

## ECOLOGIA E TECNOLOGIE DIGITALI

L'architettura alla piccola scala  
come luogo di connessioni

## ECOLOGY AND DIGITAL TECHNOLOGIES

Small-scale architecture as  
a place of connections

Massimo Perriccioli, Roberto Ruggiero, Michael Salka

### ABSTRACT

Muovendo dalle relazioni tra tecnologie digitali e cultura ambientale, il saggio punta a delineare i contorni della nuova dimensione ecologica del progetto di architettura come luogo di connessioni multiple e interagenti in cui risolvere criticamente la dicotomia tra natura e cultura. Da questo punto di vista, l'architettura alla piccola scala rappresenta un promettente campo di sperimentazione in cui nuovi sistemi tecnologici, improntati a una maggiore efficienza delle soluzioni ecologiche, incontrano la gestione di cicli biologici e si integrano con essa. I processi industriali e di produzione, ripensati sulla base del paradigma della circolarità, si organizzano in maniera analoga a quella degli ecosistemi naturali riguardo all'uso di energia e di materiali, diventando un'opzione promettente per renderli più efficienti e sostenibili.

Starting from the relationships between digital technologies and environmental culture, the essay aims to outline the contours of the new ecological dimension of architectural design as a place of multiple and interacting connections in which we can critically resolve the dichotomy between nature and culture. From this point of view, small-scale architecture provides a promising field of experimentation in which new technological systems, marked by more efficient ecological solutions, meet and integrate with the management of biological cycles. Industrial and production processes, rethought on the basis of the circularity paradigm, can be organised in a similar way to natural ecosystems with regard to the use of energy and materials, becoming a promising option for making them more efficient and sustainable.

### KEYWORDS

ecologia, circolarità, digitale, architettura alla piccola scala, adattività

ecology, circularity, digital, small-scale architecture, adaptability

**Massimo Perriccioli**, Architect and PhD, is a Full Professor at the Department of Architecture of the 'Federico II' University of Naples (Italy), where he coordinates the Degree Course in Design for the Community. He carries out research in the field of technological culture of architecture and design. Mob. +39 345/92.53.984 | E-mail: massimo.perriccioli@unina.it

**Roberto Ruggiero**, Architect and PhD, is a Researcher at the School of Architecture and Design of the University of Camerino (Italy). He carries out research activities mainly in the field of innovation of construction processes. Mob. +39 335/77.99.229 | E-mail: roberto.ruggiero@unicam.it

**Michael Salka**, Architect, Gates Cambridge PhD at the University of Cambridge, Technical Coordinator of Valldaura Labs at IAAC Barcelona (Spain) during the design and execution of the VQC. His research activity is focused on the use of big data and advanced digital technologies in the field of environmental sustainability and, in particular, circular economy applied to the construction sector. E-mail: michael.salka@iaac.net

Le tecnologie digitali stanno modificando la nostra idea di realtà e, in misura sempre maggiore, il nostro modo di abitare il mondo, creando nuove modalità cognitive e interpretative dei contesti in cui viviamo e agiamo. L'ambiente in cui siamo immersi con il suo enorme portato di informazioni ha sempre meno bisogno di supporti materiali ed è sempre meno analogico. Secondo Luciano Floridi (2014, p. 111), uno dei filosofi contemporanei più attenti alle trasformazioni cognitive e comportamentali della Information Age, «[...] siamo testimoni di una migrazione epocale e senza precedenti dell'umanità dallo spazio fisico newtoniano al nuovo ambiente dell'infosfera, anche perché quest'ultimo sta gradualmente assorbendo il primo». In questo nuovo ambiente, le tecnologie digitali offrono inedite e innumerevoli opportunità di pensiero, di ricerca e di sperimentazione che possono fornire metodi, strategie e soluzioni adeguate alla crescente complessità del fare architettura in un'era caratterizzata da una crisi ecologica senza precedenti. Il mondo digitale ci pone, infatti, di fronte a un problema di 'pensiero' più che di 'strumenti' che richiede la formulazione di nuove teorie conoscitive attente alle diverse forme esperienziali capaci di strutturare le differenti visioni della realtà e, di conseguenza nel nostro specifico, di stabilire nuove e più avanzate relazioni tra l'architettura e i sistemi naturali.

Tale svolta epistemologica comporta il passaggio da una 'conoscenza manipolatrice', fondata su logiche deterministiche e riduzioniste a una 'conoscenza complessa' (Morin, 1993) che mira ad accrescere le relazioni tra ambiti, discipline e realtà differenti per la comprensione dei fenomeni generativi fondamentali, non solo per cogliere la complessità dei processi naturali, ma soprattutto per trasferire le logiche in processi che sappiano rapportarsi in modo sistemico e adattivo all'ambiente in cui si inseriscono. Il mutamento di prospettiva operato dalla svolta digitale nel campo del progetto di architettura sollecita in primo luogo una riflessione critica sulla cultura materiale che contraddistingue il nostro tempo (Picon, 2021). Nelle articolate relazioni e interazioni che caratterizzano la nuova ecologia del progetto digitale, l'architettura non perde la sua fisicità ma si arricchisce di una nuova materialità che attribuisce valore sia alle qualità sensoriali, grazie all'impiego di dispositivi che la rendono sempre più responsiva, sia ai flussi di conoscenze, che riconducono i processi alla trasmissione di dati comunicabili, sia, infine, a materiali progettabili sulla base di caratteristiche non solo funzionali ed estetico-percettive ma soprattutto legate al loro ciclo di vita.

La 'svolta digitale' (Carpo, 2017) ha consentito il superamento della dicotomia cartesiana tra 'macchina' e 'organismo', evidenziando sempre più l'importanza delle interconnessioni tra organismi e ambiente, ponendo l'accento sul contesto e sulla necessità che ogni programma di modificazione parta dalla valutazione delle relazioni del sistema con la realtà che si intende modificare. L'approccio computazionale ha introdotto nel contesto del progetto digitale, non solo forme complesse, ma anche materiali astratti e di natura effimera, come i dati e le informazioni che consentono alle costruzioni di abbandonare sempre più la loro natura rigida e defini-

ta, per diventare, come le organizzazioni naturali da cui traggono ispirazione, sistemi adattivi capaci di evolvere nel tempo.

Come per i materiali tradizionali impiegati nelle architetture naturali, dove al variare delle condizioni ambientali corrisponde un processo di progressivo adattamento tra ambiente e costruzione, così, secondo Attilio Nebuloni, «[...] anche per l'architettura adattiva le innovazioni tecnologiche e gli strumenti di codificazione permettono di costruire, attraverso i materiali propri del contesto digitale, forme 'primitive' di intelligenza, che misurano la loro azione sulla base della ricezione di stimoli esterni» (Nebuloni and Rossi, 2018, p. 155). Sempre secondo Nebuloni, le ricadute di tale processo sono da ricercare non tanto «[...] nella produzione edilizia, più interessata agli aspetti di efficienza di tale dimensione ambientale dell'architettura, quanto nell'approccio progettuale, come relazione diretta tra disegno, regole computazionali di generazione della morfologia e fabbricazione digitale» (Nebuloni and Rossi, 2018, p. 155). Siamo di fronte, quindi, a un nuovo paradigma progettuale fondato su connessione multiple e interagenti che, superando la dimensione metaforica di approcci ispirati a sistemi naturali e in virtù della diffusione di strumenti e processi generativi basati su strumenti di codificazione e di programmazione, coniuga le potenzialità del digitale con la dimensione ecologica del progetto architettonico, ricomponendo la dicotomia tra naturale e artificiale.

### Approccio Circolare/Digitale al campo della costruzione

Riferendoci al termine 'ecologia' come relazione ecosistemica tra qualcosa o qualcuno e il suo contesto ambientale (Zanotto, 2020, p. 49), l'attuale 'crisi ambientale'<sup>1</sup> ha tutti i tratti di una 'crisi ecologica', ovvero disequilibrio, divenuto cronico in epoca antropocenica (Lewis and Maslin, 2015), tra cicli tecnologici (attraverso cui si estrinseca l'agire umano) e cicli biologici (della natura). «Se non faremo l'impossibile ci troveremo di fronte l'impensabile!» (Bookchin, 2017, p. 78); con questo monito Murray Bookchin, filosofo e padre del concetto di 'ecologia sociale', già nel 1982 inquadrava tale crisi come emergenza improcrastinabile. Quarant'anni dopo il mondo sembra essere pericolosamente vicino a quella 'impensabile' che oggi si manifesta sotto forma di fenomeni complessi e violenti quali il cambiamento climatico e, per alcuni aspetti, la stessa pandemia da Covid-19<sup>2</sup>. L'Europa è uno dei contesti geografici che oggi sembra aver meglio recepito tale stato di emergenza: le risorse destinate dal piano NextGeneration EU all'ambiente per il periodo 2021/2027<sup>3</sup> rappresentano un'occasione straordinaria per sviluppare politiche efficaci e sperimentare strategie innovative.

La costruzione di una nuova ecologia richiede, evidentemente, la messa a punto di nuovi cicli tecnologici; se questo passaggio non è stato finora compiuto è per molteplici motivi di ordine culturale, politico, sociale, ma anche tecnologico. Tuttavia, il riconoscimento diffuso anche in sede di governance europea della circolarità dei cicli tecnologici quale strategia di sostenibilità<sup>4</sup>, nonché la diffusione capillare delle tecnologie digitali, rappresenta una nuova con-

dizione del presente – culturale e tecnologica – su cui fondare la speranza per gli anni a venire e sviluppare una nuova stagione della ricerca scientifica che è appena iniziata.

L'industria delle costruzioni rappresenta un campo di studi dove la sinergia 'circolare/digitale' potrebbe portare a risultati significativi; l'inefficienza, in termini ambientali, dei cicli tecnologici legati a questo settore è oggi rappresentata da statistiche che non lasciano dubbi<sup>5</sup>. Questo spiega il richiamo alla 'circolarità' quale requisito per il raggiungimento dell'obiettivo di neutralità climatica UE/2050 espressamente contenuto nel Piano d'Azione per l'Economia Circolare (European Commission, 2020). Le esperienze di approccio circolare/digitale alla costruzione costituiscono oggi un campo vario e disomogeneo che va dall'applicazione di software per la gestione del Life Cycle Assessment degli edifici a esperienze costruttive fortemente sperimentali quale il Cyclopean Cannibalism, costruzione automatizzata di un paramento murario che utilizza materiali di scarto e, segnatamente, calcestruzzo, gomma e pietra<sup>6</sup>. Con stretto riferimento all'attualità, nuove abitudini, opportunità di scambio e formule di business ruotano intorno all'idea di utilizzare strumenti digitali per scambiare servizi e merci, sfruttando inefficienze e ridondanze e facendo un uso migliore delle risorse materiali e degli asset fisici (Zanotto, 2020, p. 48).

La capacità del digitale di traduzione del mondo sensibile in dati costituisce, in particolare, il presupposto tecnologico e operativo per l'applicazione di alcuni principi fondamentali dell'economia circolare applicata alle trasformazioni dell'ambiente costruito quali il 'buildings as material bank' e la 'urban mining', che fanno riferimento proprio all'ambiente costruito come banca di materiali potenzialmente reimpiegabili<sup>7</sup>. Ma «[...] solo catturando il mondo fisico attraverso i dati è possibile organizzare ciò che è limitato in modo che rimanga disponibile all'infinito» (Rau and Oberhuber, 2016, p. 123), ricorda Thomas Rau, il cui 'passaporto dei materiali' rappresenta una delle idee più originali legate alla circolarità dei processi da costruzione: in questo processo di 'rappresentazione informata' del mondo sensibile, il digitale, dunque, fornisce il presupposto tecnologico per acquisire, per dirla con Martin Tamke (2017, p. 38), una profondità di comprensione dei materiali, delle strutture e della costruzione al fine di prevedere le loro prestazioni e il loro comportamento, ma anche per trasformare i cicli tecnologici legati alla costruzione in processi metabolici e circolari, secondo il modello tipico dei processi biologici.

Tuttavia, è necessario considerare come l'approccio circolare/digitale presenti ancora dei limiti di applicabilità dovuti sia alla difficoltà di accesso a tecnologie in larga parte sperimentali che alla mancanza di una matura cultura tecnologica del progetto. Infatti, tra i principali impedimenti alla diffusione di un approccio circolare all'architettura vi sono, da un lato la mancanza di adeguate infrastrutture (tecnologiche, normative, procedurali), capaci di supportare la reversibilità dei processi, dall'altro il modo in cui viene tradizionalmente considerata l'architettura nella sua natura di oggetto finito e non

nella sua dimensione processuale; d'altro canto, anche nel campo dei sistemi di manifattura digitale esistono limiti oggettivi di trasferimento al campo della costruzione di edifici.

Sebbene i software di progettazione e gli strumenti di fabbricazione digitale abbiano prodotto importanti effetti trasformativi nell'innovazione di molti processi produttivi, la loro utilità è ancora gravemente limitata quando si tratta dell'assemblaggio di forme su larga scala. I computer, infatti, offrono enormi vantaggi in termini di velocità e precisione, ma non possono eguagliare la capacità umana di prendere decisioni rapide ed efficaci in contesti complessi come edifici di grandi dimensioni. Secondo Marcelo

Coelho e Tovi Grossman (2018, p. 54), ciò introduce tutta una serie di problemi come per esempio, la dimensione delle macchine che limita intrinsecamente la dimensione delle parti che possono realizzare; piccole variazioni nella geometria delle parti o nel posizionamento possono introdurre errori di composizione durante l'assemblaggio; infine, le macchine sono incapaci di improvvisare per affrontare il cambiamento delle condizioni ambientali nel corso del processo realizzativo.

**Small-Scale Architecture come campo di sperimentazione** | Da alcuni anni a questa parte l'architettura alla piccola scala rappresenta un

promettente campo di sperimentazione di strategie e soluzioni progettuali informate da una cultura tecnologica e ambientale che si alimenta delle potenti e pervasive innovazioni digitali che caratterizzano processi e metodi costruttivi, ma che, soprattutto, riflette su nuovi modi di pensare il progetto secondo un orizzonte circolare. Essa costituisce un'opportunità di comprensione diretta del pensiero progettuale, un grande laboratorio di idee e di sperimentazioni al confine tra architettura e design sostenute da una spiccata consapevolezza ambientale e una sintesi compiuta tra strumenti e mezzi, tra processi e fini, tra artigianato e industria che si esplica in massima parte nell'esaltazione del concetto di sistema e nella necessità della cura del dettaglio. La scala minuta, il carattere temporaneo, la natura prototipica, la mancanza di vincoli normativi cogenti permettono una libera sperimentazione e lo sviluppo di tecniche, sistemi e processi che sono troppo complessi e troppo costosi per essere concepiti per edifici di maggiori dimensioni.

L'architettura alla piccola scala, grazie alla sua possibilità di essere pensata, progettata e prodotta come un sistema di parti assemblate tra loro in vista del loro dis-assemblaggio, sviluppa una nuova cultura del progetto in cui il processo è più rilevante del risultato finale: il prodotto, in altri termini, è meno importante delle procedure tecniche che lo precedono e lo seguono, definendo una concreta realizzazione del paradigma dell'assemblaggio e un'esaltazione di aspetti del progetto che non sono sempre visibili nel prodotto finale. L'innovazione implicita in questo approccio progettuale consiste nell'implementazione e nella concezione di un'idea di reversibilità in cui la gestione del fine vita di materiali, degli elementi che compongono il sistema e dei potenziali rifiuti prodotti diventano parte integrante dei processi generativi. I materiali e le risorse impiegate sono selezionati e assemblati in base alla loro provenienza, all'accessibilità, alla disponibilità al loro impiego e alla loro potenzialità di riuso dopo la fine del primo ciclo operativo, identificando in anticipo le opportunità per incrementare l'efficienza nel loro uso successivo.

L'architettura alla piccola scala rappresenta quindi un luogo in cui la sperimentazione di nuovi sistemi tecnologici, improntati a una maggiore efficienza delle soluzioni ecologiche, incontra e si integra con la gestione di cicli biologici che manipolano materiali di riciclo e di materiali naturali di cui è possibile tracciare la provenienza e il ciclo di vita. I processi industriali e di produzione si organizzano in maniera analoga a quella degli ecosistemi naturali riguardo all'uso di energia e di materiali, diventando un'opzione promettente per renderli più efficienti e sostenibili. Per questi motivi, l'architettura alla piccola scala diviene un campo di sperimentazione largo e promettente, un grande laboratorio di ricerca, un luogo di connessioni tra elementi diversi del pensiero e della costruzione, tra la dimensione tecnologica e quella ambientale in cui si realizzano nuove ecologie di spazi e nuove forme di habitat in sin-



**Fig. 1** | Voxel Quarantine Cabin (VQC) in Barcelona, 2020: External view (credit: A. Goula, 2020).

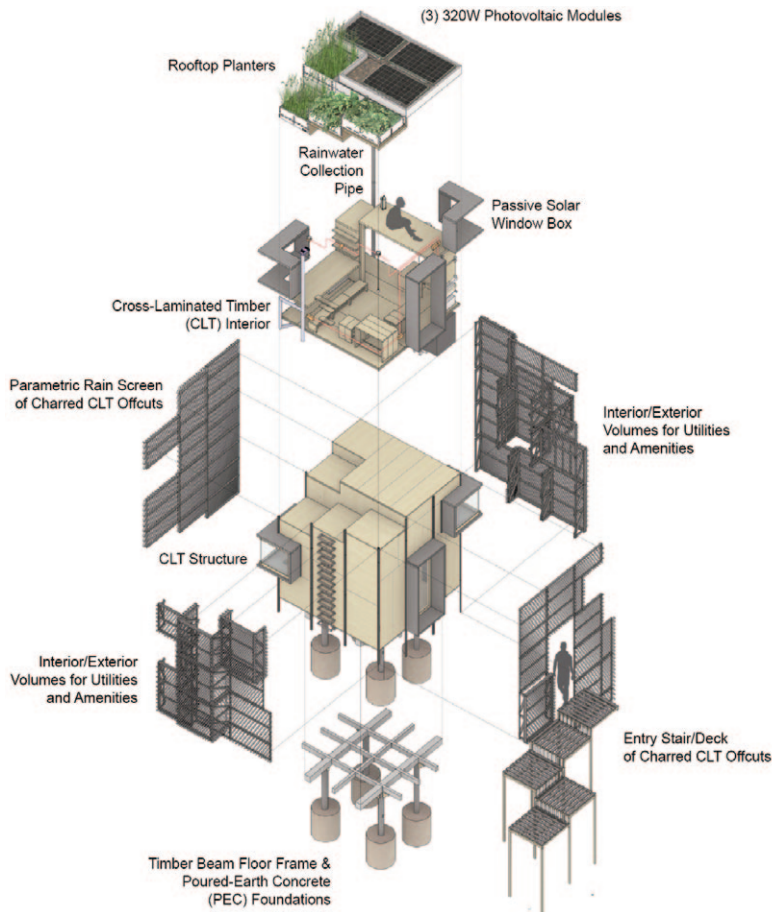


Fig. 2, 3 | VQC: Axonometric exploded view; Interior view (credits: Valldaura Labs, 2020).

tonia con la natura, caratterizzate dall'urgenza di trovare metodi costruttivi che siano più frugali nell'uso di risorse naturali.

**La Voxel Quarantine Cabin: una macchina ecologica** | Nel panorama internazionale, l'Institute for Advanced Architecture of Catalonia (IAAC) costituisce oggi uno dei principali riferimenti per la ricerca in questo ambito, condotta con metodologie innovative che prevedono l'integrazione tra ricerca e didattica di alta formazione, come nel caso del IAAC's immersive Master in Advanced Ecological Buildings and Biocities (MAEBB); alcune ricerche sviluppate nel MAEBB indagano, in particolare, la possibilità di uno sviluppo armonico tra ambiente naturale e ambiente costruito perseguendo un approccio digitale avanzato. Contesto di tale attività sono i Valldaura Labs, una straordinaria struttura che coniuga in modo innovativo ricerca e natura<sup>8</sup>. La 'visione' promossa presso i Valldaura Labs è quella di implementare lo sviluppo di un ambiente urbano autosufficiente, in grado di produrre le risorse di cui ha bisogno; parallelamente, l'ambiente naturale viene considerato come un sistema diffuso di elementi connessi disponibili per essere impiegati nella costruzione. Da questa doppia 'visione' e dal ricorso a forme avanzate di tecnologie digitali, scaturisce un approccio innovativo alla costruzione fondato sulla simbiosi tra artificio e natura, tra i cicli tecnologici che sostengono la costruzione e i cicli biologici propri dei contesti naturali. Questo spiega la presenza dei laboratori all'interno della Collserola forest, utilizzata come 'material bank' a cui è possibile attingere grazie a un flusso di lavoro che, ad eccezione delle fasi di montaggio, è esclusivamente digitale.

In particolare, la recente esperienza della Voxel Quarantine Cabin (VQC) rappresenta un esempio paradigmatico di tale filosofia ovvero di un approccio alla costruzione intesa quale 'metabolismo programmato', in accordo con l'ontologia delle macchine prospettata da Levi R. Bryant (2014, p. 15), per il quale la natura non consiste in altro che in fabbriche, micro e macro macchine spesso inserite l'una nell'altra, dove un albero non è meno di un aeroplano. Così come – secondo Bryant (2014, p. 38) – un albero e i suoi cicli biologici possono essere visti come 'un sistema di operazioni che esegue trasformazioni', l'esperienza della VQC prefigura un processo di programmazione della 'materia albero' che è reso possibile esclusivamente da un flusso di lavoro digitale nel quale la materia, lungi dall'essere passiva e aspettare la nostra plasmatura, modifica i nostri progetti in tutti i modi inaspettati (Bryant, 2014, p. 22).

La VQC è un'architettura di piccola scala (12 mq) concepita e realizzata nel 2020 durante il primo lockdown in Catalogna come alloggio per la quarantena in grado di ospitare un singolo abitante in condizione di isolamento per 14 giorni (Fig. 1, 2), frutto di un lavoro complesso che ha visto la compartecipazione di numerosi attori<sup>9</sup>. Il suo nome (Voxel) deriva da quella che possiamo considerare – in relazione all'interfaccia video di un dispositivo informatico – un 'pixel tridimensionale' (Bottazzi, 2018), ovvero unità elementare dell'informazione visualizzata in forma tridimensionale sullo schermo di un computer. È realizzata mediante un sistema costruttivo in legno che utilizza pannelli CLT (Cross Laminated Timber), rivestito con elementi discreti in legno massello (Fig. 3).

Il suo valore in termini di innovazione risiede, tuttavia, nel processo progettuale e produttivo: come accade spesso per le architetture di piccola scala, anche nel caso della VQC il processo sembra essere preminente rispetto al risultato finale. Il materiale con cui sono realizzati i componenti della costruzione è il pino di Aleppo (Fig. 4), proveniente dalla riserva boschiva della Collserola forest, in accordo con l'obiettivo di produrre un manufatto attraverso l'impiego di materiale a km 0 e coerentemente con la strategia del 'mono-material construction' che è una delle strategie oggi codificate nell'ambito della costruzione circolare (Hillebrandt et alii, 2019).

Tuttavia, l'aspetto di maggiore innovatività risiede nel sistema di tracciabilità dei materiali adottato che fa della VQC l'archetipo di una filosofia della costruzione dove ciclo tecnologico e ciclo biologico si sovrappongono senza soluzione di continuità. Ogni elemento in legno impiegato è stato infatti 'tracciato' in relazione a diversi parametri come, ad esempio, il suo esatto punto di origine (ovvero la pianta da cui è stato prelevato il materiale e la sua posizione nel bosco) o la quantità di carbonio impiegata in tutti i passaggi necessari per la sua trasformazione da elemento naturale a elemento costruttivo. Un'applicazione sviluppata in collaborazione con Bestiario, azienda specializzata nel campo del data-visualization, consente la visualizzazione e la gestione dei dati tracciati attraverso mappe e infografiche di immediata comprensione (Fig. 5, 6).

L'intelligibilità della VQC come dataset costituisce la precondizione non solo per comprendere la provenienza dei suoi componenti e valutarne l'energia incorporata, ma anche per

definire cicli di manutenzione programmata dei componenti e progettare il reimpiego alla fine del loro ciclo di vita. Si può pertanto sostenere come, nella VQC, il processo preminente non sia tanto quello di concezione spaziale o di produzione/assemblaggio dei componenti quanto quello della costruzione del dataset in relazione agli aspetti di circolarità che la VQC incarna, ma l'uso delle tecnologie digitali non si limita a questo solo aspetto. Ad esempio, attraverso un'ulteriore collaborazione con aziende specializzate nel campo dell'Information Technology<sup>10</sup>, presso i Valldaura Labs è stato installato un prototipo di rete 5G privata per sviluppare un'applicazione di realtà aumentata che permette, attraverso la scansione via smartphone dei singoli componenti del manufatto, di visualizzare le infografiche con tutti i dati e le informazioni inerenti a quel componente. E ancora, è stata sviluppata un'applicazione di realtà virtuale che permette, anche da remoto, di visitare la VQC.

Consapevolezza globale e iper-localismo sono combinati nella VQC anche attraverso la 're-immaginazione' di cicli lineari di rifiuti materiali come flussi circolari; ad esempio, gli scarti della fabbricazione del CLT sono riproposti come 'pelle organica' sotto forma di doghe carbonizzate con profili 'a taglio vivo'. Tali componenti sono resi ignifughi e resistenti agli agenti atmosferici attraverso un processo di pre-combustione controllata che fa riferimento alla tradizione giapponese del yakisugi e che consente di non impiegare sostanze chimiche per la protezione delle superfici (Fig. 7). L'articolazione dell'intero sistema di rivestimento è inoltre frutto di un processo di matching tra progettazione computazionale e tecnologie di taglio CNC. Il posizionamento, il distanziamento e la produzione delle lamelle 'a spigolo vivo', che di fatto costituiscono un sistema diffuso di brise-soleil (Fig. 8), è infatti stato sviluppato attraverso un unico workflow, in accordo con uno dei principi chiave della fabbricazione digitale (Marble, 2013). Tutti i sistemi di giunzione sono reversibili, in accordo con un altro caposaldo della costruzione circolare, il Design to Disassembly (Sposito and Scalisi, 2020). Plinti di fondazione in calcestruzzo realizzato con inerte locale, dislocati in soli quattro punti, costituiscono l'attacco a terra di un edificio interamente smontabile.

Se le strategie finora descritte sono riconducibili al tentativo di mettere in pratica un ciclo



Fig. 4 | VQC: In situ tree trunk cutting process for construction components (credit: A. Goula, 2020).

tecnologico – relativo all'intero ciclo di vita del manufatto – armonico e coerente con i cicli biologici del contesto naturale da cui il manufatto trae origine, numerose sono le strategie impiegate per il raggiungimento dell'autosufficienza in fase di esercizio: pannelli solari con accumulatori alimentano l'illuminazione e i dispositivi in essa contenuti; la copertura è caratterizzata da un tetto-giardino, mentre dispositivi per la raccolta dell'acqua piovana e sistemi di riciclaggio delle acque grigie si integrano con un'infrastruttura autonoma di biogas per il trattamento delle acque nere ai fini della generazione di fertilizzante sanitario (Figg. 9, 10). Queste e altre strategie conferiscono alla VQC lo status di edificio quale dispositivo energetico-ambientale autosufficiente e in grado di vivere in modo simbiotico con i cicli e i flussi di energia propri del contesto ambientale in cui si trova.<sup>11</sup>

#### Architetture alla piccola scala: dal sistema ambientale alla totalità ecologica

Nello scenario del costruire contemporaneo, in cui l'approccio digitale-circolare ancora stenta a trovare efficaci condizioni di applicazione e di verifica, l'architettura alla piccola scala assume un carattere esemplare come campo di sperimentazione di soluzioni tecnologiche, processuali e ambientali potenzialmente scalabili. Essa si presenta come un luogo in cui l'urgenza e la complessità delle sfide ambientali trovano nuove e significative connessioni con le possibilità offerte da un uso consapevole e proiettivo delle tecnologie digitali. Meglio di altre esperienze costruttive, l'architettura alla piccola scala dimostra come il progetto nell'era digitale trasli la propria ontologia da una dimensione oggettiva e chiusa in orizzonti prescrittivi verso una dimensione processuale, organica e generativa, basata su un approccio ecologico e circolare, in cui artefatti e natura costituiscono un unico biotopo, un sistema biologico co-evolutivo in cui il concetto di habitat torna a esprimere una nuova prospettiva ecologica dell'abitare.

Le sperimentazioni a questa scala dell'architettura, più che mostrare la natura fattuale e concreta degli oggetti prodotti, incarnano ed evidenziano il processo con cui essi sono stati realizzati, rendendo palese una visione olistica del progetto secondo la quale gli organismi vengono plasmati per assumere forma, funzioni e caratteristiche specifiche per poter interagire 'adattivamente' con l'ambiente in cui si iscrivono. In quanto tale, il progetto non adotta un approccio né descrittivo né prescrittivo ma, secondo un livello più avanzato di design organico, che ingegnerizza la natura secondo parametri desiderati, punta a definire le condizioni e i limiti che consentono di costruire artefatti adattivi e responsivi in grado di imparare da circostanze diverse.

L'approccio ecologico alla base delle sperimentazioni avviate nei laboratori dello IAAC di Barcellona conferma, inoltre, come l'attuale cultura tecnologica digitale presenti un carattere olistico e informativo in cui il concetto di sistema evolve dalla giustapposizione di elementi differenti che entrano in relazione tra loro verso una 'totalità ecologica' che si costituisce costantemente attraverso lo scambio tra sistemi e ambiente, tra materiali e dati, permettendo di ricon-

siderare il rapporto tra necessità umane, tecnologie e natura. Una dimensione ecologica in cui il progettare diviene un processo operativo caratterizzato dall'attività del 'prendersi cura', ossia dell'intelligenza dell'artigiano esperto, in cui non vi è differenza tra l'atto del 'disegnare' e quello del 'costruire' (Inghold, 2013). È il progetto stesso a porsi come interfaccia tra tecnologia e ambiente, valorizzando i processi generativi della forma presenti in natura basati sull'interrelazione tra materiale, informazione, forma e struttura attraverso lo sviluppo di processi digitali integrali di tipo computazionale. Processi generativi che consentono di integrare prestazioni spaziali, vincoli di produzione, logiche di montaggio e caratteristiche dei materiali nella definizione del sistema costruttivo secondo un'interpretazione di adattività intesa come l'attitudine di un sistema a tradurre informazioni in esperienze di progetto.

Le tracce e i sintomi, minuti ed eterogenei, di una transizione in atto nel modo di concepire la trasformazione dell'ambiente in senso ecologico, lasciano intuire un cambio di paradigma che prelude a un nuovo 'tempo progettuale' compreso tra il provvisorio e il permanente. Il progetto, avvalendosi di tecnologie, sistemi e processi digitali, si colloca in una posizione intermedia fra scienza e natura, non caratterizzandosi più unicamente come un agente dominante di trasformazione dell'ambiente ma come un mediatore fra sistemi, naturali e artificiali, che assume come principio guida un approccio culturale olistico, creativo, fortemente interattivo. In questa nuova dimensione ecologica il progetto diventa un luogo di connessioni in cui gli uomini, le macchine e la natura possono riscrivere nel presente il futuro del pianeta, accettando la 'sfida del cambiamento'.

---

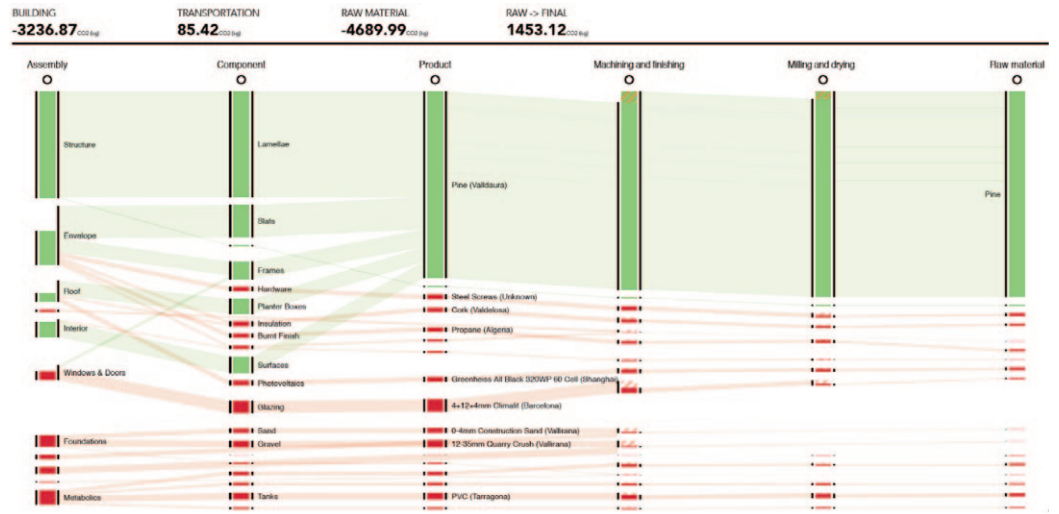
Digital technologies are changing our idea of reality and, to an increasing extent, our way of living the world, creating new ways of interpreting the contexts that digitization with its information brings us to live daily. The environment in which we are immersed has less and less need of material supports and is less and less analogical. According to Luciano Floridi (2014, p. 111), one of the contemporary philosophers most attentive to the cognitive and behavioural transformations of the Information Age, we are witnessing an epochal and unprecedented migration of humanity from Newtonian physical space to the new environment of the infosphere, also because the latter is gradually absorbing the former. In this new environment, digital technologies offer new and countless opportunities for thinking, research and experimentation that can provide methods, strategies and solutions adapted to the growing complexity of doing architecture in an era characterised by an unprecedented ecological crisis. The new digital technologies put us in front of a problem of 'thought' rather than 'tools' and therefore require the formulation of new cognitive theories attentive to the different experiential forms able to structure the different visions of reality and, consequently, in our specific case, to establish new and more advanced relationships between architecture and natural systems.

This epistemological turn involves the transition from a ‘manipulative knowledge’ based on deterministic and reductionist logic to a ‘complex knowledge’ (Morin, 1993) that aims to increase the links between different fields and disciplines for the understanding of the fundamental generative phenomena, not only to decrypt the complexity of living nature but especially to move their logic to processes that can relate in a systemic and adaptive way to the environment in which they are included.

The change in perspective brought about by the digital turn in architectural design calls for a critical reflection on the material culture that distinguishes our time (Picon, 2021). In the articulated interactions that characterize the new ecology of digital design, architecture does not lose its physicality but is enriched both by new sensory qualities, thanks to the use of devices that make it more and more responsive, and by knowledge flows, which connect processes to the transmission of communicable data, and, finally, by materials that can be designed based on performances that are not only functional and aesthetic-perceptive but above all linked to their life cycle.

The digital turn (Carpo, 2017) has allowed the overcoming of the Cartesian dichotomy between ‘machine’ and ‘organism’, further highlighting the importance of interconnections and relationships between organisms and the environment and emphasizing the context and the need for any modification program to start from the analysis of the relationships with the reality to be changed. The computational approach has introduced into the realm of digital design not only complex forms but also abstract and ephemeral materials, such as data and information, which allow constructions to increasingly abandon their rigid and defined nature and to become, like the natural structures from which they draw their inspiration, adaptive systems capable of evolving over time.

As for the traditional materials used in natural architectures, where the variation of environmental conditions corresponds to a process of progressive adaptation between environment and construction, so, according to Attilio Nebuloni (Nebuloni and Rossi, 2018, p. 155), also for adaptive architecture, technological innovations and codification tools allow building, through the materials belonging to the digital context, ‘primitive’ forms of intelligence, which measure their action on the basis of the reception of external stimuli. The effects of this process are to be found not so much in building production, which is more interested in the efficiency aspects of this environmental dimension of architecture, as in the design approach, as a direct relationship between design, computational rules for generating morphology and digital fabrication (Nebuloni and Rossi, 2018, p. 155). We are, therefore, facing a new design paradigm based on multiple and interacting connections which, going beyond the metaphorical dimension of approaches inspired by natural systems and by virtue of the spread of tools and generative processes based on coding and programming tools, combines the potential of the digital with the ecological dimension of architectural design, recomposing the dichotomy between natural and artificial.



**Fig. 5 | VQC:** Bestiario software interface showing the diagram of the carbon dioxide incorporated in all the steps of the VQC production process (credit: Valldaura Labs, 2020; source: projects.bestiario.org).

**Fig. 6 | VQC:** Selection phase of the wooden elements obtained from the cutting phase (credit: Valldaura Labs, 2020).



**Fig. 7** | VQC: The controlled pre-combustion process of the external envelope panels (credit: Valldaura Labs, 2020).

**Fig. 8** | VQC: Detail of the brise-soleil system developed by computational approach (credit: A. Goula, 2020).



**Circular/Digital Approach to the Construction Industry** | Referring to the term ‘ecology’ as «[...] ecosystemic relation between something or someone and its environmental context», and ecology itself as «[...] the reference paradigm of the contemporary age» (Zanotto, 2020, p. 49), the current ‘environmental crisis’<sup>1</sup> has all the features of an ‘ecological crisis’, i.e. disequilibrium, which has become chronic in the Anthropocene era (Lewis and Maslin, 2015), between technological cycles (through which human action is expressed) and biological cycles (of nature). According to Murray Bookchin (2017, p. 78), if we do not do the impossible, we shall be faced with the unthinkable! With this warning Bookchin, philosopher and father of the concept of ‘social ecology’, already in 1982 framed this crisis as an unmissable emergency. Forty years later the world seems to be dangerously close to that ‘unthinkable’ that today manifests itself in the form of complex and violent phenomena such as climate change and, in some respects, the Covid-19<sup>2</sup> pandemic itself. Europe is one of the geographical contexts that today seems to have better understood this state of emergency. The resources allocated by the Next Generation EU plan to the environment for the period 2021/2027<sup>3</sup> represent an extraordinary opportunity to develop effective policies and test innovative strategies.

The construction of a new ecology obviously requires the development of new technological cycles. If this step has not been taken so far, it is for a variety of cultural, political, social and technological reasons. However, the widespread recognition, also within European governance, of the circularity of technological cycles as a strategy for sustainability<sup>4</sup>, as well as the widespread diffusion of digital technologies, represent a new condition of the present – a cultural and technological condition – on which we can base hope for the years to come as well as develop the new season of scientific research that has just begun.

The construction industry represents a field of study where the ‘circular/digital’ synergy could lead to significant results. The inefficiency, in en-

vironmental terms, of the technological cycles related to this sector is today represented by statistics that leave no doubt<sup>5</sup>. This explains the call for ‘circularity’ as a requirement for achieving the EU/2050 climate neutrality goal expressly contained in the Circular Economy Action Plan (European Commission, 2020). Current experiences of circular/digital approach to construction constitute a varied and inhomogeneous field, ranging from the application of software for the management of the Life Cycle Assessment of buildings to highly experimental construction experiences such as Cyclopean Cannibalism, the automated construction of a wall face using waste materials and, in particular, concrete, rubber and stone<sup>6</sup>. With strict reference to current events, «[...] new habits, exchange opportunities and business formulae revolve around the idea of using digital tools to exchange services and commodities, exploiting inefficiencies and redundancies, making a better use of material resources and physical assets» (Zanotto, 2020, p. 48).

The capacity of the digital to translate the

sensible world into data set constitutes, in particular, the technological and operational prerequisite for the application of some fundamental principles of the circular economy applied to the construction, such as ‘buildings as material bank’ and ‘urban mining’, which refer to the built environment as a bank of potentially reusable materials<sup>7</sup>. But only by capturing the physical world through data is it possible to organize what is limited so that it remains available indefinitely (Rau and Oberhuber, 2016, p. 123), Thomas Rau recalls, whose ‘material passport’ represents one of the most original ideas related to the circularity of construction processes. In this process of ‘informed representation’ of the sensible world, the digital, therefore, provides the technological prerequisite to acquire, in the words of Martin Tamke (2017, p. 38), «[...] a depth of understanding about materials, structures and building to predict performances and behavior», but also to transform the technological cycles related to construction into metabolic and circular processes, according to the typical model of biological processes.

Moreover, it is necessary to consider how the circular/digital approach still has limits of feasibility due both to the difficulty of access to largely experimental technologies and to the lack of a mature technological culture of the project. Indeed, one of the main impediments to the diffusion of a circular approach to architecture is, on the one hand, the lack of adequate infrastructures (technological, normative, procedural) capable of supporting the reversibility of processes, and on the other hand, the way architecture is traditionally considered in its nature of a finished object and not in its processual dimension. Even in the field of digital manufacturing systems there are objective limits of transfer to the building construction field.

Although design software and digital fabrication tools have had important transformative effects in innovating many manufacturing processes, their utility is still severely limited when it comes to large-scale form assembly. Computers, in fact, offer tremendous advantages in speed and accuracy, but they cannot match the human ability to make quick and effective decisions in complex contexts such as large buildings. «This introduces a whole host of problems: for example, the size of machines inherently limits the size of the parts they can make; small variations in part geometry or placement can introduce compounding errors during assembly; and machines are incapable of improvising to address changing environmental conditions» (Coelho and Grossman, 2018, p. 54).

**Small-Scale Architecture as an experimentation field** | For some years now, small-scale architecture has been a promising field for experimentation of design strategies and solutions informed by a technological and environmental culture that feeds on the powerful and pervasive digital innovations that inform construction processes and methods, but which, above all, reflects on new ways of thinking about design on a circular horizon. It constitutes an opportunity for direct understanding of design thinking, a great laboratory of ideas and experimentations on the borders between architecture and design, supported by a marked environmental awareness and a complete synthesis between tools and means, between processes and ends, between craftsmanship and industry that is expressed mainly in the exaltation of the concept of system and the need for attention to detail. The tiny scale, the temporary nature, the prototypical nature and the lack of binding regulatory constraints allow free experimentation and development of techniques, systems and processes that are too complex and too costly to be designed for larger buildings.

Small-scale architecture, thanks to its possibility of being conceived, designed and produced as a system of parts assembled together in order to be disassembled, develops a new design culture in which the process is more important than the final result: the product, in other words, is less important than the technical procedures that precede and follow it, defining a concrete realisation of the assembly paradigm and an exaltation of the aspects of the project that are not always visible in the final product. The innovation implied in this design approach consists in the

implementation and conception of a reversibility idea in which the end-of-life management of materials, system elements and potential waste products become an integral part of the generative processes. The materials and resources used are selected and assembled according to their origin, accessibility, availability for use and their potential to be reused after the end of the first operational cycle, identifying in advance opportunities to increase efficiency in their subsequent use.

Thus, small-scale architecture is a place where experimentation with new technological systems for more efficient ecological solutions meets and integrates with the management of biological cycles (handling recycled materials) and natural materials whose origin and life cycle can be traced. Industrial and production processes are organised in a similar way to natural ecosystems with regard to the use of energy and materials, becoming a promising option for making them more efficient and sustainable. For these reasons, small-scale architecture becomes a wide and promising field of experimentation, a great research laboratory, a place of connections between different elements of thought and construction, between the technological dimension and the environmental dimension in which new ecologies of spaces and new forms of habitat in harmony with nature are created, characterised by the urgent need to find construction methods that are more frugal in their use of natural resources.

**The Voxel Quarantine Cabin: an ecological machine** | On the international scene, the Institute for Advanced Architecture of Catalonia (IAAC) is today one of the main references for research in this field, conducting innovative methodologies that involve the integration of research and higher education, as in the case of IAAC's immersive Master in Advanced Ecological Buildings and Biocities (MAEBB). Some research developed in MAEBB investigate, in particular, the possibility of harmonious development between natural and built environments, pursuing an advanced digital approach. The context of this activity is Valldaura Labs, an extraordinary facility that combines research and nature in an innovative way<sup>8</sup>. The 'vision' promoted at Valldaura Labs is to implement the development of a self-sufficient urban environment, capable of producing the resources it needs. In parallel, the natural environment is considered as a diffuse system of connected elements available to be used in construction. From this double 'vision', and from the use of advanced forms of digital technologies, an innovative approach to construction is derived based on the symbiosis between artifice and nature, between the technological cycles that underlie the construction and the biological cycles of natural contexts. This explains the presence of the laboratories within the Collserola forest, used as a 'material bank' from which it is possible to sustainably draw thanks to a workflow that, with the exception of the assembly phases, is exclusively digital.

In particular, the recent experience of the Voxel Quarantine Cabin (VQC) represents a paradigmatic example of such a philosophy, or rather of an approach to construction understood as 'programmed metabolism', in accordance with

the ontology of machines envisaged by Levi R. Bryant (2014, p. 15), for whom nature «[...] consists of nothing but factories, micro and macro machines often wrapped around each other, where a tree is no less than an airplane». Just as – according to Bryant – a tree and its biological cycles can be seen as «[...] a system of operations that performs transformations» (Bryant, 2014, p. 38), the VQC experience prefigures a process of programming the 'matter tree' that is made possible exclusively by a digital workflow in which «[...] matter, far from being passive and awaiting our shaping, modifies our designs in all sorts of unexpected ways» (Bryant, 2014, p. 22).

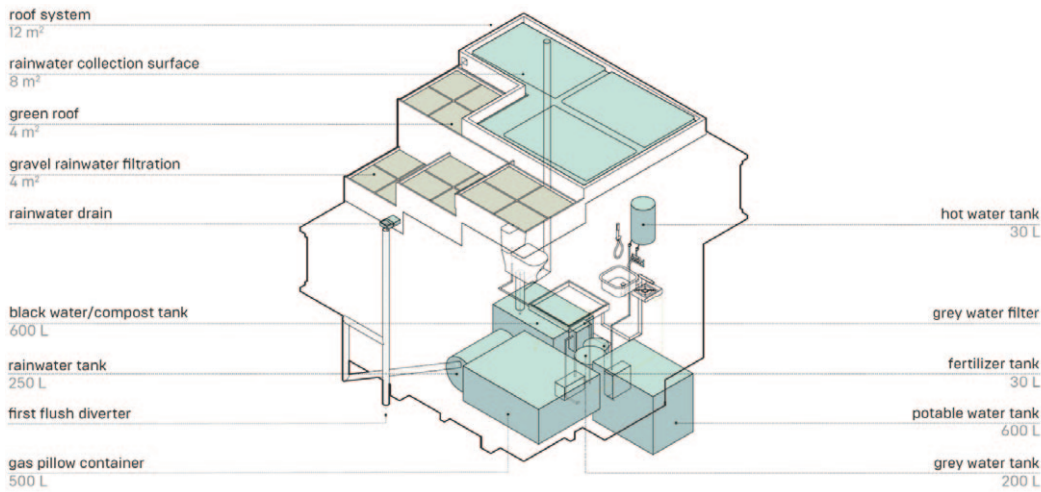
The VQC is a small-scale architecture (12 sqm) conceived and realized in 2020 during the first lock-down in Catalonia as quarantine housing capable of hosting a single inhabitant in isolation for 14 days (Fig. 1, 2). The VQC is the result of a complex work that has seen the co-participation of many actors<sup>9</sup>. Its name (Voxel) derives from what we can consider – in relation to the video interface of a computer device – a three-dimensional 'pixel' (Bottazzi, 2018), i.e. an elementary unit of information displayed in the three-dimensional form on a computer screen. It is built with a timber construction system made of Cross Laminated Timber panels, encased with discrete solid wood elements (Fig. 3).

As it often happens with small-scale architecture, the VQC's value in terms of innovation lies more in the design and production process than in its final shape. The material that makes up the VQC is Aleppo Pine (Fig. 4), sourced from the Collserola forest reserve, in accordance with the goal of producing an artefact through the use of 0-km material and consistent with the 'mono-material construction' strategy that is one of the strategies codified today in circular economy studies applied to construction (Hillebrandt et alii, 2019).

However, the most innovative aspect lies in the material traceability system, which makes the VQC the archetype of a construction philosophy where technological and biological cycles overlap seamlessly. Each timber component of the construction has been traced in relation to different parameters such as, for example, its exact point of origin (i.e. the plant from which the material was taken and its position in the forest) or the amount of carbon used in all the steps necessary for its transformation from a natural element to a building element. An application developed in collaboration with Bestiario, a company specializing in the field of data-visualization, allows the visualization and management of the traced data through maps and infographics of immediate understanding (Fig. 5, 6).

The intelligibility of the VQC as a data set is the precondition not only to understand the origin of its components and to evaluate their embodied energy but also to define planned maintenance cycles of the components and to plan their reuse at the end of their life cycle. Therefore, it can be argued that, in the VQC, the pre-eminent process is not so much that of spatial conception or production/assembly of components as that of the construction of the data set in relation to the aspects of circularity that the





**Fig. 9, 10** | VQC: Axonometric scheme of water management; Roof garden and photovoltaic panels on the roof (credits: Valldaura Labs, 2020).

VQC embodies. But the use of digital technologies is not limited only to this aspect. For example, through further collaboration with companies specialized in the field of Information Technology<sup>10</sup>, at Valldaura Labs a prototype of a private 5G network has been installed to host an augmented reality application that allows visitors, through the scanning via smartphone of the individual components of the artefact, to view infographics with all the data and information related to that specific component. Furthermore, a virtual reality application has been developed to 'explore', even remotely, the VQC.

Global awareness and hyper-localism are further combined in the Voxel through the reimagining of linear cycles of material waste as circular flows. For example, waste from the manufacture of CLT is repurposed as 'organic leather' in the form of charred slats with 'live-edge' profiles. These components are made fire-retardant and resistant to atmospheric agents and pests through a process of controlled pre-burning that refers to the Japanese tradition of *yakisugi* and that avoids the use of chemicals for the protection of surfaces (Fig. 7). The articulation of the entire coating system is also the result of a matching process between computational design and CNC cutting technologies. In fact, the position-

ing, spacing and production of the sharp-edged slats, which constitute a widespread *brise-soleil* system (Fig. 8), was developed through a single parametric workflow, in accordance with one of the key principles of digital fabrication (Marble, 2013). All joint systems are reversible, in accordance with another cornerstone of circular construction, the Design to Disassembly (Sposito and Scalisi, 2020). Poured earth concrete foundation plinths made of local inert material, displaced at only four points, form the ground connection of an entirely disassemblable building.

If the strategies described so far can be seen as the attempt to create a technological cycle – related to the entire life cycle of the building – which is harmonious and consistent with the biological cycles of the natural context from which the building originates, there are many strategies used to achieve self-sufficiency during operation: Solar panels with battery storage power lighting and devices, while a rooftop garden, rainwater collection and greywater recycling systems integrate with a self-contained biogas infrastructure for blackwater treatment to generate only usable fuel and sanitary fertilizer as by-products (Fig. 9, 10). These and other strategies give the VQC the status of a building as a self-sufficient energy-environmental device ca-

pable of living symbiotically with the energy cycles and flows of the environmental context in which it is located.<sup>11</sup>

**Small-Scale Architecture: from environmental system to ecological totality** | In the scenario of contemporary building, where the digital-circular approach is still struggling to find effective conditions of application and feasibility, small-scale architecture takes on an exemplary character as a field of experimentation of technological, processual and environmental potentially scalable solutions. It shows as a place where the urgency and complexity of environmental challenges find new and significant connections with the possibilities offered by informed and projective use of digital technologies. Better than other building experiences, small-scale architecture shows how the design in the digital age shifts its ontology from an objective dimension closed in prescriptive horizons to a generative dimension based on an ecological approach in which artefacts and nature constitute a single biotope, a co-evolutive biological system in which the concept of habitat returns to express a new ecological prospect of living.

Experimentations at this scale of architecture, rather than showing the factual and concrete nature of the objects produced, embody and highlight the process by which they were made, making a holistic vision of design clear according to which organisms are shaped to take on a specific form, functions and characteristics in order to interact adaptively with the environment in which they are inscribed. As such, the project does not take a descriptive or prescriptive approach but, according to a more advanced level of organic design that engineers nature according to desired parameters, it aims to define the conditions and limits that allow the construction of adaptive and responsive artefacts capable of learning from different circumstances.

The ecological approach at the basis of the experimentations carried out in the laboratories of IAAC in Barcelona confirms, moreover, how the current digital technological culture has a holistic and informational character in which the concept of the system evolves from the juxtaposition of different elements that relate to each other towards an 'ecological totality' that is constantly constituted through the exchange between systems and environment, between materials and data, allowing us to reconsider the relationship between human needs, technologies and nature. An ecological dimension in which designing becomes an operational process characterised by the activity of 'taking care', i.e. the intelligence of the skilled craftsman, in which there is no difference between the acts of 'designing' and 'building' (Inghold, 2019). It is the project itself that acts as an interface between technology and environment, enhancing the generative processes of form occurring in nature based on the interrelation between material, information, form and structure through the development of integrated digital computational processes. These generative processes make it possible to integrate spatial performance, production constraints, assembly logic and material characteristics in the definition of the construction

system according to an interpretation of adaptability understood as the ability of a system to translate information into design experience.

The tiny and heterogeneous traces and symptoms of an ongoing transition in the way of conceiving the transformation of the environment in an ecological sense, suggest a paradigm shift that prelude to a new 'design time' be-

tween the temporary and the permanent. The project, using digital technologies, systems and processes, is placed in an intermediate position between science and nature, no longer characterised solely as a dominant agent for the transformation of the environment, but as a mediator between natural and artificial systems, which takes a holistic, creative and highly inter-

active cultural approach as its leading principle. In this new ecological dimension, the project becomes a place of connections where people, machines and nature can rewrite the future of the planet in the present, accepting the 'challenge of change'.

## Acknowledgements

The contribution, resulting from a common reflection, is to be assigned in equal parts to all the Authors.

## Notes

1) According to Oxford Reference (2021), 'environmental crisis' is «A term that is used to describe the sum of the environmental problems that we face today. Key contemporary environmental problems include the greenhouse effect and global warming, the hole in the ozone layer, acid rain, and tropical forest clearance. New dimensions to the environmental crisis include emerging threats and the global nature, rapid build-up, and persistence of the problems». [Online] Available at: [oxfordreference.com/view/10.1093/oi/authority.20110803095753543](https://www.oxfordreference.com/view/10.1093/oi/authority.20110803095753543) [Accessed 10 November 2021].

2) In fact, the scientific community seems to agree in considering the pollution and, in general, the climate crisis, a risk factor for the spread of viral phenomena such as the pandemic in progress. For example, see Dragone et alii (2021), the outcome of the research conducted by the Institute for the study of nanostructured materials of the CNR with Grenoble Institute of Technology and E. Amaldi Foundation.

3) The budget made available by the NextGeneration EU 2021/2027 plan for the strategic area Natural Resources and Environment (Chapter 3) amounts to 401 billion euros, of which 14.48 billion is allocated exclusively to Environment and Climate Action. *For more information see the webpage:* [op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/d3e77637-a963-11eb-9585-01aa75ed71a1/language-en](https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/d3e77637-a963-11eb-9585-01aa75ed71a1/language-en) [Accessed 10 November 2021].

4) The Action Plan for the Circular Economy (2020), an integral part of the European Green Deal, explicitly calls for the concept of circularity as an indispensable requirement for achieving the EU goal of climate neutrality by 2050.

5) In Europe, two figures exemplify the scale of the problem. 3.4 million companies (which accounts for 9% of the EU's gross domestic product) engaged in the construction industry produce 25-30% of all waste generated in the Union and use 4.3 gigatons/year of materials (of which only 12% come from secondary sources). *For more information see the webpage:* [unep.org/resources/emissions-gap-report-2021](https://unep.org/resources/emissions-gap-report-2021) [Accessed 10 November 2021].

6) Authors of this experimentation, launched in 2017, are Randon Clifford, Wes McGee and Johanna Lobdell, researchers at the Massachusetts Institute of Technology (MIT) in partnership with the company Quarra Stone. *For more information see the webpage:* [matterdesign-studio.com/cyclopean-cannibalism](https://matterdesign-studio.com/cyclopean-cannibalism) [Accessed 10 November 2021].

7) The ongoing research at the Institute for Advanced Architecture of Catalonia (IAAC) called Material (data) Intelligence – Towards a Circular Building Environment represents, for example, an emblematic case of how artificial intelligence and data analysis can generate new strategies for reusing building materials. In particular, the research investigates the possibility of building a large dataset of materials from demolition processes for reuse in new construction (Batalle et alii, 2021).

8) The Vallaura Labs are part of the Institute for Advanced Architecture of Catalonia (IAAC). They are located within the Collserola Natural Park, a 135 hectares naturalistic area, immediately north of the metropolitan area of Barcelona.

9) Credits: V. Guallart e D. Ibañez (direction and scientific coordination); M. Salka (technical coordination); L. Pifarré (management); Saltoki, Miogás, Mausa, Distribució Sostenible, Bestiario, Henkel, Cork 2000 & Tallfusta (sponsor); O. Aceves, M. Rodriguez, J. Scheerer, E. Orte, G. Sevillano, E. Chamorro, D. Valldeoriola, M. Nevado, J. Prat, G. Escudero (tutor); B. Ganem, L. Leveri, A. Mhamunkar, D. Nahmias, L. Sidiq, K. Kerner (tutoring and support); A. Hadley, A. Mishchenko, S. Kocaoğlu, C. Garnier, D. Abouross, E. Camps Bastida, F. Vegezzi, G. Mirizzi, J. G. Secondo, M. J. Uka, C. Fajardo, N. Botbol, S. Sharma, Y. Zhang, Z. Liu, R. Aboud, I. Rodriguez Perez (MAEBB students involved in the entire design, production and construction process).

10) Partner of this joint venture are: Mobile World Capital Barcelona, Neutron, Italtel e Aumenta Solutions.

11) For a more deep description of the Voxel Quarantine Cabin, see the video at the webpage: [youtube.com/watch?v=\\_tPnUrYMSO4](https://www.youtube.com/watch?v=_tPnUrYMSO4) [Accessed 10 November 2021].

## References

- Batalle Garcia, A. Cebeci, I. Y. Vargas, C. R. and Gordon, M. (2021), "Material (data) Intelligence – Towards a Circular Building Environment", in Globa, A., van Ameijde, J., Fingrut, A., Kim, N. and Tian Tian, S. L. (eds), *Projections | Proceedings of the 26th International Conference of the Association for Computer-Aided Architectural Design Research in Asia (CAADRIA) 2021*, vol. 1, Association for Computer-Aided Architectural Design Research in Asia, Hong Kong, pp. 361-370. [Online] Available at: [caadria2021.org/wp-content/uploads/CAADRIA2021\\_Proceedings\\_Volume\\_1.pdf](https://caadria2021.org/wp-content/uploads/CAADRIA2021_Proceedings_Volume_1.pdf) [Accessed 10 November 2021].
- Bookchin, M. (2017), *L'Ecologia della libertà* [or. ed. *The Ecology of Freedom*, 1982], Eléuthera, Milano.
- Bottazzi, R. (2018), *Digital architecture beyond computers – Fragments of a cultural history of computational design*, Bloomsbury Visual Arts, London.
- Bryant, L. R. (2014), *Onto-Cartography – An anthology of machines and media*, Edinburgh University Press, Edinburgh (UK).
- Carpo, M. (2017), *The Second Digital Turn – Design beyond intelligence*, The MIT Press, Cambridge (MA).
- Coelho, M. and Grossman, T. (2017), "Crowd-driven pattern formation – Computational strategies for large-scale design and assembly", in Tibbitts, S. (2018), *Autonomous assembly – Designing for a new era of collective construction*, Wiley, Hoboken, New Jersey (US), pp. 50-59.
- Dragone, R., Licciardi, G., Grasso, G., Del Gudino, C. and Chanussot, J. (2021), "Analysis of the Chemical and Physical Environmental Aspects that Promoted the Spread of SARS-CoV-2 in the Lombard Area", in *International Journal of Environmental Research and Public Health*, vol. 18, issue 3, pp. 1-20. [Online] Available at: [doi.org/10.3390/ijerph18031226](https://doi.org/10.3390/ijerph18031226) [Accessed 10 November 2021].

European Commission (2020), *Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions – A new EU Circular Economy Action Plan for a cleaner and more competitive Europe*, document 52020DC0098, 98 final. [Online] Available at: [eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?qid=1583933814386&uri=COM:2020:98:FIN](https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?qid=1583933814386&uri=COM:2020:98:FIN) [Accessed 10 November 2021].

Floridi, L. (2017), *La quarta rivoluzione – Come l'infosfera sta trasformando il mondo*, Raffaello Cortina, Milano.

Hillebrandt, A., Riegler-Floors, P., Rosen, A. and Seggewies, J.-K. (2019), *Manual of Recycling – Buildings as sources of materials*, Detail, Munich.

Inghold, T. (2013), *Making – Anthropology, Archaeology, Art and Architecture*, Routledge, London.

Lewis, S. L. and Maslin, M. A. (2015), "Defining the Anthropocene", in *Nature*, vol. 519, pp. 171-180. [Online] Available at: [doi.org/10.1002/ad.2195](https://doi.org/10.1002/ad.2195) [Accessed 10 November 2021].

Marble, S. (ed.) (2013), *Digital workflows in architecture – Design-Assembly-Industry*, Birkhauser, Basel. [Online] Available at: [doi.org/10.1515/9783034612173](https://doi.org/10.1515/9783034612173) [Accessed 10 November 2021].

Morin, E. (1993), *Introduzione al pensiero complesso – Gli strumenti per affrontare la sfida della complessità*, Sperling & Kupfer, Milano.

Nebuloni, A. and Rossi, A. (2018), *Codice e progetto – Il computational design tra architettura, design, territorio, rappresentazione, strumenti, materiali e nuove tecnologie*, Mimesis, Milano-Udine.

Picon, A. (2021), *The Materiality of Architecture*, University of Minnesota Press, Minneapolis (US).

Rau, T. and Oberhuber, S. (2016), *Material matters – L'importanza della materia*, Edizioni Ambiente, Milano.

Sposito, C. and Scalisi, F. (2020), "Ambiente costruito e sostenibilità – Materiali riciclati e Design for Disassembly tra ricerca e buone pratiche | Built environment and sustainability – Recycled materials and Design for Disassembly between research and good practices", in *Agathon | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 08, pp. 106-117. [Online] Available at: [doi.org/10.19229/2464-9309/8102020](https://doi.org/10.19229/2464-9309/8102020) [Accessed 10 November 2021].

Tamke, M. (2017), "Fundamental changes for architecture", in Commerel, A. H. and Feireiss, K. (eds), *Craftmanship in the digital age – Architecture, value and digital fabrication*, ANCB edition, Berlin, pp. 36-39. [Online] Available at: [ancb.de/sixcms/detail.php?id=18846875](https://ancb.de/sixcms/detail.php?id=18846875) [Accessed 10 November 2021].

Zanotto, F. (2020), *Circular architecture – A design ideology*, LetteraVentidue Edizioni, Siracusa.