

Reviews Article

architecture

**COSTRUIRE CON L'ACQUA: NUOVI PARADIGMI
DELL'ARCHITETTURA SOSTENIBILE**
**BUILDING WITH WATER: NEW STANDARDS
OF SUSTAINABLE ARCHITECTURE**

Cesare Sposito*

ABSTRACT - All'interno di una prassi architettonica sempre più consolidata che mira alla sostenibilità ambientale e all'autosufficienza energetica, l'articolo riporta ricerche e sperimentazioni condotte in ambito internazionale sul tema acqua-architettura, evidenziando come, partendo dall'ottima capacità del fluido di termoregolare gli ambienti confinati, si possa arrivare a considerare l'acqua anche un materiale componente dell'architettura.

Within an increasingly consolidated architectural practice aiming at environmental sustainability and energy self-sufficiency, the article reports international research and experiments carried out on water-architecture. Furthermore, it highlights how, starting from the excellent capacity of the fluid to heat and cool its surrounding space, we can think to water as a material component of architecture.

KEYWORDS: Acqua, architettura, innovazione, struttura adattiva, componenti multifunzionali.

Water, architecture, innovation, trans-structure, multifunctional elements.

Tra i materiali che la natura ci offre, l'acqua da sempre è strettamente correlata all'uomo, guidandone le scelte nei processi insediativi e produttivi, le attività di modifica del paesaggio e dell'ambiente, in un rapporto, sin dalle origini, mirato a governare problemi di sussistenza e di regolazione, attraverso una continua rimodellazione del confine acqua / terra. Indispensabile per le diverse forme di vita, l'acqua ha assunto svariati significati simbolici, stimolando le diverse espressioni artistiche, da quella letteraria a quella pittorica, da quella scultorea a quella architettonica. Il rapporto tra l'acqua e l'architettura si è da sempre caratterizzato con molte forme, funzioni, sistemi, talvolta con fallimenti e altre volte con successi; per non andare lontano nel tempo basterà ricordare i grandi maestri del secolo scorso che nella loro ricerca operativa sulle unità residenziali hanno impiegato l'acqua talvolta con valore simbolico altre volte come strumento per una maggiore integrazione con il paesaggio (Rowe et al., 1997; Weston, 2004; Williamson D.A., 2013).

Ad esempio: Frank Lloyd Wright, rompendo schemi, geometrie e volumi tradizionali, integra nella *Fallingwater* (1935-37) l'architettura con il paesaggio, rendendo l'acqua parte integrante della costruzione (Fig. 1); nella *Casa Kaufmann* (1946), Richard Neutra utilizza la piscina per mediare l'impatto con l'arido paesaggio (Fig. 2); Mies Van der Rohe realizza la *Farnsworth House* (1951) su di un piano rialzato per risolvere il problema degli allagamenti continui del terreno (Fig. 3); Oscar Niemeyer nella *Casa de Canoas* (1953) a Rio de Janeiro, propone curve libere e forme sinuose attraverso una perfetta combinazione di vetro, cemento, vegetazione, roccia e acqua (Fig. 4).

Anche gli artisti sono attratti dalla possibilità di utilizzare l'acqua nelle proprie opere: esempi sono le recenti macro-installazioni di Olafur Eliasson, il *Waterfall* (2008) a New York, cascata artificiale lungo l'East Side e il Ponte di Brooklyn, costituita da un'impalcatura di acciaio da cui viene giù l'acqua (Fig. 5), e di Christo e Jeanne-Claude, le *Floating Piers* (2016), realizzate con passerelle di polietilene sulla sponda bresciana del Lago d'Iseo, che consentivano ai visitatori di camminare appena sopra la superficie dell'acqua (Fig. 6). Tutti esempi molto noti. Ma negli ultimi vent'anni nuove ricerche operative e sperimentazioni hanno determinato interessi e sviluppi di cui si vuole qui rendicontare per poi concludere con alcune considerazioni sul ruolo che l'acqua può assumere, in un prossimo futuro, nell'architettura.

Prime sperimentazioni sull'integrazione tra acqua e architettura - Già negli anni '80 le Archistar iniziano a percorrere una nuova strada, quella che conduce alla smaterializzazione dell'architettura, attraverso l'uso di volumi trasparenti in vetro. La teorizzata *blurring architecture* (architettura dai limiti diffusi) di Toyo Ito, con il supporto della tecnologia e un'approfondita ricerca sui materiali, produce architetture libere dalla propria materialità e riconducibili a quella 'fragilità' che solitamente caratterizza le installazioni temporanee (Figg. 7-9): per Ito, la rappresentazione di uno spazio fluido è la riduzione estrema della sua struttura secondo il motto *less is more* di Mies Van Der Rohe. La ricercata evanescenza della materia trova poi nuove 'forme espressive' attraverso l'uso del materiale più naturale e antico che esista, l'acqua. Seppur oggetto di attenzione e sperimentazione per



Fig. 1 - Frank Lloyd Wright, Casa Kaufmann, nota come Fallingwater, in Pennsylvania (1935-37).



Fig. 2 - Richard Neutra, Casa Kaufmann a Palm Springs, in California (1946).



Fig. 3 - Mies Van der Rohe, Casa Farnsworth a Plano in Texas (1951).



Fig. 4 - Oscar Niemeyer, Casa de Canoas a Rio de Janeiro (1953).

le sue valenze ambientali, l'acqua in quegli anni è ancora scarsamente integrata al progetto architettonico vero e proprio e la funzione di 'materiale costruttivo' è più percepita che reale. In tal senso, le poche applicazioni sono da ricondurre a un filone di ricerca fisico-tecnica il quale, con l'ausilio di innovativi sistemi idraulici e informatici, crea delle quinte con un valore simbolico, narrativo o scenografico, affrontando contestualmente questioni ambientali e microclimatiche. Schiaffonati rileva come negli ultimi anni l'acqua tenda a svolgere «il ruolo di paradigma rappresentativo di nuove forme e modalità d'intervento sul costruito» e come su di essa si punti per caratterizzare il progetto architettonico, ambientale e paesaggistico (Schiaffonati, Mussinelli, 2008), nei suoi tre stati gassoso, liquido e solido (Ruban, 2014). Di seguito tre interventi particolarmente significativi.

Il primo, definito dai progettisti come 'un'architettura dell'atmosfera', che conforma uno 'spazio in bassa definizione', è il *Blur Building*: un padiglione temporaneo realizzato nel 2002 sul Lago di Neuchâtel in Svizzera su progetto dello Studio Diller Scofidio + Renfro in occasione della National Exhibition. La struttura in acciaio è avvolta da una nuvola artificiale realizzata con acqua nebulizzata, prelevata direttamente dal lago, ottenuta tramite un complesso sistema idraulico di pompe, filtri e ugelli gestiti da un sistema informatico e di sensori, che ne calibra la pressione in base a parametri atmosferici, rilevati in tempo reale, quali direzione e velocità del vento, pressione atmosferica, umidità e temperatura dell'aria (Fig. 10). L'obiettivo dei progettisti, pienamente raggiunto, è stato quello di generare una surreale esperienza dapprima visiva, a distanza, poi sensoriale, all'interno, rendendo la percezione degli utenti indistinta e sfocata, *blur* appunto. Le tecnologie impiegate non sono strettamente funzionali al manufatto, ma servono alla realizzazione di un



Fig. 5 - Olafur Eliasson, il Waterfall lungo l'East Side e il Ponte di Brooklyn, New York (2008).

sistema interattivo in cui gli impermeabili dotati di sensori, una volta bagnati, si colorano ed emettono suoni (Gasperini, 2012).

Il secondo intervento è il *Digital Water Pavilion*, realizzato in occasione dell'Expo 2008 a Saragozza e frutto della collaborazione tra Carlo Ratti e il MIT; esso ci offre una nuova lettura del *curtain wall*, questa volta fluido e dinamico, generatore di spazi flessibili e modulatore di luce, capace di interagire con i suoi fruitori e con il microclima. Su di un'area di 400 m², si giustappongono i due modesti volumi (*Info Point e Café*), inglobati in un'unica copertura mobile, una sottile lastra ripiena d'acqua, con vuoti di differenti dimensioni, due dei quali coincidono con i volumi di servizio (Fig. 11). Dodici pistoni idraulici muovono il piano orizzontale annullando lo spazio interno quando il livello della copertura coincide con quello del terreno. Il padiglione estremizza il rapporto tra spazio e struttura, tra pieni e vuoti, tra interno ed esterno; le chiusure verticali si dissolvono in diaframmi d'acqua, grazie a getti ad alta frequenza controllati digitalmente, consentendo sempre diverse conformazioni spaziali. Versione contemporanea delle architetture futuriste, questo padiglione si caratterizza per la sua capacità di comunicare: il controllo digitale dei getti d'acqua, all'intradosso della copertura, permette di creare disegni, *texture* e scritte nei paramenti d'acqua, veri e propri vuoti a tempo che trasformano continuamente l'opera. Esperienza simile è offerta dal 'Centro di Educazione Ambientale' *Hydropolis* di Breslavia, progetto del 2015 a firma di *ART FM Architecture Studio 5* (Fig. 12); anche in questo caso l'utilizzo dell'acqua è relegato a semplice cortina d'acqua digitale, giustapposta a un involucro rivestito con lastre di rame forate e



Fig. 6 - Christo e Jeanne-Claude, le Floating Piers sulla sponda bresciana del Lago d'Iseo (2016).

illuminata con *led* multicolori (Mattei, 2012).

Infine il terzo intervento: a differenza dei precedenti esempi, in cui l'acqua è impiegata negli stati gassoso e liquido come strumento mediatico ed espedito scenografico, negli *ICE Hotel* l'acqua allo stato solido è materiale strutturale, sebbene effimero, e quanto mai legato al tempo meteorologico e al luogo. Ogni anno, prevalentemente nel circolo polare artico, gli hotel prendono corpo attraverso l'impiego di enormi centine in acciaio, che vengono rimosse ogni due giorni non appena le volte di neve divengono autoportanti, relegando alle colonne di ghiaccio centrali la sola funzione di supporto alla copertura (Fig. 13).

Il Water Drum Wall - È un particolare sistema, sperimentato dagli anni Quaranta fino ai primi del nostro secolo, che si basa su alcuni principi. Una parte importante dell'energia primaria totale consumata dagli edifici viene utilizzata per il riscaldamento, il raffrescamento e la ventilazione, che hanno un peso tutt'altro che trascurabile sui costi gestionali, sui fabbisogni energetici e sulle emissioni di anidride carbonica. Il suo elevato potere di massa termica consente all'acqua di essere impiegata nei sistemi solari passivi, prevalentemente in climi con apprezzabili escursioni termiche tra il giorno e la notte. Il *drum wall* si pone in alternativa alle chiusure in pietra, mattoni o cemento, secondo il funzionamento offerto da un qualunque 'muro di Trombe', o in copertura con il *roof radiation trap*, largamente teorizzato e sperimentato da Baruch Givoni negli anni '70 (Haggard et al., 2000).

Il funzionamento del *Water Drum Wall* è alquanto elementare: i raggi del sole, che attraversano la superficie vetrata, sono intercettati da una massa di accumulo di acqua o di altro liquido che li converte in calore, distribuito per convezione attraverso l'intercapedine ventilata oltre che per convezione e radiazione attraverso la sua faccia



Fig. 7 - Jean Nouvel, Fondation Cartier pour l'art contemporain, Parigi (1994).



Fig. 8 - Toyo Ito & Associates, Mediateca a Sendai, Giappone (1995-2000).



Fig. 9 - Bernard Tschumi Architects, Glass House a Groningen, Olanda (1990).



Figg. 10, 11 - Diller Scofidio + Renfro, Blur Building, Lago di Neuchâtel, Svizzera (2002); Carlo Ratti e MIT, Digital Water Pavilion, Saragozza, Expo 2008 (©Max Tomasinelli).

interna, al locale servito; il rapporto tra la superficie di scambio termico con l'ambiente interno e la massa di accumulo determina anche in questo caso l'entità del trasferimento termico e il ritardo con cui esso avviene. Il trasferimento di calore per via convettiva attraverso la massa di liquido è più rapido che per conduzione entro una muratura; così, a differenza di quanto avviene nella 'parete di Trombe', il trasferimento di calore all'ambiente interno per irraggiamento e convezione dalla faccia interna della parete è quasi istantaneo (Simmons, 2011). Pertanto, al fine di controllare i moti convettivi, sono necessari dei controlli che ritardino il trasferimento termico: sul lato interno della parete d'acqua è necessario prevedere uno schermo isolante con aperture in testa e al piede del paramento, mentre sul lato opposto una schermatura mobile che impedisca il surriscaldamento o, all'occorrenza, le dispersioni termiche verso l'esterno (Emmitt, 2012).

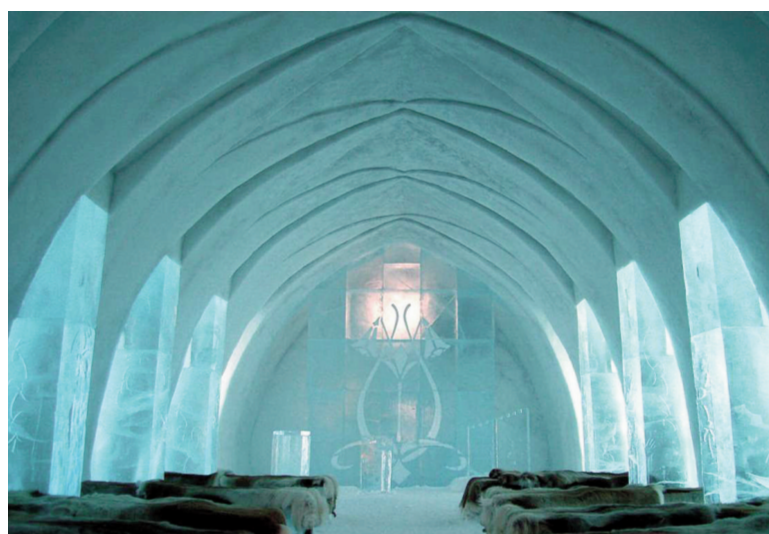
Lungi dal costituire una nuova tecnologia, il *water drum wall* è stato sperimentato per la prima volta alla fine degli anni '40 da Hoyt Hottel e dagli studenti del *Massachusetts Institute of Technology* di Boston. Nonostante le buone prestazioni riscontrate e il costo contenuto, il settore delle costruzioni si è però rivolto a sistemi solari passivi più onerosi e spesso meno performanti. Negli anni '70 alcuni progettisti hanno rinnovato l'interesse per

questa tecnologia: Steve Baer nella propria abitazione a Corrales, in New Mexico, ha utilizzato 208 litri d'acqua in fusti per fornire massa termica con un innovativo progetto solare passivo (Fig. 14); stesso sistema, ma con la variante della parete d'acqua interrata, è stato impiegato da John Hammond nella sua fattoria in un nuovo edificio per uffici a Winters e da Marshall Hunt con Virginia Thigpen a Davis, entrambi in California; tutti e due i sistemi passivi oggi sono perfettamente funzionanti dopo oltre 30 anni. Anche una coppia di costruttori illuminati, Mike e Judy Corbett, ha investito nella nuova tecnologia e realizzato, su progetto di John Hofacre, 220 unità residenziali con grandi muri d'acqua all'interno del *Village Homes* a Davis (Bainbridge, 2007; Corbett J. and M., 2000).

A partire da queste pionieristiche iniziative, altri operatori hanno fornito un importante contributo, nel corso degli anni, alla ricerca e alla sperimentazione delle 'pareti d'acqua' (Bainbridge, 1981, 2005); tra questi: Tod Neubauer, ingegnere agricolo, ha affrontato gli aspetti legati alla sicurezza sismica; Denny Long, per conto della *Passive Solar Development* ha progettato e costruito diverse tipologie di serbatoi in acciaio; Wayne e Susan Nicols, dopo aver studiato i serbatoi di cemento, ha contribuito allo sviluppo del sistema *Heat Wall™* che impiega contenitori di vinile con un telaio di alluminio e acciaio inossidabile; Tim Maloney, di

One Design, ha testato i sistemi modulari con contenitori di plastica e pannelli di lamiera; la *Solar Applications e Research Group* di Vancouver, in California, e il *Water Wall Engineering Group*, in Ohio, hanno lavorato su sottili tubi di acciaio con rivestimenti in plastica; un gruppo di ingegneri della *Kalwall Corporation* (ora *Solar Components*), parallelamente ad altri tecnici dell'*Ames Laboratory*, ha brevettato particolari cilindri e pannelli traslucidi in fibra di vetro (Fig. 15).

Recenti ricerche sulle pareti d'acqua - In questi ultimi tre lustri, all'interno di una prassi architettonica sempre più indirizzata verso la sostenibilità ambientale e l'autosufficienza energetica, si riscopre l'acqua per le sue capacità di termoregolare il microclima in ambienti confinati (Saadian et al., 2012). In tal senso sono da leggersi le ricerche e sperimentazioni avviate da numerosi operatori che meritano di essere menzionate: sull'ottimizzazione di modelli computerizzati per valutare le qualità dell'acqua come accumulatore di energia (Gupta, Tiwari, 2002) e sullo sviluppo di metodologie di calcolo per valutarne le prestazioni energetiche in relazione alla ISO 13790:2008(E) (Briga-Sáa et al., 2014); sulla sperimentazione, finalizzata a ottimizzare lo spessore delle pareti d'acqua per consentire all'ambiente confinato, in regime invernale, di aumentare la temperatura a



Figg. 12, 13 - ART FM Architecture Studio 5, Centro di Educazione Ambientale Hydropolis, Breslavia (2015); Ice Hotel, Jukkasjärvi, Svezia (2007).

una velocità maggiore, di raggiungere temperature complessive più elevate e di mantenere alte temperature per un periodo di tempo più lungo (Adams et al., 2010); sulle prestazioni energetiche complessive dei manufatti che impiegano pareti d'acqua, con miglioramenti riscontrati, in regime estivo e invernale, tra il 25 e l'88% (Moustafa, Aripin, 2014; Wang et al., 2012; Yang et al., 2011); sui materiali innovativi come le ceramiche porose (Melero et al., 2011), capaci di assorbire significative quantità d'acqua nebulizzata da ugelli, opportunamente collocati all'intradosso dell'apertura, e rilasciarla sotto forma di vapore per raffrescare l'ambiente confinato (Fig. 16); sullo studio di tipologie di ombreggiamento, come le veneziane in diverse colorazioni, e di controlli per la ventilazione naturale e forzata (Zhongting et al., 2015).

E infine: sullo sviluppo concettuale di facciate dinamiche a dimorfismo stagionale, denominate *Transparent Water Storage Envelope* (TWSE), per una migliore stabilità termica in estate e un più efficace isolamento termico in inverno, con dettagli tecnici utili ad agevolare le necessarie attività di manutenzione dell'involucro (Liu, Shen, 2007, 2008). È da citare anche la *review* di un gruppo di ricercatori cinesi sull'applicazione della 'parete di Trombe' nelle costruzioni, che pone l'accento su fondamentali parametri progettuali quali: il parametro 'Trombe wall' (prestazioni delle vetrate, della superficie e dei dispositivi di ombreggiatura, profondità dell'intercapedine, spessore e la stratificazione della chiusura interna, sistemi di ventilazione naturale e/o forzata); il parametro 'edificio' (inerzia termica e livello di isolamento complessivo del manufatto, presenza di altre superfici vetrate); infine il parametro 'sito' (radiazione solare, orientamento, velocità e direzione dei venti), tutti indicatori riassunti in chiave di energia, sostenibilità ambientale e costo (Zhongting et al., 2017).

Un nuovo modello concettuale - Le sperimentazioni fin qui illustrate sull'integrazione tra acqua e architettura, così come le citate ricerche di natura fisico-tecnica, inducono a immaginare che in un prossimo futuro si possa impiegare l'acqua come materiale costruttivo vero e proprio. Il 'costruire con l'acqua' potrà rappresentare una nuova frontiera per l'architettura sostenibile, sempre che essa si fondi su di un nuovo modello energetico, capace di valorizzare le



Fig. 14 - Steve Baer, abitazione con il Water Drum Wall, Corrales, New Mexico (1972).

caratteristiche di massa termica e di vettore energetico del fluido naturale a impatto zero. La nuova architettura dovrà essere pensata come un organismo vivente indipendente dalle reti di distribuzione dell'energia, del tipo 'adattivo', energeticamente autonomo, realizzato con materiali capaci di assolvere più funzioni e di fornire risposte in tempo reale per il mantenimento del comfort interno.

I due approcci della pratica architettonica sostenibile, il *Passivhaus* (Fig. 17) e l'*Active House* (Fig. 18), non affrontano il tema cruciale dell'*embodied energy*, ovvero della quantità di energia primaria totale consumata nel corso del ciclo di vita del materiale, che comprende l'energia necessaria per l'estrazione delle materie prime, quella per la lavorazione e il trasporto, nonché l'energia periodica per la manutenzione e quella finale per lo smaltimento (Cabeza et al., 2013; Hammond, Jones, 2008). Anche, i modelli di valutazione del livello di sostenibilità energetica e ambientale degli edifici (LEED, BREAM, CASACLIMA, ITACA, DGNB, HQE, CASBEE, ecc.), benché siano valide ed efficaci guide per la progettazione, trascurano il parametro dell'energia 'grigia', non consentendo il raffronto oggettivo tra progetti diversi; nessuna differenza è evidenziata, ad esempio, tra un manufatto che impiega tecnologie tradizionali e un altro che presenta una cortina realizzata con profilati tagliati al *laser* altamente energivori. Per poter effettuare un raffronto oggettivo potrebbe essere utile ricondurre tutte le variabili del progetto (reperibilità e rinnovabilità della materia prima, lavorazione e trasporto di materiali e componenti edilizi, riscaldamento e raffresca-

mento, ventilazione, consumo, smaltimento, riciclo, ecc.), collegate e interconnesse le une alle altre, a un'unica unità di misura, quella appunto dell'energia rapportata all'unità di superficie calpestabile, esprimibile in MJ/m².

L'*adattabilità* del sistema sarà un altro importante requisito per il raggiungimento dell'obiettivo. Una 'struttura adattiva' è definibile come una struttura che, soggetta a un'azione esterna come un campo di forze o ad uno stimolo ambientale, ha la capacità di modificare la propria composizione, forma o funzione per rispondere alle sollecitazioni, mantenendo la stabilità in termini strutturali e/o energetici e adattandosi ai cambiamenti in modo reversibile (Schnädelbach, 2010). Nel caso di un edificio, i fattori che entrano in gioco sono numerosi; a volte, le sollecitazioni agiscono rapidamente e localmente, altre volte intervengono con tempi più lenti e interessano l'intera costruzione. In entrambi i casi, la 'struttura adattiva' funziona più efficacemente se il sistema reagisce rapidamente anche al più piccolo cambiamento ambientale, poiché nel caso del comfort termico, anche un cambiamento di 2 o 3 °C può fare la differenza. Oltre alla velocità di risposta, è necessario predeterminare le azioni da intraprendere: ad esempio, un aumento della temperatura interna può essere controbilanciato con il raffreddamento, con una massa termica maggiore, o con costosi e complessi sistemi meccanizzati di oscuramento (Figg. 19, 20). Figli della rivoluzione elettronica e informatica gli *smart materials* sono la più recente espressione di questa intelligenza artificiale; seppur per certi aspetti presentino analogie con i sistemi biologici e con gli organismi naturali, e favoriscano un buon risparmio energetico e un miglior comfort termico, la maggior parte degli *smart materials* si caratterizza per un'*embodied energy* molto elevata (Casini, 2016).

In generale poi, le costruzioni, tanto quelle tradizionali quanto quelle più recenti improntate ai principi della bioarchitettura, sono realizzate con elementi costruttivi prevalentemente monofunzionali: ogni compito e/o necessità (funzione) è assolta da un nuovo elemento assemblato nell'insieme. Paradossalmente, per il raggiungimento dei requisiti di 'sostenibilità' e di 'efficienza energetica', la prassi ha portato ad architetture contemporanee con elevato numero di



Fig. 15 - I tubi di stoccaggio termico SUN-LITE® della Solar Components Corporation.

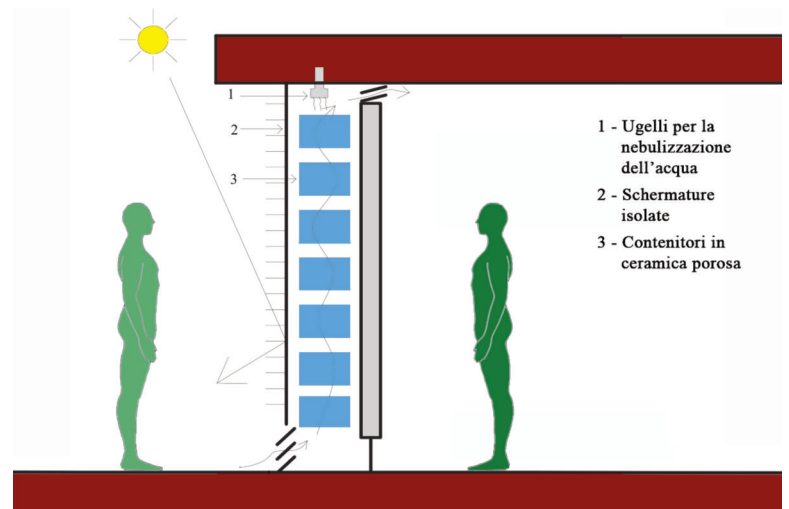


Fig. 16 - Il Water Drum Wall con contenitori in ceramica porosa (Melero et al., 2011).



Figg. 17, 18 - *Multipod Studio*, *PopUp House*, *Passivehaus* (2013); *Planho Architects e Onyx Solar*, *Genyo Building - Building Integrated Photovoltaics (BIPV)*, Granada (2008).

elementi costruttivi, aumentando di conseguenza esponenzialmente la *embodied energy* del manufatto. Una 'struttura adattiva' prevede al contrario l'impiego di pochi 'materiali multifunzionali' capaci di produrre reazioni rapide, che interessano la totalità del fabbricato; ad esempio, un muro d'acqua non dovrà essere solo una barriera o un sostegno, ma all'occorrenza dovrà poter diventare un collettore solare, un termosifone o un condizionatore. Secondo questa prospettiva, i tradizionali principi impiegati nella progettazione, quali scelta dell'orientamento e rapporto tra superfici opache e trasparenti, diventeranno obsoleti, potendo indifferentemente e liberamente realizzare involucri vetrati con esposizione a nord e a sud, equivalenti in termini energetici e di comfort termico.

L'acqua come materiale per costruire - In questa ottica, e come avanzamento, si collocano le ricerche e le sperimentazioni di Matyas Gutai, condotte rispettivamente presso il Dipartimento di Architettura dell'Università di Tokyo e il Laboratorio di Fisica Termica della Università di Tecnologia di Budapest: i risultati sono testimoniati dal brevetto del pannello *Allwater* e nella realizzazione del prototipo *Water House* (Gutai, 2013; Figg. 21-24). Il modello messo a punto prevede un involucro realizzato con un componente multifunzionale, che funge da chiusura ma anche da elemento strutturale, da termoregolatore, da isolante, da vettore per la distribuzione dell'energia, grazie alla massa termica fornita dall'acqua. I pannelli sono costituiti da telai del tipo coibentato e strutturale (SIP), e da vetri con intercapedine contenente l'acqua, che fornisce massa e peso strutturali. L'isolamento del telaio, reso necessario dalle stringenti normative europee, è stato applicato in misura minima per proteggere lo strato d'acqua dal congelamento o nel caso di guasto del sistema di riscaldamento. I dati sperimentali mostrano risultati più che apprezzabili, poiché, durante l'anno solare, con temperature esterne comprese tra -15 e +35 °C, la superficie interna della chiusura mantiene una temperatura oscillante tra i +20 e +26 °C, azzerando il fabbisogno di energia esterna per il benessere termico (Gutai, 2015; Fig. 25). Quando si raggiunge per convezione la temperatura ottimale interna, l'energia in eccesso, per essere

all'occorrenza stoccata, viene trasferita (attraverso un circuito bidirezionale riservato al fluido, caldo o freddo, che scorre dentro i pannelli di chiusura, dei pavimenti e dei soffitti) in un serbatoio esterno e interrato, (Figg. 26, 27). Il solo fabbisogno energetico per la termoregolazione degli ambienti confinati è dato dall'energia necessaria alla movimentazione dell'acqua nel circuito.

Di equivalente matrice è la *Water-branch House* di Kengo Kuma, architetto e designer giapponese, che nella propria ricerca si è spesso ritrovato a indagare su architetture minimali, basate sull'utilizzo di strutture semplici e facilmente assemblabili, che permettessero di costruire con rapidità un efficace riparo in caso di emergenza (Fig. 28). La *Water-branch House*, parzialmente esposta al MoMA di New York nel 2008 in occasione della mostra *Home Delivery Fabricating the Modern Dwelling*, si basa sull'utilizzo di contenitori di plastica leggeri, entro cui può scorrere un fluido che permetta di termoregolare la temperatura dello spazio interno. Il componente, una sorta di mattone costituito dall'unione di cinque cubetti della dimensione di 100x100 mm, è assemblabile per incastro: grazie alla particolare geometria dell'elemento modulare è possibile comporlo per realizzare pavimenti, chiusure e coperture (Figg. 29, 30). Collegata al riscaldamento e al raffreddamento geotermico, disponibile in quasi tutto il Giappone, la struttura realizzabile rappresenta la fusione ideale di un nucleo strutturale leggero e di un vettore termico, l'acqua. Anche in questo caso le sollecitazioni termiche esterne sono neutralizzate dall'elevata massa termica dell'acqua e, nel caso in cui ciò non fosse sufficiente, si prevede di ricorrere all'ausilio dell'energia geotermica. La soluzione proposta da Kengo Kuma risulta ancor più innovativa se la si contestualizza nella realtà energetica del Giappone, dove tutti i centri urbani dell'arcipelago dipendono dai servizi centralizzati di Tokyo.

Conclusioni e sviluppi futuri - All'interno di una prassi progettuale che oggi si caratterizza sempre più per l'attenzione ai materiali naturali e che impiega soluzioni tecnologiche di tipo sostenibile, anche se non sempre passive, l'acqua può giocare un importante ruolo integrando nuove funzioni a quelle fino ad oggi svolte. Materiale naturale e riciclabile all'infinito, di facile reperibilità *in situ*,

dalle elevate *performance* termo-igrometriche, ottimo vettore energetico con un *operational energy* molto bassa e un *embodied energy* pari a zero, l'acqua può assumere, alla luce delle sperimentazioni architettoniche e delle ricerche di natura fisico-tecnica citate, il ruolo di nuovo paradigma rappresentativo e 'costruttivo' per l'architettura. Per fare ciò occorrerà approfondire alcune questioni su diverse tematiche: in relazione alle questioni ambientali, occorrerà definire un nuovo modello energetico, di tipo 'adattivo', che fondi il progetto sulle peculiarità fisiche e termo-dinamiche dell'acqua e, in ragione della sua elevata capacità di accumulo di energia, che sia in grado di garantire da un lato l'autosufficienza energetica alle necessità di riscaldamento e raffreddamento del singolo manufatto, dall'altro il trasferimento dell'energia in eccesso a funzioni ed edifici pubblici limitrofi e più energivori, attraverso un sistema di stoccaggio del calore e di reti.

In relazione alle questioni tecnologiche, invece, altre linee di ricerca possono sicuramente riguardare l'ideazione e lo sviluppo di nuovi materiali e di componenti edilizi: per i primi, l'ingegneria dei materiali e la biologia sintetica potranno favorire lo sviluppo di materiali più sostenibili, più resistenti, opachi, trasparenti e isolanti, e con una bassa *embodied energy*; per i componenti dell'*involucro d'acqua* bisognerà avviare la ricerca sui requisiti di 'multifunzionalità', riducendone al minimo il numero di elementi tecnici, di durabilità e di tenuta, messe a dura prova dalla presenza dell'acqua all'interno, valutando contestualmente le *performance* complessive del sistema in risposta alle sollecitazioni esterne, meccaniche e termiche. Inoltre, poiché i nuovi componenti multifunzionali caratterizzeranno le future architetture con la propria forma, dimensione e sezione, sarà necessario approfondire sistemi di fabbricazione, tra cui ad esempio quello del *digital manufacturing*, che consentano, in relazione alle singole esigenze dei progettisti, una personalizzazione dei componenti, una varietà linguistica e formale, adeguata al contesto dell'intervento.

In conclusione, per l'utilizzo dell'acqua come materiale da costruzione certamente la strada è ancora lunga ma, grazie alle sperimentazioni e alle ricerche citate, sembra che sia stata 'fluidamente' tracciata; ma resta ancora da capire quanto queste tecnologie, prodotti e materiali possano innovare,



Figg. 19, 20 - Aedas Architects e ARUP, Al-Bahar Towers, Abu Dhabi (2012); Jean Nouvel, Architecture-Studio, Pierre Soria e Gilbert Lezenes, Istituto per il mondo arabo, Parigi (1987).

e fino a che punto, il linguaggio architettonico.

ENGLISH

Among the materials that nature offers us, water has always been closely linked to man, driving his choices in settlement and production processes, his activities of changing the landscape and the environment. The water-man relationship, focused since its start on managing subsistence and regulation problems, through a continual remodelling of the water-land line. Water is essential for the different life forms, and has taken on various symbolic meanings, stimulating different artistic expressions, from literature to painting, from sculpture to architecture. The relationship between water and architecture has always been characterised by many forms, functions, systems, sometimes by failures and others by with successes. To stay close to our times, we should only mention the great masters of the last century who, in their operational research on housing units, used water with a symbolic value or as an instrument for a better integration with the landscape (Rowe et al., 1997; Weston, 2004; Williamson D.A., 2013).

For instance: Frank Lloyd Wright, breaking traditional patterns, geometry and volumes, integrates architecture with the landscape in Fallingwater (1935-37), fully assimilating water in the building (Fig. 1); in the Kaufmann House (1946), Richard Neutra used the pool to mediate the impact with the arid landscape (Fig. 2); Mies Van der Rohe realised the Farnsworth House (1951) on a mezzanine to solve the continual flooding problem (Fig. 3); Oscar Niemeyer with the Casa de Canoas (1953) in Rio de Janeiro, offered free curves and sinuous shapes through a perfect combination of glass, concrete, vegetation, rocks and water (Fig. 4). Even artists are attracted to the possibility of using water in their works, as: the recent macro installation of Olafur Eliasson, Waterfall (2008) in New York, an artificial waterfall located in the East River; and the Brooklyn Bridge, consisting of a steel scaffolding from which

the water comes down (Fig. 5); and Christo and Jeanne-Claude's Floating Piers (2016) macro installation made with polyethylene walkways at Lake Iseo near Brescia, which allowed visitors to walk just above the surface of water (Fig. 6). Those are some famous examples. But in the last twenty years, new operational research and experimentation have determined interests and development of which we will deal with in the paper, to conclude with some considerations on the role that water might have in the near future of architecture.

First experiments on integration between water and architecture - Already in the 1980s, the Archistar went down a new path leading to the dematerialisation of architecture, through the use of transparent glass volumes. The blurring architecture theorised by Toyo Ito, with the support of technology and an in-depth research of materials, generates architectures free from their own materiality and can be traced back to that fragility that usually characterises temporary installations (Figg. 7-9). According to Ito, the representation of a fluid space is achieved with the extreme reduction of its structure following of Mies Van Der Rohe motto: less is more. The researched fading of matter has new forms of expression through the use of the most natural and ancient material: water. Even though water attracted consideration and experiments for its environmental value, it still is hardly integrated to the architectural project and its role of building material is more ideal than real.

In this respect, the few attempts are attributable to a strand of physical-technical research which, thanks to innovative hydraulic and technological systems, creates scenes with a symbolic, narrative or scenographic value, while simultaneously addressing environmental and micro-climatic issues. Schiaffonati remarked how in recent years water has played «the role of representative paradigm of new forms and intervention modalities in the buildings» and that we count

on it to characterise the environmental, architectural and landscape project (Schiaffonati, Muscinelli, 2008), in its three states gaseous, liquid and solid (Ruban, 2014). The following three interventions are particularly significant.

The first project was defined by the designers as an architecture of the atmosphere, which shapes a low-definition space, is the Blur Building: a temporary pavilion built in 2002 on Lake Neuchatel in Switzerland designed by Diller Scofidio + Renfro on the occasion of the National Exhibition. The steel structure is surrounded by an artificial cloud made of sprayed water, taken directly from the lake, obtained through a complex hydraulic system of pumps, filters and nozzles run by an IT system and sensors. The sensors regulate the pressure according to atmospheric parameters, detected in real time, such as wind direction and speed, atmospheric pressure, humidity and air temperature (Fig. 10). The goal of the designers, fully achieved, was to generate a surreal experience, first visual at a distance, then sensory on the inside, making the user perception blurred and out of focus, from which the term blur. The technologies used are not strictly functional to the building, but create an interactive system in which the raincoats with sensors, once wet, colour and emit sounds (Gasperini, 2012).

The second project is the Digital Water Pavilion, created for Expo 2008 in Zaragoza and is the result of the collaboration between Carlo Ratti and MIT. It offers us a new reading of the curtain wall, this time fluid and dynamic, creates flexible spaces and with light modulators, is able to interact with its users and the microclimate. In an area of 400 m², the two small boxes (Info Point and Café) are juxtaposed, incorporated in a single mobile roofing, a thin slab filled with water, with voids of different sizes, two of which coincide with the service boxes (Fig. 11). Twelve hydraulic pistons shift the horizontal surface, removing the internal space when the level of the roofing corresponds with that of the ground. The pavilion takes



Fig. 21, 22 - Matyas Gutai, prototipo della Water-House realizzato nel 2014 a Kecskemet, Ungheria (©AFP).

to the extremes the relationship between space and structure, full and empty, inside and outside; vertical partitions dissolve in diaphragms of water, thanks to digitally controlled high-frequency jets, always allowing different spatial configurations. This pavilion was a contemporary version of the futurist architecture, characterised by its communication ability: the digital control of the water jets and the intrados of the roofing permit to create drawings, textures and write in the water curtains, real timed voids that keep changing the work. A similar experience is offered by the Hydrocolis Environmental Education Centre in Breslavia, project designed in 2005 by ART FM Architecture Studio 5 (Fig. 12); also in this case the use of water is relegated to a simple digital water curtain, juxtaposed with a casing covered with perforated copper sheets illuminated with multicoloured LED (Mattei, 2012).

Finally, the third intervention: unlike the previous examples, in which water is used in gas and liquid states as a media tool and scenographic expedient, in the ICE Hotel solid water is a structural material, although ephemeral, and never

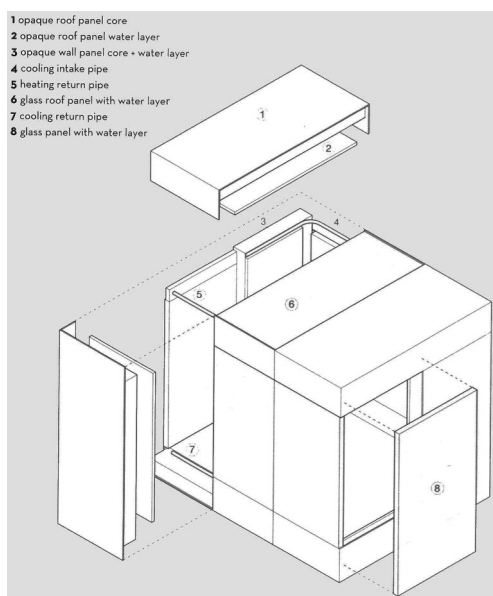


Fig. 23 - Water-House: i componenti e l'impianto di circolazione dell'acqua (Gutai, 2015).

bound to the weather or the place. Every year, mainly in the Arctic Circle, hotels are created thanks to huge steel entrings, which are removed every two days as soon as the snow vaults become self-supporting, and the central ice columns turns into the only support for the roofing (Fig. 13).

The Water Drum Wall - Is a particular system, experimented from the 1940s to the early twenty-first century based on some principles. An important part of total primary energy consumed by buildings is used for heating, cooling and ventilation, which have a considerable impact on management costs, energy demand and carbon dioxide emissions. Its high thermal mass allows water to be used in passive solar systems, mainly in climates with a significant thermal excursion between day and night. The Drum Wall is an alternative to stone, brick or concrete partitions, according to the operating system of any Drum Wall, or it can be a roof with the roof radiation trap, widely theorised and experimented by Baruch Givoni in the 1970s (Haggard et al., 2000).

The Water Drum Wall works in a rather elementary way: the rays of the sun crossing the glass surface are intercepted by a mass of water or other liquid that converts them into heat, distributed by convection or radiation from its ventilated cavity to the served room, through the wall's internal face. The relationship between the heat exchange surface with the indoor environment and the storage mass also determinates the extent of the thermal transfer and its delay. Convective heat transfer through a liquid mass is faster than by conduction within a wall. Therefore, unlike what happens in the Drum Wall, the heat transfer to the indoor environment by radiation and convection from the inner face of the wall is almost instant (Simmons, 2011). Therefore, in order to control convective motions, controls delaying heat transfer should be installed: on the inside of the water wall it is necessary an insulating screen with openings at its top and base, while on the opposite side a mobile insulating screen that prevents overheating or, if necessary, outward heat loss (Emmitt, 2012).

Far from being a new technology, the water drum wall was first tested in the late 1940s by Hoyt Hottel and the students of the Massachusetts Institute of Technology in Boston. Despite its good performance and low cost, the building sector has turned to more expensive and often less performing passive solar systems. In the 1970s some designers had renewed interest in this technology: Steve Baer in his home in Corrales, New Mexico, used 208 litres of water in drums to provide thermal mass with an innovative passive solar design (Fig. 14). The same system was used, but with the variant of the underground water wall, by John Hammond on his farm, in a new office building in Winters and by Marshall Hunt and Virginia Thigpen in Davis, both in California. Both passive systems are still fully functional after more than 30 years. Also a couple of enlightened builders, Mike and Judy Corbett, invested in new technology and built 220 residential units with large water walls inside the Village Homes in Davis, designed by John H. H. (Bainbridge, 2007; Corbett J. and M., 2000).

Starting from these pioneering initiatives, over the years, many have provided an important contribution to research and experimentation of the water walls (Bainbridge, 1981, 2005), includ-



ing: Tom Neubauer an agricultural engineer who dealt with the seismic safety aspects; Denny Long designed and built for the Passive Solar Development different types of steel tanks; Wayne and Susan Nicols, after studying cement tanks, contributed to the development of the Heat Wall™ system that employs vinyl containers with an aluminium and stainless steel frame; Tim Maloney, of One Design, has tested modular systems with plastic containers and metal sheets; Solar Applications and Research Group of Vancouver, California, and the Water Wall Engineering Group, in Ohio, have worked on thin steel pipes with plastic coatings; a group of engineers from Kalwall Corporation (now Solar Components), together with other technicians of the Ames Laboratory, patented special cylinders and translucent fibreglass panels (Fig. 15).

Recent research on the Water Walls - In the last fifteen years, within an architectural practice increasingly aiming to environmental sustainability and energetic self-sufficiency water was rediscovered for its ability to heat and cool the microclimate of enclosed spaces (Saadatian et al., 2012). The research and experiments initiated by many professionals that deserve to be mentioned and read: on the optimisation of computer models to evaluate the qualities of water as an energy accumulator (Gupta, Tiwari, 2002) and on the development of calculation methods to evaluate its energy performance in relation to ISO 13790: 2008

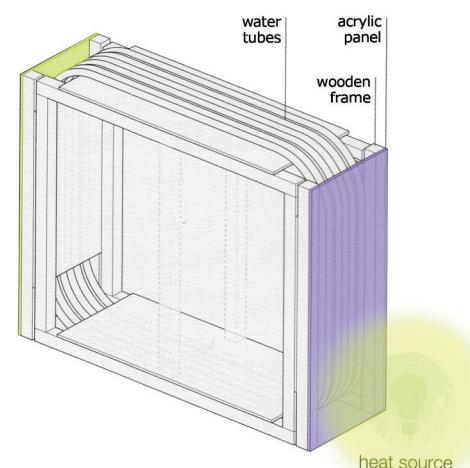


Fig. 24 - Water-House: pannello di chiusura trasparente con acqua all'interno del vetrocamera.

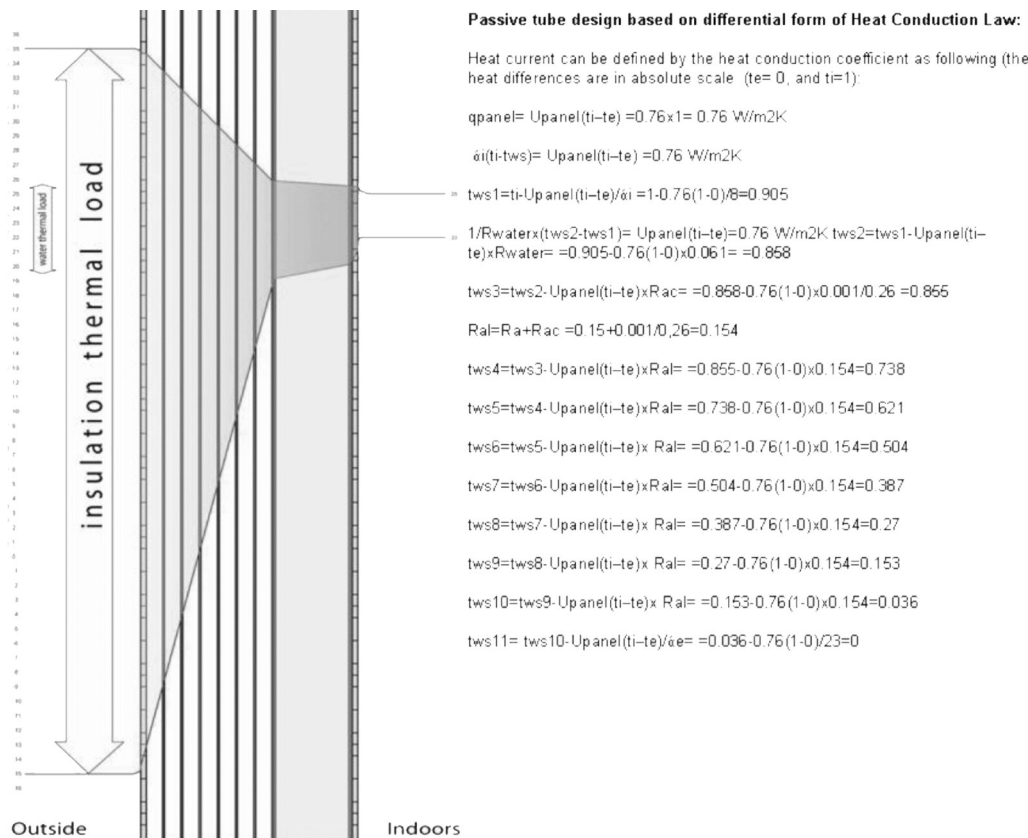


Fig. 23 - Water-House: diagramma di variazione della temperatura interna in regime estivo e invernale (Gutai, 2013).

(E) (Brig-Sáa et al., 2014); on experimentation, aiming to optimise the water wall thickness to allow the indoor environment, in winter to increase the temperature at a higher speed, to reach higher overall temperatures and to maintain high temperatures for more time (Adams et al., 2010); on the overall energetic performances of the buildings that use water walls, with improvements between 25 and 88%, in summer and winter (Moustafa, Aripin, 2014; Wang et al., 2012; Yang et al., 2011); on innovative materials such as porous ceramics (Melero et al., 2011), that can absorb significant quantities of water sprayed by nozzles, appropriately placed at the opening intrados, and release it as a steam to cool the indoor space (Fig. 16); in the study of shading typologies, such as Venetian blinds in different colours, and of natural and forced ventilation controls (Zhongting et al., 2015).

Finally: on the conceptual development of dynamic facades with seasonal dimorphism, called Transparent Water Storage Envelope (TWSE), for better thermal stability in summer and more effective thermal insulation in winter; with technical details useful to facilitate the necessary maintenance of the casing (Liu, Shen, 2007, 2008). We should mention the review by a group of Chinese researchers on the Drum Wall in buildings, which emphasises fundamental design parameters such as: the parameter Drum Wall (performance of windows, surface and shading devices, depth of the space between walls, thickness and stratification of the internal partition, natural or forced ventilation systems); the parameter building (thermal inertia and total insulation level of the building, presence of other glass panels); finally, the position parameter (solar radiation, orientation, speed and wind direction). All indicators are summarised in terms of energy, environmen-

tal sustainability and cost (Zhongting et al., 2017).

A new conceptual model- The experiments described above on the integration of water in architecture, as well as the physical-technical research, could make us think that in the near future we will be able to use water as building material. Build with water, will represent a new frontier for sustainable architecture, provided that it is based on a new energy model, able to enhance the thermal mass and energy medium of the natural green fluid characteristics. The new architecture must be conceived as a living organism independent from the energy distribution networks, as a trans-structure, energetically self-sufficient, made of multitasking materials, capable of real-time responses for preserving the indoor comfort.

The two approaches of the sustainable architectural practice, Passivhaus (Fig. 17) and Active House (Fig. 18), do not deal with the critical subject of embodied energy: the total amount of primary energy consumed in the life cycle of the material, which includes the energy needed for the extraction, processing and transport of raw materials, periodic energy for maintenance and final energy for disposal (Cabeza et al., 2013; Hammond, Jones, 2008). Also, the energetic and environmental sustainability assessment methods for buildings (LEED, BREAM, CASACLIMA, ITACA, DGNB, HQE, CASBEE, etc.), although valid and effective design guides, neglect the embedded energy, not allowing an objective comparison between different projects. No difference is highlighted, for example, between a building made with traditional technologies and with laser-cut curtain wall profiles with immense energy demand. In order to make an objective comparison could be useful tracing all the variables of the project (availability

and sustainability of raw materials, processing and transportation of building materials and components, heating and cooling, ventilation, consumption, disposal, recycling, etc.), connected and interconnected to a single unit of measurement: the energy related to the unit of square footage, expressed in MJ/m².

The versatility of the system is another important requirement to reach the objective. A Trans-structure can be defined as a structure that, subject to an external action such as a force field or an environmental stimulus, can change its composition, shape or function to respond to stress, maintaining its structural and/or energetic stability and reversibly adapting to changes (Schnädelbach, 2010). In case of a building, several factors have to be considered, changes may occur rapidly and be concentrated in some cases; while they can be slower and affect the whole building in others. Either way, trans-structure can work effectively if the system generates rapid responses even for small changes in the environment. Because, when it comes to thermal comfort even change of 2-3 degree Celsius can make a difference. In addition to speed in reaction, we need to predetermine what measures to implement. For example, an increase of indoor temperature can be counteracted with cooling, or more thermal mass and complex mechanised dimming systems (Fig. 19, 20). The smart materials, result of the electronic and computer revolution, are the most recent expression of this artificial intelligence. Although in some respects, they are similar to biological systems and natural organisms and favour a good energy efficiency and a better thermal comfort, most smart materials are characterised by a very high embodied energy (Casini, 2016).

Generally speaking, the buildings both traditional and more recent are based on the principles of bio-architecture and are mainly made with mono functional building elements: for each new task and/or demand (function) a new element is added to respond. On the contrary, fulfilling the requirements of sustainability and energy efficiency only brought additional components in the modern buildings, exponentially increasing its embodied energy. A Trans-structure uses a few multifunctional materials capable of generating rapid responses, affecting the whole building. For example, a water wall is not only a boundary or support but, when necessary, also a heat collector, a heater or cooler. In this respect, conventional elements used in the design like orientation and solid-transparent proportion of facades become obsolete, we could be free to use north and south glass casing, equal in the sense of energy and thermal comfort.

Water as a building material- The research and experiments of Matyas Gutai goes in this sense of progress, they were carried on respectively at the Department of Architecture at the University of Tokyo and the Thermal Physics Laboratory of the University of Technology in Budapest. The results are shown by the Allwater panel patent and the realisation of the Water House prototype (Gutai, 2013; Fig. 21-24). The developed model provides a casing made of a multifunctional component, which acts as a partition but also as a structural element, thermoregulation, insulator, medium for energy distribution, thanks to the thermal mass

supplied by water. The panels were made with Structure Insulated Panels (SIP) and from glass with a cavity containing water, which provides structural mass and weight. The insulation of the structure, necessary because of the strict legislation in Europe, was sufficient enough to protect the water layer from freezing or in case of heating system failure. Experimental data shows striking results, since, during the calendar year, with outdoor temperatures between -15 and $+35$ °C, the internal surface of the partition maintains a temperature between $+20$ and $+26$ °C, eliminating the external energy demand for thermal comfort (Gutai, 2015; Fig. 25). When the optimal indoors temperature is reached thanks to convection, the energy surplus, stored when necessary, is transferred (through a two-dimensional water flow, hot or cold, which flows inside the partition panels, floors and ceilings) in an external tank in the ground (Fig. 26, 27). The only energy demand for the thermoregulation of indoor spaces is the energy required to move water around in the circuit.

Similar is the Water-branch House by Kengo Kuma, a Japanese architect and designer, who in his research has often investigated minimal architectures, based on the use of simple and easy to set up structures that would allow to quickly build an effective shelter in case of emergency (Fig. 28). The Water-branch House, partially exhibited at the MOMA, New York, in 2008 for the exhibition Home Delivery Fabricating the Modern Dwelling, uses light plastic blocks filled with a fluid for the heating/cooling of the indoor space. The component is like a brick made by the union of five cubes of 100×100 mm, and can be assembled by interlocking: thanks to the particular geometry of the modular element it is possible to arrange it to create floors, partitions and roofing (Fig. 29, 30).

Connected to geothermal heating and cooling, available almost any location in Japan, the hypothetical structure is an ideal fusion of lightweight structural core and thermic medium: water. Also in this case, thermic external effects were counteracted by the considerable water thermal mass, and in case that proved to be insufficient, geothermal energy would be used. The solution proposed by Kengo Kuma is even more innovative if contextualised in the energetic reality of Japan, where all the cities of the archipelago depend on Tokyo's centralised services.

Conclusions and future developments-Within a current design practice increasingly characterised by the attention to natural materials and that employs sustainable technological solutions, even though not always passive, water can play an important role in integrating new functions to the ones currently undertaken. Natural and endlessly recyclable material, easy to find on site, with high thermo-hygrometric performances, excellent energy medium with very low operational energy and zero embodied energy. Water can take on the role of a new representative and constructive paradigm for architecture, on the basis of the above-mentioned architectural experiments and of physical-technical research. To do so, it will be necessary to examine in depth a number of issues on various subjects.

About environmental issues, it will be necessary to define a new adaptive energy model, based on the physical and thermodynamic characteristics of water and, due to its high energy storage capacity, able to guarantee, on the one hand, the energy self-sufficiency to the heating and cooling needs of a building, on the other the transfer of surplus energy to neighbouring public buildings

with immense energy demand, through a system of heat storage and networks. About technological issues, the creation and development of new materials and building components might concern other lines of research. Material engineering and synthetic biology might support the development of more sustainable, resistant, solid, transparent and insulating materials, with a low embodied energy. For the components of the water casing, research on multifunctionality requirements should be done, to minimise the number of technical elements, durability and endurance, strained by the presence of water inside. All of this, done while evaluating the overall performance of the system in response to external, mechanical and thermal stresses. Moreover, since the new multifunctional components will characterise future architectures with their own shape, size and section, it will be necessary to deepen manufacturing systems -among them there is digital manufacturing- allowing, according to the individual needs of designers, a personalisation of the components, a linguistic and formal variety, suited to the intervention background.

In conclusion, for using water as construction material there is still a long way to go but, thanks to the experiments and research above mentioned, it seems that it has been fluidly traced. But we still must understand if these technologies, products and materials can innovate the architectural score, and to what extent.

REFERENCES

- Adams, S., Becker, M., Krauss, D., Gilman, C.M. (2010), "Not a dry subject: optimizing water Trombe wall", in *Proceedings of Solar 2010 Conference*, ASSES. Bainbridge, D.A., (1981, 2005), *A waterwall solar de-*

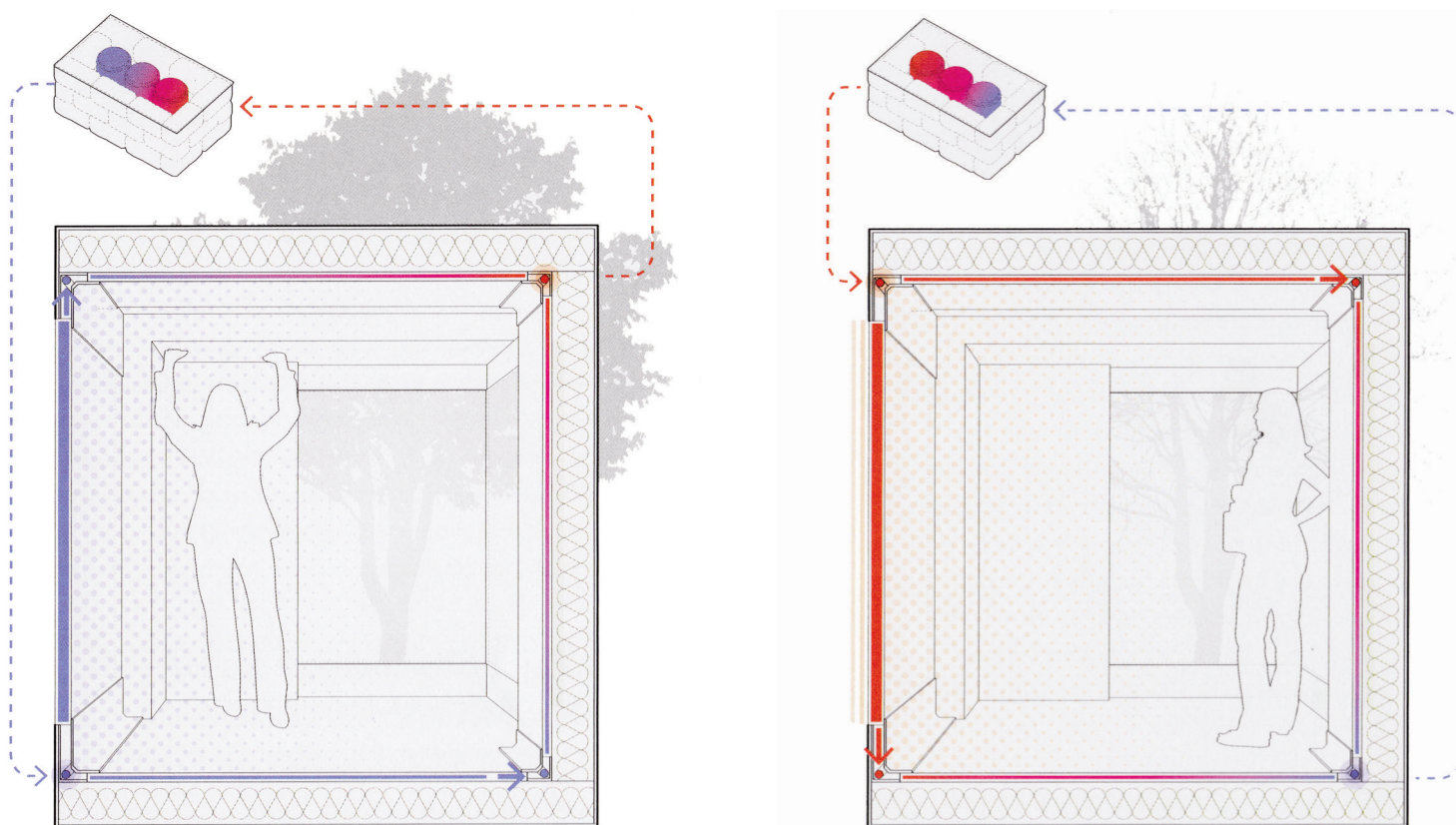
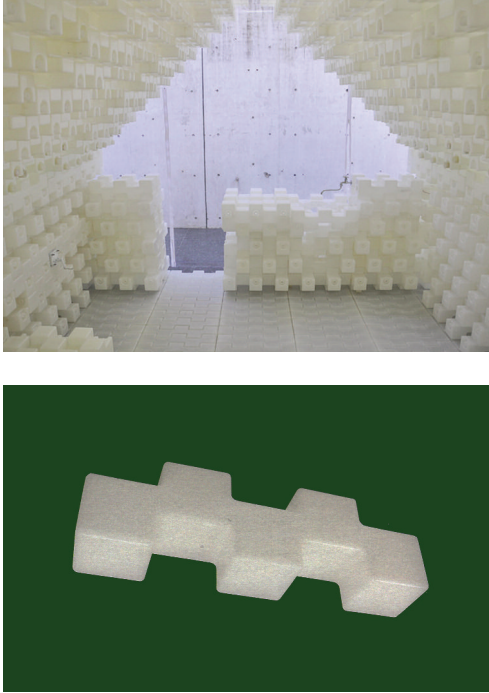
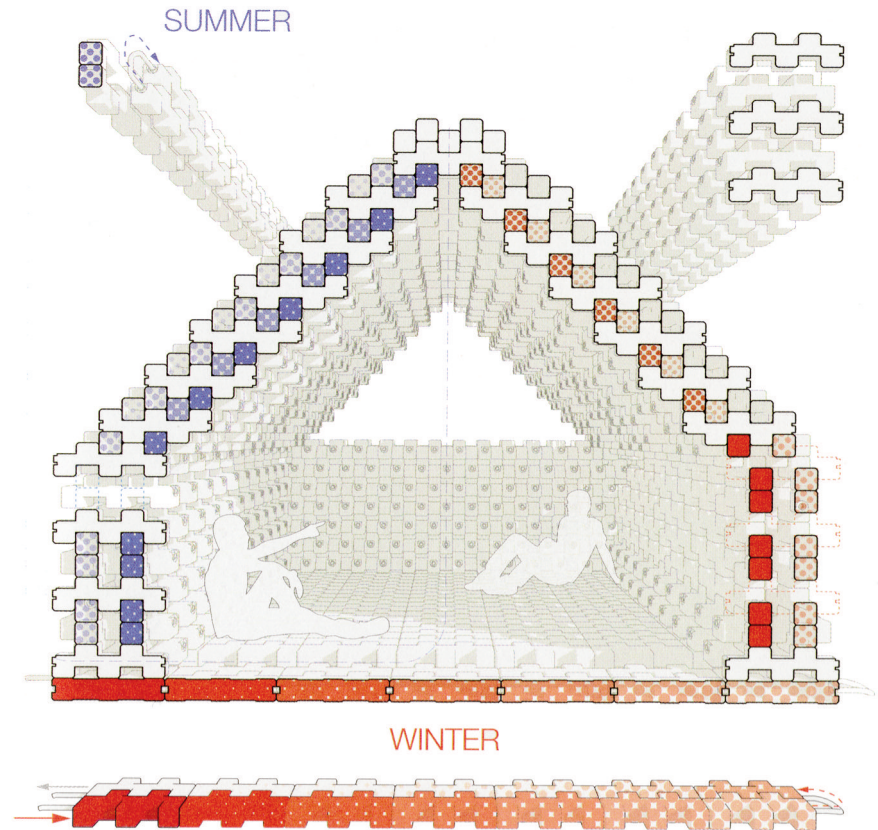


Fig. 26, 27 - Water-House: funzionamento del circuito idrico bidirezionale per il raffrescamento o il riscaldamento dell'interno, rispettivamente in regime estivo e invernale (Gutai, 2015).



Figg. 28-30 - La Water-branch House di Kengo Kuma: unità abitativa in esposizione al MOMA (2008); componente modulare; sezione e diagramma energetico in regime estivo e invernale (Gutai, 2015).



sign manual: For environmentally responsive buildings that increase comfort, save money, and protect the environment. [Online] Available from: <http://www.solaripedia.com/files/472.pdf>. [Accessed 6 September 2017].

Bainbridge, D.A., Haggard, K., Cooper P. (2007), "Return of Water Wall", in *Solar Today*, July-August 2007, pp. 38-41.

Briga-Sáa, A., Martinsc, A., Boaventura-Cunhad, J., Lanzinhaa, J.C., Paiva, A. (2014), "Energy performance of Trombe walls: Adaptation of ISO 13790:2008 (E) to the Portuguese reality", in *Energy and Buildings*, vol. 74, pp. 111-119. [Online] Available from: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.01.040>. [Accessed 11/9/2017].

Cabeza, L.F., Barreneche, C., Miró, L., Morera, J.M., Bartoli, E., Fernández, A.I. (2013), "Low carbon and low embodied energy materials in buildings: A review", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 23, pp. 536-542.

Casini, M. (2016), *Smart Buildings. Advanced materials and nanotechnology to improve energy-efficiency and environmental performance*, Woodhead Publishing-Elsevier.

Corbett, J., Corbett, M. (2000), *Designing Sustainable Communities: Learning from Village Homes*, 2nd Edition, Island Press, Washington DC.

Emmitt, S. (2012), *Architectural Technology*, 2nd Edition, John Wiley and Sons, UK.

Gasparini, K. (2012), *Schemi urbani. Tecnologia e innovazione. Nuovi sistemi per le facciate mediatrice*, Wolters Kluwer Italia, Milano.

Gupta, A., Tiwari, G.N. (2002), "Computer model and its validation for prediction of storage effect of water mass in a greenhouse: a transient analysis", in *Energy Conversion and Management*, vol. 43, issue 18, pp. 2625-2640.

Gutai, M. (2013), *Liquid Engineering Towards New Sustainable Model for Architecture and City*, lecture at "International Conference on Planning and Environment", Peking University.

Gutai, M. (2015), *Trans-Structures: fluid architecture and liquid engineering. Response-able innovative structures*, Actar Publishers, New York.

Haggard, K., Cooper, P., Rennick, J., Niles, P. (2000), "Natural Conditioning of Buildings", in Elizabeth L., Adams, C. (eds.), *Alternative Construction: Contemporary Natural Building Materials*, John Wiley and Sons, UK, pp. 37-69.

Hammond, G.P., Jones, C.I. (2008), "Embodied energy and carbon in construction materials", in *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Energy*, vol. 161 (2), pp. 87-98.

Hordeski, M.F. (2011), *New technologies for energy efficiency*, The Fairmont Press, New York.

Liu, X., Shen, T., (2007), "Conceptual development of transparent water storage envelopes", in *Architectural Science Review*, vol. 50, issue 1, pp. 18-25.

Liu, X., Shen, T., (2008), "The development of transparent water storage envelopes (TWSE) through theoretical thermal and optical analyses", in *Architectural Science Review*, vol. 51, issue 2, pp. 109-123.

Mattei, M.G. (ed.) (2012), *Carlo Ratti. Smart city, smart citizen*, Egea Edizioni, Milano.

Melero, S., Morgado, I., Neila, J., et al. (2011), "Passive evaporative cooling by porous ceramic elements integrated in a Trombe wall", in Bodart, M., Evrard, A. (eds.), *PLEA 2011: Architecture & Sustainable Development*, Presses Université de Louvain.

Moustafa, M.A., Aripin, S. (2014), "CFD evaluation of the pottery water wall in a hot arid climate of Luxor, Egypt", in *Journal of Green Building*, vol. 9, issue 4, pp. 175-189.

Rowe, C. (1997), "At the Sink: Architecture in Abjection", in Lahiji, N., Friedman, S.D. (eds.), *Plumbing: sounding modern architecture*, Princeton Architectural Press.

Ruban L. (2014), "Three states of water: how technology makes water a construction material", in *Technical Transactions Architecture*, Issue 15 (8-A), pp. 27-37.

Saadatian, O., Sopian, K., Lim, C.H., Asim, N., Sulaiman, M.Y. (2012), "Trombe walls: A review of opportunities and challenges in research and development", in *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 16, issue 8, pp. 6340-6351.

Schiaffonati, F., Mussinelli, E. (2008), *Il tema dell'acqua nella progettazione ambientale*, Maggioli, Santarcangelo di Romagna (RM).

Schnädelbach, H. (2010), *Adaptive Architecture: Conceptual Framework*. [Online] Available from: www.researchgate.net/publication/235218510_Adaptive_Architecture_Conceptual_Framework. [Accessed 12 September 2017].

Simmons, H.L. (2011), *Olin's construction: principles, materials, and methods*, John Wiley & Sons, UK.

Thumann, A., Mehta D.P. (2008), *Handbook of Energy*

Engineering, Fairmont Press, Florida.

Wang, W., Tian, Z., Niu, X., Xu, X. (2012), "Investigation on a passive solar house equipped with water thermal storage wall", in *Applied Mechanics and Materials*, n. 178, pp. 193-196.

Weston, R. (2004), *Plans, Sections and Elevations: Key Buildings of the Twentieth Century*, Laurence King Publishing, London.

Williamson, D.A. (2013), "Water and the Architect: Architecture as Decentralized Water Management", in *Theses from the Architecture Program*, Paper 164. [Online] Available from: www.digitalcommons.unl.edu/archthesis/164. [Accessed 6 July 2017].

Yang, Q., Zhu, L.H., He, J.J., et al. (2011), "Integrating passive cooling and solar techniques into the existing building in South China", in *Advanced Materials Research*, vol. 37, pp. 368-373.

Zhongting, H., Bingqing, L., Wei, H. (2015), "An experimental investigation of a novel trombe wall with venetian blind structure", in *Energy Procedia*, vol. 70, pp. 691-698.

Zhongting, H., Wei, H., Jie, J., Shengyao, Z. (2017), "A review on the application of Trombe wall system in buildings", in *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 70, pp. 976-987.

* CESARE SPOSITO, PhD, è Professore Associato presso il DARCH, Dipartimento di Architettura, Scuola Politecnica, dell'Università degli Studi di Palermo, docente del Laboratorio di Costruzione dell'Architettura. I suoi principali campi di ricerca sono: i sistemi di protezione per i siti archeologici, il recupero delle aree industriali dismesse, il social housing, i materiali innovativi per l'architettura, le nanotecnologie e il risparmio energetico degli edifici. Cell. +39 328/00.89.765. E-mail: cesare.sposito@unipa.it.