

Essays & Viewpoint

architecture

## PARADIGMI DELLA NATURA PER PROGETTARE INVOLUCRI ARCHITETTONICI NATURE'S PARADIGMS FOR DESIGNING ARCHITECTURAL ENVELOPES

Fabrizio Tucci\*

**ABSTRACT** - La Natura ha messo a punto strategie e soluzioni per l'ottimizzazione del passaggio, selezione, filtro e scambio metabolico di risorse materiali e immateriali, fisiche ed energetiche; oggi, in epoca di scarsità di risorse, di crisi ambientale ed economica, di cambiamenti climatici e di costante emergenza, è dovere dei ricercatori mettere a frutto tale potenziale patrimonio di Sapere. Ed è importante comprendere le future linee evolutive della ricerca, che il presente contributo sintetizza in dieci punti principali, riferiti agli involucri dinamici a proprietà variabili, sia di tipo opaco e semiopaco che di tipo trasparente e traslucido.

Nature has perfected strategies and solutions to optimize how resources - material and immaterial resources, physical resources, and energy resources - are transferred, selected, filtered, and metabolically exchanged. Today, at a time of scarce resources, environmental and economic crisis, climate change and constant emergency, researchers have to exploit this potential wealth of knowledge. And it is important to understand the lines of development for research in the future which this paper summarizes in ten main points, referring to dynamic envelopes with variable properties - both opaque / semi-opaque and transparent / translucent.

**KEYWORDS:** Approccio bioclimatico, architettura naturale, biomimetica, progettazione tecnologica ambientale.

Bioclimatic approach, natural architecture, biomimicry, environmental technological design.

Da diversi decenni si è sviluppata la consapevolezza dell'importante ruolo che lo studio della biomimetica può svolgere a supporto di una rigenerazione responsabile e consapevole dell'ambiente costruito. Tali studi stanno da tempo mettendo in luce quanto efficacemente la Natura abbia messo a punto nel corso dell'evoluzione un vastissimo quadro di strategie per il risparmio e la razionalizzazione dell'utilizzo di materia, energia e informazione, e in genere per l'ottimizzazione degli scambi metabolici di tipo materiale e immateriale. Oggi, in epoca di scarsità di risorse, di crisi ambientale ed economica, di cambiamenti climatici e di costante emergenza, è dovere dei ricercatori e progettisti mettere a frutto tale potenziale patrimonio di sapere. Sono ormai noti i principali meccanismi e processi grazie ai quali le strutture fisiche degli esseri viventi riescono ad adattarsi alle più diverse situazioni climatiche della Terra (Beynus, 2002): ai cambiamenti del clima esterno, ai mutamenti delle condizioni fisiche, geografiche e territoriali, alle continue trasformazioni delle attività metaboliche e vitali. Gli organismi reagiscono con l'uso di membrane fortemente adattive, con sistemi di circolazione interrelati, e con complessi meccanismi di autoregolazione.

Gli organismi viventi animali e vegetali utilizzano esclusivamente energie rinnovabili per produrre riscaldamento e raffrescamento, per generare movimento e articolazione del proprio agire nello spazio, per ottenere una buona ventilazione quando necessaria o schermarsi del tutto da essa, per operare le complesse sintesi metaboliche. Nelle operazioni di adattamento, regolazione, interazione e metabolizzazione si fa sempre leva in Natura su elementi-chiave a membrana (reale o virtuale) di passaggio, di selezione e di filtro per gli scambi di materiale e di immateriale, di risorse fisiche ed energetiche (Bonser, 2006). Già poco più di vent'anni fa uno dei più noti studiosi del tema affermava: «L'architettura animale è in perfetta armonia con il contesto ecologico, non esaurisce le risorse naturali e non crea problemi di rifiuto e di inquinamento. L'uso prolungato e il riuso sono, per gli animali, considerazioni economiche importanti»<sup>1</sup> (Pallasmaa, 1995).

Sul nostro pianeta abbiamo avuto animali e piante 'architetti' molti anni prima che l'*Homo Sapiens* compisse i suoi primi rudimentali tentativi di costruzione, e non ci deve stupire che i

loro manufatti superino spesso, ancora oggi, quelli umani per funzionalità, adattabilità, qualità ecologica, solidità strutturale, efficienza energetica, efficacia bioclimatica, gestione delle risorse e precisione nell'esecuzione (Lakhtakia, Martin-Palma, 2013). Studiando a fondo tali processi è possibile avere importanti spunti e indicazioni per arricchire e approfondire in senso critico le questioni che si pongono alla base delle scelte strategiche volte ad imprimere un'impostazione ambientalmente corretta e tecnologicamente efficace dell'architettura, soprattutto nella progettazione dei sistemi e componenti delle membrane e degli involucri architettonici che oggi sono chiamati ad esercitare un ruolo-chiave nella ricerca di una maggiore sostenibilità e resilienza dell'ambiente costruito.

*L'esempio paradigmatico della Natura nelle architetture animali e vegetali per definire ruoli e prestazioni* - Può essere innanzitutto utile porsi due grandi interrogativi: quali sono i criteri che sono alla base della gestione bioclimatico-energetica delle 'architetture' del mondo naturale? Quale ruolo può assumere un loro attento studio nell'indirizzare le strategie di una ricerca tecnologica volta alla rigenerazione in chiave bioclimatica e ambientale dell'architettura e dei suoi sistemi involucranti? Per rispondere al primo quesito è funzionale ricordare alcuni tra i numerosi casi studiati negli ultimi decenni su questo tema, esemplificativi della capacità della Natura di gestire i fenomeni bioclimatico-energetici secondo quattro principali ambiti: quelli del *passive cooling*, della *natural ventilation*, del *daylighting* e del *thermal insulation*<sup>2</sup> (Baumeister, 2014). Potremo poi passare a formulare una prospettiva verso le possibili future tendenze di sviluppo della ricerca tecnologica applicate soprattutto all'evoluzione prestazionale di involucri e membrane dinamici e a prestazioni variabili, opachi e semiopachi, trasparenti e traslucidi.

Per cominciare il sintetico *excursus* nel mondo delle *performance* delle membrane dell'architettura naturale, possiamo citare quelle che possiamo definire a pieno diritto 'costruzioni bioclimatiche' delle termiti *Trinermitermes* che vivono nelle regioni secche dell'Africa: le loro costruzioni sono capaci di captare e mettere in moto un sistema di ventilazione estremamente raffinato, tale da far muovere l'aria intorno al

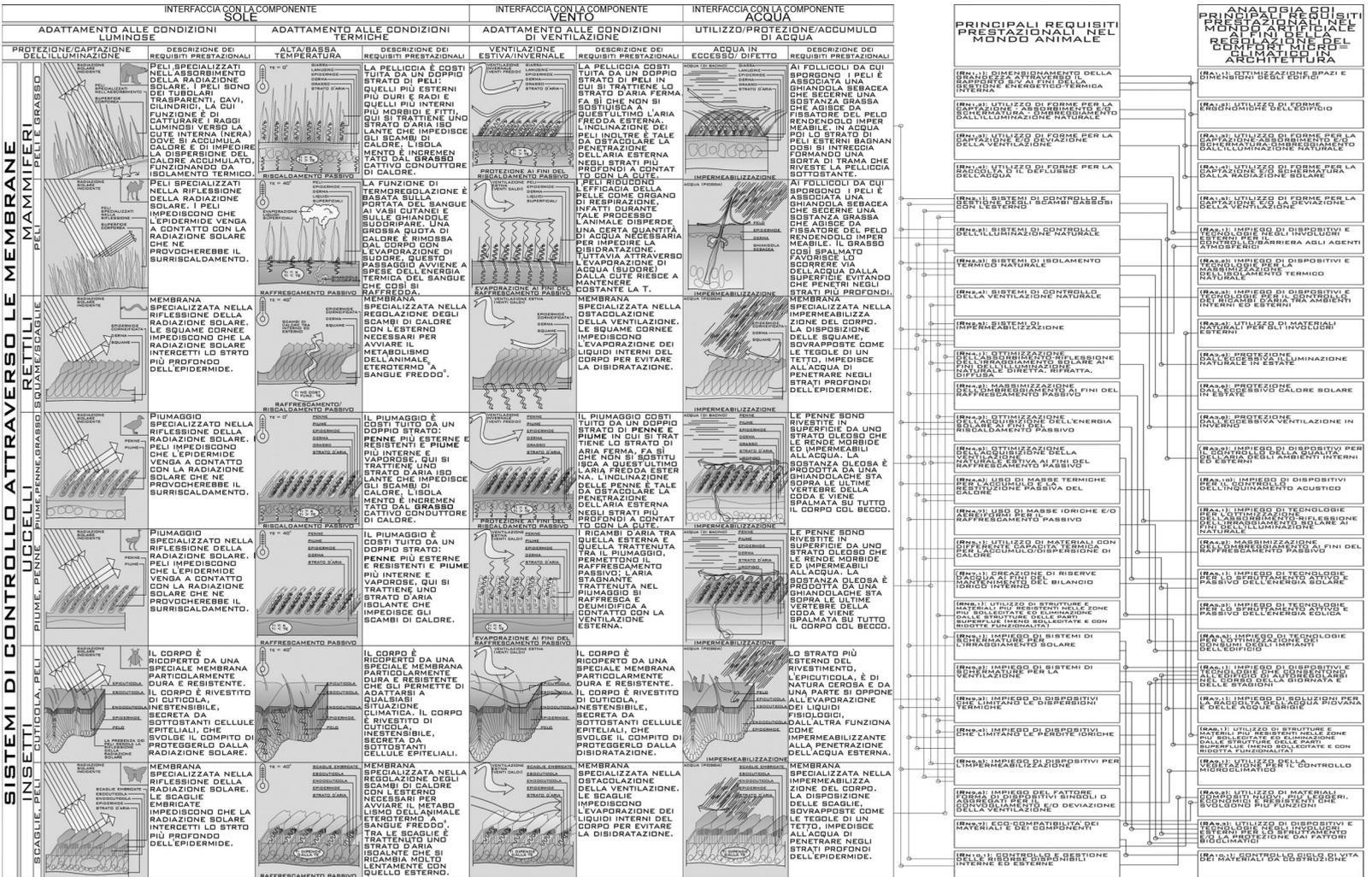


Fig. 1 - Sistemi di controllo bioclimatico-energetico in natura, attraverso gli involucri animali.

termaito alla velocità richiesta dalle differenti situazioni microclimatiche. Nelle loro costruzioni si perviene all'ottimizzazione dell'impiego di un principio basilare del raffreddamento passivo: quello per evaporazione dell'acqua, in questo caso sotterranea. Il fenomeno, unito a quello del convogliamento sapiente della ventilazione naturale, produce un veloce raffreddamento dell'aria, che raffresca l'intera costruzione e procura, in un clima avverso alla vita quale è quello desertico, condizioni ambientali interne molto confortevoli grazie a una tecnica costruttiva efficace e semplice al tempo stesso<sup>3</sup> (Tucci, 2012). Inoltre può essere utile sottolineare che le membrane delle costruzioni-tipo delle termiti non subiscono un irraggiamento solare casuale, non vengono illuminate in modo uniformemente indistinto, né vengono attraversate da flussi di energia che non siano controllati e ottimizzati. Proporzione, forma, orientamento, struttura e qualità degli involucri dei termitai tendono a compartecipare attivamente alla ottimizzazione delle interazioni tra condizioni necessarie per la vita interna della costruzione e condizioni fisico-climatiche esterne, alla razionalizzazione dei flussi energetici che li attraversano e al potenziamento di qualsiasi forma si riveli necessaria per migliorare l'isolamento e il risparmio termico ed energetico (Omedes, Piqué, 2004).<sup>4</sup>

Nel mondo vegetale, un interessante esempio relativo all'impiego dell'irraggiamento solare

può essere quelle delle piante verdi, che hanno sviluppato un sistema di convogliamento, di permeabilità e di filtraggio della luce naturale, sia per massimizzare la dispersione dell'energia termica in eccesso, sia per ottimizzare la captazione di radiazione luminosa (Nachtigall, Blüchel, 2000)<sup>5</sup>. La pianta africana *Davanzale*, ad esempio, è letteralmente seppellita nel terreno per proteggersi dal caldo, mentre le uniche parti che emergono sono le sue 'finestre' che, essendo trasparenti, riescono a raccogliere e convogliare la luce all'interno. La pianta, in tal modo, è in grado di ottimizzare le condizioni del suo complesso sistema metabolico in maniera tale da ottenere, a seconda delle situazioni illuminative esterne, una costante e soprattutto diffusa illuminazione naturale 'interna' (Nachtigall, Wisser, 2015).

Riguardo alle questioni dell'*isolamento termico* e degli *scambi termici*, la Natura riesce a risolverli sistematicamente col ricorso a materiali totalmente riciclabili, come la celluloido, la chitina o la cheratina, il più delle volte impiegati, tra l'altro, per risolvere più compiti contemporaneamente, dalla impermeabilizzazione al passaggio d'acqua, fino all'assolvimento di vere e proprie prestazioni di tipo strutturale (Fratzl, 2007). È interessante osservare non solo l'*intelligenza* prestazionale in termini fisici e chimici di materiali da costruzione di questo tipo - che anche su questo tema in Natura si offrono innumerevoli a essere studiati - ma anche l'*intelligenza* tecnolo-

gica con cui essi vengono prodotti e usati (Pallasmaa, 1996). Molti uccelli possono mutare la struttura o la disposizione delle loro piume per favorire o ridurre gli scambi termici tra l'interno del proprio corpo e l'ambiente esterno. Alcuni aumentano la loro capacità di proteggersi dal freddo arricciando le penne; gli *struzzi sudafricani*, ad esempio, regolano la loro temperatura spiegando le loro piume, facendo cioè uso del loro piumaggio permeabile in modo differenziato e controllabile. È in un certo senso la stessa direzione in cui si stanno cominciando a muovere da un decennio gli involucri architettonici di tipo dinamico, quelli a proprietà variabili, e quelli d'impronta parametrica, che hanno tutti ancora molto da imparare da un sempre più approfondito studio dei comportamenti naturali prima citati (Malik, Clement, 2014)<sup>6</sup>. Sulla regolazione degli scambi termici in Natura si fa anche - e ampiamente - un uso adattivo e dinamico della massa termica: il *varano del deserto* si interra fino a 2-3 metri di profondità per combattere il caldo, sfruttando peraltro l'umidità del terreno per evitare la disidratazione; lo stesso fa la *talpa dorata* (*Eremitalpa granti*), che addirittura 'naviga' sotto la sabbia, per uscirne solo nel corso della notte.

La Natura usa anche moltissimi 'involucri filati' (Milwich, Speck, 2006; Koch, Barthlott, 2009), come ad esempio avviene con le *larve delle farfalle*, che vengono imprigionate in un tessuto che lascia passare la luce e l'aria ma che

è impermeabile all'acqua. Un caso le cui caratteristiche sono state trasferite nella ricerca e nella sperimentazione sull'involucro architettonico innovativo e bioclimaticamente polivalente è quello rappresentato dal pelo degli *orsi bianchi polari*, studi ai quali l'autore ha preso parte nei primi anni Novanta, sotto la guida di Thomas Herzog, per le prime applicazioni in architettura dei prototipi del TWD *TransluzenteWärmeDämmung* (oggi meglio noto come *TIM, Transparent Insulating Material*) (Tucci, 2008). È ormai noto da tempo che il pelo dell'orso non è bianco, bensì traslucido, e che gli orsi polari hanno sviluppato questo particolarissimo 'involucro filato' per assicurare la loro protezione termica nei confronti delle rigide temperature polari, attraverso una mutazione graduale a partire dal pelo degli orsi bruni. Quando la radiazione solare colpisce la pelle dell'orso polare, filtrando attraverso la particolare struttura del pelo traslucido e cavo, ne determina il riscaldamento, e il calore così prodotto viene 'ingabbiato' dallo strato superiore dell'epidermide che ne impedisce la cessione all'ambiente esterno, grazie all'eccezionale proprietà del pelo dell'orso polare di isolamento termico (Herzog, 2005).

Qualcosa di simile si verifica anche in altri esseri viventi: ad esempio nei *cercopidi*, che, per proteggere le loro crisalidi, producono una schiuma albuminosa caratterizzata da ottime qualità di protezione termica; o in un elevatissimo numero di *piante nelle zone alpine*, dove uno strato peloso trasparente o semitrasparente integrato sulla parte esterna del loro involucro consente un aumento di temperatura per effetto serra, che ne prolunga il peraltro breve periodo 'vitale'<sup>7</sup> (Bruni, 2015). Le *foglie delle piante verdi* dispongono della luce come un approvvigionatore di energia che la può usare e riutilizzare in tempi differiti, in caso di bisogno. Sappiamo bene che esse sintetizzano e riciclano costantemente le loro cellule 'solari' a seconda degli andamenti della temperatura dell'ambiente. I due aspetti forse più interessanti risiedono nella dimensione degli strati che convertono la luce - diecimila volte più sottili delle nostre cellule fotovoltaiche - e nella propensione della pianta a rigenerarli ogni anno, in un infinito processo di 'aggiornamento prestazionale'. Aspetti che hanno costituito un importante esempio ispiratore per lo sviluppo dei *Biophotovoltaics* (Hug, Bader, 2014), delle *Dye Sensitized Solar Cells* (Grätzel, 2003) e dell'ultima generazione delle *Organic Solar Cells*, all'applicazione delle quali l'autore ha partecipato nella prima esperienza di sperimentazione in *outdoor* d'Italia (Tucci, 2014).

*I possibili sviluppi della ricerca tecnologica ispirata alla biomimetica* - Si potrebbe continuare a lungo, perché gli studi teorici in ambito biomimetico non mancano e negli ultimi anni cominciano a moltiplicarsi le loro applicazioni nell'architettura e nei suoi sistemi e componenti; ma può essere più utile fermarci e provare a tracciare un quadro prospettico delle future tendenze sperimentali sul tema. Gli sviluppi scientifici e tecnologici più recenti della ricerca e della sperimentazione d'impronta biomimetica hanno aperto orizzonti e potenzialità totalmente nuovi per la progettazione e la realizzazione di involucri

architettonici 'dinamici', in grado di dare risposte ai sempre più complessi scenari culturali, esigenziali e prestazionali. La traduzione *in fieri* degli sviluppi della ricerca, prodotti in questa direzione negli ultimi anni, sta portando alla nascita di vere e proprie nuove categorie di prodotti edilizi, che prendono il nome di 'Componenti con materiali a proprietà variabili' (*Variable Property Materials, VPM*) che, tra i tanti risultati tuttora *in progress* di tali sviluppi, rappresentano quelli specificamente pensati e orientati per aumentare le capacità d'interazione dinamica con i fattori ambientali, climatici ed energetici.

Tra questi possiamo annoverare quelli che nel presente contributo sono considerati le dieci categorie di componenti d'involucro più significativi e promettenti per gli sviluppi del prossimo futuro: 1) i componenti fotocromici, termocromici ed elettrocromici, quali testimoni avanzati della ricerca nel campo dei 'materiali cromogenici', capaci d'interagire con gli effetti termici dei fattori ambientali come il soleggiamento e la ventilazione, mutando in tempo reale il loro stato chimico-fisico da una configurazione trasparente a una opacizzata e, in alcuni casi, addirittura cromaticamente caratterizzata;

2) i 'materiali a cambiamento di fase' (*PCM, Phase Change Materials*), capaci di modificare il proprio stato chimico-fisico da solido a liquido, ad aeriforme, a plasmatico e viceversa, a seconda della quantità di calore assorbita che diventa 'calore latente' nei periodi caldi e 'calore ceduto' nei periodi freddi;

3) le ultime generazioni dei componenti traslucidi di *aerogel*, la categoria dei materiali artificiali più leggera al mondo, pesante solo quattro volte l'aria, con una trasmittanza termica incredibilmente bassa;

4) i materiali a base di 'gel dinamico', capace di opacizzarsi all'aumentare del calore (solitamente, ma non esclusivamente, impresso sull'involucro dall'irraggiamento solare);

5) i componenti 'traslucidi dinamici' a elevata capacità d'isolamento termico (*TIM, Transparent Insulating Materials*), messi a punto per l'applicazione in architettura - come prima ricordato - già da vent'anni, ma sui quali la sperimentazione e il perfezionamento delle prestazioni continuano senza sosta, nella loro duplice applicabilità 'dinamica', su involucri massivi opachi o su involucri semiopachi a elevata capacità di diffusione della luce;

6) le tinte e le vernici 'cromaticamente variabili' a seconda dell'irraggiamento solare incidente nella sua componente termica, ossia del calore assorbito e della temperatura superficiale dell'involucro con essi trattato;

7) i vetri 'dielettrici' che, a seconda del materiale, sono in grado di produrre polarizzazioni elettriche di tipo ionico, elettronico, di orientazione o di carica spaziale nella componente d'involucro in cui sono impiegati;

8) i vetri 'prismatici dinamici', in grande sviluppo nel campo della regolazione della cosiddetta 'selettività angolare' dei raggi solari, orientata a produrne il ri-direzionamento e la penetrazione in profondità verso gli ambienti interni, o la riflessione verso l'esterno, a seconda dei momenti della giornata e dell'anno;

9) gli 'isolamenti con conduttanza variabile' (*Variable Conductance Insulation, VCI*), che possono ampliare lo scambio termico regolato dalla

superficie esterna dell'edificio dal 30% circa fino al 90% dell'intera superficie di parete e copertura; 10) i 'vetri con grado di trasmittanza variabile' (*Variable Transmittance Glas, VTG*), e i 'diodi a convezione variabile' (*Variable Convection Diodes, VCD*).

Vi sono poi, rispetto a tale *quadro-decalogo* delle principali tendenze di sviluppo rapportabili all'influenza degli studi biomimetici, alcune linee direttive specificamente riferibili all'evoluzione futura degli involucri opachi e semi-opachi da una parte, e di quelli trasparenti e traslucidi dall'altra. La prestazionalità delle pareti opache, leggere o massive, ventilate o ad unico pacchetto, multi-stratificate o calibrate su di una o due pelli prevalenti, sta vivendo una continua evoluzione che può essere riassunta nelle seguenti linee direttive:

- il perfezionamento prestazionale dei materiali massivi o semi-massivi da impiegare negli involucri opachi nella progressiva ottimizzazione dei delicati equilibri da conseguire nel loro rapporto economie di processo produttivo / capacità di resistenza / valori di trasmittanza;

- la ricerca di un'ottimizzazione tra capacità di contenimento delle dispersioni di calore, ecologicità dei materiali isolanti da impiegare nell'involucro opaco e i loro costi, il che tira necessariamente in ballo ulteriori perfezionamenti delle modalità produttive da una parte, e la massima diffusione del loro impiego in edilizia dall'altra;

- la ricerca della fusione di più prestazioni nell'ambito delle stesse componenti dell'involucro opaco<sup>8</sup>;

- la ricerca tecnologica sul mutamento dei rapporti massivo/leggero dei componenti opachi (dove tradizionalmente ha sempre prevalso il massivo) legata alla necessità di conseguire nella realizzazione di un involucro opaco il giusto equilibrio tra alleggerimento complessivo dei suoi componenti (importante e utile per facilitare le fasi del momento costruttivo e per intaccare meno risorse) e massività di parte dei suoi materiali costitutivi (fondamentale, soprattutto ai nostri climi caldo-temperati, per innescare i benefici scambi termici per irraggiamento tra masse, legati all'esigenza di un raffrescamento naturale passivo degli ambienti interni);

- il perfezionamento tecnologico dei componenti per l'esecuzione dei sistemi di pareti ventilate opache, che dal punto di vista puramente prestazionale - in rapporto alla capacità di controllo del duplice obiettivo efficienza energetica/comfort ambientale - è costantemente in un *progress* fatto di piccoli passi, mentre dal punto di vista estetico-espressivo può avere ancora moltissimo da indagare e sperimentare;

- la crescita della sperimentazione sulle componenti dei 'muri solari ad aria', che è ormai avviata da tempo ma che potrebbe essere suscettibile di notevoli perfezionamenti, soprattutto sulla efficienza dell'accumulo e della restituzione del calore, sulla tenuta alle dispersioni termiche e sul rendimento energetico complessivo di questa tipologia di componenti di sistemi solari;

- la ricerca di un'interazione e integrazione fisica e prestazionale tra impiego di componenti opachi e uso di materiali 'naturali', quali acqua e vegetazione (si pensi ad esempio ai loro potenziali contributi al comfort ambientale in relazione al fenomeno dell'evaporazione nella prima e dell'evapo-traspirazione nella seconda).<sup>9</sup>

Sul piano degli involucri trasparenti, semitrasparenti e traslucidi, vi sono altre linee direttive che ne sintetizzano le tendenze evolutive in atto o in sviluppo futuro:

- la crescita delle capacità di commutazione ottica, con l'uso di materiali sempre più perfezionati gascromici, a cristalli liquidi, a particelle sospese, con l'uso di rivestimenti con selezione della lunghezza d'onda desiderata, e con lo sviluppo di materiali sempre più 'intelligenti';
- il miglioramento delle caratteristiche prestazionali al controllo del *daylighting*, attraverso l'uso di materiali con proprietà angolari variabili;
- il miglioramento dei valori isolanti in materiali trasparenti e traslucidi, a partire dallo sviluppo di polimeri, rivestimenti e gel di ultima generazione;
- il miglioramento delle caratteristiche di azione degli agenti atmosferici da parte di vetri con rivestimenti auto-pulenti;
- lo sfruttamento della concentrazione di luce con materiali che consentono la distribuzione dell'illuminazione naturale, usando fibre ottiche, apparecchiature olografiche e simili;
- il miglioramento della resistenza dei componenti trasparenti: riduzione della fragilità con conseguente miglioramento del rapporto forza/leggerezza;
- lo sviluppo della 'risposta intelligente' con l'uso esteso delle cosiddette *superwindow*: l'idea secondo la quale i vetri, i loro rivestimenti e i materiali compositi possano esser combinati insieme per produrre involucri edilizi che si comportino come una versione progettata della pelle umana, in cui aree diverse della superficie di facciata o di copertura presentino prestazioni differenziate nei modi, durate e tempi, a seconda delle esigenze differenziate delle varie parti dell'organismo edilizio.

*Conclusioni* - Forse l'involucro architettonico del futuro riuscirà a essere un sistema fortemente dinamico, con caratteristiche tecnologiche, configurazionali e prestazionali variabili, a seconda del mutare delle condizioni microclimatiche esterne e dei caratteri, delle funzioni, delle esigenze e della cultura stessa dei fruitori degli spazi che esso confina; proprio come fanno le membrane vegetali, le pelli animali e l'epidermide dell'uomo nella loro - per ora insuperabile - azione di selezione, filtro, mediazione che esercitano costantemente tra condizioni ambientali esterne e esigenze metaboliche interne degli organismi da esse involucrati. La portata paradigmatica offerta dal punto di vista comportamentale-prestazionale, dallo studio d'impostazione biomimetica delle architetture naturali sta di fatto spalancando le porte alle discipline scientifiche della progettazione tecnologica e ambientale dell'architettura per una ricerca e una sperimentazione che, dopo i primi tre decenni di studi condotti con la consapevolezza di tale portata, hanno di fronte un percorso - ancora lungo ma ormai imboccato - per renderli sempre più diffusamente ed efficacemente applicabili.

#### ENGLISH

*For several years, there has been growing awareness of the important role that the study of biomimicry can play in support of a responsible, informed regeneration of the built environment. And for some time, these studies have been casting light on how effectively nature has, over the course of evolution, perfected a vast framework of strate-*

*gies for saving and streamlining the use of material, energy, and information, and in general for optimizing the metabolic exchanges of both the material and immaterial type. Today, at a time of scarce resources, environmental and economic crisis, climate change, and constant emergency, researchers and planners have to exploit this potential wealth of knowledge. The main mechanisms and processes thanks to which the physical structures of living beings can adapt to the Earth's various climate situations (Beynus, 2002) - to changes in the external climate, to changed physical, geographical, and territorial conditions, to continued transformations of metabolic and vital activities - are now well known. Organisms react with the use of highly adaptive membranes, with interrelated circulation systems, and with complex self-regulation mechanisms.*

*Living animal and plant organisms make exclusive use of renewable energies to produce heating and cooling, to generate movement and articulation of their own actions in space, to obtain good ventilation when needed, or to shield themselves from all this in order to carry out complex metabolic syntheses. In adaptation, regulation, interaction, and metabolization operations, nature always relies on key elements in the form of a transfer, selection, and filtering membrane (real or virtual) for exchanges of the material and immaterial, and of physical and energy resources (Bonser, 2006). Already little more than twenty years ago, one of the most well-known scholars in the subject wrote: «Animal architecture is in perfect harmony with the ecological context, does not exhaust natural resources, and creates no problems of waste and pollution. Prolonged use and reuse are, for animals, important economic considerations»<sup>1</sup> (Pallasmaa, 1995).*

*On our planet, we had animal and plant architects long before Homo Sapiens made his first rudimentary attempts at building, and it should come as no surprise that their constructions, even today, often exceed human efforts in terms of function, adaptability, ecological quality, structural solidity, energy efficiency, bioclimatic effectiveness, resource management, and precision of execution (Lakhtakia, Martin-Palma, 2013). By studying these processes in depth, we can gain important insights and indications to enrich and critically analyze the questions underlying the strategic choices aimed at giving architecture an environmentally correct and technologically effective configuration, especially in designing the systems and components of the membranes and of the architectural envelopes that are called upon today to play a key role in the quest for the built environment's greater sustainability and resilience.*

The paradigmatic example of Nature in animal and plant architectures for the definition of roles and performance - *At the start, it may be useful to ask two big questions: What are the criteria underlying the bioclimatic/energy management of the architectures of the natural world? And: What role can a careful study of them play in guiding the strategies of a technological search aimed at the bioclimatic and environmental regeneration of architecture and of its enveloping systems? To respond to the first query, it is useful to keep in mind some of the numerous cases studied on this issue in recent years, that exemplify Nature's abil-*

*ity to handle bioclimatic/energy phenomena in accordance with four main spheres: passive cooling, natural ventilation, daylighting, and thermal insulation<sup>2</sup> (Baumeister, 2014). We will then be able to go on to formulate a prospective scenario towards possible future development trends in technological research applied above all to the evolving performance of dynamic membranes and envelopes, and to variable, opaque/semi-opaque, transparent, and translucent performance.*

*To begin this brief overview of how the membranes of natural architecture perform, we may cite what can be defined as the full-blown bioclimatic constructions built by Trinervitermes, termites living in the dry regions of Africa: their constructions are able to capture and set in motion an extremely refined ventilation system, that can move the air around the termite mound at the speed required by the different microclimatic situations. Their constructions make optimal use of a bedrock principle of passive cooling: water evaporation - underground water in this case. The phenomenon, along with that of shrewd channelling of natural ventilation, produces a quick cooling of the air, which in turn cools down the entire construction and, in an adverse climate like the desert, creates very comfortable environmental conditions thanks to a simple yet effective building technique<sup>3</sup> (Tucci, 2012). Moreover, it may be useful to point out that the membranes of the termites' typical construction are not subjected to random solar irradiation, are not lit in a uniformly indistinct way, and are not traversed by energy flows that have not been controlled and optimized. The proportion, form, orientation, structure, and quality of the termite mounds' envelopes tend to take active part in optimizing the interactions between the conditions necessary for life inside the construction and the outside physical and climatic conditions, in streamlining the energy flows that pass through them, and at strengthening any shape required to improve insulation and to better save heat and energy<sup>4</sup> (Omedes, Piqué, 2004).*

*In the plant world, an interesting example related to the use of solar irradiation may be that of green plants, which have developed a system to convey, be permeable to, and filter natural light, in order both to maximize the dispersion of excessive thermal energy, and to optimize the capture of luminous radiation<sup>5</sup> (Nachtigall, Blüchel, 2000). The African plant referred to as Davanzale (i.e. window sill), for example, is literally buried in the earth to protect itself from the heat; the only parts that emerge are its windows that, being transparent, can collect and convey light inside. In this way, the plant can optimize the conditions of its overall metabolic system in such a way as to obtain, depending on the outside lighting situations, a constant and above all diffuse natural interior lighting).*

*As to the questions of thermal insulation and heat exchange, Nature can resolve them systematically by relying on entirely recyclable materials, like celluloid, chitin, or keratin, which are also most frequently used for a number of tasks at the same time, from waterproofing to allowing water to pass through, and performing genuine structural-type services (Fratzl, 2007). It is interesting to note not only the performance-related intelligence, in chemical and physical terms, of construction materials of this kind - and in this area*



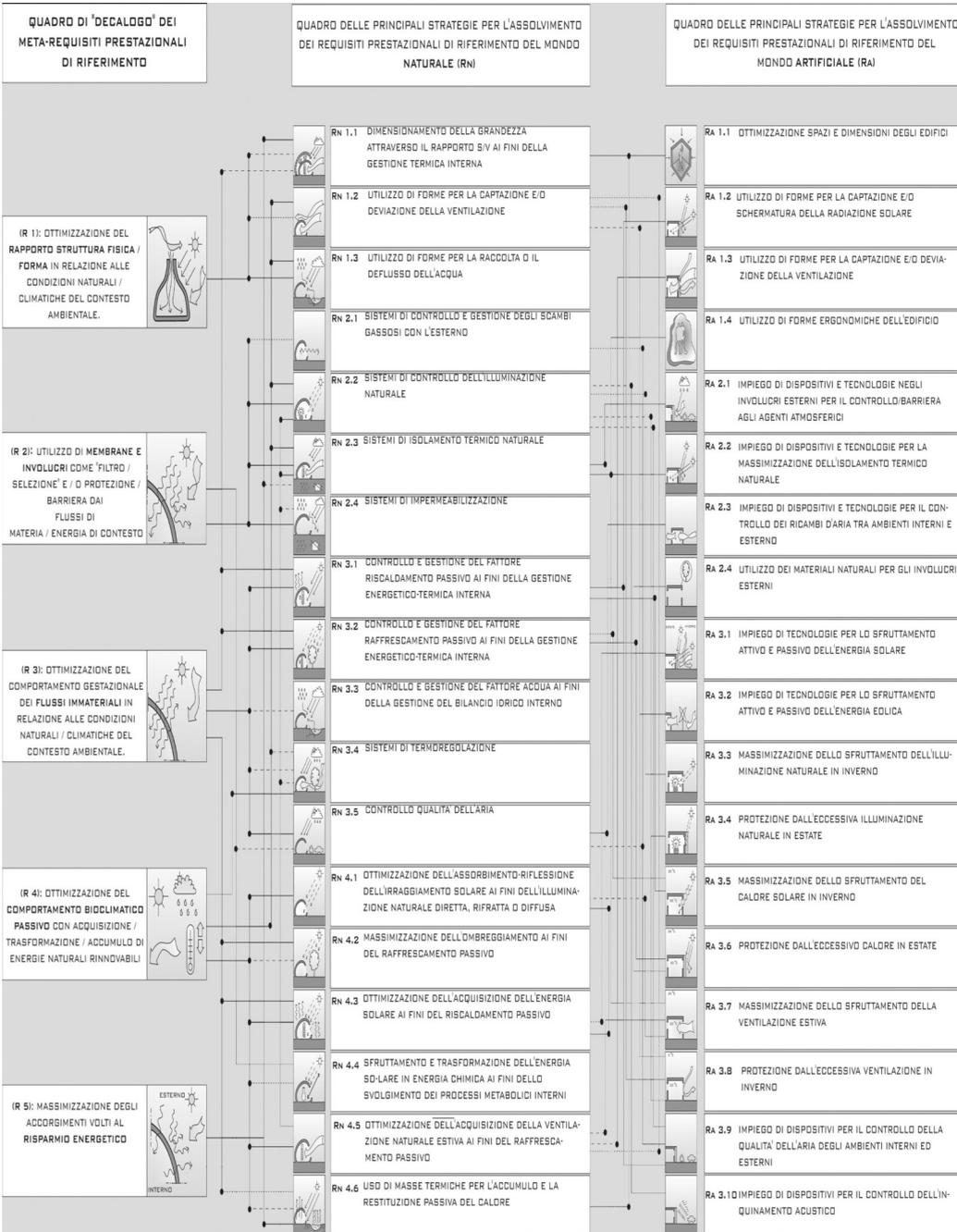


Fig. 3a - Decalogo dei meta-requisiti prestazionali e delle relative strategie di attuazione in natura, di esempio biomimetico per il mondo artificiale.

developments of biomimicry-oriented research and experimentation have opened horizons and entirely new potentials for designing and building dynamic architectural envelopes capable of providing responses to increasingly complex scenarios of culture, needs, and performance. Translating the research developments produced in this direction during these years as they occur is leading to the rise of wholly new categories of construction products bearing the name Variable Property materials (VPM) which, of the many results of these developments still in progress, represent those specifically designed and oriented to increase the capacities for dynamic interaction with environmental, climate, and energy factors.

Among these, we may include what this paper considers the 10 categories of envelope components that are most significant and promising for developments in the near future:

1) photochromic, thermochromic, and electrochromic components as advanced research items in the field of chromogenic materials capable of interacting with the thermal effects of such environmental factors as sunlight and ventilation, by changing their physical and chemical state in real time from a transparent to opaque and in some cases even chromatically characterized configuration;

2) Phase Change Materials (PCM), capable of modifying their chemical and physical state from solid to liquid to gas to plasma and back, depending on the quantity of absorbed heat that becomes latent heat during warm periods and surplus heat during cold periods;

3) the latest generations of aerogel transparent components, the lightest category of artificial materials in the world (just four times heavier than air), with an unbelievably low thermal

transmittance;

4) dynamic gel-based materials capable of turning opaque as the heat increases (usually but not exclusively the heat impressed upon the envelope by solar irradiation);

5) the dynamic transparent component with a high thermal insulation capacity (Transparent Insulating Materials - TIM), already perfected for application in architecture twenty years ago - as discussed earlier - but for which experimentation continues to go on and performance is perfected nonstop, in their dual dynamic applicability on massive opaque envelopes or on semi-opaque envelopes with a high capacity for diffusing light;

6) chromatically variable dyes and paint that change in accordance with incident sunlight in its thermal component, which is to say depending on absorbed heat and on the surface temperature of the envelope treated with them;

7) dielectric glass which, depending on the material, can produce electrical polarizations - ionic or electronic, or in terms of orientation or spatial charge - in the envelope component in which they are used;

8) dynamic prismatic glass, which is seeing great development in the field of regulating the so-called angular selectivity of the sun's rays, aimed towards redirecting them and producing in-depth penetration into interior environments, or reflection to the outside, depending on the moments of the day and year;

9) Variable Conductance Insulation (VCI), which can amplify the thermal exchange regulated by the building's outer surface from about 30% to 90% of the entire wall and roof surface;

10) Variable Transmittance Glass (VTG), and Variable Convection Diodes (VCD).

In this setting, this Decalogue, some main development trends may be linked to the influence of biomimetic studies, and there are some guidelines specifically referable to the future development of opaque and semi-opaque envelopes on the one hand, and to transparent and translucent ones on the other. The performance features of opaque walls, light or massive, ventilated or single-package, multilayered, or calibrated on one or more prior skins, is undergoing continuous development which may be summarized in the following guidelines:

- the evolved performance of massive or semi-massive materials to be used in opaque envelopes in the progressive optimization of the delicate balances to be achieved in production process economies / resistance capacity / transmittance values relationship;

- the search for optimization between the capacity to contain heat dispersion, the eco-friendliness of the insulation materials to be employed in the opaque envelope, and their costs, which necessarily puts into play additional evolutions of the modes of production on the one hand, and the massive spread of their use in construction on the other;

- the search to fuse together a number of performance features within the same components of the opaque envelope<sup>8</sup>;

- technological research on the change in the opaque components' massive / light relationships (where, traditionally, massive always prevailed), connected to the need, when making an opaque

envelope, to strike the right balance between the overall lightening of its components (important and useful for facilitating the phases of the moment of construction and to involve fewer resources) and massiveness of part of its constituent materials (fundamental, especially in our warm/temperate climates, for triggering beneficial thermal exchanges for radiation between masses, connected with the need for a natural passive cooling of the interior environments);

- the technological development of the components for building systems of opaque ventilated walls, which from a purely performance-related standpoint – in relation to the ability to control the dual energy efficiency/environmental comfort objective – are consistently in a state of progress made of small steps, while from the aesthetic and expressive standpoint there may still be a great deal to investigate and experiment with;

- the growing experimentation on the components of air solar walls, which has been underway for some time but might be susceptible to considerable developments, above all with regard to the efficiency of heat accumulation and restitution, the seal against heat dispersion, and the overall energy performance of solar system components of this type;

- the search for an interaction and physical and performance integration between the employment of opaque components and the use of natural materials, such as water and vegetation (consider, for example, their potential contributions to environmental comfort in connection with the phenomenon of evaporation in the former and of evapotranspiration in the latter).<sup>9</sup>

In terms of transparent, semi-transparent, and translucent envelopes, there are more guidelines that summarize the development trends in progress or in future development:

- growth of the capacities of optical switching, with the use of increasingly evolved materials: gas-chromatic, with liquid crystals, with suspended particles, with the use of linings with the selection of the desired wavelength, and with the development of increasingly smart materials;

- improvement of the performance features to control daylighting, through the use of materials with variable angular properties;

- improvement of insulating values in transparent and translucent materials, starting from the development of polymers, linings, and latest-generation gels;

- improved action of atmospheric agents by glass with self-cleaning linings;

- exploiting the concentration of light with materials that enable the distribution of natural lighting, using optical fibres, holographic apparatus, and the like;

- improved resistance of transparent components: reducing fragility with consequent improvement of the strength/lightness ratio;

- development of the smart response with the use of superwindows: the idea according to which the glass, its lining, and its composite materials may be combined together to produce construction envelopes that behave like a designed version of human skin, in which the different areas of the surface of façade or roof present features differentiated in their modes, durations, and times, in accordance with the differentiated needs of the various parts of the construction organism.

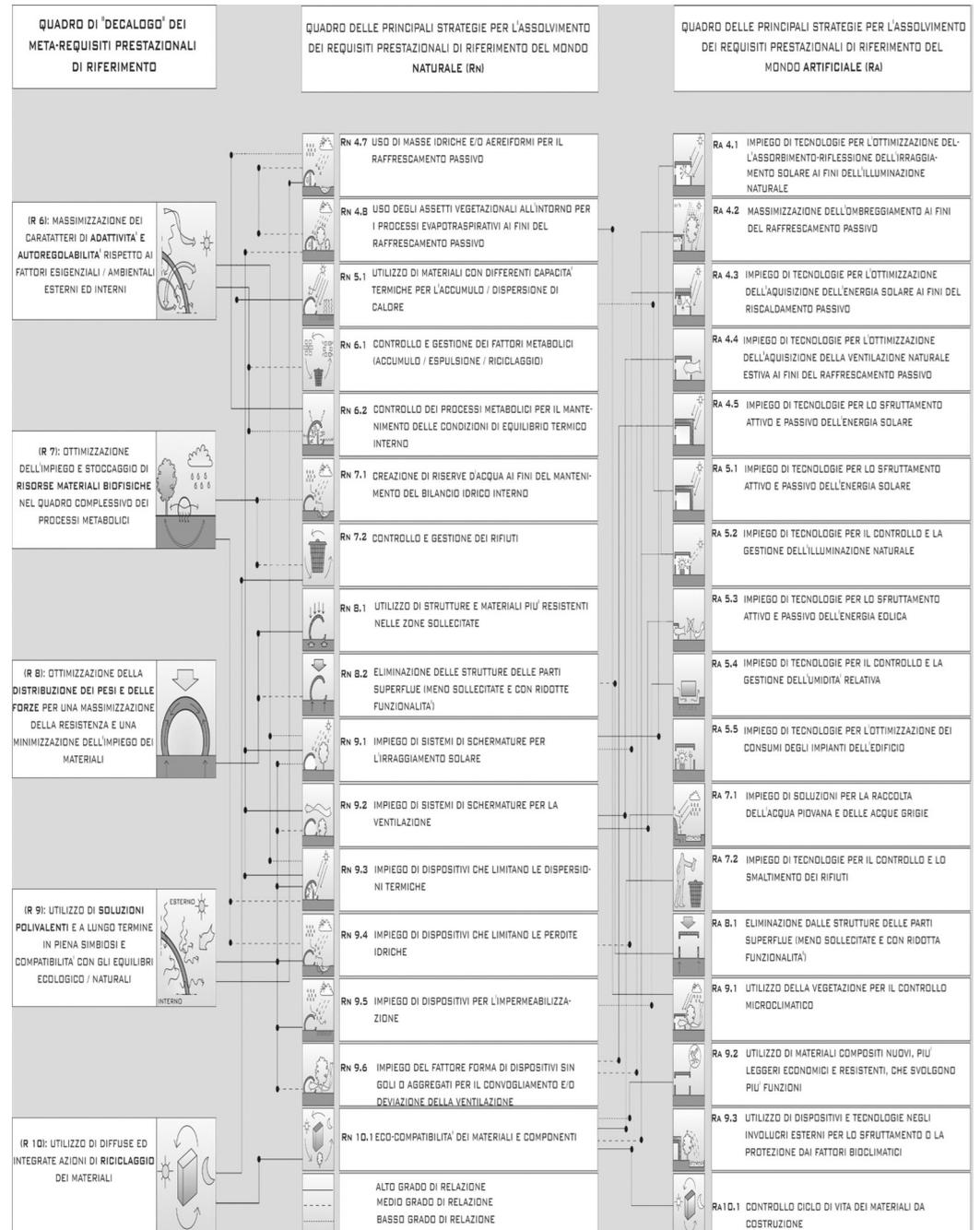


Fig. 3b - Decalogo dei meta-requisiti prestazionali e delle relative strategie di attuazione in natura, di esempio biomimetico per il mondo artificiale.

Conclusions - Perhaps the architectural envelope of the future will manage to be a highly dynamic system, with technological, configurational, and performance features that may be varied with the changes in the exterior microclimate conditions, and in the characteristics, functions, needs, and the very culture of those using the spaces that it confines - just as plant membranes, animal hides, and the human epidermis do in their (for now insuperable) action of selection, filtering, and mediation exercised constantly between exterior environmental conditions and the internal metabolic needs of the organisms enveloped by them.

The paradigmatic scope offered from the behavioural/performance standpoint by the study of the biomimetic configuration of natural architectures is in fact throwing open the gates to the scientific disciplines of environmental technological design, for research and experi-

mentation which, after the first three years of research done with the awareness of this scope, have before them a path - still long but now embarked upon - to make them more widely and effectively applicable.

#### NOTES

1) Per un maggior approfondimento di questa tematica si faccia riferimento ai numerosi scritti di Juhani Pallasmaa, e in particolare ai testi: Pallasmaa, J. (2000), "L'architettura dei sensi e della pelle", in Battisti, A., Tucci, F., *Ambiente e Cultura dell'Abitare*, Editrice Librerie Dedalo, Roma; Pallasmaa, J. (1996), *The eyes of the sky*, Academy Editions, Londra; Pallasmaa, J. (1995), *Animal Architecture*, Museum of Finnish Architecture.

2) Tra i vari contributi dell'autore in merito, si vedano: Tucci, F. (1999), *Architettura come 'Terzo Ambiente'*.

*Configurazioni sostenibili della forma urbana nell'interazione tra innovazione tecnologica ed ecoefficienza dei processi insediativi*, Tesi di Dottorato in Progettazione Ambientale, X ciclo, Tutor Prof. Salvatore Dierna, Sapienza Università di Roma.

3) L'architettura 'spontanea' tradizionale si è spesso sviluppata in modo simile ai processi in natura, nel trovare soluzioni tecniche, tecnologiche, formali e prestazionali attraverso progressivi cambiamenti e adattamenti: i popoli primitivi hanno sviluppato con l'esperienza modi di costruire molto raffinati. A titolo esemplificativo possiamo citare, tra tutti, l'igloo in quanto architettura umana tradizionale che impiega il principio della conservazione del calore tramite una forma geometrica caratterizzata da una più piccola superficie d'involucro con il massimo volume, insieme ovviamente alla nota proprietà della neve e del ghiaccio di condurre male il calore. Esso è costruito in modo tale che l'entrata si trovi in basso, mentre lo spazio abitabile sia collocato a un livello superiore, laddove si raccoglie meglio l'aria calda. In Islanda, invece, le case ricoperte di grasso sfruttano sia il vantaggio dello sprofondamento nel terreno, sia la protezione isolante ottenuta per mezzo di strati di terra coperti d'erba che circondano fittamente le cavità aeree. nell'architettura tradizionale araba, infine, troviamo edifici alti e intimamente connessi uno nell'altro in modo da ridurre l'incidenza della luce e creare ombre che inducano la formazione di aria fresca e ne favoriscano la circolazione.

4) Nel caso di un termitaio, al sorgere del sole l'estesa superficie dell'edificio viene fortemente irradiata dai raggi solari, il che si rivela particolarmente vantaggioso in una situazione climatica desertica in cui le notti di regola sono molto fredde, anche d'estate. A mezzogiorno, quando il sole è molto caldo poiché i suoi raggi sono meno inclinati rispetto allo zenit, la posizione verticale dei termitai permette loro di subire in misura inferiore l'incidenza della radiazione, poiché fisicamente la costruzione viene colpita su di una superficie sensibilmente più piccola rispetto agli altri momenti della giornata. E infine, al pomeriggio, con il lato occidentale dell'edificio irradiato appieno e a lungo dal sole e caratterizzato non a caso da una maggiore massività, viene operato l'accumulo termico necessario per la lenta restituzione del calore durante la fredda notte.

5) Si invita il lettore a operare un confronto con quanto sviluppato approfonditamente sul tema da Werner Nachtigall, con particolare riferimento ai due testi, che segnano un'evoluzione di quindici anni di studi: Nachtigall, W., Blüchel, K.G. (2000), Nachtigall, W., Wisser, A. (2015), citati tra le *references*.

6) Tra le prime ad aver svolto ricerche approfondite in questo senso è stato Mike Davis, di cui possiamo ricordare un primo rivoluzionario articolo, *A wall for all seasons*, risultato di una ricerca da lui svolta per conto della Pilkington Brothers Ltd., pubblicato nel prestigioso *RIBA Journal*, vol.88, n.2, febbraio 1981. Vent'anni dopo gli ha fatto seguito, tra le tante sul tema ormai in sviluppo, la pubblicazione di Andrea Compagno in cui tra l'altro viene operata un'interessante disamina sulle potenzialità offerte dalla nuova frontiera dell'assimilazione della facciata architettonica alla pelle di un camaleonte: «La parete polivalente è come la pelle di un camaleonte, capace di adattarsi per garantire le migliori condizioni possibili negli ambienti costruiti» (Compagno, A., *Intelligent glass Facade. Material, Practice, Design*, Birkhauser, Basilea, 2002).

7) Molto interessante è lo sviluppo che del tema ha fatto Renato Bruni nel suo *Erba Volant. Imparare dalle piante*, Codice Edizioni, 2015, di cui il lettore è invitato a fare ampia consultazione per la ricchezza di spunti che la Biomimetica può offrire nell'indicare all'uomo innovazioni prestazionalmente efficaci e sostenibili.

8) Pensiamo alle potenzialità che già si stanno sperimentando sulla produzione di blocchi per pareti di chiusure esterne opache, composti di materiale isolante compattato a prestazione variabile, che eliminerebbero dimensionalmente - e quindi anche spazialmente - almeno uno strato nello spessore complessivo dell'involucro, e che stanno arrivando a prefigurare la possi-

bilità di ospitare in sé in modo integrato getti di calcestruzzo armato alleggerito ecologico per la eliminazione di buona parte delle tradizionali strutture di cemento armato che come noto pongono sempre la questione della risoluzione dei ponti termici.

9) Vi è inoltre il potenziale campo di sperimentazione, questo sì tutto da sviluppare, della massima integrabilità tra componenti stratigrafici propri della tipologia degli involucri opachi con componenti innovativi appartenenti alla ricerca sulla prestazionalità avanzata degli involucri trasparenti, semitrasparenti e traslucidi; ciò potrebbe aprire le porte a un'eccezionale categoria d'involucri che conserverebbe le proprietà necessarie ai nostri climi di relativa massività e opacità, ma al contempo offrirebbe all'edificio i servizi delle più raffinate tecnologie per la captazione passiva e attiva dell'irraggiamento solare (o per la protezione da esso) e per la sua trasformazione in energia termica ed elettrica.

#### REFERENCES

- Baumeister, D. (2014), *Biomimicry Resource Handbook: a Seed Bank of Best Practices*, Create Space Independent Publishing Platform.
- Beynus, J. (2002), *Biomimicry: Innovation inspired by Nature*, Harper Collins, New York.
- Bonser, R. (2006), "Patented Biologically-Inspired Technological Innovations: a Twenty Year View", in *Journal of Bionic Engineering*, n. 3, pp. 39-41.
- Bruni, R. (2015), *Erba Volant. Imparare dalle piante*, Codice Edizioni.
- Malik, F., Clement, R.M. et al. (2014), "Nature's Moisture Harvesters: a comparative review", in *Bioinspiration & Biomimetics*, n. 9.
- Fratzl, P. (2007), "Biomimetic Materials Research: what can we really learn from Nature's structural materials?", in *Journal of the Royal Society Interface*, n. 4, pp. 637-642.
- Grätzel, M., (2003), "Dye-Sensitized Solar Cells", in *Photochemistry Reviews*, n. 4, pp. 145-153.
- Herzog, T. (2005), *Architecture+Technology*, Prestel Verlag, Munich, London, New York.
- Hug, H., Bader, M. (2014), "Biophotovoltaics: Natural Pigments in Dye-Sensitized Solar Cells", in *Applied Energy*, n. 115, pp. 216-225.
- Lakhtakia, A., Martin-Palma, R. (2013), *Engineered Biomimicry*, Elsevier, Amsterdam.
- Milwich, M., Speck, T. et al. (2006), "Biomimetics and Technical Textiles: solving engineering problems with the help of Nature's Wisdom", in *American Journal of Botany*, n. 93, pp.1455-1465.
- Koch, K., Barthlott, W. (2009), "Superhydrophobic and Superhydrophilic Plant Surfaces: an inspiration for Biomimetic Materials", in *Philosophical Transactions of the Royal Society of London A: Mathematical Physical and Engineering Sciences*, n. 367, pp. 1487-1509.
- Nachtigall, W., Blüchel, K.G. (2000), *Das grosse Buch der Bionik. Neue Technologien nach dem Vorbild der Natur*, Deutsche Verlags-Ansalt, Stuttgart-München.
- Nachtigall, W., Wisser, A. (2015), *Bionics by Examples*, Springer Verlag, New York.
- Omedes, A., Piqué, J. (2004), *Els altres arquitectes | Los otros arquitectos | The other architects*, Editorial Gustavo Gili, SA, Barcellona.
- Pallasmaa, J. (1995), *Animal Architecture*, Museum of Finnish Architecture.
- Pallasmaa, J. (1996), *The eyes of the skyn*, Academy Editions, Londra.
- Tucci, F. (2008), *Tecnologia e Natura. Gli insegnamenti del mondo naturale per il progetto dell'architettura bioclimatica*, Alinea Editrice, Firenze.
- Tucci, F. (2012), *Atlante dei sistemi tecnologici per l'architettura bioclimatica. Ventilazione naturale negli edifici | Atlas of technological systems for bioclimatic architecture. Natural Building Ventilation*, Alinea, Firenze.
- Tucci, F. (2014), "Fotovoltaico organico. La terza generazione punta dell'innovazione tecnologica: integrazione e rinnovabilità del solare in architettura", in *Modulo*, vol. 392, pp. 513-518.



Fig. 4 - L'uccello Ploceus Cucullatus, durante la realizzazione dell'involucro della sua casa.

\* FABRIZIO TUCCI, architetto, è Professore Associato in Progettazione Tecnologica dell'Architettura, Coordinatore del Dottorato di Pianificazione, Design e Tecnologia dell'Architettura, Facoltà di Architettura, Dipartimento PDTA, Sapienza Università di Roma. Tel. +39 (0)6/70.47.46.25. E-mail: fabrizio.tucci@uniroma1.it.