POLITECNICO DI TORINO
Repository ISTITUZIONALE

Modularità e architettura adattiva. Una strategia per la gestione di sistemi d’involucro complessi -

Original
Modularità e architettura adattiva. Una strategia per la gestione di sistemi d’involucro complessi -
Modularity and adaptive architecture. A strategy for managing complex envelope systems / Manni, V., Valzano, L.S.. - In: AGATHÓN. - ISSN 2532-683X. - ELETTRONICO. - 14:(2023), pp. 134-151. [10.19229/2464-9309/14112023]

Availability:
This version is available at: 11583/2985648 since: 2024-02-02T16:04:20Z

Publisher:
Palermo University Press | New Digital Frontiers srl

Published
DOI:10.19229/2464-9309/14112023

Terms of use:

This article is made available under terms and conditions as specified in the corresponding bibliographic description in the repository

Publisher copyright

(Article begins on next page)

26 November 2026

AGATHÓN – International Journal of Architecture, Art and Design | n. 14 | 2023 | pp. 134-151
ISSN print: 2464-9309 – ISSN online: 2532-683X | doi.org/10.19229/2464-9309/14112023

Article Info

Received 08 September 2023
Revised 14 October 2023
Accepted 26 October 2023
Published 31 December 2023

MODULARITÀ E ARCHITETTURA ADATTIVA
Una strategia per la gestione di sistemi d'involucro complessi

MODULARITY AND ADAPTIVE ARCHITECTURE
A strategy for managing complex envelope systems

Valentino Manni, Luca Saverio Valzano

Abstract

A fronte del cambiamento climatico globale all'ambiente costruito è ascrivibile un crescente fabbisogno energetico per il mantenimento di condizioni di benessere indoor. L'architettura adattiva, ispirata al pensiero sistemico e alla biomimetica, può dar vita a organismi edilizi complessi che rispondono dinamicamente alle sollecitazioni ambientali attraverso la modulazione della fisicità del proprio involucro, riducendo il dispendio energetico per la climatizzazione. L'illustrazione di un quadro rappresentativo di progetti e ricerche evidenzia il ruolo della modularità nell'architettura adattiva in termini di principi di funzionamento, modalità di controllo, modalità di risposta, complessità funzionale e strutturale. Il contributo mette in luce la centralità della modularità quale strategia per affrontare la complessità multidimensionale dei sistemi tecnologici per l'involucro adattivo.

In the face of global climate change, the built environment is experiencing an increasing demand for energy to maintain indoor comfort conditions. Inspired by systemic thinking and biomimicry, adaptive architecture can give rise to complex building organisms that dynamically respond to environmental stimuli by modulating the physicality of their envelope, thereby reducing energy consumption for climate control. Illustrating a representative framework of projects and research highlights the role of modularity in adaptive architecture in terms of operational principles, control modes, response mechanisms, functional complexity, and structural complexity. This contribution underscores the centrality of modularity as a strategy to address the multidimensional complexity of technological systems for adaptive envelopes.

Keywords

architettura adattiva, involucro edilizio adattivo, complessità, modularità, tassellazioni

adaptive architecture, adaptive building envelope, complexity, modularity, tessellations

Valentino Manni is a Researcher and Lecturer at the Department of Architecture and Design and Scientific Director of the Innovative Technological Systems Laboratory at the Polytechnic University of Turin (Italy). His research has focused on sustainable architectural design, the exploitation of renewable energy sources for the building envelope, and technological systems for glazed facades and solar shading. E-mail: valentino.manni@polito.it

Luca Saverio Valzano is a PhD Candidate at the Department of Architecture and Design and a Teaching Associate at the Department of Structural Engineering Building and Geotechnical Engineering, Polytechnic University of Turin (Italy). His research focuses on studying adaptive biomimetic technological systems for the building envelope. During his studies, he has investigated topics such as construction in developing countries, the design of high-rise buildings, and parametric design. E-mail: luca.valzano@polito.it

Le cause del cambiamento climatico sono molteplici, complesse e interconnesse e dipendono in gran parte dall'azione antropica sull'ecosistema. Poiché nelle città avviene la maggior parte dei processi di conversione dell'energia a supporto delle attività antropiche, ne deriva che ad esse è ascrivibile una quota considerevole del fabbisogno energetico mondiale e delle conseguenti emissioni di gas climalteranti in atmosfera (UNEP, 2020). Si stima che attualmente circa il 55% della popolazione mondiale viva in aree urbanizzate e si prevede che tale quota sia destinata ad aumentare nei prossimi decenni, con un raddoppio entro il 2050 del patrimonio edilizio mondiale rispetto a quello del 2015 (CIESIN, IFPRI and CIAT, 2011; UNEP, 2016).

Nel quadro descritto, in ragione di una sostenuta crescita demografica, i Paesi in via di sviluppo assumono un ruolo preminente nel determinare un aumento dell'azione antropica sull'ambiente. Inoltre, poiché la maggior parte di essi si colloca nelle zone a clima tropicale, si prevede che a livello globale la domanda energetica per raffrescamento eguaglierà quella per riscaldamento nel 2060 (Birmingham Energy Institute, 2015) e si ipotizza che entrambe le modalità di condizionamento dell'aria saranno conseguite attraverso l'impiego di pompe di calore ad alimentazione elettrica (Butera, 2021).

Risulta evidente come la razionalizzazione del metabolismo dell'ambiente costruito rappresenti un tema ineludibile dell'era contemporanea, in termini energetici e ambientali ma anche economici e sociali, che sollecita la ricerca di soluzioni in grado di ridurre significativamente l'impatto antropico sull'ambiente (Antonini, 2019). Richard Rogers (1998, p. 4) sostiene che «[…] our cities are the major destroyer of the ecosystem and the greatest threat to mankind's survival on the planet. […] While the need for cities and the inevitability of their continued growth will not diminish, city living per se need not lead to civilization's self-destruction. [Ma afferma di credere] that the arts of architecture could evolve to provide crucial tools for safeguarding our future».

I progetti e le ricerche condotte nell'ultimo ventennio sembrano poter soddisfare le aspettative di Rogers rispetto alla capacità dell'innovazione tecnologica di fornire soluzioni in risposta alle cogenti questioni ambientali. Infatti alla scala architettonica è possibile ricorrere a tecnologie in grado di dare vita a un organismo edilizio che, superando la consolidata concezione di equilibrio statico con l'ambiente, si ponga in relazione dinamica continua con il proprio contesto, modificando aspetti della propria fisicità al variare delle sollecitazioni ambientali, al fine di conseguire un controllo razionale del microclima interno e di mitigare il dispendio energetico.

Nuovi indirizzi dell'architettura demandano la capacità di adattamento all'involucro, in quanto esso è la principale interfaccia per la regolazione degli scambi di energia e di materia tra ambiente interno ed esterno, cambiandone la concezione da statica a dinamica. In questa prospettiva l'involucro adattivo, inteso come responsivo, dinamico ed efficiente in termini energetici (IEA, 2022), da subsistema per la protezione dagli agenti climatici si trasforma in sistema in grado di interagire con i contesti esterno e interno, mutando la propria natura da elemento di separazione a elemento di mediazione caratterizzato da un considerevole grado di complessità funzionale e tecnologica.

Il contributo mette in luce come l'applicazione dell'approccio modulare renda possibile affrontare la complessità dell'architettura adattiva. Partendo dalla definizione del significato di adattività, complessità e modularità e procedendo attraverso la descrizione degli attuali indirizzi di sviluppo della ricerca sul tema e di un insieme rappresentativo di progetti e sperimentazioni si mettono in luce ricadute e prospettive dell'approccio modulare nell'architettura adattiva.

L'architettura adattiva | Il concetto di architettura adattiva fu introdotto negli anni '70 da Nicholas Negroponte per indicare un tipo di architettura che possiede la capacità di modificarsi in tempo reale per rispondere alle complesse e mutevoli condizioni ambientali: «[…] responsive, sometimes called adaptable, or reactive, means the environment is taking an active role, initiating to a greater or lesser degree changes as a result and function of complex or simple computations» (Negroponte, 1975, p. 132). Tillmann Klein del TU Delft sostiene che l'architettura adattiva «[…] not dissimilar to Nature, it responds dynamically to change» (cit. in Mazzucchelli, 2018, p. 79). Il dibattito scientifico coglie questa analogia con il mondo naturale e mette in luce come l'architettura adattiva, ispirandosi all'approccio biomimetico nella ricerca tecnologica e nel progetto (Benyus, 1997; Jeronimidis and Gruber, 2012), concepisca un edificio quale sistema in grado di svolgere molteplici funzioni in virtù della capacità di auto-organizzarsi come un organismo biologico auto-poietico (Maturana and Varela, 1985).

Se già Negroponte immaginava l'architettura adattiva quale risultato dell'integrazione della potenza di calcolo e della capacità tecnologica, negli ultimi decenni, la disponibilità di dispositivi e tecnologie per il monitoraggio e il controllo – come la sensoristica, l'Internet of Things (IoT), il Building Management System (BMS), l'Intelligenza Artificiale (AI) – insieme a sofisticati dispositivi attuatori, elettrici, pneumatici o chimico-fisici, concretizza gli scenari prefigurati (d'Estrée Sterk, 2005), dando vita a un'architettura cognitiva, interattiva e complessa.

Gli strumenti computazionali anticipano la capacità responsiva dell'architettura fin dalla fase di progetto; la capacità predittiva del Computational Design basato sulla modellazione e sulla simulazione parametrico-algoritmiche, implementato con il Building Information Modeling, i Big Data e il Data Exchange (Davino and Bassolino, 2019), è in grado di descrivere il livello prestazionale dell'organismo architettonico adattivo cogliendo la complessità delle relazioni tra sistema edificio-impianto e utenza. Per descrivere gli scenari di maggiore efficienza energetica è possibile considerare le azioni ambientali, le prestazioni dei sistemi tecnologici d'involucro, le caratteristiche dei dispositivi per la generazione energetica, per l'illuminazione e per la climatizzazione indoor e, persino, i modelli di comportamento dell'utenza (Energy Efficiency Based on User's Behaviour). In sintesi, l'analisi «[…] dell'interazione tra edificio, ambiente esterno e utente, può costituire un potente strumento di conoscenza» (Andaloro, 2021, p. 79) per l'ottimizzazione dei modelli di funzionamento dell'architettura adattiva.

La complessità dei sistemi adattivi | L'elevato livello di integrazione tecnologica conferisce all'architettura adattiva un considerevole grado di complessità, in ragione della molteplicità delle relazioni che si stabiliscono tra le parti interagenti che ne costituiscono l'articolazione e della variabilità delle funzioni che vengono loro demandate. Il pensiero sistemico interpreta la complessità quale caratteristica di un sistema, concepito come un aggregato organico e strutturato di parti mutuamente interagenti, in virtù della quale il comportamento del sistema non è determinato, riduttivamente, da quello delle singole parti che lo costituiscono, ma dipende dalle modalità della loro interazione. Ciribini (1979, 1984) mette in luce come l'interconnessione tra le parti di un sistema complesso ne determini la struttura, specificando che le sue caratteristiche fondamentali sono la totalità, la trasformazione e l'autoregolazione, che danno luogo, in architettura, a sistemi complessi adattivi, per i quali valgono le leggi dell'omeostasi e della retroazione.

L'epistemologia della complessità, che trova la propria razionalizzazione nel lavoro di Morin (1985), deve le proprie premesse agli studi di fine Ottocento di Poincaré (1902, 1905, 1909; Toscano, 2008) e a quelli, nella prima metà del Novecento, di matematici e fisici come Hadamard (1921), Schrödinger (1926a, 1926b) e Andronov (Andronov, Vitt and Khaikin, 1966). Contributi decisivi al pensiero complesso furono offerti dalla Tectologia di Bogdanov (Rispoli, 2012), dalla cibernetica di Wiener (1948), von Foerster (2003) e Weaver (1948) e, in seguito, dagli studi di Prigogine (1993) sulla termodinamica che presto si volsero all'esame dei sistemi adattivi in molteplici domini, tra cui quello ecologico, cogliendo la pluralità delle relazioni non lineari tra le parti dei sistemi naturali e la tendenza a mettere in atto processi di auto-organizzazione autopoietici.

L'auto-organizzazione generalmente viene intesa come una forma di sviluppo del sistema attraverso influenze ordinanti e limitative, provenienti dagli stessi elementi che costituiscono il sistema, che permettono di raggiungere un maggior livello di complessità. Hofstadter (1985) descrive l'auto-organizzazione quale composizione di totalità coerenti a partire da parti disperse, mentre Capra (2015) ne mette in luce la non linearità; De Toni e Comello (2005) ne evidenziano, invece, la capacità di conferire robustezza e resilienza a un sistema.

La molteplicità delle parti costituenti un sistema complesso e la variabilità delle reciproche influenze (nel senso di frequenza di cambiamento nel tempo), in essere o in potenza, in quanto la struttura di un sistema è anche molteplicità delle interazioni possibili (Piaget, 1978), impongono l'applicazione di strategie per la gestione della complessità. Un sistema tecnologico può trarre vantaggio dall'articolazione modulare della propria struttura (sia nella sua dimensione logica sia nella sua esplicitazione fisica) quale strategia per la gestione della propria complessità intrinseca. In un sistema, a fronte dell'aumento del grado di complessità prodotto dall'auto-organizzazione, la modularità rappresenta uno strumento per l'individuazione di soluzioni di maggiore efficienza ed efficacia.

La modularità per la gestione della complessità | La Legge della Varietà Necessaria, teorizzata da William Ross Ashby (1957) nell'ambito dei propri studi sulla cibernetica e sui sistemi complessi, stabilisce che per ogni sistema complesso

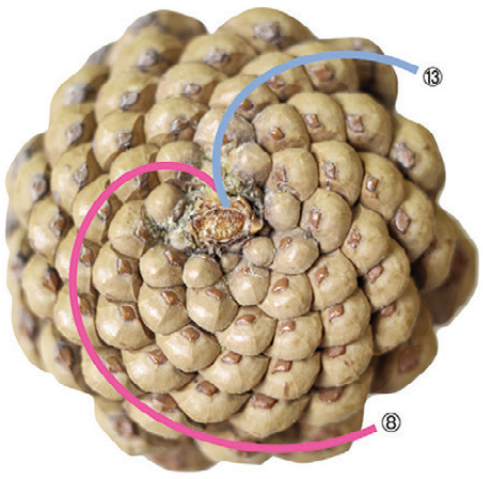
che ne governa un altro, il sistema più ampio debba avere un livello di complessità comparabile al sistema governato. In altre parole il controllo è possibile solo se il sistema regolatore possiede una varietà e una flessibilità pari o superiore al sistema complesso regolato. Ciò conduce a due strategie equivalenti ma diametralmente opposte: o si aumenta la complessità del sistema regolatore o si riduce quella del sistema regolato. Ne deriva la vantaggiosità di scomporre un sistema complesso, difficilmente gestibile, in una pluralità di componenti di minore complessità, al fine di renderne più semplici controllo e gestione (Salingaros, n.d.). Tale scomposizione dà luogo alla modularità che, nell'ambito del progetto, può essere definita «[…] a very general set of principles for managing complexity» (Langlois, 2000, p. 19).

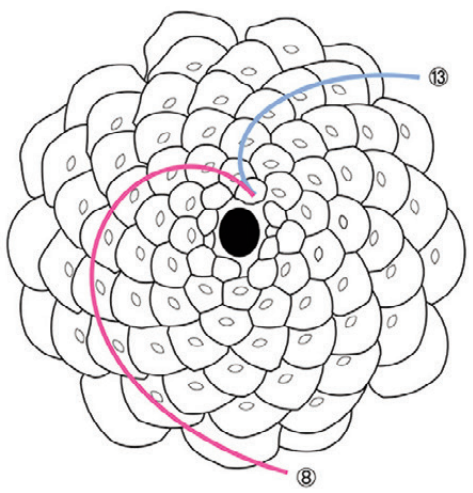
L'approccio modulare consiste nella suddivisione della struttura di un sistema complesso in unità logiche o funzionali disgiunte ma coerenti e interdipendenti – chiamate moduli – distintamente individuate e caratterizzate da un livello di complessità gestibile. I moduli, per mezzo delle reciproche relazioni, rimandano sempre a una struttura superiore, risultante dalla combinazione delle parti; pertanto la modularità non è mai 'chiusa', in quanto la struttura può essere indefinitamente estesa; inoltre la possibilità di stabilire relazioni tra diverse strutture sottolinea il carattere aperto della modularità; essa non è un'astrazione: se ne ha riscontro ovunque, soprattutto in Natura, in quanto essa rappresenta il modo con cui, a fronte della complessità dell'ecosistema, il vivente esplica l'auto-organizzazione attraverso la ricombinazione e l'adattamento di pattern funzionali (Tucci, 2017).

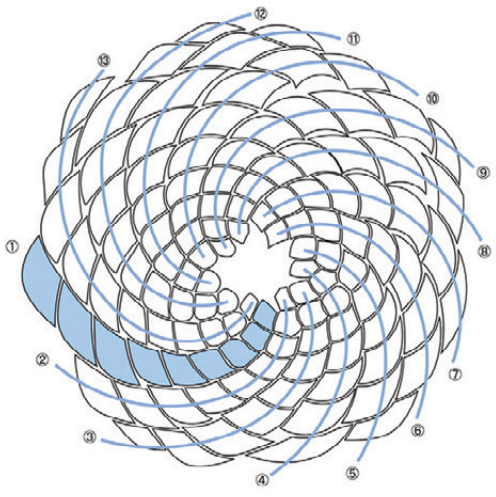
Nel 1917 Thompson (1992), attraverso il volume On Growth and Form, divulgava i propri studi condotti con metodi analitici sui processi naturali relativi alla creazione di forme, mettendo in luce come le regole matematiche che governano i fenomeni di crescita degli organismi viventi siano fondate su regolarità e modularità. Nei processi morfogenetici piante e animali manifestano la tendenza a svilupparsi secondo successioni matematiche e schemi geometrici ricorsivi riconducibili alla successione numerica di Fibonacci e alla sezione aurea. Lo sviluppo del numero di spirali brattee su una pigna (Fig. 1), la disposizione dei semi nello stame del girasole e l'accrescimento della conchiglia calcarea del nautilus (Fig. 2) seguono la successione di Fibonacci e una ricorsività modulare e scalare, dimostrando come in Natura il concetto di modularità afferisca principalmente a principi di auto-organizzazione e di autoregolazione secondo schemi ascrivibili a un dominio prettamente logico, in cui la regola che governa la complessità supera la precisa manifestazione spaziale, temporale e materiale.

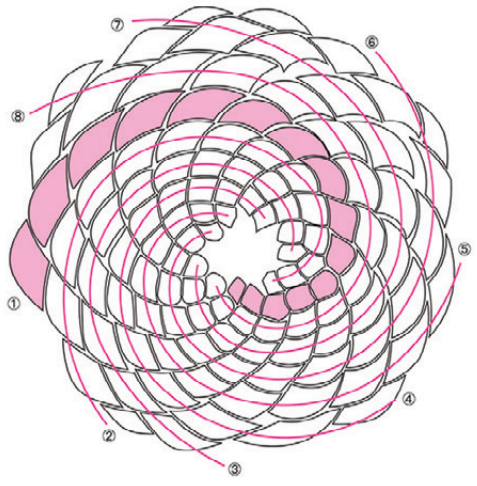
Il pensiero di Thompson ha profondamente influenzato il lavoro di studiosi e architetti, da Frei Otto a Norman Foster, da Toyo Ito a Nicholas Grimshaw[1], infatti anche un'architettura può essere concepita attraverso l'emulazione dei processi di ottimizzazione messi in atto dai sistemi viventi (Tucci and Carlo Ratti Associati, 2023) e può essere interpretata come un organismo modulare scomponibile in diverse unità interagenti. La modularità può dare forma al progetto fin dalle sue primissime fasi: dalla sua concezione, alla specificazione tecnologica, alla costruzione fino alla gestione, la modularità, semplificandone la fenomenologia complessa, rende possibile la concretizzazione dell'architettura.

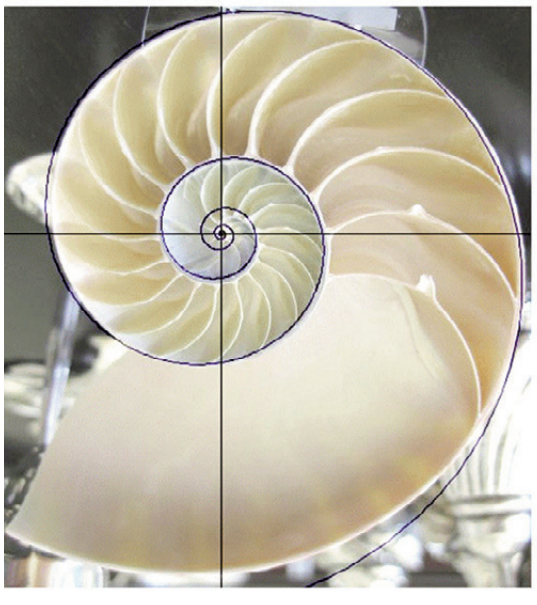
La modularità nell'architettura adattiva | Un approccio modulare nell'architettura adattiva si traduce nell'impiego di moduli con configurazioni e funzioni variabili ma formalmente e unitariamente definite e interrelate, cosicché ciascun modulo costituisce una parte omogenea e unitaria di una medesima struttura, una parte del tutto in grado di perseguire specifici obiettivi. Pur presentando un'articolazione complessa i componenti di una struttura modulare sono comunque facilmente gestibili e maggiormente controllabili e rispondenti alla pluralità delle esigenze. Infatti l'articolazione modulare consente a un sistema di graduare funzioni e prestazioni dei moduli, in modo da passare











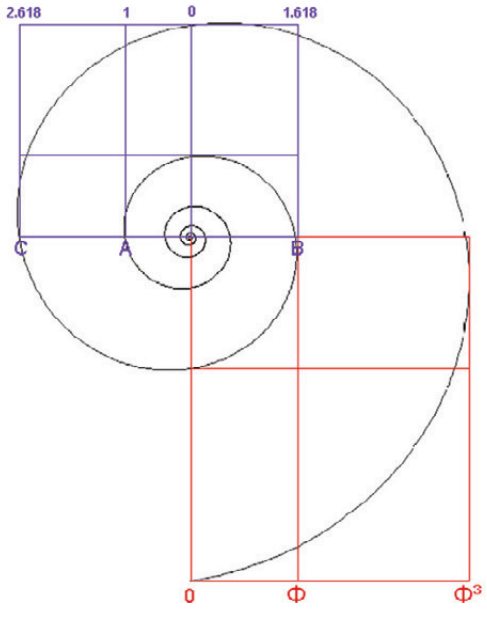


Fig. 1 | Spirals on the pinecone following the Fibonacci sequence (source: craftofcoding.wordpress.com; credit: M. Wirth, 2022).

Fig. 2 | Growth of the shell of the nautilus (source: goldennumber.net; Meisner, 2014).

da compiti semplici a compiti più complessi, muovendosi da un limitato livello di autonomia a un elevato livello di complessità.

La misura dell'articolazione modulare e il grado di interrelazione tra i moduli influenzano specifici aspetti del sistema che, se spiccatamente modulare e composto da un numero considerevole di moduli, è più facile da manutenere e ampliare, ma manifesta un'elevata complessità intrinseca, derivante dalla necessità di gestire la coordinazione tra i moduli; di contro un sistema limitatamente modulare, composto da un numero esiguo di moduli, è più difficile da manutenere ma la coordinazione tra i moduli è più semplice. Tali considerazioni invitano a valutare l'utilizzo di specifici componenti attraverso il grado di separabilità e di aggregabilità dei componenti di un sistema modulare, il loro livello di interdipendenza e le regole attinenti all'architettura generale del sistema (Sorrenti, 2017).

I vantaggi dell'applicazione dell'approccio modulare in architettura sono molteplici. Da un punto di vista compositivo è possibile caratterizzare l'oggetto architettonico in virtù di molteplici soluzioni ottenute dalla combinazione di un numero finito di componenti, mentre dal punto di vista tecnologico è possibile modulare le soluzioni in ragione della complessità delle funzioni e della molteplicità dei requisiti definiti. Dal punto di vista produttivo la fornitura di varietà limitate di componenti si traduce nella possibilità di conseguire costi di produzione inferiori, mentre dal punto di vista gestionale l'omogeneità e l'intercambiabilità dei moduli agevolano i processi di riparazione e di sostituzione, riducendo i costi della manutenzione nel tempo.

Nell'architettura contemporanea numerosi progetti mettono in luce come l'approccio modulare sia essenziale per la realizzazione di sistemi di involucro adattivi, in termini di installazione, funzionamento, controllo prestazionale, manutenibilità e figurabilità architettonica. Il funzionamento della facciata meridionale dell'Institut du Monde Arabe (1987) a Parigi, di Jean Nouvel, si basa sulla ripetizione modulare di diaframmi meccanici, ispirati all'occhio umano, a cui è demandato il controllo dell'illuminazione naturale negli ambienti interni.

Il sistema di schermatura solare delle Al-Bahar Towers (2012) ad Abu Dhabi di Aedas Architects e Arup presenta un'articolazione a nido d'ape di moduli dotati di elementi tessili dispiegabili che asseconda lo sviluppo curvilineo delle facciate; l'approccio modulare consente di attuare risposte locali differenziate, proporzionali al gradiente delle sollecitazioni ambientali, di semplificare la manutenzione e di caratterizzare l'immagine architettonica (Fig. 3). L'involucro edilizio del Kiefer Technic Showroom di Graz (2007) in Austria, di Ernst Giselbrecht, si basa sulla cinematica di moduli di facciata interconnessi; una schermatura solare, realizzata in pannelli metallici e attuata da dispositivi meccanici, dà vita a un'ampia gamma di configurazioni (Fig. 4).

L'involucro del Media-TIC Building di Barcellona (2009; Fig. 5), di Enric Ruiz Geli, è stato sviluppato attraverso un processo morfogenetico di trasformazione di una griglia modulare (Fig. 6) che compone una trama di cuscini gonfiabili in etilene tetrafluoretilene (EFTE) i quali consentono il passaggio della luce pur assorbendone la componente termica (Albiñana, 2011). Una rete di sensori integrati e indipendenti governa dispositivi pneumatici che, insufflando aria nei cuscini, ne modificano la capacità schermante e coibente, dando luogo a una responsività commisurata al livello di radiazione solare locale che contribuisce al conseguimento di una maggiore efficienza globale del sistema.

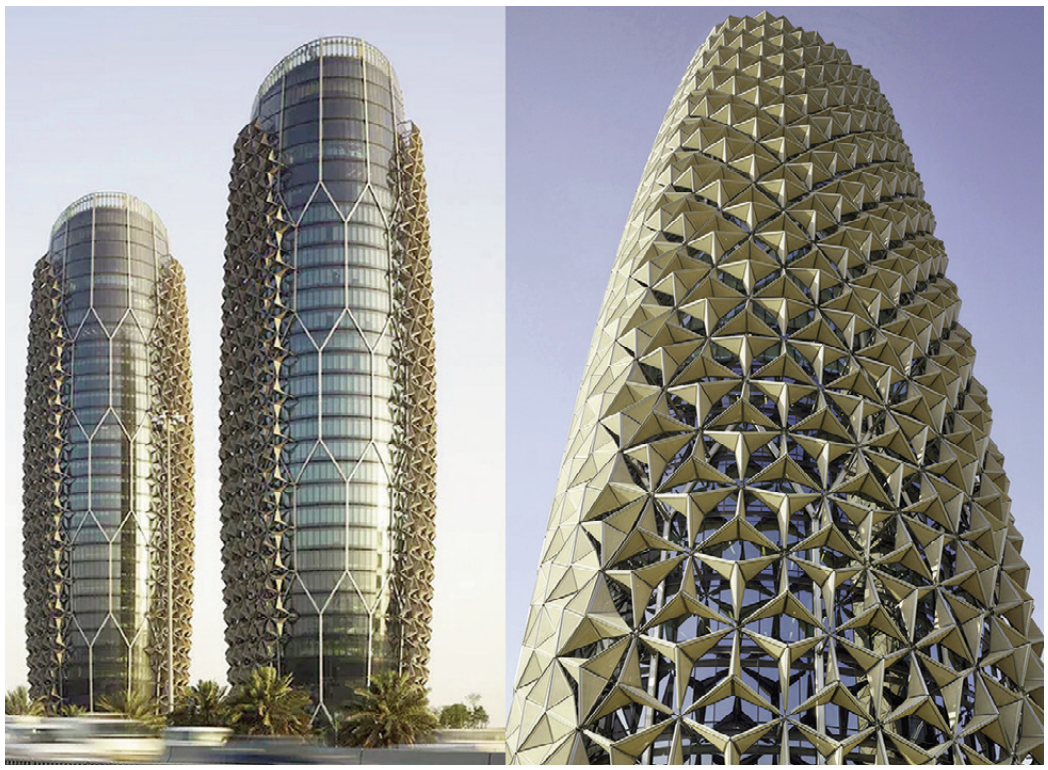


Fig. 3 | Al-Bahar Towers (2009-12) in Abu Dhabi, designed by Aedas Architects and Arup (source: archello.com; credit: C. Richters, 2014).



Fig. 4 | Kiefer Technic Showroom (2006-07) in Graz, designed by Ernst Giselbrecht and Partner ZT GmbH (source: archtonic.com; credit: P. Ott, 2010).

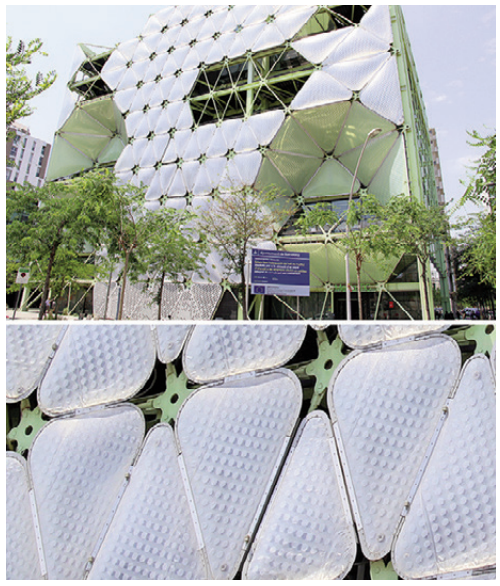
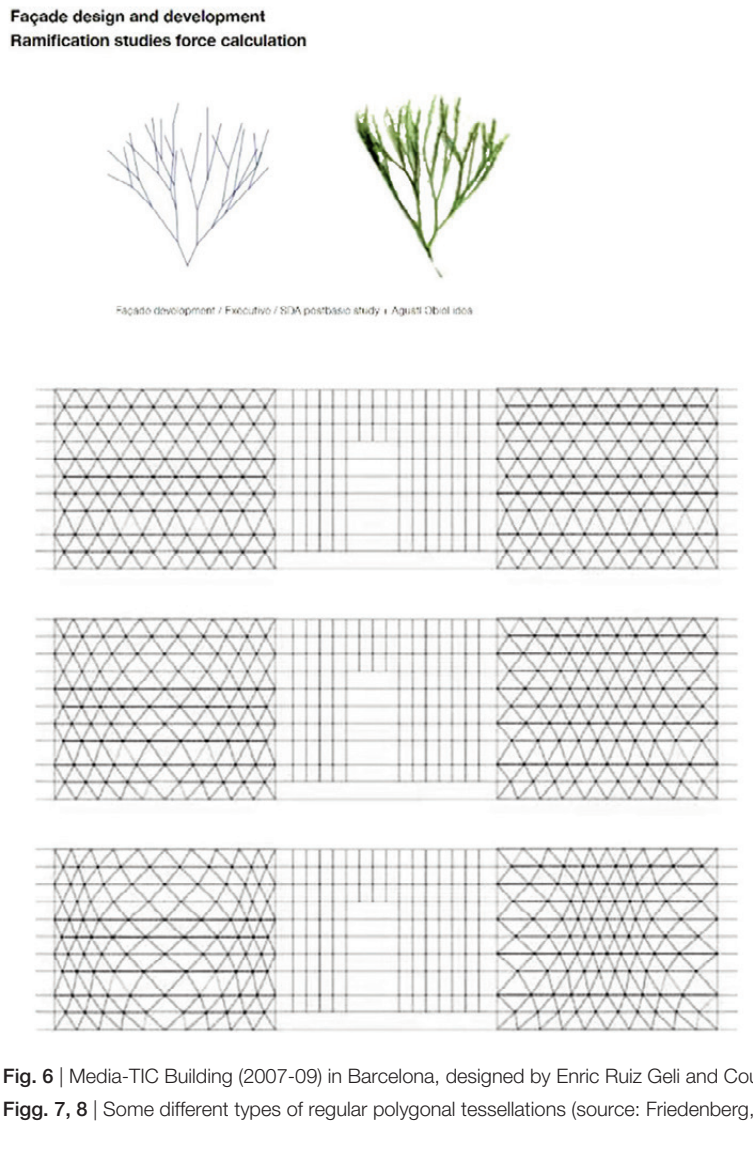


Fig. 5 | Media-TIC Building (2007-09) in Barcelona, designed by Enric Ruiz Geli and Coud9: main façade and detail of modules (source: flickr.com; credit: F. Romero, 2017).

Tassellazioni, origami e kirigami: la ricerca sulla modularità nell'architettura adattiva | La frontiera della ricerca sull'involucro adattivo ricorre alla metodologia analitica della matematica e della geometria per conseguire progressi tecnologici e inedite soluzioni formali. In geometria, la ripetizione di una figura su una superficie piana o spaziale attraverso variazioni quali rotazione, riflessione, alternanza, traslazione o trasformazione scalare dà luogo a una configurazione modulare definita 'pattern'. La tipologia più semplice di pattern è la 'tassellazione', ovvero la ripetizione all'infinito di una o più figure geometriche su una superficie, senza lacune o sovrapposizioni.

In generale le tassellazioni possono assumere, come modulo, figure geometriche piane come triangoli, quadrati ed esagoni. Il triangolo equilatero è un'ottima figura modulare impiegabile nelle tassellazioni in quanto da un lato è in grado di



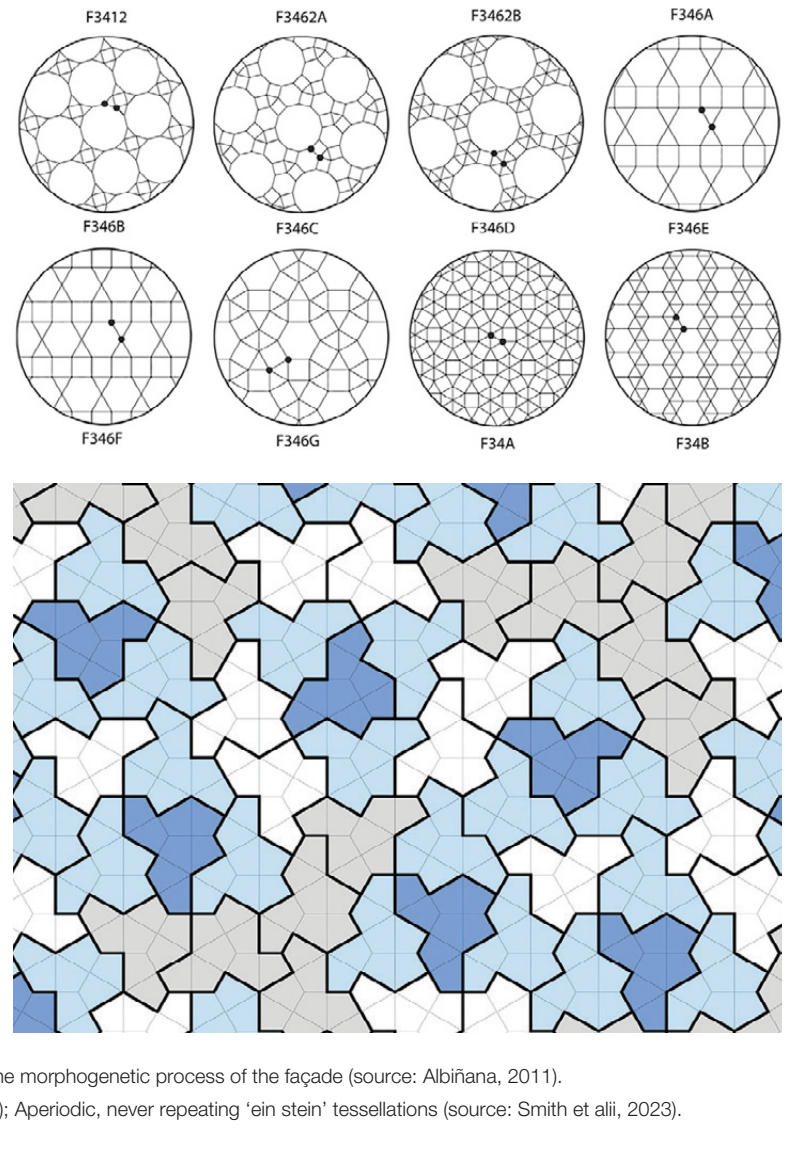


Fig. 6 | Media-TIC Building (2007-09) in Barcelona, designed by Enric Ruiz Geli and Coud9: the morphogenetic process of the façade (source: Albiñana, 2011).

Figg. 7, 8 | Some different types of regular polygonal tessellations (source: Friedenberg, 2019); Aperiodic, never repeating 'ein stein' tessellations (source: Smith et alii, 2023).

occupare interamente una superficie senza l'ausilio di altri poligoni, dall'altro la ripetizione del modulo triangolare consente la creazione di altre figure geometriche come il rombo, il trapezio, l'esagono o poligoni stellari.

Le tassellazioni che si ottengono mendiante trasformazioni isometriche 'rigide' come traslazione e rotazione vengono definite regolari (Fig. 7). Tra le tassellazioni non regolari o aperiodiche, ovvero tali che nessuna rotazione o traslazione sia in grado di spostare localmente i tasselli l'uno sull'altro, si annoverano quelle randomiche di Lejeune Dirichlet (1850) e di Delaunay (1934) o quelle irregolari di Wang (1961), di Robinson (1971) o di Penrose (1974), scoperta nel 1974 e basata sulla sezione aurea. Nel 2023 il matematico David Smith (Smith et alii, 2023) ha scoperto la tassellazione aperiodica 'ein stein' caratterizzata da un'unica forma le cui combinazioni generano uno schema che non si ripete mai (Fig. 8).

La Natura offre numerosi esempi di tassellazioni, tra cui la superficie alare e gli occhi degli insetti, il favo delle api, il tessuto monocellulare della cipolla, la trama della lamina della foglia, le fratture di un terreno argilloso secco, nonché alcune strutture cellulari animali e vegetali (Fig. 9), dimostrando che la ricorsività di determinati principi geometrici e morfologie, pur differenziatesi per parametri e fattori limitanti, è trasversale a molteplici domini ed è generalmente motivata da fattori biologici, chimico-fisici e dall'interazione con l'ambiente esterno. Il sistema di schermatura solare del Kolding Campus di Henning Larsen Architects a Grønborg in Danimarca (2014) è un esempio di applicazione di una tassellazione triangolare al progetto di un'architettura adattiva (Fig. 10). Nel sistema di involucro Responsive Façade ideato da Boutros Bou-Nahra[2], basato su una tassellazione di prismi a base quadrata, pannelli in fibra di vetro polimerizzata ruotano su un asse regolando il guadagno solare con l'ausilio di sensori e attuatori meccanici (Fig. 11).

L'indagine sullo stato dell'arte dell'architettura adattiva mette in luce che la ricerca si sta indirizzando verso l'approfondimento metodologico delle tecniche di tassellazione, come ad esempio la piegatura di superfici nelle tre dimensioni, in analogia con la tecnica orientale dell'origami, al fine di ottenere inedite configurazioni geometriche, dare luogo a nuovi cinematismi e semplificare l'articolazione strutturale dei sistemi tecnologici responsivi riducendone i componenti soggetti ad usura.

A partire dagli anni '70 il crescente interesse della ricerca nei confronti degli origami, dovuto alla loro capacità di dare luogo a tassellazioni che si adattano a superfici di forma libera (Tsiamis, Oliva and Calvano, 2018; Fig. 12) e dei cinematismi che sono in grado di esplicare, ha dato impulso alla cosiddetta architettura origamica (Rodonò, 2022). Nel tempo i principi alla base degli origami sono stati impiegati per lo sviluppo di strutture dispiegabili, strutture riconfigurabili e strutture a elevate prestazioni meccaniche. Più recentemente Tomohiro Tachi (2011) dell'Università di Tokyo ha sviluppato il dimostratore Rigid-Foldable Thick Origami, componente d'involucro composto da un insieme di pannelli rigidi uniti sul loro perimetro con materiale flessibile per generare un comportamento cinetico (Fig. 13), mentre Ohira, Eguchi, Okabe e Tanaka (2022) della Keio University hanno sviluppato il dimostratore Ex-Chochin, involucro adattivo realizzato secondo una tassellazione origamica ispirata al pattern Miura, in grado di cambiare forma e tessitura grazie all'azione di attuatori meccanici e di generare un'ampia gamma di configurazioni geometriche (Fig. 14).

Diversi studi e sperimentazioni applicano anche la tecnica del kirigami, variante dell'origami, in cui oltre alla piegatura viene praticato anche l'intaglio. Breathing Façade (Kuboki et alii, 2019) è un sistema modulare per l'involucro adattivo ispirato alle branchie dei pesci composto da membrane in metamateriali polimerici auxetici a memoria di forma in cui sono stati praticati degli intagli per innescare una ventilazione spontanea tra ambiente interno ed esterno (Fig. 15). Infine ricerche come quella condotta dal gruppo del Prof. Overvelde dell'Università di Harvard dimostrano che componenti in metamateriali auxetici basati su articolazioni modulari origamiche, in virtù di una



Fig. 9 | Samples of tessellations in Nature (source: Bellelli, 2022).

Fig. 10 | Kolding Campus (2012-14) in Grønborg, designed by Henning Larsen Architects (sources: kristinejensen.dk; Lucarelli et alii 2020).

struttura 'programmabile' per forma, possono produrre cinematismi senza il ricorso a giunti meccanici, semplificando così i processi di fabbricazione, installazione e manutenzione (Overvelde et alii, 2017).

Riflessioni conclusive su approccio modulare e architettura adattiva | Il problema energetico-ambientale, determinato dall'azione antropica sull'ecosistema, sollecita la riflessione sulle metodologie progettuali e sui futuri indirizzi dell'innovazione tecnologica dell'ambiente costruito, catalizzatore della maggior parte dei processi di conversione dell'energia a supporto delle attività umane.

Nuovi approcci progettuali, basati sull'osservazione e sull'emulazione dei processi di adattamento degli esseri viventi, concepiscono l'organismo edilizio quale sistema in grado di auto-regolarsi e di conseguire un equilibrio omeostatico con l'ambiente, al fine di garantire soddisfacenti livelli di comfort e ridurre il consumo energetico, dando vita all'architettura adattiva. In quest'ottica il contributo presenta una ricognizione sullo stato dell'arte dell'architettura adattiva che, raccogliendo un insieme rappresentativo di studi e progetti, mette in luce il ruolo della modularità nei sistemi responsivi d'involucro attraverso l'esame di aspetti come funzione, configurazione geometrica, funzionamento, controllo e grado di complessità (Tab.1).

Dall'osservazione dei casi riportati è possibile ricavare come i limiti intrinseci dell'architettura adattiva derivino, in primo luogo, dalla complessità che la caratterizza, complessità che si esplicita sia nell'aspetto funzionale che in quello materiale. La molteplicità delle funzioni demandate e la sofisticata struttura sistemica possono dare vita a interferenze incidentali e guasti in grado di pregiudicare gli scenari di progetto, mentre l'elevata articolazione tecnologica espone il sistema al decadimento prestazionale.L'approccio modulare, del quale si ha ampio riscontro nei processi di ottimizzazione e di adattamento dei sistemi complessi nel dominio naturale, è una metodologia che riduce la complessità di un sistema tecnologico e che può essere applicata alle fasi di progettazione, realizzazione, gestione e manutenzione, per conseguire efficienza ed efficacia. Tuttavia si potrebbe dibattere sugli aspetti limitativi del carattere tipologico della modularità che, pur affrancando il progetto dal controllo di una complessità ingestibile, lo vincola a una ripetitiva articolazione tecnologica e formale. Ciononostante numerose esperienze nello scenario contemporaneo, a partire da quelle illustrate, mettono in luce la capacità dell'approccio modulare di garantire i livelli prestazionali attesi e di caratterizzare la figurabilità dell'architettura adattiva.

Progetti, ricerche e sperimentazioni, avvalendosi delle possibilità offerte dalla progettazione parametrica e dai progressi nella scienza dei materiali, indagano inedite applicazioni della modularità in architettura, come tassellazioni, origami, kirigami e metamateriali, dando luogo a nuove soluzioni tecnologiche e formali che prefigurano sviluppi futuri in un dominio di ricerca multidisciplinare e multiscalare.

Il tema dell'applicabilità scalare dei modelli modulari indagati dalle ricerche in corso individua due principali direzioni di sviluppo: la prima può guidare la ricerca verso lo studio, alla piccola scala, dell'applicazione dell'approccio modulare alla concezione e alla produzione di strutture di nuovi metamateriali, anche grazie alle nanotecnologie; la seconda può indirizzare la ricerca, a una scala urbana, verso l'applicazione della modularità alla concezione della città adattiva, di cui è esempio il progetto di riqualificazione del Waterfront di Toronto di Sidewalk Lab (2019a, 2019b), improvvisamente interrotto nel 2020 a causa della situazione di incertezza economica prodotta dalla pandemia di Covid-19. Se entrambi gli indirizzi di ricerca presentano limiti derivanti dalla disponibilità di investimenti, il primo è più sensibile al grado di maturità tecnologica dei processi produttivi, mentre il secondo è condizionato soprattutto da barriere socioculturali. Pertanto, a fronte delle potenzialità dell'architettura adattiva modulare illustrate, lo sviluppo della ricerca dipenderà dalla propensione di Enti pubblici e aziende a sostenere progetti e

sperimentazioni e dall'attitudine del contesto socioculturale. Infine è importante rilevare che, se finora l'architettura adattiva ha voluto rispondere alle mutevoli condizioni ambientali, per contro, essa non è stata in grado di produrre alcun sostanziale cambiamento nel comportamento umano, mentre dovrebbe essere in grado di responsabilizzare la società, al fine di «[…] creare un rapporto simbiotico che esprima una relazione ecologicamente stabile, e allo stesso tempo reciproca, fra la Terra e gli uomini» (Ulber and Mahall, 2019, p. 98).

The causes of climate change are multiple, complex and interconnected, and depend mainly on anthropogenic action on the ecosystem. Since most of the energy conversion processes supporting human activities occur in cities, they are responsible for a considerable share of the world's energy needs and the resulting emissions of climate-changing gases into the atmosphere (UNEP, 2020). It is estimated that about 55% of the world's population currently lives in urbanised areas, and this share is projected to increase in the coming decades, with a doubling by 2050 of the world's housing stock compared to that of 2015 (CIESIN, IFPRI and CIAT, 2011; UNEP, 2016).

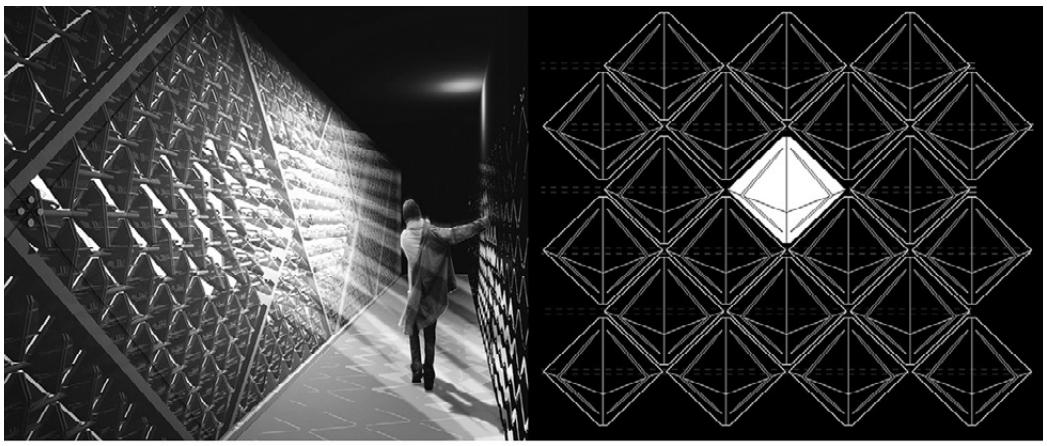
In the framework described, due to sustained population growth, developing countries assume a prominent role in driving increased anthropogenic action on the environment. Moreover, since most of them are located in tropical climate zones, it is predicted that, globally, energy demand for cooling will equal that for heating in 2060 (Birmingham Energy Institute, 2015); it is assumed that both modes of air conditioning will be achieved through the use of electrically powered heat pumps (Butera, 2021).

It becomes clear that the rationalisation of the metabolism of the built environment represents an inescapable issue of the contemporary era, in energy and environmental terms but also economic and social ones, which urges the search for solutions that can significantly reduce the anthropogenic impact on the environment (Antonini, 2019). Richard Rogers (1998, p. 4) argues that «[…] our cities are the major destroyer of the ecosystem and the greatest threat to mankind's survival on the planet. [...] While the need for cities and the inevitability of their continued growth will not diminish, city living per se need not lead to civilization's self-destruction. [But he also states] that the arts of architecture could evolve to provide crucial tools for safeguarding our future».

The projects and research conducted in the last two decades seem to be able to meet Rogers' expectations with respect to the ability of technological innovation to provide solutions in response to cogent environmental issues. In fact, at the architectural scale, it is possible to resort to technologies capable of bringing to life a building organism that, overcoming the well-established concept of static equilibrium with the environment, places itself in a continuous dynamic relationship with its context, modifying aspects of its physicality as environmental stresses change, in order to achieve rational control of the indoor microclimate and mitigate energy expenditure.

New directions in architecture demand adaptive capacity from the envelope, as it is the primary interface for regulating energy and matter exchanges between the indoor and outdoor environment, changing its conception from static to dynamic. In this perspective, the adaptive envelope, understood as responsive, dynamic and energy efficient (IEA, 2022), transforms from a subsystem for protection from climatic agents into a system capable of interacting with the external and internal contexts, changing its nature from a separating element to a mediating element characterised by a considerable degree of functional and technological complexity.

The paper highlights how applying the modular approach makes it possible to address the complexity of adaptive architecture. Starting with a definition of the meaning of adaptivity, complexity, and modularity and proceeding through a de-



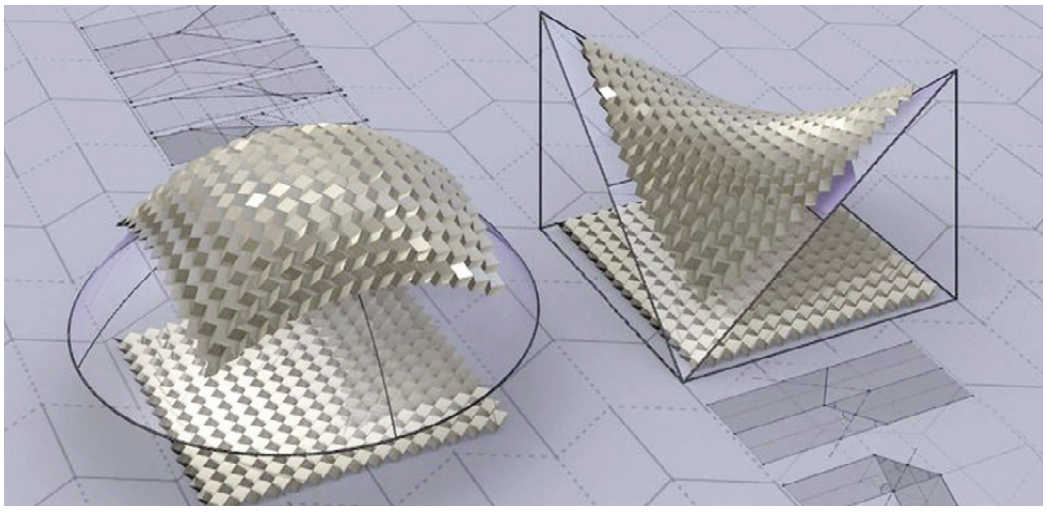


Fig. 11 | Responsive Façade (2020), designed by Boutros Bou-Nahra (source: boutrosbounahra.com).

Fig. 12 | Miura surface pattern pulled to two target surfaces (source: Tsiamis, Oliva and Calvano, 2018).

scription of the current directions of development of research on the topic and a representative set of projects and experiments, the effects and prospects of the modular approach in adaptive architecture are highlighted.

Adaptive architecture | The concept of adaptive architecture was introduced in the 1970s by Nicholas Negroponte to denote a type of architecture that possesses the ability to change in real-time to respond to complex and changing environmental conditions: «[…] responsive, sometimes called adaptable, or reactive, means the environment is taking an active role, initiating to a greater or lesser degree changes as a result and function of complex or simple computations» (Negroponte, 1975, p. 132). Tillmann Klein of TU Delft argues that adaptive architecture «[…] not dissimilar to Nature, it responds dynamically to change" (cited in Mazzucchelli, 2018, p. 79). The scholarly debate captures this analogy with the natural world and highlights how adaptive architecture, inspired by the biomimetic approach in technological research and design (Benyus, 1997; Jeronimidis and Gruber, 2012), conceives of a building as a system capable of performing multiple functions by virtue of its ability to self-organize as a self-poietic biological organism (Maturana and Varela, 1985).

While Negroponte already envisioned adaptive architecture as the result of the integration of computing power and technological capacity, in recent decades, the availability of devices and technologies for monitoring and control, such as sensor technology, Internet of Things (IoT), Building Management System (BMS), Artificial Intelligence (AI) – along with sophisticated actuator devices, whether electrical, pneumatic or chemical-physical, materialises the prefigured scenarios (d'Estrée Sterk, 2005), resulting in a cognitive, interactive and complex architecture.

Computational tools anticipate the responsive capability of architecture right from the design phase. The predictive capacity of Computational Design based on parametric-algorithmic modelling and simulation, implemented with Building Information Modeling, Big Data and Data Exchange (Davino and Bassolino, 2019), is able to describe the performance level of the adaptive architectural organism by capturing the complexity of the relationships between the building-plant system and users.

Environmental actions, performance of envelope technology systems, characteristics of energy generation, lighting and indoor climate control devices, and even user behaviour patterns (Energy Efficiency Based on User's Behaviour) can be considered to describe the most energy-efficient scenarios. In summary, «[…] the search for an interaction between building, external environment and user, can be a powerful knowledge tool» (Andaloro, 2021, p. 83) for optimising the operating models of adaptive architecture.

The complexity of adaptive systems | The high level of technological integration gives adaptive architecture a considerable degree of complexity, because of the multiplicity of relationships established among the interacting parts that constitute its articulation and the variability of the functions entrusted to them. Systemic thinking interprets complexity as a characteristic of a system, conceived as an organic and structured aggregate of mutually interacting parts, by virtue of which the system's behaviour is not determined, reductively, by that of the individual constituent parts but depends on the manner of their interaction. Ciribini (1979, 1984) highlights how the interconnection between the parts of a complex system determines its structure, specifying that its fundamental characteristics are wholeness, transformation and self-regulation, which give rise, in architecture, to adaptive complex systems, for which the laws of homeostasis and feedback apply.

The epistemology of complexity, which finds its rationalisation in the work of Morin (1985), owes its premises to the late nineteenth-century studies of Poincaré (1902, 1905, 1909; Toscano, 2008) and those, in the first half of the twentieth century, of mathematicians and physicists such as Hadamard (1921), Schrödinger (1926a, 1926b) and Andronov (Andronov, Vitt and Khaikin, 1966). Decisive contributions to complex thinking were made by Bogdanov's Tectology (Rispoli, 2012), the cybernetics of Wiener (1948), von Foerster (2003) and Weaver (1948) and, later, Prigogine's (1993) studies of thermodynamics, which soon turned to the examination of adaptive systems in multiple domains, including the ecological one, grasping the plurality of nonlinear relationships among the parts of natural systems and the tendency to enact autopoietic self-organising processes.

Self-organisation is generally understood as a form of system development through ordering and limiting influences, coming from the system's constituent elements, that allow it to reach a greater level of complexity. Hofstadter (1985) describes self-organisation as the composition of coherent totality from dispersed parts, while Capra (2015) highlights its nonlinearity; De Toni and Comello (2005), on the other hand, highlight its ability to confer robustness and resilience to a system.

The multiplicity of the constituent parts of a complex system and the variability of mutual influences (in the sense of frequency of change over time), either in being or in power, since the structure of a system is also multiplicity of possible interactions (Piaget, 1978), dictate the application of strategies for managing complexity. A technological system can benefit from the modular articulation of its structure (both in its logical dimension and physical explicitness) as a strategy for managing its inherent complexity. In a system, in the face of the increased degree of complexity produced by self-organisation, modularity represents a tool for finding solutions of greater efficiency and effectiveness.

Modularity for complexity management | The Law of Necessary Variety, theorised by William Ross Ashby (1957) as part of his studies of cyber-

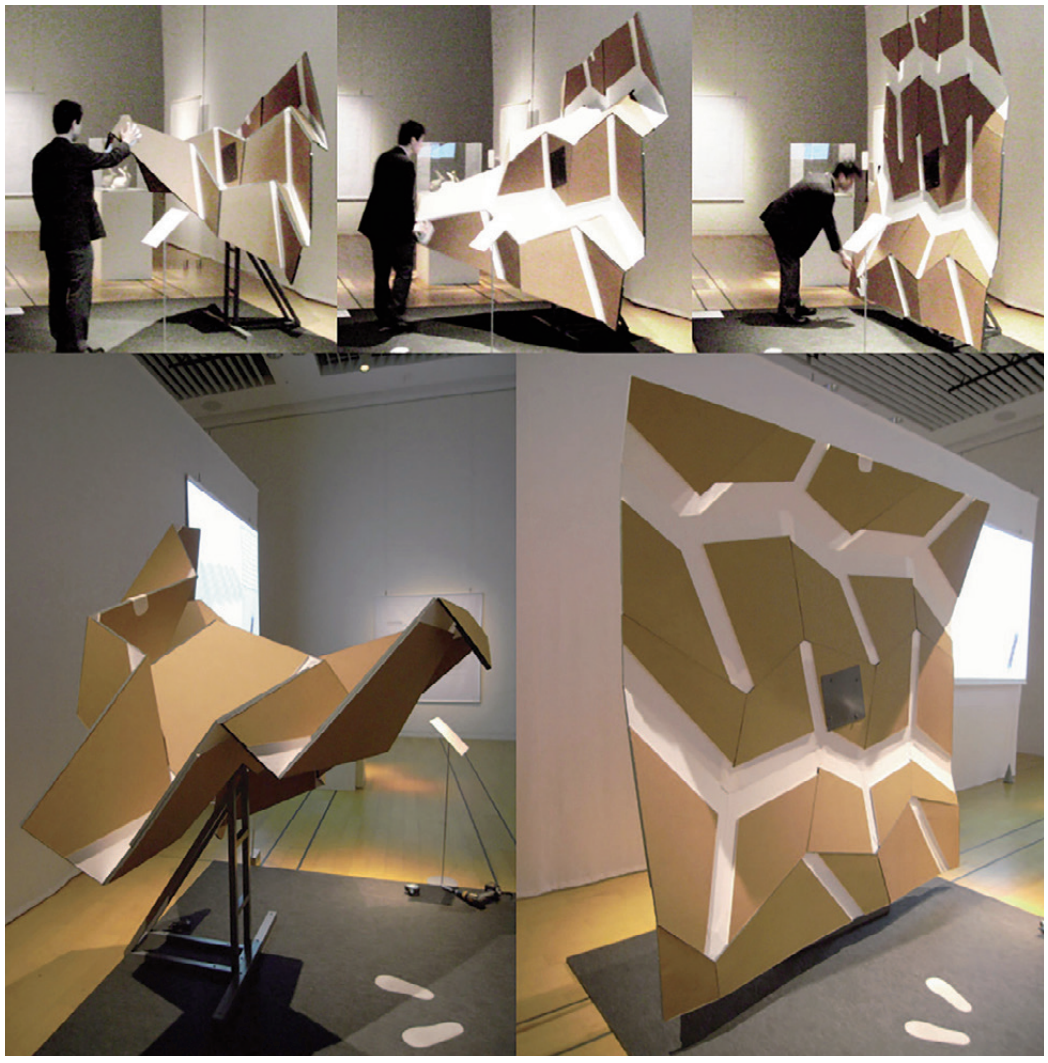


Fig. 13 | Rigid-Foldable Thick Origami (2011), designed by Tomohiro Tachi (source: Tachi, 2011).

netics and complex systems, states that for every complex system that governs another, the more extensive system must have a level of complexity comparable to the governed system. In other words, control is possible only if the governed system possesses variety and flexibility equal to or greater than the governed complex system. This leads to two equivalent but opposed strategies: either increase the complexity of the regulating system or reduce that of the governed system. The result is the advantageousness of decomposing a complex system, which is difficult to manage, into a plurality of components of lower complexity in order to make its control and management easier (Salingaros, n.d.). Such decomposition gives rise to modularity, which, in the context of the project, can be called «[...] a very general set of principles for managing complexity» (Langlois, 2000, p. 19).

The modular approach consists of subdividing the structure of a complex system into disjointed but coherent and interdependent logical or functional units – called modules – distinctly identified and characterised by a manageable level of complexity. Modules, through their mutual relationships, always refer back to a higher structure, resulting from the combination of the parts; therefore, modularity is never 'closed', in that the structure can be indefinitely extended; moreover, the possibility of establishing relationships between different structures underscores the open character of modularity. Modularity is not an abstraction: there is evidence of it everywhere, especially in Nature, as it represents how, in the face of ecosystem complexity, the living explicates self-organisation through recombination and adaptation of functional patterns (Tucci, 2017).

In 1917, Thompson (1992), with his book entitled On Growth and Form, publicised his studies conducted using analytical methods on natural processes relating to the creation of forms, highlighting how the mathematical rules governing the growth phenomena of living organisms are based on regularity and modularity. In morphogenetic processes, plants and animals tend to develop according to mathematical successions and recursive geometric patterns that can be traced back to the Fibonacci number succession and the golden section. The development of the number of bracted spirals on a pine cone (Fig. 1), the arrangement of seeds in the stamen of the sunflower and the growth of the calcareous shell of the nautilus (Fig. 2) follow the Fibonacci succession and a modular and scalar recursiveness, demonstrating how in Nature the concept of modularity pertains mainly to principles of self-organisation and self-regulation according to patterns ascribable to a purely logical domain, in which the rule governing complexity exceeds the precise spatial, temporal and material manifestation.

Thompson's thought has profoundly influenced the work of scholars and architects, from Frei Otto to Norman Foster, Toyo Ito to Nicholas Grimshaw[1]. Indeed, even an architecture can be conceived by emulating the optimisation processes enacted by living systems (Tucci and Carlo Ratti Associati, 2023) and can be interpreted as a modular organism that can be decomposed into several interacting units. Modularity can shape the project from its earliest stages: from its conception, technological specification, and construction to management, modularity, by simplifying its complex phenomenology, makes possible the concretisation of architecture.

Modularity in adaptive architecture | A modular approach in adaptive architecture results in the use of modules with varying configurations and functions but formally and unitarily defined and interrelated, so that each module constitutes a homogeneous and unified part of the same structure, a part of the whole capable of pursuing specific goals. Although presenting a complex articulation, the components of a modular structure are nevertheless easily manageable and more controllable and responsive to the plurality of needs. In fact, modular articulation allows a system to graduate functions and performance of modules to move from simple to more complex tasks, moving from a limited level of autonomy to a high level of complexity.

The extent of modular articulation and the degree of interrelation between modules influence specific aspects of the system. A markedly modular system composed of a considerable number of modules is undoubtedly easier to maintain and expand but manifests a high inherent complexity resulting from the need to manage coordination be-

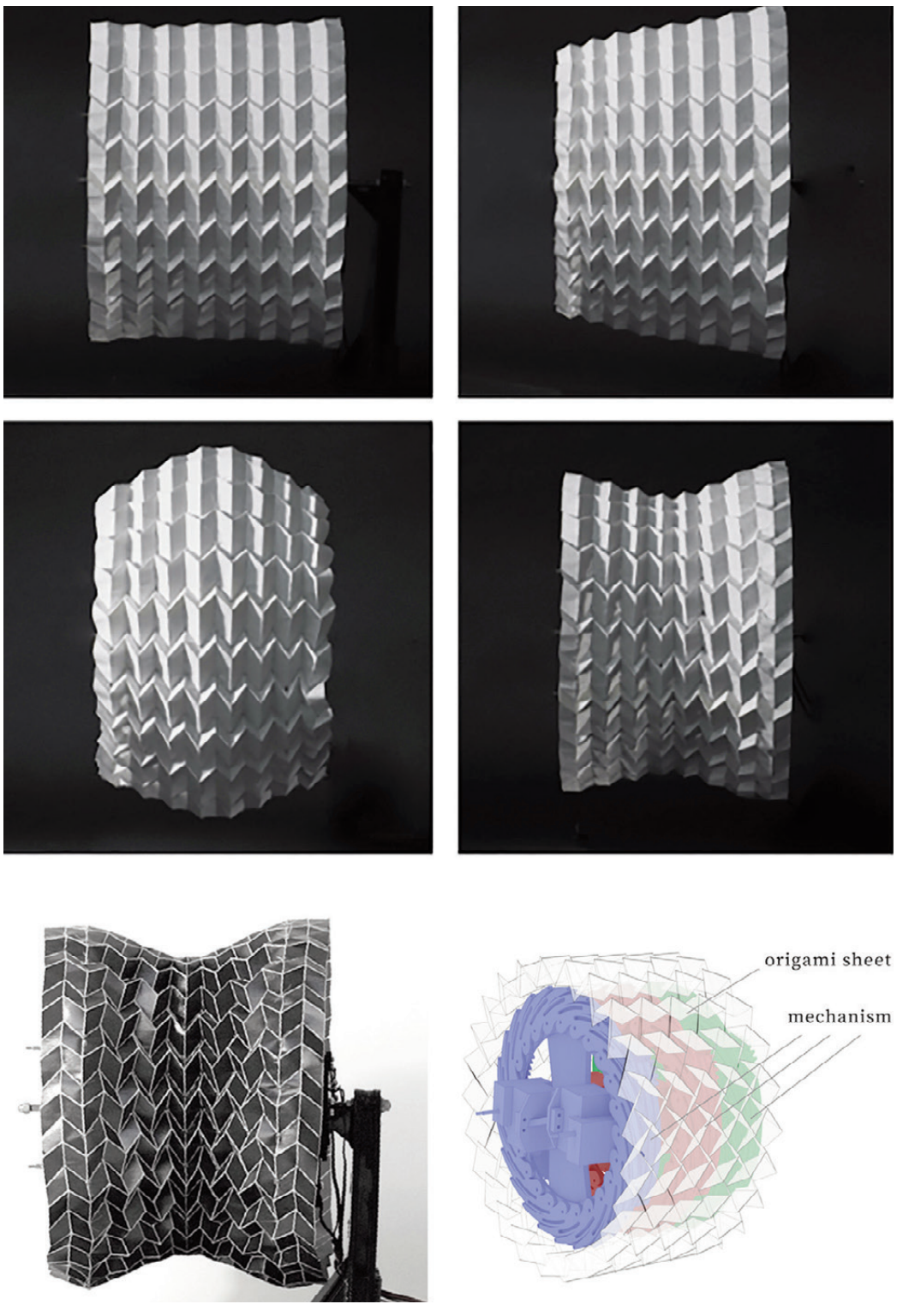


Fig. 14 | Ex-Chochin (2022), designed by Mai Ohira, Soya Eguchi, Claire Okabe and Hiroya Tanaka (source: Ohira et alii, 2022).

tween modules; in contrast, a limitedly modular system composed of a small number of modules is more difficult to maintain but coordination between modules is simpler. These considerations invite the evaluation of the use of specific components through the degree of separability and aggregability of the components of a modular system, their level of interdependence and the rules pertaining to the system's overall architecture (Sorrenti, 2017).

The advantages of applying the modular approach in architecture are manifold. From a compositional point of view, it is possible to characterise the architectural object by virtue of multiple solutions obtained from the combination of a finite number of components, while from a technological point of view, it is possible to modulate solutions due to the complexity of functions and the multiplicity of defined requirements. From the production point of view, the supply of limited varieties of components results in the possibility of achieving lower production costs, while from the management point of view, the homogeneity and interchangeability of modules facilitate repair and replacement processes, reducing maintenance costs over time.

In contemporary architecture, numerous projects highlight how the modular approach is essential for realising adaptive envelope systems in terms of installation, operation, performance control, maintainability and architectural figurability. The operation of the southern façade of the Institut du Monde Arabe (1987) in Paris, by Jean Nouvel, is based on the modular repetition of mechanical diaphragms, inspired by the human eye, to which the control of natural lighting in interior spaces is delegated.

The sun-shading system of the Al-Bahar Towers (2012) in Abu Dhabi by Aedas Architects and Arup features a honeycombed articulation of modules equipped with deployable textile elements that panders to the curvilinear development of the facades; the modular approach enables the implementation of differentiated local responses proportional to the gradient of environmental stresses, simplifies maintenance and characterises the architectural image (Fig. 3). The building envelope of the Kiefer Technic Showroom in Graz, Austria (2007), by Ernst Giselbrecht, is based on the kinematics of interconnected façade modules; a solar shading, made of metal panels and implemented by mechanical devices, gives rise to a wide range of configurations (Fig. 4).

The envelope of the Media-TIC Building in Barcelona (2009; Fig. 5), by Enric Ruiz Geli, was developed through a morphogenetic process of transforming a modular grid (Fig. 6) that composes a weave of inflatable ethylene tetrafluoroethylene (EFTE) cushions that allow light to pass through while absorbing its thermal component (Albiñana, 2011). A network of integrated and independent sensors governs pneumatic devices that, by insufflating air into the cushions, change their shielding and insulating capacity, resulting in a responsivity commensurate with the level of local solar radiation that contributes to greater overall system efficiency.

Tessellations, origami and kirigami: modularity research in adaptive architecture | The frontier of adaptive envelope research resorts to the analytical methodology of mathematics and geometry to achieve technological advances and novel formal solutions. In geometry, repeating a figure on a plane or spatial surface through variations such as rotation, reflection, alternation, translation or scalar transformation gives rise to a modular configuration called a 'pattern'. The simplest type of pattern is 'tessellation', i.e. the infinite repetition of one or more geometric figures on a surface, without gaps or overlaps.

Tessellations can generally take plane geometric figures such as triangles, squares and hexagons as a module. The equilateral triangle is an excellent modular figure that can be employed in tessellations because, on the one hand, it is able to occupy an entire surface without the aid of other polygons and, on the other hand, the repetition of the triangular module allows the creation of different geometric figures such as the rhombus, trapezoid, hexagon or star polygons.

The tessellations that are obtained by isometric transformations 'rigid' such as translation and rotation are called regular (Fig. 7). Non-regular or aperiodic tessellations – i.e., such that no rotation or translation is able to move the tessellations locally on each other – include the random ones of Lejeune Dirichlet (1850) and Delaunay (1934) or the irregular ones of Wang (1961), Robinson (1971) or Penrose (1974), discovered in 1974 and based on the golden section. In 2023, mathematician David Smith (Smith et alii, 2023) discovered the aperiodic tessellation 'ein stein', characterised by a single shape whose combinations generate a pattern that never repeats (Fig. 8).

Nature offers numerous examples of tessellations, including the wing surface and eyes of insects, the honeycomb of bees, the single-cell tissue of the onion, the texture of the leaf blade, the fractures of dry clay soil, as well as some animal and plant cell structures (Fig. 9), demonstrating that the recursiveness of certain geometric principles and morphologies, although differentiated by parameters and limiting factors, cuts across multiple domains and is generally motivated by biological, chemical and physical factors and interaction with the external environment.

The solar shading system at Henning Larsen Architects' Kolding Campus in Grønborg, Denmark in 2014 is an example of the application of triangular tessellation to adaptive architecture design (Fig. 10). In the Responsive Façade envelope system devised by Boutros Bou-Nahra[2], based on a tessellation of squares, polymerised fibreglass panels rotate on an axis adjusting solar gain by means of mechanical actuators (Fig. 11).

The survey of the state of the art on the subject of adaptive architecture highlights that research is moving toward methodological deepen-

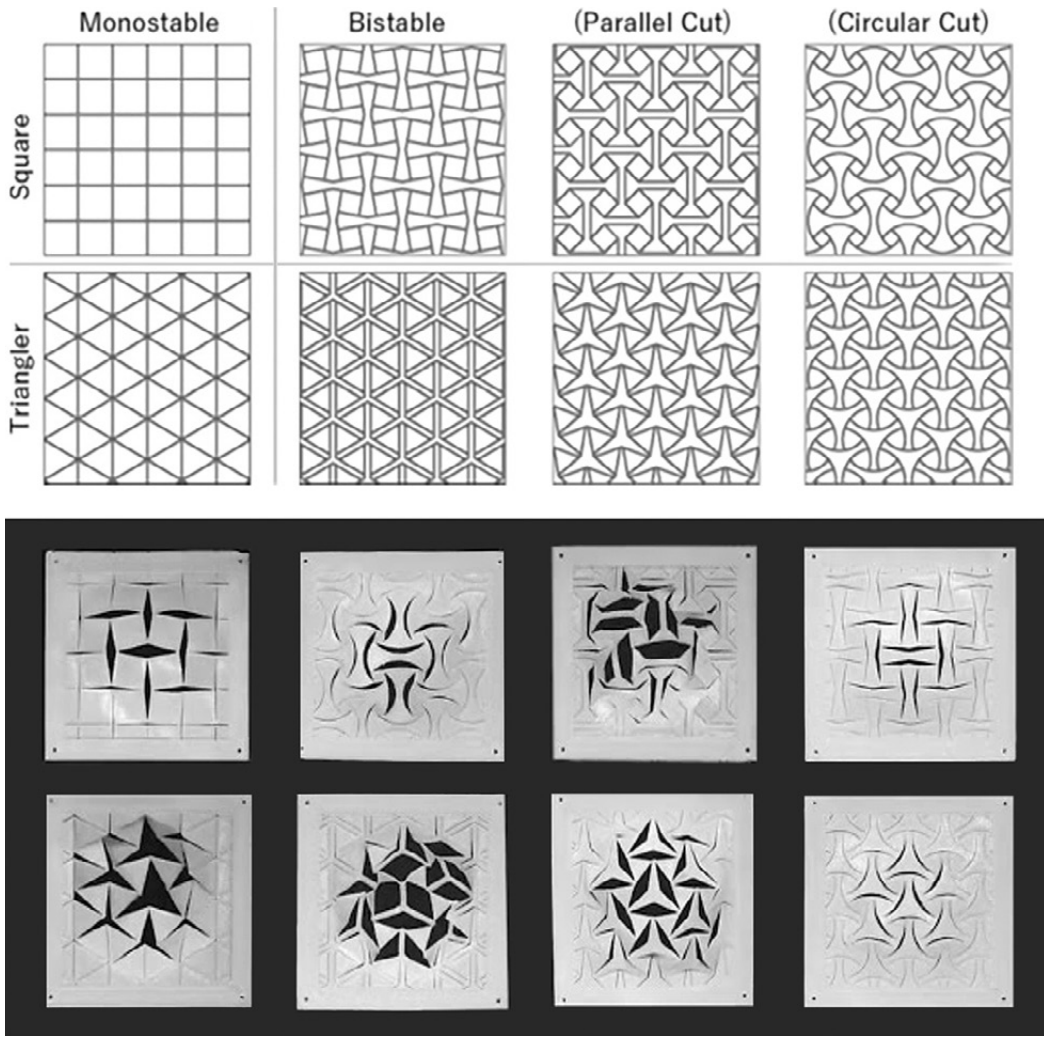


Fig. 15 | Breathing Façade (2019), designed by Hitomi Kuboki, Hiroya Tanaka, Sadatoshi Ohno, Keitarou Sugita, Naho Takayanagi, Nanako Nakajima, Kyohei Yuasa and Takatoshi Nakatani (source: youtube.com; credits: H. Tanaka, 2019).

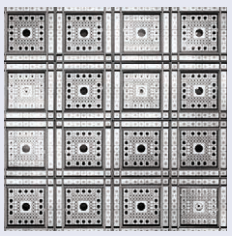
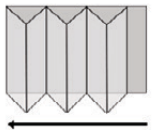
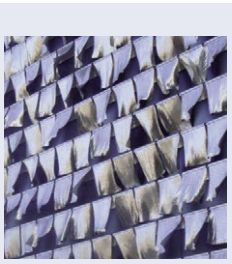
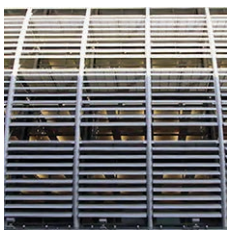
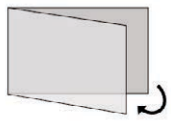
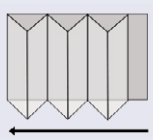
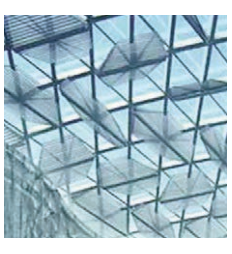
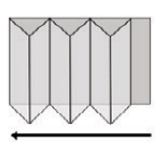
Next pages

Tab. 1 | Projects and research on the adaptive envelope in architecture (credits: The Authors, 2023).

MODULARITY IN ADAPTIVE ARCHITECTURE

Multi-Criteria assessment of case studies

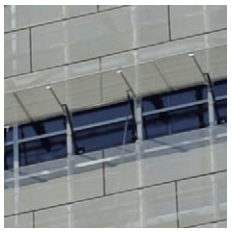
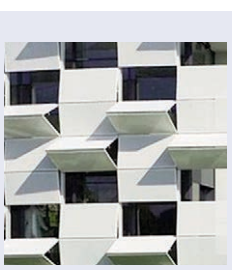
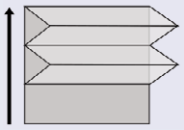
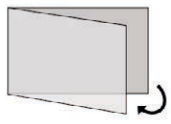
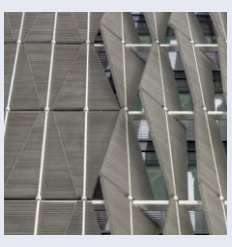
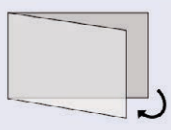
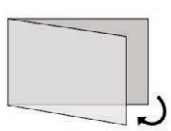
Architectural projects

N°	Project Designer(s)	Place	Year	Image	Functions	Modular pattern	Motion type	Type of actuation	Type of control	Type of response	Functional complexity	Structural complexity
1	**Institut du Monde Arabe** Jean Nouvel Pierre Soria Gilbert Lezénés Architecture Studio	Paris France	1987		Daylight control Heat gain control	Modular grid of squares	 Scaling based on 2D rotation	Mechanical hydraulic	Centralized	Integral	lower	higher
2	**Biocatalysis Lab Building Technical University of Graz** Ernst Giselbrecht	Graz Austria	2004		Daylight control Heat gain control	Modular grid of rectangles	 Horizontal folding	Mechanical motor-based	Modular	Modular	lower	average
3	**Articulated Cloud Pittsburgh Children's Museum** Ned Kahn Studios	Pittsburgh USA	2004		Daylight control Heat gain control	Modular grid of rectangles	 One-axis rotation vertical/horizontal	Physical (wind)	None	Modular	lower	lower
4	**Devonshire Building University of Newcastle** Dewjoc Architects	Newcastle United Kingdom	2004		Daylight control Heat gain control	Tassellation of rectangles	 One-axis rotation vertical/horizontal	Mechanical	Centralized	Integral	lower	average
5	**Ljubljana University Housing** Bevk Perovic Arhitekti	Ljubljana Slovenija	2005		Daylight control Heat gain control	Modular grid of rectangles	 Horizontal folding	Mechanical motor-based	Centralized	Modular	lower	average
6	**Madrid's City of Justice** Foster + Partners	Madrid Spain	2006		Daylight control Heat gain control	Tassellation of hexagons	 Horizontal folding	Mechanical	Centralized	Modular	lower	average

MODULARITY IN ADAPTIVE ARCHITECTURE

Multi-Criteria assessment of case studies

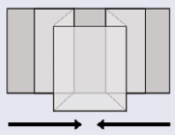
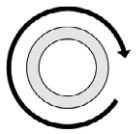
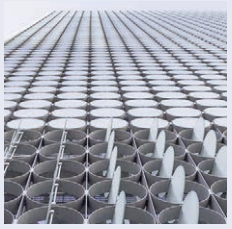
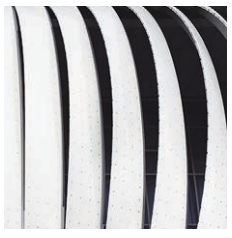
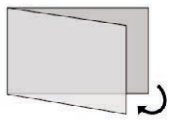
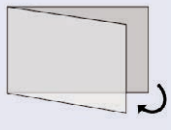
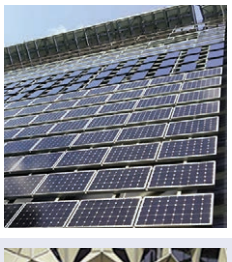
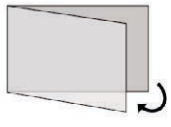
Architectural projects

N°	Project Designer(s)	Place	Year	Image	Functions	Modular pattern	Motion type	Type of actuation	Type of control	Type of response	Functional complexity	Structural complexity
7	**Council House 2 Building** Mick Pearce Design	Melbourne Australia	2006		Daylight control Heat gain control	Tassellation of polygons	 One-axis rotation vertical/horizontal	Mechanical	Centralized	Integral	lower	average
8	**Federal Building** Brandon Welling Jon Ghera Smith Group	San Francisco USA	2007		Daylight control Heat gain control	Modular grid of rectangles	 One-axis rotation vertical/horizontal	Mechanical	Centralized	Integral	lower	average
9	**Kiefer Technic Showroom** Ernst Giselbrecht Partner ZT GmbH	Graz Austria	2007		Daylight control Heat gain control	Modular grid of rectangles	 Vertical folding	Mechanical motor-based	Centralized	Modular	lower	average
10	**Manitoba Hydro Palace** Smith Carter Architects & Engineers	Manitoba Canada	2009		Heat gain control Ventilation	Modular grid of rectangles	 One-axis rotation vertical/horizontal	Mechanical	Centralized	Modular	lower	average
11	**Thyssenkrupp Q1 Head Quarter** Chaix & Morel et Associés JSWD Architekten	Essen Germany	2010		Daylight control Heat gain control	Tassellation of triangles	 One-axis rotation vertical/horizontal	Mechanical motor-based	Centralized	Modular	lower	average
12	**KfW Westarkade** Sauerbruch Hutton Hamiltons Laboratory Taghaboni	Frankfurt Germany	2010		Daylight control Heat gain control Thermal insulation Ventilation	Origamic tassellation	 One-axis rotation vertical/horizontal	Mechanical motor-based	Centralized	Modular	higher	average

MODULARITY IN ADAPTIVE ARCHITECTURE

Multi-Criteria assessment of case studies

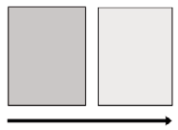
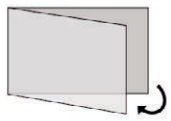
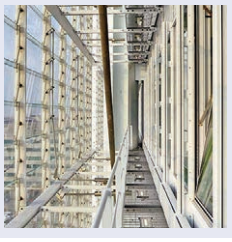
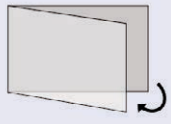
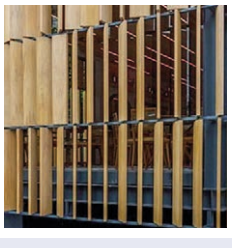
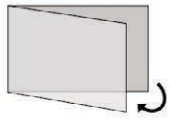
Architectural projects

N°	Project Designer(s)	Place	Year	Image	Functions	Modular pattern	Motion type	Type of actuation	Type of control	Type of response	Functional complexity	Structural complexity
13	**Media-TIC Building** Enric Ruiz Geli	Barcelona Spain	2010		Daylight control Heat gain control Thermal insulation	Tassellation of triangles	 Deformation	Mechanical hydraulic	Modular	Modular	average	average
14	**Kuggen Building Chalmers University of Technology** Gert Wingardh Jonas Edblad	Göteborg Sweden	2011		Daylight control Heat gain control	Origamic tassellation	 One axis rotation of the whole envelope	Mechanical motor-based (railtrack)	Centralized	Integral	lower	higher
15	**Building 100 Royal Melbourne Institute of Technology** Gert Wingardh Jonas Edblad	Melbourne Australia	2012		Daylight control Heat gain control	Modular grid of disks	 One-axis rotation vertical/horizontal	Mechanical motor-based	Centralized	Modular	average	average
16	**One Ocean Pavilion Expo Yeosu 2012** Soma Architects	Yeosu South Korea	2012		Daylight control Heat gain control Ventilation	Modular grid of rectangles	 One-axis rotation vertical/horizontal	Mechanical hydraulic	Centralized	Integral	average	average
17	**Moving Landscapes** Matharoo Associates	Ahmedabad India	2012		Daylight control Heat gain control	Modular grid of squares	 One-axis rotation vertical/horizontal	Mechanical	Centralized	Modular	lower	average
18	**Energy & Environment Innovation Building** Yoshiharu Tsukamoto	Tokyo Japan	2012		Daylight control Heat gain control Energy production	Modular grid of squares	 One-axis rotation vertical/horizontal	Mechanical	Centralized	Integral	average	higher
19	**Al Bahr Towers** Aedas Architects ARUP Group	Abu Dhabi UAE	2012		Daylight control Heat gain control Ventilation	Origamic tassellation	 Multi-axis rotation	Mechanical	Centralized	Modular	average	higher

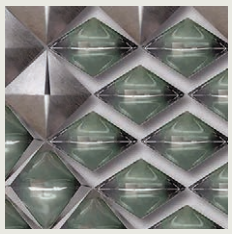
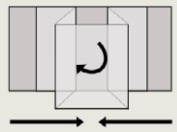
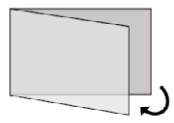
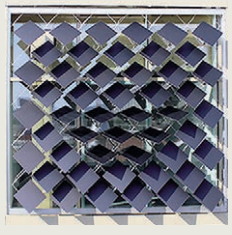
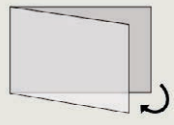
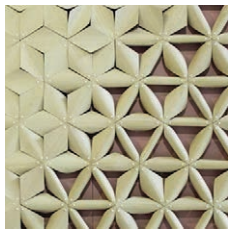
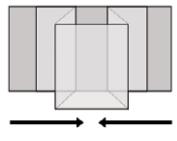
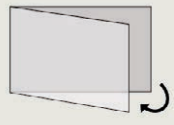
MODULARITY IN ADAPTIVE ARCHITECTURE

Multi-Criteria assessment of case studies

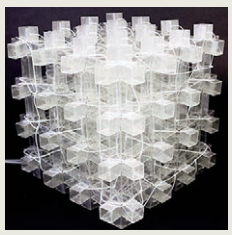
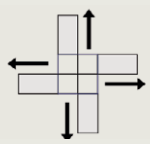
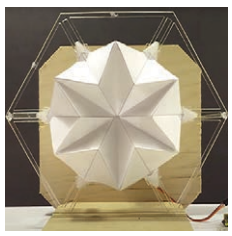
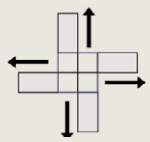
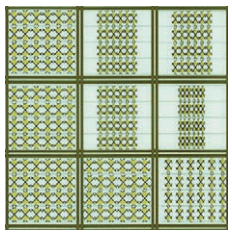
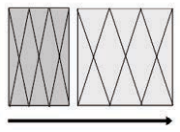
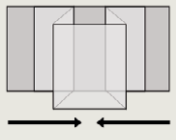
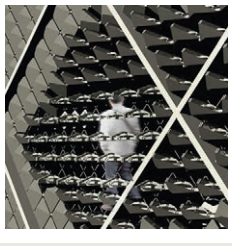
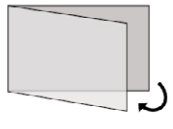
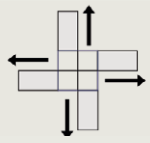
Architectural projects

N°	Project Designer(s)	Place	Year	Image	Functions	Modular pattern	Motion type	Type of actuation	Type of control	Type of response	Functional complexity	Structural complexity
20	**Bio Intelligent Quotient (BIQ) House** Splitterwerk Arup Engineers Colt Int. GmbH SSC GmbH	Hamburg Germany	2013		Daylight control Heat gain control Ventilation Energy production Air depollution	Modular grid of rectangles	 One-axis rotation vertical/horizontal	Mechanical Biological-integrated	Centralized	Modular	higher	higher
21	**Situla Complex** Bevk Perovic	Ljubljana Slovenija	2013		Daylight control Heat gain control	Modular grid of rectangles	 One-axis sliding	Mechanical	Modular	Modular	lower	average
22	**Blaauwlakenblok** Angie Abbink Chris Kabel	Amsterdam The Netherlands	2013		Daylight control Heat gain control	Modular grid of hexagons	 One-axis rotation vertical/horizontal	Physical (wind)	None	Modular	lower	lower
23	**Kolding Building University of Southern Denmark** Henning Larsen Architects	Grønborg Denmark	2014		Daylight control Heat gain control	Tassellation of triangles	 One-axis rotation vertical/horizontal	Mechanical	Centralized	Modular	lower	average
24	**Intesa-SanPaolo Headquarters** Renzo Piano Building Workshop	Turin Italy	2014		Daylight control Ventilation	Modular grid of rectangles	 One-axis rotation vertical/horizontal	Mechanical	Centralized	Modular	lower	average
25	**Restaurant Bossa** Rosenbaum and Muti Randolph	São Paulo Brazil	2015		Daylight control Heat gain control	Tassellation of rectangles	 One-axis rotation vertical/horizontal	Mechanical	Centralized	Modular	lower	average
26	**India Pavillion Expo Dubai 2020** C.P. Kukreja Architects	Dubai UAE	2020		Daylight control Heat gain control	Tassellation of rectangles	 One-axis rotation vertical/horizontal	Mechanical	Centralized	Modular	lower	average

Research and prototypes

N°	Research / prototype Designer(s) Institute	Place	Year	Image	Functions	Modular pattern	Motion type	Type of actuation	Type of control	Type of response	Functional complexity	Structural complexity
27	**Sonomorph Sound Responsive Wall** Natasa Sljivancanin Cornell University	New York USA	2009		Noise control Lighting	Modular origami pattern	 Physical properties and one-axis rotation	Mechanical motor-based	Centralized	Modular	average	higher
28	**Rigid-Foldable Thick Origami** Tomohiro Tachi University of Tokyo	Tokyo Japan	2011		Daylight control Heat gain control	Origamic tassellation	 Multi-axis rotation	Mechanical	Not applicable	Not applicable	lower	average
29	**Square-Tic Façade** Kamil Sharaidin Royal Melbourne Institute of Technology	Melbourne Australia	2014		Daylight control Heat gain control	Origamic tassellation of squares	 Sliding and retracting	Mechanical	Not applicable	Not applicable	lower	average
30	**Integrated Concentrating Solar Facade (ICSF)** Anna Dyson Matt Gindlesparger Peter Stark et alii Yale School of Architecture	New Haven USA	2015		Daylight control Heat gain control Energy production	Modular pattern of prisms	 One-axis rotation vertical/horizontal	Mechanical motor-based	Centralized	Integral	higher	higher
31	**SoRo-Track** Bratislav Svetozarevic Zoltan Nagy Johannes Hofer et alii ETH Zurich	Zürich Switzerland	2015		Daylight control Heat gain control Energy production	Modular grid of squares	 Two-axis rotation vertical and horizontal	Mechanical hydraulic, motorized	Centralized	Modular	average	higher
32	**Water-Reactive Envelope** Chao Chen Royal College of Art	London United Kingdom	2015		Rainwater protection	Tassellation of diamonds	 Deformation due to physical properties	Physical-chemical	None	Modular	lower	lower
33	**Adaptive Solar Skin** Daniel Raznick Artemis Hanson Christopher Brenny Daniel Raznick Arch.	Minneapolis USA	2016		Daylight control Heat gain control Energy production	Modular grid of squares	 One-axis rotation vertical/horizontal	Mechanical motor-based	Not applicable	Not applicable	average	higher

Research and prototypes

N°	Research/prototype Designer(s) Institute	Place	Year	Image	Functions	Modular pattern	Motion type	Type of actuation	Type of control	Type of response	Functional complexity	Structural complexity
34	**Shapeshifting Material** Johannes Overvelde Katia Bertoldi et alii Harvard University	Cambridge USA	2016		Multi-purpose adaptability	Metamaterial based on origamic modular pattern	 Scaling based on translation	Electro-actuated	Not applicable	Not applicable	Not applicable	average
35	**Responsive Origami** Mostafa Alani Brian Leounis Clemson University	Clemson USA	2017		Daylight control Heat gain control	Origamic tassellation	 Multi-axis rotation	Mechanical motor-based	Not applicable	Modular	average	higher
36	**Heat-Actuated Auxetic Façade** Elnaz Tafrihi Bailey Amira Abdel-Rahman University of California Massachusetts Institute of Technology	Berkely–Cambridge USA	2018		Daylight control Heat gain control	Auxetic metamaterial based on modular pattern	 Scaling based on translation	Physical (heat)	Not applicable	Integral	lower	lower
37	**Scissornet** Maziar Asefi Sepide Shoaee Tabriz Islamic Art University	Tabriz Iran	2018		Daylight control Heat gain control	Pantographic spatial tessellation of diamonds	 Contracting and expanding	Mechanical	Not applicable	Not applicable	lower	average
38	**Breathing Façade Reactive Wall** Hitomi Kuboki Hiroya Tanaka Sadatoshi Ohno et alii Keyo University	Tokyo Japan	2019		Ventilation	Modular kirigami pattern	 Deformation due to geometrical properties	Physical (air pressure)	None	Modular	lower	lower
39	**Responsive façade** Boutros Bou-Nahra Boutros Bou-Nahra Architect	Miami USA	2020		Daylight control Heat gain control	Modular grid of prisms	 One-axis rotation vertical/horizontal	Mechanical motor-based	Modular	Modular	lower	higher
40	**Ex-Chochin** Mai Ohira Soya Eguchi Claire Okabe Hiroya Tanaka Keyo University	Tokyo Japan	2022		Multi-purpose adaptability	Modular origamic pattern	 Scaling based on translation	Mechanical motor-based	Centralized	Integral	Not applicable	higher

ing of tessellation techniques, such as folding surfaces in three dimensions, in analogy with the Oriental technique of origami, in order to obtain novel geometric configurations, give rise to new kinematics and simplify the structural articulation of responsive technological systems by reducing their wear and tear components.

Since the 1970s, the growing research interest in origami – because of their ability to give rise to tessellations that fit free-form surfaces (Tsiamis, Oliva and Calvano, 2018; Fig. 12) and the kinematics they are capable of explicating – has given impetus to so-called origami architecture (Rodonò, 2022). Over time, the principles behind origami have been used to develop unfoldable structures, reconfigurable structures, and structures with high mechanical performance. More recently, Tomohiro Tachi (2011) of the University of Tokyo developed the Rigid-Foldable Thick Origami demonstrator, an enclosure component composed of a set of rigid panels joined at their perimeter with flexible material to generate kinetic behaviour (Fig. 13), while Ohira, Eguchi, Okabe and Tanaka (2022) of Keio University developed the Ex-Chochin demonstrator, an adaptive envelope made according to an origami tessellation inspired by the Miura pattern, capable of changing shape and texture through the action of mechanical actuators and generating a wide range of geometric configurations (Fig. 14).

Several studies and experiments also apply the technique of kirigami, a variant of origami, in which carving is practiced in addition to folding. Breathing Façade (Kuboki et alii, 2019) is a modular adaptive envelope system inspired by fish gills composed of shape-memory auxetic polymer metamaterial membranes in which notches have been made to trigger spontaneous ventilation between the internal and external environments (Fig. 15). Finally, research such as that conducted by Prof. Overvelde's team at Harvard University demonstrates that components made of auxetic metamaterials based on modular origami joints, by virtue of a shape-memory 'programmable' structure, can produce kinematics without the use of mechanical joints, thus simplifying manufacturing, installation and maintenance processes (Overvelde et alii, 2017).

Concluding reflections on modular approach and adaptive architecture | The energy-environmental problem, determined by anthropogenic action on the ecosystem, prompts reflection on design methodologies and future directions of technological innovation in the built environment, the catalyst for most of the energy conversion processes supporting human activities.

New design approaches, based on observation and emulation of the adaptation processes of living beings, conceive the building organism as a system capable of self-regulation and achieving homeostatic balance with the environment to ensure satisfactory levels of comfort and reduce energy consumption, giving rise to adaptive architecture. With this in mind, the paper presents a survey of the state of the art of adaptive architecture that, by collecting a representative set of studies and projects, highlights the role of modularity in responsive envelope systems through the examination of aspects such as function, geometric configuration, operation, control and degree of complexity (Tab.1).

From the observation of the reported cases, it is possible to deduce how the inherent limitations of adaptive architecture derive, first and foremost, from its complexity. This complexity is explicit in both the functional and material aspects. The multiplicity of functions demanded and the sophisticated systemic structure can give rise to incidental interference and failures that can undermine design scenarios, while the high technological articulation exposes the system to performance decay.

The modular approach, of which there is ample evidence in the optimisation and adaptation processes of complex systems in the natural domain, is a methodology that reduces the complexity of a technological system and can be applied to the design, implementation, operation and maintenance phases to achieve efficiency and effectiveness. However, one could debate certain limiting aspects of the typological character of modularity that, while freeing the project from the control of unmanageable complexity, binds it to repetitive formal and technological articulation. Nevertheless, numerous contemporary projects, beginning with those illustrated, highlight the modular approach's ability to guarantee the expected performance levels and characterise the figurability of the adaptive architecture.

Projects, research and experimentation, making use of the possibilities offered by parametric design and advances in materials science, investigate novel applications of modularity in architecture, such as tessellations, origami, kirigami and metamaterials, resulting in new technological and formal solutions that foreshadow future developments in a multidisciplinary and multiscalar research domain.

The issue of scalar applicability of modular models investigated by current research identifies two main directions for development. The first can guide research toward the study, at a small scale, of applying the modular approach to designing and producing structures of new metamaterials, including through nanotechnology. The second can steer research, at an urban scale, toward the application of modularity to adaptive city design, of which Sidewalk Lab's Toronto Waterfront Redevelopment Project (Sidewalk Lab, 2019a, 2019b), abruptly halted in 2020 due to the economic uncertainty produced by the Covid19 pandemic, is an example.

While both research directions have limitations stemming from the availability of investment, the former is more sensitive to the degree of technological maturity of production processes, while sociocultural barriers mainly condition the latter. Therefore, against the potential of the modular adaptive architecture illustrated, the development of research will depend on the propensity of public agencies and companies to support projects and experiments and the attitude of the sociocultural environment.

Finally, it is important to note that while adaptive architecture has so far been intended to respond to changing environmental conditions, in contrast, it has not been able to produce any substantial changes in human behaviour. Instead, it should be able to empower society in order to «[...] the search for an interaction between building, external environment and user, can be a powerful knowledge tool» (Ulber and Mahall, 2019, p. 103).

Acknowledgements

This paper is the result of a common reflection of the Authors.

Notes

1) In particular, we refer to Otto Frei's designs of the German Pavilion at the Montreal Expo (1967), the Olympic Stadium in Munich (1972) and the Japanese Pavilion at the Hanover Expo (2000), designed in collaboration with Shigeru Ban, Toyo Ito's design of the Grin Grin Park in Fukuoka (2009), Nicholas Grimshaw's designs of Waterloo Station in London (1993), the Eden Project in St. Blazey, Cornwall (2000), the Penang International Airport in Malaysia (2018), and Norman Foster's designs of The Gherkin Tower in London (2004) and the Great Court of the British Museum in London (2011).

2) For more information on Bou-Nahra's Responsive Façade, see the webpage: boutrosbounahra.com/responsive-façade [Accessed 14 October 2023].

References

Albiñana, M. (2011), *Media-ICT*, Actar Publishers, Barcelona. [Online] Available at: issuu.com/actar/docs/media-ict [Accessed 20 October 2023].

Andaloro, B. (2021), "Il corpo fisico dell'architettura interattiva – Approcci scenario-based e generativo | The body of interactive architecture – Scenario-based and generative approaches", in *Agathón | International Journal of Architecture Art and Design*, vol. 10, pp. 76-83. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/1072021 [Accessed 11 October 2023].

Antonini, E. (2019), "Incertezza, fragilità, resilienza | Uncertainty, fragility, resilience", in *Agathón | International Journal of Architecture Art and Design*, vol. 6, pp. 6-13. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/612019 [Accessed 12 October 2023].

Andronov, A. A., Vitt, A. A. and Khaikin, S. E. (1966), *Theory of oscillators*, Pergamon Press, London.

Ashby, W. R. (1957), *An introduction to cybernetics*, Chapman & Hall, London.

Bellelli, F. (2022), "The fascinating world of Voronoi diagrams – A brief introduction about this ubiquitous pattern and its applications", in *Towards Data Science*, 02/04/2022. [Online] Available at: towardsdatascience.com/the-fascinating-world-of-voronoi-diagrams-da8fc700fa1b [Accessed 20 October 2023].

Benyus, J. (1997), *Biomimicry – Innovation Inspired by Nature*, Harper-Collins Publisher, New York.

Birmingham Energy Institute (2015), *Doing Cold Smarter*, University of Birmingham, Birmingham. [Online] Available at: birmingham.ac.uk/Documents/college-eps/energy/policy/Doing-Cold-Smarter-Report.pdf [Accessed 14 October 2023].

Butera, F. M. (2021), *Affrontare la complessità – Per governare la transizione ecologica*, Edizioni Ambiente, Milano.

Capra, F. (2015), *La rete della vita*, BUR Rizzoli, Milano.

CIESIN, IFPRI and CIAT (2011), *Global Rural-Urban Mapping Project, Version 1 (GRUMPv1) – Urban Extents Grid*, NASA Socioeconomic Data and Applications Center (SEDAC), Palisades, New York. [Online] Available at: doi.org/10.7927/H4GH9FVG [Accessed 14 October 2023].

Ciribini, G. (1984), *Tecnologia e progetto – Argomenti di cultura tecnologica della progettazione*, Celid, Torino.

Ciribini, G. (1979), *Introduzione alla tecnologia del design – Metodi e strumenti logici per la progettazione dell'ambiente costruito*, FrancoAngeli, Milano.

Davino, G. and Bassolino, E. (2019), "Strategie di progettazione adattiva per il retrofit di edifici in risposta ai cambiamenti climatici | Adaptive design strategies for buildings' retrofit in response to climate change", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 6, pp. 192-199. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/6182019 [Accessed 11 October 2023].

d'Estrée Sterk, T. (2005), "Building upon Negroponte – A hybridized model of control suitable for responsive architecture", in *Automation in Construction*, vol. 14, issue 2, pp. 225-232. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.autcon.2004.07.003 [Accessed 19 October 2023].

De Toni, A. F. and Comello, L. (2005), "Complessità e organizzazione, ovvero verso le auto-organizzazioni", in *complexlab*. [Online] Available at: complexlab.it/Members/lucacomello/articoli/complessita-e-organizzazione-ovvero-verso-le-auto-organizzazioni [Accessed 14 October 2023].

Delaunay, B. (1934), "Sur la sphere vide – A la mémoire de Georges Voronoï", *in Bulletin de l'Académie des Science de l'URSS*, vol. 6, pp. 793-800. [Online] Available at: mathnet.ru/php/getFT.phtml?jrnid=im&paperid=4937&what=fullt&option_lang=rus [Accessed 19 October 2023].

Friedenberg, J. (2019), "The Perceived Beauty of Regular Polygon Tessellations", in *Symmetry*, vol. 11, issue 8, n. 984, pp. 1-17. [Online] Available at: doi.org/10.3390/sym11080984 [Accessed 20 October 2023].

Hadamard, J. (1921), "L' Œuvre mathématique de Poincaré", in *Acta Mathematica*, XXXVII, pp. 203-287. [Online] Available at: doi.org/10.1007/BF02392071 [Accessed 19 October 2023].

Hofstadter, D. R. (1985), "L'architettura del Jumbo", in Bocchi, G. and Ceruti, M. (eds), *La sfida della complessità*, Feltrinelli, Milano, pp. 274-309.

IEA (2022), "Building Envelopes", in *iea.org*. [Online] Available at: iea.org/reports/building-envelopes [Accessed 14 October 2023].

Jeronimidis, G. and Gruber, P. (2012), "Has biomimetics arrived in architecture?", in *Bioinspiration & Biomimetics*, vol. 7, issue 1, pp. 1-2. [Online] Available at: doi.org/10.1088/1748-3182/7/1/010201 [Accessed 2 August 2023].

Kuboki, H., Tanaka, H., Ohno, S., Sugita, K., Takayanagi, N., Nakajima, N., Yuasa, K. and Nakatani, T. (2019), "A Proposal for Reactive Wall Panel using Auxetic Patterns", in *Proceedings of 4DFF2019*, Keio University, Tokyo. [Online] Available at: fab.sfc.keio.ac.jp/paper/files/kuboki_4dff_fin.pdf [Accessed 14 October 2023].

Langlois, R. N. (2000), "Modularity in Technology and Organization", in *Journal of Economic Behaviour and Organization*, vol. 49, issue 1, pp. 19-37. [Online] Available at: sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0167268102000562 [Accessed 14 October 2023].

Lejeune Dirichlet, J. P. G. (1850), "Über die Reduktion der positiven quadratischen Formen mit drei unbestimmten ganzen Zahlen", in *Journal für die Reine und Angewandte Mathematik*, vol. 40, pp. 209-227. [Online] Available at: http://gdz.sub.uni-goettingen.de/dms/resolveppn/?PPN=GDZPPN002146894 [Accessed 19 October 2023].

Lucarelli, M. T., Milardi, M., Mandaglio, M. and Musarella, C. C. (2020), "Fenomeni macro vs risposte micro – Approcci multiscalari nei rapporti dinamici tra involucro e contesto | Macro phenomena vs micro responses – Multiscale approaches in the dynamic relationship between envelope and context", in *Agathón | International Journal of Architecture Art and Design*, vol. 7, pp. 26-33. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/73202 [Accessed 12 October 2023].

Maturana, H. R. and Varela, F. J. (1985), *Autopiesis and Cognition – The Realization of the Living*, D. Reidel Publishing Company. [Online] Available at: monoskop.org/images/3/35/Maturana_Humberto_Varela_Francisco_Autopoiesis_and_Congition_The_Realization_of_the_Living.pdf [Accessed 14 October 2023].

Mazzucchelli, E. S. (2018), "L'Involucro di Edifici Complessi – Aspetti Progettuali e Costruttivi", in *Modulo*, vol. 415, pp. 78-83. [Online] Available at: modulo.net/files/chunks/5bed911ca0d55630c4000875/5bed9165a0d55630da00084f.pdf [Accessed 14 October 2022].

Meisner, G. (2014), "Is the Nautilus shell spiral a golden spiral?", in *The Golden Number*, 08/02/2014. [Online] Available at: goldennumber.net/nautilus-spiral-golden-ratio/ [Accessed 20 October 2023].

Morin, E. (1985), "Le vie della complessità", in Bocchi, G. and Ceruti, M. (eds), *La sfida della complessità*, Feltrinelli, Milano, pp. 25-36.

Negroponte, N. (1975), *Soft Architecture Machines*, The MIT Press, Cambridge. [Online] Available at: doi.org/10.7551/mitpress/6317.001.0001 [Accessed 14 October 2023].

Ohira, M., Eguchi, S., Okabe, C. and Tanaka, H. (2022), "Demonstrating ex-CHOCHIN – Shape/Texture-changing cylindrical interface with deformable origami tessellation", in *UIST '22 Adjunct – Adjunct Proceedings of the 35th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, Association for Computing Machinery, New York, article 57, pp. 1-3. [Online] Available at: doi.org/10.1145/3526114.3558626 [Accessed 14 October 2023].

Overvelde, J. T. B., Weaver, J. C., Hoberman, C. and Bertoldi, K. (2017), "Rational design of reconfigurable prismatic architected materials", in *Nature*, vol. 541, pp. 347-352. [Online] Available at: nature.com/articles/nature20824 [Accessed 14 October 2023].

Penrose, R. (1974), "The role of aesthetics in pure and applied mathematical research", in *Bulletin of the Institute of Mathematics and Its Applications*, vol. 7-8, issue 10, pp. 266-271.

Piaget, J. (1978), *Structuralism*, Harper and Row, New York.

Poincaré, H. (1909), *Science et méthode*, Flammarion, Paris.

Poincaré, H. (1905), *La valeur de la science*, Flammarion, Paris.

Poincaré, H. (1902), *La science et l'hypothèse*, Flammarion, Paris.

Prigogine, I. (1993), *Le leggi del caos*, Laterza, Bari.

Rispoli, G. (2012), *Dall'empiriomonismo alla tectologia – Organizzazione, complessita` e approccio sistemico nel pensiero di Aleksandr Bogdanov*, Aracne, Roma.

Robinson, R. M. (1971), "Undecidability and Nonperiodicity for Tilings of the Plane", in *Inventiones Mathematicae*, vol. 12, issue 3, pp. 177-209. [Online] Available at: doi.org/10.1007/BF01418780 [Accessed 20 October 2023].

Rodonò, G. (2022), *Tecnologia dei componenti cinetici per l'architettura – Origami e superfici pieghevoli*, Edicom Edizioni, Monfalcone.

Rogers, R. (1998), *Cities for a Small Planet*, Basic Books, New York.

Salingaros, N. A. (n.d.), "La Legge della Varietà Necessaria e l'ambiente costruito", in *La Direzione | Rivista dell'Innovazionismo*. [Online] Available at: ladirezione.it/la-legge-della-varieta-necessaria-e-lambiente-costruito-dinikos-a-salingaros/ [Accessed 20 October 2023].

Schrödinger, E. (1926a), "Quantisierung als Eigenwertproblem", in *Annalen der Physik*, vol. 384, issue 4, pp. 361-376. [Online] Available at: dx.doi.org/10.1002/andp.19263840404 [Accessed 19 October 2023].

Schrödinger, E. (1926b), "Quantisierung als Eigenwertproblem", in *Annalen der Physik*, vol. 81, pp. 109-139. [Online] Available at: gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k15383q/f117.item [Accessed 19 October 2023].

Sidewalk Labs (2019a), *Toronto Tomorrow – A new approach for inclusive growth*, vol. 1. [Online] Available at: storage.googleapis.com/sidewalk-labs-com-assets/MIDP_Volume1_printerfriendly_e108cdf1c6/MIDP_Volume1_printerfriendly_e108cdf1c6.pdf [Accessed 22 October 2023].

Sidewalk Labs (2019b), *Toronto Tomorrow – A new approach for inclusive growth*, vol. 2. [Online] Available at: storage.googleapis.com/sidewalk-labs-com-assets/MIDP_Volume2_printerfriendly_722347160d/MIDP_Volume2_printerfriendly_722347160d.pdf [Accessed 22 October 2023].

Smith, D., Myers, J. S., Kaplan, C. S. and Goodman-Strauss, C. (2023), "A chiral aperiodic monotile", in *ArXiv*, 28/05/2023. [Online] Available at: doi.org/10.48550/arxiv.2305.17743 [Accessed 20 October 2023].

Sorrenti, D. (2017), *Modelli per le scelte tecnologiche*, Università C. Cattaneo LIUC, Castellanza. [Online] Available at: my.liuc.it/MatSup/2017/N75310/5.%20Modularit%C3%A0%20-%20A.A.%202017%20-%202018.pdf [Accessed 14 October 2023].

Tachi, T. (2011), "Rigid-Foldable Thick Origami", in Wang-Iverson, P., Lang, R. J. and YIM, M. (eds), *Proceedings of Origami 5 – Fifth International Meeting of Origami Science, Mathematics, and Education*, CRC Press, pp. 253-263. [Online] Available at: doi.org/10.1201/b10971-24 [Accessed 14 October 2023].

Thompson, D. W. (1992), *On Growth and Form*, Cambridge University Press, Cambridge. [Online] Available at: doi.org/10.1017/CBO9781107325852 [Accessed 14 October 2023].

Toscano, M. (2008), *Un pensiero complesso – Riflessioni storiche ed epistemologiche sulla scoperta del caos nell'opera di Jules Henri Poincaré | Une pensee complexe – Reflexions historiques et epistemologique sur la decouverte du chaos dans l'œuvre de Jules Henri Poincare*, Tesi di Dottorato in Antropologia ed Epistemologia della Complessità, XXI ciclo, 2007-2008, Relatori Giannetto E. and Boi L., Università di Bergamo. [Online] Available at: aisberg.unibg.it/retrieve/e40f7b84-0108-afca-e053-6605fe0aeaf2/Tesi%20Marco%20Toscano.pdf [Accessed 19 October 2023].

Tsiamis, M., Oliva, A. and Calvano, M. (2018), "Algorithmic Design and Analysis of Architectural Origami", in *Nexus Network Journal*, vol. 20, pp. 59-73. [Online] Available at: doi.org/10.1007/s00004-017-0361-9 [Accessed 14 October 2023].

Tucci, F. (2017), "Paradigmi della Natura per Progettare Involucri architettonici | Nature's Paradigms for Designing Architectural Envelopes", in *Agathón | International Journal of Architecture Art and Design*, vol. 2, pp. 47-54. [Online] Available at: 10.19229/2464-9309/262017 [Accessed 11 October 2023].

Tucci, G. and Carlo Ratti Associati (2023), "La tecnologia come abilitatore di un nuovo ecosistema urbano responsivo – Intervista a Carlo Ratti (CRA Studio) | Technology as an enabler of a new ecosystem responsive urbanism – Interview with Carlo Ratti (CRA Studio)", in *Agathón | International Journal of Architecture Art and Design*, vol. 12, pp. 190-201. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/12172022 [Accessed 12 October 2023].

Ulber, M. and Mahall, M. (2019), "L'architettura adattiva come mediatrice fra gli uomini e la terra | Adaptive architecture as mediator between humans and earth", in *Agathón | International Journal of Architecture Art and Design*, vol. 6, pp. 94-103. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/692019 [Accessed 12 October 2023].

UNEP (2020), *2020 Global Status Report for Buildings and Construction – Towards a Zero-emission, Efficient and Resilient Buildings and Construction Sector*. [Online] Available at: globalabc.org/news/launched-2020-global-status-report-buildings-and-construction [Accessed 14 October 2021].

UNEP (2016), *Global Status Report 2016 – Towards Zero-Emission, Efficient and Resilient Buildings*. [Online] Available at: globalabc.org/resources/publications/gabc-global-status-report-2016-towards-zero-emission-efficient-and-resilient [Accessed 14 October 2023].

von Foerster, H. (2003), *Understanding Understanding – Essays on Cybernetics and Cognition*, Springer-Nature, New York. [Online] Available at: doi.org/10.1007/b97451 [Accessed 14 October 2023].

Wang, H. (1961), "Proving theorems by pattern recognition – II", in *The Bell System Technical Journal*, vol. 40, issue 1, pp. 1-41. [Online] Available at: doi.org/10.1002/j.1538-7305.1961.tb03975.x [Accessed 20 October 2023].

Weaver, W. (1948), "Science and Complexity", in *American Scientist*, vol. 36, issue 4, pp. 536-544. [Online] Available at: jstor.org/stable/27826254 [Accessed 19 October 2023].

Wiener, N. (1948), *Cybernetics – Or Control and Communication in the Animal and the Machine*, Kessinger, New York.