

“Reconstructive re-drawings” and “reconstructive models” for history of construction. The experience of SIXXI research

Gianluca Capurso, Ilaria Giannetti*

Highlights

This paper retraces the evolution of “reconstructive redrawing” from the axonometric cross-section, made with the 2D Cad, to 3D virtual models and 3D printed models, as powerful tools of investigation for the study of 20th Century Construction History. The subject is illustrated presenting the outcomes of some material surveys carried out, using this set of tools, on a selection of significant made in Italy “structural architectures” of 1950s and 1960s.

Abstract

During the SIXXI research (“XX Century Structural Engineering: the Italian Contribution”, ERC Adv Grant, PI: Sergio Poretti, Tullia Iori) special study tools supported historical surveys on works. The experimentation on tools became an autonomous research topic, developing itself from the “reconstructive re-drawing”, pioneered by Poretti in the mid 1980s, up to 3D modelling and 3D printing. This paper resumes briefly its starting and illustrates most recent outcomes, as a board field of research in Construction and Structural engineering History.

Keywords

Construction history, 3D printing, Study tools, SIXXI research project, History of Engineering

1. INTRODUCTION

In the mid-1980s, Sergio Poretti introduced a fundamental analytical tool to study the history of Italian construction in the 20th century: the “reconstructive re-drawing”. Through a special isometric axonometry from below, “cut” to measure for the work analysed, this tool allowed to “peel” the works in neuralgic points, revealing their anatomy.

With an operation neither systematic nor exhaustive, starting from the analysis of the archival sources (project drawings, technical reports) and taking full advantage of the possibilities of 2D-CAD, the axonometry, obtained combining 2D drawings (transversal, cross-sections and plans), was a powerful three-dimensional visual device capable of focusing on the most

Gianluca Capurso

Università degli Studi di Roma
“Tor Vergata” – DICII, via del
Politecnico 1, Roma, 00133,
Italia

Ilaria Giannetti

Università degli Studi di Roma
“Tor Vergata” – DICII, via del
Politecnico 1, Roma, 00133,
Italia

* Corresponding author

Tel.: +39-0672597032;

fax: +39-0672597032;

e-mail:

ilaria.giannetti@uniroma2.it

intimate connections between architecture and construction.

In the development of the technique of representation, the research Tullia Iori carried on since 1994 using the software “AutoCad14”, is fundamental. The isometric axonometry, composed through the combination of layouts, elevations and sections, on the three Cartesian axes, has been renamed within the research group “Iori axonometry”.

In 2012, when the SIXXI project (Twentieth Century Structural Engineering: the Italian Contribution) started, the need to investigate the relationship between structure and architecture in the works designed by the representatives of the Italian School of Engineering, often in collaboration with the best architects, encouraged a rethinking of the tools used until then to study the history of construction [1].

How to investigate “the architecturally strategic use of structural forms” [2], in both architecture with iconic static solutions (such as Pirelli skyscraper, designed by Gio Ponti, Arturo Danusso and Pier Luigi Nervi and the Velasca tower, by BBPR architects and Arturo Danusso) and iconic architectures featured by hidden static stratagems (let’s think, for example, to the Girasole house and to the “La Saracena” villa designed by Luigi Moretti, to the “Villaggio del Fanciullo” by Marcello D’Olivo and to the “Chiesa dell’Autostrada” by Giovanni Michelucci)? How to represent and inquiry the sense of structural expressionism, entrusted to the plastic (non-serial) forms of concrete, re-elaborates the most classic themes of medium span structures (pillars, beams, slabs, shells), characterizing the predominant languages of architectural realism [3]? How to analyse the duality between the craftsmanship of construction and the erudition of structural design, in the diversity of architectural outcomes, building by building, structure by structure?

Attempting to answer these questions, the consolidated tool of “reconstructive re-drawing” played a central role: in the hands of the team led by Sergio Poretti and Tullia Iori, it underwent continuous development and enrichment, evolving thanks to the opportunities offered by the continuous updates of virtual drawing softwares, by three-dimensional modeling and by 3D printing.

2. RECONSTRUCTIVE AXONOMETRY

Since 2006 some buildings, already recognized as important in the history of Italian architecture, have been submitted to specific analysis, with the aim to investigate the special relationship between structural apparatus and architectural concept.

1. INTRODUZIONE

A metà degli anni '80, Sergio Poretti introduce nelle ricerche sulla storia della costruzione italiana del '900 un fondamentale strumento analitico: il “ridisegno ricostruttivo”. Attraverso una speciale assonometria isometrica dal basso, “tagliata” su misura per l’opera analizzata, questo strumento permetteva di “sbucciare” e “spellare” le opere in punti nevralgici, svelando la loro anatomia.

Con un’operazione né sistematica né esaustiva, partendo dalle conoscenze attinte dalle fonti (disegni di progetto) e sfruttando a fondo le possibilità del CAD 2D, l’assonometria, ottenuta tramite la combinazione dei disegni bidimensionali della pianta, dei prospetti e delle sezioni principali, costituiva un potente artificio visivo tridimensionale capace di mettere a fuoco le più intime connessioni fra architettura e costruzione.

Nella messa a punto della tecnica di rappresentazione, sono fondamentali le ricerche di Tullia Iori condotte a partire dal 1994, con il software AutoCad14.

L’assonometria isometrica, composta attraverso la combinazione delle piante, dei prospetti e delle sezioni, sui tre assi cartesiani, è stata ribattezzata nell’ambito del gruppo di ricerca “assonometria Iori”.

Nel 2012, con l’avvio del progetto SIXXI – Storia dell’ingegneria strutturale in Italia, la necessità di indagare il tema del rapporto tra struttura e architettura nelle opere progettate dagli esponenti della Scuola italiana di Ingegneria, spesso insieme ai migliori architetti, ha stimolato una revisione degli strumenti utilizzati fino a quel momento per lo studio della storia della costruzione [1].

Come indagare “l’impegno compositivamente strategico delle forme strutturali” [2], tanto in architetture con soluzioni statiche iconiche (come il Grattacielo Pirelli di Gio Ponti, Arturo Danusso e Pier Luigi Nervi e la Torre Velasca del gruppo BBPR e Arturo Danusso) quanto in architetture iconiche con stratagemmi statici più nascosti (si pensi, per esempio, alla Casa del Girasole e alla villa “La Saracena” di Luigi Moretti, al Villaggio del Fanciullo di Marcello D’Olivo, alla chiesa sull’Autostrada di Giovanni Michelucci)? Come rappresentare e analizzare quella nota di espressionismo strutturale che, affidata alle forme plastiche (non seriali) del calcestruzzo, rielabora i temi più classici delle strutture di media luce (il pilastro, il telaio, la piastra, il guscio) connotando i dominanti linguaggi del realismo architettonico [3]? Come focalizzare la dualità tra artigianalità costruttiva e raffinatezza del progetto strutturale, nella diversità degli esiti architettonici, cogliendone le concrete articolazioni, di edificio in edificio, di struttura in struttura?

Nel tentativo di rispondere a questi interrogativi, il consolidato strumento del “ridisegno ricostruttivo” ha avuto un ruolo centrale: utilizzato dal team guidato da Sergio Poretti e Tullia

In the case of skyscrapers, the tool of reconstructive re-drawing demonstrated all its effectiveness and adaptive capacity. After the encouraging results of the study conducted on the Velasca tower [4], a monographic survey was dedicated to the Stock Exchange tower in Montreal, designed by Luigi Moretti and Pier Luigi Nervi.

In 1965, when it was completed, the 185-metre-high skyscraper was the tallest reinforced concrete building in the world. To support it, Nervi conceived an original structural system, which prefigured the “outrigger” scheme, applied by Fazlur Khan in his projects since the late 1960s. While the International Style was affirming a model of skyscraper based on pure geometries, with structures set on regular grids and clad with curtain wall facades, the two Italian designers understood that the structure of the tower, of exceptional static effort, offered the opportunity to redesign, in a new way, the skeleton of the tall building and redefine its relationship with the image. Nervi, remaining faithful to his poetics, would have shown the entire structural system, making it coincide, without alterations, with the image of the building, but Moretti, whose approach prevailed in this project, introduced into the project a series of visual tricks and optical corrections that modify the perception of the load-bearing skeleton. The “baroque structure”, synthesis of the “real” structure – the one designed by the engineer – and the “perceived” one, proportioned by Moretti for the observer, can be analysed and represented with isometric axonometry, provided that the drawing is designed for this specific purpose and that any claim of “neutral” representation of the architectural object is abandoned.

By making half of the floors “disappear” with a transparency, after having sectioned them, it is possible to show fully the “main resistant system” of the building, deliberately spared by the section plan, consisting of a central core of reinforced concrete, four pillars arranged on the corners of the square plan of the tower and three sets of trusses that rigidly connect pillars and core. When the system is subjected to horizontal actions – wind or earthquake, particularly dangerous in Montreal –, it is successfully balanced by the angular pillars: each pair of uprights placed at the ends of a diagonal of the floor, one stretched and one compressed, reacts with a couple of vertical forces of opposite sign and, therefore, with a moment that stabilizes the structure. The skeleton is then completed with eight pillars – two on each side of the square – which significantly collaborate to carry the weight of the single floors. This is the “real” structure.

The re-drawing also shows, however, that the convex curtain-wall that surrounds and hides the intermediate pillars leads the observer to believe that

Iori, ha continuato a svilupparsi ed arricchirsi, trasformandosi grazie alle opportunità offerte dai continui aggiornamenti del software di disegno virtuale, dalla modellazione tridimensionale e dalla stampa 3D.

2. ASSONOMETRIE “RICOSTRUTTIVE”

Alcuni manufatti, tutti di rilevanza già riconosciuta nella storia dell'architettura italiana, sono stati sottoposti ad analisi specifica, a partire dal 2006, con l'obiettivo di indagare lo speciale rapporto tra l'apparato strutturale e la concezione architettonica. In particolare, nel caso dell'edificio alto, lo strumento del ridisegno ricostruttivo ha dimostrato tutta la sua efficacia e versatilità.

Dopo gli incoraggianti esiti dello studio condotto sulla torre Velasca [4], un'indagine monografica è stata dedicata alla torre della Stock Exchange di Montreal, progettata da Luigi Moretti e Pier Luigi Nervi.

Nel 1965, quando viene completato, il grattacielo è, con i suoi 185 metri, il più alto edificio al mondo in cemento armato. Per sostenerlo, Nervi idea un originale sistema strutturale, che anticipa lo schema a “outrigger”, applicato da Fazlur Khan, nei suoi progetti, dalla fine degli anni Sessanta. Mentre l'International Style afferma un modello di grattacielo basato sulle geometrie pure, con strutture impostate su griglie regolari rivestite da facciate in curtain wall, ai due progettisti italiani non sfugge che la struttura della torre, di eccezionale impegno statico, offre l'occasione per ridisegnare, in modo nuovo, l'ossatura dell'edificio alto e ridefinire il suo rapporto con l'immagine. Nervi, restando fedele alla sua poetica, mostrerebbe interamente il sistema strutturale facendolo coincidere, senza alterazioni, con l'immagine dell'edificio ma Moretti, il cui approccio prevale in questo progetto, introduce nell'opera una serie di accorgimenti e correzioni ottiche che modificano la percezione dello scheletro portante. La “struttura barocca”, sintesi della struttura “reale” – quella progettata dall'ingegnere – e quella “percepita”, proporzionata da Moretti per l'osservatore, può essere analizzata e rappresentata con l'assonometria isometrica, a patto di progettare il disegno con questa specifica finalità e di abbandonare quindi ogni pretesa di rappresentazione “neutra” dell'oggetto architettonico.

Facendo “scompare” con una trasparenza metà dei solai, dopo averli sezionati, è possibile mostrare per intero il “sistema resistente principale” dell'edificio, appositamente risparmiato dal piano di sezione, composto da un nucleo centrale di cemento armato, da quattro pilastri disposti sugli angoli della pianta quadrata della torre e da tre serie di travi reticolari che collegano rigidamente pilastri e nucleo. Sottoposto a un'azione orizzontale – vento o sisma, particolarmente pericoloso a Montreal –, il sistema è equilibrato efficacemente dai pilastri angolari:

the whole building could be supported only by the corner pillars. In addition, the axonometry allows to examine how, to reinforce this impression, the angular pillars are “magnified” thanks to a cladding made by concrete panels, spaced from the structural section. This shell was, in fact, designed as an autonomous object, whose development in height shows an entasis similar to that of the Doric columns, to communicate, as Moretti wanted, the “visible suffering” of the pillars. Finally, thanks to the drawing, it is also possible to visualize the tapering of the facade, obtained exclusively by using the constructive tolerances of the curtain-wall. With this device, applied to the overall outline of the building, reduced at the top only 30 centimetres from the base, Moretti succeeded in optically correcting the perception of the tower to avoid, as in ancient architecture, the feeling that elevations lean outwards.

ogni coppia di montanti posti agli estremi di una diagonale della pianta, uno teso e uno compresso, restituisce infatti forze verticali di segno opposto e, quindi, un momento stabilizzante la struttura. Lo scheletro è completato, poi, con otto pilastri – due per ogni lato del quadrato – che collaborano in maniera decisiva a portare il peso dei singoli piani. Fin qui, la struttura “reale”.

Il ridisegno fa però comprendere anche che il curtain-wall bombato che avvolge e nasconde i pilastri intermedi porta l'osservatore a credere che tutto l'edificio possa essere sostenuto solo dai pilastri d'angolo. Inoltre, lo spaccato permette di esaminare come, per rafforzare questa impressione, i pilastri angolari siano “ingigantiti” grazie ad un rivestimento in pannelli di calcestruzzo, staccato dalla sezione strutturale. La scocca è, infatti, progettata come un oggetto di

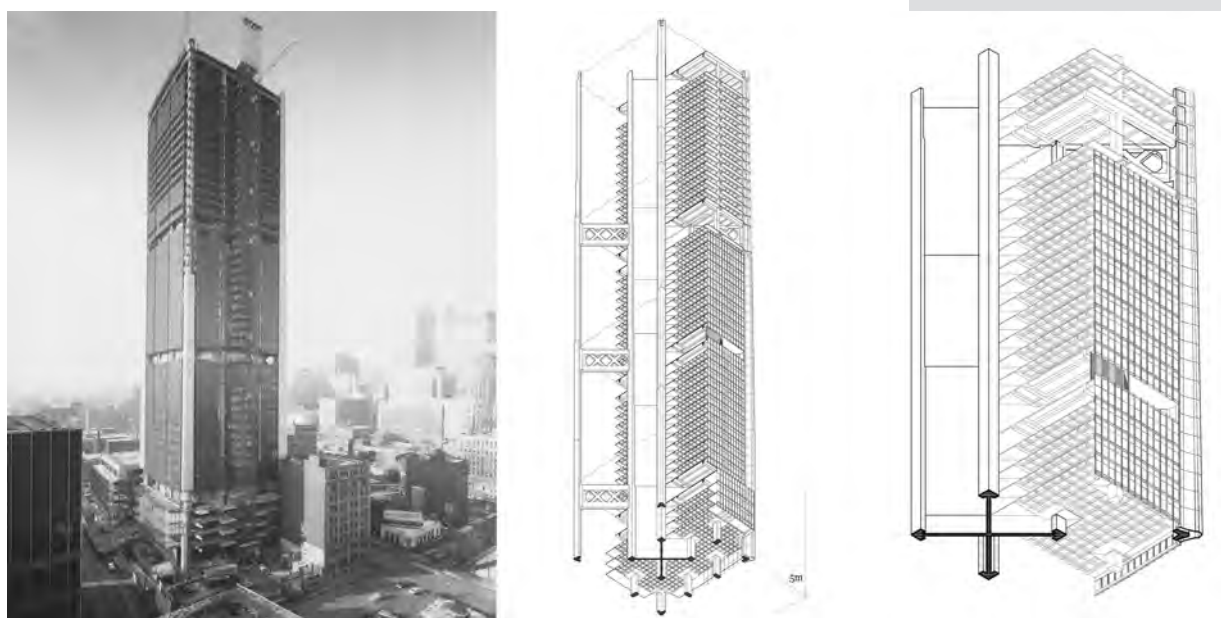


Figure 1. Stock Exchange Tower in Montreal, construction site and “reconstructive axonometries” (drawings by G. Capurso, 2006).

3. RECONSTRUCTIVE MODELS

The research conducted on the large structures of the Italian School of Engineering asked to stress the established technique of analysis of the “reconstructive redrawing”.

For bridges, viaducts and large roofs, in fact, the traditional device of the axonometric cross-section, already tested for buildings, immediately turned out to be less effective to show their peculiar anatomies: the dichotomy between the large overall size of the structure and the small thickness of the structural elements, made it difficult to create a device of representation as intuitive and powerful as the one developed in the past.

design autonomo, il cui sviluppo in altezza presenta addirittura un'entasi simile a quella delle colonne doriche, per comunicare, come voleva Moretti, la “palese sofferenza” dei pilastri. Grazie al ridisegno, infine, è possibile anche visualizzare la rastremazione del curtain-wall, ottenuta facendo ricorso esclusivamente alle tolleranze costruttive della vetrata. Con questo stratagemma applicato alla sagoma complessiva dell'edificio, ridotta in sommità di appena 30 centimetri rispetto alla base, Moretti riesce a correggere otticamente la percezione della torre per evitare, come nell'architettura antica, la sensazione di ribaltamento dei prospetti.

3. MODELLI “RICOSTRUTTIVI”

Le ricerche condotte sulle grandi strutture della Scuola Italiana

Let's imagine, to explain, a thin shell with a diameter of more than 60 metres, in which we have to represent the thickness of 2.5 cm of the corrugated elements composing it, or a viaduct of 500 metres in length in which the structural design demonstrates its elegance in details with a section of just 30 cm in thickness.

Furthermore, another aspect of the study of large structures, gave ineffectiveness to the re-drawing as tool of analysis: the crucial role held by the constructive process in the inner "expressive" nature of the structure.

To better understand, let's think, once again, at Nervi's domes: the image, word-wide known as a monolithic embroidery of reinforced concrete, obtained from a single large mould, is was, instead, the result of the application of a building process, unique in the world, conceived by thousands of pieces.

Too complex to be investigated through drawing, the construction system invented by Nervi was, therefore, the pretext to imagine a new "physical" tool supporting the studies: a "reconstructive model" cut to measure for large structures.

In 2010, the monographic exhibition on the work of Nervi in Rome, curated by Sergio Poretti and Tullia Iori at the MAXXI Museum in Rome, was an extraordinary opportunity for a first experimental verification of this idea.

di Ingegneria hanno richiesto di spingere al limite le tecniche più consolidate del "ridisegno ricostruttivo". Per ponti, viadotti e grandi coperture, infatti, il tradizionale strumento dello spaccato assonometrico, così collaudato alla scala dell'edificio, si è rivelato da subito meno efficace a rappresentarne le particolari anatomiche: la dicotomia tra la grande dimensione complessiva dell'opera e gli spessori spesso così esigui degli elementi strutturali, rendevano difficile la creazione di un dispositivo di rappresentazione tanto intuitivo e potente quanto quello messo a punto negli anni precedenti. Per chiarire, si immagini, a esempio, un guscio di oltre 60 metri di diametro di cui si deve rappresentare l'esiguo spessore di 2,5 centimetri degli elementi ondulati e corrugati di cui si compone, oppure un viadotto lungo oltre 500 metri in cui il disegno strutturale dimostra la sua raffinatezza in dettagli di sezione di appena 30 centimetri di spessore. Un altro aspetto, poi, dello studio delle grandi strutture rendeva inefficace il ridisegno come strumento d'indagine: la centralità del processo costruttivo nella comprensione dei caratteri "espressivi" della struttura. Per comprendere meglio, pensiamo alle cupole di Nervi la cui immagine, famosa in tutto il mondo, sebbene appaia come un monolitico ricamo, ottenuto da un unico grande stampo, è il risultato dell'applicazione di



Figure 2. Palagioco, reconstructive model of the Palazzetto dello Sport and its construction site. The model was built for the exhibition "Pier Luigi Nervi. Architettura come Sfida. Roma. Ingegno e costruzione" (curators: Carlo Olmo, Tullia Iori and Sergio Poretti), MAXXI, Rome, 2010-2011. (Design of the model: Tullia Iori and Sergio Poretti. Coordination of construction works: Ilaria Giannetti with Luca Porqueddu. 3D modeling with CATIA software : Michele Ricci. Model construction : Walter Sergiusti and Claudio Giudice, with the collaboration of Felice Patacca).

To describe the “Palazzetto dello Sport”, the most representative work of the “Nervi System”, it was decided to design a model reproducing also the construction site [5].

The gigantic model (with a diameter of 3,5 meters) immediately proved to be an extraordinary instrument of investigation: its construction – carried out, step by step, according to the phases of the “Nervi System” – definitively clarified not only the most intimate connections between the structural behaviour and the architectural image of the great dome, but also the peculiar manufacturing process of the 1620 pieces (“tavelloni”), of which the dome is composed, through the sequence of moulds called “grandmother, mother and daughter”[6]. Once finished and displayed in the exhibition, the large model has also proved to be a powerful means of scientific dissemination, especially to the general public.

Despite its analytical effectiveness, timing and methods of manufacturing – 2 months of work, too many if compared to the 8 months in which the real Palazzetto was built – left open the question of the possibilities of a systematic use of the “reconstructive model” as a tool of investigation for the study of large structures.

To validate the technique it was necessary to wait a few more years, until technological progress offered adequate tools. Finally, in 2015, the 3D printing technology arrived in the SIXXI laboratory, in the form of a desktop printer (Ultimaker 2+) capable of producing objects with a maximum size of 20x20x20 cm.

3D printing technology has enabled a change of strategy: the 3D virtual modelling has been used for the direct “production” of miniature works, transforming the “reconstructive redrawing” from a virtual analytical tool into an instantaneous (and economic) means of production. Moreover, 3D printing technology has made it easier to understand very complex geometries (very thin and double-curved shells, variously bent and form-resistant slabs, “nameless” topologies), almost impossible to reproduce through the traditional techniques of model making.

4. RECONSTRUCTIVE 3D PRINTING

Testbed of the new “reconstructive technology” was the virtual modelling and 3D printing of a series of works by Sergio Musmeci and characterized by complex structural and architectural geometries.

The survey, carried out within the framework of the SIXXI3DLab, focused on the unbuilt projects, most difficult to understand that were accompanied by very few archival drawings, or those that even if were built were featured by

un modo di costruire, per migliaia di pezzi, unico al mondo. Troppo complesso per essere indagato tramite il disegno, il sistema inventato da Nervi è stato quindi il pretesto per immaginare un nuovo strumento “fisico” di supporto alle indagini: un “modello ricostruttivo” tagliato su misura per lo studio delle grandi strutture.

La mostra monografica sull'opera romana di Nervi, curata da Sergio Poretti e Tullia Iori per il Museo MAXXI di Roma nel 2010 ha costituito una straordinaria occasione di verifica sperimentale di questa idea. Per rappresentare, in mostra, il Palazzetto dello Sport, l'opera simbolo del Sistema Nervi, è stata presa la decisione di realizzare un grande plastico riprodotto anche il cantiere [5]. Il gigantesco modello (3,5 metri di diametro) si è rivelato da subito uno straordinario strumento di indagine: la sua costruzione – eseguita passo dopo passo secondo le fasi del “Sistema Nervi” – ha chiarito definitivamente non solo le più intime connessioni tra il comportamento strutturale e l'immagine architettonica della grande cupola, ma anche il peculiare processo di fabbricazione dei 1620 tavelloni, di cui la cupola si compone, attraverso il gioco di stampi e controstampi secondo la sequenza “nonna, mamma e figlia” [6]. Nonostante la sua efficacia analitica, i tempi e i modi di fabbricazione del modello – che ha richiesto 2 mesi di lavoro, troppi se confrontati agli 8 mesi nei quali è stato costruito il reale Palazzetto – lasciavano ancora aperto l'interrogativo sulle possibilità di un uso sistematico del “modello ricostruttivo” come strumento di indagine nello studio delle grandi strutture.

Per validare la tecnica è stato necessario aspettare ancora qualche anno, in attesa che l'avanzamento tecnologico offrisse adeguati strumenti. Finalmente, nel 2015, nel laboratorio SIXXI è arrivata la tecnologia della stampa 3D, sotto forma di una stampante da scrivania (Ultimaker 2+) capace di produrre oggetti delle dimensioni massime di 20x20x20 centimetri.

La tecnologia della stampa 3D ha permesso di cambiare strategia: il modello virtuale tridimensionale è stato utilizzato per la “produzione” diretta di opere in miniatura, trasformando il “ridisegno ricostruttivo” da strumento analitico virtuale in un mezzo di fabbricazione istantanea (ed economica). Inoltre, la tecnologia della stampa 3D ha permesso di rendere più facilmente comprensibili, e quindi analizzabili, geometrie molto complesse (gusci sottilissimi e a doppia curvatura, solette variamente piegate e resistenti per forma, topologie “senza nome”), quasi impossibili da riprodurre attraverso le tradizionali tecniche di fabbricazione dei modelli.

4. STAMPA 3D “RICOSTRUTTIVA”

Un banco di prova della nuova “tecnologia ricostruttiva” è stato, quindi, offerto dalla modellazione virtuale e dalla stampa 3D di una

so complex a geometry to remain still mysterious.

The surveys, led by Tullia Iori and Sergio Poretti, involved students from the master degree Architecture and Building Engineering within the Laboratory attached to course of “Architettura Tecnica 2” (prof. Tullia Iori) and from the master degree conducted within the SIXXI project (Architecture and Building Engineering, Building Engineering and Building Techniques). [Work of: F. Antonellis, S. De Meis, “Musmeci a Vicenza: opere e progetti (1952-1962)”, tutors: T. Iori, S. Poretti; N. Henderson, “Sergio Musmeci a Pietrasanta : architettura e costruzione dello stabilimento Raffo per la lavorazione del marmo”, tutor: T. Iori, co-tutor: I. Giannetti; F. Peggio, “Chiesa Sant’Alberto a Sarteano nella Scuola Italiana di Ingegneria (1969-1972)”, tutor: T. Iori, co-tutor: I. Giannetti; T. Bernabei, “Virtual Musmeci: the project for the Dannuziano Theatre in Pescara”, speaker: T. Iori, co-tutor: I. Giannetti.]

The research started in 2015 with the analysis of a series of buildings – the Church of San Carlo in the “Villaggio del Sole” in Vicenza, the Raffo plant in Pietrasanta, the Restaurant of the Swimming Stadium in Rome, the Church of Sant’Alberto in Sarteano – which, in their diversity, demonstrate experimentation on the main structural themes of Musmeci’s authorial research [7].

The Church of San Carlo in Vicenza was characterized by the spectacular geometry of the roof: a beams network, whose design follows, in plan, three different families of logarithmic spirals configuring, in space, a grid with triangular meshes. The “reconstructive model” allowed to deeply understand the structural geometry of the roof, by repeating the steps that Musmeci identified for the construction, briefly described in the calculation reports [4]. The 3D printing process, thanks to its peculiarities, is well-suited to simulate reinforced concrete structures. The FFF (Fused Filament Fabrication) printing technology presents, in fact, a series of analogies with the process of cast *in situ*. For the realization of the ribs, for example, it was necessary to use supports (a miniature version of the Innocenti tubular scaffolding) that allowed to hold the additive casting of the thermoplastic filament (PLA) which composed the model. Basically, it was possible to replicate on the printer plate, in a very reduced scale, crucial problems of the construction site in order to understand the craftsmanship and “sculptural” nature of a work, at the same time characterized by a rigorous mathematical genesis.

For the roofing of the Raffo plant in Pietrasanta and that of the “Stadio del Nuoto” restaurant in Rome, Musmeci focused on the theme of thin slabs as form-resistant structures: the size and rhythm of the folds, and counter folds, seem to change in order to react punctually to the stresses, linking the structural

serie di edifici progettati da Sergio Musmeci, caratterizzati da geometrie strutturali e architettoniche molto complesse. L'indagine, condotta nell'ambito del SIXXI3DLab, si è concentrata sui progetti rimasti sulla carta più difficili da comprendere, quelli corredati da pochi disegni d'archivio, o su opere realizzate ma di geometria così articolata da risultare comunque oscura.

L'indagine, guidata da Tullia Iori e Sergio Poretti, ha coinvolto gli studenti del corso di laurea magistrale a ciclo unico in Ingegneria Edile-Architettura nell'ambito del Laboratorio annesso all'insegnamento di Architettura Tecnica 2 (prof. Tullia Iori) e delle tesi di laurea SIXXI (Ingegneria Edile-Architettura, Ingegneria dell'edilizia e Ingegneria e Tecniche del Costruire). [Tesi di: F. Antonellis, S. De Meis, “Musmeci a Vicenza: opere e progetti (1952-1962)”, relatori: T. Iori, S. Poretti; N. Henderson, “Sergio Musmeci a Pietrasanta : architettura e costruzione dello stabilimento Raffo per la lavorazione del marmo”, relatore: T. Iori, correlatore: I. Giannetti; F. Peggio, “La Chiesa Sant’Alberto a Sarteano nella Scuola Italiana di Ingegneria (1969-1972)”, relatore: T. Iori, correlatore: I. Giannetti; T. Bernabei, “Musmeci Virtuale: il progetto per il Teatro Dannuziano a Pescara”, relatore: T. Iori, correlatore: I. Giannetti.]

La ricerca si è avviata, nel 2015, con l'analisi di una serie di opere realizzate – la chiesa di San Carlo al Villaggio del Sole a Vicenza, lo stabilimento Raffo per la lavorazione del marmo a Pietrasanta, il ristorante dello Stadio del nuoto a Roma, la chiesa di Sant’Alberto a Sarteano – che, nella loro diversità, seguono alcune delle linee di sperimentazione principali della ricerca di Musmeci [7].

La chiesa di San Carlo a Vicenza è caratterizzata dalla spettacolare copertura: una tenda composta da un reticolo di travi in cemento armato a maglie triangolari, generato da tre famiglie di spirali logaritmiche. Elaborando il “modello ricostruttivo” è stato possibile comprendere la geometria strutturale della copertura, ripetendo in sequenza i passaggi individuati da Musmeci per la costruzione, sinteticamente descritti nella relazione di calcolo [4]. Il processo di stampa 3D, per le sue peculiarità, si presta particolarmente a simulare le strutture in cemento armato. La tecnologia di stampa FFF (Fused Filament Fabrication) presenta, infatti, una serie di analogie con il processo del getto in opera. Per la realizzazione delle nervature è stato, ad esempio, necessario prevedere supporti (una versione in miniatura del ponteggio Innocenti) che permettevano di sostenere la colatura additiva del filamento di termoplastica (PLA) di cui si compone il modello. Praticamente è stato possibile replicare sul piatto della stampante, sebbene in versione molto ridotta, le difficoltà esecutive registrate in cantiere e comprendere la natura artigianale e “scultorea” di

expressiveness to the variations of the static problem. The reconstructive model allowed to verify, slab by slab, fold by fold, the complex geometry, adding a further geometric and constructive interpretation, alongside the pure static one. With these purposes, the design of the virtual 3D model of the Raffa plant in Pietrasanta focused on the base element of the roof, which is composed of 11 folds. During the virtual analysis process, it emerged that all the faces of the slabs have an inclination between 10° and 30° . This allowed to launch the 3D printing of the element in a vertical position, without any supports.

un'opera per altri versi caratterizzata da una rigorosa genesi matematica. Per la copertura dello stabilimento Raffa a Pietrasanta e per quella del ristorante dello Stadio del Nuoto a Roma, Musmeci elabora il tema della soletta sottile piegata, resistente per forma: l'ampiezza e il ritmo delle pieghe e delle contropieghe si adattano puntualmente alle sollecitazioni, legando l'espressività strutturale alle variazioni del problema statico. Il modello ricostruttivo ha consentito di verificare, tridimensionalmente, soletta per soletta, piega per piega, la complessa geometria, aggiungendo alla lettura puramente statica

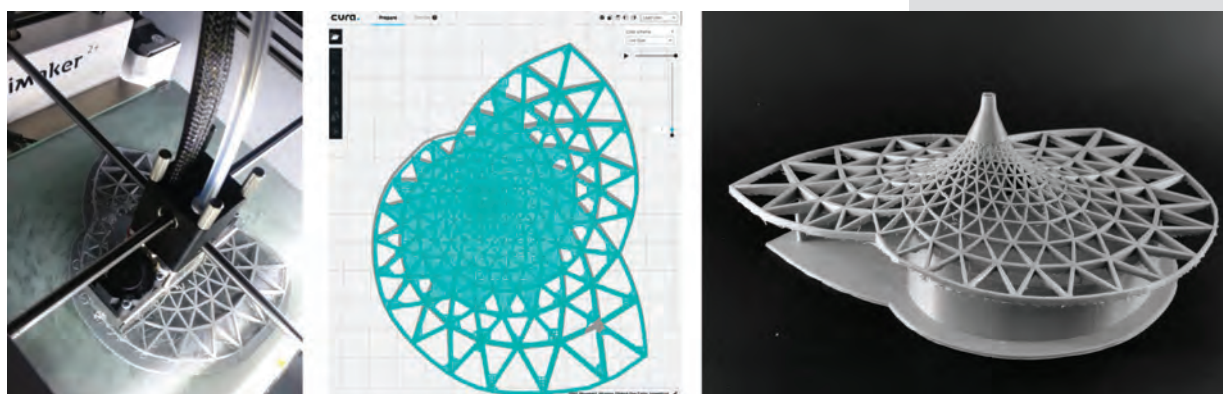


Figure 3. S. Carlo church in Vicenza: 3D printed model 3D by F. Antonellis e S. De Meis (SIXXI3DLab).

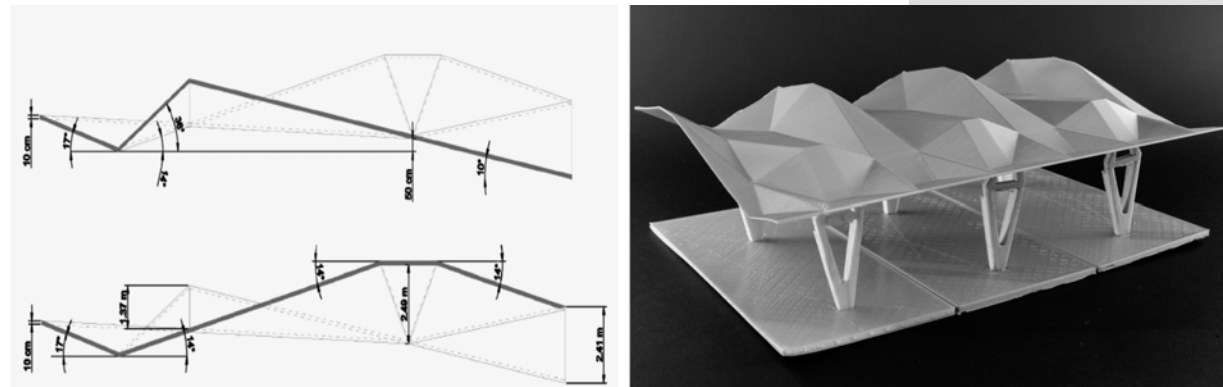


Figure 4. Raffa plant in Pietrasanta: construction drawing and modello 3D printed model by N. Henderson (SIXXI3DLab).

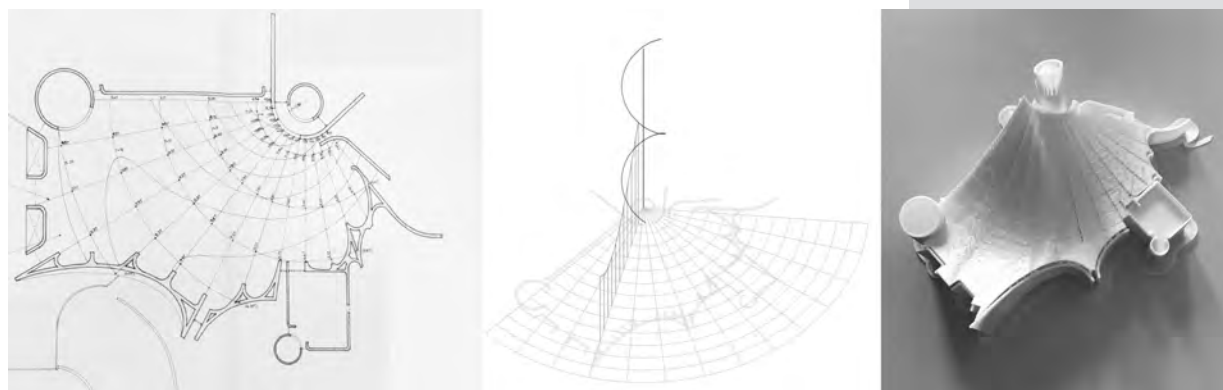


Figure 5. Church Sant'Alberto in Sarteano: archival drawing; reconstructive axonometry; 3D printed model by F. Peggio (SIXXI3DLab).

Even if this solution has no correspondances with the practice of the real construction site, it was possible thanks to the particular choice of the inclination angles of the slab's face: during the actual construction phase, the same low inclination (less than 35°) allowed to cast in place concrete on an intradosal wooden boarding, without any lateral element to prevent the slipping of the concrete.

The tensile structure of the Church of Sarteano (1969), one of the most innovative structural geometries conceived by Musmeci, was investigated combining the new technique of the 3D printed reconstructive model with the traditional tool of reconstructive axonometry.

In order to reproduce three-dimensionally the tensile structure of the roof – a cables net laid radially to support a thin double-curved concrete shell, reinforced by a double wire mesh – it was necessary to decode and replicate step by step the geometric genesis of the roofing, synthetically illustrated in the archival documents [Fondo Musmeci – Zanini, Fondazione MAXXI, Centro archivi architettura, Roma. The archival research was carried out by the student Flavia Peggio as part of her degree thesis]. Once traced the funicular curve of the suspension cables and, at the same time, the helix that, wrapping around the cylindrical volume of the bell tower, represents the path on which the cables themselves hook, at different heights, all these curves were placed in the 3D space.

Then a series of cables, all of the same length, was anchored to the helix, building up a first virtual surface with a circular edge. Then, once the real wall perimeter was extruded on the “z” axis of the same virtual model, the surface was “cutted” by its real border.

The thrust towards the inside of the hanging shell, which is different at every point, is countered by the particular geometry of the walls, which, thanks to their large cavities, contributed to centre the weight and, with their inverse curvatures, stabilise the horizontal component of that force.

Moreover, “reconstructive 3D printing” opened new research possibilities about Musmeci's unbuilt projects.

In this case, the model, replacing the construction site, verifies the feasibility of the project. For example, for the visionary project of the Cagliari Opera Theatre, conceived by Musmeci and Francesco Palpacelli in 1964 for a design tender, the shell was summarily described by the freehand drawings and in the rudimentary study model, appearing like a sheet lying freely on supports, without rules.

Thanks to the spatial layout of the sequence of contour lines, shown two-dimensionally in the archival drawings, with the Rhino software it was

L'analisi della geometria strutturale e delle modalità costruttive. Con questi obiettivi, il modello dello stabilimento di Pietrasanta si è concentrato sul modulo di base della copertura, composto da 11 falde, che si ripete identico più volte. È emerso durante il processo di analisi virtuale che tutte le falde presentano un'inclinazione compresa tra i 10° e i 30°: questo ha consentito la stampa 3D in posizione verticale, senza supporti. E, anche se questa soluzione non corrisponde in alcun modo alla pratica del cantiere, è stata resa possibile proprio grazie alla particolare scelta degli angoli d'inclinazione delle falde: e in fase di costruzione reale, proprio questa inclinazione contenuta (minore di 35°) ha permesso di eseguire il getto su un tavolato intradossale di appoggio, senza necessità di spondine per evitare lo scivolamento del calcestruzzo.

La tensostruttura della Chiesa di Sarteano (1969), una delle più innovative geometrie strutturali disegnate da Musmeci, è stata indagata combinando la nuova tecnica del modello ricostruttivo prodotto in stampa 3D, con il consolidato strumento dell'assonometria ricostruttiva. Per ricostruire tridimensionalmente la tensostruttura di copertura – costituita da un sistema di cavi tesi disposti radialmente a sostegno di un guscio sottile a doppia curvatura in calcestruzzo, armato da una doppia rete metallica – è stato, infatti, necessario decifrare e replicare l'esatta sequenza della genesi geometrica della copertura, sinteticamente illustrata nei documenti di archivio. [Fondo Musmeci – Zanini, Fondazione MAXXI, Centro archivi architettura, Roma. Le ricerche sono state svolte dalla studentessa Flavia Peggio nell'ambito della sua tesi di laurea]. Riprodotta la funicolare dei cavi di sospensione e, allo stesso tempo, l'elica che, avvolgendosi intorno al volume cilindrico del campanile, costituisce il tracciato sul quale i cavi stessi si agganciano, a diverse quote, queste curve sono state posizionate nello spazio tridimensionale. Ancorando poi all'elica una trama di cavi identici, tutti della stessa lunghezza, si è costruita virtualmente una prima superficie con bordo circolare; quindi, facendo innalzare in verticale, nello stesso modello virtuale, il reale perimetro murario, la superficie, intersecata da quest'ultimo, viene “smerlata” dal vero bordo. La spinta verso l'interno della tenda appesa, diversa in ogni punto, viene contrastata dalla particolare geometria dei muri di perimetro, che grazie agli ampi cavetti centrano il peso e con la loro curvatura inversa stabilizzano la componente orizzontale della forza. La stampa 3D “ricostruttiva” ha aperto, infine, nuove possibilità nello studio dei progetti non realizzati di Musmeci. In questo caso, il modello, sostituendosi in un certo senso al cantiere, verifica la fattibilità del progetto: a esempio, nel visionario teatro dell'opera di Cagliari, immaginato da Musmeci e Francesco

possible to generate a NURBS corresponding to a “network of curves”. This network, after being transformed into a triangular mesh and sent to the 3D printer, generated exactly the roofing visible in the model, revealing Musmeci’s awareness and analytical control over the entire process.

5. CONCLUSIONS: WHAT A FUTURE FOR THE SIXXI3DLAB?

The “reconstructive redesign” and the “reconstructive model” tell a story of investigations that began with Sergio Poretti’s intuitions: from Autocad 14 to the 3D printer, the journey has been long, but the tools used by the construction historian continue to evolve and must be adapted to this particular research, making the most of all kinds of innovations.

Best tools are those which, in addition to support research, contribute to the dissemination of its outcomes: so, reconstructive models have naturally been transformed, over the years, into didactic devices. Through their assembly (as construction games), they have become suitable for intuitively communicating, even to the youngest students, the construction processes and the “inventions” of the structural forms of Italian School of Engineering. [8].

Palpacelli per un concorso del 1964, il guscio di copertura era sommariamente descritto solo dai disegni a mano libera e dal rudimentale plastico di studio, sembrando un lenzuolo adagiato liberamente sui supporti, senza regole. Attraverso la disposizione spaziale della successione delle curve di livello, riportate bidimensionalmente nei disegni di archivio, con il software Rhino è stato invece possibile generare una NURBS corrispondente alla “rete di curve” che, dopo essere stata trasformata in una mesh triangolare e “data in pasto” alla stampante, ha generato esattamente la copertura visibile nel plastico, rivelando la consapevolezza e il controllo analitico di Musmeci sull’intero processo.

5. CONCLUSIONI: QUALE FUTURO PER IL SIXXI3DLAB?

Il “ridisegno ricostruttivo” e il “modello ricostruttivo” raccontano una storia di indagini avviate dalle intuizioni di Sergio Poretti: dall’Autocad 14 alla stampante 3D il viaggio è stato lungo ma gli strumenti a disposizione dello storico della costruzione continuano a evolvere e vanno adattati a questa peculiare ricerca, sfruttando al meglio tutti i tipi di innovazione. E gli strumenti migliori sono quelli che, oltre alla ricerca,



Figure 6. SIXXI Games, “reconstructive” construction games (SIXXI3DLab).

6. REFERENCES

- [1] Iori T., Poretti S., *L’ingegneria italiana tra positivismo e umanesimo*, in T. Iori, S. Poretti (eds.), *SIXXI 4. Storia dell’ingegneria strutturale in Italia*, pp. 7-25. Roma: Gangemi, 2017.
- [2] Poretti S., *Architettura e struttura in Italia negli anni cinquanta e sessanta*, in M. Pogacnik (ed.), *Adalberto Libera, Sergio Musmeci, Il Palazzo della Regione a Trento. Tra antico decoro e nuove figure strutturali*. Rovereto: Nicolodi, 2007.
- [3] Poretti S., *Struttura e architettura nel modernismo italiano*, in T. Iori, S. Poretti (eds.),

favoriscono la disseminazione: è il caso dei modelli ricostruttivi che, con il tempo, si sono trasformati naturalmente in dispositivi didattici adatti a comunicare intuitivamente, attraverso il gioco di montaggio, anche agli allievi più giovani, i processi costruttivi e le “invenzioni” delle forme strutturali della Scuola italiana di Ingegneria [8].

Ingegneria italiana, monographic issue of “Rassegna di architettura e urbanistica”, 121-122, p. 21. Roma: Kappa, 2007.

- [4] Capurso G., Giannetti I., *Struttura e Architettura nella Scuola Italiana di Ingegneria. Il ridisegno ricostruttivo e la stampa 3D come strumenti di conoscenza*, in F. Cuboni, G. Desogus, E. Quaquero (eds.), *Edilizia Circolare. Costruire nel terzo millennio*, pp. 98-107. Monfalcone: Edicom Edizioni, 2018.
- [5] Iori T., *L'apoteosi del sistema Nervi*, in T. Iori, S. Poretti (eds.), *SIXXI 4. Storia dell'ingegneria strutturale in Italia*, pp. 80-97. Roma: Gangemi, 2017.
- [6] Iori T., *Pier Luigi Nervi Annibale Vitellozzi Palazzetto dello sport a Roma, un prototipo ripetibile e a buon mercato / The Palazzetto dello Sport in Rome*, «Casabella», 782, ottobre 2009, pp. 50-65.
- [7] Iori T., Poretti S., *Il linguaggio delle strutture*, in T. Iori, S. Poretti (eds.), *SIXXI 2. Storia dell'ingegneria strutturale in Italia*, pp. 7-24. Roma: Gangemi, 2015.
- [8] Iori T., Giannetti I., Capurso G., *SIXXIGames: serious games to educate young architects and structural engineers*, ICSA19, 4th International Conference on Structure and Architecture, Proceedings (in press).