TECHNE

Journal of Technology for Architecture and Environment

17 | 2019

ORIZZONTALITÀ VERTICALITÀ IN ARCHITETTURA

horizontality/verticality in architecture

Poste Italiane spa - Tassa pagata - Piego di libro
Aut. n. 072/DCB/FII/VF del 31.03.2005

on line ISSN 2239-0243

FIRENZE UNIVERSITY PRESS

SITdA

TECHNE

Journal of Technology for Architecture and Environment

Issue 17
Year 9

Director
Maria Teresa Lucarelli

Scientific Committee
Tor Broström, Gabriella Caterina, Pier Angiolo Cetica, Gianfranco Dioguardi, Stephen Emmitt, Paolo Felli, Luigi Ferrara, Cristina Forlani, Rosario Giuffré, Helen Lochhead, Mario Losasso, Lorenzo Matteoli, Gabriella Peretti, Fabrizio Schiaffonati, Maria Chiara Torricelli

Editor in Chief
Emilio Faroldi

Editorial Board
Ernesto Antonini, Eliana Cangelli, Tiziana Ferrante, Massimo Lauria, Elena Mussinelli, Riccardo Pollo, Marina Rigillo

Assistant Editors
Alessandro Claudi de Saint Mihiel, Paola Gallo, Francesca Giglio, Maria Pilar Vettori

Editorial Assistants
Viola Fabi, Serena Giorgi, Luca Magnani, Valentina Puglisi, Flavia Trebicka

Graphic Design
Veronica Dal Buono

Editorial Office
c/o SIT*d*A onlus,
Via Toledo 402, 80134 Napoli
Email: redazionetechne@sitda.net

Issues per year: 2

Publisher
FUP (Firenze University Press)
Phone: (0039) 055 2743051
Email: journals@fupress.com

Journal of SIT*d*A (Società Italiana della Tecnologia dell'Architettura)

SITdA

Società Italiana della Tecnologia
dell'Architettura

ORIZZONTALITÀ/VERTICALITÀ IN ARCHITETTURA
HORIZONTALITY/VERTICALITY IN ARCHITECTURE

NOTA *NOTE*

7 Nota
Note
Maria Teresa Lucarelli

PROLOGO *PROLOGUE*

9 Orizzontalità e verticalità. L'architettura tra radicamento alla terra e conquista del cielo
Horizontality and verticality. Low level and high rise architecture
Emilio Faroldi

DOSSIER a cura di/*edited by* Eliana Cangelli, Maria Pilar Vettori

16 L'architettura tra orizzontalità e verticalità
The architecture between horizontality and verticality
Eliana Cangelli, Maria Pilar Vettori

22 Etica di paesaggio. Un pensiero senza bordi
Landscape ethics. A borderless way of thinking
Massimo Venturi Ferriolo

29 Dispositivi ibridi. Oltre l'idea di verticale e orizzontale
Hybrid dispositifs. Beyond the idea of vertical and horizontal
Paola Scala

35 Mischbebauung e la città verticale
Mischbebauung and the vertical city
Adalberto Del Bo

40 Roma babilonia
Rome babylon
Rosario Pavia

47 Orizzontalità/verticalità: percorsi di ricerca e temi per il progetto
Horizontality/verticality: research paths and themes for the project
Aldo Norsa

SCATTI D'AUTORE *ART PHOTOGRAPHY* a cura di/*edited by* Marco Introini

52 Orizzontalità e verticalità: Hong Kong Island e Brasilia
Horizontality and verticality: Hong Kong Island and Brasilia

CONRIBUTI ***CONTRIBUTIONS***

SAGGI E PUNTI DI VISTA *ESSAYS AND VIEWPOINTS*

68 Going underground. Nuove dimensioni per nuovi modelli urbani
Going underground. New dimensions for new urban models
Filippo Lambertucci

78 Ambiguità degli effetti delle discipline regionali sul consumo di suolo zero e sulla verticalità in architettura
Ambiguous effects of regional regulations on zero land consumption and on verticality in architecture
Francesca Moraci, Celestina Fazia

86 Milano verticale/orizzontale: note sulla qualità urbana nel ciclo trasformativo recente
Vertical/horizontal Milan: notes on urban quality in the recent transformation cycle of the city
Bertrando Bonfantini

92 Il progetto contemporaneo di edificio alto residenziale, tra densità e intensità
The contemporary project of the tall residential building, between density and intensity
Matteo Moscatelli

100 Il condominio 'alto e snello' cinese
The chinese 'high and slender' condominium
Luca Maria Francesco Fabris, Gerardo Semprebon

110 Progettare i grattacieli, oggi. Osservazioni sull'evoluzione tecnologica e morfologica degli edifici alti
Designing contemporary skyscrapers. Remarks on the technical and architectural evolution of tall buildings
Dario Trabucco

119 Orizzontale vs verticale. Lo spazio pubblico in sezione
Horizontal vs vertical. The public space in section
Filippo Orsini, Pasquale Mei

133 Industria 4.0 e manifattura in città: uno sviluppo verticale possibile
Industry 4.0 and manufacturing in the city: a possible vertical development
Andrea Ciaramella, Alberto Celani

143 L'approccio sistemico nella progettazione ambientale sostenibile: richiami all'ecologia dei sistemi viventi
The systemic approach in sustainable environmental planning: references to the ecology of living systems
Matteo Clementi, Carlotta Fontana

152 Orizzontalità e verticalità nelle architetture per la salute
Horizontality and verticality in architectures for health
Stefano Capolongo, Grazia Giulia Cocina, Marco Gola, Gabriella Peretti, Riccardo Pollo

RICERCA E SPERIMENTAZIONE *RESEARCH AND EXPERIMENTATION*

161 Riciclare l'urbano. Strategie rigenerative per la "città orizzontale"
Urban recycle. Regenerative strategies for the "horizontal city"
Vincenzo Gioffrè

171 *Baugruppen*. Innovazione attraverso infrastrutture collaborative
Baugruppen. Innovation through collaborative infrastructures
Virginia De Jorge-Huertas

183 Strategie di progettazione ambientale in contesti urbani a diversa densità
Environmental design strategies in different-density-urban contexts
Giacomo Chiesa

191 Parchi ed involucri: riconcettualizzando la confluenza tra interesse pubblico e privato ad HK
Parks and envelopes: reconceptualizing the intersection of public and private interests in HK
Per-Johan Dahl

202 Effetti energetico-ambientali della densità edilizia mediante lo studio dell'accesso solare
Energy effects of buildings density with solar access analysis
Matteo Iommi

213 Immaginare il settore delle costruzioni nel 2050. Innovazione tecnologica e verticalità
Envision the construction sector in 2050. Technological innovation and verticality
Angelo Figliola

222 L'edificio residenziale alto nello sviluppo della città cinese. Un'esperienza di ricerca
The high rise building in the development of the chinese city. A research experience
Spartaco Paris, Roberto Bianchi

232 Up-one: criticità nella sopraelevazione degli edifici residenziali della seconda metà del '900
Up-one: problems issuing from upward extensions of 1950-1900 residential buildings
Angelo Bertolazzi, Marco Campagnola, Giorgio Croatto, Agata Maniero, Umberto Turrini, Alberto Vignato

241 Rain(e)scape. La presenza dell'acqua come ordinamento e figura. Il caso degli stagni di Levante a Ostia
Rain(e)scape. The presence of water as order and figure. The case study of stagni di Levante in Ostia
Manuela Raitano

251 Interpretare l'orizzontalità. Centri minori, strategie di intervento e sviluppo sostenibile
Interpreting horizontality. Minor centers, intervention strategies and sustainable development
Mariangela Bellomo, Angela D'Agostino

264 *Rooftop architecture e urban roofscape*: azioni trasformative per la nuova città verticale
Rooftop architecture and urban roofscape: designing the new vertical city
Oscar Eugenio Bellini, Martino Mocchi

278 Densità - intensità. Elementi materiali ed immateriali per una valutazione della qualità urbana
Density - intensity. Material and immaterial elements in assessing urban quality
Maria Federica Ottone, Roberta Cocci Grifoni, Graziano Enzo Marchesani, Dajla Riera

DIALOGHI *DIALOGUES* a cura di/*edited* by Maria Pilar Vettori

289 Orizzontalità/verticalità
Horizontality/verticality
Un Dialogo tra | *A Dialogue between* Azzurra Muzzonigro e | *and* Stefano Boeri

300 RECENSIONI *REVIEWS* a cura di/*edited* by Francesca Giglio

302 Jan Gehl, *Città per le persone*
Serena Viola

304 Matteo Moscatelli, *L'edificio alto residenziale nell'architettura europea. 11 casi contemporanei*
Laura Calcagnini

306 Carlo Ratti, Mattew Claudel, *La città di domani*
Domenico D'Olimpo

INNOVAZIONE E SVILUPPO INDUSTRIALE *INNOVATION AND INDUSTRIAL DEVELOPMENT*

a cura di/*edited* by Alessandro Claudi de Saint Mihiel

308 La cultura dell'innovazione per la trasformazione della realtà
The culture of innovation for the transformation of reality
Alessandro Claudi de Saint Mihiel

Immaginare il settore delle costruzioni nel 2050. Innovazione tecnologica e verticalità

Angelo Figliola,
Dipartimento di Pianificazione, design, tecnologia dell'architettura, Sapienza Università di Roma, Italia
angelo.figliola@uniroma1.it

Abstract. Il contributo propone una riflessione sul ruolo dell'innovazione tipologica e tecnologica nella progettazione e realizzazione di architetture verticali attraverso l'analisi di scenari tecnologici del 2050. Nell'era dell'Antropocene, dove gli effetti dell'azione umana condizionano l'ambiente terrestre, è necessario chiedersi come possiamo implementare i processi progettuali e costruttivi per dare vita a modelli architettonici performativi che possono influenzare positivamente la tecnosfera. Da qui la necessità di studiare metodologie operative innovative attraverso le quali definire nuovi paradigmi progettuali. A riguardo, il focus della ricerca viene posto sulla relazione che sussiste tra computazione, fabbricazione digitale e l'implementazione di modelli di sviluppo verticali esistenti.

Parole chiave: Modelli di sviluppo; Design generativo; Fabbricazione digitale e robotica; Prefabbricazione; Ottimizzazione.

Antropocene, tra scenari mutevoli e scarsità di risorse

Nell'era dell'Antropocene (Crutzen, 2005), in cui gli effetti dell'azione umana condizionano fortemente l'ambiente terrestre, è necessario avviare una riflessione transdisciplinare sul futuro del settore architettonico, ingegneristico e delle costruzioni, AEC, per dare vita a modelli architettonici innovativi, capaci di interpretare i cambiamenti in atto. Modelli di sviluppo informati e performativi attraverso i quali colonizzare le città e influire positivamente sulla tecnosfera, fornendo risposte tangibili alle criticità dell'era attuale. Oltre al noto problema dei consumi energetici e della scarsità delle risorse che vede il settore AEC responsabile del 50% dell'uso finale delle risorse energetiche e del 36% della produzione totale di CO2 nei paesi dell'UE (Mardiana & Riffat, 2015), una delle grandi sfide che ci aspetta riguarda la crescita demografica, l'urbanizzazione e il consumo di suolo. I numeri che descrivono il problema possono essere riassunti come segue: nel 2050 la popolazione mondiale crescerà fino a 9,9 miliardi di persone, di cui il 71% vivrà in aree urbane; sarà necessario coltivare 1.000.000.000 ettari di terreno per soddisfare il bisogno di cibo della popolazione mondiale (Dep. of Economics and Social Affairs, 2003). Il breve escursus effettuato sulle criticità dell'antropocene, è complementare alla curva esponenziale che descrive l'odierno processo di innovazione tecnologica: *supercomputing*, intelligenza artificiale (AI), macchine autonome, tecnologie manufatturiere innovative e mobilità elettrica sono solo alcuni dei *megatrend* emersi durante la conferenza di *Davos* 2018[1] in grado di giocare un ruolo fondamentale per il futuro dell'umanità e per l'evoluzione della stessa. Alcuni di questi topics sono parte di uno studio condotto da Arup che ha portato alla progettazione di un'applicazione digitale definita come *Drivers of Change*[2] nel quale vengono delineate le linee di sviluppo future che potrebbero avere un impatto significativo sull'ambiente costruito in relazione a macro-categorie d'interesse. Come l'innovazione tecnologica può implementare i processi progettuali al fine di individuare nuovi modelli di sviluppo alle differenti scale progettuali? La dirompete evoluzione tecnologica è in possesso di una forza che sta trasformando ogni aspetto della società, dall'economia alla cultura, dalla sfera pubblica a quella privata. A riguardo, è necessario avviare una riflessione su un sistema di operare innovativo (Ito & Howe, 2016), propedeutico alla creazione di nuovi modelli che possono offrire delle risposte alle problematiche sopra elencate.

Verticalità in architettura

Una delle sfide riguarda lo studio di modelli di sviluppo verticale delle città che possono essere immaginati in risposta alle criticità dell'antropocene. La tipologia di edificio a torre nasce alla fine del XIX secolo grazie alle ricerche condotte dalla scuola

Envision the construction sector in 2050. Technological innovation and verticality

Abstract. The contribution proposes a reflection on the role of typological and technological innovation in the design and implementation of vertical architectures through the analysis of technological scenarios of 2050. In the Anthropocene era, where the effects of human action shape the terrestrial environment, it is necessary to ask ourselves how we can implement the design and constructive processes to give life to architectural performative models that can positively influence the technosphere. Hence the need to study innovative methods through which to define new design paradigms. About that, the focus of the research is placed on the relationship that exists between computation, digital fabrication and the implementation of existing vertical models of development.

Keywords: Models of development; Generative design; Digital and robotic manufacturing; Prefabrication; Optimization.

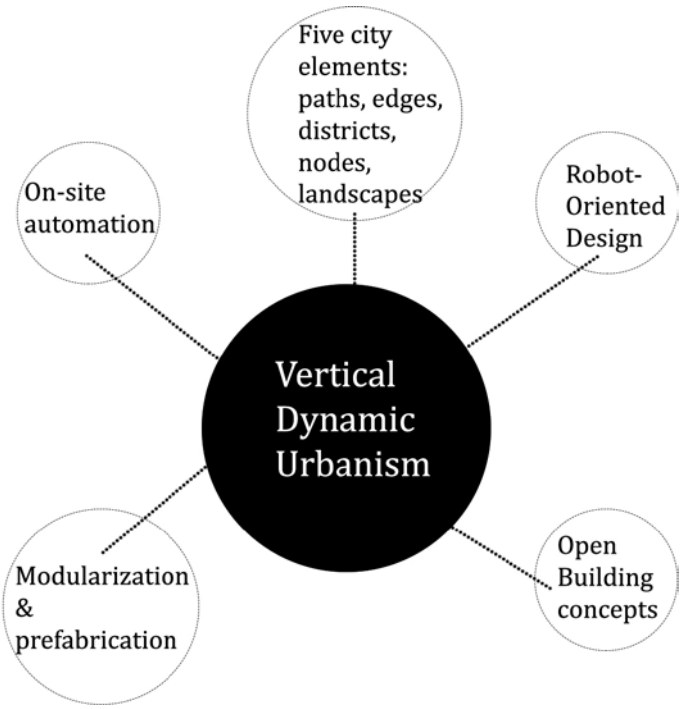
Anthropocene, between changing scenarios and scarcity of resources

In the Anthropocene era (Crutzen, 2005), in which the effects of human action strongly influence the terrestrial environment, it is necessary to start a transdisciplinary reflection on the future of the architectural, engineering and construction sector, AEC, to give life to innovative architectural models capable of interpreting the changes taking place. Informed and performative models of development through which to colonize cities and positively influence the technosphere, providing tangible responses to the critical issues of the current era. In addition to the well-known problem of energy consumption and scarcity of resources, which sees the AEC sector responsible for 50% of the final use of energy resources and 36% of total CO2 production in the EU countries (Mardiana & Riffat, 2015), one of the great challenges that awaits us is population growth, urbanization and land consumption. The numbers describing the problem can be summarized as follows: in 2050 the world population will grow up to 9.9 billion people, of which 71% will live in urban areas; it will be necessary to cultivate 1,000,000,000 hectares of land to meet the world's food needs (Dept. of Economics and Social Affairs, 2003). The brief excursus on the anthropocene's criticalities is complementary to the exponential curve that describes today's technological innovation process: supercomputing, artificial intelligence (AI), autonomous machines, innovative manufacturing technologies and electric mobility are just some of the megatrends that emerged during the Davos 2018 conference[1] able to play a fundamental role for the future of humanity and for

ISSN online: 2239-0243 | © 2019 Firenze University Press | http://www.fupress.com/techne
DOI: 10.13128/Techne-23900

01 | *Vertical Dynamic Urbanism*, diagramma concettuale, elaborazione di Angelo Figliola
Vertical Dynamic Urbanism, conceptual diagram, elaboration by Angelo Figliola

| 01



di Chicago e, sebbene la tecnologia sia avanzata e lo stile architettonico degli edifici alti si sia evoluto, rimane uno degli emblemi della modernità come rappresentazione della sua produzione culturale e tecnologica (Erdin, 2013). A testimonianza di ciò vi è il fatto che il *concept* architettonico e strutturale è ancora legato a concetti chiave propri della modernità, quali: la standardizzazione dei sistemi tecnologici; le strutture modulari e ortogonali a griglia; l'utilizzo del cemento armato e dell'acciaio; la rigida suddivisione tra spazio servito e spazio servente, tra interno ed esterno, tra struttura e involucro. Come afferma Aiello nella pubblicazione *Skyscraper for the XXI Century* (2008), la progettazione di edifici a torre è stata ridotta nel tempo a una serie di assiomi binari, come torre e città, circolazione e abitazione, struttura e involucro a scapito di una visione sistemica volta a integrare gli elementi sopra elencati. In sintesi, nonostante la complessità dell'epoca odierna la tipologia a torre è ancora basata sullo stesso principio regolatore: impilare verticalmente una serie di piani e raggiungere efficienze spaziali tali da aumentare la superficie utile (Khayal, 2017). La post-modernità caratterizzata da molteplicità e frammentazione della realtà, rende inadeguata ogni dimensione unitaria e statica, dalla progettazione alla costruzione. Lo scenario sopra descritto è il preludio alla definizione di sistemi innovativi, aperti ed eterogenei, in grado di adattarsi alle condizioni mutevoli. Come per i movimenti utopici degli anni '60 e '70, oggi la sperimentazione tipologica e tecnologica gioca un ruolo chiave nell'implementazione di modelli verticali innovativi e caratterizzati da una spiccata ecologia adattiva (Spyropoulos, 2013). Ricerche e studi su modelli di sviluppo verticali basati sulle logiche dell'ecologia adattiva sono condotte presso la AA di Londra e il *Design Research Laboratory.* Focus delle sperimentazioni è l'impiego di logiche algoritmiche di generazione formale e l'esplorazione di sistemi organizzativi a metafora naturale nel processo progettuale. Un ulteriore modello visionario è stato proposto dallo studio *Arup*[3] che ha immaginato e descritto il grattacielo del futuro partendo dall'analisi di alcuni trend di innovazione tecnologica basati su degli assiomi progettuali: adattabilità e modularità, energia e risorse, reazione e mutamento, inclusione e integrazione (Cangelli, 2015). Un ulteriore passo avanti è stato compiuto con il concept di *Vertical Dynamic Urbanism* (Hu *et al.*, 2018) (Fig. 1) è l'introduzione di una relazione sistemica tra interpretazione cognitiva del concetto di città da parte dell'utente; concetto di *open-building*; modularità e prefabbricazione; *robot-oriented design* e automazione del cantiere. In risposta alle criticità dell'antropocene, i grattacieli performativi rappresentano un modello

its evolution. Some of these topics are part of a study conducted by Arup that led to the design of a digital application defined as *Drivers of Change*[2] in which the lines of future development are outlined that could have a significant impact on the environment built in relation to macro-categories of interest. How can technological innovation implement design processes in order to identify new models of development at the different design scales? The disruptive technological evolution is in possession of a force that is transforming every aspect of society, from economy to culture, from the public to the private sphere. About that, it is necessary to start a reflection on an innovative method (Ito & Howe, 2016), preparatory to the creation of new models that can provide answers to the problems listed above.

Verticality in architecture

One of the challenges is the study of models of vertical development of cities that can be imagined in response to the criticality of the anthropocene. The tower building typology was born in the late nineteenth century thanks to research conducted by the School of Chicago and, although the technology is advanced, and the architectural style of tall buildings has evolved, remains one of the emblems of modernity as a representation of its cultural production and technology (Erdin, 2013). Proof of this is the fact that the architectural and structural concept is still linked to key concepts typical of modernity, such as: the standardization of technological systems; modular and orthogonal grid structures; the use of reinforced concrete and steel; the rigid division between served and serving space, between inside and outside, between structure and envelope. As Aiello states in the publication *Skyscraper for the XXI Century* (2008), the design of tower buildings has been reduced over time to a series of binary axioms, such as tower and city, circulation and housing, structure and building envelope at the expense of a systemic vision aimed at integrating the elements listed above.. In summary, despite the complexity of today's era, the tower type is still based on the same regulatory principle: vertically stacking a series of floors and achieving spatial efficiencies such as to increase the useful surface (Khayal, 2017). Post-modernity, characterized by multiplicity and fragmentation of reality, makes every unitary and static dimension inadequate, from design to construction. The scenario described above is the prelude to the definition of innovative, open and heterogeneous systems, able to adapt to changing conditions. As for the utopian movements of the 60s and 70s, today typological and technological experimentation plays a key role in the implementation of innovative vertical models characterized by a marked adaptive ecology (Spyropoulos, 2013). Research and studies on vertical development models based on the logic of adaptive ecology are conducted at the AA London, Design Research Laboratory. Experimental focus is the use of algorithmic logics of formal generation and the exploration of organizational systems based on natural principles in the design process. A further visionary model was proposed by Arup[3], which imagined and described the skyscraper of the future starting from the analysis of some technological innovation trends based on the following design axioms: adaptability and modularity, energy and resources, re-

di sviluppo urbano in grado di adattarsi in maniera responsiva rispetto agli stimoli che provengono dall'ambiente esterno, di lasciare uno spazio produttivo alla scala urbana proponendo nuove autostrade aeree adattandosi alle esigenze mutevoli attraverso continue variazioni del layout architettonico. Partendo da questo excursus, il contributo analizza una serie di innovazioni tecnologiche in grado di implementare e innovare i modelli architettonici sopra descritti nella fase costruttiva.

Il ruolo dell'innovazione tecnologica: dalla progettazione alla costruzione

Nell'ambito delle innovazioni tecnologiche è possibile evidenziare due principali macro-aree di indagine in grado di impattare significativamente nella progettazione e costruzione di architetture verticali: nella fase di progettazione, l'uso massiccio del processo generativo e dell'AI permette di esplorare codici formali innovativi risultanti dal rapporto tra generazione formale e ottimizzazione delle prestazioni; nella fase costruttiva il focus viene posto sul ruolo che la fabbricazione digitale e l'impiego di macchine autonome e cooperanti, come robot e droni, rivestono nel processo di *mass-customization*. Di seguito una serie di parole chiave inerenti alle due macro-categorie che caratterizzeranno il settore delle costruzioni in uno scenario spazio-temporale che va da qui al 2050.

Processo generativo:
- AI, intelligenza artificiale;
- strategia *data-driven*;
- ottimizzazione;

Fabbricazione digitale:
- prefabbricazione digitale;
- fabbricazione robotica *on-site* e *off-site*;
- interazione uomo-macchina.

Automazione e prefabbricazione digitale

L'architettura, come disciplina legata alla tettonica, presenta da sempre un legame con lo sviluppo tecnologico e con gli eventi sociali e culturali che caratterizzano le varie epoche storiche (Iwanamoto, 2009). L'odierna era digitale, definita come *digital making* (Carpo, 2011), è coincisa con l'incremento della complessità che ha raggiunto il suo apice con l'avvento dell'era post-moderna (Menges, 2015). Una delle innovazioni che maggiormente stanno rivoluzionando il settore dell'AEC riguarda l'impiego di robot industriali nei processi produttivi di sistemi tecnologici progettati secondo logiche *performance-based*. Superata una prima fase di ricerca sperimentale, l'utilizzo di robot di derivazione industriale nei processi di fabbricazione rappresenta l'input per innovare un settore ancora legato a logiche e tecniche costruttive di derivazione modernista. Se alla fine degli anni '80 l'introduzione di robot nel settore AEC si proponeva di automatizzare il sito di progetto cercando di limitare il più possibile l'impiego di manodopera, per una maggiore efficienza in termini di costi e tempi di produzione, oggi l'attenzione viene posta sul processo creativo inteso come connessione diretta tra modello digitale e realtà fisica per espandere lo spazio delle possibilità progettuali (Gramazio & Kohler, 2014). A riguardo, gli ambiti della ricerca sulla fabbricazione robotica che possono contribuire a implementare i tre focus del *Vertical Dynamic Urbanism* (VDU) quali *Robot-Oriented Construction*, modularità e prefabbricazione e *open-building*, si possono ricondurre a due macro-categorie:

action and change, inclusion and integration (Cangelli, 2015). A further step forward was made with the concept of *Vertical Dynamic Urbanism* (Hu *et al.*, 2018) (Fig. 1) and the introduction of a systemic relationship between the cognitive interpretation of the concept of city by the user; open-building concept; modularity and prefabrication; robot-oriented design and building automation. In response to the critical issues of the anthropocene, the performance skyscrapers represent a model of urban development able to adapt responsibly to the stimuli coming from the external environment, leaving a productive space on the urban scale proposing new airways adapting to changing needs through continuous variations of the architectural layout. Starting from this excursus, the contribution analyses a series of technological innovations able to implement and innovate the architectural models described above in the construction phase.

The role of technological innovation: from design to construction

In the field of technological innovations, it is possible to highlight two main macro-areas of investigation that can significantly impact the design and construction of vertical architectures: in the design phase, the massive use of the generative process and the AI allows to explore innovative formal codes resulting from the relationship between formal generation and performance optimization; in the construction phase, the focus is placed on the role that digital manufacturing and the use of autonomous and cooperating machines, such as robots and drones, play in the mass-customization process. Below is a series of key words related to the two macro-categories that will characterize the construction sector in a space-time scenario that goes from here to 2050.

Generative design:
- AI, Artificial Intelligence;
- data-driven strategy;
- optimization.

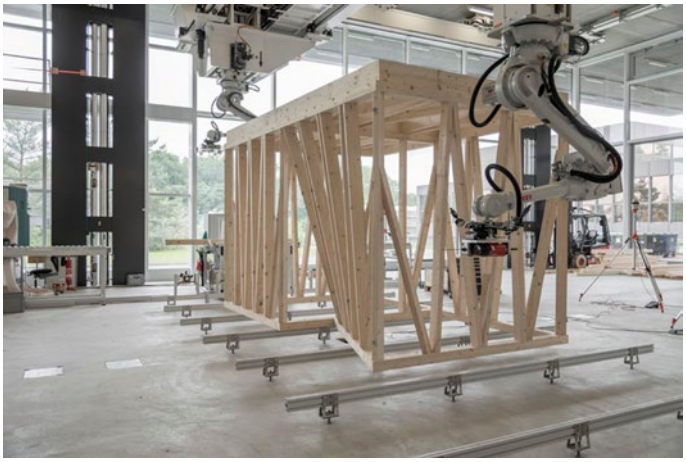
Digital fabrication:
- digital Prefabrication;
- on-site and off-site robotic fabrication;
- human/robot collaboration.

Automation and digital prefabrication

Architecture, as a discipline linked to tectonics, has always had a link with the technological development and with the social and cultural events that characterize the various historical periods (Iwanamoto, 2009). Today's digital era, defined as digital making (Carpo, 2011), coincided with the increase in complexity that reached its peak with the advent of the post-modern era (Menges, 2015). One of the innovations that are most revolutionizing the AEC sector concerns the use of industrial robots in the production processes of technological systems designed according to performance-based logic. After a first phase of experimental research, the use of industrial-derived robots in manufacturing processes represents the input to innovate a sector still linked to the logics and construction techniques of modernist derivation. If at the end of the 80s the introduction of robots in the AEC sector was aimed at automating the project site, trying to limit as much as possible the use of labor, for greater efficiency in terms of costs and production times, today the 'attention is placed on the creative

02 | ETH, *Spatial Timber Assemblies*, prototipo di struttura in legno ottimizzata, foto di Gramazio Kohler Research

ETH, Spatial Timber Assemblies, prototype of an optimized wooden structure, photo by Gramazio Kohler Research



| 02

– la prefabbricazione off-site di sistemi tecnologici ottimizzati;
– l'impiego *on-site* di macchine autonome per la produzione e l'assemblaggio di componenti prefabbricati performativi.

Le due modalità operative rappresentano la messa a sistema delle potenzialità offerte dalla computazione digitale applicata alla progettazione di macchine autonome. Esempio del primo approccio è la ricerca condotta dal Politecnico Federale di Zurigo, ETH, sulle strutture spaziali in legno e sulle tecnologie additive applicate a processi di prefabbricazione di componenti strutturali. Una delle sperimentazioni più significative sulle strutture prefabbricate in legno è frutto di una collaborazione tra *Gramazio Kohler Research* e ERNE AG *Holzbau*. La ricerca *Spatial Timber Assemblies*[4] (Fig. 2) studia tecnologie di assemblaggio intelligente di unità tecnologiche in legno per la costruzione di sistemi tecnologici strutturali ottimizzati e perciò caratterizzati da un elevato grado di customizzazione. Rispetto ai comuni processi industriali, l'impiego dei bracci robotici consente di personalizzare i processi produttivi e di collocare i componenti nello spazio solo dove necessario seguendo una logica di ottimizzazione strutturale, garantendo velocità ed economicità dell'intero processo con un assemblaggio rapido in-situ senza richiedere una mano d'opera specializzata. La complessità del sistema tecnologico non rappresenta un ostacolo per la sua fabbricazione anche grazie alla collaborazione uomo-macchina che permette di far fronte a eventuali problematiche derivate dalle tolleranze. Il caso studio *Smart Slab*[5] (Fig. 3) rappresenta il risultato principale del percorso di ricerca sui processi additivi per la prefabbricazione di sistemi tecnologici performativi. Il prototipo di solaio istallato sull'edificio sperimentale DFAB HOUSE (Fig. 4) presenta una serie di innovazioni pronte per essere trasferite nel settore AEC: il processo progettuale parte dall'ottimizzazione topologica della partizione orizzontale, in relazione ai carichi applicati, e dalla relativa discretizzazione dello stesso in relazione alle dimensioni massime dei componenti che è possibile realizzare e trasportare. Il modello digitale viene impiegato per definire e produrre le casseforme con una stampante 3d ad alta risoluzione che impiega sabbia e collanti; le casseforme stampate vengono riempite con cemento fibrorinforzato predisponendo il sistema di ancoraggio per il pre-stress da effettuare *on-site*. La stampa ad alta risoluzione permette di ridurre le tolleranze derivate dal processo di fabbricazione oltre che integrare sub-sistemi tecnologici diminuendo le tempistiche e la complessità del cantiere. A riguardo, può essere introdotto il secondo scenario d'innovazione: la collocazione del sistema tecnologico *on-site* può avvenire mediante l'impiego di macchine autonome come droni e *cable-robot*. L'impiego di droni nella fase di costruzione è attualmente oggetto di progetti di ricerca nelle principali università europee dove si sperimenta la possibilità di impiegare queste macchine nelle differenti fasi del processo di fabbricazione per completare task relative:

– all'assemblaggio di componenti tecnologici;
– all'estrusione di parti strutturali;

process understood as a direct connection between the digital model and physical reality to expand the space of design possibilities (Gramazio & Kohler, 2014). In this regard, the areas of research on robotic fabrication that can contribute to implement the three focuses of *Vertical Dynamic Urbanism* (VDU) such as *Robot-Oriented Construction*, modularity and prefabrication and open-building, can be traced back to two macro-categories:

– off-site prefabrication of optimized technological systems;
– on-site and off-site use of autonomous machines for the production and assembly of prefabricated performative components.

The two approach represent the setting up of the potential offered by digital computation applied to the design of autonomous machines. An example of the first approach is the research conducted by the ETH, Zurich Polytechnic, on wood spatial structures and additive technologies applied to prefabrication processes of structural components. One of the most significant experiments on prefabricated wooden structures is the result of a collaboration between *Gramazio Kohler Research* and ERNE AG Holzbau. The *Spatial Timber Assemblies* research[4] (Fig. 2) studies smart assembly technologies of wood technological units for the construction of optimized structural technological systems and therefore characterized by a high degree of customization. Compared to common industrial processes, the use of robotic arms allows to customize production processes and place components in space only where necessary following a logic of structural optimization, ensuring speed and economy of the whole process with a rapid in-situ assembly without requiring a specialized workforce. The complexity of the technological system does not represent an obstacle for its manufacture, thanks also to the man-machine collaboration which allows us to cope with any problems deriving from tolerances. The *Smart Slab* case study[5] (Fig. 3) represents the main result of the research path on additive processes for the prefabrication of performative technological systems. The floor prototype installed on the experimental building DFAB HOUSE (Fig. 4) presents a series of innovations ready to be transferred to the AEC sector: the design process starts from the topological optimization of the horizontal partition, in relation to the applied loads, and from the relative discretization of the same in relation to the maximum dimensions of the components that can be made and transported. The digital model is used to define and produce the formworks with a high-resolution 3D printer that uses sand and adhesives; the moulded formworks are filled with fiber-reinforced cement, preparing the anchorage system for the pre-stress to be carried out on-site. High-resolution printing reduces the tolerances derived from the manufacturing process as well as integrating technological subsystems, reducing the time and complexity of the construction site. About that, the second innovation scenario can be introduced: the on-site installation of the technological system can be achieved through the use of autonomous machines such as drones and cable-robots. The use of drones in the construction phase is currently the subject of research projects in the main European universities where the possibility of using these machines at

03 | ETH, *Smart Slabs*, prototipo di solaio in calcestruzzo per l'edificio sperimentale DFAB HOUSE, foto di Tom Mundy | ETH Zurich

ETH, Smart Slabs, concrete floor prototype for the experimental building DFAB HOUSE, photo by Tom Mundy | ETH Zurich

04 | ETH, *Spatial Timber Assemblies*, collocazione del prototipo di struttura in legno ottimizzata on-site, foto di *EMPA*, Swiss Federal Laboratories for Materials Science and Technology

ETH, Spatial Timber Assemblies, on-site installation of the optimized wooden structure prototype, photo by EMPA, Swiss Federal Laboratories for Materials Science and Technology

05 | ICD, *Cyber Physical Material*, droni per l'assemblaggio adattivo di unità tecnologiche per strutture leggere, foto di ICD, Institute for Computational Design

ICD, Cyber Physical Material, drones for the adaptive assembly process of lightweight technological units, photos by ICD, Institute for Computational Design

– al monitoraggio del processo di fabbricazione.

Il progetto *Cyber Physical Macro Material*[6] (Fig. 5) dell'ICD di Stoccarda, *Institute for Computational Design*, rappresenta una concreta applicazione dell'impiego di droni nell'assemblaggio di componenti tecnologici, seppur dalle dimensioni ridotte. La sperimentazione prevede la progettazione di un'infrastruttura tecnologica per lo spazio aperto capace di riconfigurarsi in maniera adattiva in base al pattern di movimento dell'utenza. La trasformazione della struttura avviene mediante l'impiego di droni progettati per muovere agilmente i componenti grazie a un sistema di nodi con calamite. Un protocollo di comunicazione basato sulla logica dell'IoT, *Internet of Things*, rende il sistema autonomo e in grado di captare input provenienti dall'ambiente esterno. A differenza dei droni, i *cable-robot*, ovvero macchine in grado di muoversi nello spazio x,y,z grazie a cavi connessi a una struttura puntuale a prevalente estensione verticale composta da quattro pilastri reticolari in acciaio, rappresentano una novità nel settore delle costruzioni. Processi sperimentali sono stati avviati dallo IAAC, *Institute for Advanced Architecture of Catalunya*, in collaborazione con TECNALIA con la realizzazione di un prototipo sperimentale di partizione verticale in terra cruda presentato durante l'appuntamento annuale *Construnmat* di Barcellona, 2017. Il prototipo (Fig. 6), parte della ricerca *On Site Robotics*[7], è stato realizzato direttamente sul sito espositivo mediante l'utilizzo di un *cable-robot* e un estrusore per materiali fluido-densi opportunamente progettato. Il prototipo realizzato ha dimostrato come la metodologia progettuale proposta sia applicabile per la costruzione di unità abitative ecosostenibili con materiali naturali. Inoltre, la meccatronica della macchina e la sua relativa semplicità, permette di scalare il processo sull'asse

| 03

| 04

| 05

different stages of the manufacturing process is tested to complete related tasks such as:

– the assembly of technological components;
– the extrusion of structural parts;
– monitoring of the manufacturing process.

The *Cyber Physical Macro Material* project[6] (Fig. 5) of the ICD Stuttgart, Institute for Computational Design, represents a concrete application of the use of drones in the assembly process of technological components albeit with reduced dimensions. Experimentation involves the design of a technological infrastructure for outdoor space able to reconfigure itself in an adaptive manner based on the user's movement pattern. The transformation of the structure takes place through the use of drones designed to move the components easily thanks to a system of knots with magnets. A communication protocol based on the logic of IoT, Internet of Things, makes the system autonomous and able to capture inputs from the external environment. Unlike drones, cable-robots are machines able to move in space x, y, z thanks to cables connected to a punctual structure with a prevalent vertical extension consisting of four steel reticular pillars, represent a novelty in the construction sector. Experimental processes have been initiated by IAAC, Institute for Advanced Architecture of Catalunya, in collaboration with TECNALIA with the construction of an experimental prototype of vertical earth wall presented during the annual Construnmat event in Barcelona, 2017. The prototype (Fig. 6), part of the *On-Site Robotics* research[7], was created directly on the exhibition site using a cable-robot and an

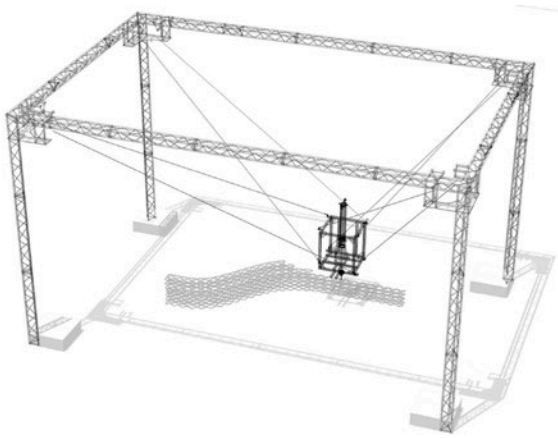
06 | IAAC, *On Site Robotic*, prototipo realizzato per la fiera Costrumat 2017 a Barcellona, foto di IAAC, Institute for Advanced Architecture of Catalunya
IAAC, On Site Robotic, prototype created for the Costrumat Fair 2017 in Barcelona, photo by IAAC, Institute for Advanced Architecture of Catalunya

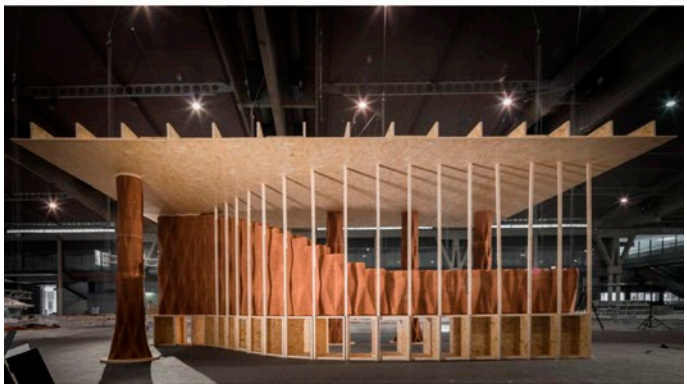
07 | Iaac, *Minibuilders*, robot cooperanti per la realizzazione di strutture architettoniche, foto di IAAC, Institute for Advanced Architecture of Catalunya
Iaac, Minibuilders, cooperating robots for the construction of architectural structures, photos of IAAC, Institute for Advanced Architecture of Catalunya

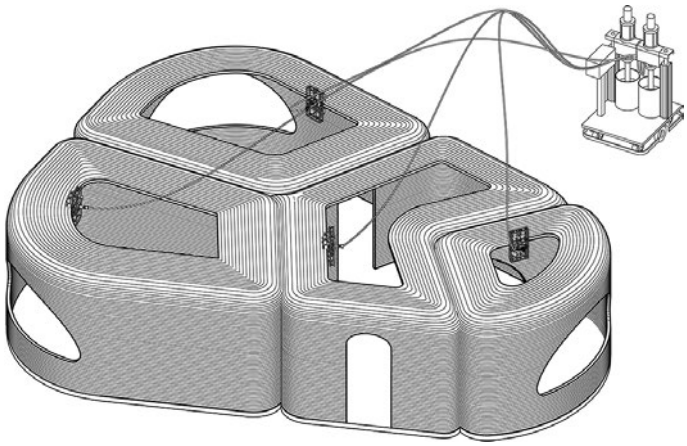
verticale che può essere immaginato come dinamico e in grado di variare rispetto alle diverse esigenze progettuali, dalla casa al grattacielo. La ricerca condotta dallo IAAC ha interessato l'ottimizzazione strutturale ed energetica del sistema tecnologico; lo studio del materiale e della sua composizione; la progettazione del tool utilizzato per l'estrusione; la calibrazione del robot rispetto al processo produttivo adottato. Un ulteriore approccio alla fabbricazione digitale è l'utilizzo di piccoli robot direttamente *on-site*: il progetto *Mini-Builders*, sviluppato presso lo IAAC, impiega tre differenti tipologie di robot per la fabbricazione di piccole strutture. I robot, dotati di capacità sensoriali e di un dispositivo in grado di provvedere al materiale per l'estrusione, possono lavorare in maniera coordinata e svolgono tre differenti funzioni che si susseguono in maniera consequenziale: il primo robot estrude i primi 20 *layer* della struttura di fondazione grazie alla capacità cognitiva e la possibilità di seguire un percorso prestabilito, per poi avere robot specializzati per la produzione di partizioni verticali e orizzontali (Fig. 7).

L'architettura verticale nel 2050

Il grattacielo del 2050 sarà perlopiù un'infrastruttura dinamica e adattiva in grado di riconfigurarsi in tempo reale in base alle necessità dell'utenza, sfruttando le potenzialità offerte dai processi computazionali e dall'AI. Tra i tanti *Drivers of Changes* è possibile definire tre focus di innovazione in grado di implementare il modello di *VDU* rispetto alla fase progettuale e di costruzione (Fig. 8).
Adattività performativa: la fase progettuale dovrà essere legata all'analisi dei dati, alla simulazione di fenomeni complessi e a processi generativi, mediante l'impiego di AI e algoritmi genetici. L'applicazione di una strategia progettuale *data-driven* fa sì che la morfologia è generata partendo dall'analisi delle condizioni di un preciso sito progettuale in relazione ai flussi di circolazione, pattern di movimento, all'impatto sul microclima urbano e privilegiando il confort indoor e outdoor rispetto alla mera


| 06




| 07

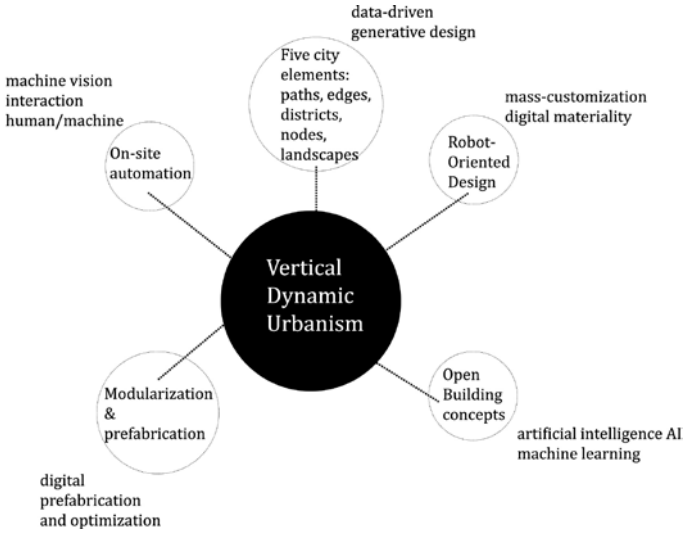
appropriately designed extruder for fluid-dense materials. The prototype realized showed how the proposed design methodology is applicable for the construction of eco-sustainable housing units with natural materials. In addition, the mechatronics of the machine and its relative simplicity, allows to scale the process on the vertical axis that can be imagined as dynamic and able to vary with respect to the different design requirements, from the house to the skyscraper. The research conducted by IAAC involved the following criteria: the structural and energy optimization of the technological system; the study of the material and its composition; the design of the tool used for extrusion; the calibration of the robot with respect to the production process adopted. A further approach to digital manufacturing is the use of small robots directly on-site: the *Mini-Builders* project, developed at IAAC, employs three different types of robots for the fabrication of small structures. The robots, equipped with sensory capacities and a device capable of providing the material for extrusion, can work in a coordinated manner and perform three different functions that follow one another in a consequential steps: the first robot extrudes the first 20 layers of the structure of foundation, thanks to the cognitive ability and the ability to follow a pre-established path, and then to have specialized robots for the production of vertical and horizontal partitions (Fig. 7).

Vertical architecture of 2050

The skyscraper of 2050 will be a dynamic and adaptive infrastructure able to reconfigure in real time according to the needs of users, exploiting the potential offered by the computation-

08 | Implementare il concept di *Vertical Dynamic Urbanism* attraverso l'innovazione tecnologica, elaborazione di Angelo Figliola

Implement the concept of Vertical Dynamic Urbanism through technological innovation, elaboration by Angelo Figliola



massimizzazione della superficie utile. Passando dalla scala urbana a quella dell'edificio, il processo adattivo dovrà interessare anche il layout funzionale degli edifici mediante una costante riconfigurazione spaziale basata sul monitoraggio in *real time* dell'occupazione degli stessi e delle relazioni con la funzione che essi ospitano. Grazie a tecniche di *machine learning*, è possibile monitorare i dati provenienti da dispositivi mobili e prevedere il comportamento dell'utenza rispetto alle diverse fasi della giornata. Rispetto a un orizzonte temporale più ampio, la riconfigurazione spaziale può interessare lo sviluppo verticale attraverso l'incremento delle unità abitative e funzionali mediante l'automazione dei processi costruttivi. L'edificio passa dall'essere considerato un'entità statica a dinamica in grado di interpretare le esigenze mutevoli della società. La performatività viene esplicitata mediante l'ottimizzazione strutturale e l'impiego di processi parametrici che consento di mettere a sistema le variabili principali quali analisi fluidodinamica CFD e analisi strutturale. La struttura e l'involucro si fondono in un unico sistema.

Prefabbricazione e ottimizzazione: a caratterizzare i processi costruttivi sarà sicuramente la "prefabbricazione digitale" basata sul concetto di ottimizzazione delle perfomance. L'aspetto fondamentale riguarderà l'utilizzo efficiente delle risorse materiali: l'integrazione di processi di ottimizzazione computazionale e tecnologie innovative di fabbricazione digitale, permetterà di impiegare il materiale solo dove necessario, in base all'informazione dei processi e ai parametri performativi guida del processo progettuale. I processi additivi possono ricoprire un ruolo importante offrendo la possibilità di comporre elementi generici considerando tutti i gradi di libertà che la macchina offre. Questo favorisce l'esplorazione di sistemi aggregativi complessi per componenti edilizi *high-performance*, gestiti mediante algoritmi, da assemblare *on-site* con processi a secco. Questo approccio favorisce la sperimentazione su sistemi di aggregazione innovativi in grado di stimolare la creatività progettuale al fine di superare la prefabbricazione industriale aperta che caratterizza i processi progettuali contemporanei. A riguardo, la progettazione parametrica permette di indagare e gestire la complessità che deriva dall'aggregazione dei componenti ed esplorare diverse opzioni progettuali grazie alla struttura gerarchica di dati. In relazione a ciò, il grattacielo del futuro sarà progettato ottimizzando la sua struttura in maniera sistemica con gli altri sub-sistemi tecnologici (e.g. struttura/involucro) mentre le sue unità funzionali (e.g. unità abitativa) saranno il risultato dell'assemblaggio di componenti prefabbricati performativi.

Automazione e interazione uomo - macchina: i concetti di *open-building* e prefabbricazione digitale preludono all'impiego *on-site* e *off-site* di macchine autonome dotate di AI e in grado di muoversi agevolmente in relazione allo spazio con il quale interagiscono. Questo scenario progettuale è basato sull'utilizzo

al processes and the AI. Among the many *Drivers of Changes* it is possible to define three innovation focuses able to implement the VDU model with respect to the design and construction phase (Fig. 8).

Performative adaptivity: the design phase must be linked to the analysis of data, the simulation of complex phenomena and generative processes, through the use of AI and genetic algorithms.

The application of a data-driven design strategy means that the morphology is generated starting from the analysis of the conditions of a precise design site in relation to the circulation flows, movement patterns, the impact on the urban microclimate and privileging the indoor and outdoor comfort compared to the mere maximization of the usable area. Moving from the urban to the building scale, the adaptive process must also involve the functional layout of buildings through a constant spatial reconfiguration based on real time monitoring of their occupation and of the relations with the function they host. Thanks to machine learning techniques, it is possible to monitor data coming from mobile devices and predict the behaviour of users with respect to the different phases of the day. Compared to a wider time horizon, spatial reconfiguration can involve vertical development through the increase of housing and functional units through the automation of construction processes. The building passes from being considered a static entity to dynamics capable of interpreting the changing needs of society. The performativity is explained through the structural optimization and the use of parametric processes that allow to put in the system the main variables such as CFD fluid dynamics analysis and structural analysis. The structure and the building envelope merge into a single system.

Prefabrication and optimization: to characterize the construction processes will certainly be the digital prefabrication based on the concept of performance optimization. The fundamental aspect will be the efficient use of material resources: the integration of processes of computational optimization and innovative technologies of digital fabrication, will allow to use the material only where necessary, based on the information of the processes and the performance parameters of the design process. Additive processes can play an important role by offering the possibility of composing generic and discrete elements considering all the degrees of freedom that the machine offers. This favours the exploration of complex aggregation systems for high-performance building components, managed through algorithms, to be assembled on-site with dry processes. This approach encourages experimentation on innovative aggregation systems able to stimulate design creativity in order to overcome the open industrial prefabrication that characterizes contemporary design processes. In this regard, parametric design allows to investigate and manage the complexity that derives from the aggregation of components and explore different design options thanks to the flexibility of parametric models. Starting from that, the skyscraper of the future will be designed optimizing its structure in a systemic way with the other technological sub-systems (e.g. structure / envelope) while its functional units (e.g. housing unit) will be the result of the assembly of prefabricated performative components.

di sensori in grado di acquisire dati in *real-time* e un processo computazionale che permette di adattare le azioni della macchina in maniera intelligente creando una connessione diretta tra modello digitale, ambiente e output fisico. A riguardo, Il grattacielo del futuro sarà assemblato e modificherà il suo layout grazie a macchine volati, come droni e sciami di robot, in grado di muoversi in maniera autonoma e di cooperare con gli operatori sul sito di progetto riducendo la filiera produttiva. Grazie all'iterazione uomo-macchina, sub-sistemi tecnologici complessi verranno realizzati combinando realtà fisica con quella digitale mediante tecniche olografiche. Il confine tra reale e virtuale si dissolve rendendo la complessità libera dai vincoli strumentali e operativi.

Il ruolo della Tecnologia dell'Architettura (TdA) come ambito disciplinare

All'interno dello scenario proposto, la TdA ricopre un ruolo cruciale nella ricerca di soluzioni innovative e negli aspetti legati alla didattica per la formazione dei futuri operatori del settore. Quest'ultimi necessiteranno di una consapevolezza tecnologica rinnovata rispetto alla costante evoluzione del processo progettuale e delle tecnologie costruttive, per comprendere i cambiamenti in atto al fine di misurare e verificare l'incidenza degli stessi sull'ambiente costruito. Per far ciò è necessario strutturare percorsi formativi innovativi che consentono di accrescere la sensibilità e le conoscenze specialistiche degli allievi, rispetto alle tematiche sopra esposte, con competenze teorico-pratiche trasversali. Una metodologia didattica basata sul concetto di *learning by doing* e la collaborazione con le industrie del settore, potrebbe rappresentare l'aspetto innovativo nel processo formativo e allo stesso modo presentare possibili soluzioni a problematiche concrete del settore delle costruzioni necessarie ad affrontare sfide tecnologiche e costruttive del futuro (Figliola, 2018).

NOTE

[1] *World Economic Forum* 2018.

[2] Arup's Foresight, Drivers of Change, Gennaio 2013, https://www.driversofchange.com/tools/doc/

[3] Arup's Foresight + Innovation group, It's alive! Can you imagine the urban building of the future? Gennaio 2013, www.arup.com.

[4] Per approfondire: http://dfabhouse.ch/spatial_timber_assemblies/.

[5] Per approfondire: http://dfabhouse.ch/smart-slab/.

[6] Per approfondire: http://icd.uni-stuttgart.de/?p=23178.

[7] Per approfondire: https://iaac.net/research-projects/large-scale-3d-printing/on-site-robotics/.

REFERENCES

Aiello, C. (2008), *Evolo: Skyscraper for the XXI Century*, Evolo Publishing, USA.

Cangelli, E. (2015), "NZEB 2050 | Visioni possibili", *Journal of Planning Design Technology*, Vol. 3, pp. 144-153.

Carpo, M. (2011), *The alphabet and the algorithm*, *Writing architecture*. MIT Press, Cambridge, Mass.

Crutzen P. (2005), *Benvenuti nell'Antropocene. L'uomo ha cambiato il clima, la Terra entra in una nuova era*, Mondadori, Milano.

Department of economic and social affairs population division (2003), *World population in 2300, Report of United Nations expert meeting on world population in 2300*, New York, United States, December 9.

Automation and human-machine interaction: the concepts of open-building and digital prefabrication are a prelude to the on-site and off-site use of autonomous machines equipped with AI and able to move easily in relation to the space with which they interact. This design scenario is based on the use of sensors able to acquire real-time data and a computational process that allows to adapt the actions of the machine in an intelligent way creating a direct connection between the digital model, the environment and the physical output. Adopting this approach, the skyscraper of the future will be assembled and will modify its layout thanks to flown machines, such as drones and swarms of robots, able to move independently and cooperate with the operators on the project site, reducing the production chain. Thanks to the man-machine interaction, complex technological sub-systems will be created by combining physical and digital reality using holographic techniques. The boundary between real and virtual dissolves, making complexity free from instrumental and operational constraints.

The role of Technology of Architecture (TdA) as a disciplinary area

Within the proposed scenario, the TdA plays a crucial role in the search for innovative solutions and in aspects related to didactic and training of future operators in the sector. The latter will require a renewed technological awareness with respect to the constant evolution of design and construction technologies, to understand the changes taking place in order to measure and verify the impact of these on the built environment. To do this it is necessary to structure innovative training courses that allow students to increase their sensitivity and specialist knowledge, with respect to the above-mentioned issues, with transversal theoretical and practical skills. An educational methodology based on the concept of learning by doing and collaboration with the construction industries could represent the innovative aspect in the training process and at the same time present possible solutions to concrete problems in the AEC necessary to face the technological and constructive challenges of the future (Figliola, 2018).

NOTES

[1] *World Economic Forum* 2018.

[2] Arup's Foresight, Drivers of Change, Gennaio 2013, https://www.driversofchange.com/tools/doc/

[3] Arup's Foresight + Innovation group, It's alive! Can you imagine the urban building of the future? Gennaio 2013, www.arup.com.

[4] Further information: http://dfabhouse.ch/spatial_timber_assemblies/.

[5] Further information: http://dfabhouse.ch/smart-slab/.

[6] Further information: http://icd.uni-stuttgart.de/?p=23178.

[7] Further information: https://iaac.net/research-projects/large-scale-3d-printing/on-site-robotics/.

Erdin, E. (2013), "Generative Approaches in Tower Design. Algorithms for the Integration of Tower Subsystems", *Arch-Doct,* Vol. 1, n. 1, pp. 58-70.

Figliola, A. (2018), "Il ruolo della didattica nell'era post digitale", *Agathon*, n. 3, pp. 29-36.

Gramazio, F., Kohler, M. and Willmann, J. (2014), *The robotic touch: how Robots change architecture*, Park Books, London.

Hu, R., Pan, W. and Bock, T. (2018), "A novel approach to develop vertical city utilizing construction automation and robotics", *Proceedings of the Creative Construction Conference,* Creative Construction Conference 2018, CCC 2018, 30 June - 3 July 2018, Ljubljana, Slovenia, pp. 2-10.

Ito, J. and Howe, J. (2016), *Whiplash: How to Survive Our Faster Future*, MIT Media Lab, Grand Central Publishing, New York.

Iwamoto, L. (2009), *Digital fabrications: architectural and material techniques,* Princeton Architectural Press, New York.

Khayal, M.O. (2017), "Tall Buildings and Urban Habitat of the 21st Century: A Global Perspective", *Buildings* 2012, n. 2, pp. 384-423.

Mardiana A. and Riffat S.B. (2015), "Building Energy Consumption and Carbon dioxide Emissions: Threat to Climate Change", *Journal of Earth Science & Climatic Change*, n. 3, pp. 1-3.

Menges, A. (2015), *Material synthesis: fusing the physical and the computational*, Architectural Design Profile, Wiley, London.

Spyropoulos, T. (2013), *Adaptive ecologies: correlated systems of living*, AA Publisher, London.