali. Contemporaneamente vagliano, a livello tipologico, gli schemi strutturali adatti a configurare i diversi spazi in progetto.

Nella seconda fase, che è preceduta da un incontro con le altre unità di progetto per confrontarsi sui lavori in corso, il programma prevede il progetto di un monastero contemporaneo, per funzioni, linguaggio e tecniche costruttive, usando gli stessi tipi architettonici studiati nella prima fase del lavoro. Progetto che non deve quindi mantenere inalterato l'impianto planimetrico e volumetrico, ma reinterpretarlo, anche strutturalmente, limitandosi ad usare il tipo della corte aperta con, al suo interno, quattro volumi, uno per ogni destina-

zione funzionale richiesta, disposti secondo logiche non lineari. L'opera di Louis Kahn non è quindi stata assunta come riferimento dal punto di vista del linguaggio architettonico, ma piuttosto come riferimento ai tipi morfologici e strutturali e alla composizione tra spazi e forme architettoniche e scelte strutturali. Questo approccio didattico si inserisce nello sviluppo che nell'ultimo decennio ha interessato la didattica del progetto a partire dai 'Pattern languages' di Christopher Alexander, indagando la possibilità di svilupparli nelle tecniche di insegnamento del progetto (Lawn, 2017).

Dal punto di vista strutturale si richiede in questa fase allo studente di definire uno schema strutturale complessivo che preveda la copertura di almeno uno spazio con una volta in muratura sottoposta a sola compressione che viene progettata e analizzata con il software di modellazione parametrica Rhino Vaults. In questa fase la maggior difficoltà riscontrata dagli studenti è stata quella di sviluppare il progetto con un linguaggio architettonico autonomo. L'immagine forte del progetto di Kahn e le ragioni compositive delle sue forme, che gli studenti hanno studiato anche attraverso gli scritti dell'architetto, hanno reso difficile la presa di distanza e la pratica di soluzioni più personali. Una seconda, ma non minore difficoltà, è consistita nell'inserimento degli spazi voltati all'interno delle proposte progettuali. Questo inserimento è risultato più organico e convincente quando gli studenti hanno usato le volte in mura-

tura per coprire ambienti aperti di collegamento o di ingresso, sfruttandone la specificità espressiva e dando loro un carattere di segnali, di landmarks. Quando invece gli studenti hanno tentato l'inserimento delle volte in muratura a copertura di ambienti chiusi, spesso il raccordo della volta con il tamponamento verticale o il raccordo degli spazi voltati con i corpi adiacenti sono risultati temi troppo complessi per essere risolti all'interno di un'esperienza didattica limitata. Esperienza limitata anche dal software usato per la progettazione parametrica delle volte. Perché tutti potessero usare Rhino Vaults si è chiaramente dovuto optare per la versione freeware del programma che non consente di modellare tutti i tipi di volta, ma solo le volte sottoposte unicamente a compressione la cui generatrice non sia perfettamente orizzontale.

L'ultima e più complessa fase dell'esperienza didattica prevede un processo reiterativo delle proposte progettuali, sia architettoniche sia strutturali, basato sui modelli fisici e virtuali che permettono allo studente una percezione spaziale immediata e approfondita degli oggetti e delle loro reciproche relazioni strutturali, proporzionali e visuali. Agli studenti si richiedeva quindi di discutere le loro nuove proposte ogni settimana anche attraverso l'aggiornamento continuo degli schemi strutturali. L'ultima fase ha incluso anche alcune peer reviews, nel senso che gli studenti sono stati chiamati a discutere e commentare i lavori dei loro colleghi. Tali revisioni erano organizzate in

modo che tre coppie di 'progettisti' discutessero i rispettivi progetti davanti all'intero corso mettendo in evidenza pregi e difetti, ma anche proponendo soluzioni per fare avanzare il progetto. Questa modalità di revisione ha riscosso particolare successo tra gli studenti che l'hanno segnalata, nei moduli per la valutazione della didattica compilati a fine semestre, come molto proficua.

*Interazione tra modelli fisici e modelli virtuali come strumento didattico* – Il metodo didattico prevede l'uso parallelo di modelli fisici e virtuali come strumento per comprendere e favorire l'interazione tra forme architettoniche e strutturali. A livello compositivo, il modello fisico è servito come dispositivo di studio e concezione del progetto. Realizzando il modello congetturale del progetto per la Dominican Motherhouse di Louis Kahn, gli studenti hanno potuto ipotizzare e verificare i possibili, verosimili, schemi strutturali del progetto originario. Questo ha costituito un primo esercizio di indagine sulla relazione tra l'ambito architettonico e quello strutturale. Nella successiva fase progettuale, durante la quale viene chiesto agli studenti di ideare un nuovo edificio a partire dai vincoli strutturali imposti, il modello fisico ha avuto il ruolo di supporto alla concezione delle forme, inteso come prima verifica del risultato sia compositivo che spaziale.

Le criticità emerse hanno riguardato da un punto di vista progettuale il rapporto tra pelle e

struttura, in particolare l'interazione tra superfici trasparenti e elementi strutturali, mentre, dal punto di vista dello strumento metodologico, la criticità è consistita nella comprensione dell'uso del modello fisico non come strumento di rappresentazione finale, ma come dispositivo progettuale.

La concezione del suddetto tipo strutturale è avvenuta in seguito a lezioni teoriche sui principi strutturali che ne regolano il comportamento e all'insegnamento dell'uso del software Rhino Vault tramite il quale realizzare il modello virtuale della volta di progetto. Rhino Vaults si basa sulla Thrust Network Analysis (Block, 2009) come metodo di verifica dell'equilibrio tridimensionale. A partire dalla 'thrust line' ossia la risultante delle forze di un arco che, se interna alla sezione di questo, ne definisce una possibile condizione di equilibrio, è stato sviluppato un modello tridimensionale che si serve di diagrammi reciproci di forme e forze. La dualità tra la geometria del network delle forme e le forze interne permette di verificare l'equilibrio orizzontale, prima, e quello verticale, poi. Il risultato è un modello virtuale in equilibrio nelle tre dimensioni con elementi che simulano porzioni finite della volta soggetti a sola compressione. Il software permette una rapida generazione di molteplici schemi strutturali in funzione dei requisiti o vincoli impostati. Questa velocità di calcolo, che permette di ottenere molteplici configurazioni spaziali in equilibrio in poco tempo, è l'innovazione che consente di concepire

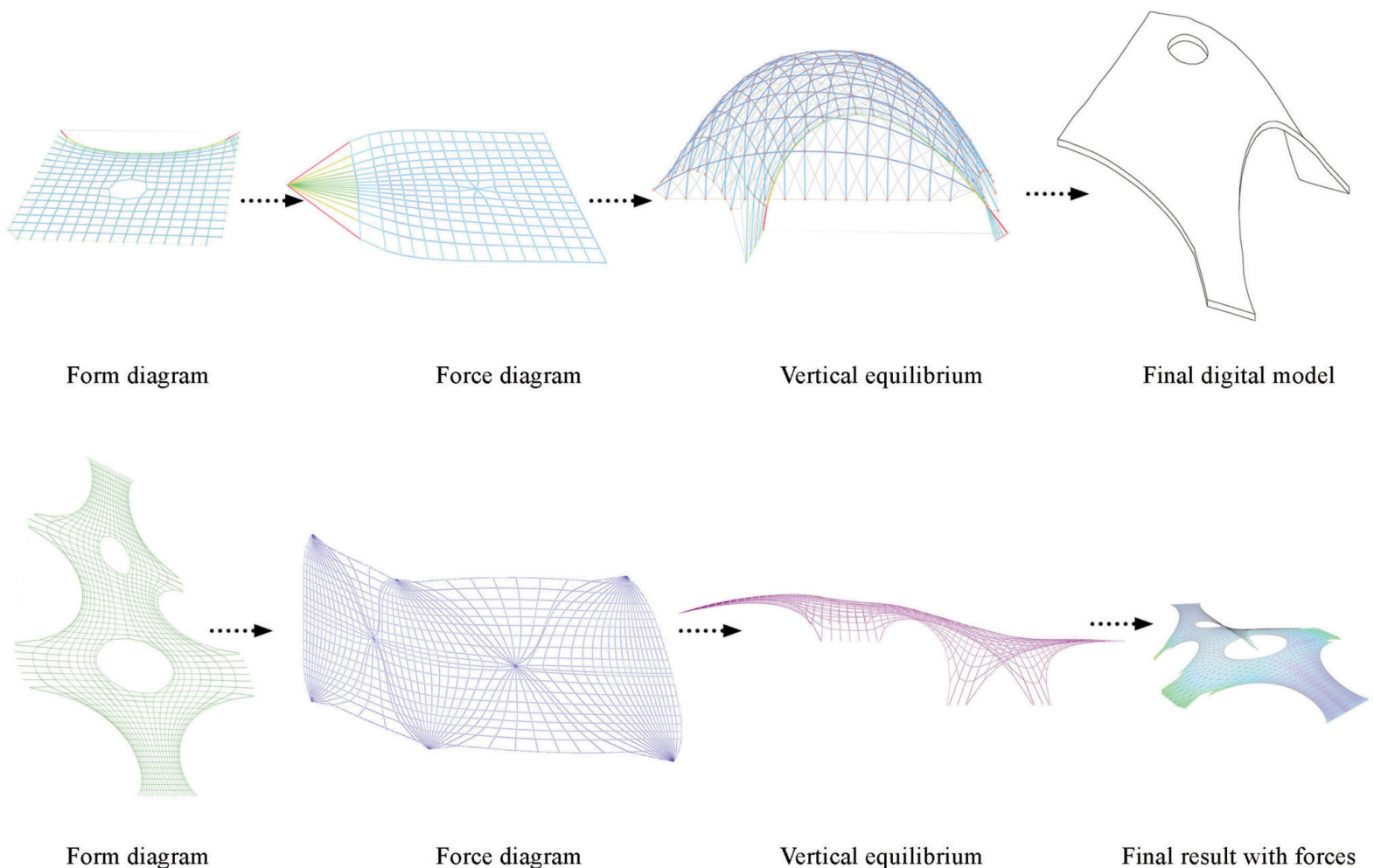


Fig. 4, 5 - The masonry vaults project process: 1) form diagram; 2) forces diagram; 3) equilibrium condition search; 4) final configuration analysis (students: W. Plata and A. Erinal; K. Klassen and P. Pourshahmari).

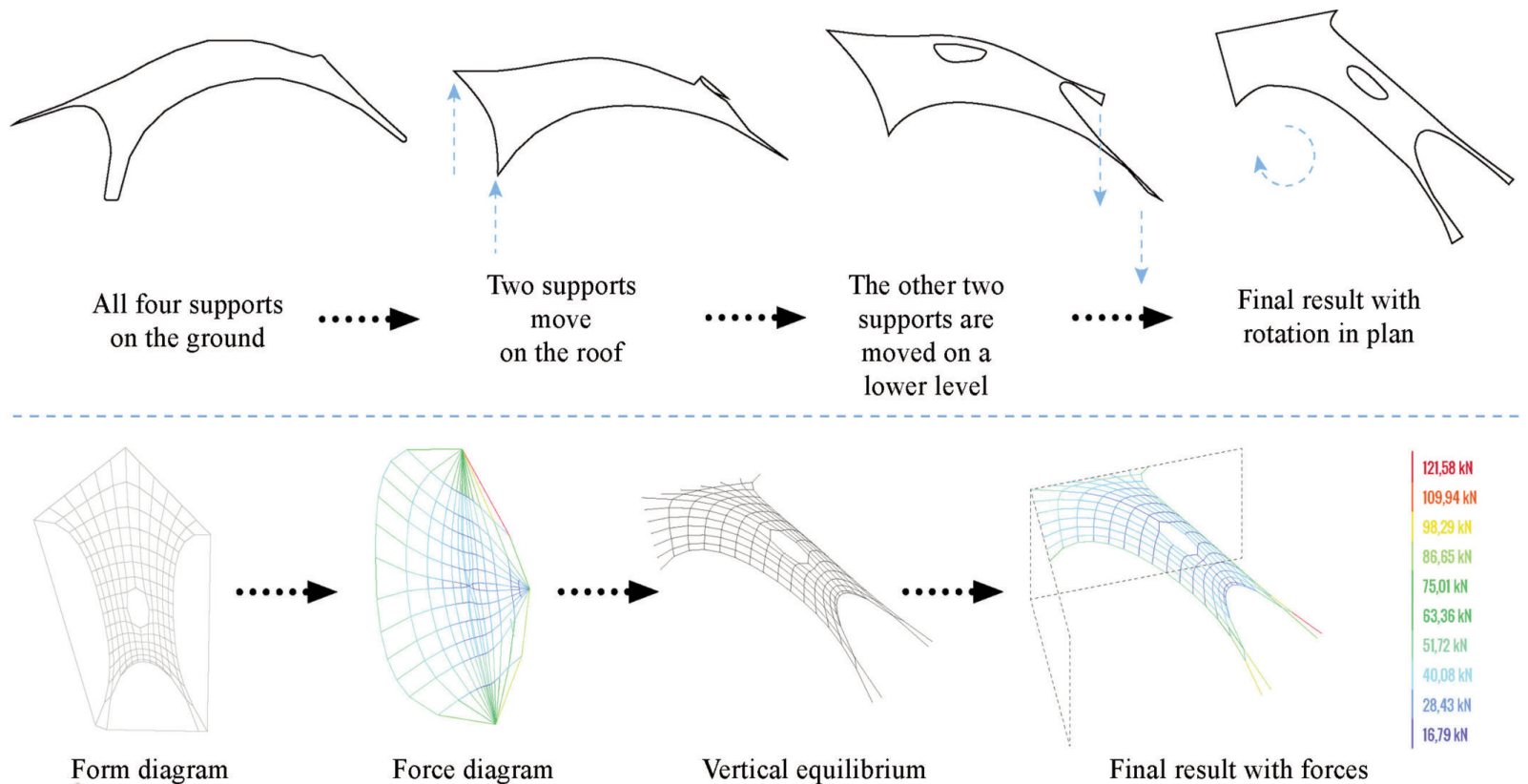


Fig. 6 - The masonry vaults project process: 1) form diagram; 2) forces diagram; 3) equilibrium condition search; 4) final configuration analysis. The process has been repeated for each type of vault setting: a) the four setting points of the vault are on a plan; b) two of the setting points are moved to a higher level; c) two of the setting points are moved to a lower level; d) two of the setting points are moved to a rotated plan (students: F. Maffia and A. Singh).

forme contemporanee a partire da un sistema costruttivo tradizionale come la muratura portante.

La modellazione spaziale diretta della volta, invece che il calcolo manuale di ogni sezione, efficace solo per casi tipo estremamente semplici ed in condizioni di simmetria, ha quindi permesso agli studenti di prefigurare diverse soluzioni strutturali al variare della concezione delle forme architettoniche e dei relativi requisiti statici. La velocità con cui è possibile generare una vasta gamma di geometrie spaziali, spesso innovative, grazie all'uso di tali software, è sicuramente uno dei più interessanti punti dell'interazione interdisciplinare tra l'ingegneria strutturale e la progettazione architettonica (Kasyanov, 2016). Agli studenti è stato anche chiesto di realizzare, a partire dal modello virtuale, un modello fisico in scala in elementi di creta, la cui scasseratura costituiva il test dell'equilibrio della volta sottoposta a sola compressione. Questo modello fisico non costituisce infatti solo uno strumento di concezione spaziale, ma permette agli studenti di sperimentare concretamente i principi teorici, e anche catteristici, della tecnica delle costruzioni illustrata nelle lezioni frontali.

L'attività di progettazione e verifica strutturale delle volte non è avvenuta esclusivamente a conclusione dell'elaborazione formale e compositiva del complesso architettonico. Si è trattato infatti, come già illustrato, di un processo circolare ripetuto che procedeva parallelamente al processo di concezione architettonica, a volte informandolo, a volte seguendolo. I requisiti strutturali richiesti alle volte in progetto sono inoltre variati durante lo sviluppo del progetto stesso. Gli studenti si sono così confrontati con il progetto e la verifica di volte dapprima impostate su un piano, poi con

punti d'appoggio a livelli diversi ed infine caratterizzate da una superficie forata.

**Conclusioni** – L'unità di progetto 'Architecture and Structural Forms' è stata quindi concepita come strumento capace di contribuire alla formazione di un progettista in grado di integrare i requisiti, alcuni li chiamerebbero vincoli, strutturali e le istanze spaziali propri di uno spazio architettonico sin dalle prime fasi di concezione del progetto. Questa esperienza didattica implementa sia la capacità di team-working, tipica della formazione in architettura basata sul lavoro di gruppo negli ateliers, sia la capacità calcolo e verifica di forme strutturali complesse che solitamente appartiene agli ingegneri strutturali

Nel panorama europeo dei master in architettura esperienze di questo genere sono rare poiché richiedono studenti con una solida preparazione di base nel campo della scienza delle costruzioni e un team di docenti capace di interagire, per quanto riguarda le indicazioni programmatiche, in tutte le fasi di sviluppo del progetto elaborato dagli studenti, ma iniziano a diffondersi così come testimonia la recente letteratura (Cotantino, 2010). Così nella maggior parte degli atenei a spiccata vocazione tecnica, i master degrees dedicati all'Architettura propongono studios progettuali interdisciplinari, il cui approccio ai temi della costruzione si riferisce però più allo sviluppo di elementi e soluzioni tecnologiche e/o fisico-ambientali che non a quelli propriamente strutturali (come nel Master in Architecture del Tu Delft), oppure studios mono disciplinari in cui i temi strutturali e i temi compositivi vengono trattati separatamente (come all'ETSAM di Madrid o al TU di Monaco), o ancora percorsi di master che inco-

cano progettazione architettonica e progettazione strutturale concentrandosi però sul lato tecnico della produzione edilizia e architettonica e tralasciando la preparazione storica, sociologica ed urbana che invece caratterizzano la laurea strutturale in Architettura Costruzione e Città.

#### ENGLISH

*The mismatch, as effectively defined by Anglo-Saxons, between the profiles of graduates and profiles required by the labour market, has long been one of the topics at the centre of reflections on educational programmes of various degree programmes, not only in architecture. The Polytechnic of Turin has for more than a decade focussed educational programmes in architecture, both bachelor and master; on interdisciplinary ateliers (or design units), which on one hand try to respond to the construction market's demands, while on other to provide students with a broad cultural and technical preparation, allowing them to aspire to professional areas not strictly related to the world of architecture (Bates, 2016).*

*In the specific case of the educational experimentation presented here, the Architecture and Structural Forms<sup>1</sup> design unit focusses on a strong interdisciplinary approach, through the compositional and structural redesign of the references, with the aid of the integrated use of physical and virtual models as a tool of conception, aiming to develop the awareness of the structural and constructive origin of the forms and spaces of architecture. Awareness can help to train experienced designers in structural design, prepare to have a constructive dialogue with engineers and workers, form figures with a strong transdisciplinary approach (Bernstein, 2015),*

distinctly scientific and able to enter the world of production, not just construction, but also manufacturing and environmental.

Master's degree course Architecture Construction City: A model of interdisciplinary teaching – Master's Degree Course Architecture Construction City of the Politecnico di Torino aims to train an intellectual and professional figure as an architect (as foreseen by Directive 36/2005/EU), who has a high cultural preparation, both humanistic and scientific-technical: a professional figure general, who will find in his career's development different ways to specialise and differentiate. The importance of training students for transdisciplinarity is widely recognised at an international level, as well as the atelier as the best place to practice this kind of training (Morales, 2017). At PoliTo, the teaching method to pursue this objective is the alternation of multi and interdisciplinary design units with mono disciplinary courses. The design units assume different weights and denominations depending on the semesters. So, if the architectural composition represents the constant of all the design units, it is combined with the construction technique, architecture's technology, urban planning or economic estimation. In the case of design units, providing the contribution of urban planning or urban economy, these two disciplines are also joined by further two contributions, chosen according to the specific project themes, including the sociology of information, sociology of territory and environment, political and economic geography, urban economics, technical and environmental physics, landscape design, architecture technology and history of architecture.

The educational offer, thus configured, presents to the student a strong interaction between different disciplines, reasoning around a common theme, with a unified programme, producing project proposals where they integrate points of view and working methods of each of the disciplines involved, thus training students in a true interdisciplinary approach. In this sense, some contributions may be more based on lectures, other on exercises in the classroom or outside, but all contributions will intervene in the discussion and development of the project solution developed by students sometimes in groups, sometimes individually. Interdisciplinarity is still reinforced by two moments of collective discussion, where all design units active during the semester expose and discuss, together with external guests, their work's intermediate results. The organisation of a series of themed conferences, held by speakers of different geographical and cultural origins, even very distant, called to bring their point of view on the project, further underlines the variety of perspectives proposed.

In this overall framework, the Architecture and Structural Forms design unit, delivered in English, combines the teachings of architectural composition and structural engineering. The interaction between the two disciplines with an almost equal weight within the design unit and that develop their contribution in parallel with frequent collective reviews, well represents the multi-disciplinary approach's effectiveness, allowing students to understand deeply the architectural form's structural origins and simultaneously to

master structural verification techniques, courtesy which, in a professional future, it will be able to competently support its design requirements.

Architecture and Structural Forms: from the re-design to recognition and use of architectural and structural type in the project – The design approach proposed by the design unit tends to highlight the structural and constructive matrix of architectural forms (Torroja, 1966) regarding which the student is then asked to set up his own project by consciously choosing whether and how to make explicit the structural principles. The atelier is focussed on the typological approach to architectural design (Muratori, 1960; Rossi 1986), nowadays often used in the international panorama as a pedagogical method in structuring the

ateliers by phases and exercises, instead of organising them as the development of a single design topic (Grover, 2017).

The work's first step is a project's analytical reading of a never realised building designed by Louis Kahn during the Sixties for the Dominican Motherhouse in Pennsylvania. The analysis' object was chosen for the variety of architectural types it offers and for the complexity of spatial shapes and their mutual relationships, allowing us to hypothesise a plurality of structural solutions. The analysis is carried out through the original project's redesign. Each group, formed by two students, formulates a conjectural reconstruction starting from the large amount of existing project sketches, where structural solutions are sketched only in some parts. In this way, students develop

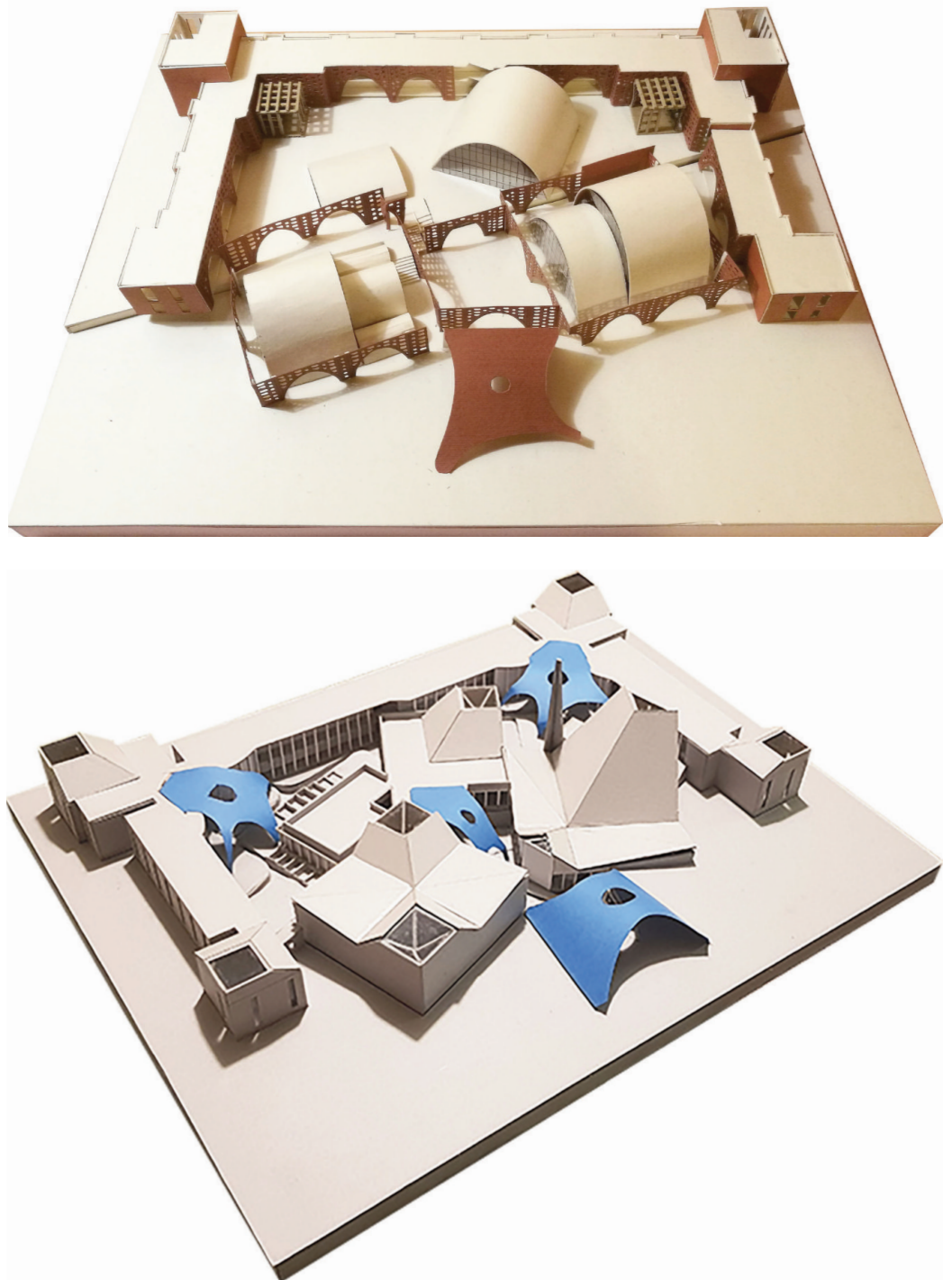


Fig. 7, 8 - Students' physical model: final solution (students: N. Niharika and Y. Liu; F. Maffia and A. Singh).

an in-depth understanding of the peculiar characteristics of the type proposed by Kahn: an open court, whose corners are characterised by towers, where five elements with a square base are inserted, three of them with a central plan, arranged according to apparently random and conflict logic. At the same time, they evaluate the structural schemes suitable for configuring different spaces in the project.

In the second phase, preceded by a meeting with the other project units to discuss the work in progress, the programme includes the design of a contemporary monastery, for functions, language and construction techniques, using the same architectural types studied in the work's first phase. This project must therefore not maintain the planimetric and volumetric layout unaltered, but reinterpret it, even structurally, limiting itself to using the open court type with four volumes inside, one for each functional destination required, arranged according to non-linear logics. Louis Kahn's work has therefore not been taken as a reference from the point of view of architectural language, but rather as a reference to morphological and structural types and to composition of spaces and architectural forms as well as structural choices. This pedagogical approach has its place in the teaching methods arisen in the last decade linked

to the Pattern Languages described by Christopher Alexander and the possibility to implement them as a teaching design method (Lawn 2017).

From a structural point of view, at this stage, the student is required to define an overall structural scheme, foreseeing the coverage of at least one space with a compression-only masonry vault, designed and analysed with the Rhino Vaults parametric modelling software. In this phase, the main difficulty encountered by the students was that of developing the project with an autonomous architectural language. The Kahn project's strong image and compositional reasons of its forms that students have also studied through the architect's writings, have made it difficult to distance themselves and practice more personal solutions. A second, but not minor, difficulty consisted in the insertion of the vaulted spaces within the project proposals. This insertion was more organic and convincing when students used masonry vaults to cover open connecting or entry areas, exploiting their expressive specificity and acting as signals, landmarks. When, on the other hand, students attempted to insert masonry vaults to cover enclosed spaces, often the vault's connection with the vertical infill or vaulted spaces' connection with the adjacent bodies were too complex themes to be solved within limited educational experi-

ence. Experience was also limited by software used for vaults' parametric design. In order to let everyone use Rhino Vaults, it was clearly necessary to opt for the programme's freeware version, which does not allow all types of vaults to be modelled, but only those subjected only to compression whose generatrix is not perfectly horizontal.

The teaching experience's last and most complex phase foresees a reiterative process of design proposals, both architectural and structural, based on physical and virtual models, allowing the student an immediate and in-depth spatial perception of objects and their reciprocal structural, proportional and visual relationships. Students were asked to discuss their new proposals every week, also through the continuous updating of structural schemes. The last phase also included some peer reviews, where students were called to discuss and comment on their colleagues' works. These reviews were organised in such a way that three pairs of designers discussed their projects in front of the entire course, highlighting strengths and weaknesses and proposing solutions to make the project progress. This revision method has been particularly successful among students, who reported it, in the modules for the evaluation of teaching completed at the end of the semester, as very profitable.



Fig. 9, 10 - Students' project render: final solution (students: A. Krivosheina and S. Asgari; K. Klassen and P. Pourshahmari).

Interaction between physical and virtual models as an educational tool – *The teaching method involves the parallel use of physical and virtual models as extremely effective tools for understanding the interaction between architectural and structural forms. In terms of composition, the physical model has served as a device for studying and designing the project. Realising the project's conjectural model for the Dominican Motherhouse by Louis Kahn, students were able to hypothesise and verify the original project's possible, probable and structural models. This constituted a first investigation exercise on the relationship between the architectural and structural spheres. In the subsequent design phase, where students are asked to design a new building starting from the imposed constraints, the physical model has played the role of supporting the conception of forms, intended as the result's first verification, both compositional and spatial.*

*The emerged critical issues have concerned, from a design point of view, the relationship between skin and structure, in particular the interaction between transparent surfaces and structural elements; while, from the methodological tool's point of view, the critical aspect consisted in understanding the use of physical model not as a final representation tool, but as a design device.*

*The above-mentioned structural type's conception took place following theoretical lessons on structural principles, regulating its behaviour and teaching the use of Rhino Vault software through which virtual model of the project's vault is realised. Rhino Vault is based on Thrust Network Analysis (Block 2009) as a three-dimensional balance verification method. Starting from the thrust line, which is the result of an arc's forces that if it is internal to the section of this, defines a possible equilibrium condition; a three-dimensional model has been developed that uses reciprocal diagrams of shapes and forces. The duality between the geometry of the network of forms and internal forces makes it possible to verify the horizontal equilibrium first and then the vertical equilibrium. The result is a virtual model balanced in the three dimensions with elements, simulating finite portions of the compression only vault. The software allows rapid generation of multiple structural schemes according to the requirements or constraints set. This calculation speed, which allows obtaining multiple spatial configurations in equilibrium in a short time, is the innovation, allowing conceiving contemporary forms starting from a traditional building system like the load-bearing masonry.*

*The vault's direct spatial modelling, instead of each section's manual calculation, effective only for extremely simple and symmetric situations, has allowed students to prefigure different structural solutions to vary the conception of architectural forms and related static requirements. The possibility of quickly generating a wide range of spatial configurations, resulting from the force diagram and set of equilibrium, is one of the most interesting aspects resulting from the interaction between architectural design and structural engineering (Kasyanov, 2016). Students were also asked to create, starting from the virtual model, a physical model in scale in clay elements, whose removal of the formwork constituted the test of the equilibrium of the compression-only vault. In fact,*

*this physical model is not just an instrument of spatial conception, but allows students to concretely experiment theoretical principles, as well as building ones, of the construction technique illustrated in the lectures.*

*The vaults' design and structural verification did not take place at the end of the formal and compositional elaboration of the architectural complex. As already illustrated, it was a repeated circular process, proceeding intertwined with the process of architectural conception, sometimes informing it, sometimes following it. Structural requirements demanded for the vaults in the project also varied during the project's development itself. Students were thus confronted with the project and verification of vaults initially set on a plane, then with points of support at different levels and finally characterised by a holed surface.*

*Conclusions – In the European panorama of master's degree programmes in architecture, experiences of this kind are rare, because they require students with a solid basic preparation in the field of construction science and a team of teachers able to interact regarding programmatic indications in all phases of the project's development by the students, but start to spread as recent literature witnesses (Cotantino, 2010). So in most universities with a strong technical vocation, master's degrees dedicated to architecture offer interdisciplinary project studios, whose approach to the construction themes refers more to the development of technological and/or physical-environmental elements and solutions than to those properly structural (as in the Tu Delft Master in Architecture), or mono disciplinary studios where structural and compositional themes are treated separately (as in the ETSAM in Madrid or the TU in Monaco), or master's courses, crossing architectural and structural design focussing on the technical side of building and architectural production and leaving aside the historical, sociological and urban preparation that instead characterise the structural degree in Architecture Construction City.*

#### NOTES

1) *Architecture and Structural forms* is a Design Unit coordinated by Profs. Michela Barosio and Francesco Tondolo during a.y. 2017/2018. The Design Unit, consisting of 8 credits of Architectural and Urban Composition and 6 credits of Building Techniques, is included within the international chain of the Master's Degree in Architecture Construction City of the Politecnico di Torino.

#### REFERENCES

- Alexander, C., Ishikawa, S. and Silverstein, M. (1977), *A Pattern Language: Towns, Buildings, Construction*, OUP, USA.
- Barosio, M., Grignolo, R., Ramello, M. and Rosso, A. (2015), *4+1 punti dell'architettura. Istruzioni per studenti moderni*, Celid, Torino.
- Bates, D., Mitsogianni, V. and Ramirez-Lovering, D. (eds) (2016), *Studio Futures: Changing Trajectories in Architectural Education*, Oro Editions, Novato, California.
- Bernstein, J. H. (2015), "Transdisciplinarity: A review of its origins, development, and current issues", in *Journal of Research Practice*, 11(1), Article R1.
- Block, P. (2009), *Thrust Network Analysis. Exploring*

*Three-dimensional Equilibrium*, Massachusetts Institute of Technology.

Cotantino, T. et al. (2010), "An Interdisciplinary Design Studio: How Can Art and Engineering Collaborate to Increase Students' Creativity?", in *Art Education*, 63:2, pp. 49-53.

Frank, C. and Pedretti, B. (eds) (2013), *L'architetto generalista*, Mendrisio Academy Press, Mendrisio.

Froud, D. and Harriss, H. (eds) (2015), *Radical Pedagogies: Architectural Education and the British Tradition*, RIBA publishing, London.

Grover, R., Emmitt, S. and Copping, A. (2017), "The typological learning framework: the application of structured precedent design knowledge in the architectural design studio", in *International Journal of Technology and Design Education*, pp. 1-20.

Kasyanov, N. (2016), "The evolution of architectural morphogenesis at the beginning of XXI century in the context of scientific advance", in *Procedia Engineering*, vol. 153, pp. 266-270.

Law, N. et al. (2017), "A Pattern Language Based Learning Design Studio for an Analytics Informed Inter-Professional Design Community", in *Interaction Design and Architecture(s) Journal - IxD&A*, n. 33, pp. 92-112.

Morales, M. (2017), "Creating the Transdisciplinary Individual: Guiding Principles Rooted in Studio Pedagogy", in *Journal of Interdisciplinary Studies in Education*, vol. 6, n. 1.

Muratori, S. (1960), *Studi per una operante storia urbana di Venezia*, Istituto poligrafico, Roma.

Rossi, A., Consolascio, E. and Bosshard, M. (1986), *La costruzione del territorio: uno studio sul Canton Ticino*, CLUP, Milano.

Spiller, N. and Clear, N. (eds) (2014), *Educating architects. How tomorrow's practitioners will learn today*, Thames and Hudson, London.

Torroja, E. (1966), *La concezione strutturale: logica ed intuito nella ideazione delle forme*, UTET, Torino.

\* MICHELA BAROSIO, PhD, is Researcher of Architectural and Urban Design at the Politecnico di Torino. She has been in charge of interdisciplinary Design Laboratories for about ten years and is a member of the Teaching Academy of the European Association for Architectural education. Her research is mainly focussed on three axes: design teaching methods, cultural landscapes and urban regeneration of industrial dismantled areas, specifically related to retail developments. Tel. +39 340/49.89.328. E-mail: michela.barosio@polito.it

\*\* LUDOVICA ROLANDO is a master's graduating student and student teaching assistant in the Architectural and Structural Forms Design Unit of the Master's Degree Course in Architecture Construction City of the Politecnico di Torino. Tel. +39 348/39.93.499. E-mail: ludovica.rolando@studenti.polito.it



*Fig. 11 - Students' project render: final solution (students: K. Klassen and P. Pourshahmari).*